



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

SENSOR ÓPTICO DE DESPLAZAMIENTO EMPLEANDO UNA CELDA HERRIOTT

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

PRESENTA:  
ING. JUAN JOSÉ CAMPOS PUEBLA

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

MÉXICO, D. F. JULIO 2016



**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: DR. GUTIÉRREZ CASTREJÓN RAMÓN

Secretario: DR. QURESHI NASER

Vocal: DRA. SÁNCHEZ PÉREZ CELIA ANGELINA

1<sup>er</sup>. Suplente: DR. MATATAGUI CRUZ DANIEL

2<sup>d o</sup>. Suplente: DR. CEBALLOS HERRERA DANIEL ENRIQUE

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

**TUTOR DE TESIS:**

DRA. CELIA ANGELINA SÁNCHEZ PÉREZ

-----  
**FIRMA**



Porque escudo es la ciencia, y escudo es el dinero; mas **la sabiduría** excede, en que da vida a sus poseedores.

**Eclesiastés 7:12**

El principio de la sabiduría **es el temor de Jehová**; los insensatos desprecian la sabiduría y la enseñanza.

**Proverbios 1:7**

El temor de Jehová **es aborrecer el mal**; la soberbia y la arrogancia, el mal camino, y la boca perversa, aborrezco.

**Proverbios 8:13**

Y he visto todas las obras de Dios, que el hombre no puede alcanzar la obra que debajo del Sol se hace; por mucho que trabaje el hombre buscándola, no la hallará; aunque diga el sabio que la conoce, no por eso podrá alcanzarla.

**Eclesiastés 8:17**



## AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por haberme puesto en este tiempo y en este Camino.

A mis padres, por su guía, amor y cuidados.

A mi esposa por estar antes y después siempre conmigo.

Gracias por la oportunidad de pertenecer a esta gran casa de estudio, la UNAM, por mi raza hablará el espíritu.

Especiales agradecimientos a la Dra. Celia por su apoyo, el tiempo dedicado y sobre todo por su amistad.

A todos los que forman parte del Grupo de Sensores del CCADET, especialmente al Dr. Eduardo Sandoval por sus consejos, buen ánimo y apoyo durante toda la maestría, al M.I Giovanni Ramírez por apoyarme siempre en entender mejor las celdas.

Al Dr. Víctor Argueta Díaz por sus ideas aportadas sin las cuales no hubiese sido posible realizar éste trabajo.

Al M.C. Alejandro Esparza García y al Técnico Martín Briseño García por su apoyo en el depósito de plata hecho para la fabricación de los espejos.

Al Técnico David Flores García por su apoyo e ideas en la manufactura del montaje experimental.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado mediante la beca de posgrado durante los dos años de maestría.

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 cada uno de los sinodales: Dr. Naser Qureshi, Dr. Daniel Matatagui Cruz, Dr. Daniel Enrique Ceballos Herrera y el Dr. Ramón Gutiérrez Castrejón por su tiempo y apoyo para revisar éste trabajo y brindar ideas y sugerencias de mejora.

# ÍNDICE GENERAL

<b>RESUMEN</b> .....	<b>7</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>8</b>
1.1 CARACTERÍSTICAS DEL DESPLAZAMIENTO DE UN CUERPO.....	8
1.2. SENSORES DE DESPLAZAMIENTO ÓPTICOS. ....	8
1.2.1 Sensor de desplazamiento en fibra óptica. ....	8
1.2.2 Sensor óptico de desplazamiento en tecnología MEMS basado en un interferómetro Fabry-Perot. .	9
1.2.3 Sismómetro basado en un interferómetro de fibra óptica. ....	10
1.2.4 Sensor de desplazamientos para alinear el espejo primario del telescopio W.M. Keck.....	11
1.2.5 Sensor de desplazamiento integrado. ....	11
1.2.6 Sensor óptico de desplazamiento utilizando el efecto navaja para un AFM (Atomic Force Microscopy). ....	12
1.3. CELDAS DE CAMINO ÓPTICO LARGO. ....	13
1.3.1 Celda White .....	13
1.3.2 Celda Herriott.....	14
1.4 PROPUESTA DE SENSOR DE DESPLAZAMIENTO BASADO EN CELDA HERRIOTT. ....	15
<b>2. ANTECEDENTES</b> .....	<b>17</b>
2.1 DEFORMACIÓN DE UN CUERPO .....	17
2.2. CONFIGURACIONES DE LA CELDA HERRIOTT. ....	18
2.2.1 Celda Herriott con espejos esféricos. ....	18
2.2.2 Celda Herriott con espejos astigmáticos.....	18
2.2.1 Celda Herriott con espejos cilíndricos.....	18
2.3. PARÁMETROS DE LA CELDA HERRIOTT CON ESPEJOS CILÍNDRICOS. ....	19
2.3.1 Ángulo entre reflexiones.....	19
2.3.2 Número de pasos y número de órbitas. ....	19
2.3.3 Condiciones de estabilidad y operación. ....	20
2.3.5 Patrones de incidencias. ....	20
2.3.6 Sensibilidad de la celda Herriott. ....	23
<b>3. SENSOR DE DESPLAZAMIENTO</b> .....	<b>24</b>
3.1. DISEÑO DE CELDA HERRIOTT COMO TRANSDUCTOR DE DESPLAZAMIENTO.....	24
3.1.1 Ángulo entre reflexiones en función de la separación entre espejos. ....	24
3.1.2 Principio de funcionamiento de sensor de desplazamiento.....	25
3.1.3 Cambio de posición del patrón de incidencia. ....	26
3.1.4 Número de incidencias en M2.....	27
3.1.5 Ángulo de salida .....	28
3.2. DISEÑO MECÁNICO. ....	31
3.2.1 Diseño de los espejos que conforman la celda.....	31
3.2.2 Análisis de esfuerzos con fuerza distribuida.....	33
3.2.3 Análisis de esfuerzos con fuerza puntual. ....	33
3.2.4 Diseño final de espejo.....	35
3.3. INTEGRACIÓN DEL DETECTOR AL SENSOR DE DESPLAZAMIENTO. ....	36
3.3.1. Detección fotométrica de la señal.....	37
3.3.2. Caracterización de detector de potencia.....	41
<b>4. RESULTADOS EXPERIMENTALES</b> .....	<b>42</b>
4.1 PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN DEL DESPLAZAMIENTO.....	42
4.2 PRUEBA EXPERIMENTAL CUALITATIVA DEL PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL SENSOR DE DESPLAZAMIENTO. .	43
4.3 PRUEBA EXPERIMENTAL CUANTITATIVA .....	44
4.3.1. Repetibilidad.....	50
4.3.2. Sensibilidad .....	51
4.3.3. Resolución y rango de medición. ....	52



---

<b>5. CONCLUSIONES GENERALES.....</b>	<b>54</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>55</b>
A) ESTRUCTURA REDISEÑADA CON RESORTES Y CARCASA.....	55
B) INTERFAZ Y ADQUISICIÓN DE VALORES PARA PRUEBAS CON DETECTOR DE POTENCIA ÓPTICA.....	56

## Resumen.

Muchos son los sistemas donde es imprescindible cuantificar los desplazamientos que se presentan ya sea en un cuerpo que forme parte de un sistema o bien del sistema mismo en relación a su entorno. Desde un sistema óptico de escaneo de imágenes hasta un sistema de orientación satelital de telescopios, contienen componentes que requieren un monitoreo constante de su ubicación espacial y la magnitud de los desplazamientos que se presentan en ellos. Y es que a diferencia de medir solo la posición de un objeto, el desplazamiento de dicho objeto involucra un estado anterior y otro posterior por lo que es necesario contar con una referencia u origen que permita determinar la dirección del movimiento. Ya se han desarrollado diversos sistemas capaces de cuantificar los cambios de posición para diversas aplicaciones, sin embargo, existe la necesidad de proponer nuevos sistemas para registrar desplazamientos del orden de milímetros a micras y quizá por debajo de éstas escalas, bajo condiciones de estabilidad mecánica y térmica más robustas que los sistemas actualmente reportados. Pudiendo llegar a ser útil en áreas de aplicación como la actividad volcánica, sismología, inclinación de edificios, puentes, etc.

