



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ELÉCTRICA – INSTRUMENTACIÓN

SENSOR ÓPTICO DE FLUJO DE CALOR EMPLEANDO UNA CELDA HERRIOTT

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ING. ROBERTO GIOVANNI RAMÍREZ CHAVARRÍA

TUTORA PRINCIPAL:
DRA. CELIA ANGELINA SÁNCHEZ PÉREZ
CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO (CCADET)

MÉXICO, D. F. JULIO 2015

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. JESÚS GARDUÑO MEJÍA
Secretario: DR. GABRIEL EDUARDO SANDOVAL ROMERO
Vocal: DRA. CELIA ANGELINA SÁNCHEZ PÉREZ
1^{er.} Suplente: DR. SALVADOR CARLOS CUEVAS CARDONA
2^{do.} Suplente: DR. MATHIEU CHRISTIAN ANNE HAUTEFEUILLE

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO (CCADET) – Grupo de Sensores Ópticos y Eléctricos

TUTORA DE TESIS:

DRA. CELIA ANGELINA SÁNCHEZ PÉREZ



FIRMA

A Dios.

A mi abuela Isabel (In memoriam).

A mis padres, María Eugenia y Roberto, por su eterno amor y apoyo.

A mi hermano Hugo, por siempre mi mejor amigo y cómplice.

A quién me ha enseñado que los tiempos de dios son perfectos, Pily, sólo faltan 47... o menos!

AGRADECIMIENTOS

A mi alma mater, la Universidad Nacional Autónoma de México por darme la posibilidad de realizar mis estudios de maestría.

A la Dra. Celia Sánchez por su infinita paciencia, sus enseñanzas y especialmente la confianza depositada en mí para formar parte de su grupo de trabajo.

Al Grupo de Sensores Ópticos y Eléctricos del CCADET, especialmente a la Dra. Celia Sánchez y al Dr. Eduardo Sandoval por ser un gran ejemplo en mi vida académica y profesional.

A la Facultad de Ingeniería, a través de los departamentos de Ingeniería de Control y Robótica y de Ingeniería en Computación.

Al Laboratorio de Control de Emisiones de la FI, encabezado por el Dr. Rogelio González Oropeza, por el apoyo y la confianza siempre depositados en mí.

Al Dr. Víctor Argueta Díaz por su invaluable participación en el desarrollo de este trabajo y responsable del maquinado de las celdas Herriott.

Al M.C. Alejandro Esparza García y al Tec. Martín Briseño García por su apoyo en el proceso de deposición de aluminio en las celdas.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado durante 24 meses para los estudios de maestría (CVU: 555791).

A la DGAPA- UNAM - PAPIIT por el apoyo brindado a través del proyecto (IT100515), “Sistema óptico para la caracterización de propiedades térmicas de tejido hepático con alteraciones por enfermedades crónico-degenerativas”.

A los sinodales por su tiempo y dedicación para revisar este trabajo y así enriquecerlo con sus valiosos comentarios.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	x
PREFACIO	xi
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	
1.1. Caracterización de propiedades térmicas en materiales	13
1.2. Sensores de flujo de calor	13
1.3. Dispositivos ópticos que emplean múltiples reflexiones de un haz	15
1.3.1. Celdas ópticas de largo camino	18
1.4. Hipótesis	23
Referencias del capítulo	24
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	
2.1. Transferencia de calor	25
2.2. Flujo de calor	27
2.3. Deflexión foto-térmica	30
2.4. Configuraciones de la celda Herriott	31
2.4.1. Espejos esféricos	31
2.4.2. Espejos astigmáticos	33
2.4.3. Espejos cilíndricos	34
2.5. Principio de operación del sensor de flujo de calor	36
Referencias del capítulo	39
CAPÍTULO 3. MODELADO Y DISEÑO DE LA CELDA HERRIOTT	
3.1. Modelado	40
3.2. Parámetros de diseño	43
3.2.1. Ángulo entre reflexiones	43
3.2.2. Número de órbitas M	45
3.2.3. Número de pasos N	45
3.2.4. Condiciones de estabilidad y operación	46
3.2.5. Patrones de incidencias	48
3.3. Simulación de la celda	49
3.3.1. Curvas de diseño	51
3.4. Diseño de una celda Herriott integrada en acrílico	56
3.4.1. Diseño 1: Celda con espejos ortogonalmente alineados	56
3.4.2. Diseño 2: Celda con espejos con espejos rotados δ	59
3.4.3. Diseño 3: Celda con espejos sin rotar $\delta = 0$	61
Referencias del capítulo	63

CAPÍTULO 4. FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA CELDA HERRIOTT

4.1.	Proceso de fabricación	64
4.1.1.	Maquinado de la celda	64
4.1.2.	Integración de los espejos	66
4.2.	Caracterización de la celda	67
4.2.1.	Pérdidas por propagación	67
4.2.2.	Pérdidas por reflexión	69
4.2.3.	Pérdidas totales	70
4.3.	Comprobación experimental de la celda diseñada	71
	Referencias del capítulo	73

CAPÍTULO 5. INTEGRACIÓN DEL SENSOR DE FLUJO DE CALOR

5.1.	Posicionamiento mecánico	74
5.2.	Fuente de calor	75
5.3.	Detección fotométrica de la señal	76
5.4.	Procedimiento de medición de flujo de calor	78
	Referencias del capítulo	82

CAPÍTULO 6. RESULTADOS EXPERIMENTALES

6.1.	Caracterización del sensor	83
6.1.1.	Repetitividad y reproducibilidad	83
6.1.2.	Sensibilidad	85
6.1.3.	Resolución y rango de medición	87
6.2.	Medición de flujo de calor en materiales de conductividad térmica conocida	89
6.3.	Múltiples trayectorias vs trayectoria lineal	91

	CONCLUSIONES GENERALES	95
--	------------------------------	----

ANEXOS

Anexo A.	Efecto navaja	97
Anexo B.	Automatización del sistema de medición	100
Anexo C.	Programa de MATLAB para el cálculo del método matricial de trazo de rayos	105
Anexo D.	Programa de MATLAB para obtener las curvas de diseño de la celda Herriott ...	107
Anexo E.	Publicación desprendida del trabajo de investigación	113

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Figura 1.1. Sensor de flujo de calor implementado en fibra óptica	15
Figura 1.2. Deflexión de un haz en un cristal electro-óptico	16
Figura 1.3. Múltiples reflexiones de un haz en un cristal electro-óptico	17
Figura 1.4. Cantiléver de dos espejos con múltiples reflexiones	17
Figura 1.5. Celda contenedora de gas con arreglo de espejos para crear múltiples reflexiones	18
Figura 1.6. Diagrama de una celda óptica White	19
Figura 1.7. Patrón de incidencias de típico de una celda White	20
Figura 1.8. Diagrama general de una celda óptica Herriott de espejos esféricos	21
Figura 1.9. Celda White en espacio libre	22
Figura 1.10. Celda Herriott en aplicaciones de sensado de gases	22

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

Figura 2.1. Conducción de calor entre dos medios	26
Figura 2.2. Conducción de calor a través de una pared plana	27
Figura 2.3. Derivada de la temperatura respecto a la dirección de propagación de calor	28
Figura 2.4. Desviación de la trayectoria de un haz debido a la presencia de un gradiente térmico	30
Figura 2.5. Patrón de incidencias elíptico de una celda Herriott de espejos esféricos	32
Figura 2.6. Patrón de incidencias de una celda Herriott de espejos astigmáticos	33
Figura 2.7. Diagrama de una celda Herriott de espejos astigmáticos	34
Figura 2.8. Diagrama de una celda Herriott de espejos cilíndricos	35
Figura 2.9. Patrones de incidencias formados en una celda Herriott de espejos cilíndricos	36
Figura 2.10. Propuesta de una celda Herriott integrada en un bloque de acrílico para el sensado de flujo de calor	37
Figura 2.11. Diagrama del principio de operación del sensor de flujo de calor	38

CAPÍTULO 3. MODELADO Y DISEÑO DE LA CELDA HERRIOTT

Figura 3.1. Esquema de la celda Herriott con espejos cilíndricos	40
Figura 3.2. Patrones formados por las incidencias con $N=8$ para a) $\delta = 90^\circ$ y b) $\delta = 44^\circ$...	48
Figura 3.3. Patrones formados por las incidencias con $N=144$ para a) $\delta = 90^\circ$ y b) $\delta = 44^\circ$	49
Figura 3.4. Patrón de incidencias en el espejo frontal para una celda con $N=138$, $d=110.3$ [mm], $f_1=f_2=106.9$ [mm], $\delta=44.12^\circ$ y $\phi=-9.29^\circ$	50
Figura 3.5. Patrón de incidencias en el espejo frontal para una celda con $N=174$, $d/f=1.13$ y $\delta=98.3^\circ$	50

Figura 3.6. Curvas para el ángulo entre reflexiones en función de d para diferentes valores de R	52
Figura 3.7. Curvas para el número de recirculaciones en función de θ_R . (a) Para $R = 1[\text{cm}]$, (b) para $R = 2[\text{cm}]$, (c) para $R = 3[\text{cm}]$, (d) para $R = 4[\text{cm}]$ y (e) para $R = 5[\text{cm}]$	53
Figura 3.8. Curvas para el número de recirculaciones en función de d para diferentes valores de R	54
Figura 3.9. Curvas para la distancia total recorrida en función de d para diferentes valores de R	55
Figura 3.10. Celda Herriott integrada con espejos ortogonalmente alineados	56
Figura 3.11. Patrón de incidencias para una celda Herriott con espejos ortogonalmente alineados con $\delta=90^\circ$ y $\phi =1^\circ$ (Diseño 1)	58
Figura 3.12. Celda Herriott integrada con curvatura del espejo M1 en el eje y y M2 en el eje x	58
Figura 3.13. Patrón de incidencias para una celda Herriott con espejos ortogonalmente alineados con $\delta=90^\circ$ y $\phi =1^\circ$ (Diseño 1)	59
Figura 3.14. Celda Herriott integrada con rotación δ en los espejos	59
Figura 3.15. Patrón de incidencias para una celda Herriott con espejos rotados $\delta=45^\circ$ y $\phi =1^\circ$ (Diseño 2)	61
Figura 3.16. Celda Herriott integrada sin rotación en los espejos $\delta=0^\circ$	62
Figura 3.17. Patrón de incidencias para una celda Herriott sin rotación en los espejos ..	63

CAPÍTULO 4. FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA CELDA HERRIOTT

Figura 4.1. Celdas Herriott fabricadas en un bloque de acrílico	66
Figura 4.2. Comparativa entre depósitos de aluminio de buena y mala calidad	67
Figura 4.3. Recta de ajuste para los datos experimentales en la medición del coeficiente de atenuación del acrílico	68
Figura 4.4. Patrón de incidencias en el espejo M1 de la celda Herriott	71
Figura 4.5. Patrón de incidencias en el espejo M2 de la celda Herriott	72

CAPÍTULO 5. INTEGRACIÓN DEL SENSOR DE FLUJO DE CALOR

Figura 5.1. Sistema mecánico de posicionamiento para la fuente de luz láser y la celda Herriott	74
Figura 5.2. Diagrama esquemático de la fuente de calor acoplada a la celda Herriott	75
Figura 5.3. Relación del ángulo de deflexión con un desplazamiento lineal	77
Figura 5.4. Esquema de detección foto-métrica de la señal de salida del sensor	77
Figura 5.5. Esquema completo del sensor de flujo de calor empleando una celda Herriott	79
Figura 5.6. Señal temporal de calentamiento inducida por el resistor de potencia	80
Figura 5.7. Señal de respuesta del sensor normalizada	80
Figura 5.8. Montaje experimental del sensor de flujo de calor	81

CAPÍTULO 6. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Figura 6.1. Respuesta del sensor de flujo de calor ante un valor de $Q = 40.5$ [W/cm ²] para determinar la repetibilidad del sistema	84
Figura 6.2. Respuesta del sensor de flujo de calor ante un valor de $Q = 162$ [W/cm ²] para determinar la reproducibilidad del sistema	85
Figura 6.3. Respuesta del sensor de flujo de calor a diferentes valores de Q	86
Figura 6.4. Recta de calibración de la respuesta del sensor de flujo de calor	87
Figura 6.5. Respuesta del sensor a diferentes valores de Q para determinar resolución ...	88
Figura 6.6. Rango de medición del sensor óptico de flujo de calor	89
Figura 6.7. Respuesta del sensor ante materiales con diferente conductividad térmica aplicando un valor de $Q = 112.5$ [mW/cm ²]	90
Figura 6.8. Respuesta del sensor ante variaciones del espesor de una capa de aire aplicando un valor de $Q = 95.2$ [mW/cm ²]	91
Figura 6.9. Recta de calibración del sensor de flujo de calor con esquema de trayectoria lineal	93
Figura 6.10. Respuesta del sensor en configuración de múltiples reflexiones vs trayectoria lineal	94

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 3. MODELADO Y DISEÑO DE LA CELDA HERRIOTT

Tabla 3.1. Combinaciones posibles para los factores M_x y M_y	47
Tabla 3.2. Correspondencia entre $M_{x,y}$ y δ	48
Tabla 3.3. Parámetros de desempeño de una celda Herriott integrada con espejos ortogonalmente alineados	57
Tabla 3.4. Parámetros de desempeño de una celda Herriott integrada con espejos rotados un ángulo δ	60
Tabla 3.5. Parámetros de desempeño de una celda Herriott integrada con espejos sin rotación	61

CAPÍTULO 4. FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA CELDA HERRIOTT

Tabla 4.1. Dimensiones físicas y parámetros de las celdas Herriott fabricadas	66
Tabla 4.2. Datos experimentales para el cálculo de las pérdidas por propagación	68
Tabla 4.3. Mediciones de potencia reflejada para determinar el coeficiente de reflectividad	69

CAPÍTULO 6. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Tabla 6.1. Determinación del máximo decremento de potencia	86
Tabla 6.2. Conductividad térmica de los materiales bajo prueba	89
Tabla 6.3. Comparativa entre el máximo decremento de potencia del esquema de múltiples reflexiones y en trayectoria lineal	92

PREFACIO

El presente trabajo es resultado del proyecto de investigación que se llevó a cabo como parte del proceso para obtener el grado de Maestro en Ingeniería. La obra titulada “Sensor óptico de flujo de calor empleando una celda Herriott” pretende abordar el diseño de un sensor que permita cuantificar la conducción de calor empleando técnicas termo-ópticas y cuyo elemento central es una celda óptica de largo camino tipo Herriott, la cual emplea un esquema de múltiples reflexiones de un haz. Emplear a dicha celda como elemento sensible del sensor permitirá reducir el tamaño de éste con el objetivo de proponer potenciales aplicaciones en la caracterización de propiedades térmicas de materiales, los cuales debido podrán tener dimensiones asociadas al reducido tamaño de la celda.

La propuesta de diseño mostrada en este trabajo tiene su fundamento en una línea de estudio que se aborda en el Grupo de Sensores Ópticos y Eléctricos del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) de la UNAM, bajo la coordinación de la Dra. Celia Sánchez. Desde hace algunos años, el grupo de trabajo de la Dra. Sánchez ha centrado sus esfuerzos en el diseño de sensores de fibra óptica para caracterizar térmicamente las propiedades de materiales, las cuales, según se ha estudiado cambian su conductividad térmica debido a alteraciones presentes en composición y estructura, ejemplo de ello es el caso de los tejidos biológicos. Bajo este contexto, el presente trabajo pretende mostrar un nuevo método óptico que permita caracterizar la conducción de calor en materiales empleando una celda Herriott, con lo cual en un futuro pueda ser empleado en mediciones *in situ* tanto para aplicaciones biomédicas como la caracterización de procesos físicos y químicos; sin embargo es preciso aclarar que el contenido del presente abarca como se mencionó antes, únicamente la propuesta de un nuevo sensor óptico de flujo de calor, que por sus características, no puede ser equiparable con los trabajos en fibra óptica previamente reportadas y cuyo propósito es demostrar como el esquema propuesto pudiera representar una excelente alternativa a los métodos termo-ópticos de caracterización.

El trabajo se encuentra dividido en siete capítulos los cuales se desarrollan de la siguiente forma:

En el capítulo 1 se introduce al lector en el contexto de los conceptos básicos de los cuales se desprende el trabajo, así, se presentan la caracterización de las propiedades térmicas de los materiales, mediante una revisión al estado del arte en cuanto sensores de flujo de calor se refiere, y se explican los beneficios y características de algunos dispositivos ópticos que emplean el esquema de múltiples reflexiones de un haz. Con todos los conceptos abordados, finalmente se plantea la hipótesis que sustenta a la tesis presentada.

En cuanto al segundo capítulo, éste aborda lo referente al marco teórico, se presentan formalmente los conceptos y métodos involucrados en el desarrollo del sensor de flujo de calor propuesto. Partiendo desde los conceptos de transferencia de calor y las propiedades térmicas de los materiales, se continúa con la explicación de las celdas ópticas tipo Herriott. Posteriormente se aborda el efecto de la deflexión fototérmica puesto que representa el principio de funcionamiento del sensor de flujo de calor.

El capítulo 3 involucra los métodos analíticos que permiten diseñar y modelar a la celda Herriott, quien será el elemento transductor del sensor óptico. En este capítulo se obtienen todos los parámetros que determinan las condiciones de operación de la celda. Se presenta el formalismo matemático de diseño, que posteriormente permitirá fabricar un dispositivo compacto e integrado en acrílico, hecho que debe ser resaltado, dado que hasta donde se tiene conocimiento éste diseño es único en su especie.

El cuarto capítulo muestra el proceso de fabricación de la celda Herriott, los métodos y tecnologías empleadas, así como las ventajas y desventajas de éstas. Por otro lado, se presenta la caracterización experimental de la celda fabricada, principalmente en términos de las pérdidas ópticas que ésta presenta a fin de determinar el comportamiento del haz de luz láser dentro de la celda.

Posteriormente, el capítulo 5 involucra la integración del sensor de flujo de calor completo. Se parte del posicionamiento mecánico de la fuente de luz y la celda, continuando con la fuente de calentamiento que induce el flujo de calor, hasta llegar a la descripción del proceso de detección fotométrica de la señal resultante. Se plantea el procedimiento de medición de flujo de calor en términos de una serie de pasos que deben seguirse para obtener un resultado adecuado.

El capítulo sexto trata sobre los resultados experimentales del sensor para obtener sus parámetros de medición asociados, tal es el caso de la repetibilidad y reproducibilidad, mediante las cuales es posible determinar la precisión del sensor; además se muestran los valores de sensibilidad, resolución y rango del sensor óptico. Finalmente, se pretende demostrar la hipótesis planteada haciendo una comparación entre un esquema de medición con un solo paso del haz y el esquema de múltiples reflexiones, así como la medición de flujo de calor en materiales de conductividad térmica conocida.

Finalmente, se presentan las conclusiones a partir de los resultados obtenidos al finalizar el trabajo de investigación y experimentación. En él se describen las ventajas y desventajas del método propuesto y algunas recomendaciones en la mejora de éste, para posteriores trabajos a futuro.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se introducirá al lector en el contexto de la medición de propiedades térmicas en materiales tomando como base la revisión al estado del arte hecha para sensores de flujo de calor así como algunos dispositivos ópticos que emplean múltiples reflexiones de un haz en aras de aumentar las características de medición del dispositivo, con lo cual se plantea la hipótesis a demostrar durante el desarrollo de este trabajo.

1.1. Caracterización de propiedades térmicas en materiales

La conducción de calor en materiales tiene una estrecha dependencia con la composición y estructura molecular de éstos y a su vez está relacionada con sus propiedades térmicas. La cuantificación y caracterización de dicha conducción de calor resulta útil para obtener información sobre las propiedades y eventuales modificaciones presentes en distintos materiales. La caracterización térmica de los materiales puede ser llevada a cabo mediante la determinación de distintas propiedades de los mismos en relación a su comportamiento frente a la temperatura. De esta manera es preciso mencionar tres de las propiedades térmicas más importantes en el estudio térmico de materiales: conductividad térmica, difusividad térmica y efusividad térmica, términos que serán detallados en la capítulo siguiente pero que es conveniente mencionarlos ya que ellos constituyen los parámetros de interés para los sensores de flujo de calor, elementos que permiten cuantificar y caracterizar las propiedades térmicas de materiales.

1.2. Sensores de flujo de calor

Partiendo del concepto básico de sensor, definido como el elemento que transforma una magnitud física, química, biológica, etc., o también llamada variable de instrumentación en una señal eléctrica de corriente o voltaje, es prudente hacer una breve síntesis de aquellos dispositivos sensores que actualmente se encuentran reportados en la literatura y que hacen referencia a la variable de instrumentación de interés en este trabajo, el flujo de calor.

Los Sensores de Flujo de Calor (SFC) son muy útiles para entender y controlar fenómenos térmicos acoplados o no con otros procesos físicos, químicos o mecánicos. Un SFC debe ser juiciosamente diseñado con el objetivo de asegurar la mayor sensibilidad así como reducir las fuentes de error en la cuantificación de propiedades térmicas. El flujo de calor puede ser medido usando principalmente dos métodos directos, aquellos en donde existe un gradiente térmico normal o tangencial al sensor ^[1] y aquellos en donde existe una disipación de potencia eléctrica ^[2]. El método del gradiente corresponde al comúnmente usado y se basa en la ley de conducción de Fourier, en la cual, el flujo de calor es proporcional a la conductividad térmica y al gradiente de

temperatura. La mayoría de los SFC disponibles comercialmente miden el gradiente mediante el uso de termopares hechos en película delgada, los depositados en ambos lados de una película de polímero la cual se coloca en contacto directo con el material bajo estudio ^[3].

En algunas ocasiones es necesario medir el flujo de calor debido a la presencia de un gradiente térmico en más de una dirección, para ello se ha diseñado un tipo de SFC en el cual se reducen las perturbaciones térmicas generadas por el propio sensor. Dicho dispositivo está compuesto por dos medias carcasas hechas del mismo material objetivo del estudio de tal forma que un conjunto de micro-termopares se colocan a diferentes distancias de la superficie sobre el plano transversal de ésta ^[4], así dichas distribuciones de temperatura son utilizadas para estimar el flujo de calor mediante el uso de métodos numéricos ^[5].

En los últimos años, los dispositivos para medir el flujo de calor presentan nuevos retos, por ende se han desarrollado y aplicado nuevas técnicas, las cuales han incrementado satisfactoriamente características como la resolución, el rango de operación y la sensibilidad de la instrumentación asociada al flujo de calor. Ejemplos de dichos avances han sido expuestos en un número considerable de trabajos publicados, con los cuales es posible hacer una clasificación de SFC de acuerdo a la tecnología empleada en el diseño de los mismos, de tal forma que dichos sensores pueden ser vistos desde la perspectiva de dos grandes grupos, aquellos fabricados en película delgada y los que utilizan técnicas ópticas.

Los SFC de película delgada son los más representativos ya que hasta donde se tiene conocimiento han sido mayormente estudiados, por lo cual es posible encontrar sub clasificaciones de este tipo de sensores, por ejemplo, sensores con base en resistencias eléctricas ^[6], galgas ^[7] y termopares ^[8] en película delgada, así como sensores con base en termopilas ^[9].

En cuanto a los sensores ópticos se refiere, éstos han ido ganando terreno frente a los sensores electrónicos tradicionales en los que los transductores de semiconductores son el elemento principal, de tal forma que los sensores ópticos de flujo de calor no son la excepción; sin embargo al realizar una minuciosa revisión al estado del arte, la cantidad de trabajos publicados no es comparable con los SFC de película delgada.

Los sensores ópticos de flujo de calor más comunes pueden ser divididos en dos tipos, los que emplean a la interferencia como mecanismo de sensado y los que basan su funcionamiento en la medición de potencia óptica también llamados sensores de intensidad.

Como ejemplo de funcionamiento de un sensor interferométrico, se presenta aquel donde la medición de la distribución de temperatura en el material bajo estudio se realiza midiendo la diferencia de fase entre dos señales provenientes un interferómetro Mach-Zender, en los cuales la diferencia de temperatura induce un cambio en el camino óptico del interferómetro debido a la variación del índice de refracción n respecto a la temperatura T (dn/dT) y al coeficiente de expansión térmica del material ^[10]. Con este método es posible realizar mediciones en materiales con dimensiones de aproximadamente 20 [mm²] en un tiempo corto y ha sido verificado en mediciones de conductividad térmica dentro de un rango de 0.5 a 100 [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]. Sin embargo, este tipo de sensor presenta desventajas como la necesidad de alinear perfectamente el interferómetro, el cual a su vez es altamente sensible al ruido ambiental.

Por otro lado, en cuanto a los sensores de intensidad se refiere, éstos comúnmente se han diseñado utilizando fibra óptica como medio de propagación de la luz. Un ejemplo de sensor de

flujo de calor en fibra se presenta con la medición de una diferencia de temperaturas en dos puntos separados por una distancia L , en un material con conductividad térmica conocida, k . En dicho material el flujo de calor es directamente proporcional a la diferencia de temperatura entre los dos puntos. El sistema de sensado se compone de dos configuraciones diferente: un termómetro basado en el tiempo de fluorescencia en una fibra y un termómetro basado en rejillas de Bragg ^[11]. La principal desventaja de este sensor además de su alto costo es el tiempo de medición el cual es de aproximadamente 30 horas.

Finalmente, es preciso describir brevemente un sensor de flujo de calor en fibra óptica el cual basa su funcionamiento en la deflexión foto-térmica de un haz gaussiano ^[12]. Un haz es emitido por una fuente de luz láser, el cual viaja por medio de fibra óptica monomodal hacia un colimador de entrada, el haz continúa su propagación por un bloque de acrílico que se caracteriza por tener un índice de refracción determinado y un pulido a nivel micrométrico en sus caras laterales. Perpendicularmente a la dirección de propagación del haz, se induce un gradiente térmico produciendo así que el haz sea desviado de su trayectoria lineal originando un ángulo de deflexión, el cual se refleja como un decremento en la potencia luminosa recolectada por un colimador de salida, conectado por medio de fibra óptica a un fotodetector. Este sensor representa la base del principio de funcionamiento del dispositivo propuesto en el presente trabajo aunque con sustanciales diferencias que a lo largo del trabajo serán descritas. En la Figura 1.1 se muestra el diagrama del sensor de flujo de calor en fibra óptica.

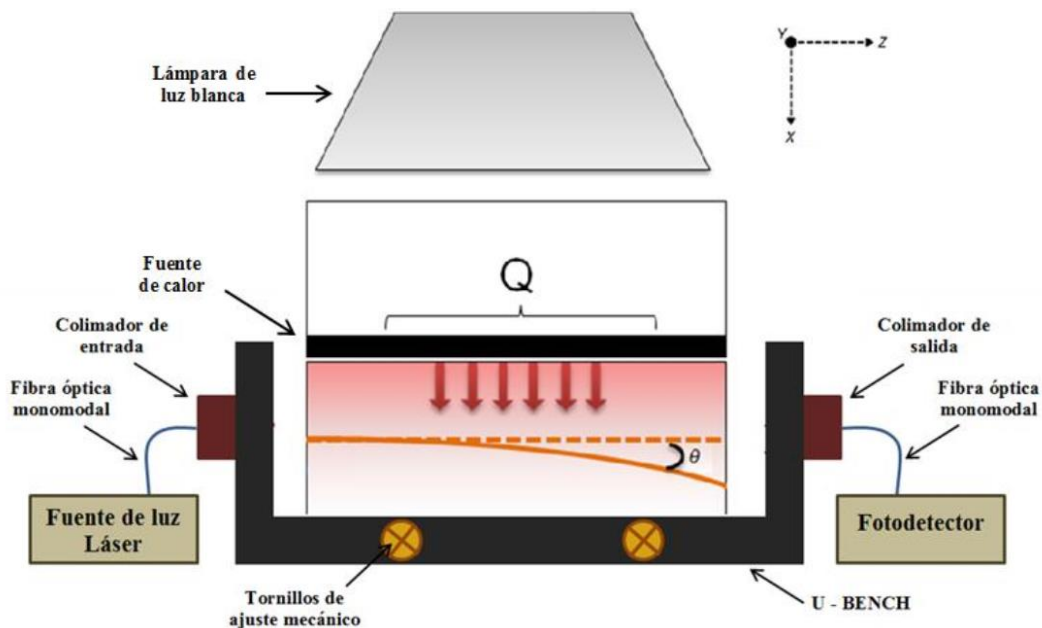


Figura 1.1. Sensor de flujo de calor implementado en fibra óptica.

1.3. Dispositivos ópticos que emplean múltiples reflexiones de un haz

En una gran cantidad de dispositivos ópticos como interferómetros, sensores, líneas de retardo, escáneres, por mencionar sólo algunos, es utilizado el concepto de múltiples reflexiones de un haz de luz el cual viaja una y otra vez a lo largo y/o ancho de un elemento óptico. El uso de este esquema de reflexión múltiple tiene principalmente dos razones de ser, en primera instancia se logra aumentar el camino que el haz recorre disminuyendo el área del elemento en el cual éste

se propaga; la segunda ventaja que se presenta es que la sensibilidad del dispositivo óptico se ve aumentada debido a que el camino óptico también lo hace. Para ilustrar este ejemplo, es posible pensar que un haz de luz viaja linealmente a través de un elemento óptico de 1 [cm] de longitud, siendo ésta igual al camino óptico recorrido; ahora bien, si en ese mismo elemento se colocan dos espejos, el haz será reflejado varias veces entre ellos, de tal forma que si se tienen N reflexiones desde que el haz entra al elemento hasta que sale de él, el camino recorrido será igual a la longitud de elemento multiplicado N veces. Para tener un mejor entendimiento de la aplicación del esquema múltiples reflexiones, a continuación se presentan algunos dispositivos reportados en la literatura que permiten hacer alusión a este efecto.

- **High-resolution KTN Optical Beam Scanner** [13]

En este trabajo se presenta un escáner de haz óptico con base en un cristal electro-óptico de $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ (KTN) colocado entre dos electrodos. El principio de funcionamiento se resume de la siguiente manera. Un haz de luz viaja a través del cristal en dirección paralela a los electrodos de tal forma que si aplica una diferencia de potencial en estos últimos, la dirección de propagación del haz será afectada debido al voltaje aplicado. Dado que el cristal KTN presenta un efecto de segundo orden, el índice de refracción de éste cambiará de cuando se aplique un campo eléctrico perpendicular a la dirección de propagación provocando que el haz sea desviado de su trayectoria lineal a la salida del KTN. En la Figura 1.2 se muestra un diagrama que ilustra el efecto de este dispositivo.

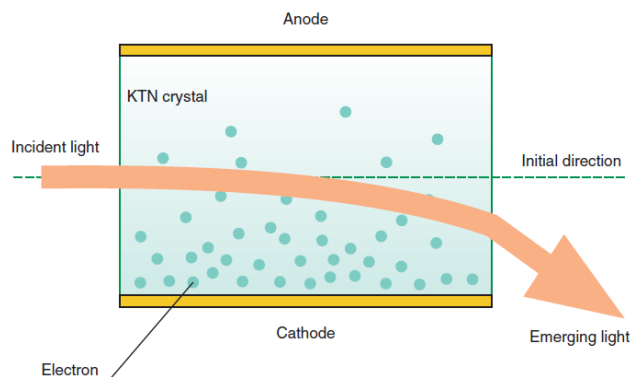


Figura 1.2. Deflexión de un haz en un cristal electro – óptico [13].

Dado que la desviación del haz es proporcional a la magnitud del campo eléctrico aplicado, entonces es posible variar a éste con el objetivo de obtener un cierto número de puntos comprendidos entre la separación que existen entre los electrodos para cada magnitud del campo eléctrico, éste es el principio de funcionamiento del escáner óptico; sin embargo dicho número de puntos que pueden ser resueltos estará limitado debido a la trayectoria lineal que el haz sigue. Para resolver esta situación el trabajo propone que la trayectoria recorrida pueda ser incrementada con el objetivo de que la resolución del escáner puede ser incrementada. Dicho incremento de trayectoria es realizado mediante el uso de múltiples reflexiones del haz dentro del KTN de tal forma que las dimensiones de éste no sean modificadas. Así, el efecto de reflexión múltiple es producido cuando se colocan dos espejos planos en las caras del cristal por donde el haz entra y sale de éste como se muestra en el Figura 1.3.

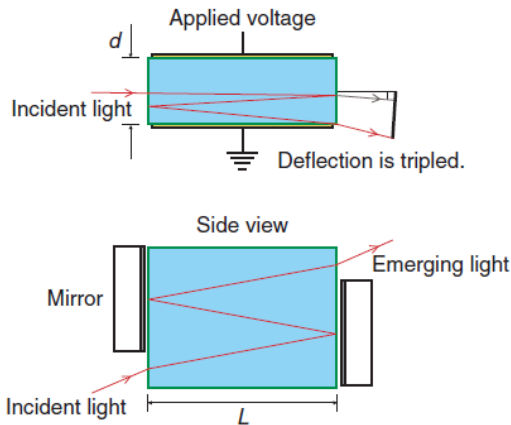


Figura 1.3. Múltiples reflexiones de un haz en un cristal electro – óptico [13].

Como resultado final, el trabajo explica que únicamente fue posible lograr 2 reflexiones o 3 pasos del haz dentro del cristal debido a la configuración de espejos planos; sin embargo el objetivo de aumentar la trayectoria recorrida 3 veces se cumplió dando lugar a que el ángulo de deflexión fuera triplicado y en consecuencia la resolución del escáner aumenta.

- **Terahertz wave detection method based on multi-reflection optical lever with nano-scale precision** [14]

En este trabajo se propone un método térmico de detección de señales electromagnéticas en el rango de los Tera Hertz mediante el uso de un sistema óptico de múltiples reflexiones el cual forma un cantiléver capaz de medir pequeños desplazamientos con una resolución del orden de nanómetros, de tal forma que el cantiléver está constituido por un par de espejos planos, uno fijo y otro móvil, en vez de solo tener una superficie reflectora en donde un haz de luz incide. En la Figura 1.4 se muestra el diagrama esquemático del cantiléver de dos espejos en donde ocurren múltiples reflexiones.

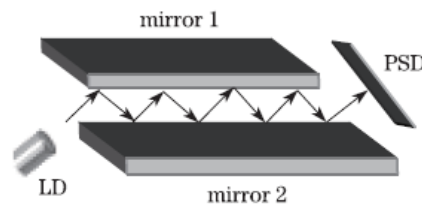


Figura 1.4. Cantiléver de dos espejos con múltiples reflexiones [14].

Un haz de luz entra al arreglo de los espejos mediante un diodo láser e incide en el espejo 1 a cierto ángulo de tal forma que genera una y vez reflexiones entre ambos espejos, después de la última reflexión el haz es detectado mediante un detector sensible a la posición (PSD: *Position Sensitive Detector*).

En el artículo se plantean dos tipos de movimientos que los espejos pueden tener, estos son rotación o translación con el objetivo de saber cuál de éstos es el que mejores resultados produce. El efecto de radiación de Tera Hertz es quien da el efecto de movimiento dado que el espejo 1 se encuentra recubierto con un material capaz de absorber las ondas THz dando lugar a que el

espejo sea deformado. La deformación inducida provoca que el camino óptico del haz se modificada y mediante el PSD es posible cuantificar del desplazamiento inducido por la onda THz. Los autores concluyen que el uso del esquema de múltiples reflexiones permite incrementar la resolución y sensibilidad del instrumento a 4 [nm] y 5.95 [nm/V] respectivamente, valores que con el uso de un esquema de trayectoria lineal no pueden ser logrados.

- **Compact Multi Reflection Cells for Optical Gas Sensor Applications** ^[15]

Este trabajo expone el diseño y construcción de celdas ópticas en donde un haz de luz reflejará un número determinado de veces para aplicaciones de medición de concentración de gases. Se plantea como solución a la detección de pequeñas concentraciones de gases el método de espectroscopia de absorción de luz para determinar la concentración éstos, para ello se requiere un camino óptico largo con el objetivo de detener un límite de detección suficiente. Así pequeñas cantidades de gas deberán corresponder a un volumen pequeño de la celda en donde éste estará contenido, por lo que esta es la forma de garantizar mediciones eficientes con suficiente resolución. Para solucionar este problema, los autores proponen el diseño de celdas de camino óptico largo con base en un arreglo de espejos que permitirán que un haz de luz sufra el efecto de múltiples reflexiones a través de la celda, el cual interactúa con el gas contenido en ella. Se obtiene un camino óptico desde 1.6 a 15 [m] en celdas con longitudes de aproximadamente 0.5 [m]. En la Figura 1.5 se muestra el diagrama esquemático del sistema de medición incluyendo el arreglo de espejos mencionado.

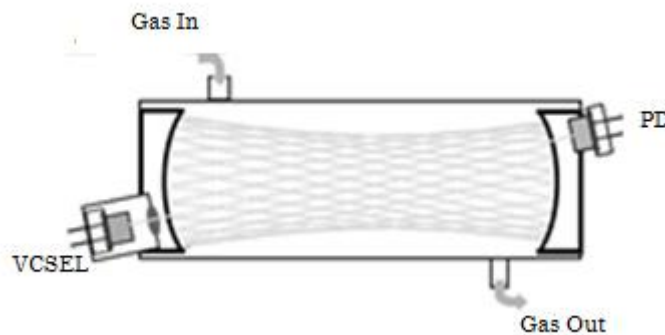


Figura 1.5. Celda contenedora de gas con arreglo de espejos para crear múltiples reflexiones ^[15].

El sistema está compuesto por un diodo láser sintonizable (VCSEL: *Vertical Cavity Surface Emitting Laser*) el cual emite un haz de luz a cierta longitud de onda λ , el cual atraviesa la celda contenedora efectuando múltiples reflexiones entre ambos espejos curvos colocados uno frente a otro. Una vez que el haz efectuado un número determinado de reflexiones sale por el extremo opuesto por donde entro y es detectado mediante un fotodiodo. Con esta configuración los autores reportan un aumento sustancial en la sensibilidad del sensor, además de tener resolución de 2 ppm (*parts per million*) en una medición de oxígeno, concluyendo que si se aumentan el camino óptico y se conserva el volumen del gas contenido, la eficiencia de las mediciones se mejora notablemente.

1.3.1 Celdas ópticas de largo camino

El arreglo más simple para que un haz refleje un número determinado de veces está conformado por un par espejos planos colocados uno frente al otro; sin embargo este esquema

presenta el gran inconveniente de permitir solo unas pocas reflexiones si el área de los espejos es relativamente pequeña.

Dadas las grandes ventajas ofrecidas por el esquema de múltiples reflexiones en cuanto al aumento de sensibilidad y resolución se refiere, desde mediados del siglo XX expertos en óptica han dedicado sus estudios al diseño de dispositivos ópticos que permitan ofrecer múltiples reflexiones evadiendo el limitado uso de espejos planos, así, se han propuesto diversas configuraciones de espejos curvos con las cuales es posible obtener largo caminos ópticos y que han contribuido al desarrollo de múltiples aplicaciones.

Las configuraciones de espejos curvas mencionadas son llamadas también celdas ópticas de largo camino. Las más importantes y estudiadas son las celdas White y Herriott, nombradas así en honor de sus creadores. A continuación se presenta la descripción, configuración y aplicación de estas celdas con el objetivo de comprender su funcionamiento y así poder relacionarlo con el presente trabajo.

- Celda White

La celda óptica White ^[16] consiste en un arreglo de tres espejos esféricos cóncavos con radios de curvatura iguales y por ende misma distancia focal. La distancia que existe entre los espejos debe ser dos veces la distancia focal de ellos, $2f$. La superficie reflectora del espejo A colocado a la izquierda del arreglo, se encuentra frente a las superficies reflectoras de los espejos B y C, colocados a la derecha. Un haz de luz es focalizado con un ángulo Ω a partir de un punto inicial F_0 de tal forma que incide sobre la superficie del espejo B, la imagen de F_0 es reflejada como un punto F_1 de regreso al espejo A. El espejo A es orientado de tal forma que ahora F_1 pueda ser reflejado en el espejo C creando un punto F_2 , el cual será reflejado nuevamente hacia el espejo A. Esta secuencia de reflexiones representa un viaje completo del haz, es decir, cada viaje completo está dado por 4 pasos del haz dentro de la celda óptica. Si ahora se considera que el punto F_2 en el espejo A, es el punto de partida para comenzar un nuevo viaje, se producirá la misma cantidad de reflexiones pero desplazadas una cierta distancia respecto a las incidencias del primer viaje. Finalmente, se tendrán dos grupos de incidencias o puntos en los espejos situados en el espejo A, por una parte las incidencias pares F_0, F_2, F_4, \dots y las incidencias noes F_1, F_3, F_5, \dots ; de esta forma se formará un patrón de incidencias en dicho espejo. En la Figura 1.6 se muestra el arreglo de espejos que conforman una celda Herriott.

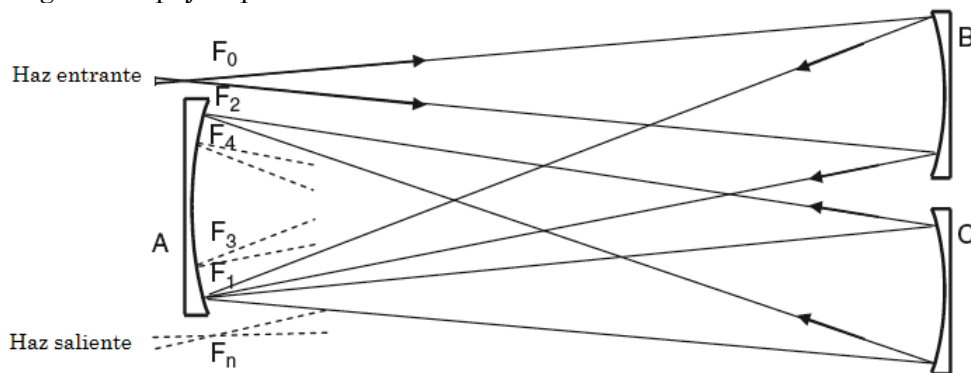


Figura 1.6. Diagrama de una celda óptica White.

Usualmente, los espejos B y C son ligeramente rotados de tal forma que las incidencias noes y pares formen dos filas en la superficie del espejo A; además que dicho movimiento de

rotación permite ajustar el número de pasos en bloques de 4 dado que éste es el número de pasos de un viaje completo. Finalmente, en la figura anterior se observa un punto denotado por F_n , el cual hace referencia a cuando el haz abandona el arreglo de espejos con un ángulo opuesto al de entrada, es decir $-\Omega$. La Figura 1.7 muestra el patrón de incidencias típico de una celda White formado en el espejo A.

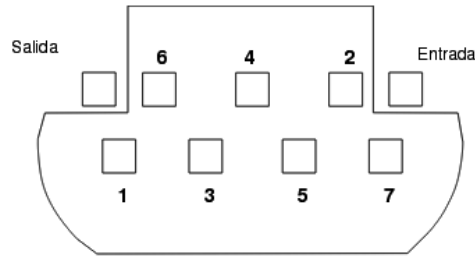


Figura 1.7. Patrón de incidencias de típico de una celda White.

En la Figura 1.7 es posible observar cómo es que las incidencias en el espejo A se encuentran alineadas en dos filas de acuerdo en grupos de pares y nones. Al ser 7 incidencias, es posible deducir que éstas corresponden a 16 pasos del haz dentro de la celda, es decir 4 grupos de 4 pasos, lo que concuerda con el principio de funcionamiento de la celda White.

La trayectoria total ϑ_{WHITE} que el haz recorre en la celda desde su entrada hasta su salida puede ser estimada en términos del número de pasos y la separación entre espejos correspondiente a 2 veces la distancia focal f de los espejos, así se tiene que:

$$\vartheta_{WHITE} \approx (No.pasos) * 2f. \quad (1.1)$$

Se dice que el valor para ϑ_{WHITE} solo puede ser estimado dado que en la práctica no es posible conocer con exactitud la posición de cada incidencia debido al ajuste necesario en la rotación de los espejos B y C, así como del ángulo con el que el haz entra a la celda. Dichos ajustes hacen posible obtener que el desempeño de la celda se adecuado, es decir, se debe encontrar la posición para los elementos anteriormente mencionados que permita que el haz salga de la celda por el extremo opuesto del espejo A y con el ángulo contrario al que tenía a su entrada.

La ventaja principal de la celda White radica en el hecho de poder lograr grandes caminos ópticos debido al arreglo de los 3 espejos que se tienen; sin embargo esto involucra también una desventaja ya que dichos espejos deben encontrarse perfectamente alineados para que la celda opere correctamente, situación que en ocasiones no puede ser controlada y por ende se dice que la celda White no es estable mecánicamente.

- **Celda Herriott**

Se entiende como una celda Herriott^[17] aquel dispositivo óptico formado por dos espejos cóncavos curvos M1 y M2 con radios de curvatura $R1$ y $R2$, respectivamente. Dichos radios pueden ser iguales o de diferente valor. Los espejos se encuentran colocados uno frente al otro separados una distancia d igual o mayor que dos veces el valor del menor de los radios. Un diagrama esquemático que permite visualizar la disposición de los espejos en una celda Herriott se muestra en la Figura 1.8.

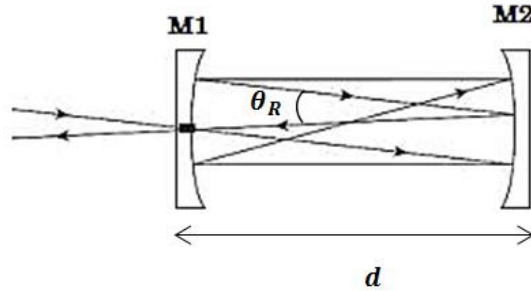


Figura 1.8. Diagrama general de una celda óptica Herriott de espejos esféricos.

En general en este tipo de celda se considera que un haz de luz láser entra por un orificio en uno de los espejos y después de N reflexiones, el haz sale de la celda por el mismo lugar por donde entró.

El diseño de este tipo de celdas se basa principalmente en 3 parámetros: R_1 , R_2 y d , de tal forma que éstos determinan la trayectoria recorrida por el haz, el número de reflexiones en la celda y el ángulo de separación entre las incidencias que ocurren sobre los espejos; las ventajas de las celdas Herriott son varias, entre las que se encuentran: la configuración óptica simple al sólo tener dos espejos; así como la poca distorsión del haz debido a la característica de re focalización de éste mediante espejos curvos. Además, en este tipo de celdas ópticas no es necesario realizar movimientos simultáneos de los espejos como en el caso de la celda White, lo que implica que las celdas Herriott sean mecánicamente más estables; sin embargo, la principal desventaja en el desempeño de estos dispositivos radica en la necesidad de tener un haz de luz bien colimado.

- Aplicaciones y diseño

Las celdas ópticas de camino largo White y Herriott tienen su principal aplicación en numerosos instrumentos de medición orientados a la medición de concentraciones de gases en mezclas de éstos mediante la técnica de espectroscopia de absorción, dado que las moléculas absorben luz en cierta longitud de onda. Su uso se justifica en el hecho de generar caminos ópticos largos en espacios más pequeños que el camino óptico usando el esquema de múltiples reflexiones. Al tener dispositivos de esta índole, el volumen de la mezcla de gases puede ser reducido y simultáneamente la sensibilidad del instrumento se ve aumentada debido a que el camino óptico aumenta.

Una aplicación más que suele darse a las celdas White y Herriott es como líneas ópticas de retardo. Tomando como ejemplo la interferometría, entonces resulta útil en algunas aplicaciones incrementar el camino óptico de alguno de los brazos del interferómetro con la finalidad de incrementar la sensibilidad de éste sin la necesidad de aumentar las dimensiones físicas del diseño.

Bajo este contexto, el diseño y fabricación de las celdas ópticas se realiza en espacio libre, es decir, teniendo al aire como medio de propagación del haz de luz que viaja a través de ellas y empleando espejos con una reflectividad cercana al 99%. En cuanto a las dimensiones de las celdas se refiere, comúnmente la separación entre espejos es mayor a los 30 [cm] logrando así caminos ópticos en el orden de los metros. En la Figura 1.9 se presenta una fotografía de una

celda White en espacio libre mientras en la Figura 1.10 se muestra a una celda tipo Herriott empleada en aplicaciones de medición de gases.

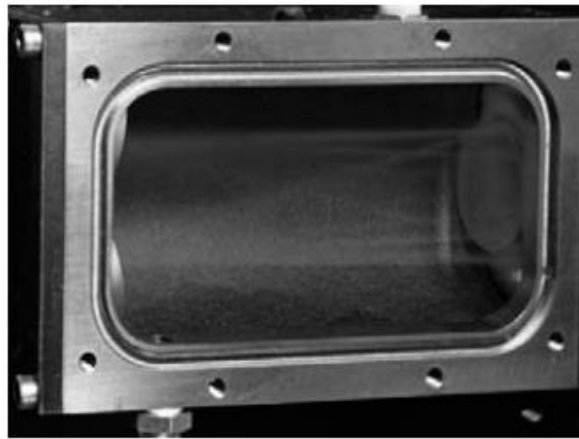


Figura 1.9. Celda White en espacio libre.

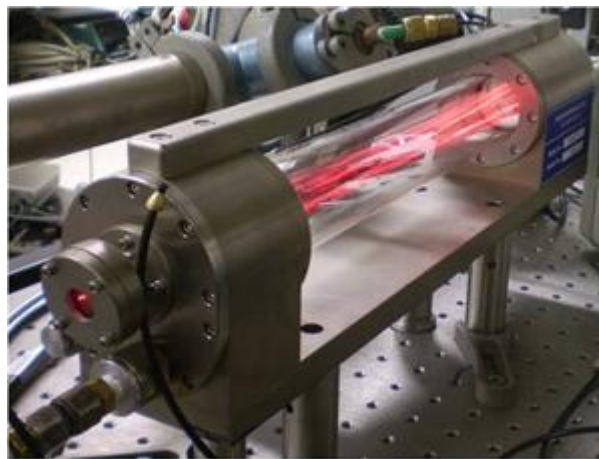


Figura 1.10. Celda Herriott en aplicaciones de sensado de gases.

De los dos tipos de celdas de largo camino anteriormente descritas, es posible hacer una comparativa entre ambas, resaltando que la celda Herriott es mecánicamente más estable que la de White debido a que en esta última se requiere realizar ajustes en los tres espejos que la conforman a fin de que cumpla su objetivo, mientras tanto la celda Herriott resulta un elemento con desempeño similar pero con sustanciales diferencias en cuanto al arreglo óptico ya que solo se tienen dos espejos, cuyas posiciones no necesariamente deben ser ajustadas manualmente, cualidad que la convierte en un dispositivo empleado en muchas aplicaciones como las mencionadas anteriormente. Así, una celda Herriott será la elegida para ser usada como transductor en el sensor óptico de flujo de calor propuesto en este trabajo.

1.4. Hipótesis

Una vez vistos los conceptos introductorios al tema expuesto en este trabajo, es necesario conjuntarlos con el objetivo de formular una hipótesis que a lo largo del presente se pretenderá demostrar formalmente. Se propone el diseño, desarrollo y validación de un sensor óptico de flujo de calor mediante la técnica de la deflexión foto-térmica empleando un esquema de múltiples reflexiones de un haz de luz dentro de una celda óptica de largo camino, dicho sensor será capaz de cuantificar la conducción de calor en materiales, los cuales tendrán una característica propia de composición en su estructura que determinará la conducción de calor. Se hará un especial énfasis en que la aplicación y la propuesta de diseño del sensor óptico de flujo de calor mediante el esquema de múltiples reflexiones propuesto será hasta donde se tiene conocimiento, un producto de innovación tecnológica que permitirá tener un dispositivo compacto de caracterización térmica de materiales para los cuales se deberá tener una muestra de ellos con un tamaño menor a 2 [cm²] manteniendo una alta sensibilidad para una trayectoria total recorrida de entre 3 y 10 [cm]. Finalmente se determinará la viabilidad del sensor para en un futuro extender las aplicaciones éste hacia su uso en caracterización de tejido biológico mediante biopsias y en sondas para mediciones *in vivo* de procesos térmicos.

En este primer capítulo se presentó una breve pero concisa introducción al trabajo abordando los temas que a grandes rasgos permiten definir el problema a resolver como son, la caracterización propiedades térmicas de los materiales, los sensores de flujo de calor que han sido reportados en la literatura, así como el uso del esquema de múltiples reflexiones en dispositivos ópticos. En conjunto estas tres ideas permitieron formular una hipótesis que fundamenta la base del presente trabajo. En el siguiente capítulo se abordará formalmente el marco teórico a fin de comprender los fundamentos, métodos y técnicas utilizadas para plantear la resolución del problema planteado.

REFERENCIAS DEL CAPÍTULO

- [1] Mityakov A.V., *et al.*, *Gradient heat flux sensors for high temperature environments*, Sensors and Actuators A: Physical No. 176, pp. 1-9, 2012.
- [2] Van der Graff F., *Heat flux sensors*, Thermal Sensors Vol. 4 Ch.8, Wiley-VCH Verlag GmbH, pp. 297–322, Germany, 1990.
- [3] Khaled, M. *et al.*, *A new method for simultaneous measurement of convective and radiative heat flux in car underhood applications*, Measurement Science and Technology No. 21, 2010.
- [4] J P Bardon, Y Jarny, *Procédé et dispositif de mesure en régime transitoire de température et flux surfacique*, Patent n° 94.01996, Feb 22th 1994.
- [5] J V Beck, B Blackwell, C R St Clair, *Jr*, *Inverse Heat Conduction*. Wiley, Inc. New York, 1985.
- [6] Thiery, L. *et al.*, *Evolution of thermal micromasurement techniques for various applications* Revue Generale de Thermique, 37(1), pp. 60-73, 1998.
- [7] Piccini E., Guo S., Jones T., *The development of a new direct-heat-flux gauge for heat transfer facilities*, Measurement Science and Technology, Vol. 11 No. 4 , pp. 342-349, 2000.
- [8] Mukherjee, S. K. *et al.*, *Anodic vacuum arc developed nanocrystalline Cu–Ni and Fe–Ni thin film thermocouple*, Journal of Applied Physics 106, 2009.
- [9] Sung N. *The effect of Ti adhesion layer on the thermoelectric noise of a high resolution thermopile for nanowatt heat flux sensor*, International Journal Of Precision Engineering and Manufacturing Vol. 15 Issue: 11, p.p. 2391 – 2396, 2014.
- [10] Kuznetsov I. *et al.*, *Thermal conductivity measurements using phase-shifting interferometry*, Optical Materials Express Vol. 4 No. 10, 2014.
- [11] Shen, Y. *et al.*, *Fiber-optic system for heat flux measurement*, Review of Scientific Instruments. Vol. 75, No 4, p.p. 15-23, 2004.
- [12] Sánchez Pérez, C. *et al.*, *Heat flux measurement in biological tissues by photothermal beam deflection*, AIP Conf. Proc. 1494 62, 2012.
- [13] Naganuma K. *et al.* "High-resolution KTN Optical Beam Scanner", NTT Technical Review, vol. 7 No.12, 2009.
- [14] Liu X. *et al.* *Terahertz wave detection method based on multi-reflection optical lever with nano-scale precision*, Chinese Optics Letters 1671-7694, pp. S20402-(1-4), 2010.
- [15] Herbst J. *et al.*, *Compact Multi Reflection Cells for Optical Gas Sensor Applications*, Sensor + Test Conference Proceedings, pp. 255 -256, 2009.
- [16] White, J., *Long Optical Paths of Large Aperture*, Journal of the Optical Society of America, vol. 32, No.5, pp. 285, 1942.
- [17] Herriott D. *et al.* *Off-Axis Paths in Spherical Mirror Interferometers*, Applied Optics, vol.3 no.4, pp. 523-526, 1964.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

En el capítulo 2 se presentan los fundamentos teóricos que describen los conceptos de transferencia y flujo de calor, el principio de la deflexión foto-térmica de un haz de luz, así como la descripción y configuraciones de las celdas ópticas de largo camino. En conjunto estos tres elementos permitirán describir el principio de funcionamiento del sensor óptico de flujo de calor que a la postre será diseñado e implementado.

2.1. Transferencia de calor

El calor es una forma de energía que se manifiesta cuando un sistema transfiere parte de su energía interna a otro sistema cuando existe una diferencia de temperaturas entre dichos sistemas. Las formas y mecanismos en que la energía es transferida de un sistema a otro se denominan transferencia de calor, en este contexto existe entonces un requisito básico para que la transferencia de calor ocurra, la diferencia de temperatura. Dado que la transferencia de calor es un transporte de energía se debe considerar forzosamente la ley de conservación de la energía dada por la primera Ley de la Termodinámica:

$$\Delta U_{12} = {}_1Q_2 - {}_1W_2, \quad (2.1)$$

la cual establece que el cambio de la energía interna de un sistema ΔU_{12} es igual a la cantidad de calor suministrada ${}_1Q_2$ al sistema menos el trabajo ${}_1W_2$ efectuado por el sistema sobre sus alrededores. Por lo que, en un sistema cerrado, el calor emitido por la región 1 de temperatura superior, debe ser igual al calor recibido por la región 2 de temperatura inferior.

Es importante resaltar la diferencia entre calor, término referido a la energía térmica de un sistema y transferencia de calor, la cual hace alusión a la transferencia de la energía térmica.

La transferencia de energía en forma de calor siempre se produce del medio que tiene la temperatura más alta hacia el de temperatura más baja. La manera con la que el calor se transfiere en una dirección depende de la magnitud del gradiente de temperatura (diferencia de temperatura por unidad de longitud o la razón de cambio de la temperatura en esa dirección), así a mayor gradiente de temperatura, mayor será la razón de transferencia de calor.

Los mecanismos mediante los cuales el calor puede ser transferido son tres: conducción, convección y radiación. Aunque el análisis de dichos mecanismos puede realizarse por separado, comúnmente en aplicaciones científicas e ingenieriles se presenta la combinación de las formas de transferencia de calor. Con el objeto de concretar únicamente las ideas de interés para el estudio presentado en este trabajo solo se abordará el mecanismo de conducción de calor ya que éste será el involucrado en el principio de funcionamiento del sensor.

- **Conducción de calor** ^[1]

La conducción de calor es la transferencia de la energía de las partículas más energéticas de un medio hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de la interacción de las partículas. La conducción puede presentarse en sólidos, líquidos o gases. En gases y líquidos la conducción se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio, mientras en los sólidos la conducción se debe a la combinación de las vibraciones de las moléculas y al transporte de energía por parte de los electrones libres. En la Figura 2.1 se ilustra como el calor es cedido del medio con mayor temperatura al de menor temperatura.

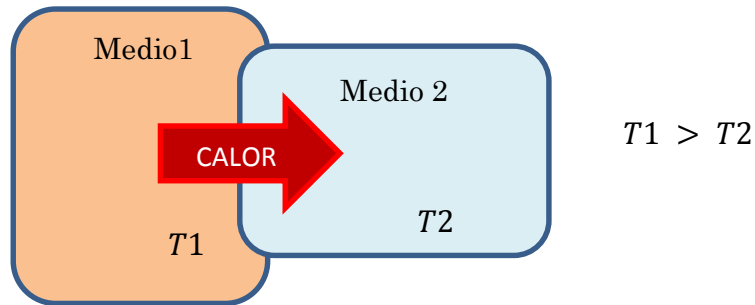


Figura 2.1. Conducción de calor entre dos medios.

Para expresar la conducción de calor se utiliza la ley de conducción de Fourier ^[2], la cual en términos de una sola dimensión, es decir si la conducción del calor se efectúa en una sola dirección está dada por:

$$Q = -k \frac{\partial T}{\partial x} . \tag{2.2}$$

Donde:

Q : Calor conducido en la dirección x .

k : Conductividad térmica del material.

$\frac{\partial T}{\partial x}$: Componente del gradiente de temperatura en la dirección de propagación.

El calor es conducido en la dirección de la temperatura decreciente y el gradiente térmico se vuelve negativo cuando esta última decrece al crecer x . El signo negativo de la ecuación garantiza que la transferencia de calor en la dirección x positiva sea una cantidad positiva. Finalmente, es de resaltar que la dirección de transferencia de calor siempre será normal (perpendicular) a la superficie de los medios entre los cuales éste se propaga.

El mecanismo de conducción de calor está íntimamente relacionado con la conductividad térmica de tal forma que es posible inferir el comportamiento de un material en términos de que tan bueno o mal conductor es éste, a través dicha propiedad física.

- **Conductividad Térmica (k)** ^[1]

Es la propiedad física de un material mediante la cual éste es capaz de conducir calor, dicho de otra manera, es la razón de transferencia de calor a través de un material con espesor

unitario por unidad de área por unidad de diferencia de temperatura. Se dice que cuando un material no es buen conductor de calor, presenta un valor pequeño de k y es clasificado como un aislante térmico, como ejemplo de un mal conductor de calor se tiene al aire. La conductividad de calor está presente en la Ley de Fourier para la conducción de calor y en el Sistema Internacional (SI) sus unidades son $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$.

2.2. Flujo de calor ^[1]

La rapidez de conducción de calor en un medio depende de la configuración geométrica de éste, su espesor y el material de que éste hecho, así como de la diferencia de temperatura a través de él, en la Figura 2.2 se muestra el efecto descrito anteriormente.

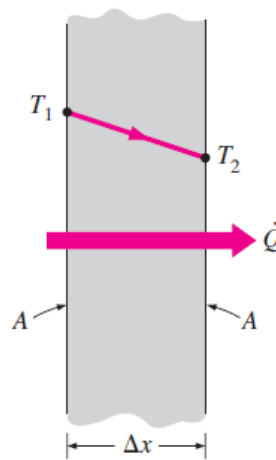


Figura 2.2. Conducción de calor a través de una pared plana. ^[1]

El flujo de calor puede ser definido como la razón de conducción de calor a través de una capa plana y que es proporcional a la diferencia de temperatura a través de ésta y al área de transferencia de calor, pero es inversamente proporcional al espesor de esa capa.

$$Q_{cond} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \text{ [W]}. \quad (2.3)$$

Donde:

Q_{cond} : Razón de conducción de calor.

A : Área de transferencia de calor.

ΔT : Diferencia de temperatura.

Δx : Espesor de la capa plana.

Considerando al espesor Δx muy pequeño de tal forma que si se toma el límite cuando éste tiende a cero $\Delta x \rightarrow 0$, la ecuación 2.3 puede escribirse en términos de la derivada, cuya interpretación física hace referencia a la rapidez con la que el calor es conducido; así la forma diferencial para el flujo de calor es:

$$Q_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} [W], \quad (2.4)$$

el término $\frac{dT}{dx}$ es el gradiente de temperatura, el cual es la pendiente de la curva de temperatura en un diagrama $T - x$ (razón de cambio de T con respecto de x), en la dirección x , como se muestra en la Figura 2.3. En pocas palabras, la relación 2.2 indica que la razón de conducción de calor en una dirección es proporcional al gradiente de temperatura en esa dirección.

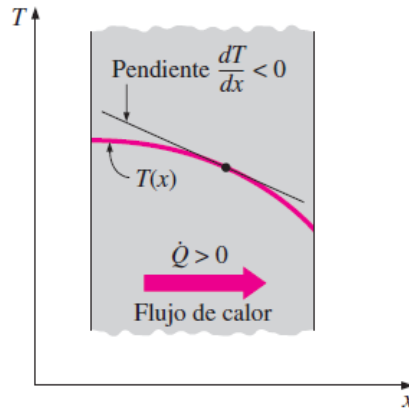


Figura 2.3. Derivada de la temperatura respecto la dirección de propagación x . [1]

El flujo de calor está íntimamente relacionado con dos propiedades físicas de los materiales denominadas difusividad y efusividad.

- **Difusividad Térmica (α)**^[2]

Propiedad termo-física que define la velocidad de propagación de calor por conducción durante ciertos cambios de temperatura, de tal forma que está asociada directamente con el tiempo en que se alcanza el equilibrio térmico. Matemáticamente se define como la relación de la conductividad térmica k entre la capacidad térmica específica c por la densidad, propias del material. Sus unidades en el SI son $[m^2s^{-1}]$.

- **Efusividad Térmica (ϵ)**^[3]

Se refiere a la magnitud que cuantifica la capacidad de un material para intercambiar calor con su alrededor en condiciones transitorias, de tal forma que en dichas condiciones la efusividad o impedancia térmica es proporcional al flujo de calor, en contraste con las condiciones estacionarias en donde ϵ es proporcional a la conductividad térmica. Está relacionada con la raíz cuadrada del producto de la densidad del material por la capacidad térmica específica y por la conductividad térmica del mismo. Sus unidades en el SI son $[W \cdot s^{1/2} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$.

Se sabe que el gradiente de temperatura en la dirección x está dado por el término $\frac{dT}{dx}$; sin embargo es posible generalizar la expresión de éste para un sistema cartesiano tridimensional $\Psi(x, y, z) = x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k}$, es decir el calor conducido en un material se presenta en tres direcciones, así, se tiene entonces un vector de rapidez de conducción de calor en términos de coordenadas rectangulares:

$$\vec{Q} = Q_x \hat{i} + Q_y \hat{j} + Q_z \hat{k} . \quad (2.3)$$

Donde:

\hat{i}, \hat{j} y \hat{k} : Vectores unitarios en las direcciones x, y y z .

Q_x, Q_y y Q_z : Magnitudes de las razones de transferencia de calor en las direcciones x, y y z .

Las magnitudes a su vez están dadas por:

$$Q_x = -kA_x \frac{\partial T}{\partial x} , Q_y = -kA_y \frac{\partial T}{\partial y} \quad y \quad Q_z = -kA_z \frac{\partial T}{\partial z} . \quad (2.4)$$

En esta última expresión A_x, A_y y A_z , son las áreas de conducción del calor normales a las direcciones correspondientes a cada eje coordenado, respectivamente.

Un análisis que permite representar la transferencia térmica o flujo de calor, es la ecuación de difusión. La importancia de dicha ecuación radica en que partir de su solución, es posible obtener la distribución espacial de temperatura $T(x, y, z)$ como función del tiempo, cuya ecuación en coordenadas cartesianas es:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k dy dz \left[\frac{\partial T}{\partial x} \right] \right) dx + \frac{\partial}{\partial y} \left(k dx dz \left[\frac{\partial T}{\partial y} \right] \right) dy + \frac{\partial}{\partial z} \left(k dx dy \left[\frac{\partial T}{\partial z} \right] \right) dz + g dx dy dz = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz . \quad (2.5)$$

Donde:

k : Conductividad térmica del material.

ρ : Densidad del material.

g : Variación de la generación de energía interna por unidad de volumen.

c : Capacidad térmica específica del material. †

Sí se considera que el gradiente de temperatura solo se encuentra en la dirección x , entonces se obtiene la ecuación unidimensional de la difusión de calor sin fuentes de generación internas, quedando de la siguiente forma:

$$q_x = \frac{\partial}{\partial x} \left(k dy dz \left[\frac{\partial T}{\partial x} \right] \right) dx = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx . \quad (2.6)$$

Donde q_x es el calor propagado en la dirección del eje x .

Finalmente, es importante mencionar nuevamente que todos los planteamientos anteriormente expuestos puedan llevarse a cabo, es necesario que exista un gradiente térmico o diferencia de temperatura entre los medios para que el calor sea conducido, de tal forma que para aplicaciones de sensado de flujo de calor se debe prever que el sistema no alcance el equilibrio térmico ya que así no habrá razón de cambio en la conducción que pueda ser cuantificada.

† Capacidad térmica específica: Es una medida de inercia térmica y se define como el calor necesario para elevar una unidad de [K] la temperatura de una determinada cantidad de material. Matemática se define como: $c = Q/m \Delta T$, donde q es la cantidad de calor, m la masa del material y ΔT la diferencia de temperatura.

2.3. Deflexión foto-térmica

El fenómeno de la deflexión foto-térmica ha sido previamente estudiado e implementado dado que resulta ser un mecanismo adecuado para lograr una interacción entre la transferencia de calor y la óptica, siendo entonces el principio en el cual se basa el sensor propuesto en este trabajo, al igual que el sensor de flujo de calor en fibra óptica previamente desarrollado por el grupo de investigación y que a continuación se describe.

Un material que cumpla con el requisito de cambiar su índice de refracción n debido a una variación en la temperatura T en el propio material, presenta una propiedad denominada coeficiente termo-óptico, dado por la razón de cambio del índice de refracción respecto a la temperatura $\frac{dn}{dT}$. Si se considera que un haz de luz láser viaja dentro de un material, dicho gradiente en el índice de refracción propicia que el haz sea desviado angularmente de su trayectoria original, traducido como un ángulo de deflexión.

Así, cuando un material es expuesto a una fuente de calor Q su temperatura aumenta de manera gradual y por lo tanto la densidad del material se ve disminuida, dando lugar a que el índice de refracción también sea disminuido. El cambio en el índice de refracción conlleva a que el haz de luz que se propaga a través del medio desvíe su camino hacia la parte del material en donde el índice de refracción es mayor [4].

Para comprender mejor la deflexión foto-térmica, es posible hacer el siguiente planteamiento. Si un haz de luz atraviesa linealmente un bloque de acrílico, material que presenta relativamente buenas características ópticas y un buen coeficiente termo-óptico, y que perpendicularmente a la dirección de propagación del haz se induce un gradiente de temperatura ∇T en ambas caras del bloque, debido a la presencia de una fuente de calor; cuando el haz salga del acrílico éste se encontrará desviado de su trayectoria lineal. En la Figura 2.4 se ilustra el efecto de desviación en la trayectoria del haz.

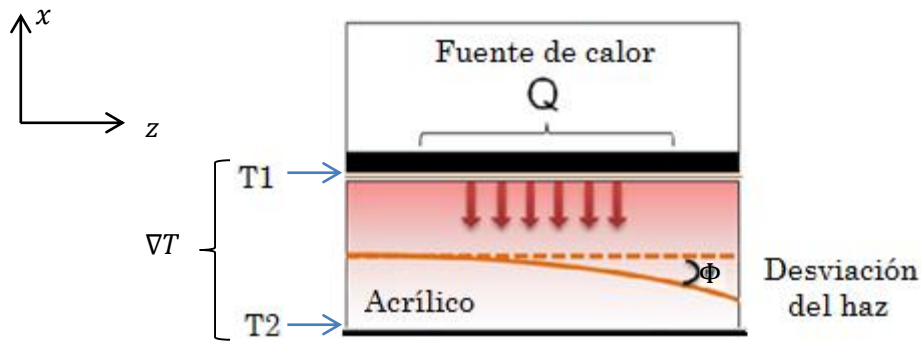


Figura 2.4. Desviación de la trayectoria de un haz debido a la presencia de un gradiente térmico.

Como se observa en la figura anterior, la desviación puede ser vista como un cierto ángulo de deflexión Φ provocado por el gradiente en el índice de refracción, quien a su vez es propiciado por el gradiente térmico generado por el flujo de calor. Para determinar el valor de θ , éste puede ser modelado como un haz de luz con diámetro infinitesimal de tal forma que la deflexión en radianes, es en realidad la suma de pequeños gradientes en el índice de refracción, los cuales son

perpendiculares a la dirección de propagación del haz o eje óptico z , la expresión analítica ^[5] que describe este hecho está dada por:

$$\Phi = \int \frac{\nabla n}{n} dz . \quad (2.7)$$

A su vez, el gradiente del índice de refracción debido al gradiente térmico es:

$$\nabla n = \frac{dn}{dT} \nabla T . \quad (2.8)$$

Desarrollando la expresión 2.7 en términos de la ecuación 2.8 y considerando que el gradiente térmico sólo tiene lugar en la dirección x , el valor del ángulo de deflexión queda de la forma:

$$\Phi = \frac{1}{n} \frac{dn}{dT} \int \frac{\partial T}{\partial x} dz . \quad (2.9)$$

Finalmente, es posible notar que el valor de la tanto la fuente de calor como las propiedades térmicas del material bajo estudio, serán quienes determinen la magnitud del gradiente térmico, teniendo como consecuencia que el ángulo de deflexión sea modificado de acuerdo a dichas condiciones.

2.4. Configuraciones de la celda Herriott

En capítulo anterior se explicó el funcionamiento de las celdas ópticas de largo camino, destacando que la que se emplea en el sensor de flujo de calor es la celda Herriott, Dadas sus buenas características, las celdas Herriott han sido estudiadas a profundidad con el fin de obtener el mejor desempeño posible cumpliendo con su principal función, lograr el mayor número de reflexiones sin perder de vista su buena estabilidad; así como su relativa facilidad de fabricación. Básicamente, se tienen tres tipos de celdas Herriott, cuya clasificación se realiza de acuerdo al tipo de espejos que las conforman: espejos esféricos, espejos astigmáticos y espejos cilíndricos. Es importante mencionar que las 3 configuraciones siguen la misma disposición de espejos anteriormente descrita. A continuación se hace una breve descripción de los 3 tipos mencionados con el objetivo de estudiar su funcionamiento y desempeño.

2.4.1. Espejos esféricos

Esta es la configuración más usada de la celda Herriott. Consiste en un espejo frontal (M1) con distancia focal igual a la mitad del radio de curvatura del espejo, $f_1 = R_1/2$. En M1 se encuentra un orificio fuera del eje óptico en las coordenadas $[x_0, y_0]$, a través del cual un haz láser es inyectado con una inclinación x'_0 y y'_0 , de tal forma que pueda ser enfocado sobre el segundo espejo, llamado espejo lejano (M2), el cual tiene una distancia focal f_2 . El haz es reflejado periódicamente y reenfocado de tal forma que éste eventualmente saldrá por el mismo orificio por donde entró en $[x_0, y_0]$ pero en la dirección opuesta, esto es con inclinación x'_0 y y'_0 contraria con el objetivo de colocar un detector para el haz de salida sin obstruir el haz de entrada.

Las incidencias en los espejos forman un patrón elíptico y en casos particulares una circunferencia. En la Figura 2.5 se muestra un patrón de incidencias característico de una celda Herriott de espejos esféricos.

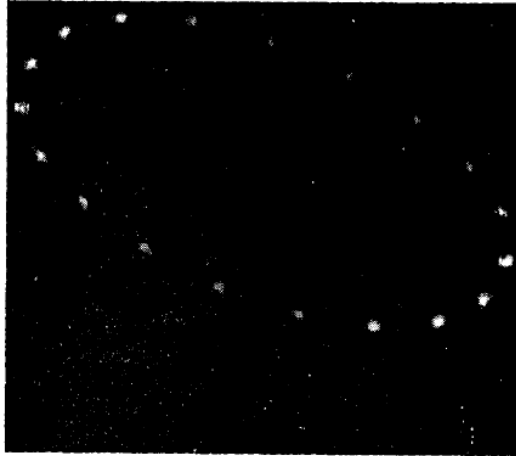


Figura 2.5. Patrón de incidencias elíptico de una celda Herriott de espejos esféricos ^[6].

Las condiciones de recirculación del haz dentro de la celda que permiten formar el patrón anteriormente mostrado dependen del ángulo que existe entre reflexiones consecutivas θ_R , así como del número de pasos N (número entero par) que el haz realiza. Estos parámetros son determinados mediante los radios de curvatura de los espejos $R1$ y $R2$ y la separación d entre ellos. Así, analíticamente se tienen dos expresiones fundamentales en el análisis de la celda Herriott ^[6].

$$\theta_R = 2 \left[\arccos \sqrt{\left(1 - \frac{d}{R1}\right) \left(1 - \frac{d}{R2}\right)} \right]. \quad (2.10)$$

$$N = \frac{2\pi M}{\theta_R}. \quad (2.11)$$

La ecuación 2.10 muestra cómo es que el ángulo entre reflexiones puede ser calculado en términos de los radios de curvatura de los espejos y la separación entre ellos. Mientras que para obtener el número de pasos, la ecuación 2.11 relaciona a éste con el ángulo θ_R y un factor denotado por M , el cual hace referencia al número de órbitas que las incidencias pueden formar, es decir el número de elipses formadas.

Las ventajas de esta configuración de celda Herriott son que teóricamente, longitud de camino óptico deseado y número de pasos pueden ser obtenidos simplemente ajustando la separación entre espejos considerando valores fijos de los radios de curvatura; además presenta una buena estabilidad mecánica debido a que el haz de salida no varía si existe una ligera rotación o desalineación de los espejos. En resumen, una vez que el haz de entrada es ajustado para que pueda salir de la celda, el número de pasos y trayectoria total recorrida pueden ser ajustados simplemente desplazando al espejo M2 a lo largo del eje óptico.

La principal desventaja de estas celdas radica en el hecho de que en la práctica, el espacio de soluciones para el número de incidencias que pueden establecerse dentro del patrón elíptico, no es infinito e incluso no puede tener un valor grande debido a la adyacencia entre incidencias dada por el valor de θ_R .

2.4.2. Espejos astigmáticos

Para solucionar el problema de no poder tener un gran número de incidencias en los espejos de la celda de espejos esféricos, se demostró que es posible emplear espejos con astigmatismo ^[7]. La configuración citada emplea dos espejos nombrados M1 y M2 al igual que en el caso anterior, pero en esta ocasión el haz de entrada se encuentra en la posición $[x_0 = 0, y_0 = 0]$, es decir, el centro del espejo M1.

El astigmatismo de los espejos hace referencia a que cada uno de los espejos tiene dos distancias focales f_x y f_y en la dirección x y y , respectivamente. El uso de espejos astigmáticos tiene implicaciones en la solución analítica de la celda Herriott de este tipo, de tal forma que existen dos soluciones independientes para los ángulos entre reflexiones sucesivas θ_{Rx} y θ_{Ry} , dados en función de los radios de curvatura R_x y R_y asociados a las distancias focales de los ejes y la separación d .

$$\theta_{Rx} = \arccos\left(1 - \frac{d}{R_x}\right) \quad \text{y} \quad \theta_{Ry} = \arccos\left(1 - \frac{d}{R_y}\right). \quad (2.12)$$

Además es posible conocer la n -ésima posición de cada incidencia después de un paso, en términos de las coordenadas x y y , así como del tamaño del espejo en ambos ejes X_o y Y_o .

$$x_n = X_o \sin(n\theta_{Rx}) \quad \text{y} \quad y_n = Y_o \sin(in), \quad (2.13)$$

donde n representa la n -ésima incidencia.

Las ecuaciones anteriores son aplicables para los dos espejos que conforman la celda si éstos se consideran idénticos. El efecto producido por este tipo de espejos consiste en formar ciclos de incidencias a diferentes frecuencias, es decir a diferentes valores de ángulos de reflexión θ_{Rx} , θ_{Ry} dando lugar a la formación de múltiples elipses orientadas en diferentes direcciones como se muestra en la Figura 2.6.

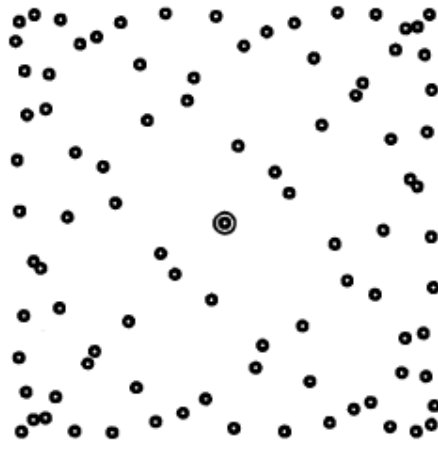


Figura 2.6. Patrón de incidencias elíptico de una celda Herriott de espejos astigmáticos ^[7].

Una implicación más en términos de la solución analítica es que el haz puede salir de la celda después de una media órbita, es decir cuando la suma de los ángulos θ_{Rx} y θ_{Ry} sea π ó 180° . Entonces, existe una expresión que relaciona al número de pasos N con los ángulos entre reflexiones y el número de órbitas formadas para cada eje M_x y M_y .

$$N = \frac{\pi M_x}{\theta_{Rx}}, \quad N = \frac{\pi M_y}{\theta_{Ry}} . \quad (2.14)$$

La principal ventaja ofrecida por los espejos astigmáticos en la celda Herriott es precisamente que el haz dentro de ella puede crear un patrón de incidencias más denso en los espejos ya que las incidencias son distribuidas a lo largo y ancho de éstos. Así, el número de pasos N que el haz realiza dentro de la celda puede ser incrementado debido a que la adyacencia entre incidencias puede ser más pequeña que en una celda con espejos esféricos.

La desventaja que contrarresta las buenas prestaciones ópticas de los espejos astigmáticos es que éstos deben ser fabricados con una tolerancia en el radio de curvatura a razón de $1:10^4$, y por tal motivo el uso en la práctica de esta variante se vuelve complicado y costoso. Los defectos en los espejos causados por las altas tolerancias de fabricación son traducidos en un difícil procedimiento de alineación de los espejos para lograr que la celda cumpla con su correcto funcionamiento. Para ello, se demostró que el espejo M2 debe ser rotado un cierto ángulo Γ , el cual es determinado empíricamente hasta encontrar cuando es que la celda cumpla con las especificaciones de diseño. En la Figura 2.7 se muestra el diagrama esquemático de una celda Herriott de espejos astigmáticos.

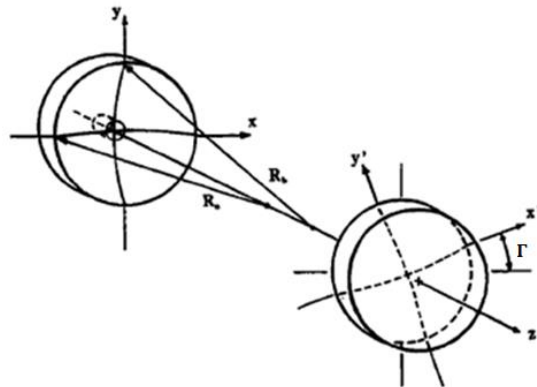


Figura 2.7. Diagrama de una celda Herriott de espejos astigmáticos [7].

2.4.3. Espejos cilíndricos

En los últimos años se propuso una nueva forma de crear los mismos efectos que las celdas descritas anteriormente, es decir lograr el diseño de una celda Herriott con espejos esféricos, pero con las ventajas ofrecidas por la de espejos astigmáticos. Esto se logra mediante el uso de espejos cilíndricos [8-9], en donde los ejes principales de los espejos se encuentran siempre ortogonales uno respecto al otro. Básicamente esto significa que, respecto al eje x del sistema cartesiano, el espejo M1 tiene asociado un radio de curvatura $R1$ mientras que el espejo M2 actúa como espejo plano en dicha dirección. Por otro lado, respecto al eje y ocurre lo contrario, el espejo M1 es considerado

como plano y el espejo M2 tiene un radio de curvatura $R2$. En general, se considera que en este arreglo de espejos, éstos se encuentran rotados un ángulo $\delta = 90^\circ$ uno respecto al otro, dando así el efecto de ortogonalidad. Al igual que en el caso anterior el haz entra a la celda por un orificio colocado justo en el centro del espejo M1. La Figura 2.8 muestra una celda Herriott de espejos cilíndricos en donde el espejo M1 tiene la curvatura respecto al eje y y mientras en el espejo M2 la curvatura se asocia al eje x .