Debido a lo anterior, surge la idea de usar la celda tipo Herriott como sensor de desplazamiento, puesto que previamente dentro del Grupo de Sensores del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) de la UNAM, bajo la coordinación de la Dra. Celia Sánchez, se han estudiado las características de la celda y se ha demostrado su utilidad para el sensado de ciertas variables físicas y permitiéndonos pensar su utilidad para medir desplazamientos.

Por lo que se propone el diseño de un sensor de desplazamiento que use la celda Herriott como transductor. Se ha estudiado que los cambios en el radio de curvatura de uno de los espejos que conforman la cavidad por la aplicación de una fuerza, provoca, además de la deformación del espejo, una reducción de la distancia entre los espejos generando un cambio de posición y un cambio del ángulo del haz de salida que sirve como indicador del desplazamiento ocurrido en la dirección en la que se aplico la fuerza.

Si bien en la literatura es posible encontrar una amplia cantidad de sensores de desplazamiento, no existen documentos publicados que usen una celda tipo Herriott para medir desplazamientos. Por otro lado, se puede pensar que con el rápido desarrollo de la tecnología MEMS un sistema óptico de espejos en espacio libre tendría desventaja, sin embargo una de las finalidades que se persigue con la elaboración de éste trabajo es disminuir los costos de fabricación así como aprovechar las cualidades conocidas de una cavidad de camino óptico largo pero ahora en el campo mecánico.

El presente trabajo contiene la estructura general para el diseño de una celda Herriott y su aplicación como sensor de desplazamientos así como el diseño mecánico, fabricación y los primeros resultados experimentales con éste sistema, obteniendo resultados prometedores con una resolución de nanómetros y un rango de medición comparable con otros sistemas más complejos. La fabricación de la celda tipo Herriott se logró utilizando la infraestructura con la que cuenta el CCADET resultando ser relativamente económica.

## 1. INTRODUCCIÓN

*En este capítulo se introduce al lector al contexto de medición de desplazamientos de un cuerpo, y el estado del arte de algunos métodos ópticos usados para medirlos. Dentro de los métodos ópticos se mostrará el empleo de una celda de múltiples reflexiones de un haz láser para sensar desplazamiento. Dicho contexto permitirá plantear el principio de funcionamiento del sensor de desplazamiento propuesto, mismo que se irá explicando durante el desarrollo de este trabajo.*

### 1.1 Características del desplazamiento de un cuerpo.

Al aplicar cargas a un cuerpo deformable se generan deformaciones locales o totales que pueden dar lugar a un cambio de posición (desplazamiento) de una parte o todo el cuerpo. Para entender el comportamiento de cualquier estructura y determinar así su estabilidad frente a la aplicación de fuerzas externas, es necesario realizar un estudio estático que permita determinar las fuerzas que actúan sobre y dentro de un cuerpo y así encontrar las zonas de mayor concentración de esfuerzos que den lugar a rupturas o fallas del material. Existen métodos analíticos para calcular la magnitud de los esfuerzos que se formarán a diversas cargas aplicadas en estructuras. Dicha información es usada en el diseño de elementos de máquinas, en arquitectura y en la teoría de suelos. Se han desarrollado diversos sistemas que permiten conocer la evolución de la deformación de los cuerpos al estar expuestos a cargas constantes. Estos sistemas mantienen un monitoreo de las condiciones estructurales a cambios en el ambiente o bien por la presencia de fuerzas externas. El método analítico proporciona los puntos de mayor concentración de esfuerzos y es en estos puntos por lo general es donde los sistemas de monitoreo son colocados.

### 1.2. Sensores de desplazamiento ópticos.

Existen diferentes sensores de desplazamiento ópticos basados en fibra óptica los cuales operan con base en la técnica de modulación de intensidad. Se ha logrado obtener sensibilidades altas y rangos lineales grandes mediante el diseño de sondas que involucran un emisor, un receptor, un reflector y probado con diferentes revestimientos plásticos. Las aplicaciones para la medición de variables físicas en las cuales se han utilizado reportados en la literatura son la detección de rugosidad superficial, índice de refracción de un líquido, nivel de líquido, la vibración, la temperatura, etc.[1].

A continuación mencionaremos brevemente dos dispositivos ópticos que sensan desplazamiento reportados en la literatura que se relacionan con la propuesta de sensor de desplazamiento a desarrollar durante el presente trabajo.

#### 1.2.1 Sensor de desplazamiento en fibra óptica.

Basa su funcionamiento en la medición de la intensidad de luz reflejada por un espejo plano que se desplaza. Usa fibra óptica multimodal. La luz proveniente de un LED viaja por la fibra hasta que llega aun un espejo (diafragma) donde es reflejada para entrar nuevamente a la fibra mediante un acomplador y de ahí a un receptor, el espejo sufre deformaciones proporcionales a los desplazamientos generados por la presión que se le aplica. Es posible calibrarlo para medir presión o vibración [2].

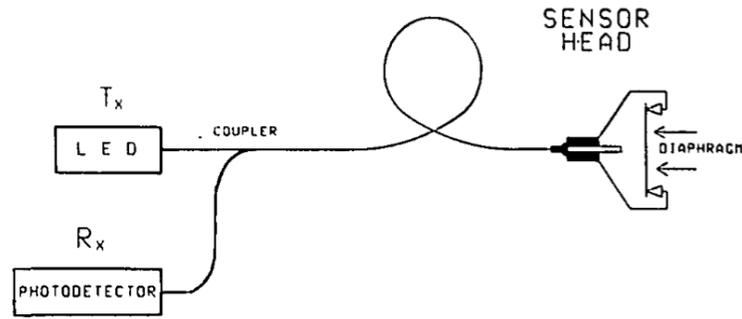


Fig. 1.1. Representación de sensor de desplazamiento configurado como un sensor de presión [2].

Podemos ver en la Fig. 1.1. que la presión aplicada en el diafragma genera un desplazamiento en su región central que cambia la intensidad de la luz reflejada de vuelta al receptor.