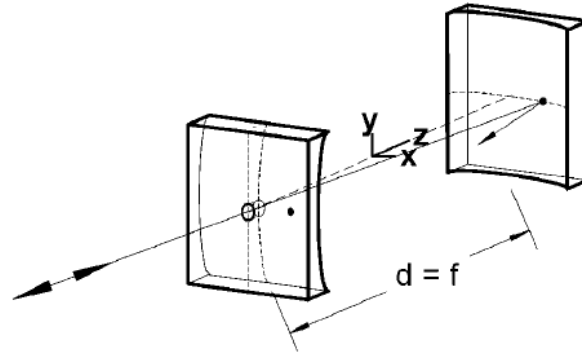


Figura 2.8. Diagrama de una celda Herriott de espejos cilíndricos [8].

La configuración de espejos cilíndricos [9] plantea diversas soluciones de recirculación del haz en la celda, es decir una gama de combinaciones para los valores del ángulo entre reflexiones, número de pasos y número de órbitas. Es de mencionar que las soluciones para dichos parámetros pueden ser obtenidas si los espejos pueden ser idénticos o con radios de curvatura diferentes, aunque por cuestiones de facilidad en la implementación física de la celda, comúnmente se considera que $R1 = R2$.

La ortogonalidad presente en el arreglo de espejos permite emular el comportamiento de la celda de espejos astigmáticos, es decir, el patrón de incidencias puede formar órbitas en distintas direcciones logrando así que la densidad o adyacencia entre reflexiones aumente.

Dado que la tolerancia de fabricación ya no es un factor determinante, en contraste con la celda de espejos astigmáticos, el efecto de rotación de uno de los espejos respecto al eje óptico cuando $\delta \neq 90^\circ$ es producir el mayor número de pasos del haz ajustando el valor de δ hasta encontrar el desempeño de la celda que permita aumentar el número de incidencias en los espejos. Una ilustración de este hecho se puede observar en la Figura 2.9.

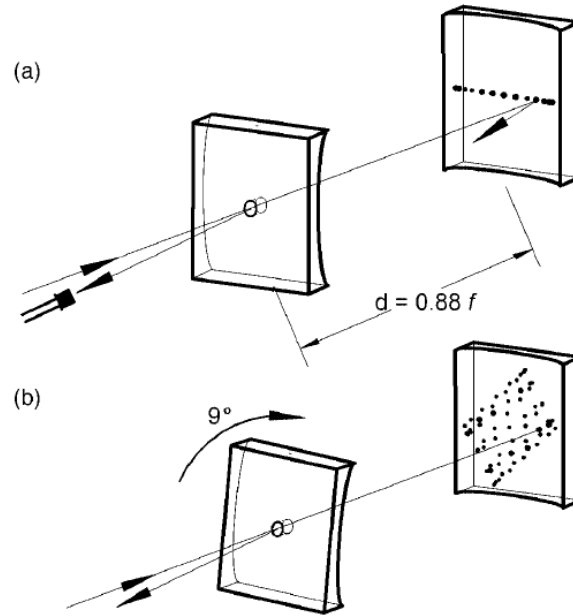


Figura 2.9. Patrones de incidencias formados en una celda Herriott de espejos cilíndricos [8].

En la figura anterior se observa que al igual que en las configuraciones anteriormente descritas, el haz entra y sale por el mismo lugar pero con el ángulo contrario. En el primer caso (a), los espejos se encuentran rotados $\delta = 90[^\circ]$, de tal forma que el patrón de incidencias se encuentra alineado respecto al eje de la curvatura del espejo M2, es decir x . Mientras en el inciso (b) $\delta = 9[^\circ]$, provocando así que el patrón se encuentre distribuido sobre la superficie del espejo y por ende el número de incidencias sea mayor.

La ventaja principal de esta configuración es clara, la fabricación de los espejos no requiere estrictos procedimientos ni tolerancias de tal forma que resulta muy útil para instrumentos de campo. Por otra parte, presenta las ventajas de desempeño de una celda de espejos astigmáticos en donde la densidad de incidencias es mayor respecto a la de espejos esféricos, lo que conlleva a la posibilidad de rotar los espejos con el objetivo de generar dicho incremento. Se tiene entonces para esta configuración dos parámetros que deben ser ajustados a fin de lograr que la celda funcione correctamente, la separación entre espejos d y el ángulo de rotación δ . Cabe mencionar que si dichos parámetros son establecidos desde un inicio por el diseñador entonces experimentalmente no deberán ser restablecidos y la celda puede cumplir con su objetivo.

2.5. Principio de operación del sensor de flujo de calor

Una vez que se han establecido los conceptos teóricos involucrados en el trabajo y que permitirán dar una solución a la hipótesis planteada al inicio de éste, es preciso entonces establecer una primera aproximación teórica a dicha solución.

Partiendo del hecho en que un haz de luz puede ser desviado un ángulo Φ de su trayectoria lineal por medio de la deflexión foto-térmica debido a la presencia de un gradiente térmico, entonces sí se considera un dispositivo de múltiples reflexiones, el ángulo de deflexión total, cuando el haz ha sufrido el efecto de reflexión múltiple, será mayor que cuando solo realiza una

trayectoria lineal. Así, es posible entonces combinar las características de la deflexión fototérmica y de una celda Herriott de tal forma que si se piensa que esta última, puede ser integrada en un bloque de acrílico, debido a sus buenas características termo ópticas, la trayectoria que el haz recorrerá será mayor que la longitud del bloque de acrílico. En este sentido, tomando como base la configuración de espejos cilíndricos debido a sus características de desempeño, así como la facilidad de fabricación de los espejos en términos de la flexibilidad en el proceso de manufactura, es viable la posibilidad de integrar una celda Herriott de espejos cilíndricos en un bloque de acrílico. En la Figura 2.10 se muestra la propuesta de diseño de la celda Herriott en su aplicación al sensor de flujo de calor.

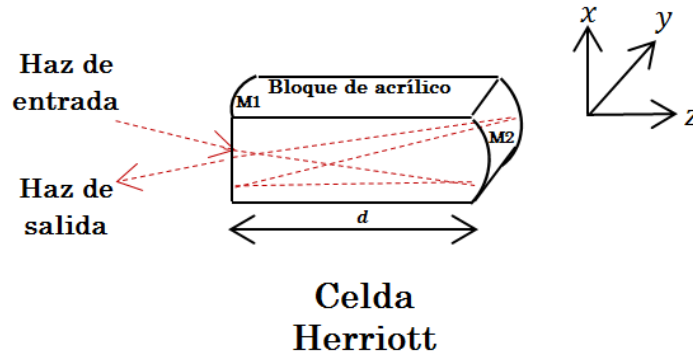


Figura 2.10. Propuesta de una celda Herriott integrada en un bloque de acrílico para el sensado de flujo de calor.

Ahora bien, si se induce una magnitud de ∇T perpendicular a la dirección de propagación del haz dentro de la celda, debido al esquema de múltiples reflexiones, el valor del ángulo de deflexión total Φ_{MR} puede ser considerado como la suma de la i -ésima deflexión que ocurre después de cada paso que el haz efectúa dentro de la celda, considerando que N es el número total de pasos que el haz realiza dentro de la celda Herriott.

$$\Phi_{MR} = \sum_{i=1}^N \Phi_i \quad . \quad (2.15)$$

Esquemáticamente la expresión anterior puede ser comprendida mediante la Figura 2.11, en donde se observa el ángulo θ_{MR} es consecuencia de la suma de las deflexiones que ocurren cada que el haz refleja en los espejos de la celda Herriott cuando una fuente calor Q se encuentra perpendicular al eje óptico z .

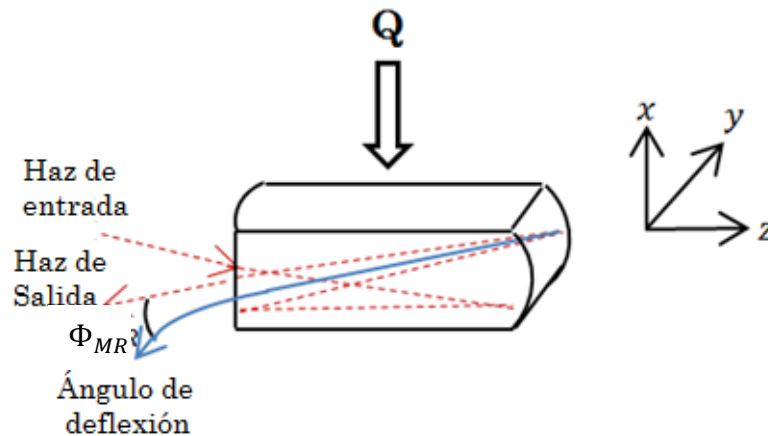


Figura 2.11. Diagrama del principio de operación del sensor de flujo de calor.

Es importante mencionar que en términos del sensado óptico, el ángulo de deflexión puede ser traducido como un decremento en potencia óptica si el haz el haz láser es considerado con un perfil Gaussiano y a su vez es provisto de una etapa de colimación. Por el momento ésta situación solo permite aclarar que el SFC es un sensor óptico de intensidad, en donde ésta será proporcional al flujo de calor aplicado.

Finalmente, las situaciones anteriormente planteadas, es decir, la combinación de una celda Herriott integrada en acrílico y su combinación con el efecto de la deflexión foto-térmica constituyen el principio de operación del sensor de flujo de calor propuesto.

Al finalizar este capítulo el lector cuenta con los conceptos teóricos básicos involucrados en el desarrollo del sensor óptico de flujo de calor. Partiendo desde el formalismo de transferencia de calor desde el punto de vista termodinámico, pasando por el principio de deflexión fototérmica, las celdas ópticas de camino largo y llegando al principio de operación del sensor. En el siguiente capítulo se presentará el diseño de la celda óptica Herriott de espejos cilíndricos tomando como base el que ésta será integrada en un bloque de acrílico. Es importante resaltar que la celda óptica constituye el elemento central del sensor propuesto ya que es considerado como el elemento transductor del mismo, por lo que el diseño y estudio exhaustivo de la celda Herriott es imprescindible.

REFERENCIAS DEL CAPÍTULO

- [1] Cengel Y. Ghajar A., *Transferencia de calor y masa*, Mc. Graw Hill, 4a. edición, p.p. 19-22, México, 2011.
- [2] Resnick R., Halliday D., Krane K. S., *Física Volumen 1*. Ed. Continental, 4a. edición, pp. 622-624, México, 2001.
- [3] Marín E., *Teaching thermal physics by touching*, Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol. 2, No. 1, México, 2008.
- [4] Almond D.P. and Patel P.M., *Photothermal science and techniques*, Chapman and Hall, 1st. Edition, pp. 622-624, 2001.
- [5] Sánchez C. *et al.*, *Planar integrated optical sensors based on the Mirage Effect*, Measurement Science and Technology, Mexico, 2010.
- [6] Herriott, D. and Schulte, H. *Folded Optical Delay Lines*. Applied Optics, vol.4 no.8, pp. 883-891, 1965.
- [7] McManus J.B., Kebabian P.L. and Zahnsier M.S., *Astigmatic mirror multipass absorption cells for long-path-length spectroscopy*, Applied Optics, vol. 34 no. 18, pp. 3336-3348, 1995.
- [8] Hao L.Y. *et al.*, *Cylindrical mirror multipass Lissajouss system for laser photoacoustic spectroscopy*, Review of Scientific Instruments 73, pp. 2079-2085, 2002.
- [9] Silver J.A., *Simple dense-pattern optical multipass cells*, Applied Optics, vol.44 no.31, pp.6545-6556, 2005.

CAPÍTULO 3. MODELADO Y DISEÑO DE LA CELDA HERRIOTT

El presente capítulo describe el diseño y modelado de la celda Herriott propuesta para su aplicación en el sensor de flujo de calor. Se presentan las ecuaciones y métodos numéricos empleados en el análisis de la misma, de tal forma que, mediante éstos es posible obtener los parámetros de diseño que permitirán determinar las características de fabricación con el objetivo de reducir el área activa del sensor y por lo tanto el tamaño de la muestra a caracterizar.

3.1. Modelado

Como se mencionó en el capítulo anterior, la configuración de la celda Herriott seleccionada para el sensor de flujo de calor corresponde a la de espejos cilíndricos. Con el objetivo de tener una representación esquemática del diseño propuesto, en la Figura 3.1 se muestra el diseño conceptual de una celda Herriott integrada en acrílico.

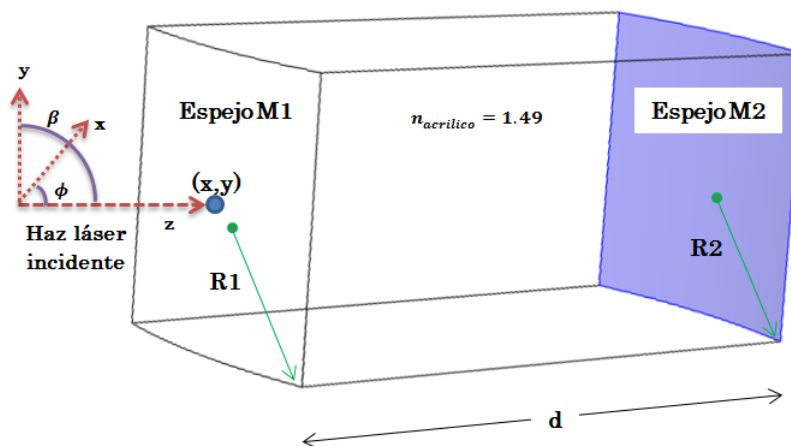


Figura 3.1. Esquema de la celda Herriott con espejos cilíndricos.

Inicialmente un haz de luz láser entra a la celda por un orificio en el espejo M1 colocado en la posición $x = y = z = 0$ con ángulo ϕ en el plano x - z y β en y - z . Idealmente, después de $N-1$ reflexiones en los espejos, el haz saldrá de la celda con un ángulo opuesto al de entrada por el mismo orificio. N corresponde al número de veces que el haz viaja entre ambos espejos, también llamado número de pasos.

Para analizar el comportamiento de la celda, es posible emplear el método matricial de propagación de rayos ^[1], en el cual es necesario considerar diversos elementos que permitirán

describir cómo es que el haz sigue la trayectoria dentro de la celda dados los parámetros d , $R1$, $R2$ y el índice de refracción del medio de propagación $n_{acrílico}$. El método matricial se basa en la aproximación paraxial, en donde se asume que los rayos incidentes en un espejo forman pequeños ángulos γ en radianes con el eje óptico, de tal forma que es posible hacer las siguientes aproximaciones:

$$\text{sen } \gamma = \gamma, \quad (3.1)$$

$$\text{tan } \gamma = \gamma. \quad (3.2)$$

Con el sistema de análisis matricial se logra trazar la trayectoria de cualquier rayo paraxial a través de un sistema óptico llevando a cabo una serie de multiplicaciones matriciales en las que intervienen matrices de transmisión, reflexión y refracción [2]. El esquema matricial resulta útil para analizar y simplificar sistemas ópticos complejos de manera analítica o numéricamente por esta razón es el método que se emplea en el análisis de celdas ópticas de largo camino. Es importante mencionar que dentro de las matrices debe ser considerado el índice de refracción del medio de propagación n , el cual para la celda Herriott propuesta corresponde al acrílico y su correspondiente valor es $n_{acrílico} = 1.49$ a la longitud de onda de 633 [nm].

- **Vector de posición inicial:**

Como su nombre lo indica, éste vector contiene la información de las coordenadas iniciales por donde el haz entra a la celda así como el valor de los ángulos con los que éste comenzará el recorrido.

$$r_0 = \begin{bmatrix} x \\ Sx \\ y \\ Sy \end{bmatrix}; Sx = \phi n \text{ y } Sy = \beta n. \quad (3.3)$$

- **Matriz de transmisión:**

Mediante este elemento es posible describir cómo es que el rayo viaja de un espejo al otro una distancia d , de tal forma que se asocia con el número de pasos N que efectúa el haz dentro de la celda. En este punto se debe precisar que cuando el haz realiza dos pasos consecutivos se dice que ha ocurrido un viaje redondo. En resumen, mediante ésta matriz es posible calcular la nueva ubicación del rayo una vez que se ha reflejado en alguno de los espejos, es decir cuando el haz se propaga a lo largo de la celda.

$$T1(d) = \begin{bmatrix} 1 & d/n & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d/n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.4)$$

- **Matriz de reflexión:**

Para calcular los ángulos con los que el rayo es reflejado en M1 y M2 se emplea la matriz de reflexión, en la cual debe ser considerado el radio de curvatura de cada uno de los espejos. Debido a que los espejos de la celda Herriott a diseñar son cilíndricos, la curvatura de éstos solo se encuentra en uno de los ejes a diferencia de un espejo esférico, de tal forma que para el sistema propuesto se tienen dos matrices de reflexión:

a) Para el espejo 1 con curvatura en el eje x :

$$\mathbf{R}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-2n}{R_1} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.5)$$

b) Para el espejo 2 con curvatura en el eje y :

$$\mathbf{R}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-2n}{R_2} & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.6)$$

En estas matrices de 4x4 representadas se puede apreciar el efecto de ortogonalidad entre las curvaturas de los espejos, el elemento (1,2) en la matriz \mathbf{R}_1 dice que la curvatura se encuentra en el eje x mientras que en la matriz \mathbf{R}_2 el elemento (3,4) asocia la curvatura al eje y . Es importante mencionar que el signo negativo de dichos elementos se debe a que la concavidad de los espejos.

- Matriz de rotación

La matriz de rotación contiene información del ángulo δ de rotación del espejo M2 en el plano x-y, es decir cuando el ángulo $\delta \neq 90^\circ$ el ángulo de reflexión en dicho espejo es modificado y debe ser recalculado mediante esta matriz.

$$T(\delta) = \begin{bmatrix} \cos(\delta) & 0 & \sin(\delta) & 0 \\ 0 & \cos(\delta) & 0 & \sin(\delta) \\ -\sin(\delta) & 0 & \cos(\delta) & 0 \\ 0 & -\sin(\delta) & 0 & \cos(\delta) \end{bmatrix}. \quad (3.7)$$

Así, para obtener el resultado de dicha modificación es necesario multiplicar a la matriz de rotación con la matriz de reflexión para M2 de tal forma que la ecuación que describe este efecto está dada por:

$$\mathbf{R}_2' = T(-\delta) \cdot \mathbf{R}_2 \cdot T(\delta). \quad (3.8)$$

- Ecuación para la matriz de para viaje completo del haz entre los espejos

Una vez definidos los elementos matriciales para el análisis numérico del sistema óptico, la combinación matemática de éstos resulta útil para describir el comportamiento del haz de luz dentro de la celda Herriott. Dentro de este contexto, se define la matriz total C la cual describe un viaje completo del haz:

$$C = \mathbf{R}_1 \cdot T(d) \cdot \mathbf{R}_2' \cdot T(d). \quad (3.9)$$

Haciendo uso de ésta matriz se puede obtener la información de la ubicación de cada una de las incidencias que ocurren en ambos espejos, de esta manera, la posición del haz y su ángulo de inclinación pueden ser calculados.

- Ecuaciones para las posiciones del haz en los espejos ^[3]

En el espejo M1 el vector de posición r_1 asociado a éste contiene la información sobre la posición y ángulos del haz respecto a los ejes coordenados. Para calcular a r_1 , se emplea la matriz que describe a éste, además de la matriz de reflexión correspondiente a M2, así como el vector de posición inicial, de tal forma que el cálculo está dado por:

$$r_1 = T(d) \cdot R_2' \cdot T(d) \cdot C^{0.5N-1} \cdot r_0, \quad (3.10)$$

mientras que la posición y ángulos del haz en el espejo lejano M2, pueden ser predichos de forma similar y están dados por la ecuación para un vector r_2 de tal forma que:

$$r_2 = T(d) \cdot C^{0.5N-1} \cdot r_0. \quad (3.11)$$

De las ecuaciones (3.10) y (3.11) el término $C^{0.5N-1}$ hace referencia a que el número total de reflexiones $N - 1$, se encuentra distribuido en los dos espejos que conforma a la celda. Desde el punto de vista de diseño, idealmente el valor de N puede ser cualquier número entero par tal que $N \geq 2$, dado que sea posible cumplir con el funcionamiento básico de la celda Herriott, el haz entra y sale por el mismo orificio; sin embargo en la práctica N estará totalmente definido por los valores d , $R1$, $R2$ y n ; así como por las dimensiones de los espejos. Por otro lado, numéricamente éstas ecuaciones permiten determinar la posición del haz en cada espejo después de cada paso, así, dado un cierto valor de N es posible implementar un algoritmo iterativo de cómputo para calcular las posiciones, las cuales formarán un patrón de incidencias y permitirán tener una aproximación numérica de diseño para la celda.

3.2. Parámetros de diseño

En el punto anterior se abordó el formalismo matemático necesario para entender cómo es que el haz se propaga dentro de una celda Herriott; sin embargo no sólo el método matricial es suficiente para diseñar a ésta, siendo necesarios entonces otros parámetros que permitan determinar el valor de N dados los valores de la separación entre espejos y los radios de curvatura, con lo que será posible obtener conjeturas acerca de la distancia total recorrida y determinar cuáles serán las dimensiones físicas que la celda Herriott debiera tener para cumplir con los requisitos de la aplicación en la que ésta será empleada.

3.2.1. Ángulo entre reflexiones

El recorrido del haz en las celdas ópticas de largo camino tipo Herriott puede ser descrito numéricamente conociendo la posición de las incidencias en los espejos, aunado a ello, es importante determinar un parámetro que indique como es que el haz deber ser reflejado de un espejo a otro, con lo cual se define un patrón gráfico de incidencias. El parámetro que hace referencia a dicho comportamiento del haz es llamado ángulo entre reflexiones o ángulo de reentrada. En otras palabras, este ángulo se asocia con la periodicidad con que el haz refleja en ambos espejos y por ende es el ángulo que existe entre reflexiones sucesivas.

La forma de calcular a los ángulos asociados a los ejes coordenados θ_x y θ_y , tiene su base en la convención de parámetros g para resonadores ^[4], para la cual se definen los parámetros normalizados g_1 y g_2 :

$$g_1 = 1 - \frac{d}{R_1} \quad \text{y} \quad g_2 = 1 - \frac{d}{R_2}. \quad (3.12)$$

Donde d es la longitud del resonador o celda Herriott en este caso, y R_1 , R_2 son los radios de curvatura de los espejos. Al analizar las proyecciones de dichos parámetros en los espejos se obtiene que forman un ángulo respecto al eje óptico z , del tal forma que es posible establecer las relaciones siguientes:

$$\theta_{Rx} = \text{acos}(g_1) \quad \text{y} \quad (3.13)$$

$$\theta_{Ry} = \text{acos}(g_2). \quad (3.14)$$

En la práctica, por facilidad en la fabricación de la celda óptica comúnmente los radios de curvatura en ambos espejos son iguales $R_1 = R_2 = R$, sí es así, existe entonces una sola ecuación que determina el ángulo entre reflexiones en los espejos ^[5], dicha ecuación está dada por:

$$\theta_R = \text{arc cos} \sqrt{\left(1 - \frac{d}{R}\right)}. \quad (3.15)$$

Los ángulos $\theta_{Rx,y}$ también pueden ser relacionados con el número de orbitas formadas por el patrón de incidencias ($M_{x,y}$) y el número de recirculaciones en la celda (N):

$$\theta_{Rx} = \pi M_x / N \quad \text{y} \quad (3.16)$$

$$\theta_{Ry} = \pi M_y / N. \quad (3.17)$$

Lo anterior se cumple cuando el ángulo de rotación del espejo M2 $\delta = 90^\circ$, esto es, los espejos están ortogonalmente alineados respecto al eje óptico; sin embargo cuando uno de los espejos se rota un ángulo $\delta \neq 90^\circ$, los ángulos de reflexión deben ser calculados en función de los parámetros d , f y δ cómo lo describen las siguientes ecuaciones:

$$\cos(2\theta_{Rx}) = \frac{1}{2}(F - \zeta) \quad \text{y} \quad \cos(2\theta_{Ry}) = \frac{1}{2}(G + \zeta), \quad (3.18)$$

donde:

$$F = 2 \left(\frac{d}{f} \cos^2(\tau) - 1 \right)^2 - \left(\frac{d}{f} \right)^2 \cos^2(\tau), \quad (3.19)$$

$$G = 2 \left(\frac{d}{f} \sin^2(\tau) - 1 \right)^2 - \left(\frac{d}{f} \right)^2 \sin^2(\tau), \quad (3.20)$$

$$\zeta = \frac{1}{2}(G - F) \left\{ -1 + \left[1 - \frac{4\epsilon^2}{(G-F)^2} \right]^{1/2} \right\}, \quad (3.21)$$

$$\epsilon = -\left(\frac{d}{f}\right)^2 \sin(4\tau) \quad \text{y} \quad \tau = \frac{\delta}{2}. \quad (3.22)$$

Es importante recordar que estas formulaciones son válidas para espejos con iguales radios de curvatura. De las ecuaciones anteriores es fácil demostrar que para el caso particular en donde $\delta = 90^\circ$, los ángulos $\theta_{Rx,y}$ son iguales.

3.2.2. Número de orbitas M

El parámetro denotado por $M_{x,y}$ o simplemente M es de vital importancia para el diseño de una celda Herriott. Dicho parámetro hace referencia al número de ciclos que el haz genera en el patrón de incidencias en los espejos, entendiendo como un ciclo cuando el número de incidencias completa 360° . Los valores de los índices M_x y M_y mantienen una estrecha relación con el número de recirculaciones del haz N y el comportamiento de éste al salir de la celda; sin embargo, no es posible calcularlos directamente de manera analítica. Según lo propuesto por los diseñadores de celdas Herriott [5], lo que se puede estimar es la relación con el ángulo entre reflexiones y el valor de N , de tal forma que dependiendo de dicha relación se tendrá un conjunto de posibles soluciones o valores para $M_{x,y}$. Para ello, si se toman las ecuaciones (3.16) y (3.17), despejando N e igualando las ecuaciones, se tiene que:

$$\frac{\pi M_x}{\theta_{Rx}} = \frac{\pi M_y}{\theta_{Ry}}, \quad (3.23)$$

simplificando y reacomodando términos finalmente se llega la expresión:

$$\frac{\theta_{Rx}}{\theta_{Ry}} = \frac{M_x}{M_y}. \quad (3.24)$$

Ahora bien, de lo propuesto en las secciones anteriores, los ángulos $\theta_{Rx,y}$, ecuaciones (3.16), (3.17) y (3.18) pueden ser calculados de manera analítica si se conoce d y R , entonces, se puede calcular el cociente de dichos ángulos, el cual, deberá ser igual para el cociente de los índices $M_{x,y}$, logrando así estimar los valores numéricos de éstos y que deberán cumplir con las condiciones de estabilidad del sistema. En este contexto es conveniente mencionar entonces que, el valor de N puede ser propuesto por el diseñador y cumplir simultáneamente con todas las especificaciones de diseño.

3.2.3. Número de pasos N

Como se mencionó anteriormente el valor de N teóricamente puede ser propuesto, sin embargo experimentalmente este es determinado por las características físicas propias de la celda: coeficiente de reflexión de los espejos, área de éstos y la distancia d . Numéricamente es posible obtener el valor de N a partir de la ecuación (3.16), donde despejando a N resulta:

$$N = \pi M / \theta_R, \quad (3.25)$$

en donde los valores de $M_x = M_y = M$ pueden ser fijados por el diseñador y el valor de θ_R calculado previamente con los valores de d y R .

Se puede notar que el único parámetro involucrado que no puede ser calculado analíticamente es M , de tal forma que para realizar un análisis de desempeño de la celda, dicho valor puede ser variado siempre y cuando éste sea entero. Dicho análisis entregará una infinidad de soluciones pero es responsabilidad del diseñador ajustarlo de acuerdo a las necesidades.

El número de recirculaciones tiene también injerencia directa con un parámetro de vital importancia en el diseño de las celdas ópticas de camino largo, la trayectoria recorrida ϑ por el haz dentro de la celda. En este sentido el valor de N es quien determina ϑ de la siguiente manera:

$$\vartheta \approx N \cdot d . \quad (3.26)$$

Es claro que al multiplicar el número de veces que el haz viaja dentro de la celda por la longitud de esta, el resultado será la trayectoria total recorrida. En la aplicación que se pretende dar a la celda Herriott, este parámetro es determinante para diseñar a la celda y obtener características de sensibilidad y tamaño compacto en el sensor de flujo de calor mediante la obtención de las dimensiones físicas de la celda a través del modelado y simulaciones numéricas.

3.2.4. Condiciones de estabilidad y operación

Analizando la ecuación (3.15) desde el punto de vista matemático es claro que al tener una función que involucra una potencia fraccionaria - raíz cuadrada-, el dominio de ésta se encuentra restringido con el fin de evitar soluciones que involucran números complejos, dicho de otra manera, el valor de la separación entre espejos d debe ser acotado con el fin de lograr un criterio de estabilidad en la celda, entonces la relación que la define es:

$$0 \leq d \leq R . \quad (3.27)$$

Es importante mencionar un aspecto de suma relevancia al considerar las dimensiones de d y R en el cálculo del método matricial de propagación de rayos de tal forma que la matriz C que describe a un viaje completo del haz dentro de la celda deberá ser igual a la matriz identidad cuando $C^{0.5N}$, esto es a la mitad del número de pasos, dicha condición se logra cuando $d = R/2$ y $\delta = 90^\circ$; si el espejo M2 está rotado un ángulo δ entonces será necesario ajustar el valor de d de tal forma que se cumpla la condición $C^{0.5N} = I$.

- Condiciones del haz a la entrada de la celda

Para una celda Herriott con espejos cilíndricos se ha demostrado, que teóricamente es posible tener dos distintas condiciones para la entrada del haz a la celda [5], éstas son: 1) por el centro del espejo frontal y alineado respecto al eje óptico y 2) fuera del eje óptico y en un extremo del espejo frontal, a continuación se sintetizan las consideraciones necesarias para emplear ambos casos.

a) Entrada del haz en el centro del espejo M1

En la práctica es conveniente ajustar el ángulo de entrada del haz de tal forma que la primera incidencia en el espejo lejano se encuentre lo más cerca al borde de éste, con ello la eficiencia del sistema aumenta y se logra concentrar el mayor número de reflexiones en el área del espejo.

En puntos anteriores se mencionaron los factores $M_{x,y}$, éstos son los encargados de limitar las condiciones de operación de la celda para un cierto valor de número de reflexiones, por tal motivo es conveniente resumir los posibles casos que se pueden presentar para los valores de $M_{x,y}$ y su relación con N . En la Tabla 3.1 se muestran las combinaciones posibles así como su descripción.

Tabla 3.1. Combinaciones posibles para los factores M_x y M_y

Combinación	M_x	M_y	N	Descripción
1	Entero par	Entero par	Entero	El haz sale por el mismo lugar donde entró pero con ángulo contrario.
2	Entero par	Entero par	$N/2=\text{par};$ $N:\text{entero}$	El haz en la $N/2$ posición se encuentra justo en el centro del espejo M1.
3	Entero par	Entero par	$N/2=\text{impar};$ $N:\text{entero}$	El haz en la $N/2$ posición se encuentra justo en el centro del espejo M2.
4	Entero impar	Entero impar	Entero	El haz siempre sale exactamente a la fuente de luz.
5	Entero par	Entero impar	Entero	El haz sale en algún lugar del plano x-y, dicho lugar no es posible determinarlo <i>a priori</i> .
6	Entero impar	Entero par	Entero	El haz sale en algún lugar del plano x-y, dicho lugar no es posible determinarlo <i>a priori</i> .

De la tabla anterior, es posible decir que las combinaciones 1,2 y 3 son las únicas de interés para el propósito del sensor de flujo de calor ya que es necesario conocer por donde saldrá el haz de la celda, además de que permitirá saber cómo es que deberán disponerse la fuente de luz y el detector de ella en el arreglo experimental del sensor.

b) Entrada del haz fuera del eje óptico

En el caso donde la entrada del haz está fuera del eje óptico, las condiciones iniciales del haz de entrada, en cuanto al ángulo de inclinación se refiere, son aquellas que causan que el patrón de incidencias se vea únicamente limitado a las superficies de los espejos. A diferencia del caso anterior, para una entrada del haz fuera del eje óptico, sólo existe una combinación posible, esto es, cuando $M_{x,y}$ son enteros pares con $N/2$ entero impar y el patrón de incidencias formará una circunferencia para $\delta = 90^\circ$ cuando $d = R/2$ como en el caso de la celda Herriott de espejos esféricos. Sin embargo, es preciso comentar que para celdas alineadas respecto al eje óptico, la entrada del haz fuera de éste trae consigo inestabilidad en el sistema ya que las incidencias ocurren cerca del orificio de entrada lo cual propicia que la alineación del sistema se torne complicada y el patrón de incidencias no sea claramente distinguido.

Relación entre M_x, M_y, N y d [5]

Finalmente, es conveniente entender como las variables M_x, M_y, N y d se relacionan entre sí en el desempeño de la celda Herriott. Pensando en un caso en donde se tiene un valor $N/2$ entero

impar, aunque las reglas aplican para las otras combinaciones descritas en la tabla 3.1, se establece una condición más para cumplir con la estabilidad del sistema (3.27), dicha condición es:

$$M_x + M_y \leq N. \tag{3.28}$$

Desde un punto de vista matemático el sistema de espejos puede establecerse si se conocen los valores de $M_{x,y}$ de tal forma que para ellos es posible asociar un valor del ángulo de rotación δ . En la Tabla 3.2 se muestra las correspondencias mencionadas.

Tabla 3.2. Correspondencia entre $M_{x,y}$ y δ

Relación entre M_x, M_y	Valor de δ
$M_x > M_y$	$\delta < 90^\circ$
$M_x < M_y$	$\delta > 90^\circ$
$M_x = M_y$	$\delta = 90^\circ$

Generalizando, para un determinado N , pequeños valores de M_x y M_y corresponden a pequeños valores de la distancia d . Cuando $d \sim R/2$, la suma de los valores M_x y M_y es cercana a $N/2$, por otra parte la diferencia $M_x - M_y$ puede ser considerada como una medida del ángulo de rotación δ , concluyendo que grandes diferencias corresponden a soluciones cerca de $\delta = \pi$ ó 0 , y pequeñas diferencias tienen soluciones cercanas a $\delta = 90^\circ$.

3.2.5. Patrones de incidencias

Recordando, el patrón de incidencias formado en una celda Herriott hace alusión a una figura con geometría definida la cual permite observar y obtener conjeturas de su desempeño. Básicamente se tienen dos tipos de patrones que el haz puede formar en una celda de espejos cilíndricos, estos dos casos se dan precisamente para $\delta = 90^\circ$ y $\delta \neq 90^\circ$.

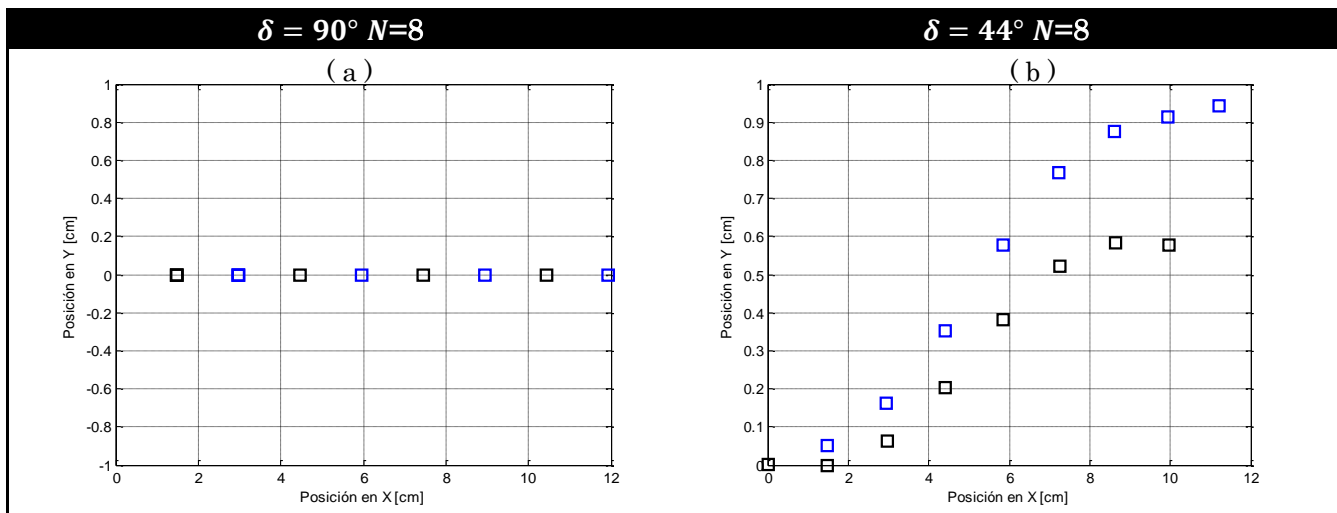


Figura 3.2. Patrones formados por las incidencias con $N=8$ para a) $\delta = 90^\circ$ y b) $\delta = 44^\circ$.

En este punto es necesario comentar que para el ángulo de rotación igual a 90° los patrones siempre formarán una línea recta sobre el eje en donde se encuentre el radio de curvatura del espejo M2, por otra parte cuando el ángulo sea distinto de los 90° el patrón formará figuras de Lissajous ^[5,6]. En este último caso el número de órbitas M o figuras está dado por el número de recirculaciones N . Sin embargo, en la Figura 3.2 (b) no es posible observar figuras de Lissajous, esto es debido a que el número de recirculaciones es relativamente pequeño y para poder apreciar el efecto se necesita un mayor de número de pasos, siendo así, en la Figura 3.3. se muestran los patrones de incidencias para los mismos ángulos de rotación que en el caso anterior pero con un número mayor de recirculaciones.

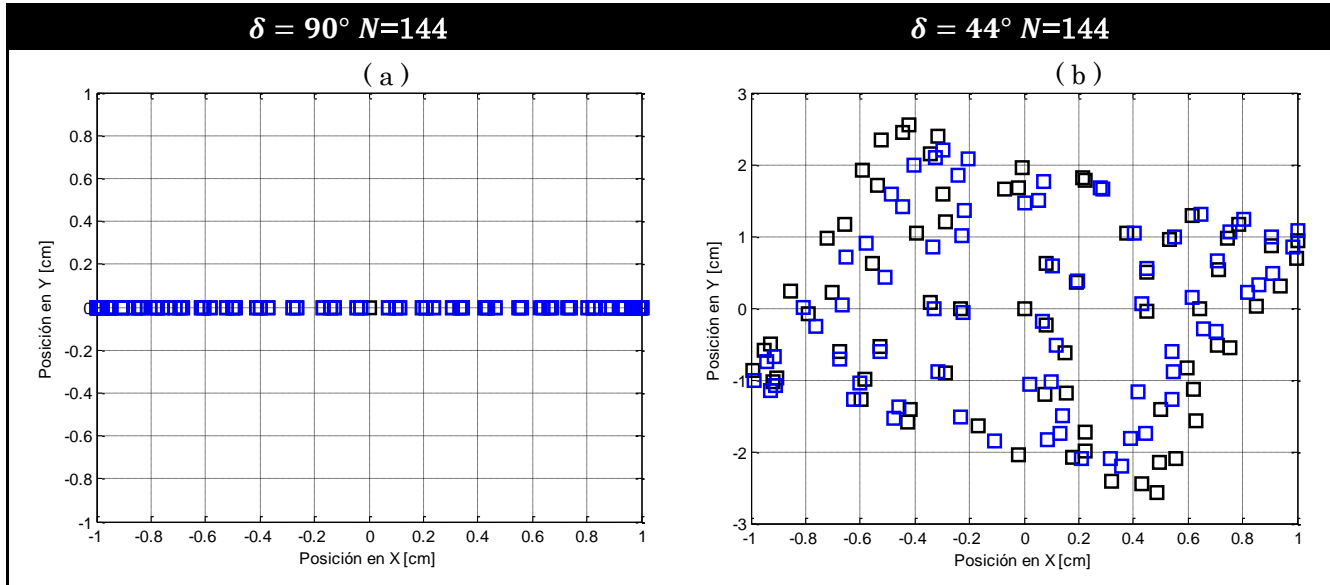


Figura 3.3. Patrones formados por las incidencias con $N=144$ para a) $\delta = 90^\circ$ y b) $\delta = 44^\circ$.