Las ventajas que presenta son: alta exactitud y buena inmunidad a interferencia eléctrica, trabaja en un rango de 20-500  $\mu\text{m}$  y tiene una resolución teórica de 1 nm. Sin embargo para lograr la resolución en la práctica se requiere: incorporar técnicas de equilibrio de fluctuaciones en la potencia de salida de la fuente, considerando la deriva de la sensibilidad del receptor óptico y compensar las pérdidas en la fibra [2]. Por otro lado, éste dispositivo solo puede medir cuando la fuerza que genera el desplazamiento del diafragma se distribuye de manera uniforme, de tal forma que si aplicásemos una fuerza puntual la respuesta del sensor cambiaría considerablemente siendo incapaz de determinar la magnitud del desplazamiento ocurrido.

### 1.2.2 Sensor óptico de desplazamiento en tecnología MEMS basado en un interferómetro Fabry-Perot.

Esta basado en el interferómetro Fabry-Perot en fibra óptica y mide los desplazamientos de un elemento que esta en cantiléver. Esta fabricado a través de procesos de litografía UV. Una fibra óptica monomodo se emplea para detectar el desplazamiento del elemento en cantiléver inducido por algún esfuerzo cortante provocado en el elemento. Tiene una resolución de 10 nm y una sensibilidad de 0.128 nm/nm (desplazamiento de espectro/desplazamiento de cantiléver)[3].

Este sensor puede emplearse en entornos de aire o líquido con una alta sensibilidad debido a su diseño impermeable.

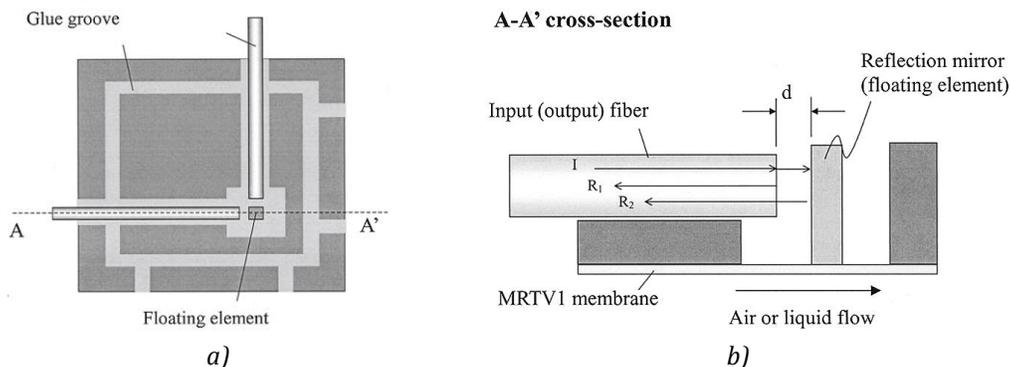


Fig. 1.2. Sensor de desplazamiento con base en interferómetro Fabry-Perot y elemento en cantiléver [3].

Se puede ver en la Fig. 1.2. (a) un esquema del sensor el cual tiene como elementos principales un elemento flotante y dos fibras ópticas colocadas perpendicularmente para sensar dos ejes. En la Fig. 1.2. (b) dos de los lados del elemento flotante están cubiertos con una película de metal para lograr una reflexión de la luz incidente ( $I$ ) que de nuevo regresa a la fibra ( $R2$ ) y puesto que la fibra también tiene un depósito de metal que hace que parcialmente transmita o refleje se tiene interferencia con otra reflexión de luz ( $R1$ ). Habrá entonces múltiples reflexiones entre el elemento en cantiléver y la superficie de la fibra. El espectro dependerá de la distancia entre los elementos, así como la longitud de onda de luz incidente [3].

Este sensor alcanza altas resoluciones pero tiene como desventaja la necesidad de una infraestructura especializada para la fabricación de la tecnología MEM's a pesar de que el costo unitario llegue a ser relativamente económico.

### 1.2.3 Sismómetro basado en un interferómetro de fibra óptica.

De la misma forma que los sismómetros mecánicos convencionales, éste sensor utiliza una masa sísmica de 520 gm la cual está sujeta a dos cilindros de goma, los cuales actúan como resortes donde cada cilindro tiene una capa enrollada de fibra óptica monomodo de 6.5 m de largo. La función de los “resortes” de goma es transformar los movimientos longitudinales relativos entre la carcasa del sensor y la masa sísmica en un esfuerzo de tensión y compresión en la fibra. Los extremos de la capa de fibra están interconectados a través de un acoplador de 3 dB, formando un interferómetro de Michelson. Cuando se desplaza la carcasa del sensor, la fibra alrededor de un cilindro se extiende, mientras que la otra se contrae, de ésta forma es posible determinar la magnitud del desplazamiento ocurrido en el sensor [4].

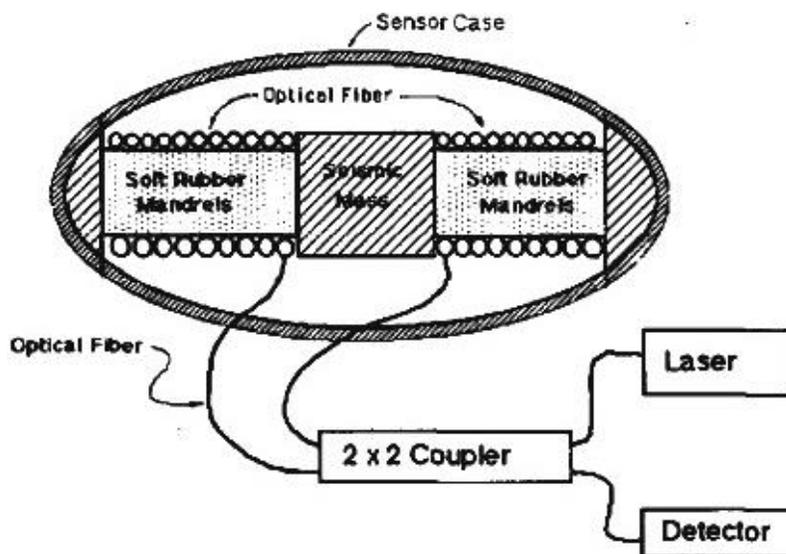


Fig. 1.3. Diagrama del sismómetro con base en un interferómetro Michelson de fibra óptica [4]

La configuración propuesta en la Fig. 1.3. permite que la luz viaje alrededor de cada cilindro dos veces debido a la reflexión, por lo que se logra aumentar cuatro veces la sensibilidad comparado con un interferómetro de Michelson convencional. Tiene una sensibilidad de 8500 rad/ $\mu$ m de cambio de fase óptica por desplazamiento cuando se trabaja por arriba de la resonancia de masa-

resorte donde funciona como un sismógrafo. Debajo de dicha resonancia el sensor funciona como un acelerómetro con una sensibilidad de 10.500 rad/g.

#### 1.2.4 Sensor de desplazamientos para alinear el espejo primario del telescopio W.M. Keck.

El espejo primario del telescopio usado en el observatorio de Keck está compuesto por un arreglo de 36 espejos con forma hexagonal y dado que cada espejo está dispuesto uno al lado del otro es necesario un sistema de medición para la orientación relativa de cada espejo. El sensor desarrollado para cumplir esta tarea está acoplado a un actuador que reorienta la posición de cada espejo.

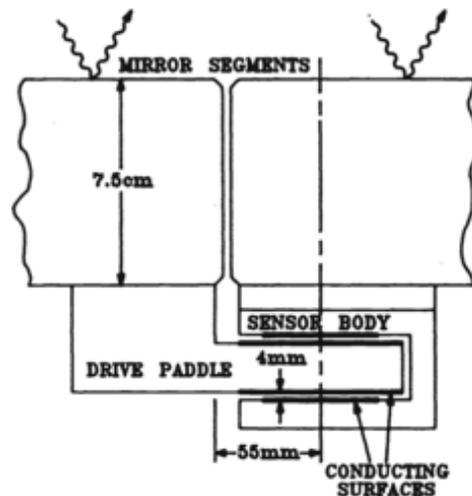


Fig. 1.4. Corte transversal del sensor [5].

Podemos ver en la Fig. 1.4. un corte del sistema cerca de dos espejos colindantes donde está dispuesto el sensor de desplazamientos el cual no interfiere en la captura de imágenes pues está colocado en la parte inferior del arreglo de espejos. El cuerpo del sensor tiene forma de herradura y envuelve una guía la cual se usa como referencia para medir la posición relativa de los espejos. Tanto la herradura como la guía del sensor tienen superficies que conducen corriente eléctrica por lo que se genera un capacitor variable. De ésta forma, cada vez que se requiere alinear alguno de los espejos su posición es determinada por los cambios en capacitancia que se presentan en el sistema, siendo ésta la variable de retroalimentación para los actuadores.

#### 1.2.5 Sensor de desplazamiento integrado.

Éste sensor combina la óptica integrada y la micro-mecánica en un sustrato monolítico. La señal de adquisición es óptica. El dispositivo se fabrica utilizando una combinación de pulsos láser de femtosegundos y ataque químico. Se compone de una plataforma móvil y un marco fijo [6].

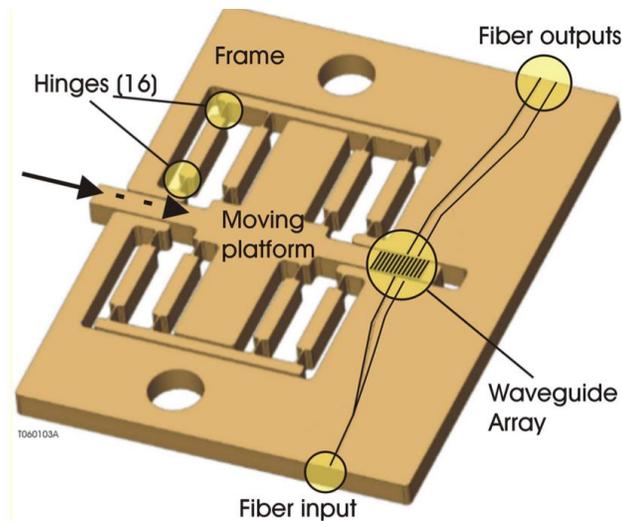


Fig. 1.5. Sensor de desplazamiento en sustrato monolítico con el codificador y plataforma móvil [6].

Tiene como ventaja que la fabricación es en una sola etapa con lo que elimina los problemas de alineación. La silica es químicamente estable y ofrece buena transparencia, además soporta altas temperaturas. Su módulo de Young es similar al del aluminio. Trabaja en un rango de 0 – 1 mm con una resolución de 50 nm [6].

Sin embargo, puede tener errores de fabricación ya que la precisión depende principalmente de las etapas motorizadas utilizados para mover la muestra bajo el haz láser y dichos errores repercuten de manera directa a la resolución que puede alcanzar éste dispositivo.

### 1.2.6 Sensor óptico de desplazamiento utilizando el efecto navaja para un AFM (Atomic Force Microscopy).

Los microscopios de fuerza atómica de alta velocidad (AFM) tienen una velocidad de filmación de hasta 1000 veces más rápido en comparación con AFM's convencionales y permiten la obtención de imágenes aun cuando hay algún proceso dinámico rápido. Sin embargo, existe la dificultad de corregir los movimientos de los actuadores piezoeléctricos en los escáneres del AFM. Por lo que para resolver éste inconveniente se propone un sensor de desplazamiento que se adapta bien para cumplir los requisitos de AFM's de alta velocidad. Sus dimensiones son pequeñas por lo que puede acoplarse al sistema del AFM, además, el ancho de banda del sensor está por encima de 100 kHz y su resolución está en la escala nanómetros [7].

El principio de funcionamiento de éste sensor está basado en la técnica del filo de la navaja, proporcionando la detección del desplazamiento sin entrar en contacto con el cantilever del AFM. Ver Fig. 1.6. (a), permitiendo así una alta resolución y un ancho de banda grande. Como se sabe, la técnica de filo de la navaja se utiliza comúnmente para determinar el perfil del haz láser, sin embargo, se propone su uso como sensor de desplazamiento midiendo en el eje Z proyectado en un plano  $\xi$ . Ver Fig. 1.6. (b), la ubicación de la navaja permite que un 50 % del haz esté incidiendo en un detector de potencia y el porcentaje restante este oculto en la navaja de tal forma que al presentarse un desplazamiento el sistema está en la zona más sensible puesto que

es ahí donde la potencia del haz desciende de manera más brusca por el perfil mismo del haz gaussiano.

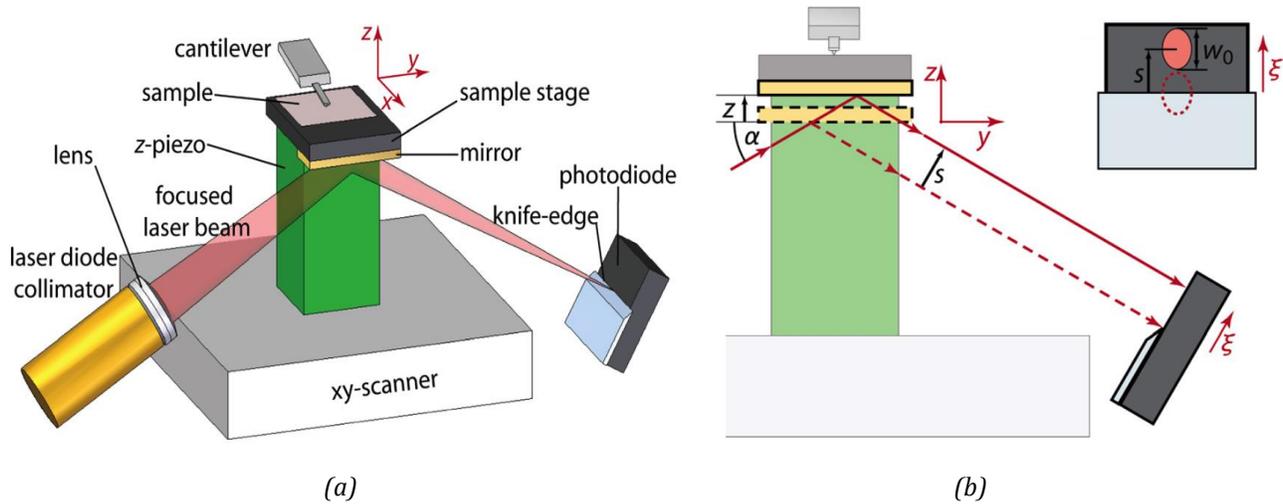


Fig. 1.6. Principio de funcionamiento de sensor de desplazamiento para AFM's, (a) vista general del sistema, (b) corte en vista frontal con proyección al plano  $\xi$ . [7].