Al analizar las figuras 3.2 y 3.3 es posible observar el comportamiento de la celda mediante el patrón de incidencias formado. Al respecto se puede observar de manera relevante que para tener un patrón de incidencias en forma de línea recta, el ángulo δ no forzosamente debe ser 90° , pero si un múltiplo entero de éste, es decir:

$$\delta_k = k\delta \text{ siendo } k = 1,2,3 \dots m . \quad (3.29)$$

3.3. Simulación de la celda

Con el objetivo de modelar numéricamente a la celda que se desea diseñar, se desarrolló un algoritmo de simulación para la celda Herriott empleando la plataforma MATLAB. En dicho algoritmo se programaron todas las ecuaciones y matrices que describen a la celda óptica. La implementación del algoritmo se fundamenta en el hecho de poder obtener los valores de los parámetros que deberán ser considerados en la posterior fabricación de la celda así como para comprobar que una vez fabricada ésta, el comportamiento del haz en su interior corresponda a las aproximaciones numéricas realizadas mediante el algoritmo además de poder tener la representación gráfica del patrón de incidencias en ambos espejos. En las Figuras 3.4 y 3.5 se muestra el patrón de incidencias para una celda Herriott para valores conocidos de separación entre espejos, radios de curvatura, ángulo de rotación, ángulo de entrada del haz así como número de pasos.

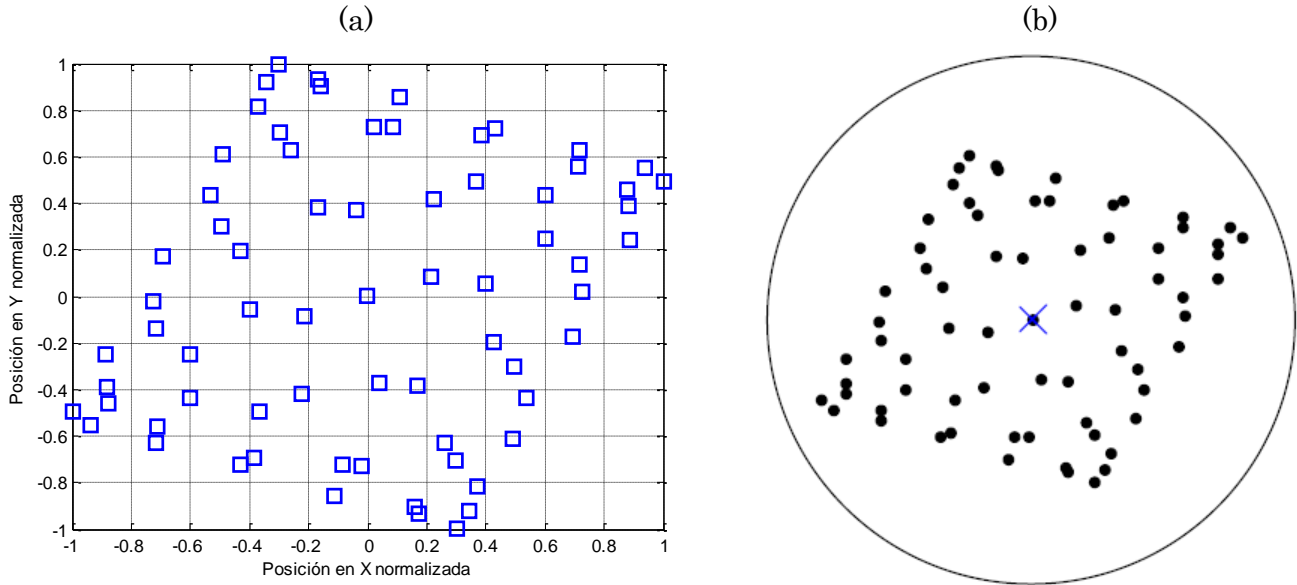


Figura 3.4. Patrón de incidencias en el espejo frontal para una celda con: $N=138$, $d=110.32$ [mm], $f_1=f_2=106.9$ [mm], $\delta=44.12^\circ$ y $\phi=-9.29^\circ$.

La Figura 3.4(a) representa el patrón de incidencias obtenido mediante el algoritmo de simulación programado, mientras que la Figura 3.4(b) muestra el patrón obtenido por los autores de la referencia [3], ambas corresponden a los parámetros mostrados al pie de dicha figura. Las posiciones de las incidencias se encuentran normalizadas respecto a su valor máximo debido a que en éste momento las dimensiones de los espejos no es relevante puesto que el énfasis de este estudio es mostrar el comportamiento del patrón de incidencias. Además, es posible comparar a ambas figuras en términos de que, tanto el número de incidencias en el espejo como la distribución de éstas son similares.

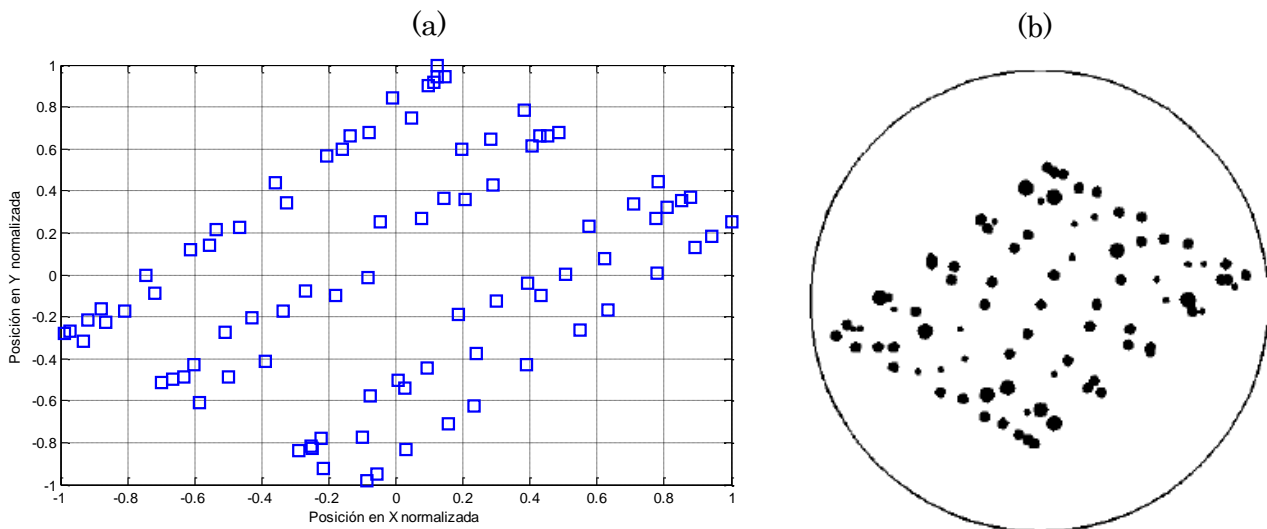


Figura 3.5. Patrón de incidencias en el espejo frontal para una celda con: $N=174$, $d/f=1.13$ y $\delta=98.3^\circ$

De la misma forma que en la Figura 3.4, la figura anterior muestra la comparación entre los patrones de incidencias obtenidos mediante el algoritmo desarrollado y el presentado en la

literatura [3]; sin embargo la Figura 3.5 emplea distintos parámetros de desempeño para la celda Herriott, por ejemplo el parámetro d/f hace referencia a la relación que existe entre la separación entre espejos d y la distancia focal del espejos f en donde $f = R/2$.

En resumen, las figuras anteriores muestran que el algoritmo de simulación cumple con las expectativas planteadas, al dar como resultado un patrón de incidencias que permitirá observar cómo es que el haz describe su trayectoria en la celda Herriott y con ello determinar si los parámetros de diseño cumplen con los requerimientos necesarios en la aplicación propuesta.

3.3.1. Curvas de diseño

El algoritmo mencionado anteriormente basa su funcionamiento en el método matricial para trazo de rayos de tal forma que permite obtener el patrón de incidencias formado en los espejos de la celda; sin embargo respecto a los parámetros de desempeño de ésta los valores arrojados son cuando los radios de curvatura, la separación entre espejos y el número de órbitas son fijados por el usuario, en otras palabras, funciona para una celda cuyos valores se conocen.

Uno de los principales objetivos de este trabajo consiste en diseñar una celda óptica Herriott que cumpla con los requerimientos de funcionamiento del sensor de flujo de calor para lo cual el parámetro del que se debe partir es la trayectoria recorrida por el haz de tal forma que ésta sea de aproximadamente 3[cm] lo cual implica que las dimensiones físicas del dispositivo se encuentren en dicho orden de magnitud. Sí toma como base el valor de ϑ como parte aguas en el diseño de la celda, entonces es posible analizar las situaciones en donde la combinación de los demás parámetros den como resultado el valor de ϑ buscado.

Una ampliación al algoritmo de simulación resulta entonces ser útil para obtener curvas de diseño al variar algunos de los parámetros de funcionamiento de la celda, así observando el comportamiento que siguen las curvas es posible determinar el rango de posibles soluciones que cumplan con las especificaciones de diseño; además una vez obtenidos los resultados de dicha simulación será posible determinar la factibilidad de fabricación de la(s) celdas que se deseen implementar.

Antes de continuar con los resultados numéricos, es momento de precisar un aspecto importante en los criterios de diseño que se proponen, las simulaciones numéricas que se muestran son consideradas para valores de d en el rango 0 a 5 [cm] puesto que ϑ deberá ser menor o igual a los 10 [cm], de tal forma que si se plantea el caso donde $d = 5$ [cm], $N = 2$ y $M = 1$, la trayectoria recorrida por el haz será de 10 [cm] lo cual se encuentra dentro del rango de interés planteado en el diseño de la celda. Además es necesario mencionar que la resolución de d es de 0.1 [cm] puesto que ésta corresponde a la resolución de la máquina de corte láser con la que se cuenta para maquinar los bloques de acrílico que conforman a las celdas ópticas. De igual forma los valores de los radios de curvatura de los espejos se consideran de 1 a 5 [cm] tomando en cuenta los criterios de fabricación y a su vez recordando que la celda debe contar con la cualidad de ser compacta.

- Ángulo entre reflexiones como función de la separación entre espejos

Recordando que el valor del ángulo entre reflexiones θ_R está función de la separación entre espejos d y los radios de curvatura $R1 = R2$, entonces es posible analizar como como es que θ_R

cambia conforme los otros dos parámetros también lo hacen y de esta manera ubicar el rango de valores en donde θ_R tenga la mayor estabilidad en el entendido que dicho valor permitirá obtener el número de pasos del haz y por ende la trayectoria total recorrida. En la Figura 3.6 se muestra la curva de θ_R en función de d .

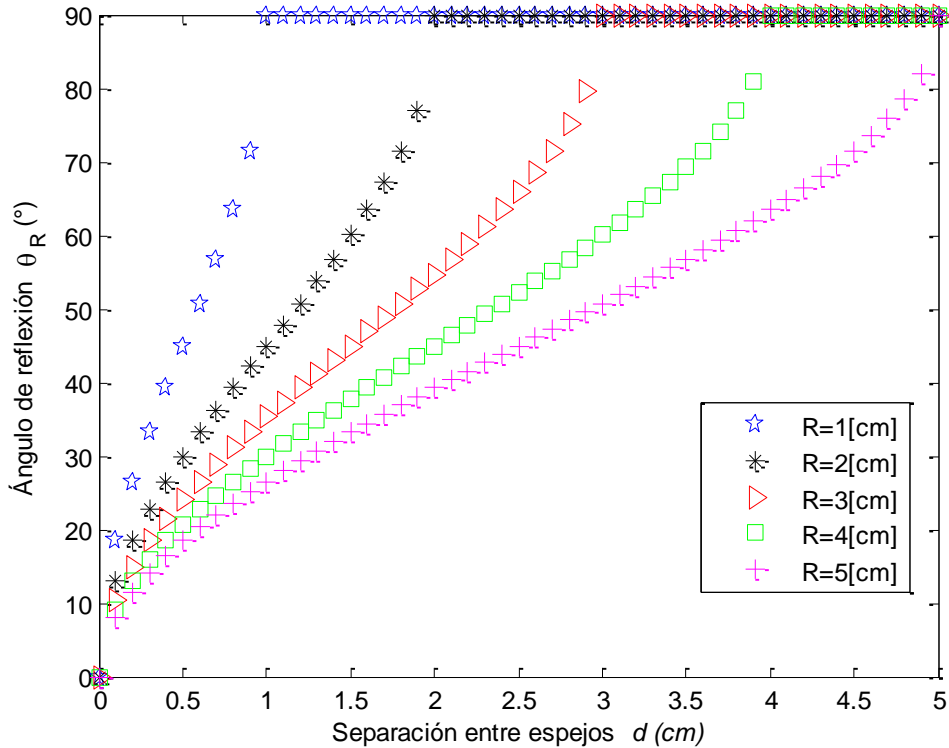


Figura 3.6. Curva para el ángulo entre reflexiones en función de d para diferentes valores de R .

El comportamiento de la figura 3.6 muestra cómo es que al incrementar la separación entre los espejos y los radios de curvatura de éstos, el ángulo θ_R también lo hace; sin embargo se debe notar que dichas variaciones crecen en menor medida conforme el valor de $R_1 = R_2 = R$ es menor. Existe un compromiso entre los valores de R y d puesto que se debe cumplir con la condición de estabilidad de la celda y entre más corta sea la separación entre espejos y más pequeño el radio de curvatura, más rápido se alcanzará la inestabilidad del dispositivo, mostrada gráficamente en las parte planas de la gráfica cuando $\theta_R=90[^\circ]$.

- Variación del índice M dado un valor de R

El valor del número de orbitas M formadas por el patrón de incidencias en los espejos permite determinar el número de pasos del haz, por ende es necesario realizar las simulaciones que permitan concluir el comportamiento de N si θ_R cambia para distintos valores de M . En la Figura 3.7 se muestran las curvas del número de pasos como función del ángulo entre reflexiones para valores de θ_R obtenidos en la Figura 3.6 en donde existió una variación en el radio de curvatura.

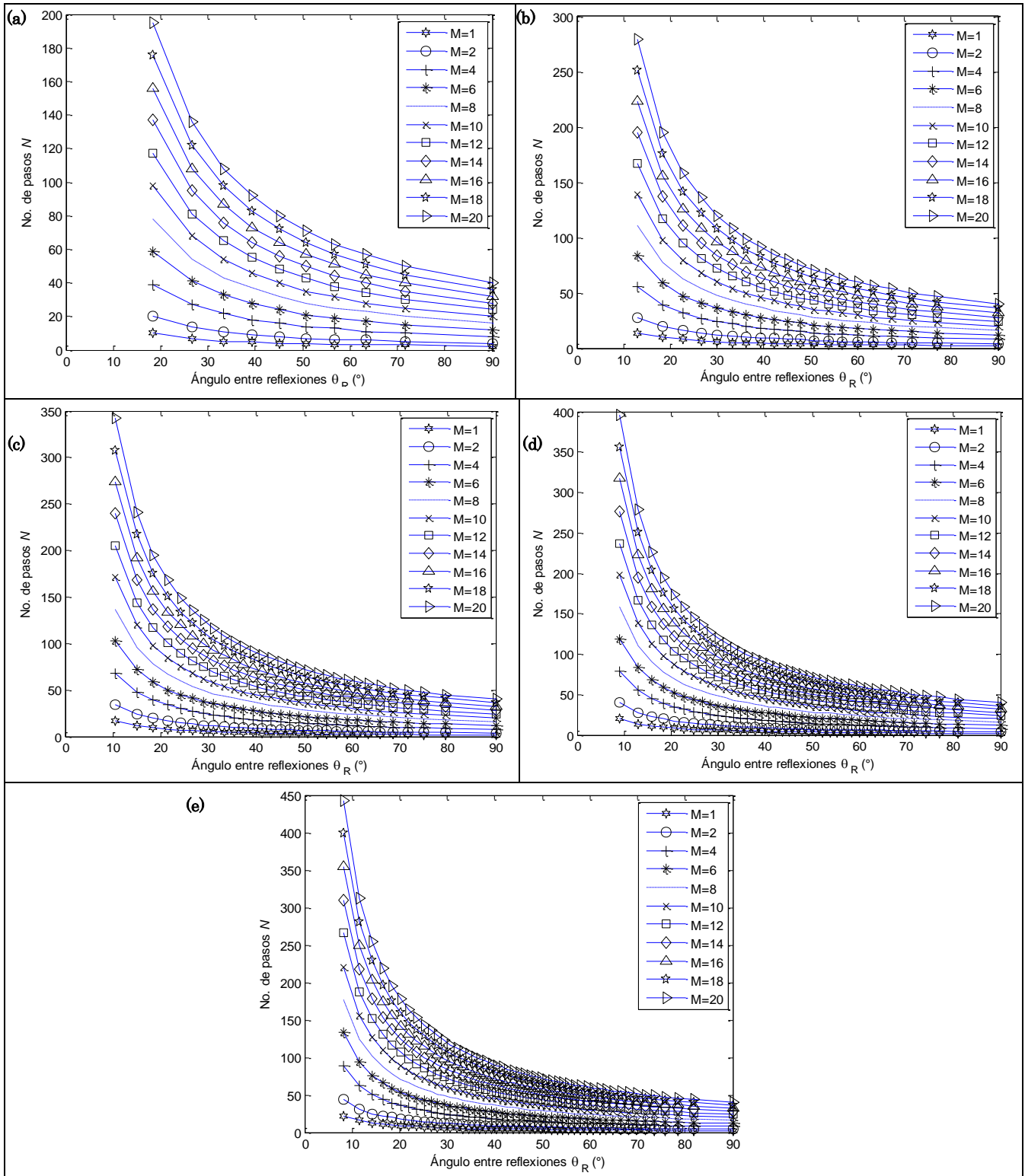


Figura 3.7. Curvas para el número de pasos en función de θ_R . (a) Para $R = 1$ [cm], (b) para $R = 2$ [cm], (c) para $R = 3$ [cm], (d) para $R = 4$ [cm] y (e) para $R = 5$ [cm].

Sí se analizan las curvas anteriores se observa que entre mayor es el radio de curvatura hay más valores posibles para θ_R , así, de acuerdo a la ecuación (3.25) dichos valores se asocian a la cantidad de datos de N , es decir un mayor número de órbitas M , corresponde a un mayor número de pasos N . Por otro lado, esto se relaciona de tal forma que el ángulo entre reflexiones cada vez se hace más pequeño dando lugar a mayor número de pasos, lo que gráficamente se presenta como un decaimiento de segundo orden en el número de recirculaciones cuando el ángulo entre reflexiones aumenta mientras que también el valor de N es mayor conforme el número de ciclos M crece. El comportamiento de las curvas se debe a que el número de pasos es inversamente proporcional al número de órbitas, ecuación (3.25), y aunque dicha relación es lineal, el término N , tiene relación directa con el ángulo entre reflexiones, cuyo cálculo no es lineal, ecuación (3.15).

Finalmente, en el contexto del diseño que se propone, las curvas de la figura 3.6 permiten concluir el número de órbitas que el diseño requiere y su asociación con el número de pasos del haz dentro de la celda ya que como se mencionó anteriormente el dispositivo tendrá que ser acotado dentro de los límites de fabricación que se tienen, por ende, no es necesario tener un valor de M grande e incluso con $M = 1$ la celda diseñada cumple con los requisitos de estabilidad y funcionamiento para el sensor.

Número de pasos en función de la separación entre espejos

Si se fija el parámetro adimensional M con un valor igual a la unidad, es posible plantear las posibles soluciones que se encuentran cerca del punto de interés, $3 \leq d \leq 10$ [cm], únicamente variando el radio de curvatura de los espejos, con ello, las curvas que representan esta situación son mostradas en la Figura 3.8.

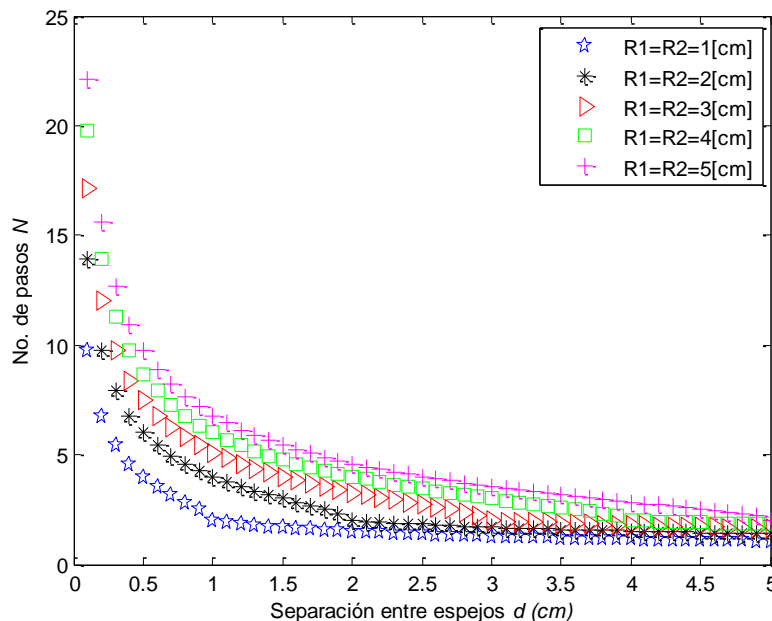


Figura 3.8. Curvas para el número de recirculaciones en función de d para diferentes valores de R .

De las curvas de la figura 3.8 es que cuanto más cerca se encuentra un espejo del otro considerando sus radios de curvatura iguales $R_1 = R_2$, el valor de N es mayor, es decir el valor de

θ_R es más pequeño. Gráficamente se observa que el número de recirculaciones decrece exponencialmente; sin embargo también es importante notar que cuanto menor es el valor de los radios, el cambio en el valor de N es menos significativo, lo cual será un factor a tomar en cuenta en la fabricación de la celda ya que deberán considerarse tolerancias al momento de llevarla a cabo.

El análisis de los parámetros N como función de d es determinante para conocer cuáles serán las dimensiones de la celda considerando que las que se tomarán en cuenta para la fabricación de ésta son: los radios de curvatura y la separación entre espejos. El hecho de enfatizar en estas curvas es debido a que para calcular la trayectoria total recorrida hay que recordar que $\vartheta = N \cdot d$, lo que implica que éstos deberán ser los valores que tendrán que determinarse concretamente para cumplir con los requerimientos para la aplicación de la celda.

Trayectoria recorrida en función de la separación entre espejos

Una vez que se analizó como es que la celda se comporta dados los parámetros más importantes que intervienen en su diseño; sin embargo es momento de acotar aún más los valores que dichos parámetros pueden tener, de tal forma que permitan definir a las dimensiones físicas con las que podría fabricar al dispositivo. Sí se toma como parámetro base a ϑ entonces es conveniente mostrar cómo es su comportamiento respecto a la separación entre espejos pero únicamente considerando valores de d entre 0.5 y 5 [cm], es decir éstos serán los valores de interés para la fabricación de una celda Herriott compacta. En la Figura 3.9 se muestra la representación gráfica de la trayectoria total recorrida ϑ en función de la separación entre espejos o longitud de la celda.

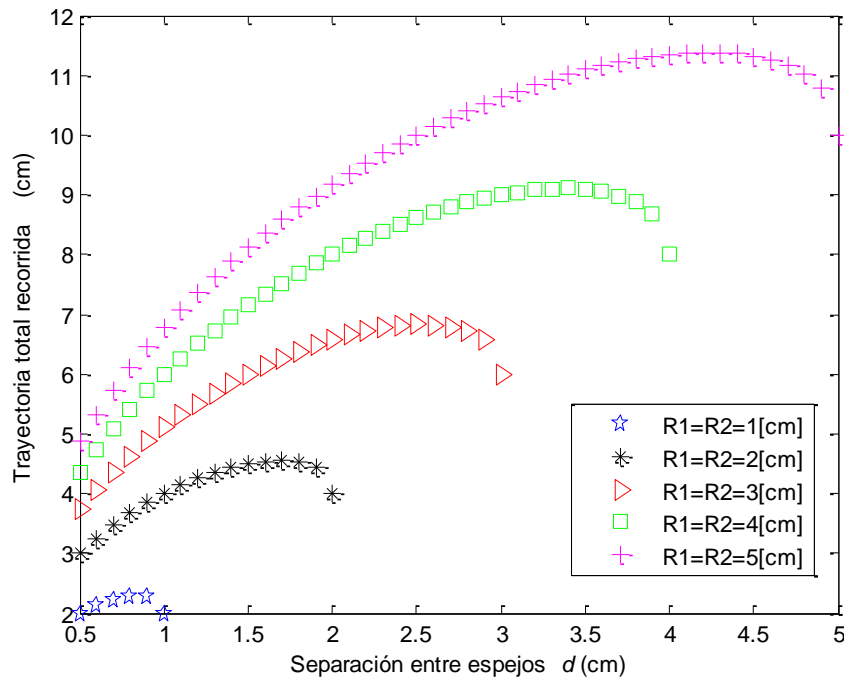


Figura 3.9. Curvas para la distancia total recorrida en función de d para diferentes valores de R .

Se observa que la distancia total recorrida presenta un crecimiento gradual cuando la separación entre espejos aumenta, de igual forma se nota como al incrementar los radios de

curvatura el valor de ϑ también lo hace. Cada punto de las curvas corresponde a un valor de N calculado a partir de los valores d , R y θ_R , es decir conforme aumenta el número de pasos, la trayectoria recorrida por el haz también lo hace. Un punto importante a notar en la gráfica es que dependiendo del valor del radio de curvatura, el valor de ϑ es se ve limitado puesto que es importante cumplir con la condición de estabilidad $d \leq R$, así el máximo valor que se puede tener para d corresponde al valor del radio de curvatura de los espejos.

3.4. Diseño de una celda Herriott integrada en acrílico

Recordando que la aplicación que se le quiere dar a la celda de camino óptico largo tipo Herriott es para un sensor de flujo de calor en donde un haz de luz deberá propagarse en acrílico, es necesario entonces hacer el diseño de una celda integrada en dicho material. Por otra parte es importante mencionar que el diseño deberá realizarse tomando en cuenta que la trayectoria recorrida por el haz dentro de la celda sea menor a 10 [cm] y con una separación entre espejos máxima de 1.5 [cm].

Como resultado de analizar detalladamente las curvas de diseño se tiene entonces una amplia gama de posibles combinaciones para obtener las condiciones de operación que la celda deberá tener, de esta manera resulta práctico sólo extraer los casos que brinden un resultado significativo para el diseño y que posteriormente puedan ser fabricados. A continuación se muestran 3 casos de estudio para el diseño de celdas Herriott con el objetivo de evaluar su desempeño y así determinar cuáles serán las dimensiones y características que éstas deberán tener de tal forma que permitan concluir la factibilidad de fabricación. Los casos presentados cumplirán con las condiciones de estabilidad y desempeño haciendo especial énfasis en que la celda estará integrada en acrílico y una vez que ésta sea fabricada sus parámetros no podrán ser modificados, es decir no será posible ajustar los valores de d , R_1 , R_2 y δ , por lo que desde este momento se asume que dichos parámetros cumplirán con las condiciones de estabilidad: $0 \leq d \leq R$ y $d = R/2$.

3.4.1. Diseño 1: Celda con espejos ortogonalmente alineados

Esta primera propuesta de diseño considera el efecto de ortogonalidad en los espejos, en donde la curvatura del espejo M1 está orientada en el eje y y mientras que el radio del espejo M2 se encuentra en el eje x . En la Figura 3.10 se presenta el diagrama esquemático para el caso propuesto.

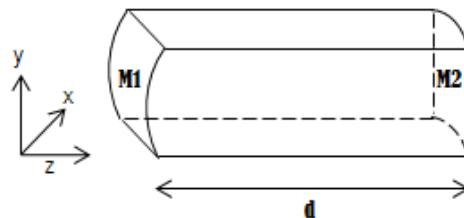


Figura 3.10. Celda Herriott integrada con espejos ortogonalmente alineados.

Los parámetros considerados en el diseño son:

- $R1 = R2 = 3[\text{cm}]$
- $d=1.5[\text{cm}]$
- $x = 0, y = 0$
- $\phi = 1^\circ, \beta = 0^\circ$
- $\delta = 90^\circ$
- $M_{xy} = 1$
- $n=1.49$

Aplicando el algoritmo de simulación numérica anteriormente planteado se obtuvieron los resultados de desempeño de la celda se presentan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Parámetros de desempeño de una celda Herriott integrada con espejos ortogonalmente alineados (Diseño 1).

Parámetro	Valor
θ_{Rx}	45°
θ_{Ry}	45°
N	4
Estabilidad: $N/2$	2 (par)
Estabilidad: $M_x + M_y < N$	$2 < 4$
ϑ	6 [cm]

Al analizar la tabla anterior es posible observar que las condiciones de estabilidad en la celda se cumplen. Por otro lado, el parámetro de interés en la aplicación de la celda se cumple al tener que $\vartheta = 6[\text{cm}]$ y ser menor a 10 [cm]. Con la finalidad de tener la representación gráfica del patrón de incidencias formado en los espejos de la celda, en la Figura 3.11 se muestra dicho patrón para este primer caso de estudio.

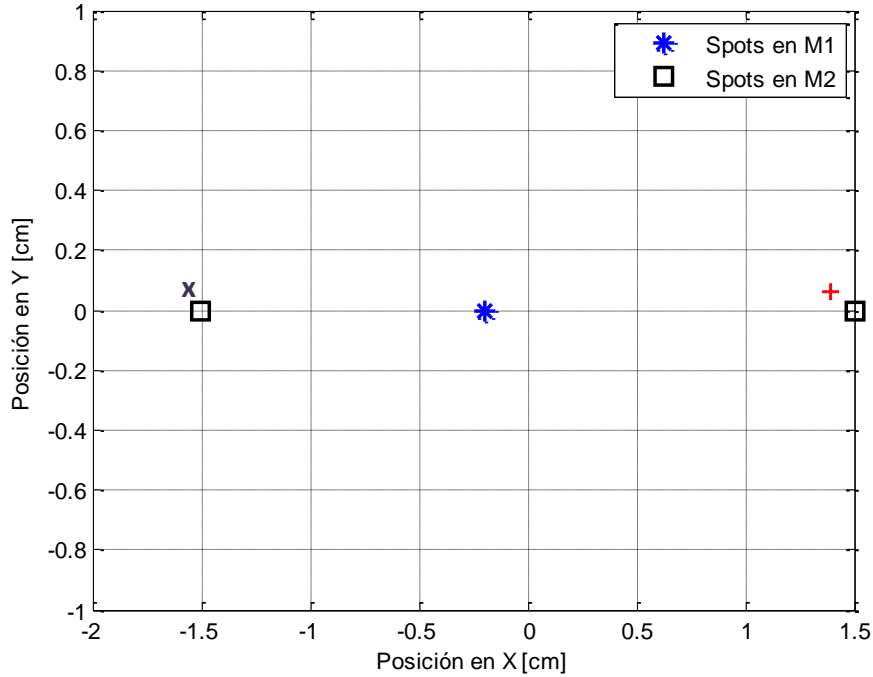


Figura 3.11. Patrón de incidencias para una celda Herriott con espejos ortogonalmente alineados con $\delta=90^\circ$ y $\phi = 1^\circ$ (Diseño 1).

En la figura anterior se presentan los valores de las posiciones para cada incidencia en términos de las coordenadas x, y del vector de posición r' resultante de cada iteración del algoritmo programado para $N = 4$, es decir $N - 1$ reflexiones. El eje de las abscisas representa la posición en el eje x mientras que el de las ordenadas representa la posición de la incidencia en el eje y . La posición del primer *spot* o incidencia inicial se encuentra en el espejo M2 y está marcada con el símbolo '+' mientras que la posición de la incidencia final, justo antes de que el haz salga de la celda se encuentra marcado con el símbolo 'x'. Es preciso comentar que el patrón de incidencias se encuentra alineado respecto al eje x debido a que la curvatura de M2 está en dicho eje y que el haz de entrada sólo tiene inclinación ϕ . Para ilustrar éste último hecho, si ahora se considera que el espejo M1 tiene la curvatura respecto al eje y y el espejo M2 tiene alineada la curvatura al eje x como lo muestra la Figura 3.12.

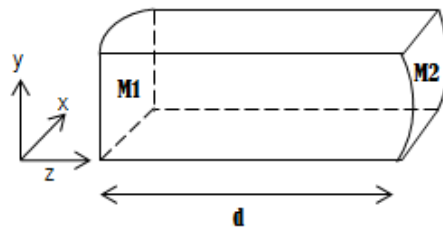


Figura 3.12. Celda Herriott integrada con curvatura del espejo M1 en el eje y y M2 en el eje x .

Los parámetros de desempeño de la celda serán los mismos que los mostrados en la tabla 3.3, la gran diferencia radica en el patrón de incidencias formado, el cual estará alineado respecto al eje y debido a la configuración de las curvaturas y a que el ángulo del haz de entrada solo estará en la componente β . En la Figura 3.13 se muestra el patrón de incidencias para éste caso de estudio.

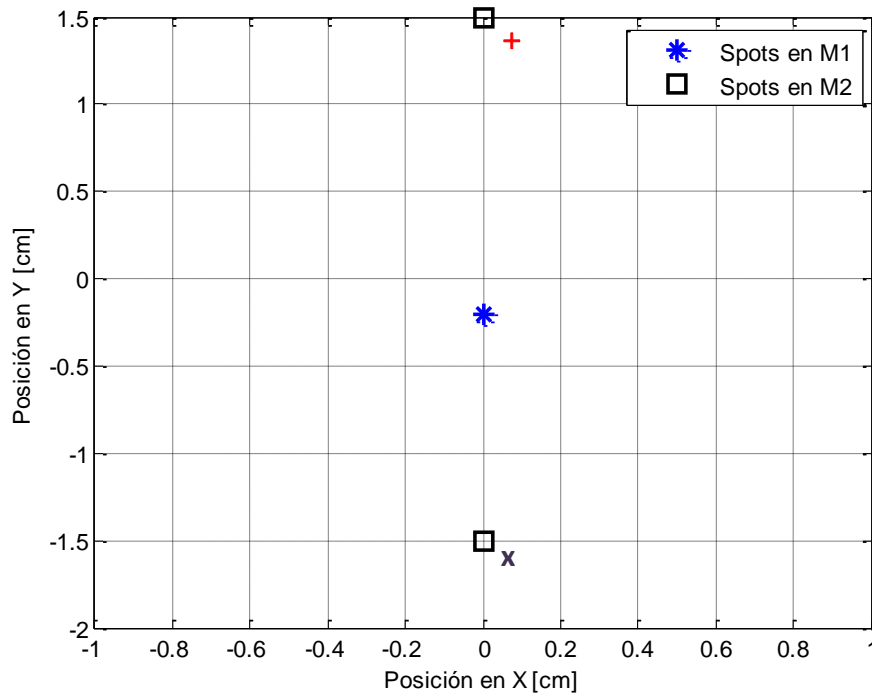


Figura 3.13. Patrón de incidencias para una celda Herriott con espejos ortogonalmente alineados con $\delta=90^\circ$ y $\phi = 1^\circ$ (Diseño 1).

La figura anterior permite observar el patrón de incidencias formado para la configuración de la celda mostrada en la Figura 3.11, la posición de la primera incidencia está marcada con el símbolo '+' mientras que la posición del haz antes de salir de la celda está señalada con el símbolo 'x'.

Finalmente al analizar este primer diseño de la celda Herriott es posible corroborar que el comportamiento de ésta depende de cómo se encuentren posicionadas las curvaturas de los dos espejos que la conforman, así como del ángulo con el que el haz entra a la celda.

3.4.2. Diseño 2: Celda con espejos rotados δ

En el segundo diseño se presenta un caso similar al diseño 1 pero con la diferencia de considerar que el espejo M2 se encontrará rotado un ángulo $\delta \neq 90^\circ$ como se muestra en la Figura 3.14.

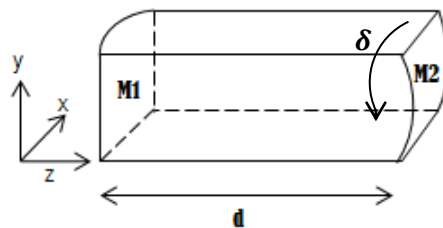


Figura 3.14. Celda Herriott integrada con rotación δ en los espejos.

El objetivo de presentar este caso de estudio es el poder determinar y observar el comportamiento del haz dentro de la celda así como el patrón de incidencias formado cuando uno de los espejos se encuentra rotado respecto al eje de la celda. Para ilustrar mejor esto, se tomaran como base las dimensiones de la celda diseñada en el punto anterior de tal forma que sea posible comparar los casos cuando $\delta = 90^\circ$ y $\delta \neq 90^\circ$, respectivamente, de tal forma que los parámetros a considerar son:

- $R1 = R2 = 3[\text{cm}]$
- $d=1.5\text{cm}]$
- $x = 0, y = 0$
- $\phi = 1^\circ, \beta = 0^\circ$
- $\delta = 45^\circ$
- $M_{xy} = 1$
- $n=1.49$

Al resolver numéricamente el algoritmo de simulación, los parámetros de desempeño obtenidos son muy similares a los del diseño anterior. En la Tabla 3.4 se resumen los resultados para la celda Herriott con espejos rotados.

Tabla 3.4. Parámetros de desempeño de una celda Herriott integrada con espejos rotados un ángulo $\delta = 45^\circ$ (Diseño 2).

Parámetro	Valor
θ_{Rx}	45°
θ_{Ry}	45°
N	4
Estabilidad: $N/2$	2 (par)
Estabilidad: $M_x + M_y < N$	$2 < 4$
ϑ	6 [cm]

Se puede observar que los parámetros de desempeño son iguales a los del diseño 1 debido a que las dimensiones de la celda son exactamente las misma; sin embargo el aspecto más interesante a observar en este diseño, es el comportamiento del patrón de incidencias, ya que al tener un ángulo $\delta \neq 90^\circ$ el patrón ya no deberá encontrarse alineado respecto a alguno de los ejes. En la Figura 3.15 se muestra el patrón de incidencias en los espejos de la celda Herriott con espejos rotados un ángulo $\delta = 45^\circ$.

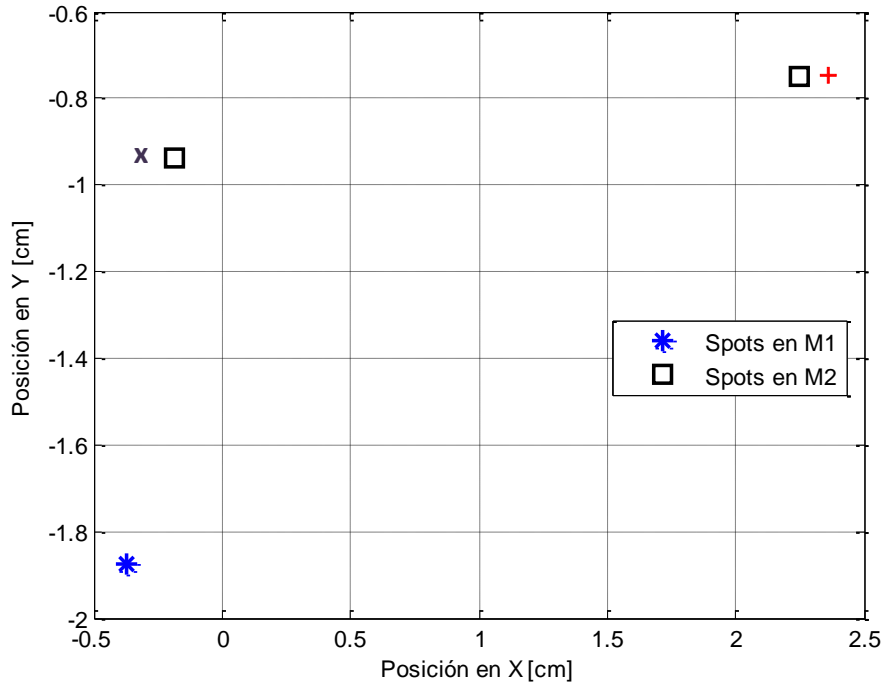


Figura 3.15. Patrón de incidencias para una celda Herriott con espejos rotados $\delta=45^\circ$ y $\phi=1^\circ$ (Diseño 2).

Al analizar el patrón de incidencias formado en la Figura 3.13, es posible notar en primera instancia que el número de reflexiones corresponde al valor $N - 1$, donde $N = 4$; por otra parte se corrobora que las 3 incidencias ya no se encuentran alineadas respecto a alguno de los ejes, es decir sus posiciones son distribuidas sobre el área de los espejos con el objetivo de tener una mayor densidad de incidencias correspondiente a la celda Herriott con espejos rotados. Sin embargo es necesario decir que para este caso de estudio no se aprecian las figuras de Lissajous debido a que N tiene un valor de sólo 4 pasos. La primera incidencia en el espejo M2 se encuentra marcada con el símbolo '+' mientras que la tercera reflexión que ocurre antes de que el haz salga de la celda está señalada con el símbolo 'x'.

3.4.3. Diseño 3: Celda con espejos sin rotar $\delta = 0$

Este último caso de estudio tiene como objetivo observar el comportamiento de la celda Herriott cuando no existe ortogonalidad ni ángulo de rotación entre las curvaturas de los espejos M1 y M2. El diseño se presenta dado que al no tener la necesidad de rotar al espejo M2, la posterior fabricación de la celda pudiera ser más sencilla; sin embargo es necesario determinar el comportamiento del haz dentro de ésta y así determinar si esta configuración es o no factible de utilizar en el sensor de flujo de calor. En la Figura 3.16 se muestra el esquema de la celda presentada en este diseño.

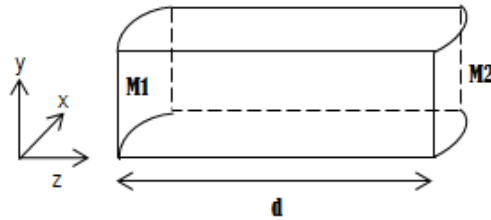


Figura 3.16. Celda Herriott integrada sin rotación en los espejos $\delta=0^\circ$.