### 1.3. Celdas de camino óptico largo.

Se han encontrado muchas aplicaciones al lograr que un haz se refleje un número determinado de veces entre espejos, siendo la configuración más simple dos espejos planos, sin embargo, con éstos no se puede llegar a un número muy grande de reflexiones y demanda en todo caso un tamaño grande de los espejos para que se lleven a cabo múltiples reflexiones. Puesto que se ha comprobado que el aumentar las reflexiones de un haz se aumenta la sensibilidad y resolución del sistema, se han estudiado dispositivos ópticos que permitan ofrecer múltiples reflexiones mediante el uso de espejos curvos con las cuales es posible obtener largos caminos ópticos para diversas aplicaciones.

Dichas configuraciones de espejos curvos son las celdas ópticas de largo camino. Siendo las más estudiadas la celdas White y Herriott. Las celdas de camino largo tienen la gran ventaja de que permiten determinar el camino óptico recorrido por el haz mediante el diseño de la misma. Para comprender su funcionamiento 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.

#### 1.3.1 Celda White

La *celda óptica White* está formada por tres espejos esféricos cóncavos con radios de curvatura iguales con una distancia entre espejos igual a dos veces la distancia focal de ellos ( $d=2f$ ). En la Fig. 1.7. se muestra el arreglo de espejos que conforman una celda White donde los espejos se nombran con las letras **A**, **B** y **C** donde el espejo **A** colocado a la izquierda del arreglo, se encuentra frente a los espejos **B** y **C**, colocados a la derecha. Un haz entra con un ángulo 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  $A$ . Ahora  $F_1$  se refleja en el espejo  $C$  creando un punto  $F_2$ , el cual se refleja nuevamente hacia el espejo  $A$ . Esta secuencia de reflexiones representa un viaje completo del haz, es decir, un viaje completo se logra cuando el haz parte nuevamente desde el espejo  $A$  después de haberse reflejado en  $B$  y  $C$  pudiendo considerarse ahora que el punto  $F_2$  en el espejo  $A$  es el punto de partida para comenzar un nuevo viaje, con esto 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  $F_0, F_2, F_4...$  etc. Y las incidencias nones  $F_1, F_3, F_5, ...$ etc. De esta forma se formará un patrón de incidencias en los espejos [8].

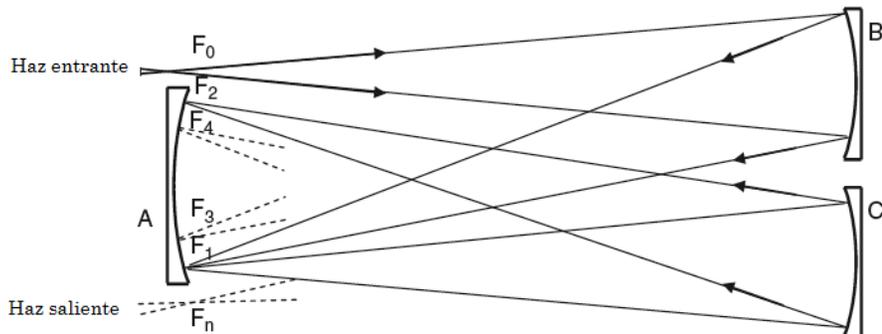


Fig. 1.7. Diagrama de una celda óptica White [9].

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. De ésta forma si se dispone de una cantidad de muestra limitada como en la medición de los espectros de vapor se puede lograr que la radiación vaya y venga en el mismo volumen un gran número de veces logrando así reducir el tamaño de muestra y aumentando la sensibilidad. Puede ser utilizado en líquidos o gases siempre y cuando éstos no dañen la superficie de los espejos, con los que están directamente en contacto.

La desventaja de ésta configuración de celdas de camino óptico largo es que la alineación de los espejos debe ser muy precisa 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.

### 1.3.2 Celda Herriott

La celda Herriott [9] está formada por dos espejos cóncavos curvos  $M1$  y  $M2$  con radios de curvatura  $R1$  y  $R2$ , respectivamente. Dichos radios pueden ser iguales o diferentes. Los espejos se encuentran colocados concéntricamente alineados con el eje óptico, uno frente al otro separados una distancia igual a dos veces la distancia focal, como se muestra en la Fig. 1.8.

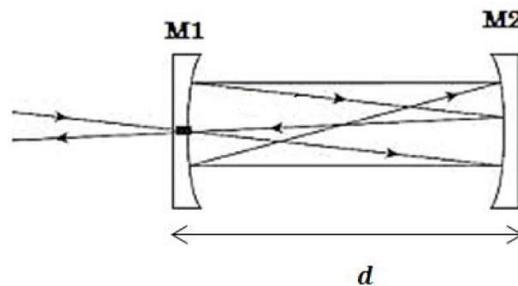


Fig. 1.8. Diagrama general de una celda óptica Herriott de espejos esféricos[10].



La celda óptica de camino largo tipo Herriott tiene la peculiaridad de que el haz que entra por un orificio en uno de los espejos, después de varias reflexiones, sale por el mismo lugar por donde entró.

La celda tiene como parámetros principales en su diseño los radios de curvatura  $R1$  y  $R2$  y la distancia  $d$  entre ellos. Dichos valores determinan la cantidad de reflexiones internas que se tendrán en la cavidad. La disposición de los espejos bajo esta configuración permite a cada paso que da el haz de un espejo a otro la re-focalización de la luz por lo que se tiene una menor distorsión del haz de salida. Por otro lado, no se requiere de una alineación muy precisa como en el caso de la celda White, dando lugar a una estabilidad mecánica superior en el caso de la celda Herriott.

Estas dos configuraciones de cavidades ópticas que permiten múltiples reflexiones entre los espejos que las conforman, celda White y Herriott, se utilizan para lograr caminos ópticos muy largos en volúmenes pequeños. Sus aplicaciones más comunes son en la espectroscopia de absorción, espectroscopia foto-acústica, como retardadores ópticos, como celdas de ganancia Raman, en interferometría y como resonadores[10]. Debido a que generan caminos ópticos largos en volúmenes pequeños reduciendo de esta manera el volumen de la mezcla de gases y simultáneamente aumentar la sensibilidad del instrumento.

De las dos celdas de camino óptico largo descritas brevemente anteriormente, la celda Herriott por sus características, es la seleccionada para usarse como transductor en el sensor óptico de desplazamiento propuesto en este trabajo, debido a que la cantidad de reflexiones logradas en la cavidad está en función de características físicas por lo que si se modifica un parámetro mediante una fuerza externa que dé lugar a un desplazamiento, se podrá cuantificar el valor del desplazamiento, en capítulos siguientes se describirá con mayor detalle el funcionamiento de este dispositivo y la manera en la que se pueden aprovechar sus características para el sensado de desplazamiento, aplicación que hasta el momento no se ha encontrado en la literatura para una celda Herriott.