Los parámetros a considerar en el análisis numérico de la celda son:

- $R1 = R2 = 3[\text{cm}]$
- $d=1.5\text{cm}]$
- $x = 0, y = 0$
- $\phi = 1^\circ, \beta = 0^\circ$
- $\delta = 45^\circ$
- $M_{xy} = 1$
- $n=1.49$

Resolviendo el algoritmo de simulación para este caso se obtienen los parámetros de desempeño de la celda Herriott presentados en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Parámetros de desempeño de una celda Herriott integrada con espejos sin rotación (Diseño 3).

Parámetro	Valor
θ_{Rx}	45°
θ_{Ry}	45°
N	4
Estabilidad: $N/2$	2 (par)
Estabilidad: $M_x + M_y < N$	$2 < 4$
ϑ	6 [cm]

Al igual que en los diseños anteriores, los valores de los parámetros de desempeño son idénticos dado que sólo dependen de las dimensiones de la celda; sin embargo para determinar el comportamiento del haz dentro de la celda, es necesario observar el patrón de incidencias, así en la Figura 3.17 se muestra dicho patrón para la celda sin rotación en sus espejos.

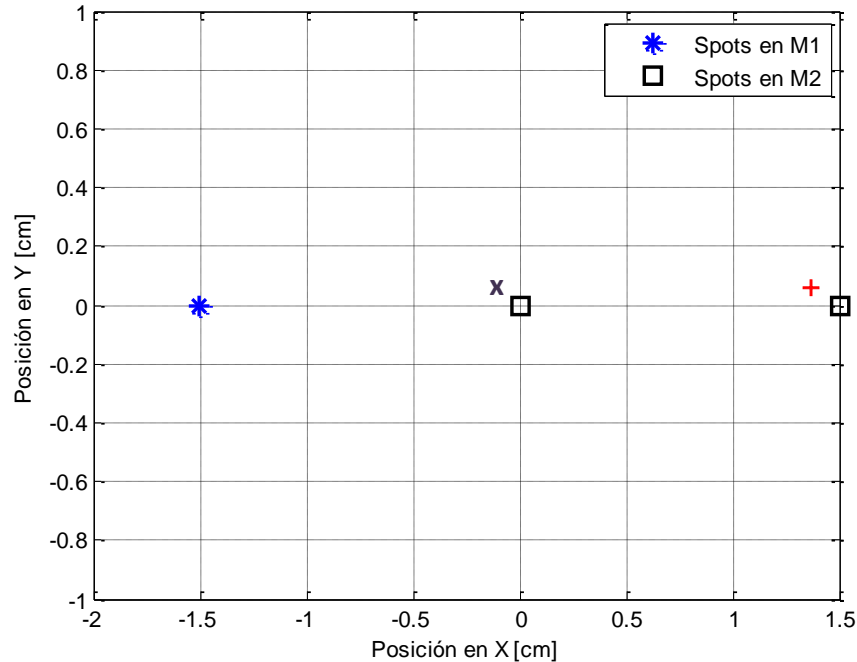


Figura 3.17. Patrón de incidencias para una celda Herriott sin rotación en los espejos (Diseño 3).

El patrón de incidencias para este tercer diseño es muy parecido al mostrado en la Figura 3.10 ya que las incidencias se encuentran alineadas respecto al eje x , dado que solo hay ángulo para el haz de entrada en la componente ϕ . La diferencia entre ambos patrones radica en la posición de la incidencia en el espejo M1, en este caso ésta se ubica en el extremo del espejo, es decir en -1.5 [cm], mientras que en el diseño 1 ésta se encontraba cerca de la coordenada $x = 0$. Por otra parte se puede observar que en el espejo M2, tanto la primera incidencia marcada con '+' como la incidencia antes de que el haz salga de la celda señalada con 'x', se encuentran una junto a la otra y ésta última está posicionada justo en el centro del espejo, lo que indica que el haz saldrá de la celda por el mismo lugar donde entró pero sin ángulo, aspecto que no concuerda con el diseño 1 en donde el haz sale de la celda con el ángulo opuesto con el que entró. Así, este diseño podrá ser considerado como no apto para su posterior fabricación ya que no es posible detectar al haz de salida.

Con el diseño y modelado numérico de la celda Herriott presentados en este capítulo fue posible determinar las características y parámetros de desempeño de la celda mediante las simulaciones de 3 casos de estudio, los cuales representan las posibles configuraciones que la celda podría tener para ser empleada en el sensor de flujo de calor. En el siguiente capítulo se abordará el proceso de fabricación de las celdas así como su caracterización experimental de la celda correspondiente al Diseño 1 ya que resulta el caso idóneo en su aplicación al sensado de flujo de calor.

REFERENCIAS DEL CAPÍTULO

- [1] Saleh B.E.A., Teich M.C., *Fundamentals of photonics*, Ed. Wiley, 2a. Edición, pp. 26-30, 2007.
- [2] Kleinfeld D. and Tsai P. *An introduction to basic optical design: Matrix techniques through scanning microscopy*, Department of Physics, University of California – San Diego, pp. 1-11, 2004.
- [3] Kasyutich, V.L. and Martin P.A., *Multipass optical cell based upon two cylindrical mirrors for tunable diode laser spectroscopy*, Applied Physics B, Laser and Optics 88, pp. 125-130, 2007.
- [4] Siegman A., *Lasers*, Mill Valley, California: University Science Books, pp. 744-777, 1986.
- [5] Silver J.A. *Simple dense-pattern optical multipass cells*, Applied Optics, Vol.44 No.31, pp.6545-6556,2005.
- [6] Hao L.Y. et al. *Cylindrical mirror multipass Lissajouss system for laser photoacoustic spectroscopy*, Review of Scientific Instruments, Vol. 73, pp. 2079-2085, 2002.
- [7] Robert C. *Simple, stable, and compact multi-reflection optical cell for very long optical paths*, Applied Optics, Vol. 46 No. 22, pp.5408-5418, 2007.

CAPÍTULO 4. FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA CELDA HERRIOTT

El propósito de este cuarto capítulo es presentar los métodos y procedimientos fabricación de la celda Herriott diseñada en el anterior capítulo. El proceso involucra dos partes principales, la estructura del bloque de acrílico que permitirá dar la forma geométrica a la celda y por otra parte la integración de los espejos asociados a ella. Se presenta el procedimiento de caracterización para determinar las pérdidas por transmisión y reflexión en la celda. Finalmente se muestra cómo es que los parámetros de desempeño de la celda fabricada deben ser lo más cercanos a los obtenidos analíticamente.

4.1. Proceso de fabricación

El proceso de fabricación de la celda Herriott involucra dos etapas. En primer lugar se tiene el proceso de maquinado de la celda, éste hace referencia al procedimiento mediante el cual el bloque de acrílico será cortado de tal forma que la geometría resultante pueda dar lugar a la generación de las superficies curvas; así como la separación entre ellas. En segunda instancia se tiene el proceso de fabricación e integración de los espejos, de tal forma que sea posible obtener conformar e integrar en su totalidad la celda Herriott.

En los siguientes apartados se abordarán los procedimientos mencionados, de tal forma que las tecnologías empleadas en ellos serán el enfoque principal del trabajo.

4.1.1. Maquinado de la celda

El maquinado de la celda es el proceso mediante el cual un bloque de acrílico convencional será adaptado para conformar la celda Herriott de espejos cilíndricos. Lo anterior implica que mediante el corte del bloque será posible formar las geometrías cilíndricas propias de los espejos. Para realizar el proceso mencionado se emplea una máquina de corte basada en un láser de CO₂ modelo “40W/45W CO2 Hobby Laser” de la marca Full Spectrum Laser™. Sus características más importantes se resumen en la Tabla 4.1. Dada su buena resolución esta máquina resulta útil para el fin propuesto. En relación con los parámetros de diseño de la celda Herriott, se pudo obtener un valor mínimo de separación entre las superficies curvas igual a 0.5 [cm] y un radio de curvatura para los espejos de 2 [cm]. El maquinado de las celdas se realizó en Alma College en Michigan, E.U.A. gracias a la colaboración del Dr. Víctor Argueta Díaz.

Se maquinaron tres bloques maquinados de acuerdo al Diseño 1 del capítulo anterior, para los cuales en la Tabla 4.1 se muestran las dimensiones físicas así como los parámetros de desempeño obtenidos analíticamente.

Tabla 4.1. Dimensiones físicas y parámetros de las celdas Herriott fabricadas.

Celda	d (cm)	R (cm)	δ (°)	ϕ_R (°)	N	M	ϑ (cm)
1	1.5	3	90	45	4	1	6
2	1	2	90	45	4	1	4
3	0.5	2	90	30	11	1	5.5

Con el objetivo de tener una imagen ilustrativa del resultado de fabricación en la Figura 4.1 se muestran las celdas obtenidas, numeradas de acuerdo al valor de la columna Celda de la tabla anterior.


Figura 4.1. Celdas Herriott fabricadas en un bloque de acrílico.

4.1.2. Integración de los espejos

Una vez que los bloques adquirieron por medio del corte láser una curvatura de radio determinado en dos de sus caras, dichas superficies serán la base de los espejos. Para integrar a éstos en los bloques se estudiaron las técnicas empleadas para la deposición de materiales entre las cuales destacan: evaporación térmica y erosión catódica también denominada *sputtering* ^[1]. Debido a los tiempos para la realización del trabajo y considerando la infraestructura con la cual se cuenta en el CCADET se optó por la segunda técnica.

Dado que el material que debe ser depositado sobre el acrílico debe tener buenas características en cuanto a reflexión de luz se refiere, se optó por emplear aluminio dado que es el recubrimiento metálico más empleado en la fabricación de espejos debido a su buen coeficiente de reflectividad, alrededor de 88% - 92% en la región visible del espectro electromagnético, aunado a ello, su bajo costo justifica aún más su uso. El espesor de los depósitos para obtener la mayor reflectividad fue de 1 ± 0.3 [μm].

En este punto, es preciso hacer mención de que las superficies del bloque de acrílico recubiertas con aluminio, en el estricto sentido de la palabra no son espejos, dado que no presentan las características ópticas de éstos, de tal forma que es posible referirse a ellas como superficies semi-reflejantes y este será el adjetivo que se les dará en adelante.

A fin de ilustrar el resultado de la deposición de aluminio en el diseño de la celda, en la Figura 4.2 se muestra un depósito con la calidad necesaria para crear la superficie semi-reflejante deseada así como el ejemplo de un mal depósito, el cual dista demasiado de poder ser ocupado para el fin propuesto.



Figura 4.2. Comparativa entre depósitos de aluminio de (a) buena calidad y (b) mala calidad.

4.2. Caracterización de la celda

Dado que la propuesta de integrar una celda Herriott en un bloque de acrílico difiere del uso de espejos comerciales con un coeficiente de reflectividad cerca del 99% y a que el medio de propagación en donde el haz de luz recorrerá una cierta trayectoria presenta características diferentes a las del espacio libre; es preciso plantear como es que la propuesta de diseño se ve afectada por dichas condiciones en términos de potencia luminosa. Para ello se plantean dos métodos de caracterización experimental, por una parte cuantificar las pérdidas por propagación y en segunda instancia las pérdidas por reflexión.

Cabe mencionar que la celda que será caracterizada y empleada en la implementación del SFC corresponde a la nombrada como 1 en la Tabla 4.1 cuyas dimensiones físicas son $d = 1.5$ [cm] y $R = 3$ [cm], siendo la trayectoria recorrida por el haz igual a 6 [cm]. El considerar como caso de estudio útil a esta celda se debe a que las tecnologías descritas anteriormente fueron las únicas disponibles al momento de realizar el trabajo experimental y presentaron dificultades para la fabricación de las celdas 2 y 3. El principal problema ocurrió en la deposición de la película de aluminio en las que no se logró una buena adherencia.

4.2.1. Pérdidas por propagación

Para este procedimiento es necesario determinar el coeficiente de atenuación μ del acrílico, éste puede ser obtenido mediante la Ley de Beer – Lambert, la cual establece que la intensidad luminosa decrece exponencialmente con la longitud del medio de propagación, dicho decremento es función del coeficiente de atenuación del medio μ , sin considerar dispersión y en términos de potencia óptica entonces es posible establecer la siguiente ecuación:

$$P = P_0 e^{-\mu z} . \quad (4.1)$$

Donde:

P : Potencia medida

P_0 : Potencia incidente

μ : Coeficiente de atenuación lineal

z : Longitud del medio de propagación sobre el eje óptico.

Para estimar μ se tomaron tres bloques de acrílico a diferentes valores longitudes sobre los cuales se hizo incidir un haz de luz láser a 633 [nm] con una potencia de entrada igual a 967 [μ W], al final de los bloques se colocó un foto-detector para medir la potencia de salida. En la Tabla 4.2 se resumen los valores de los datos experimentales para cada uno de los bloques de acrílico.

Tabla 4.2. Datos experimentales para el cálculo de las pérdidas por propagación.

Bloque	Longitud del medio z [m]	Potencia de entrada P_0 [μ W]	Potencia de salida P [μ W]
1	0.018	967	712.3
2	0.029	967	679.1
3	0.047	967	670.2

Con los datos experimentales de P , P_0 y z , es posible obtener un modelo matemático que permita asociar a éstos con el coeficiente de atenuación del acrílico, para ello es necesario linealizar la ecuación (4.1) de la siguiente manera.

$$\ln(P) = -\mu z + \ln(P_0) \quad (4.2)$$

La ecuación (4.2), corresponde al modelo matemático de una recta en donde $\ln(P)$ es la variable dependiente y se relaciona con la potencia medida, la pendiente de la recta es $-\mu$, cuyo signo negativo indica que conforme la variable independiente z aumenta, el valor de $\ln(P)$ disminuye y el término $\ln(P_0)$ es la ordenada al origen. El modelo matemático puede ser ajustado a los datos experimentales mostrados en la Tabla 4.3, en la Figura 4.3 se observa la gráfica de los datos experimentales y la recta de ajuste.

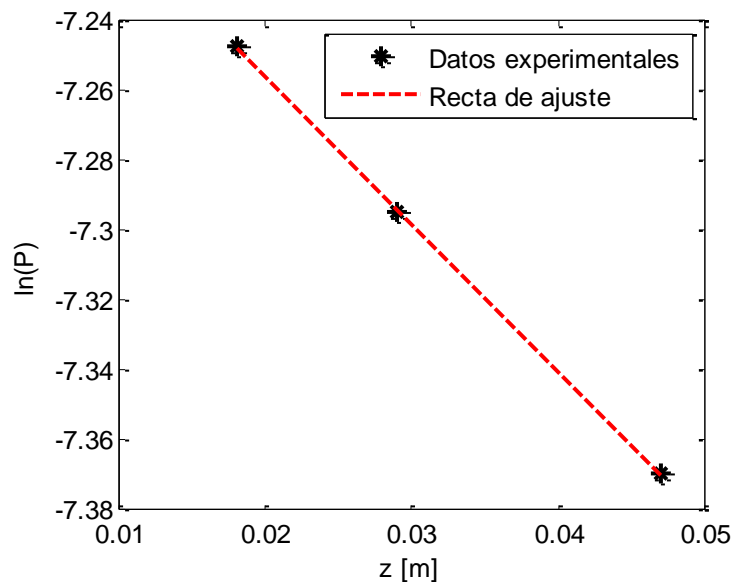


Figura 4.3. Recta de ajuste para los datos experimentales en la medición del coeficiente de atenuación del acrílico.

La pendiente de la recta mostrada en la Figura 4.3 corresponde al valor del coeficiente de atenuación, por lo que $\mu = 4.21 [m^{-1}]$. Además se comprueba la ley de Beer-Lambert dado que entre mayor es la longitud z del acrílico la potencia transmitida en lo bloque disminuye.

Este análisis será útil para calcular las pérdidas totales en la celda Herriott dados los N pasos que el haz efectúa dentro de ella.

4.2.2. Pérdidas por reflexión

Un parámetro que debe ser conocido para caracterizar a la celda fabricada es el coeficiente de reflectividad de los depósitos de aluminio que conforman a los espejos. La determinación de dicho coeficiente se realizó experimentalmente de tal forma que sobre un depósito de aluminio con espesor de aproximadamente $1 [\mu m]$, se hizo incidir un haz láser con longitud de onda igual a $633 [nm]$. Dado que la superficie que conforma al espejo es aproximadamente $1 [cm^2]$, se realizaron mediciones de la luz reflejada en 7 puntos de dicha superficie a fin de obtener un promedio de la potencia reflejada, tomando que la potencia incidente medida P_{in} fue igual a $967 [\mu W]$ y los resultados de la potencia medida después de que el haz reflejara en el espejo se muestran en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Mediciones de potencia reflejada para determinar el coeficiente de reflectividad.

Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6	Punto 7
772.8 $[\mu W]$	773.7 $[\mu W]$	771.2 $[\mu W]$	775.4 $[\mu W]$	778.6 $[\mu W]$	775.2 $[\mu W]$	777.3 $[\mu W]$

Tomando el promedio de los puntos de la tabla anterior, se tiene que el valor de la potencia reflejada es $P_{ref} = 774.8 [\mu W]$, y por tanto el coeficiente de reflectividad que hace referencia al porcentaje de la luz reflejada por la superficie con depósito de aluminio puede ser calculado como:

$$\%R = \frac{P_{ref}}{P_{in}} * 100 = \frac{774.8 [\mu W]}{967 [\mu W]} = 80\% . \quad (4.3)$$

El resultado anterior muestra que el coeficiente de reflectividad es relativamente bueno puesto que se refleja más de la mitad de la luz proveniente de la fuente de luz láser, sin embargo no es comparable con un espejo comercial en donde dicho porcentaje se encuentra por arriba del 95%, por ende a los espejos de la celda Herriott fabricada es posible llamarlos superficies semi-reflejantes. Las pérdidas por reflexión pueden entonces ser cuantificadas si se considera que el 80% de la luz se refleja:

$$Pérdidas_{ref} = 100\% - \%R = 20\%, \quad (4.4)$$

es decir, cada que la luz se refleja se pierde cerca del 20%, y este dato será útil para calcular las pérdidas totales en la celda Herriott.

4.2.3. Pérdidas totales

Las pérdidas totales hacen referencia al acumulado de las perdidas por transmisión y reflexión cuando la celda Herriott se encuentra en operación. Desde el punto de vista de las pérdidas por transmisión, estas estarán determinadas por el número de N pasos que el haz efectúa asociado al coeficiente de atenuación del acrílico, mientras que las pérdidas por reflexión estarán en términos del coeficiente de reflectividad de las superficies semi-reflejantes y por ende serán determinadas por el número de reflexiones que ocurren en la celda es decir $N - 1$.

a) Pérdidas totales por transmisión.

Una vez estimado el coeficiente de atenuación del acrílico, es posible emplear directamente la ecuación 4.1 si se conoce el valor la trayectoria recorrida por el haz de acuerdo al número de pasos que éste realiza, en la celda a caracterizar el valor de $\vartheta = 6[\text{cm}]$ con $N = 4$ y la potencia lumínica del láser es $967 [\mu\text{W}]$, entonces la potencia a la salida del haz a la salida es entonces $750.8 [\mu\text{W}]$, por lo que el porcentaje de la luz que se transmite la celda Herriott desde que el haz entra a ella hasta que sale es:

$$\%T = \frac{P}{P_0} (100\%) = \frac{750.8[\mu\text{W}]}{967 [\mu\text{W}]} = 77.6\% , \quad (4.5)$$

y las porcentaje de luz perdida en dichas condiciones es:

$$\%Perdidas_{trans} = 100\% - \%T = 22.3\% . \quad (4.6)$$

Este método para el cálculo de las pérdidas por transmisión puede generalizarse para celdas Herriott integradas en acrílico sí se conoce la trayectoria total recorrida por el haz. Es posible concluir que entre mayor sea esta última, las pérdidas serán mayores.

b) Pérdidas totales por reflexión

Conociendo el porcentaje de la luz que se pierde que cuando el haz incide sobre la superficie semi-reflejante es entonces necesario estimar las pérdidas totales en la celda después de las $N - 1$ reflexiones que ocurren dentro de la ella, de tal forma que multiplicando la ecuación la ecuación (4.4) por el número de reflexiones, siendo éste igual a 3, se tiene que:

$$\%Perdidas_{ref} = \%Perdidas_{ref} * (N - 1) = 60\% . \quad (4.7)$$

Con el cálculo anterior es posible entonces estimar que debido a las superficies semi-reflejantes se está perdiendo el 60% de la luz láser que viaja dentro de la celda, desde que entra hasta que sale de ésta.

Finalmente, si se suman las pérdidas por transmisión y reflexión en la celda Herriott se tiene que:

$$\%Pérdidas_{tot} = \%Perdidas_{trans} + \%Perdidas_{ref} = 82.3\% \quad (4.8)$$

En este sentido, es posible resumir que si la potencia del láser antes de entrar a la celda es igual a $967 \text{ } [\mu\text{W}]$ y considerando que las pérdidas son iguales a 82.36% , entonces la potencia del láser a la salida de la celda será igual a $170.5 \text{ } [\mu\text{W}]$, aproximadamente. Es necesario comentar que dichas pérdidas son elevadas y por ende representan una limitante en cuanto al número de pasos y reflexiones que pueden ser obtenidas al diseñar una celda Herriott, es decir, la propuesta de integrar una celda Herriott en acrílico debe considerar que los parámetros de desempeño obtenidos analíticamente tienen una estrecha relación con las pérdidas que se tienen en la práctica.

4.3. Comprobación experimental de la celda diseñada

Es momento de comprobar experimentalmente que la celda Herriott diseñada previamente pudo ser fabricada y que el número de pasos N , así como el patrón de incidencias, obtenidos analíticamente son los más cercanos al resultado experimental. En la Figura 4.4 se muestra el patrón de incidencias del espejo M1 de la celda, mientras que en la Figura 4.5 se muestra dicho patrón en el espejo M2, en ambas figuras se muestra la comparación del patrón experimental y el obtenido analíticamente.

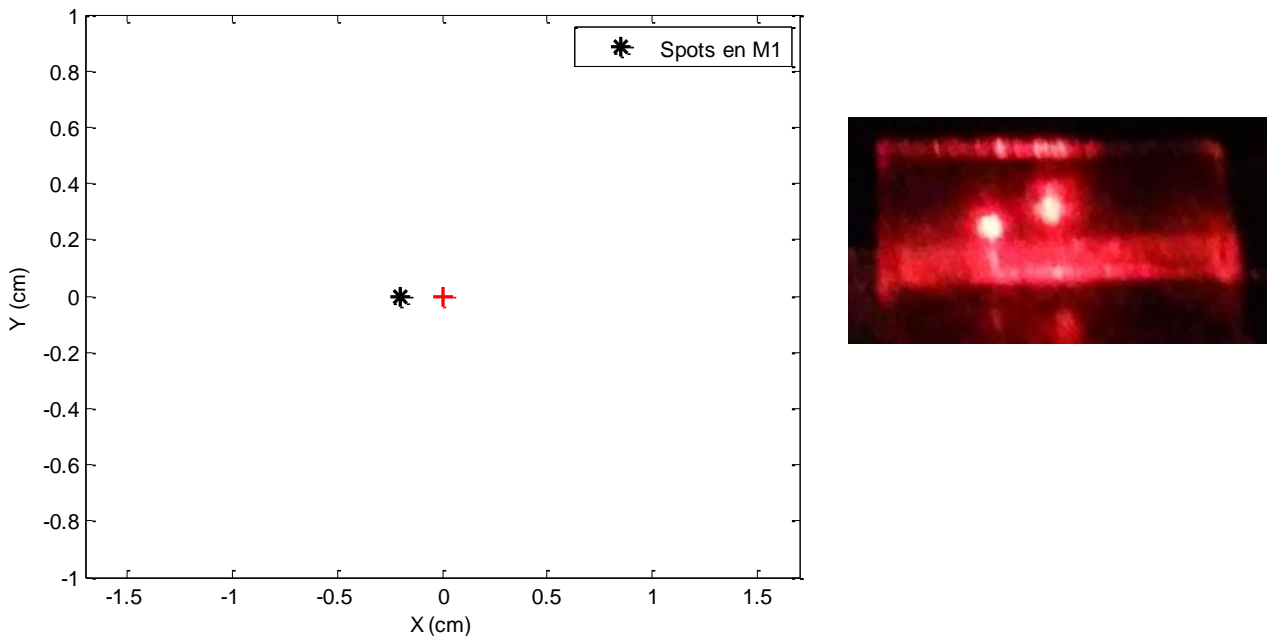


Figura 4.4. Patrón de incidencias en el espejo M1 de la celda Herriott.

La figura anterior muestra el patrón de incidencias en el espejo M1, es posible notar que tanto en el resultado analítico, como experimental, se observan dos puntos del láser; sin embargo debe precisarse que el punto central, marcado en el patrón analítico con un símbolo '+', corresponde al puerto de entrada/salida, de la celda, es decir, es el lugar en donde el haz entra y sale de ésta. Por tanto, en el espejo M1 solo existe una incidencia, ubicada a la izquierda del puerto mencionado.

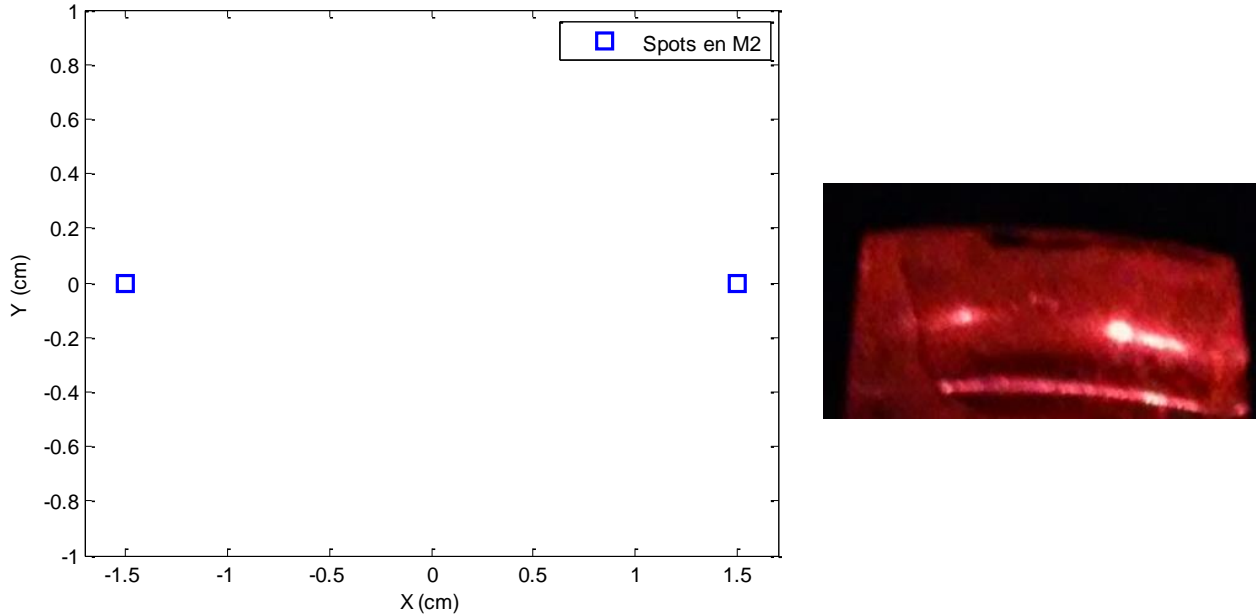


Figura 4.5. Patrón de incidencias en el espejo M2 de la celda Herriott.

Mientras tanto, la Figura 4.5 muestra las posiciones de las incidencias en el espejo M2, en donde es posible observar que se presentan dos de éstas, ubicadas prácticamente en los extremos dicho espejo. Dicha ubicación se debe precisamente al criterio de diseño en donde el ángulo del haz de entrada es quien determina dicho comportamiento. También, es posible notar que el tanto el patrón obtenido analíticamente como el experimental son semejantes, lo cual cumple con las expectativas de diseño y fabricación.

En resumen, si en el espejo M1 ocurre una sola incidencia y en M2 ocurren dos, entonces se tiene que en total existen 3 reflexiones en la celda Herriott, correspondiente a número de pasos $N=4$, valor que concuerda totalmente con el obtenido analíticamente en el Diseño 1 presentado en el capítulo anterior. Así, es posible validar los métodos de fabricación de la celda ya que éstos tienen una muy buena aproximación a los resultados analíticos.

Al finalizar el capítulo corto, fue posible mostrar los métodos y tecnologías empleadas en la fabricación de celda previamente diseñada. Además, se mostraron los procedimientos experimentales de caracterización, principalmente en términos de las pérdidas de luz que se presentan en la celda, debidas a la transmisión y a la reflexión del haz de luz láser que circula dentro de ésta, de tal forma que fue posible obtener que se pierde alrededor de 82.36% de luz en la propuesta de diseño presentada en este trabajo para la celda Herriott, lo cual refiere a una limitante en cuanto al número de pasos y reflexiones que pueden ser producidos. Sin embargo, para el propósito planteado, dichas pérdidas no representan un problema grave y en el siguiente capítulo se mostrará cómo es que la celda se integra con demás elementos para conformar al sensor de flujo de calor.

REFERENCIAS DEL CAPÍTULO

- [1] www.cicata.ipn.mx/OfertaEducativa/MTA/RecInfraestructura/Paginas/Equipos_Funcionales/Sis_Sputtering.aspx. (Consultado el 21/04/2015).
- [2] Datos proporcionados por el laboratorio de Películas Delgadas del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo tecnológico, Universidad Nacional Autónoma de México.

CAPÍTULO 5. INTEGRACIÓN DEL SENSOR DE FLUJO DE CALOR DE CALOR

El objetivo de éste es presentar como los conceptos anteriormente mencionados se integran para conformar el sensor de flujo de calor. Se aborda el posicionamiento del láser para permitir el correcto desempeño de la celda Herriott, la fuente de calor que promueve la deflexión foto-térmica así como la detección del haz a la salida de la celda. Finalmente se presenta la automatización del proceso de medición cuyo objetivo es optimizar el funcionamiento del sensor.

5.1. Posicionamiento mecánico

Como se mencionó anteriormente, un proceso fundamental en la operación de la celda Herriott es el ajuste del haz que entra a ésta, en términos de la posición y el ángulo de dicho haz incidente. El ajuste debe ser realizado de forma precisa para lograr que el haz salga por el mismo puerto por donde entró. Para lograr esto es necesario implementar un sistema de posicionamiento mecánico en donde tanto la fuente de luz, como la celda Herriott integrada puedan ser desplazadas y orientadas a fin de alinear el sistema. En la Figura 5.1 se muestra un diagrama esquemático del sistema de posicionamiento mecánico.

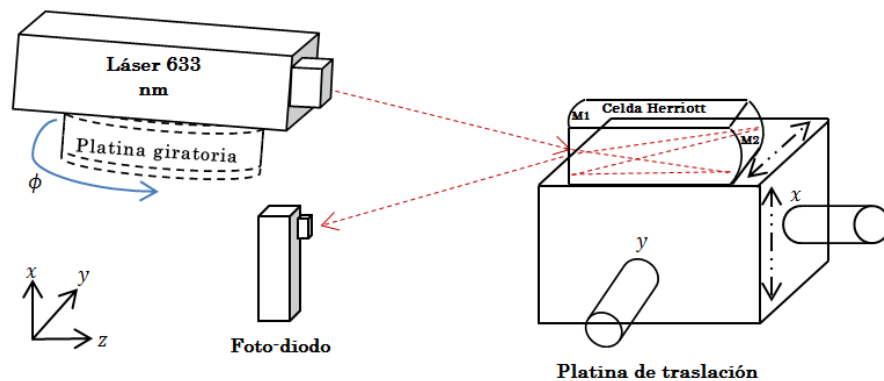


Figura 5.1. Sistema mecánico de posicionamiento para la fuente de luz láser y la celda Herriott.

Para analizar el funcionamiento del sistema es posible dividir a éste en dos partes como se describe a continuación. Es importante mencionar que la rotación sólo se realiza en el eje y del sistema coordenado mostrado en la Figura 5.1, esto se debe a que la detección del haz de salida se torna más sencilla si el foto-diodo se coloca en el plano horizontal, el mismo respecto al cual el ángulo con el que el haz entra a la celda.

Referente a la fuente de luz, un láser de la marca *Thorlabs*TM emitiendo a una longitud de onda $\lambda=633$ [nm] es fijado mecánicamente mediante tornillos a una platina giratoria PR01(M) ^[1] de *Thorlabs*TM, la cual opera en rotación continua de giro completo, 0° a 360°. La rotación es inducida manualmente por medio de un micrómetro mediante el cual es posible posicionar angularmente con buena precisión a la platina en un ángulo deseado, este elemento es con el cual se ajusta el ángulo de entrada del haz en la celda.

Por otro lado, la celda Herriott se encuentra montada sobre una platina de desplazamiento lineal de la marca *National Aperture Inc.* Ésta es capaz de inducir manualmente movimientos en los ejes x y y , los cuales se asocian a la altura y el desplazamiento horizontal de la celda, los movimientos son realizados con una resolución igual a 1[μ m]. La importancia de este montaje radica en el hecho de poder ajustar dichos parámetros para lograr que el haz de salida se ubique por el mismo puerto de entrada.

En resumen, las platinas mencionadas dan al posicionamiento mecánico de la fuente de luz y de la celda Herriott tres grados de libertad para inducir movimientos de baja escala mediante los cuales se busca que experimentalmente el desempeño de la celda sea lo más aproximado posible a los resultados obtenidos analíticamente.

5.2. Fuente de calor

La fuente de calor corresponde a un resistor de potencia, el cual es capaz de disipar la potencia eléctrica que consume en forma de calor debido a la ley de Joule:

$$\Pi = RI^2 \text{ [W]}. \tag{5.1}$$

La Figura 5.2 muestra el diagrama esquemático del posicionamiento de la fuente de calor Q perpendicular al haz de luz que se propaga dentro de la celda Herriott.

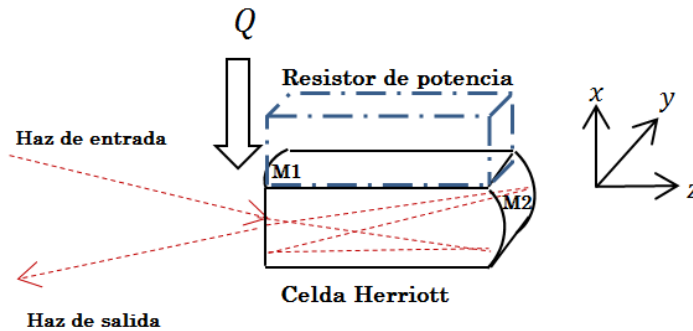


Figura 5.2. Diagrama esquemático de la fuente de calor acoplada a la celda Herriott.

El calor que el resistor es capaz de generar se puede expresar como el cociente de la potencia calorífica disipada entre el área total del bloque cerámico:

$$Q_{resistor} = \frac{\Pi}{A_{ceramico}} \left[\frac{W}{m^2} \right], \quad (5.2)$$

por ende, valor de la potencia P está en función del valor de la resistencia R y a su vez cuanto mayor sea el valor de P, mayor serán las dimensiones del resistor cerámico.

Para conocer el valor mínimo de calor disipado en el resistor, se aplica el valor mínimo de corriente eléctrica el cual se encuentra limitado a la resolución de la fuente que alimenta al resistor siendo ésta igual a 0.01 [A]. En este sentido el valor de potencia mínima disipada es $\Pi_{min} = 0.00131[W]$ mientras el valor máximo corresponde a $\Pi_{max} = 5 [W]$.

Para calcular los valores mínimo y máximo de calor generado por el resistor de potencia es necesario considerar el área total de éste igual a $A_{ceramico} = 9.54[cm^2]$. Empleando la ecuación (5.2), los valores son Q_{min} y Q_{max} son $1.37 \times 10^{-4} \left[\frac{W}{cm^2} \right]$ y $0.52 \left[\frac{W}{cm^2} \right]$, respectivamente.

Por otro lado, es posible calcular la potencia disipada en forma de calor en la cara del resistor de potencia que se encuentra en contacto con la superficie de la celda Herriott mediante la siguiente expresión:

$$\Pi_{contacto} = \frac{\Pi}{A_{ceramico}} (A_{contacto}) [W] , \quad (5.3)$$

en donde el área de contacto, $A_{contacto}$ es igual a $1.98 [cm^2]$.

Finalmente es posible obtener una expresión para determinar el flujo de calor que se aplica a la celda Herriott en términos de la superficie de ésta que se encuentra en contacto con el resistor cerámico $A_{Herriott}$ es de $1.51 [cm^2]$.

$$Q_{Herriott} = \frac{\Pi_{contacto}}{A_{Herriott}} \left[\frac{W}{cm^2} \right]. \quad (5.4)$$

El análisis realizado para estimar el calor que se aplica al sensor representa una parte fundamental en el diseño de éste debido a que conociendo el valor de $Q_{Herriott}$ será posible caracterizar la respuesta del sensor, la cual está determinada por el valor del calor aplicado.

5.3. Detección fotométrica de la señal

Recordando el principio de operación del SFC, la presencia de una fuente de calor perpendicular al eje óptico z inducirá un gradiente de temperatura entre las caras de bloque, es decir, entre la cara donde se coloca el resistor de potencia y la base del bloque de acrílico acoplada a la platina de desplazamiento lineal. El gradiente térmico causará entonces que el haz que viaja dentro de la celda Herriott se desvíe de su trayectoria un cierto ángulo θ_{MR} debido a la deflexión foto-térmica. Dado que el valor del ángulo deflectado resultante es función de la conducción de calor, es necesario cuantificarlo a fin de obtener una señal característica para el flujo de calor aplicado.

Es posible relacionar el desplazamiento angular θ_{MR} del haz de salida con un desplazamiento lineal Δx perpendicular al eje óptico, como se muestra en la Figura 5.3.

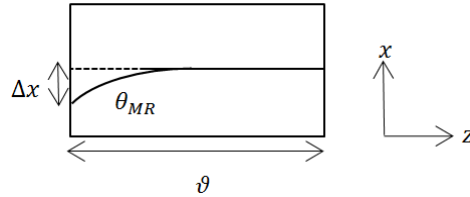


Figura 5.3. Relación del ángulo de deflexión con un desplazamiento lineal.

La Figura 5.3 muestra una proyección del en el plano $x - z$ de la desviación angular del haz, respecto al eje z se considera una distancia l dado que ésta representa la trayectoria total recorrida por el haz dentro de la celda Herriott, mientras que en el eje x se presenta el desplazamiento lineal Δx como una proyección del ángulo θ_{MR} . Mediante trigonometría básica es posible entonces obtener una expresión que relaciona a los desplazamientos angular y lineal de la siguiente manera:

$$\Delta x = l \tan \theta_{MR} . \quad (5.5)$$

Es posible asumir que el ángulo de deflexión puede ser traducido como un pequeño desplazamiento lineal sobre una superficie en donde el haz de salida incide, dicha superficie resulta ser el área activa de un foto-diodo colocado a la salida de la celda Herriott como lo muestra la Figura 5.1, recordando que la posición del detector óptico está en ángulo opuesto a la fuente de luz láser dado el principio de operación de la celda Herriott.

Dado que el desplazamiento inducido por la fuente de calor es más pequeño que el área activa de un foto-diodo convencional, el valor de Δx no podrá ser captado mediante el foto-detector por sí solo, por ende es necesario emplear una técnica de detección fotométrica como el efecto navaja ^[2] (ver Anexo A).

Bajo este contexto, el flujo de calor asociado a Δx puede ser traducido como un decremento en la potencia óptica detectada por un fotodiodo acoplado con el filo de una navaja; ésta configuración representa el principio de detección foto-métrica de la señal de salida del sensor y su esquema de operación se presenta en la Figura 5.4.

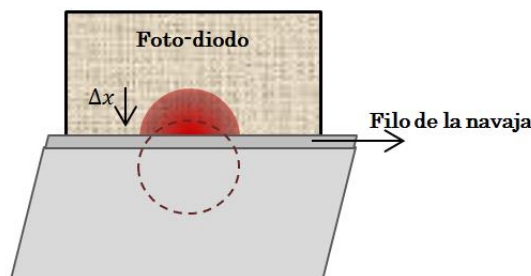


Figura 5.4. Esquema de detección foto-métrica de la señal de salida del sensor.

El foto-diodo encargado de la detección foto-métrica de la señal del sensor debe funcionar en una longitud de onda $\lambda = 633$ [nm] y tener una área activa mayor a 3 [mm]. Por tal motivo se eligió un foto-diodo modelo FDS-100^[4] de *Thorlabs*TM.

5.4. Procedimiento de medición de flujo de calor

Una vez descritos los tres elementos principales que componen al sensor de flujo de calor, es necesario establecer cómo es que se efectúa el procedimiento de medición. Inicialmente, el haz de luz de la fuente láser entra a la celda Herriott con una separación entre espejos $d = 1.5$ [cm] y radios de curvatura $R = 3$ [cm], dando lugar a 4 pasos y una trayectoria recorrida igual a 6 [cm]. A la salida de la celda, el haz de luz sale por el mismo puerto de entrada pero con el ángulo contrario al de entrada, por ende es necesario colocar al foto-diodo FDS-100 – navaja con dicho ángulo de salida. Debido a las pérdidas propias de la celda, la potencia óptica del haz de salida estará disminuida respecto a la potencia de entrada y debido a las características de las superficies semi-reflejantes, el haz de luz estará esparcido en comparación al de entrada por lo que antes de que llegue al foto-detector el haz deberá pasar por una lente convergente, así cuando llegue al filo de la navaja tendrá nuevamente una forma circular. En este hecho es importante mencionar que se debe tener una alineación adecuada de tal forma que el haz se encuentre en incidencia normal con el detector a fin de garantizar el efecto navaja; además la posición del haz deberá posicionarse de tal forma que el centro de éste se encuentre lo más cercano del filo de la navaja, por lo que la mitad del haz gaussiano estará en el área activa del foto-diodo y la otra mitad en el área opaca de la navaja, es decir, la potencia medida $P(x)_{medida}$ en condiciones iniciales será igual al 50% de la potencia total P_{tot} .

El resistor de potencia es el encargado de inducir el flujo de calor Q a la celda Herriott propiciando que el haz sea deflectado un ángulo θ_{MR} , el cual es captado por el área activa del foto-diodo como un desplazamiento lineal Δx causando así un decremento en la potencia óptica detectada por el foto-diodo. Dado que el sensor representa un sistema dinámico térmico, el cual es lento por naturaleza, el dispositivo transductor (celda Herriott) no cambiará su índice de refracción de inmediato, por ende la fuente de calor deberá producir un señal temporal de calentamiento, es decir, permanecerá encendida durante un periodo considerable de tiempo a fin de lograr que la deflexión foto-térmica tenga un efecto significativo en términos de la potencia óptica detecta.

La disposición de los elementos anteriormente mencionados, así como los efectos planteados se ilustran en el diagrama esquemático de la Figura 5.5, el cual representa el sensor de flujo de calor empleando una celda Herriott.

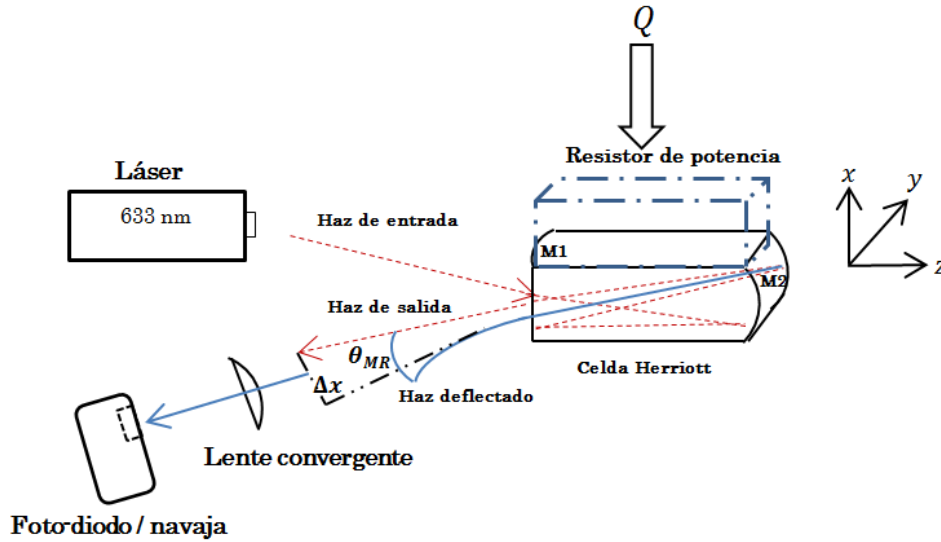


Figura 5.5. Esquema completo del sensor de flujo de calor empleando una celda Herriott.

Con lo anteriores planteamientos, experimentalmente se determinó que el procedimiento de medición puede ser resumido en los siguientes pasos:

- 1) En condiciones iniciales, la potencia detectada por el foto-diodo corresponde al 50% de la potencia total de la fuente de luz láser.
- 2) Durante 20 [s] se monitorea la potencia óptica a fin de garantizar la estabilidad de la fuente de luz.
- 3) Inmediatamente después de los 20 [s], el resistor de potencia es energizado produciendo que la cara de éste que está en contacto con la celda Herriott, ceda calor debido al efecto Joule.
- 4) La cara superior de la celda sufre un incremento de temperatura dando lugar a la presencia de un gradiente térmico entre dicha cara y la inferior.
- 5) El calentamiento dura 320 [s] para garantizar que la deflexión foto-térmica pueda ser claramente detectada por el foto-diodo. La temperatura en la cara superior se incrementa como función del tiempo, dando lugar a que la potencia detectada por el foto-diodo decrezca conforme al aumento de la temperatura.
- 6) Al transcurrir, los 320 [s] de calentamiento, la fuente de calor es apagada.
- 7) Se monitorea la respuesta del foto-diodo hasta los 1200 [s] con el objetivo de observar como la potencia óptica intenta regresar a su valor inicial debido a que la magnitud del gradiente térmico decrece.

Para ilustrar los dos efectos que dan lugar al principio de funcionamiento del sensor, en la Figura 5.12 se muestra una señal típica de calentamiento como función del tiempo, mientras en la Figura 5.6 se presenta la señal detectada por el foto-diodo ante la presencia de un gradiente térmico inducido señal temporal de calentamiento.

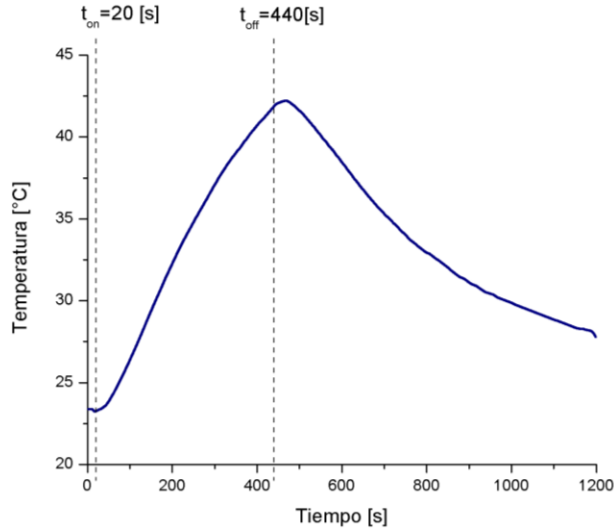


Figura 5.6. Señal temporal de calentamiento inducida por el resistor de potencia.

La figura anterior representa la señal temporal o curva de calentamiento aplicada a la celda Herriott y cuyo objetivo es inducir el gradiente de temperatura que propicia la deflexión del haz traducida como un decremento en la potencia óptica detecta por el fotodiodo. Es importante observar que la fuente de calentamiento es encendida a los 20 [s] y apagada a los 440 [s], en dicho tiempo de calentamiento es donde tendrá lugar el efecto del sensor.

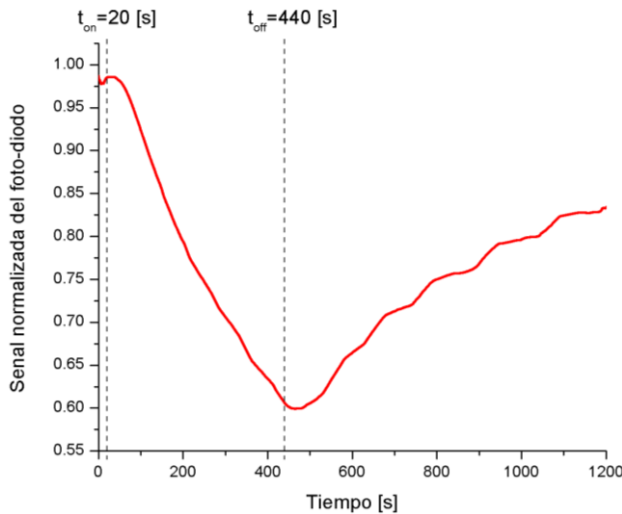


Figura 5.7. Señal de respuesta del sensor normalizada.

La Figura 5.7 muestra la señal de salida del sensor durante la aplicación de la señal de calentamiento mostrada en la Figura 5.6. Es posible observar cómo es que durante el intervalo de calentamiento la potencia óptica decrece aproximadamente al 60% de su valor inicial, en dicho intervalo tiene lugar el efecto de la deflexión fototérmica. También es de resaltar como es que después de apagada la fuente de calor, la potencia intenta regresar a su valor inicial sin lograrlo al menos en los 1200 [s] que la prueba duró, este efecto se debe a que el enfriamiento no ocurre con la misma rapidez que cuando el flujo de calor es aplicado durante el tiempo de calentamiento; sin embargo dicho comportamiento no es crítico para los fines del sensor puesto que el interés de éste es cuantificar el flujo de calor debido al proceso de calentamiento y no del enfriamiento. La

señal se normaliza respecto al valor máximo de la potencia detectada en el experimento con el objetivo de un futuro poder comparar señales de distintos experimentos cuyas condiciones iniciales no sean exactamente iguales; además el mostrar de esa manera la señal final permite que los resultados de conducción de calor puedan ser expresados en términos de porcentajes, así en adelante las gráficas presentadas para distintas pruebas de conducción serán mostradas en su forma normalizada. Es importante comentar que el procedimiento de medición fue automatizado mediante la implementación de un sistema electrónico, el cual es descrito en el Anexo B.

Finalmente, en la Figura 5.8 se muestra al lector una imagen del montaje experimental completo del sensor de flujo de calor, en donde cada aprecian todos los elementos que anteriormente han sido descritos y que conforman el sensor y procedimiento de medición.

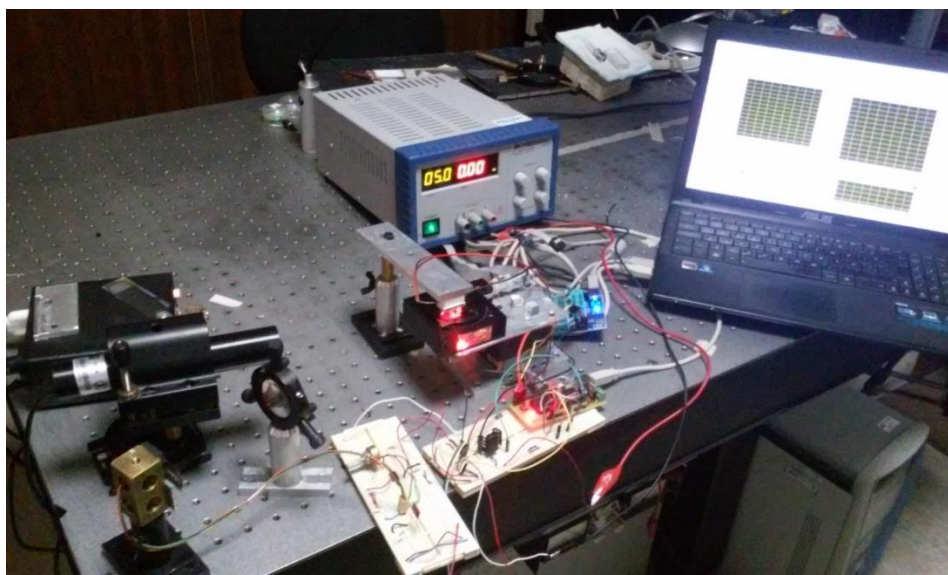


Figura 5.8. Montaje experimental del sensor de flujo de calor

Al finalizar este capítulo se ha comprendido como es que los elementos que conforman al sensor de flujo de calor se integran para interactuar entre ellos, dicha interacción da lugar a la descripción del proceso de medición. De igual forma se mostraron cuáles son los resultados esperados por efecto de la deflexión foto-térmica sobre el haz que viaja dentro de la celda Herriott, es decir el decremento en la potencia óptica debido a la presencia de un gradiente térmico. Se abordó como es que la automatización de las mediciones facilita la operación del instrumento de medición, así en haciendo uso de éste, en el siguiente capítulo se abordarán los resultados experimentales obtenidos a fin de comprobar la hipótesis planteada y determinar las características del sensor.

REFERENCIAS DEL CAPÍTULO

- [1] Hoja de especificaciones de la platina rotativa *Thorlabs*TM PR01(M).
- [2] Braunsmann C., Prucker V., and Schäffer T, *Optical knife-edge displacement sensor for high-speed atomic force microscopy*, Applied Physics Letters, Vol. 104 No. 103101, pp. 1-4, 2014.
- [3] Hoja de especificaciones del foto-diodo FDS-10 de *Thorlabs*TM.

CAPÍTULO 6. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este capítulo se presentan los resultados experimentales obtenidos mediante el sensor de flujo de calor. En primera instancia se presenta la caracterización del sensor con el objetivo de obtener los parámetros más relevantes del instrumento de medición. Posteriormente se muestra la diferencia entre el esquema de medición mediante múltiples reflexiones contra un esquema lineal para comprobar la hipótesis planteada al inicio del trabajo. Finalmente se muestran mediciones de flujo de calor en materiales cuya conductividad térmica se conoce de tal forma que el sensor pueda ser calibrado.

6.1. Caracterización del sensor

Una vez que se integró el dispositivo de medición de flujo de calor es necesario obtener sus características de desempeño mediante métodos experimentales. En los siguientes apartados se muestran las mediciones para distintos valores de flujo de calor que permiten caracterizar la respuesta del sensor óptico.

6.1.1. Repetibilidad y reproducibilidad

La repetibilidad se refiere la propiedad de un instrumento que indica la cercanía entre los resultados de mediciones sucesivas de una misma magnitud de interés, dichas mediciones son efectuadas en las mismas condiciones de medición, llamadas condiciones de repetibilidad.

Por otro lado, la reproducibilidad hace referencia a la cercanía entre resultados de las mediciones, efectuadas bajo distintas condiciones, por ende es necesario expresar las condiciones que cambian durante el proceso de medición.

Para determinar experimentalmente la repetibilidad de la respuesta del sensor, se realizaron cinco mediciones de flujo de calor con un valor de $Q = 40.5 \text{ [W/cm}^2\text{]}$. En la Figura 6.1 se muestran los resultados obtenidos.

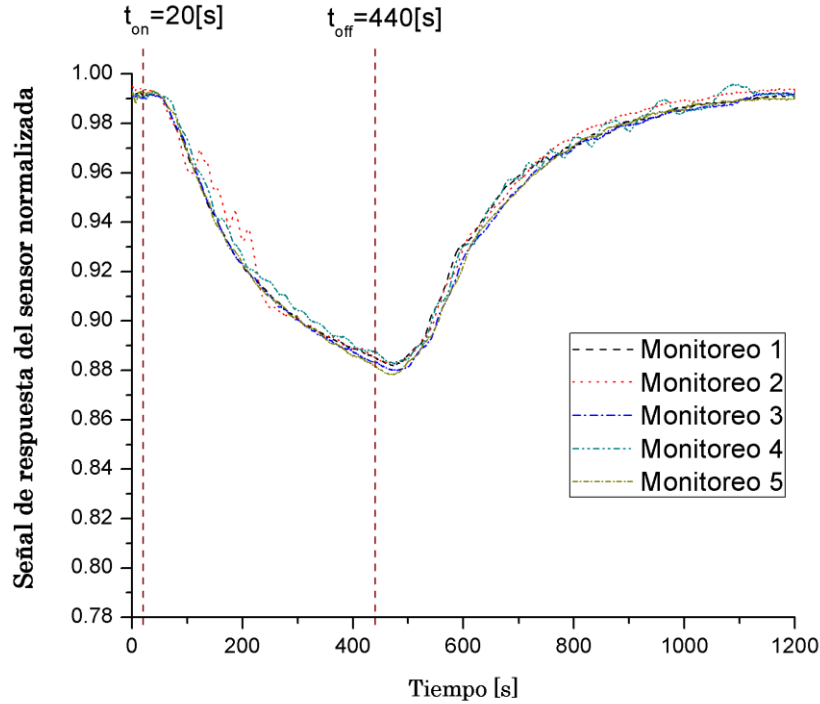


Figura 6.1. Respuesta del sensor de flujo de calor ante un valor de $Q = 40.5 \text{ [mW/cm}^2\text{]}$ para determinar la repetibilidad del sistema.

En esta primera figura se presentan las señales de respuesta del sensor obtenidas con el foto-diodo en función del tiempo medido en segundos. Se puede apreciar que dichas señales se encuentran normalizadas a fin de que ellas puedan ser comparables entre sí, así como para cuantificar fácilmente el porcentaje de decremento en la potencia óptica detectada. Con el objetivo de determinar la repetibilidad del proceso de medición se toman los puntos de cada una de las cinco señales en donde ocurre el decremento máximo de potencia óptica normalizada, los cuales ocurren aproximadamente a los 475 [s]. Con dichos datos, se seleccionan los valores mínimo y máximo siendo estos $K_{min} = 0.878$ y $K_{max} = 0.885$, respectivamente, esto con la finalidad de obtener la máxima variación entre mediciones cuyo valor corresponde a la diferencia entre K_{max} y K_{min} , siendo ésta igual a 0.00691. Es posible resumir el efecto de repetibilidad en las mediciones dado el porcentaje de error:

$$\%E_{REP} = \frac{|K_{max} - K_{min}|}{K_{max}} * 100 = 0.8\% . \quad (6.1)$$

Dado que el porcentaje de error de precisión es menor que 1%, se puede decir que el sensor cumple con la característica de repetibilidad ya que el error puede ser despreciado, garantizando así precisión del 99.2 % en las mediciones.

Posteriormente, fue necesario monitorear la respuesta del sensor bajo las mismas condiciones pero en distintos días para así determinar la reproducibilidad de las mediciones. Así, se realizaron cuatro mediciones, una por día, el resultados de ellas se presenta gráficamente en la Figura 6.2.

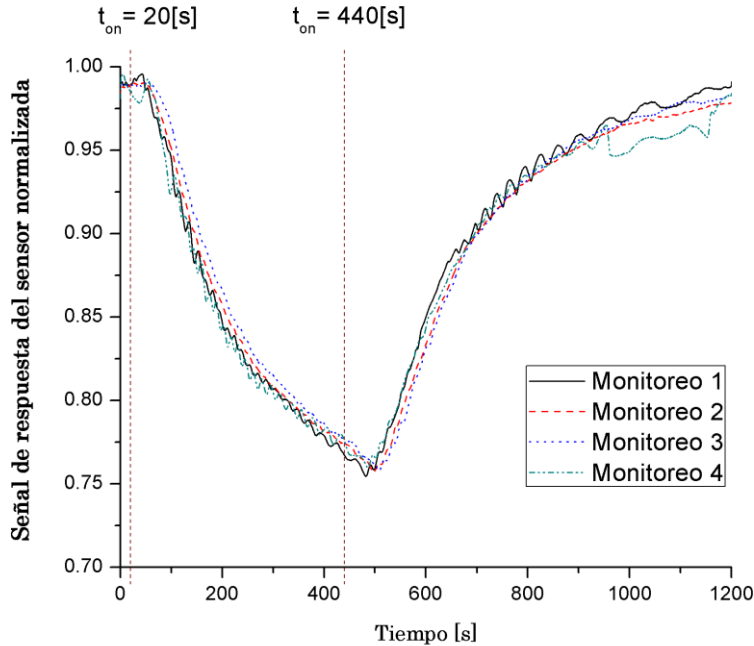


Figura 6.2. Respuesta del sensor de flujo de calor ante un valor de $Q = 162 \text{ [m W/cm}^2\text{]}$ para determinar la reproducibilidad del sistema.

El análisis sobre la figura anterior es muy similar que en el caso donde se determinó la repetibilidad del sensor; sin embargo es conveniente mencionar que en los monitoreos 1 y 4 de la Figura 6.2 se puede apreciar un efecto de oscilaciones durante el periodo de calentamiento, dicho efecto se debió a que en ese momento la estabilidad mecánica del montaje experimental se vio afectada a causas ajenas, aun así el comportamiento de las curvas de potencia normalizada siguen el mismo comportamiento y todas ellas decrecen alrededor del 25%, pudiendo entonces corroborar la reproducibilidad del sensor. Se puede apreciar también que el decremento de potencia para los 4 casos ocurrió alrededor de los 485 [s] y por ende, en dicho instante es posible considerar los valores máximo y mínimo del decremento de potencia, los cuales son $G_{min} = 0.75024$ y $G_{min} = 0.75803$, respectivamente, a fin de obtener el porcentaje de error para la reproducibilidad del sistema:

$$\%E_{REP} = \frac{|G_{max} - G_{min}|}{G_{max}} * 100 = 1\% . \quad (6.1)$$

Al ser el porcentaje de error para la reproducibilidad igual a 1%, es posible obtener la conjetura de que las mediciones de flujo de calor pueden ser consideradas como reproducibles ya que la precisión del sensor en este sentido es de 99%.

6.1.2. Sensibilidad

La sensibilidad del sensor óptico de flujo de calor corresponde a la variación de la potencia óptica medida como respuesta a una entrada de flujo de calor, es decir, indica de manera cuantitativa como es que el sensor responde en términos de la disminución en la potencia óptica debido a la deflexión fototérmica.

Para determinar la sensibilidad del SFC se realizaron 3 mediciones de flujo de calor y se obtuvieron las curvas de respuesta del sensor, mostradas en la Figura 6.3. Sin embargo, dichas curvas no ofrecen directamente la posibilidad de obtener la curva de sensibilidad o calibración de éste.

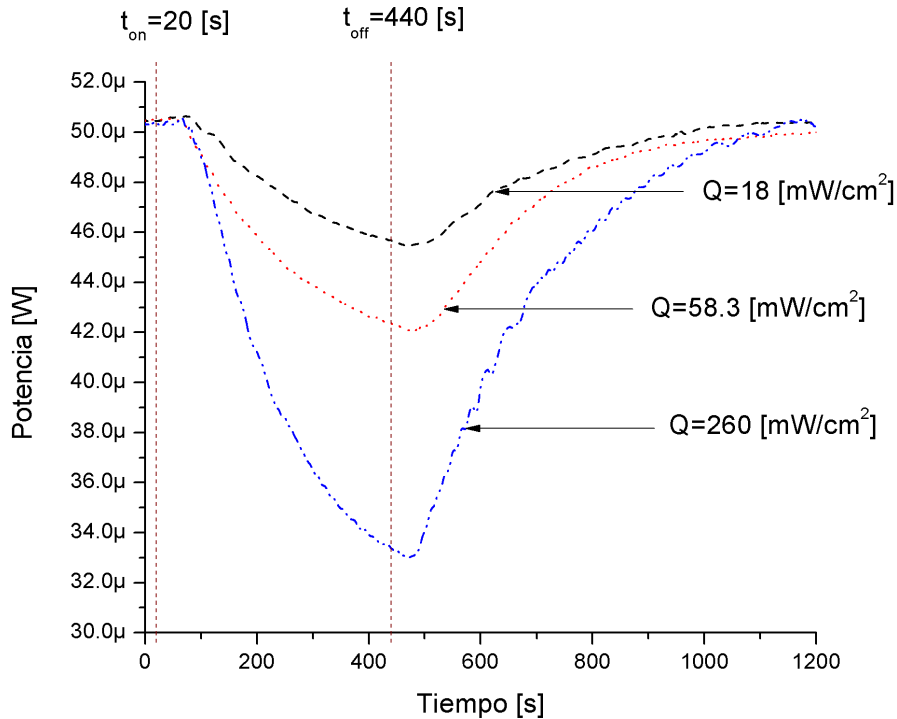


Figura 6.3. Respuesta del sensor de flujo de calor a diferentes valores de Q .

Para obtener la sensibilidad es necesario determinar mediante un análisis gráfico en que momento ocurre el máximo decremento de potencia óptica, esto es, durante el proceso de calentamiento. Así, dado que dicho proceso comprende 420 [s], éste se dividió en 6 intervalos de 70 [s] cada uno, de tal forma que sea posible obtener el intervalo en donde ocurre el cambio de potencia ΔP más significativo para cada valor de Q aplicado, los resultados de dicho análisis se resumen en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1. Determinación del máximo decremento de potencia.

Intervalo de Tiempo [s]	$Q = 18 \text{ [mW/cm}^2\text{]}$	$Q = 58.3 \text{ [mW/cm}^2\text{]}$	$Q = 260 \text{ [mW/cm}^2\text{]}$
	$\Delta P [\mu W]$	$\Delta P [\mu W]$	$\Delta P [\mu W]$
20-90	0.54	1.47	1.47
91-160	1.72	2.75	5.88
161-230	1.27	1.93	4.70
231-300	1.22	1.47	3.00
301-370	0.86	1.20	2.13
371-440	0.77	1.00	1.31

De la tabla anterior es claro observar que el intervalo de tiempo en donde ocurre el máximo decremento de potencia es entre 91 y 160 [s], por ende dicho intervalo se considera para obtener la recta de calibración del sensor; además es posible notar en dicha tabla que, cuanto mayor es el flujo de calor aplicado mayor es el decremento de potencia.

Dado que se conoce cuál es la variación máxima de potencia óptica para tres valores de flujo de calor aplicados al sensor, es posible entonces graficar los puntos ΔP en función del calentamiento Q al que responden, así como obtener la mejor recta que pase por ellos, es decir un ajuste lineal como se muestra en la Figura 6.4.

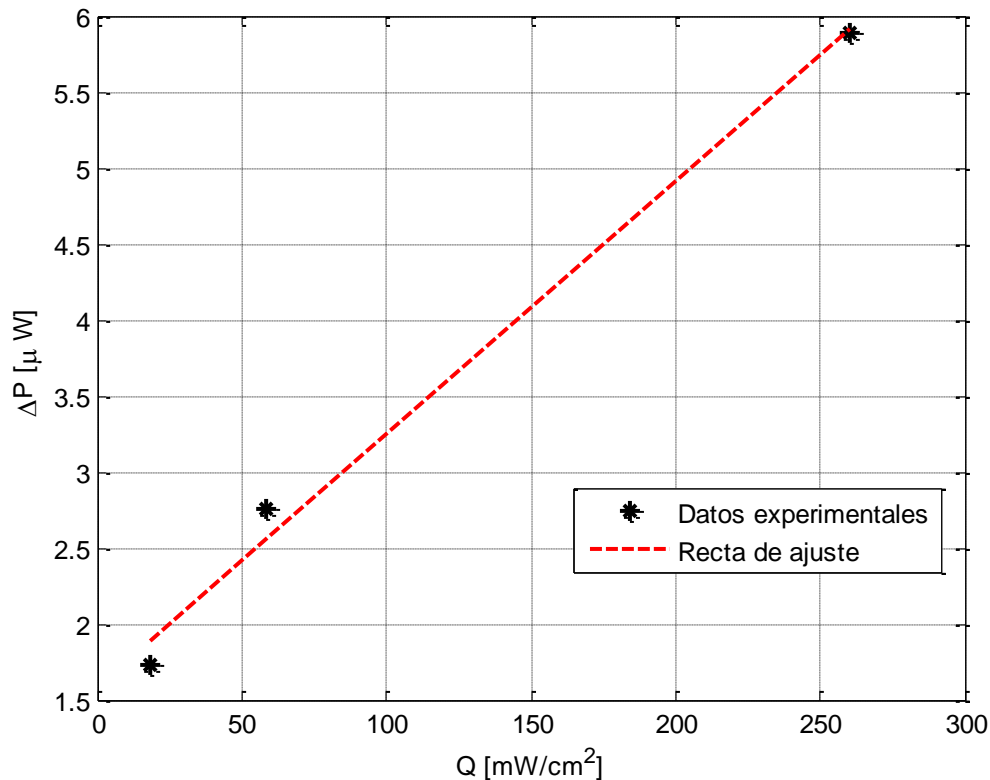


Figura 6.4. Recta de calibración de la respuesta del sensor de flujo de calor.

En la recta de calibración se grafican los valores de potencia óptica como función del flujo de calor aplicado, en ella es posible comprobar que cuanto mayor es este último, mayor es el decremento de potencia óptica detectado. Por otro lado, la pendiente de la recta es el elemento que da la información sobre la sensibilidad del sensor, pues indica la razón de cómo cambia la potencia óptica dado un valor de flujo de calor, así la sensibilidad es igual a $S = 16.6 \left[\frac{\text{nW}}{\text{mW}/\text{cm}^2} \right]$.

6.1.3. Resolución y rango de medición

La resolución de un instrumento o sensor hace referencia a la mínima lectura que éste puede dar, dicho de otra manera hace referencia al mínimo valor capaz de ser leído por el sensor. De esta forma, para determinar la resolución del sensor de flujo de calor se determinó experimentalmente el valor de corriente eléctrica que debe ser aplicada al resistor de potencia,

con el cual el sensor comienza a responder, dicho valor de corriente corresponde a 0.03 [A], generando un flujo de calor igual a 1.62 [mW/cm²], por ende dicho valor corresponde a la resolución del sensor propuesto. La Figura 6.5 muestra la respuesta del sensor a tres diferentes valores de Q , que para ser generados, se incrementó el valor de la corriente suministrada en intervalos de 0.03 [A], dado que la fuente de alimentación es el único mecanismo de control que se tiene sobre la operación del sensor.

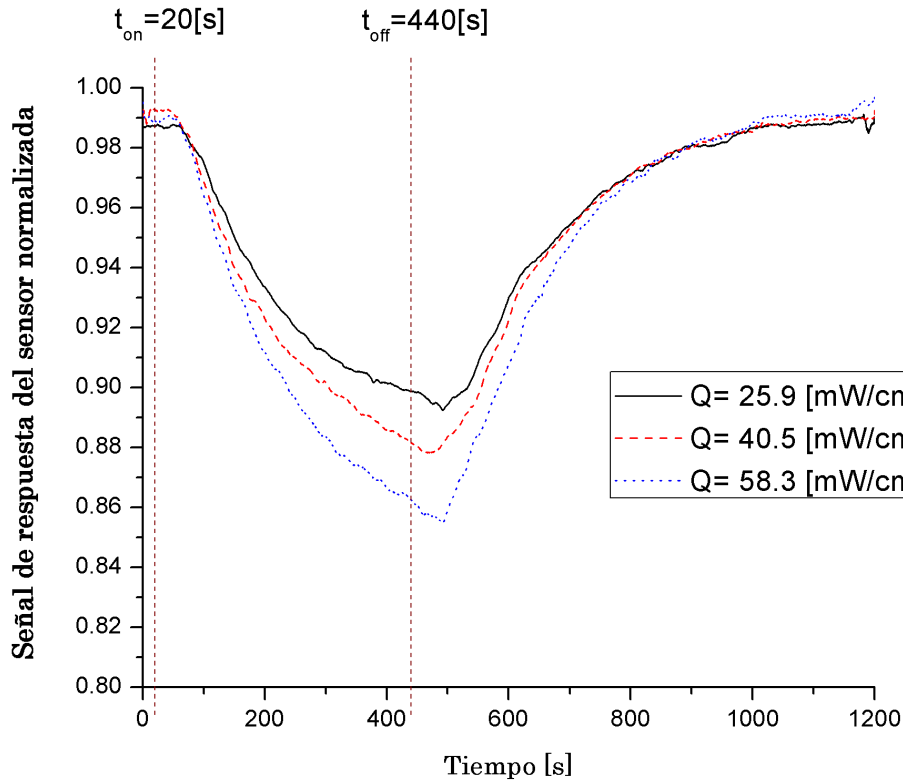


Figura 6.5. Respuesta del sensor a diferentes valores de Q para determinar resolución.

Un concepto ligado a la resolución, es el rango de medición del instrumento, referido a los valores mínimos y máximos que éste puede detectar, en este sentido, si ya se determinó previamente el mínimo, fue necesario determinar el máximo valor de flujo de calor que puede ser aplicado al sensor, considerando que es preciso ajustarse al valor máximo de corriente eléctrica (0.6 [A]), que la fuente calefactora puede soportar en términos de la potencia máxima de disipación, para el cual el flujo de calor máximo que en la práctica pudo ser aplicado al sensor es de 450.1 [mW/cm²].

Con los anteriores planteamientos, es posible entonces presentar gráficamente la respuesta del sensor de flujo de calor para los valores límite del rango de medición, la Figura 6.6 presenta el rango de medición del sensor, así como la resolución de éste, correspondiente al mínimo valor que de Q que puede ser detectado.

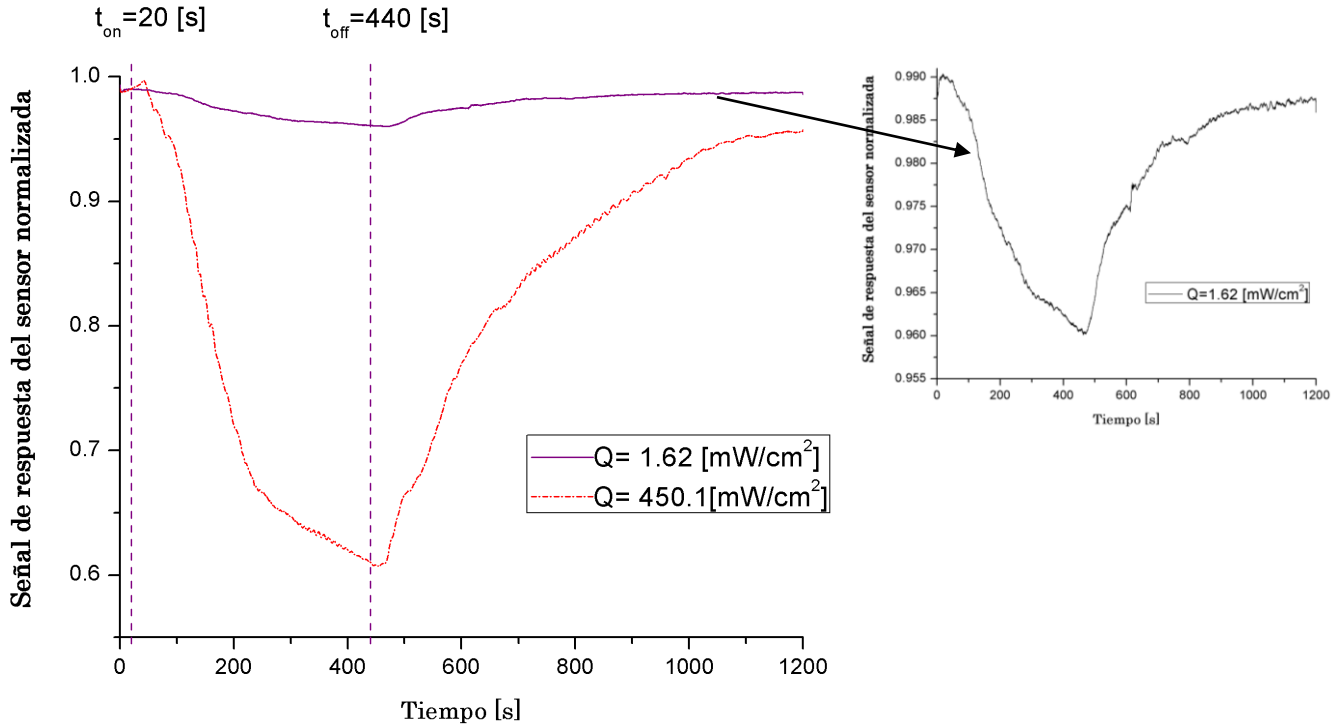


Figura 6.6. Rango de medición del sensor óptico de flujo de calor.

6.2. Medición de flujo de calor en materiales de conductividad conocida

Con el objetivo de validar la respuesta del sensor hacia una de las posibles aplicaciones que éste pudiera tener en el campo de la caracterización de propiedades térmicas de materiales, se realizaron mediciones de flujo de calor en materiales cuya conductividad térmica es conocida y ha sido reportada con anterioridad en la literatura, mostradas en la Tabla 6.2. Para ello se tomaron muestras de baquelita, vidrio y acero con dimensiones iguales a la celda Herriott fabricada, esto es 1.5 [cm²], con un espesor aproximadamente igual a 2 [mm].

Tabla 6.2. Conductividad térmica de los materiales bajo prueba *

Material	Conductividad térmica [W/(m · K)]
Baquelita	0.23
Vidrio	0.81
Acero	47

Para realizar las mediciones, los materiales fueron colocados entre el resistor de potencia (fuente de calor) y la celda Herriott, es decir, durante estas pruebas el fuente de calor ya no se encontraba en contacto directo con la celda óptica, en vez de ello, el material colocado entre ambos

*Sears, Zemansky, Young and Freedman, Física Universitaria, Vol. I, Pearson, 1999.

elementos determinará la conducción de calor de la fuente hacia el bloque de acrílico y con ello la respuesta del sensor será una función de la conductividad térmica del material como lo muestra la Figura 6.7 en donde el calor aplicado a los materiales fue igual a $112.5 \text{ [mW/cm}^2\text{]}$.

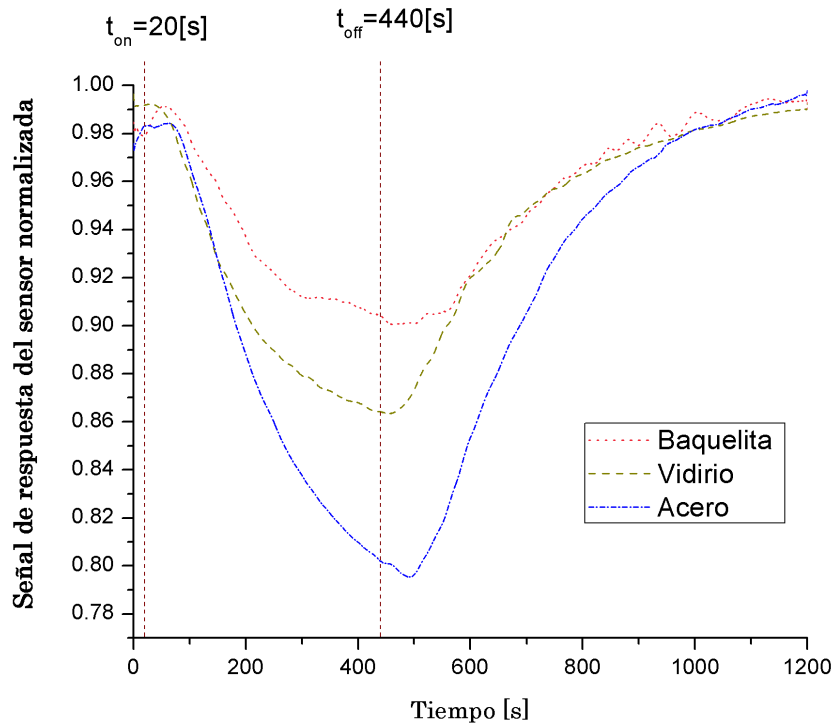


Figura 6.7. Respuesta del sensor para materiales con diferente conductividad térmica aplicando un valor de $Q = 112.5 \text{ [mW/cm}^2\text{]}$.

Si se analiza la figura anterior es posible observar como es cuanto menor es la conductividad térmica del material bajo estudio, menor es el decremento de la potencia óptica detectada, debido a que el material es quien funge como limitante del calor que se aplica de la fuente hacia la celda Herriott.

En resumen, este experimento permita validar como es que la respuesta del sensor está en función de las propiedades térmicas del material que se desee estudiar; sin embargo es de aclarar que el análisis de dichas propiedades no es el objetivo de este trabajo, dado que el propósito principal es precisamente demostrar que el sensor propuesto puede ser empleado en la caracterización de materiales.

A continuación se plantea un experimento en el que empleando un material con misma conductividad térmica, se varía el espesor de éste, de tal forma que sea posible obtener la respuesta del sensor ante dichos cambios. Así, por practicidad se eligió al aire como el material bajo prueba, por lo que se varió la distancia de separación entre el la fuente de calor y la celda Herriott, emulando así el espesor del material, cuya conductividad térmica es igual a $0.024 \text{ [W/(m} \cdot \text{K)]}$. En la Figura 6.8 se muestran las respuestas del sensor ante variaciones en el espesor de aire iguales a 1, 0.5 y 0.1 [cm].

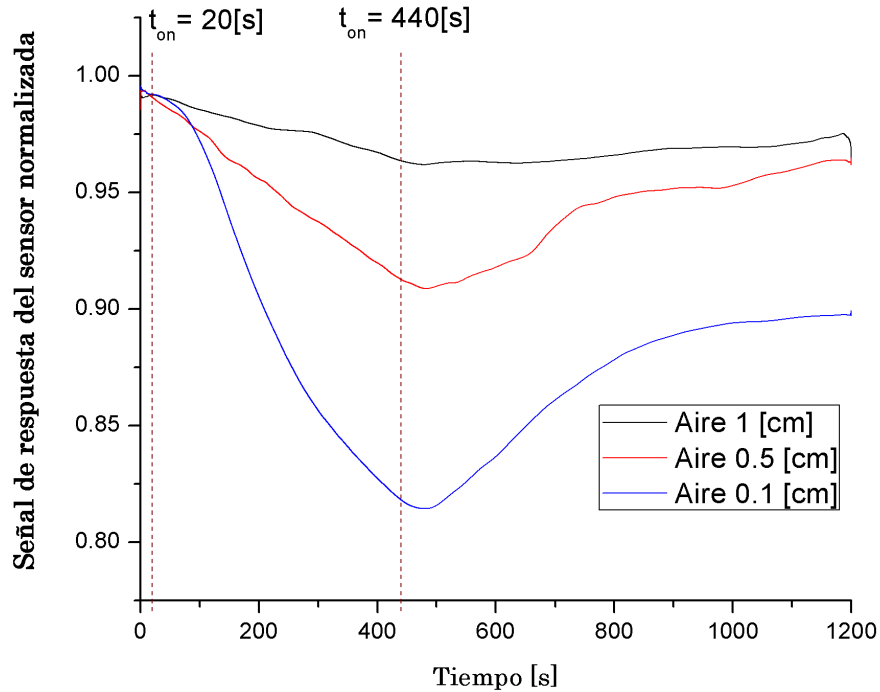


Figura 6.8. Respuesta del sensor ante variaciones del espesor de una capa de aire aplicando un valor de $Q = 95.2 \text{ [mW/cm}^2\text{]}$.