#### **1.4 Propuesta de sensor de desplazamiento basado en celda Herriott.**

Una vez descrito brevemente el tema a desarrollar y conociendo el elemento central de estudio del sensor óptico de desplazamiento, la celda Herriott, es posible formular una hipótesis que se demostrará formalmente a lo largo del presente trabajo. Se propone el diseño, desarrollo y primeros resultados experimentales de un sensor óptico de desplazamientos con base en una celda de camino óptico largo tipo Herriott. Dicho sensor será capaz de cuantificar desplazamientos en el orden de micras o nanómetros ocasionados en la dirección del eje óptico de los espejos. Es preciso aclarar que los alcances del proyecto están enfocados únicamente en la propuesta de un nuevo sensor óptico de desplazamiento, que por sus características, pudiera representar una excelente alternativa para medir desplazamientos, no a su uso en una aplicación en particular. Se presenta un producto de innovación tecnológica que permitirá tener un dispositivo compacto con un tamaño en el orden de centímetros. Finalmente se determinará la viabilidad del sensor para futuras aplicaciones como detector de desplazamientos.



En este primer capítulo se presentó una breve introducción abordando los temas que permiten entender la oportunidad de diseño que existe para la generación de un nuevo sensor de desplazamiento, las características más elementales sobre la deformación de un cuerpo que da lugar a un desplazamiento, el estado del arte de los sensores mecánicos y ópticos de desplazamiento, así como la utilidad del uso de dispositivos de múltiples reflexiones para medir una variable física. En el siguiente capítulo se abordarán los conceptos fundamentales y los parámetros de diseño usados para generar la propuesta de diseño que aprovecha las características ópticas de la celda Herriott para medir una variable mecánica, es decir, desplazamientos.

## Bibliografía

- [1] Hang Zhou Yang., et al., "A Review Of Recent Developed and Applications Of Plastic Fiber Optic Displacement Sensors," pp 333–345, (2013).
- [2] G. ECONOMOU., et al., "Studies of an Optical Fibre Displacement Sensor," Journal of the Institution of Electronic and Radio Engineers, vol. 57, No. 2, pp. 63-66, (April 1987).
- [3] Fan-Gang Tseng., et al., "Polymer MEMS-Based Fabry–Perot Shear Stress Sensor," IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 3, No. 6, (December 2003).
- [4] D. L.Gardner., et al., "A Fiber-optic Interferometric Seismometer," Journal of Lightwave Technology, VOL. LT-5, No. 1, (July 1987).
- [5] R.H. Minor., et al., "Displacement Sensor For The Primary Mirror Of The W.M. Keck Telescope," SPIE Vol.1236 Advanced Technology Optical Telescopes IV 1009, (1990).
- [6] Philippe Bado., et al., "Laser-based fabrication of a displacement sensor with an integrated high-accuracy position sensor," Proc. of SPIE Vol. 6108 61080U-1, (2006).
- [7] Christoph B., et al., "Optical knife-edge Displacement Sensor For High-Speed Atomic Force Microscopy," Appl. Physics Letters 104, 103101 (2014)
- [8] White, J. U., "Long Optical Paths of Large Aperture," J. Opt. Soc. Am., vol. 32, pp 285-288 (May 1942).
- [9] Herriott D. H., et al., "Off-Axis Paths in Spherical Mirror Interferometers," Appl. Opt., Vol. 3, No. 4, pp 523-526, (April 1964).
- [10] Silver J.A., "Simple Dense-Pattern Optical Multipass Cells," Appl. Opt., Vol. 44 No.31, pp 6545-6556, (2005).

## 2. ANTECEDENTES

En el capítulo 2 se presentan los fundamentos teóricos que describen la deformación de un cuerpo así como el principio de funcionamiento de la celda Herriott, la descripción de los elementos que intervienen en esta y algunas configuraciones de las celdas ópticas de camino largo. En conjunto estos dos elementos permitirán entender el principio de funcionamiento del sensor óptico de desplazamiento que más adelante se describirá y se presentará con algunos resultados experimentales.

### 2.1 Deformación de un cuerpo

En el análisis estructural de un cuerpo, la magnitud de la deformación depende de la carga externa, el tipo de material y la geometría del cuerpo. La obtención de dichos parámetros resulta útil para pronosticar el punto de falla de cualquier estructura, ya sea desde una pieza mecánica hasta un edificio o una ladera. Debido a la importancia que tiene el análisis estático tanto en el diseño de estructuras como en el entendimiento de algunos fenómenos físicos es preciso mencionar algunos principios fundamentales para el estudio del comportamiento de un cuerpo al ser deformado: cargas externas y fuerzas de superficie, que serán usados a lo largo de este trabajo y descritos a continuación.

**Cargas externas:** Un cuerpo puede estar sometido a diversos tipos de cargas externas; sin embargo, cualquiera de estas puede clasificarse como fuerza de superficie o como fuerza de cuerpo [1].

**Fuerzas de superficie:** Son causadas por el contacto directo de un cuerpo con la superficie de otro. En todos los casos, esas fuerzas están distribuidas sobre el área de contacto entre los cuerpos. Si esta área es pequeña en comparación con el área total del cuerpo, entonces la fuerza superficial puede idealizarse como una sola **fuerza concentrada** (puntual). Si la carga superficial es aplicada a lo largo de un área estrecha, la carga puede idealizarse como una **carga linealmente distribuida**,  $w(s)$ . La fuerza resultante  $F_R$  de  $w(s)$  es equivalente al área bajo la curva de carga distribuida, y esta resultante actúa a través del centroide  $C$  o centro geométrico de esta área. La carga a lo largo de la longitud de una viga es un ejemplo típico en el que es aplicada a menudo esta idealización [1].

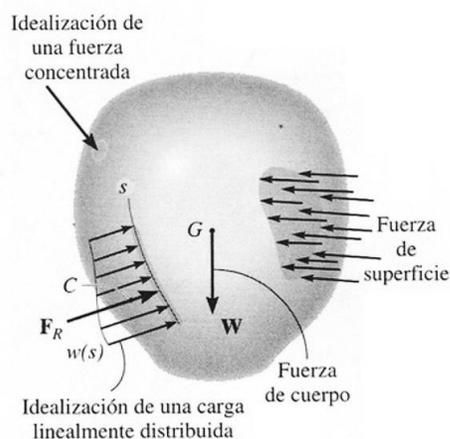


Fig. 2.1. Equilibrio de un cuerpo deformable [1].

## 2.2. Configuraciones de la celda Herriott.

### 2.2.1 Celda Herriott con espejos esféricos.

La configuración más simple de la celda, propuesta por Herriott, consta de dos *espejos esféricos* [2]. Un haz de luz láser se inyecta a través de un agujero en uno de los espejos; el haz se refleja periódicamente entre los espejos y después de un número determinado de pasos  $N$ , sale a través del orificio de entrada pero con dirección y pendiente diferente de la de entrada. Como resultado, el camino óptico total recorrido por el haz en la celda es aproximadamente  $N \times d$ . El patrón de puntos observados en los espejos de una celda se conoce como patrón de Lissajous y forma una elipse. Esta configuración de la celda Herriott convencional presenta una limitación puesto que el número de puntos que dan lugar al patrón formado en los espejos está limitado a unos 40 puntos o 80 pasos.

### 2.2.2 Celda Herriott con espejos astigmáticos

Herriott and Schulte [3] demostraron que al usar *espejos astigmáticos* en vez de esféricos, se logra una mayor densidad de puntos, para ello proponen una configuración de celda dónde cada espejo tiene diferentes distancias focales ( $f_x$ , y  $f_y$ ) con los espejos alineados ortogonalmente a la misma distancia focal entre sí. Los puntos resultantes crean patrones distribuidos sobre toda la cara de los espejos, de esta forma una cantidad superior de puntos se forma en comparación con la configuración de espejos esféricos. Sin embargo, se requiere de una precisión muy alta en la manufactura de los espejos y el proceso de fabricación es costoso, varios miles de dólares para obtener un par de espejos.

### 2.2.1 Celda Herriott con espejos cilíndricos.

Tiempo después, Hao[4] describe como generar los patrones de Lissajous, con las mismas ventajas que los espejos astigmáticos pero usando en su lugar espejos cilíndricos, los cuales son mucho más sencillos de fabricar y menos costosos.

La configuración de una *celda con espejos cilíndricos* puede verse en la Fig. 2.2., donde los dos espejos están rotados uno respecto del otro un ángulo  $\delta = 90^\circ$  por lo que el espejo frontal de entrada **M1** tiene curvatura a lo largo del eje  $y$ , por otro lado, el espejo trasero **M2** tiene su curvatura a lo largo del eje  $x$ . Dispuestos ambos espejos uno frente del otro, los espejos están ortogonalmente alineados. Después de una serie de reflexiones internas en la cavidad el haz sale por el mismo lugar por donde entró con un ángulo  $\phi_R$ .

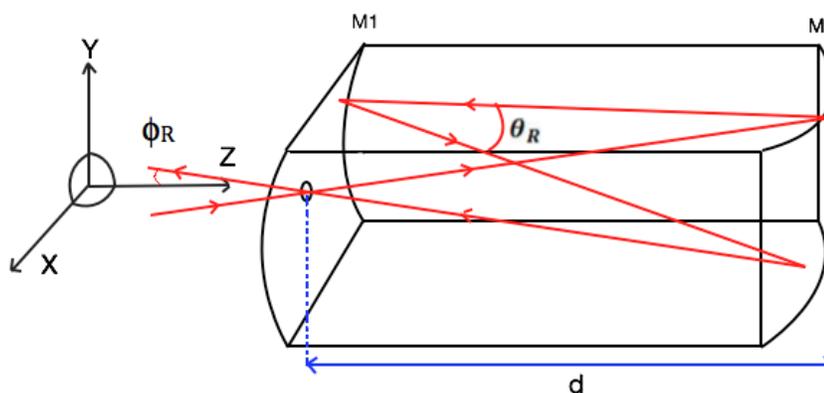


Fig. 2.2. Esquema general de la celda Herriott con espejos cilíndricos.

### 2.3. Parámetros de la Celda Herriott con espejos cilíndricos.

La trayectoria del haz dentro de la cavidad en una celda Herriott puede ser descrita mediante las ecuaciones propuestas por Herriott en [2] y [3], en donde tenemos una serie de ecuaciones que en su conjunto permiten determinar las características más relevantes de la celda como son: el número de pasos o reflexiones logradas en la celda, la posición de incidencia del haz láser en los espejos y el patrón de incidencias que se forma. A continuación describiremos las ecuaciones y conceptos que intervienen en los parámetros de diseño de la celda.

#### 2.3.1 Ángulo entre reflexiones.

El ángulo entre reflexiones  $\theta_R$  describe el valor angular entre dos reflexiones consecutivas y esta en función del radio de curvatura de los espejos y la distancia  $d$  que hay entre ellos. Asumimos que los espejos  $M1$  y  $M2$  tienen un radio de curvatura  $R1$  y  $R2$  respectivamente.

$$\theta_R = \cos^{-1} \left( \left( \sqrt{1 - \frac{d}{R1}} \right) \left( \sqrt{1 - \frac{d}{R2}} \right) \right). \quad (2.1)$$

Pero si el valor de ambos radios de curvatura es igual, podemos definir una nueva variable  $R$ , donde  $R1 = R2 = R$ . Por tanto, el valor angular entre reflexiones para éste caso está definido con la siguiente ecuación.

$$\theta_R = \cos^{-1} \left( \sqrt{1 - \frac{d}{R}} \right). \quad (2.2)$$

El valor de  $\theta_R$  indica un avance angular en cada reflexión que se produce en los espejos, es decir, entre reflexiones consecutivas. Por lo tanto, si los radios de curvatura permanecen constantes, podemos generar varios valores para  $\theta_R$  simplemente variando la distancia  $d$  y de igual forma, es posible cambiar este parámetro modificando el valor de radios de curvatura.

#### 2.3.2 Número de pasos y número de órbitas.

Cuando  $360^\circ/\theta_R$  es igual a un número entero  $N$ , decimos que el sistema en la celda se vuelve periódico, esto significa que el haz láser se refleja dentro de la celda un número  $N$  de veces o “pasos” y después abandona el sistema por el mismo puerto por donde entró [5]. Se considera un viaje completo del haz cuando ha viajado de  $M1$  a  $M2$  y regresa a  $M1$ , es decir, cuando el haz láser ha dado dos pasos, uno de ida y otro de vuelta.

Entonces el número de pasos se refiere al número de veces que el haz viaja desde  $M1$  a  $M2$  hasta que  $\theta_R = 360^\circ$  dibujando en cada incidencia en los espejos un spot.

Ahora bien, para cualquier condición donde se obtenga un número de pasos  $N$ , el parámetro  $M$  será un número entero que determinará el número de orbitas logradas por la celda, es decir, el número de ciclos completos dibujando una órbita donde cada órbita está formada por un conjunto de puntos que avanzan angularmente hasta completar un valor de  $\theta_R = 360^\circ$  en la celda. Utilizando un valor de  $M$  diferente de 1, es decir, un valor que dé lugar a más de una órbita, la ecuación para determinar el número de pasos dentro de la celda quedaría como:

$$N = \frac{2\pi M}{\theta_R}. \quad (2.3)$$

### 2.3.3 Condiciones de estabilidad y operación.

Las condiciones de estabilidad para una celda Herriott con espejos cilíndricos están definidas por las condiciones necesarias para que el haz continúe reflejándose dentro de la cavidad un número determinado de veces. Tomando como base la ecuación (2.2) observamos que la única forma de indeterminación es si el valor del radicando resulta en un valor imaginario y esto solo se logra si  $1-d/R < 0$  y para que esto suceda el cociente  $d/R$  debe ser mayor a 1. Por lo tanto, es fácil entender que  $R$  debe ser mayor a  $d$ . Por lo tanto, las condiciones de estabilidad están restringidas por la separación de los espejos  $d$  y los radios de curvatura  $R$  [5].

$$0 \leq d \leq R. \quad (2.4)$$

Como vemos, la ecuación (2.4) sólo toma en cuenta las características geométricas de la celda para la condición de estabilidad de la cavidad, sin embargo, mediante el método matricial, que más adelante se explicará, podemos darnos cuenta que el ángulo de entrada del haz también influye en ésta condición pues puede generar que el haz salga de la dimensión establecida de los espejos si el ángulo de entrada es muy grande.