Es posible observar cómo es que el decremento en la potencia óptica es función del espesor del material, esto debido a que el calor que se aplica a la celda disminuye. Por una parte cuanto mayor es la separación entre la fuente de calor y la celda Herriott (1 [cm]), menor es el decremento de potencia, alrededor de 2%, mientras que cuanto más cerca se colocan dichos elementos (0.1 [cm]), mayor es el decremento de potencia óptica, esto es, cerca del 16%. Así, se demuestra cómo es que la conducción de calor con el sensor propuesto, es función también del espesor del material bajo estudio.

Finalmente, las anteriores mediciones tanto en distintos materiales, como en uno mismo con diferente espesor, son un medio que permite corroborar como es que las propiedades térmicas de los materiales pueden ser cuantificadas mediante el sensor óptico de flujo de calor propuesto.

6.3. Múltiples reflexiones vs trayectoria lineal

Cómo se ha planteado hasta el momento, una ventaja de la configuración propuesta en este trabajo para el SFC, es el aumento de la sensibilidad debido al esquema de múltiples reflexiones que ocurren dentro de la celda Herriott, esto a consecuencia del aumento en la trayectoria total recorrida por el haz. Bajo este contexto, se planteó un experimento que permitiera observar los efectos de dicha trayectoria en la respuesta del sensor. Para ello se tomó un bloque de acrílico de 1.5 [cm] de longitud, distancia correspondiente a la separación entre espejos de la celda Herriott fabricada, sólo que en este caso las caras del bloque fueron pulidas micrométricamente para que quedaran los más planas y lisas posibles, de tal forma que el haz láser atravesara el bloque en un solo recorrido, es decir, la distancia total recorrida fue igual a 1.5 [cm] y no 6 [cm] como ocurre en la celda óptica. Empleando el proceso de medición y el sistema automático descritos en el capítulo anterior, se realizaron dos mediciones aplicando los valores de

flujo de calor con los cuales se obtuvo la sensibilidad del sensor basado en la celda Herriott, a fin de comparar los resultados entre ambos esquemas, dichos resultados se muestran en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3. Comparativa entre el máximo decremento de potencia del esquema de múltiples reflexiones y en trayectoria lineal.

Intervalo de Tiempo [s]	MÚLTIPLES REFLEXIONES $d = 6$ [cm]		TRAYECTORIA LINEAL $d = 1.5$ [cm]	
	$Q = 18$ [mW/cm ²]	$Q = 58.3$ [mW/cm ²]	$Q = 18$ [mW/cm ²]	$Q = 58.3$ [mW/cm ²]
	ΔP [μW]	ΔP [μW]	ΔP [μW]	ΔP [μW]
20-90	0.54	1.47	0.14	0.29
91-160	1.72	2.75	0.31	0.50
161-230	1.27	1.93	0.39	0.90
231-300	1.22	1.47	0.50	1.12
301-370	0.86	1.20	0.51	1.15
371-440	0.77	1.00	0.42	0.94

Analizando a tabla se corrobora lo que previamente se había determinado, para el esquema con celda Herriott el máximo decremento de potencia ocurre en el intervalo 91 a 160 [s]; sin embargo para el esquema de trayectoria lineal, dicho decremento ocurre en el intervalo de 301 a 370 [s], lo cual prevé que la velocidad de respuesta de este último esquema es menor en comparación con el esquema de múltiples reflexiones. Para determinar cuantitativamente dicha velocidad de respuesta, es necesario entonces obtener la recta de calibración del sensor con el esquema de trayectoria lineal, mostrada en la Figura 6.9, aplicando el mismo criterio que cuando se empleó la celda Herriott como elemento sensible.

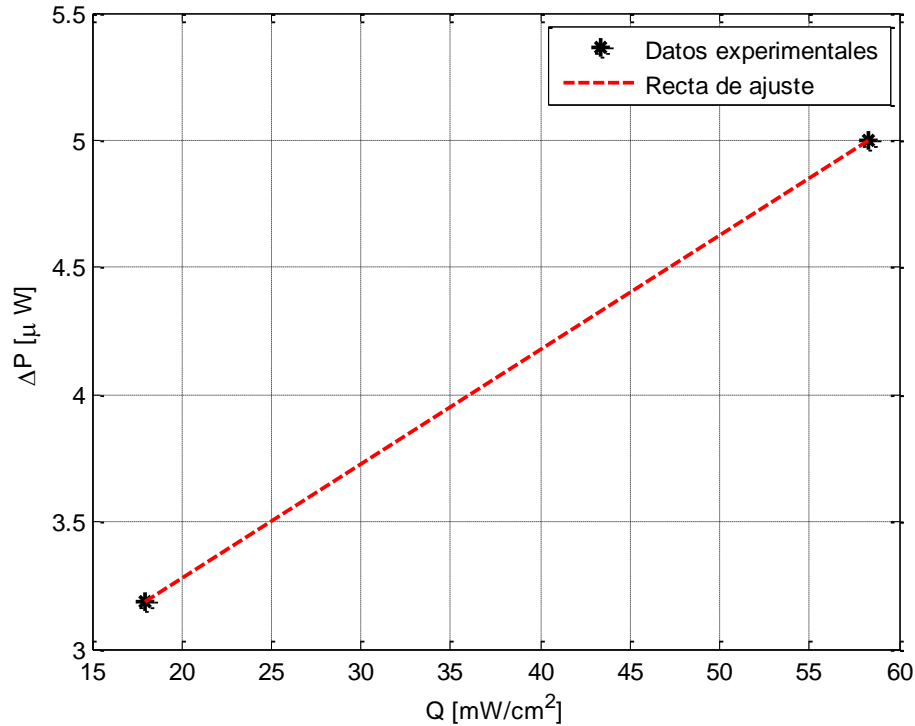


Figura 6.9. Recta de calibración del sensor de flujo de calor con esquema de trayectoria lineal.

La pendiente de la recta anterior da entonces la información sobre la sensibilidad del sensor con trayectoria lineal, siendo ésta igual a $S_{LIN} = 4.51 \left[\frac{\text{nW}}{\text{mW}/\text{cm}^2} \right]$. Y comparando dicho valor con el esquema de múltiples trayectorias se puede entonces obtener que éste último tiene una sensibilidad mayor que en trayectoria lineal en aproximadamente 72.9 %, haciendo una comparación relativa entre ambos valores. En otras palabras se puede comprobar que $S \approx 4S_{LIN}$, es decir la sensibilidad del esquema de múltiples reflexiones es aumentada respecto al de trayectoria lineal dado el número N de pasos que ocurren dentro la celda Herriott, en este particular caso 4 veces.

Para observar la respuesta entre ambas configuraciones, la Figura 6.10 muestra las señales normalizadas de potencia óptica obtenidas durante el experimento.

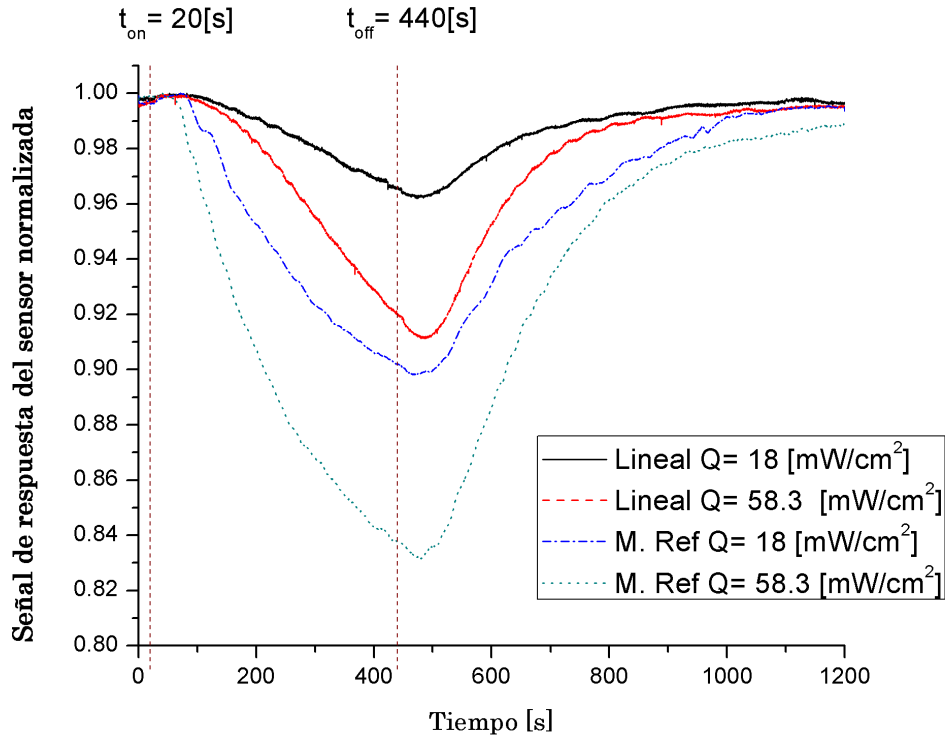


Figura 6.10. Respuesta del sensor en configuración de múltiples reflexiones vs trayectoria lineal.

Gráficamente, mediante la figura anterior es posible corroborar en términos cuantitativos que en la respuesta del sensor el decremento de la potencia es mayor cuando se emplea el esquema de múltiples reflexiones dadas por la celda Herriott, ya que para un mismo valor de $Q = 18 [mW/cm^2]$, en trayectoria lineal la potencia óptica decrece un 3%, mientras que cuando se usa la celda Herriott, el decremento es del 10%, lo mismo ocurre para $Q = 58.3 [mW/cm^2]$, en donde el primer caso muestra una disminución igual a 9%, en tanto el segundo caso refleja un 17%. En otras palabras, empleando la celda Herriott, la rapidez con la que la potencia óptica decrece es mayor que cuando solo existe una trayectoria del haz, efecto debido a que en mediante la celda Herriott se tiene mayor sensibilidad.

El propósito de este capítulo fue presentar los resultados experimentales obtenidos mediante la celda Herriott usada como transductor o elemento sensible del sensor de flujo de calor. Se mostraron las principales características de operación de este obtenido los valores numéricos referidos a la resolución, sensibilidad y rango de medición. Por otra parte, se validó su funcionamiento realizando mediciones de flujo de calor en materiales de conductividad térmica conocida, mostrando como es que cuando la conductividad de los materiales puede ser asociada a la respuesta del sensor. Finalmente, se comprobó que mediante el uso de un esquema de múltiples reflexiones del haz que viaja al interior de la celda Herriott, se logra aumentar significativamente la sensibilidad del sensor, comparado con un esquema en donde el haz viaja en una trayectoria lineal a través de un bloque de acrílico con las mismas dimensiones que la celda. La siguiente parte del trabajo, presenta las conclusiones obtenidas como resultado del desarrollo del sensor propuesto.

CONCLUSIONES GENERALES

En el presente trabajo se mostró el diseño, fabricación y validación experimental de un sensor óptico de flujo de calor basado en la deflexión foto-térmica, el cual tiene su base en una celda óptica de largo camino tipo Herriott. El uso de ésta celda tuvo como objetivo principal, demostrar que es posible disminuir el tamaño de las muestras de los materiales que se desean caracterizar térmicamente sin decremento en la sensibilidad del sensor, teniendo como consecuencia una ventaja sobre el diseño anteriormente desarrollado en el Grupo de Sensores Ópticos y Eléctricos del CCADET. Adicionalmente se presentó el aumento de sensibilidad en el sensor debido al esquema de múltiples reflexiones y por ende la trayectoria total recorrida por el haz es mayor respecto a un esquema de propagación lineal como el caso del sensor anteriormente propuesto. Contar con un dispositivo de múltiples reflexiones empleando espejos curvos presenta entonces una significativa ventaja al reducir el tamaño de la celda y manteniendo o aumentando la trayectoria total recorrida por el haz.

El comportamiento de la celda se analizó mediante el método matricial de propagación de rayos empleando la aproximación paraxial. Con dicho método fue posible obtener el patrón de incidencias que se forma en los espejos de la celda; además mediante el método analítico-geométrico utilizado en la teoría de resonadores ópticos, se obtuvieron los parámetros de desempeño de la celda a fin de determinar las características funcionales de ésta. Para ello se determinó como cambia el número de pasos N y la trayectoria total recorrida ϑ en función de los radios de curvatura y la separación entre espejos, ya que estos últimos dos parámetros son los que experimentalmente son necesarios para conformar a la celda Herriott. Además, se consideró que el medio de propagación de la luz corresponde al acrílico, con lo cual fue posible obtener un dispositivo compacto e integrado en dicho medio, a diferencia de los trabajos encontrados en la literatura.

Durante el desarrollo del trabajo fue posible obtener un primer prototipo funcional de una celda compacta tipo Herriott integrada en un bloque de acrílico. Así, el planteamiento de emplear este tipo de celda en un sensor óptico de flujo de calor para disminuir el tamaño de la muestra se cumplió, logrando reducir en este primer diseño, al menos al 50% las dimensiones, teniendo una trayectoria total recorrida igual a 6 [cm], la cual se encuentra en el intervalo de interés planteado $3 \leq \vartheta \leq 10$ [cm], lo que corresponde al doble de la trayectoria recorrida respecto al sensor de trayectoria lineal. Para el caso $\vartheta = 3$ [cm], se ha demostrado que se tiene sensibilidad suficiente para distinguir conducción de calor en distintitos materiales como tejidos biológicos, y en este caso sería necesario contar con radios de curvatura $R \sim 1$ [cm] y una separación entre espejos $d \sim 0.5$ [cm], dimensiones que con las tecnologías empleadas en este momento no pudieron ser obtenidas, pero que explorando algunas más, podrían ser logradas.

La técnica empleada para estimar la conducción es la deflexión foto-térmica, la cual es el método que permite comprobar el principio de funcionamiento del sensor, de tal forma que fue posible obtener que la respuesta del sensor, es decir, la potencia óptica detectada es una función del flujo de calor aplicado. Para ello, se realizaron pruebas experimentales con distintos valores de flujo de calor a fin de obtener la resolución del sensor, siendo ésta igual a 1.62 [mW/cm²];

además se obtuvo una sensibilidad de $1.6 \times 10^{-8} \left[\frac{\text{W}}{\text{mW/cm}^2} \right]$ y el rango de medición del sensor de 1.62 a 451 $[\text{mW/cm}^2]$. Por otro lado, se logró diferenciar la conducción de calor de materiales de conductividad térmica conocida, como el aire, el vidrio, la baquelita y el aluminio con el objetivo de comprobar que aquellos con menor conductividad presentaran un menor cambio en la señal del sensor y los de mayor conductividad tuvieran una señal de respuesta con mayor cambio.

Es importante mencionar que para la sensibilidad, aunque fue considerada como un objetivo complementario, se demostró que además de reducir el tamaño del bloque de acrílico, ésta aumentó 4 veces respecto a un esquema de propagación lineal, característica que pudiera volver atractivo al sensor propuesto en este trabajo para aplicaciones en donde se requiera analizar propiedades térmicas de materiales, como es el caso de los tejidos biológicos en donde se requiera tener una buena sensibilidad pero empleando un área activa del sensor de tamaño reducido, para lo cual el tamaño de la muestra sería comparable con el de una biopsia y por ende la posibilidad de medición *in-vivo* de conducción de calor en tejidos podría realizarse ser útil para el estudio y diagnóstico médico.

Las limitantes principales se presentaron en el proceso de fabricación de la celda Herriott, pero se pretende que el presente trabajo pueda ser un parte de estudio con miras hacia posibles mejoras en su fabricación a fin de mejorar los resultados de dicho dispositivo e incluso utilizar otras configuraciones de celdas de camino óptico largo para su aplicación en áreas como: interferometría óptica, microfluídica, espectroscopia láser, pudiendo presentar una ventaja en términos de portabilidad en el dispositivo y por lo tanto simplicidad de éste.

Anexo A. Efecto navaja

Partiendo del hecho en que el haz de luz láser que viaja dentro de la celda tiene un perfil de intensidad Gaussiano [†] cuya representación gráfica se muestran en la Figura A.1.

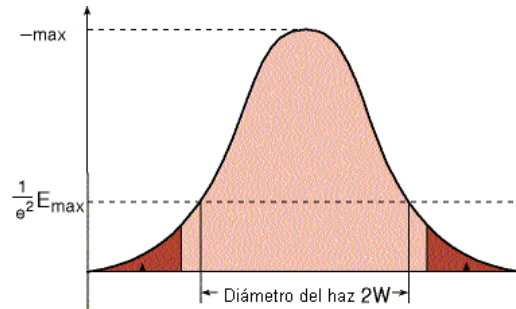


Figura A.1. Perfil Gaussiano de un haz de luz láser.

El desplazamiento lineal Δx que el haz sufre debido a la fuente de calor, provoca que el perfil Gaussiano se desplace en dirección perpendicular al eje óptico y por ende paralelamente al eje x en donde el calor es aplicado. Para ilustrar éste ejemplo en la Figura A.2. se muestra el perfil Gaussiano del haz en el estado inicial y cuando se ha desplazado un cierto Δx .

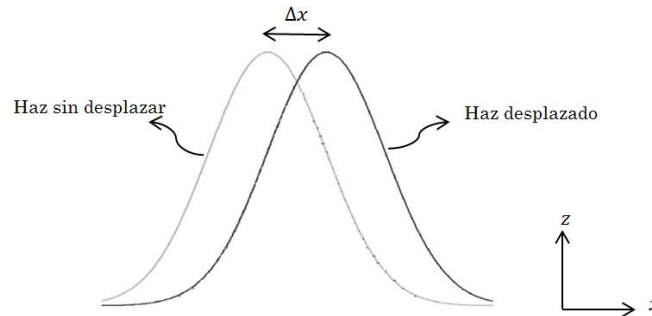


Figura A.2. Desplazamiento lineal del haz Gaussiano debido a la deflexión foto-térmica.

En óptica existe un método para determinar el perfil o distribución de intensidad de un haz de luz conocido como efecto navaja cuyo objetivo es bloquear rayos de luz y así obtener la distribución de luz que da la información sobre el perfil [2]. El método se basa en hacer incidir el haz láser sobre el filo de la navaja, la cual es desplazada en pasos típicamente micrométricos, dichos desplazamientos se ven reflejados como una disminución en la potencia óptica medida con un foto-detector conforme el filo de la navaja bloquea los rayos de luz que inciden en el detector. En resumen, partiendo de un estado inicial en donde el haz no incide en la navaja, todos los rayos son captados por el foto-detector lo que implica que sea detectada la máxima potencia óptica, conforme el desplazamiento de la navaja se incrementa, el filo bloquea cada vez más rayos de tal

[†]**Haz Gaussiano:** Es un haz de radiación electromagnética cuya transversal de campo eléctrico y distribuciones de intensidad son bien aproximada por funciones Gaussianas. Está descrito con las características de divergencia o convergencia, fase del frente de onda y la dimensión transversal del haz. El frente de onda o perfil 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.

forma que la potencia óptica disminuye cuanto mayor es el desplazamiento. El experimento para el efecto navaja sobre un haz láser se muestra en la Figura A.3.

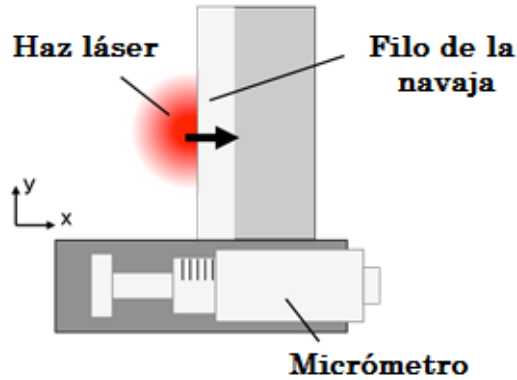


Figura A.3. Efecto navaja sobre un haz láser con perfil Gaussiano.

En el sensor de flujo de calor, el desplazamiento Δx inducido sobre el haz de salida de la celda Herriott puede asociarse al efecto navaja si se considera qué quien se desplaza es el haz mientras que la navaja queda fija, dicha configuración producirá entonces el mismo resultado que cuando la navaja se desplaza y el haz se encuentra estático.

Sí se considera que la potencia del haz es cuantificada mediante un foto-detecto, la forma en la que el área activa de éste es capaz de detectar los cambios en la potencia puede ser expresada analíticamente tomando como parámetros principales el radio del haz y el desplazamiento lineal de la siguiente manera ^[A].

Asumiendo que el haz con perfil de intensidad Gaussiano se propaga en dirección del eje óptico z, éste se describe como:

$$I(x, y) = I_0 e^{-2(x^2+y^2)/r_0^2}, \quad (\text{A.1})$$

donde I_0 es la máxima intensidad del haz en el centro de simetría de éste y r_0 es el radio del haz medido en el punto en donde la intensidad es igual a I_0/e^2 . La potencia total P_{tot} en el haz es:

$$P_{tot} = I_0 \int_{-\infty}^{\infty} e^{-2(x^2)/r_0^2} dx \int_{-\infty}^{\infty} e^{-2(y^2)/r_0^2} dy = \frac{\pi}{2} r_0^2 I_0. \quad (\text{A.2})$$

Considerando que el filo de la navaja está situado paralelamente al eje y, y el haz se desplaza en la dirección x, la potencia incidente en el área activa del detector $P(x)$ de tal forma que ésta resulta de la diferencia entre la potencia total P_{tot} y la potencia captada en la dirección x:

$$P(x) = P_{tot} - I_0 \int_{-\infty}^x e^{-2(x^2)/r_0^2} dx \int_{-\infty}^{\infty} e^{-2(y^2)/r_0^2} dy, \quad (\text{A.3})$$

^[A]Díaz R., Rosete M., and Ortega R., *Position sensing of a Gaussian beam with a power meter and a knife edge*, Revista Mexicana de Física, Vol. 39 No. 3, pp. 484-492, 1993.

la solución al término integral respecto al eje y puede ser obtenida de acuerdo a la ecuación (A.2), entonces:

$$P(x) = P_{tot} - \sqrt{\frac{\pi}{2}} I_0 r_0 \left[\int_{-\infty}^x e^{-2(x^2)/r_0^2} dx \right], \quad (\text{A.4})$$

mientras la solución para el eje de interés x , debe ser obtenida cambiando los límites de integración dado que es una integral cuyo límite superior es una variable:

$$P(x) = P_{tot} - \sqrt{\frac{\pi}{2}} I_0 r_0 \left[\int_{-\infty}^0 e^{-\frac{2(x^2)}{r_0^2}} dx + \int_0^x e^{-\frac{2(x^2)}{r_0^2}} dx \right], \quad (\text{A.5})$$

al resolver los términos integrales de la ecuación (A.5) se tiene finalmente que:

$$P(x) = \frac{P_{tot}}{2} - \sqrt{\frac{\pi}{2}} I_0 r_0 \int_0^x e^{-\frac{2(x^2)}{r_0^2}} dx. \quad (\text{A.6})$$

Considerando la ecuación (A.6), es posible tomar un cambio de variable para $u^2 = 2x^2/r_0^2$ y por tanto $dx = r_0^2 du/\sqrt{2}$, resultando entonces que:

$$P(x) = \frac{P_{tot}}{2} - \frac{\pi}{4} I_0 r_0^2 \left[\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{\sqrt{2}x}{r_0}} e^{-u^2} du \right]. \quad (\text{A.7})$$

El término integral de la ecuación (A.7) representa la definición de la función error complementario $\text{erf}(x)$:

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-u^2} du. \quad (\text{A.8})$$

Finalmente, sustituyendo la expresión (A.8) en la ecuación (A.7), se tiene que la potencia medida $P_{medida}(x)$ por el detector cuando el haz se desliza en la dirección x es:

$$P_{medida}(x) = \frac{P_{tot}}{2} \left[1 - \text{erf}\left(\frac{\sqrt{2}x}{r_0}\right) \right]. \quad (\text{A.9})$$

Anexo B. Automatización del sistema de medición

Optimizar el rendimiento de ciertos procesos de medición involucrados en distintos sistemas de instrumentación es una tarea que debiera ser inherente a ellos a fin de evitar perturbaciones indeseadas de índole mecánico, eléctrico o electromagnético, así como facilitar la adquisición de los datos propios de las mediciones y sincronizar los pasos involucrados en un procedimiento de medición. Comúnmente dicha optimización se asocia con la capacidad de un instrumento de actuar de forma automática, tratando que el operador del instrumento intervenga en el proceso de medición en la menor medida posible. Bajo este contexto, un agregado al sensor de flujo de calor y su procedimiento de medición, es la automatización de éste.

Automatizar el sistema de medición tiene como objetivos evitar que el usuario tenga la necesidad de activar o desactivar los elementos eléctricos asociados a éste, regular el flujo de calor aplicado, sincronizar los intervalos de tiempo en donde la fuente de calor debe ser encendida o apagada, digitalizar la señal del foto-diodo y almacenar en una hoja de cálculo las mediciones a fin de tener un registro de ellas. En la Figura B.1 se muestra el diagrama de bloques del sistema de medición automático propuesto.

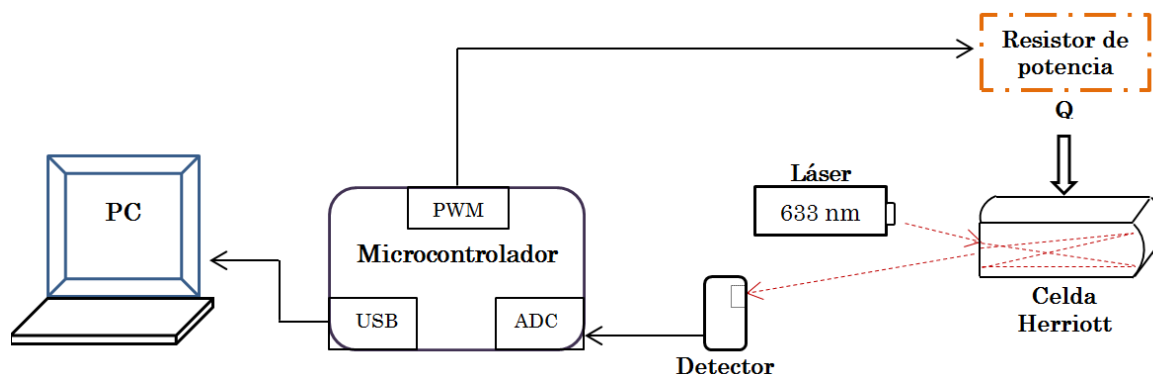


Figura B.1. Diagrama de bloques del sistema automático de medición de flujo de calor.

Para entender cada parte que conforma el proceso automático de medición a continuación se describe cada una de ellas.

- Microcontrolador

Este es el elemento central del sistema automático pues es el encargado de activar al resistor de potencia, digitalizar la señal del foto-diodo FDS-100 y enviar los datos adquiridos hacia una computadora personal a través del protocolo de comunicación USB (*Universal Serial Bus*). El dispositivo elegido para realizar dichas tareas es el microcontrolador PIC18F4550^[5] de la empresa *Microchip*TM. La elección del dispositivo se fundamenta en su buena velocidad de procesamiento (48 MHz), además cuenta con la posibilidad de implementar en forma nativa la comunicación USB sin necesidad de circuitos electrónicos intermedios, mediante la conexión USB a una computadora personal (PC: *Personal Computer*) es posible obtener una fuente de voltaje de 5 [V], ideal para polarizar al foto-diodo. Una característica más del microcontrolador es su capacidad de generar señales digitales en formato PWM (*Pulse Width Modulation*), mediante las cuales es posible controlar la cantidad de corriente eléctrica que circula por el resistor de potencia

y por ende la potencia que éste disipa. Finalmente, en cuanto a la digitalización del voltaje del foto-diodo, el 18F4550 tiene integrado un convertidor analógico-digital con resolución de 10 bits, logrando así poder digitalizar señales de voltaje con resolución de 4.9 [mV]. En conjunto, el uso de este dispositivo resulta ideal en el proceso de automatización del proceso de medición.

- Etapa de potencia para la fuente de calentamiento

Con la finalidad de controlar la cantidad de corriente eléctrica que llega al resistor de potencia y por ende la potencia que éste disipa en forma de calor, es necesario implementar un método de control de corriente teniendo una fuente de voltaje fija. Un método útil para dicho fin es la modulación de ancho de pulso o PWM, en donde una señal cuadrada de periodo conocido es aplicada a la carga que se desea controlar; mediante la variación del ciclo de trabajo de dicha señal, es posible obtener un porcentaje del voltaje total de la fuente y por ende la corriente eléctrica en la carga será proporcional al porcentaje del voltaje aplicado. Para tener una representación gráfica del funcionamiento de efecto PWM, en la Figura B.2 se muestra dicho efecto sobre una fuente de voltaje.

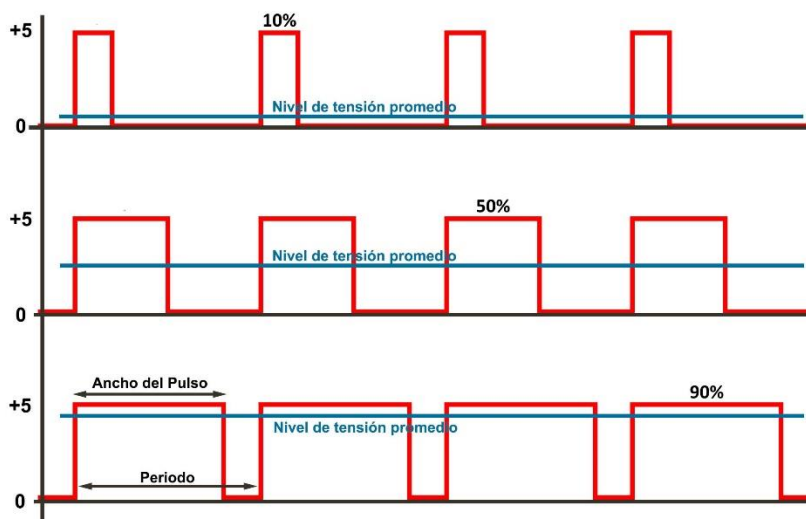


Figura B.2. Señal PWM aplicada sobre una fuente de alimentación.

Es posible notar que el resultado final de aplicar la señal PWM corresponde a un nivel de voltaje promedio, típicamente expresado en términos del porcentaje del tiempo en alto de la señal cuadrada. El encargado de generar la señal PWM es el microcontrolador; sin embargo éste sólo puede suministrar alrededor de 10 [mA] en sus terminales y por ende es necesario construir un circuito intermedio entre el microcontrolador y el resistor de potencia, dicho circuito es conocido como etapa de potencia.

La etapa de potencia es la encargada de controlar la cantidad de corriente eléctrica que fluye a través del resistor de potencia, de tal forma que quien suministra la es la fuente de voltaje y no el microcontrolador. La interfaz de potencia es construida a partir de un arreglo de transistores en configuración par Darlington, dicho dispositivo tiene una alta ganancia de corriente en comparación con un transistor simple. La elección de éste se hizo tomando como base la corriente máxima que puede fluir por el resistor de potencia, i.e. 0.61 [A], siendo la máxima corriente soportada por el par Darlington TIP120 igual a 5 [A] con un voltaje base-colector de 60 [V]. Por ende, los valores nominales del TIP120 hacen posible que la conexión entre el microcontrolador y

el resistor de potencia pueda ser establecida sin problema alguno. En la Figura B.3 se muestra el diagrama eléctrico de conexiones.

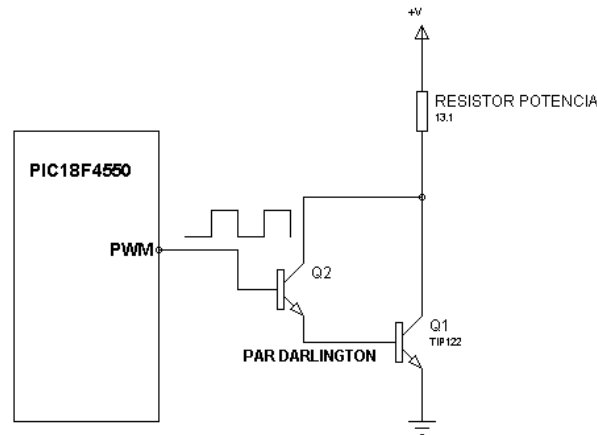


Figura B.3. Diagrama eléctrico de la etapa de potencia para la fuente de calentamiento.

Con base en el diagrama anterior, el microcontrolador se encarga de activar al par Darlington mediante la señal PWM a los 20 [s] de iniciado el proceso de medición, así como desactivar la fuente de calor a los 440[s].

- Digitalización de la señal del foto-diodo

Como se mencionó en el apartado de la detección foto-métrica de la señal del foto-diodo, la corriente generada por el ánodo de éste es convertido a voltaje mediante el circuito de la Figura 5.10. Una vez realizado éste proceso, es posible digitalizar a la señal de voltaje mediante el uno de los canales del convertidor analógico-digital integrado en el microcontrolador, el cual tiene una resolución $n = 10$ bits y un voltaje de referencia $V_{ref}=5$ [V], así, el mínimo valor de voltaje que puede ser leído es 4.88 [mV].

Sin embargo, dado que los desplazamientos Δx en el filo de la navaja acoplada al detector son muy pequeños es necesario amplificar la señal del voltaje de salida V_o del fotodiodo a fin de que dichos desplazamientos puedan ser magnificados mediante el proceso de digitalización. Para realizar dicha tarea se hace uso de un amplificador en configuración no inversor, mostrado en la Figura B.4.

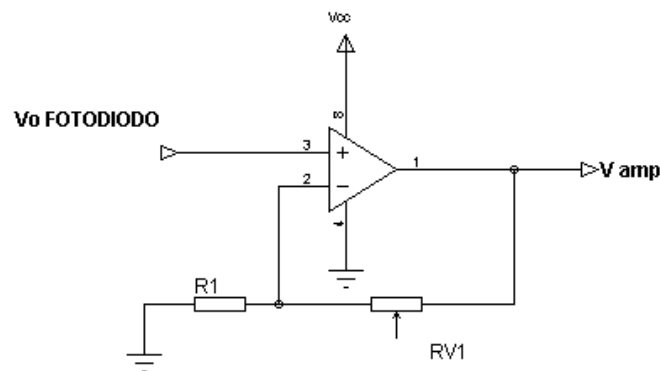


Figura B.4. Amplificador no inversor para la señal del foto-diodo.

La ganancia del circuito amplificador mostrado está dada en términos del resistor variable de realimentación RV1 y el resistor R1, de tal forma que la ganancia A del amplificador puede ser ajustada mediante el valor de RV1 y dejando fijo el valor de R1, como lo describe la siguiente expresión.

$$A = 1 + \frac{RV1}{R1}. \quad (B.1)$$

Es necesario entonces ajustar experimentalmente a RV1 hasta encontrar el valor adecuado de su resistencia para el cual el decremento en la potencia óptica detectada sea lo suficientemente claro.

Finalmente, es preciso comentar que para digitalizar la señal se toma como base un periodo de muestreo igual a 100 [ms], es decir se toman 10 muestras por segundo o bien una muestra cada 0.1 [s]. Dicho periodo resulta útil para obtener la mayor cantidad de información posible en la señal resultante.

- Interfaz de usuario en una PC

El último elemento del sistema automatizado de medición es una interfaz gráfica desarrollada bajo la plataforma LabVIEW™. Debido a sus características de programación gráfica y de interacción con dispositivos periféricos, el desarrollo de interfaces en una PC mediante dicha plataforma es ideal para aplicaciones en donde se requiere adquirir datos de un hardware externo. En este caso, el dispositivo que interactúa con el programa LabVIEW™ es precisamente el microcontrolador PIC18F4550. La comunicación entre ambos se realiza mediante la emulación de un puerto serie, protocolo implementado mediante programación en lenguaje C en el microcontrolador.

Una vez establecida la comunicación, los datos referentes a la señal amplificada del fotodiodo son enviados hacia la interfaz de LabVIEW™. Además, el software es el encargado de llevar el conteo del tiempo desde que inicia el proceso de medición, es decir a los 20 [s] después de probar la estabilidad de la fuente láser, el programa en la PC envía un comando al microcontrolador para que éste active al resistor de potencia, después de 320 [s] de calentamiento, nuevamente es enviada una orden para que se desactive la fuente de calor y a los 1200 [s] el sistema se detiene. Es importante mencionar que durante la duración de la prueba, en todo momento la potencia óptica del foto-diodo es graficada en tiempo real, de esta forma se hace posible que el usuario tenga noción del comportamiento de la señal a fin de verificar que ésta cumpla con el resultado esperado y en caso de algún error debido a la alineación del sistema, el sistema puede ser detenido para reiniciar el proceso de medición.

Un detalle que añade versatilidad a la interfaz gráfica radica en el hecho de que los datos adquiridos pueden ser registrados en una hoja de cálculo, en donde se registra cada instante de tiempo del periodo de muestreo así como el valor de la potencia del foto-diodo. El objetivo de registrar los datos brinda la posibilidad de tener los resultados de cada medición en un archivo que posteriormente pueda ser manipulado para procesos de filtrado, normalización y comparación de resultados. En la Figura B.5 se muestra el panel frontal de la interfaz gráfica programada.

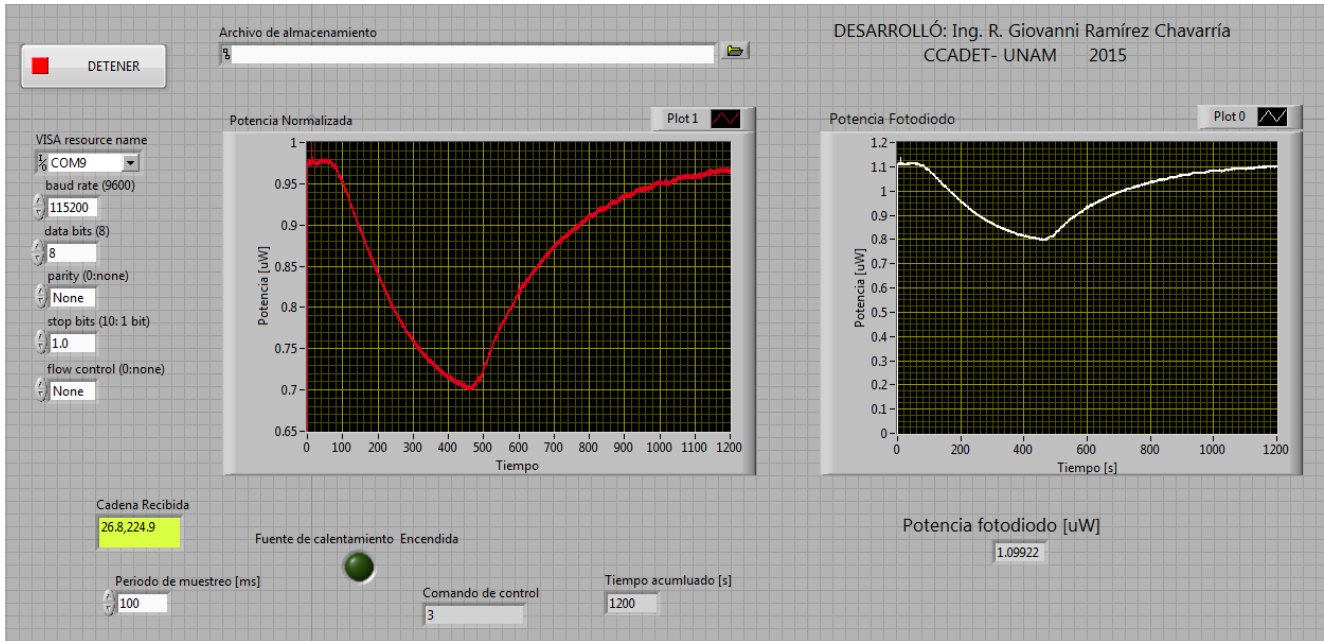


Figura B.5. Interfaz gráfica para la adquisición y registro de datos del proceso de medición de flujo de calor.

Anexo C. Programa de MATLAB para el cálculo del método matricial de trazo de rayos

```

%PROGRAMA PARA EL CALCULO MATRICIAL DE TRAZO DE RAYOS
%EN UNA CELDA TIPO HERRIOTT INTEGRADA EN ACRÍLICO
%Desarrolló: Ing. Roberto Giovanni Ramírez Chavarría
%GSOE-CCADET UNAM
%2014

clear all
clc
clf
%-----
%-----DATOS DE LA CELDA-----
%-----
r1=3; %radio de curvatura del espejo 1 [cm]
r2=3; %radio de curvatura del espejo 2 [cm]
d=1.5; %distancia entre espejos [cm]
x= 0.2; %Coordenada x de entrada
y= 0.0; %Coordenada y de entrada
sx=1; %Angulo de incidencia x
sy=0; %Angulo de incidencia y
r0= x;
nc=1.49; %índice de refracción de la celda
r=[x nc*sx y nc*sy]' %vector columna para el rayo
%-----
%-----ANÁLISIS EN ACRILICO-----
%-----
%En la celda Herriot solo es necesario considerar:
% 1) Matriz de propagación en EL MEDIO
T_d = [1 d/nc 0 0; 0 1 0 0; 0 0 1 d/nc; 0 0 0 1];
% 2) Matriz de reflexión en un espejo cilindrico cóncavo M1
T_r1 = [1 0 0 0; 0 1 0 0; 0 0 1 0; 0 0 -2*nc/r1 1];
% 3) Matriz de reflexión en un espejo esférico cóncavo M2
delta=90; %ángulo de rotación de M2
T_r2 = [1 0 0 0; 0 1 0 0; 0 0 1 0; 0 0 -2*nc/r2 1];
T_delta_pos= [cosd(delta) 0 sind(delta) 0; 0 cosd(delta) 0 sind(delta); -
sind(delta) 0 cosd(delta) 0; 0 -sind(delta) 0 cosd(delta)]
T_delta_neg= [cosd(-delta) 0 sind(-delta) 0; 0 cosd(-delta) 0 sind(-delta); -sind(-
delta) 0 cosd(-delta) 0; 0 -sind(-delta) 0 cosd(-delta)]
T_r21=T_delta_neg*T_r2*T_delta_pos;

%Para un viaje completo del haz, la matriz final de transición:
C=T_r1*T_d*T_r21*T_d;

%ángulo entre reflexiones
disp('Ángulo entre reflexiones consecutivas en un mismo espejo:');
phi=acos(sqrt(1-(d/(r1))))
phi_deg=(phi*180)/pi
%Número de pasos
disp('Número de pasos:');
N=2*pi/phi
N=fix(N)

%Número total de Reflexiones en ambos espejos
disp('Número total de Reflexiones en ambos espejos:');
Ref_tot=N*2
%Cálculo del número del Número de órbitas formadas

```

```

M=(N*phi)/(pi)
%Cálculo de la distancia recorrida en [cm]
dist=N*d
disp('Distancia recorrida total [cm]:');
%-----
%Patrón de incidencias-
%Para el espejo M1
for i = 1:N
    C^i
    r_prima_front=T_d*T_r21*T_d*(C^(((0.5*i)-1)))*r%para el espejo 1
    r=r_prima_front;

    x_pos_front(i)=r_prima_front(1);
    x_ang_front(i)=r_prima_front(2);
    y_pos_front(i)=r_prima_front(3);
    y_ang_front(i)=r_prima_front(4);
end
%Para el espejo M2
for i = 1:(N/2)
    r_prima_rear=T_d*(C^((0.5*i)-1))*r%para el espejo 2
    r=r_prima_rear;
    x_pos_rear(i)=r_prima_rear(1);
    x_ang_rear(i)=r_prima_rear(2);
    y_pos_rear(i)=r_prima_rear(3);
    y_ang_rear(i)=r_prima_rear(4);

end

figure(1)
plot(x_pos_front,y_pos_front,'gs','LineWidth',2,'MarkerSize',10,'MarkerEdgeColor','b')
xlabel('Posición en X normalizada')
ylabel('Posición en Y normalizada')
grid on
figure(2)
plot(x_pos_rear,y_pos_rear,'gs','LineWidth',2,'MarkerSize',10,'MarkerEdgeColor','k')
xlabel('Posición en X normalizada')
ylabel('Posición en Y normalizada')
grid on
figure(3)
plot(x_posfront,y_pos_front,'*','LineWidth',2,'MarkerSize',10,'MarkerEdgeColor','b')
xlabel('Posición en X normalizada')
ylabel('Posición en Y normalizada')
grid on
hold on
plot(x_rear,y_pos_rear,'gs','LineWidth',2,'MarkerSize',10,'MarkerEdgeColor','k')
legend('Spots en M1','Spots en M2')

```

Anexo D. Programa de MATLAB para obtener las curvas de diseño de la celda Herriott

```

%Programa para obtener las curvas de diseño de la celda
%Herriott integrada en acrílico
%Desarrolló: Ing. Roberto Giovanni Ramírez Chavarría
%GSOE-CCADET UNAM
%2015
clear all
clc
clf
%-----
%-----DATOS DE LA CELDA-----
%-----
r1=[1 2 3 4 5]' %radio de curvatura del espejo 1 [cm]
r2=2; %radio de curvatura del espejo 2 [cm]
nc=1.49; %índice de refracción de la celda
%-----
%-----ANÁLISIS EN ACRILICO-----
%-----

d=0:0.1:r1(5); %distancia entre espejos [cm]
d=d'

%CALCULO DEL ÁNGULO ENTRE REFLEXIONES VARIANDO d y R
for i=1:length(r1)

    phi=acos(sqrt(1-(d/(r1(i)))));
    phi_deg=(phi*180)/pi;
    mat(i,:)=phi_deg;

end

phi_r1=real(mat(1,:))';
phi_r2=real(mat(2,:))';
phi_r3=real(mat(3,:))';
phi_r4=real(mat(4,:))';
phi_r5=real(mat(5,:))';

figure(1)
plot(d,phi_r1,'p','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','b')
xlabel('Separación entre espejos \it{d} (cm)')
ylabel('Ángulo de reflexión \theta_{ R} (°)')
%grid on
hold on
plot(d,phi_r2,'*','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
plot(d,phi_r3,'>','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','r')
plot(d,phi_r4,'s','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','g')
plot(d,phi_r5,'+','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','m')
legend('R=1 [cm]', 'R=2 [cm]', 'R=3 [cm]', 'R=4 [cm]', 'R=5 [cm]')

%CÁLCULO DEL NÚMERO DE PASOS N VARIANDO EL ÍNDICE M
%M DEBE SER NÚMERO PAR Mx=My y Mx+My<=N
Mi=1;
Mf=2:2:20;
M=[Mi Mf];

```

```

phi_r1_a= phi_r1(1:11);%se extraen solo los primeros 21 valores del vector
                    %i.e. hasta phi_r1=90°
%Cálculo de N para M=1-20 y phi_r1
for j=1:length(M)

    N1=M(j)*180./phi_r1_a;
    mat2(j,:)=N1;

end

for m=1:length(M)
    N1_1=real(round(mat2(m,:)))';
    eval(['N1_M_' num2str(m) '= N1_1'])
end

MAT_N1_PHIR1=[N1_M_1 N1_M_2 N1_M_3 N1_M_4 N1_M_5 N1_M_6 N1_M_7 N1_M_8 N1_M_9
N1_M_10 N1_M_11];

figure(2)
plot(phi_r1_a,N1_M_1,'-h','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
xlabel('Ángulo entre reflexiones \theta_{ R} (°)')
ylabel('No. de pasos \itN')
%grid on
hold on
plot(phi_r1_a,N1_M_2,'-o','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
plot(phi_r1_a,N1_M_3,'-+','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
plot(phi_r1_a,N1_M_4,'-*','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
plot(phi_r1_a,N1_M_5,'-.','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
plot(phi_r1_a,N1_M_6,'-x','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
plot(phi_r1_a,N1_M_7,'-s','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
plot(phi_r1_a,N1_M_8,'-d','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
plot(phi_r1_a,N1_M_9,'-^','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
plot(phi_r1_a,N1_M_10,'-p','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
plot(phi_r1_a,N1_M_11,'->','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
legend('M=1','M=2','M=4','M=6','M=8','M=10','M=12','M=14','M=16','M=18','M=20')

%CÁLCULO DEL NÚMERO DE RECIRCULACIONES N VARIANDO EL ÍNDICE M
%M DEBE SER NÚMERO PAR Mx=My y Mx+My<=N
Mi=1;
Mf=2:2:20;
M=[Mi Mf];

phi_r2_a= phi_r2(1:21);%se extraen solo los primeros 21 valores del vector
                    %i.e. hasta phi_r1=90°
%Cálculo de N para M=1 y phi_rn(variable)
for j=1:length(M)

    N2=M(j)*180./phi_r2_a;
    mat3(j,:)=N2;

end

for m=1:length(M)

```

```

N2_1=real(round(mat3(m,:)))';
eval(['N2_M_' num2str(m) '= N2_1'])

end

figure(3)
plot(phi_r2_a,N2_M_1,'-h','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
xlabel('Ángulo entre reflexiones \theta_{ R} (°)')
ylabel('No. de pasos \itN')
%grid on
hold on
plot(phi_r2_a,N2_M_2,'-o','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
plot(phi_r2_a,N2_M_3,'-+','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
plot(phi_r2_a,N2_M_4,'-*','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
plot(phi_r2_a,N2_M_5,'-.','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
plot(phi_r2_a,N2_M_6,'-x','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
plot(phi_r2_a,N2_M_7,'-s','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
plot(phi_r2_a,N2_M_8,'-d','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
plot(phi_r2_a,N2_M_9,'-^','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
plot(phi_r2_a,N2_M_10,'-p','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
plot(phi_r2_a,N2_M_11,'->','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
legend('M=1','M=2','M=4','M=6','M=8','M=10','M=12','M=14','M=16','M=18','M=20')

%CÁLCULO DEL NÚMERO DE RECIRCULACIONES N VARIANDO EL ÍNDICE M
%M DEBE SER NÚMERO PAR Mx=My y Mx+My<=N
Mi=1;
Mf=2:2:20;
M=[Mi Mf];
phi_r3_a= phi_r3(1:31);%se extraen solo los primeros 21 valores del vector
                    %i.e. hasta phi_r1=90°
%Cálculo de N para M=1 y phi_rn(variable)
for j=1:length(M)

    N3=M(j)*180./phi_r3_a;
    mat4(j,:)=N3;

end

for m=1:length(M)
    N3_1=real(round(mat4(m,:)))';
    eval(['N3_M_' num2str(m) '= N3_1'])

end

figure(4)
plot(phi_r3_a,N3_M_1,'-h','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
xlabel('Ángulo entre reflexiones \theta_{ R} (°)')
ylabel('No. de pasos \itN')
%grid on
hold on
plot(phi_r3_a,N3_M_2,'-o','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
plot(phi_r3_a,N3_M_3,'-+','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
plot(phi_r3_a,N3_M_4,'-*','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
plot(phi_r3_a,N3_M_5,'-.','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
plot(phi_r3_a,N3_M_6,'-x','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
plot(phi_r3_a,N3_M_7,'-s','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')

```

```

plot(phi_r3_a,N3_M_8,'-d','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
plot(phi_r3_a,N3_M_9,'-^','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
plot(phi_r3_a,N3_M_10,'-p','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
plot(phi_r3_a,N3_M_11,'->','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
legend('M=1','M=2','M=4','M=6','M=8','M=10','M=12','M=14','M=16','M=18','M=20')

```

```

%CÁLCULO DEL NÚMERO DE RECIRCULACIONES N VARIANDO EL ÍNDICE M

```

```

%M DEBE SER NÚMERO PAR Mx=My y Mx+My<=N

```

```

Mi=1;

```

```

Mf=2:2:20;

```

```

M=[Mi Mf];

```

```

phi_r4_a= phi_r4(1:41);%se extraen solo los primeros 81 valores del vector
%i.e. hasta phi_r1=90°

```

```

%Cálculo de N para M=1 y phi_rn(variable)

```

```

for j=1:length(M)

```

```

    N4=M(j)*180./phi_r4_a;

```

```

    mat5(j,:)=N4;

```

```

end

```

```

for m=1:length(M)

```

```

    N4_1=real(round(mat5(m,:)))';

```

```

    eval(['N4_M_' num2str(m) '= N4_1'])

```

```

end

```

```

figure(5)

```

```

plot(phi_r4_a,N4_M_1,'-h','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')

```

```

xlabel('Ángulo entre reflexiones \theta_{ R} (°)')

```

```

ylabel('No. de pasos \itN')

```

```

%grid on

```

```

hold on

```

```

plot(phi_r4_a,N4_M_2,'-o','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')

```

```

plot(phi_r4_a,N4_M_3,'-+','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')

```

```

plot(phi_r4_a,N4_M_4,'-*','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')

```

```

plot(phi_r4_a,N4_M_5,'-.','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')

```

```

plot(phi_r4_a,N4_M_6,'-x','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')

```

```

plot(phi_r4_a,N4_M_7,'-s','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')

```

```

plot(phi_r4_a,N4_M_8,'-d','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')

```

```

plot(phi_r4_a,N4_M_9,'-^','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')

```

```

plot(phi_r4_a,N4_M_10,'-p','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')

```

```

plot(phi_r4_a,N4_M_11,'->','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')

```

```

legend('M=1','M=2','M=4','M=6','M=8','M=10','M=12','M=14','M=16','M=18','M=20')

```

```

%CÁLCULO DEL NÚMERO DE RECIRCULACIONES N VARIANDO EL ÍNDICE M

```

```

%M DEBE SER NÚMERO PAR Mx=My y Mx+My<=N

```

```

Mi=1;

```

```

Mf=2:2:20;

```

```

M=[Mi Mf];

```

```

phi_r5_a= phi_r5(1:51);

```

```

%Cálculo de N para M=1 y phi_rn(variable)

```

```

for j=1:length(M)

```

```

    N5=M(j)*180./phi_r5_a;

```

```

    mat6(j,:)=N5;

```

```

end

```

```

for m=1:length(M)
    N5_1=real(round(mat6(m,:)))';
    eval(['N5_M_' num2str(m) '= N5_1'])
end

figure(6)
plot(phi_r5_a,N5_M_1,'-h','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
xlabel('Ángulo entre reflexiones \theta_{ R} (°)')
ylabel('No. de pasos \itN')
%grid on
hold on
plot(phi_r5_a,N5_M_2,'-o','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
plot(phi_r5_a,N5_M_3,'-+','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
plot(phi_r5_a,N5_M_4,'-*','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
plot(phi_r5_a,N5_M_5,'-.','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
plot(phi_r5_a,N5_M_6,'-x','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
plot(phi_r5_a,N5_M_7,'-s','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
plot(phi_r5_a,N5_M_8,'-d','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
plot(phi_r5_a,N5_M_9,'-^','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
plot(phi_r5_a,N5_M_10,'-p','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
plot(phi_r5_a,N5_M_11,'->','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
legend('M=1','M=2','M=4','M=6','M=8','M=10','M=12','M=14','M=16','M=18','M=20')

%Soluciones únicamente con M=1

figure(7)
plot(phi_r1_a,N1_M_1,'o-b')
xlabel('Ángulo de avance entre reflexiones [°]')
ylabel('No. de recirculaciones del haz')
grid on
hold on
plot(phi_r2_a,N2_M_1,'*--g')
plot(phi_r3_a,N3_M_1,'+--k')
plot(phi_r4_a,N4_M_1,'^-r')
%CALCULO DE N variando d y R
%M=1
d1=0.1:0.1:5;%0:0.1:5; %distancia entre espejos [cm]
d1=d1'

%para R=1
phi=acos(sqrt(1-(d1./(1)))));
phi_deg=(phi*180)./pi
N_M1_r1=180./phi_deg;% M=1
tray1=N_M1_r1.*d1;

%para R=2
phi_r2=acos(sqrt(1-(d1./(2)))));
phi_deg_r2=(phi_r2*180)./pi
N_M1_r2=180./phi_deg_r2;% M=1
tray2=N_M1_r2.*d1;

%para R=3
phi_r3=acos(sqrt(1-(d1./(3)))));
phi_deg_r3=(phi_r3*180)./pi
N_M1_r3=180./phi_deg_r3;% M=1

```

```

tray3=N_M1_r3.*d1;

%para R=4
phi_r4=acos(sqrt(1-(d1./(4)))));
phi_deg_r4=(phi_r4*180)./pi
N_M1_r4=180./phi_deg_r4;% M=1
tray4=N_M1_r4.*d1;

%para R=5
phi_r5=acos(sqrt(1-(d1./(5)))));
phi_deg_r5=(phi_r5*180)./pi
N_M1_r5=180./phi_deg_r5;% M=1
tray5=N_M1_r5.*d1;

figure(10)
plot(d1,N_M1_r1,'p','LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','b')
xlabel('Separación entre espejos \it{d} (cm)')
ylabel('No. de pasos \it{N}')
%grid on
hold on
plot(d1,N_M1_r2,'*', 'LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','k')
plot(d1,N_M1_r3,'>', 'LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','r')
plot(d1,N_M1_r4,'s', 'LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','g')
plot(d1,N_M1_r5,'+', 'LineWidth',1,'MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor','m')
legend('R1=R2=1 [cm]', 'R1=R2=2 [cm]', 'R1=R2=3 [cm]', 'R1=R2=4 [cm]', 'R1=R2=5 [cm]')

figure(11)
plot(d1,tray1,'*-k')
xlabel('Separación entre espejos "d" [cm]')
ylabel('Distancia total recorrida [cm]')
grid on
hold on
plot(d1,tray2,'*-g')
plot(d1,tray3,'*-b')
plot(d1,tray4,'*-r')
plot(d1,tray5,'*-m')
legend('R1=R2=1 [cm]', 'R1=R2=2 [cm]', 'R1=R2=3 [cm]', 'R1=R2=4 [cm]', 'R1=R2=5 [cm]')

```


Anexo E. Publicación desprendida del trabajo de investigación ICOP 2015 : 17th International Conference on Optics and Photonics

Design of a compact Herriott cell for Heat Flux measurement applications

R. G. Ramírez-Chavarría, C. Sánchez-Pérez, V. Argueta-Díaz

Abstract— In this paper we present the design of an optical device based on a Herriott multi-pass cell fabricated on a small sized acrylic slab for heat flux measurements using the deflection of a laser beam propagating inside the cell. The beam deflection is produced by the heat flux conducted to the acrylic slab due to a gradient in the refractive index. The use of a long path cell as the sensitive element in this measurement device, gives the possibility of high sensitivity within a small size device. We present the optical design as well as some experimental results in order to validate the device's operation principle.

Keywords— Heat Flux, Herriott Cell, Optical Beam Deflection, Thermal Conductivity.

INTRODUCTION

A MULTI-PASS optical cell is a device with concave mirrors in which a light beam undergoes multiple reflections. Among the multi-pass cells most reported in literature, one can find the White cell [1] and Herriott cell [2]. Due to its versatility, multi path cells have been used as optical delay lines in antennas [4], also they have been widely used for liquids or gas detection by absorption spectroscopy where optical paths in the order of some meters have been obtained highly increasing sensitivity [3]. The Herriott cell has the advantage of being mechanically more stable since two mirrors are used instead of three as in the White cell. It is possible to distinguish three types of Herriott cells according to the mirrors used: spherical [2], astigmatic [5] and cylindrical [6]. Herriott cell based in cylindrical configuration implies the use of uniaxial curvature mirrors, so it becomes simpler to be fabricated with the same performance of the other two configurations with biaxial mirrors. In most of the reported works the cell cavity was formed in free space making the systems of big dimensions and mechanically delicate to be adjusted. We are not aware of Herriott cell integrating the cell elements and propagation media in one block.

In this work we present the design, fabrication and test of a Herriott cell for heat flux measurements using the photo-thermal laser beam deflection technique within a thermo-optic slab, this principle was previously reported by our group [7]. This technique was used to characterize heat conduction in biological tissue with good sensitivity to distinguish different tissues but the sample's size was big since the optical path required for measurements was

of about 3 cm. The redesign of the sensor using a Herriott cell will allow us to highly reduce the size of the sample while keeping the same sensitivity or even to increase this last.

OPERATION PRINCIPLE

The proposed optical cell is formed by two cylindrical mirrors M_1 and M_2 facing each other and separated by a distance d as shown in Fig 1. The mirrors were fabricated by manufacturing two faces of an acrylic block with a curvature radius R_1 and R_2 and later deposition of an aluminum reflecting layer by sputtering to form M_1 and M_2 respectively. When a laser beam enters the Herriott cell it will bounce several times within the cell and later exit after a specific number of passes. If a heat Q is applied to the multi-pass cell, the output beam will be deflected a certain angle (θ_{MR}) by the presence of a temperature gradient perpendicular to the optical axis direction (z). In this way by using a photo-detector with a knife-edge, blocking around of 50% of its sensitive surface, a lateral displacement of the beam due to the deflection could be measured as a change in the power detected.

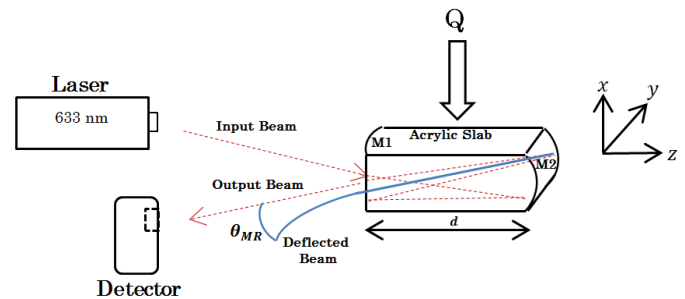


Fig. 1 Schematic diagram of the Herriott cell based device for heat flux measurements.

DESIGN OF THE HERRIOTT CELL

The proposed Herriott multi-pass cell device consists of two cylindrical mirrors of equal curvature radii $R_1 = R_2 = R$ separated by a distance d less than or equal to two times R in order to ensure the stability criteria described by C. Robert [6]. A laser beam enters the cell through a non-aluminized port in mirror M_1 . The beam is periodically reflected and refocused between the two mirrors and then, after a designated number of passes N , exits through the input port with a slope that is the

opposite of the entry slope. As a result, the total path length L traversed in the cell is approximately $L = N \cdot d$.

Matrix Ray Propagation Method

For the cylindrical configuration of the Herriott cell, one of the mirrors could be rotated a certain angle δ with respect to the other mirror for the output beam to exit at the same input port. One may calculate the ray trace by the matrix method using the paraxial approximation as it is done for thin lens systems [6]. This method allows to calculate the propagation of light rays through the Herriott cell, hence where the beam hits at the mirrors by direct matrix manipulation. Let us denote x_o and y_o as the initial position and η and γ as the slopes of the beam respectively, the bidimensional position can be represented by a vector $\mathbf{r} = [x_o \ \eta \ y_o \ \gamma]$. One may define the translation matrix \mathbf{D} as:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 1 & d/n & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d/n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

with n as the refractive index of the propagation media, i.e. $n = 1.49$ for acrylic. There exists one reflection matrix for each mirror. If M_1 has a curvature radius R along x axis, \mathbf{R}_1 becomes its reflection matrix:

$$\mathbf{R}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-2n}{R} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

and if M_2 has its radius R oriented along the y axis, the reflection matrix \mathbf{R}_2 for the second mirror is:

$$\mathbf{R}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-2n}{R} & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

As seen in above matrices, mirrors are orthogonally aligned so the angle between their curvatures is $\delta=90^\circ$.

After one round trip of the beam within the cell, one can calculate the total transfer matrix \mathbf{C} :

$$\mathbf{C} = \mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{R}_2 \cdot \mathbf{D}. \quad (4)$$

In the case when $\delta \neq \pi/2$ it is necessary to modify the reflection matrix for M_2 in terms of a rotation $\mathbf{T}(\delta)$ [8].

The positions of the beam after N passes, namely, when it reflects at both mirrors, can be computed to obtain a spot pattern diagram in terms of M_1 and M_2 by the vectors \mathbf{r}_1 and \mathbf{r}_2 respectively:

$$\mathbf{r}_1 = \mathbf{D} \cdot \mathbf{R}_2 \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{C}^{0.5N-1} \cdot \mathbf{r}, \quad \text{and} \quad (5)$$

$$\mathbf{r}_2 = \mathbf{D} \cdot \mathbf{C}^{0.5N-1} \cdot \mathbf{r}. \quad (6)$$

Herriot cell Characteristic Parameters

There are also some characteristic parameters necessary to be taken in account; in order to design the Herriott cell. The reentrant angle ϕ_R , which refers to the angle between two successive reflections; since $R_1 = R_2 = R$ for mirrors radii, exists an expression that allows determining the angle between two consecutive reflections ϕ_R as a function of R and d ,

$$\phi_R = \arccos \sqrt{\left(1 - \frac{d}{R}\right)}. \quad (7)$$

This angle is related with the number of orbits M of the beam on the mirror's surface and related with N as:

$$\phi_R = \pi M / N. \quad (8)$$

M has valid solutions for even integer numbers, as in the case of $M = 2$ it implies that the sum of ϕ_R will complete an entire cycle, i.e. 360° . An exceptional case occurs when $M = 1$ which represents a half orbit made by the spot pattern, 180° . The term N can be obtained by (8) if ϕ_R and M are previously known.

We evaluate (7) in order to calculate ϕ_R . Fig. 2 shows the values ϕ_R as function of d for mirror curvature radii R from 0 to 5 cm.

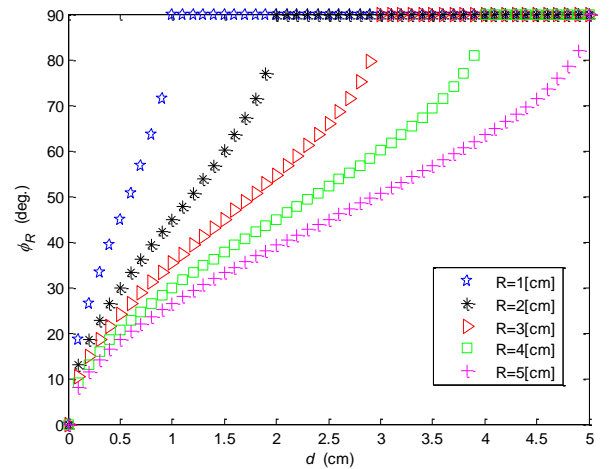


Fig. 2 Reentrant angle ϕ_R as a function of mirror separation d for different curvature radii R .

It can be seen that ϕ_R increases as the value of d does. For $R=1$ cm, changes in reentrant angle are more significant than for bigger values. The flat region at the

top of the plot represents the instability of the cell, this is for a distance between the mirrors $d \geq R$, the reentrant angle ϕ_R does not change its value, meaning that the beam gets a path out of the cell. Thus we can write an expression for stability criteria as: $0 < d < R$.

For calculating the total path length, first it is necessary to calculate N using (8), knowing ϕ_R and assuming in this case $M = 1$. Fig. 3 shows the behavior of L as a function of the mirror separation d for five different values of curvature radii R from 1 to 5 cm.

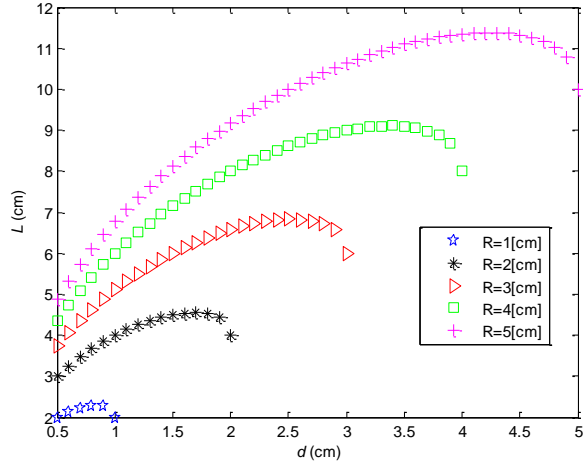


Fig. 3 Total path length L as a function of mirror separation d for different curvature radii R .

Is worth noticing that, the value of L increases as the mirror separation increases until the stability criteria is no longer valid. For larger values of R , the change on L is also larger. Also it is important to note that, when $d \leq R/2$, the behavior of L can be seen as linear, but when d becomes larger than $d = R/2$ the change in the total path increases slowly.

The plots above can help us to obtain the possible values of R and d for target path length, so this is our design criteria. Our desired total path length must be around 4 cm, as we can obtain enough sensitivity for heat flux measurement applications.

The fabrication techniques available for manufacturing the acrylic slab, allow us to study the cases for $0.5 \leq d \leq 1.5$ cm and $2 \leq R \leq 5$ cm, in order to obtain the characteristic parameters of the Herriott cell. In Table I we resume three cases for selected values of d and R , including the performance parameters obtained by its analytical solutions.

TABLE I
HERRIOTT CELLS AND ITS CHARACTERISTIC PARAMETERS

Cell	d	R	δ	ϕ_R	N	M	L
A	1.5 cm	3 cm	90°	45°	4	1	6 cm
B	1 cm	2 cm	90°	45°	4	1	4 cm
C	0.5 cm	2 cm	90°	45°	8	1	4 cm

The analysis was made taking in account that we need a total path length near to 4 cm. According to results in the table above, it can be seen that cells B and C have the same value of R but the separation of the mirrors in C is half of B, resulting on a larger number of passes and therefore the total path length increases 37.5% respect to the path length for B, nevertheless a large amount of passes may represent larger losses on the beam due to reflective surfaces and attenuation of the acrylic. When comparing cells A and B, it can be seen that for A, mirror separation seems to be just 50% larger than B, but the mirror curvature radii now is 3 cm. With these parameters the number of passes for cell A stay at the same value than cell B, nevertheless the total path length increases 50%. The only trouble of the cell A is related with its dimensions because it will be larger than other two cells, but it will be useful in order to demonstrate its application on the heat flux measurement principle. So, we consider cell A as the case of study due its fabrication facility as well as its characteristic parameters, $d = 1.5$ cm, $R = 3$ cm, $N = 4$ and $L = 6$ cm.

In order to know the behavior of the beam within the cell, we obtained the spots positions on M_1 and M_2 . In Fig. 4 is shown the spot pattern formed both mirrors of the cell A, obtained by the matrix transfer method.

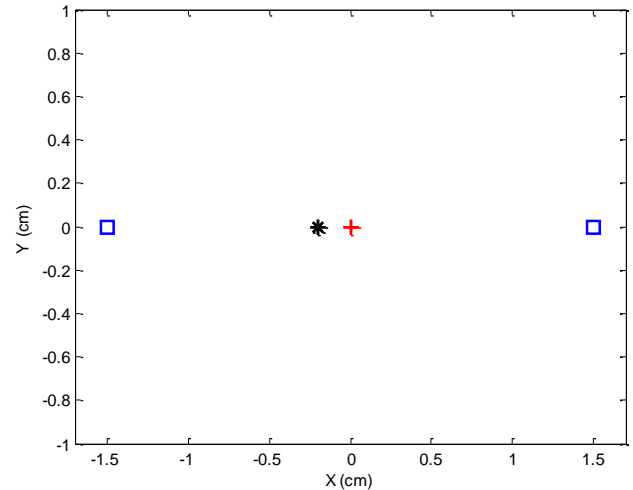


Fig. 4 Spot pattern formed on the mirrors of the Herriott cell obtained with matrix transfer method. Square bounces are the spots located on M_2 , asterisk bounce is the spot on M_1 and the plus sign mark represents the input/output port.

It the figure above, the squared points represent the spots on M_2 , it is possible to see that these spots are

located near to the mirror edge such they cover almost the whole mirror's area. The one at right side represents the first incident spot, immediately after the beam enters to the cell. The spot at the left hand is the $N - 1$, reflection, thus is the last incidence, before the beam exits the cell. In the other hand, the asterisk point represents the incident spot on M_1 which is located near to input/output port marked with a plus symbol.

The behavior of the beam well agrees with the analytical solutions, so with $d = 1.5$ cm and $R = 3$ cm the cell has 4 passes and 3 reflections, resulting on a total path length equal to 6 cm.

In summary, the cell A satisfies simultaneously two requirements, the total path length and the fabrication tolerances, so it will be adequate for obtaining experimental preliminary results for heat flux measurements.

EXPERIMENTAL RESULTS

Fabrication of the Herriott Cell

To fabricate the cell we use a laser cut machine "40W/45W CO₂ Hobby Laser" of Full Spectrum Laser™, with resolution of 1000 dpi for cutting the acrylic slab with curved shape on two sides. The resolution of R that could be obtained is 2 cm and for the mirror separation d , the fewer value possible to fabricate is 0.5 cm, making possible to fabricate the three cells depicted on Table I.

The mirrors of the cell were fabricated using sputtering deposition method by coating the two curved faces of the acrylic slab with an aluminum layer of approximately 1 μm thick. The reflectance is near to 75%. In Fig. 6 we show the first compact integrated Herriott cell that we fabricated, according to the parameters of cell A from Table I.

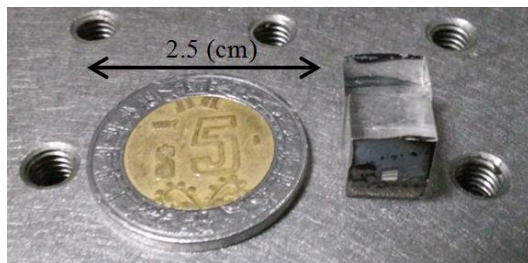


Fig. 6 Fabricated Herriott cell integrated on an acrylic slab with $d = 1.5$ cm and $R = 3$ cm.

Heat flux measurement

To experimentally characterize heat flux response function of the cell, we used a $\lambda=633$ nm laser as the light source, considering the curvature of M_1 is on x direction and M_2 radius is on y axis. The beam enters the cell at the center of mirror, i.e. $x_0=0$ and $y_0=0$, with an initial

slope $\gamma=10^\circ$ only at y direction (see Fig. 1).

In order to evaluate the heat flux response of the proposed device, we designed a measurement system for heat flux quantifying using the photo-thermal beam deflection technique [8], in which the deflection θ_i is described by:

$$\theta_i = \frac{1}{n} \frac{dn}{dT} \int \frac{\partial T}{\partial x} dz, \quad (9)$$

where n is the acrylic's refractive index, dn/dT refers to the thermo-optic coefficient of acrylic and $\partial T/\partial x$ is the thermal gradient between two faces of the acrylic slab induced by the heat source Q applied in x direction. Therefore at the output of the slab, the beam will be deviated from its linear trajectory a certain angle θ_i . In a multiple pass device like our Herriott cell, it is necessary to obtain the deflecting angle after N passes, which will be the sum of the deflection of the $i - th$ beam passing within the cell, hence giving higher sensitivity than in the heat flux measurements for a single pass device [8]. Let us consider a multiple reflection deflected angle denoted by θ_{MR} which can be calculated as:

$$\theta_{MR} = \sum_{i=1}^N \theta_i \quad (10)$$

In order to induce a heat flux Q in the cell, we use a thermo element that can increase the temperature of the acrylic slab in its upper face, as shown in Fig. 1. We use a Peltier cell, in which one of its faces becomes colder and the other side becomes hotter when an electrical current flows on it, due to the Peltier and Joule effects [9]. To estimate heat flux applied, the dissipated power P at the hot side, must be divided by the area of dissipation A , $Q = P/A$ W/m².

At the output of the Herriott cell we measure the deflection angle θ_{MR} traduced as a lateral displacement Δx over the surface of a photodiode. Given that the laser beam has a Gaussian profile we can measure Δx as the changing of the optical power using the knife-edge technique [10]. The knife-edge is attached to a Si photodiode. We center the output beam just in edge of the knife so that almost the 50% of the total power of the output beam is detected by the photodiode. Fig. 7 presents the effect of displacement over the knife-edge-coupled photodiode. The resultant displacement of the beam causes a change in the optical power detected by the photodiode.

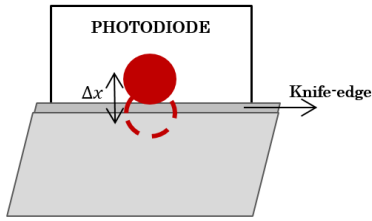


Fig. 7 Detection scheme for measuring the lateral displacements by the knife-edge technique.

The heat flux measurement is doing as follows. The laser beam is traveling within the Herriott cell, after 20 s for stability proof, immediately the heat source is turned on, since a temperature gradient appears, the beam starts to deflect so the photodiode and knife-edge set, traduces this deflection of the output beam as a decrement of total beam power as the time of measurement goes. The heating is stopped after 420 s of elapsed time in order to well distinguish the maximum decrement. Then, where there is not induced, the output power will attempt to return at its original value, for appreciate this effect the measurement finishes at 1200 s. We measured the device response to different values of Q , as shown in Fig. 8.

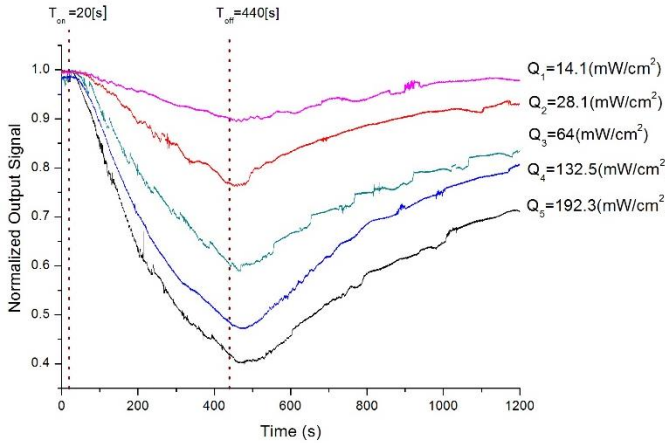


Fig. 8 Normalized photo-diode output signals for different heat flux Q 's values.

The above figure shows that after the 20 s, the output power does not rapidly decrease, which is due to the thermal inertia because of the natural response of a thermal system. Also it can be seen that after 1200 s, the output response does not return to its original value, since the inverse effect of heat conduction is slower than the heating process.

In addition, Fig 8 shows the heat flux measurement device response, where the output power is a function of the applied heat, so it is hoped that a larger value of heat will represent a larger decrement of the detected light power. It is important to remark that the output signal of

the photo-diode is normalized to its maximum value in order to compare the signals from different experiments.

The measurement process gives us a plot of normalized output signal versus time, i.e. a transient response. So we can give a quantitative result in terms of the applied heat flux, for the largest value of $Q = 192.3$ mW/cm² the output power decreases about 65% of the total power whilst the smallest $Q = 14.1$ mW/cm² only represents the 10% decrease of the input power.

Finally, we demonstrated the initial approach from the point of view of heat conduction can be traduced as a decrease of light power detected in the photo-diode.

CONCLUSION

We presented the design of a compact Herriott cell integrated on an acrylic slab with 1.5 cm². The multiple-reflections scheme given by the Herriott cell, results a powerful device which allows reducing the size of an element by increasing the optical path length as well as the sensitivity in comparison with a single pass device.

We design a preliminary system in which different heat fluxes were applied in order to demonstrate the measurement response.

The presented methodology could be considered to integrate a whole flux sensor in order to characterize thermal properties of materials like, thermal conductivity, effusivity, diffusivity and among others, with the main feature that the size of the sample under study could be small sized around 1 cm² and good sensitivity in the measurements. So it may be suitable for applications like, biomedicine, thermal engineering and materials' science.

ACKNOWLEDGMENT

We acknowledge financial support from DGAPA-UNAM in the project PAPIIT IT100515. The authors thank Alejandro Esparza-García from CCADET-UNAM for his technical contribution in the deposition of aluminum films. R.G.R-C. author acknowledges CEP-UNAM for financial support. V. A-D. thanks Alma College's professional development fund for their financial support.

REFERENCES

- [1] J. White, Long Optical Paths of Large Aperture, *J. Op. Soc. Am.*, vol. 32, no.5, pp. 285-288, 1942.
- [2] D. Herriott, H. Kogelnik and R. Kampfner, "Off-Axis Paths in Spherical Mirror Interferometers", *Appl. Opt.*, vol.3, no.4, pp. 523-526, 1964.
- [3] V.L. Kasyutich and P.A. Martin, "Multipass optical cell based upon two cylindrical mirrors for tunable diode laser spectroscopy", *Appl. Phys. B Lasers and Optics*, vol. 88, pp. 125-130, 2007.
- [4] B. L. Anderson and C.D. Little, "Optical true time delay for phased-array antennas: demonstration of a quadratic White cell", *Appl. Opt.*, vol.41, no.4, pp. 4912- 4921, 2002.

- [5] B. McManus, P.L. Keblanian and M.S. Zahniser, “Astigmatic mirror multipass absorption cells for long-path-length spectroscopy”, *Appl. Opt.*, vol. 34, no.18, pp. 3336-3348, 1995.
- [6] Robert C. “Simple, stable and compact multi-reflection optical cell for very long optical paths”, *Appl. Opt.*, vol. 46, no.22, pp. 6545-6556, 2007.
- [7] C. Sánchez-Pérez, A. Gutierrez-Arroyo and N. Alemán-García, “Heat flux measurement in biological tissues by photo-thermal beam deflection”, *Proc. AIP Conf.* 1494 62, 2007.
- [8] C. Sánchez-Pérez and A. García-Valenzuela, “Planar integrated optical sensors based on the Mirage Effect”, *Measurement Science and Technology*, vol. 21 054011, pp. 1-4, 2010.
- [9] S.B. Riffat, M. Xiaoli, “Thermoelectrics- a review of present and potential applications”, *Appl. Therm. Eng.*, vol. 23, pp. 913–935, 2003.
- [10] C. Braunsman, V. Prucker and T.E. Schäffer, “Optical knife-edge displacement sensor for high-speed atomic force Microscopy”, *Appl. Phy. Lett.*, vol. 104 103101, pp. 1-4, 2014.

R.G Ramírez-Chavarría received his BSc degree in computer science engineering from Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) in 2013. He is now pursuing a MSc degree on electrical engineering at UNAM. His research lines are focused on instrumentation, sensors and embedded systems design.

C. Sánchez-Pérez received her BSc degree in electronic engineering from the Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Mexico City, in 1996 and her MSc and PhD degrees in optics from the Institut National Polytechnique de Grenoble, France, in 1997 and 2000 respectively, continuing with a postdoctoral position in 2001. Since 2002 she has been a researcher at the Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, UNAM. Her research interests include biophotonic devices, optical sensing and colloids refractometry.

V. Argueta-Díaz received his BSc degree in telecommunications engineering from UNAM, Mexico in 1998 and his MSc and PhD in optoelectronics from The Ohio State University in 2002 and 2005 respectively. He hold a postdoc position in CCADET from 2008-2010. Since 2011 he's assistant professor and engineering program coordinator at Alma College.