### 2.3.5 Patrones de incidencias.

El patrón de incidencia en la cara interna de los espejos está compuesto por una serie de puntos del haz que se forman por cada vez que el haz incide en la cara reflectora de los espejos. Es posible determinar la posición de cada uno de éstos puntos mediante el método matricial para trazo de rayos como se describe en [6].

Para el método matricial de trazo de rayos la óptica geométrica tiene varios supuestos que es necesario recordar para entender el análisis realizado para encontrar la posición de cada incidencia en los espejos, que como ya se dijo, forman el patrón de incidencias. Uno de éstos supuestos es que los rayos viajan muy cerca del eje óptico del sistema, comúnmente el eje  $Z$ , conocidos como rayos paraxiales y por otro lado, los ángulos de inclinación de éstos rayos con respecto al eje  $Z$  son muy pequeños. Para el análisis se requieren de tres matrices fundamentales: una matriz de traslación, de reflexión y de rotación. El análisis involucra también parámetros de diseño propios de la celda como la dimensión de los radios de curvatura, el ángulo de rotación entre espejos, distancia entre espejos, índice de refracción entre los espejos, posición del orificio de entrada en el espejo  $M1$  y el ángulo del haz láser de entrada respecto al sistema coordinado de referencia.

### Vector de posición inicial:

Vamos a comenzar describiendo el vector de posición inicial  $r_0$ , el cual, es un vector columna que contiene la información inicial del haz de luz a la entrada de la celda. Está formado por cuatro elementos los cuales definen la posición de entrada en el plano  $XY$  y la inclinación del haz respecto al eje  $Z$ . El primer elemento es la coordenada en  $X$  y el segundo es el ángulo de inclinación del eje  $X$  con respecto al eje  $Z$  denotado por  $\beta n$ . El tercer elemento es la coordenada en  $Y$  seguida del ángulo de inclinación del eje  $Y$  con respecto al eje  $Z$  denotado por  $\gamma n$ . Éste vector acompaña a las ecuaciones que determinan la posición de los puntos de incidencia ya que de él depende la ubicación de cada punto bajo condiciones estáticas de la celda, es decir, sin alterar otros parámetros de la celda como pueden ser la distancia entre espejos, radios de curvatura, etc.

$$r_0 = \begin{bmatrix} X \\ \beta n \\ Y \\ \gamma n \end{bmatrix}. \quad (2.5)$$

### Matriz de traslación:

La matriz de traslación  $T$  es la matriz de propagación del haz en el espacio. Está en función de la distancia  $d$  entre espejos y del índice de refracción  $n$  del medio de propagación. En nuestro caso, es el espacio libre por lo que  $n = 1$ . Ésta matriz nos brinda información sobre la ubicación del haz una vez que ha viajado de un espejo a otro después de reflejarse en alguno de ellos.

$$T = \begin{bmatrix} 1 & d/n & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d/n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.6)$$

### Matriz de reflexión:

Una vez que el haz se ha propagado entre los espejos, la matriz de reflexión permite determinar el ángulo con el que es reflejado el haz ya sea en  $M1$  ó  $M2$  dependiendo de en que parte del viaje se encuentra el haz. La matriz de reflexión está en función del radio de curvatura de los espejos y pensando que los radios de  $M1$  y  $M2$  no son iguales, se tienen dos matrices de reflexión  $r_1$  y  $r_2$  respectivamente:

$$r_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -2n/R1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad y \quad (2.7)$$

$$r_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -2n/R2 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.8)$$

Puesto que ya sabemos que la configuración de celda tipo Herriott tiene como una de sus características la rotación de los espejos un ángulo delta  $\delta = 90$  [°], la matriz de reflexión de **M2** se modifica agregando una segunda matriz con la información del ángulo de rotación  $\delta$ . Dicho ángulo está definido con respecto del eje coordenado del sistema.

$$r'_2 = Rot(-\delta) * r_2 * Rot(\delta). \quad (2.9)$$

### Matriz de rotación:

La matriz de rotación puede ser usada para cualquier sistema de dos espejos y lleva la información del ángulo de rotación entre los espejos y los componentes **X** e **Y** de las coordenadas del haz. Se asume que la rotación tiene lugar alrededor del eje **Z**.

$$Rot = \begin{bmatrix} \cos(\delta) & 0 & \text{sen}(\delta) & 0 \\ 0 & \cos(\delta) & 0 & \text{sen}(\delta) \\ -\text{sen}(\delta) & 0 & \cos(\delta) & 0 \\ 0 & -\text{sen}(\delta) & 0 & \cos(\delta) \end{bmatrix}. \quad (2.10)$$

### Ecuación de la matriz para un viaje redondo del haz entre los espejos

La matriz **C** define un viaje de ida y vuelta dentro de la celda. Involucra las matrices vistas anteriormente. Inicialmente se tiene una traslación en la entrada del espejo **M2** hacia el espejo **M1**, que sería la matriz **T** del lado derecho de la ecuación (2.11). Posteriormente el haz incide y se refleja en el espejo **M2** por lo que ahora se requiere la matriz  $r'_2$  que incluye la de rotación **Rot**, con el cambio de dirección del haz se presenta una nueva propagación pero ahora de **M2** a **M1** por lo que al llegar al espejo **M1** incide y se refleja multiplicándose por  $r_1$ . A partir de ahí se inicia un nuevo viaje completo.

$$C = r_1 * T * r'_2 * T. \quad (2.11)$$

### Ecuaciones para las posiciones del haz en los espejos

El vector que contiene la información de la posición de las incidencias y el ángulo de inclinación con en el espejo **M1** está dado por la siguiente ecuación.

$$\text{incidencia M1} = T(d) * r'_2 * T(d) * C^{0.5N-1} * r_0. \quad (2.12)$$

De la misma manera, el vector para determinar la posición de las incidencias en el espejo **M2** antes de que el haz abandone la celda está dada por la siguiente ecuación.

$$\text{incidencia } M2 = T(d) * C^{0.5N-1} * r_0. \quad (2.14)$$

### 2.3.6 Sensibilidad de la celda Herriott.

El uso más habitual de la celda Herriott ha sido en espectroscopia donde se busca generar una mayor densidad de las reflexiones del haz laser en volúmenes pequeños para reducir el tamaño de muestra y aumentar la sensibilidad de medición. Podemos entonces deducir que los cambios en el camino óptico dentro de la cavidad se van sumando generando variaciones angulares y de posición del haz de salida de la celda. En espectroscopia un análisis de espectros del haz de salida permitirá determinar los componentes de la muestra de aire en la celda. Sin embargo, si los cambios del haz de salida son provocados por una alteración física de la celda, es decir, si cambia el radio de curvatura de uno de los espejos o la distancia entre espejos, entonces se modificará el ángulo entre reflexiones descrito en la ecuación (2.1) y en consecuencia el haz de salida cambiará. Por lo tanto, entre mayor sea el cambio de ángulo entre reflexiones mayor será la sensibilidad de la celda pues provocará un cambio mayor del ángulo de salida de la celda. El vector que guarda las características del haz de salida es el descrito en la ecuación (2.14) donde se tendrá una posición de incidencia final y un ángulo de salida final de la cavidad.

Como ya vimos, el número de incidencias en los espejos está determinado por el número de pasos **N**. Estas incidencias tienen el mismo valor de ángulo entre reflexiones consecutivas  $\theta_R$ , y si se tiene un gran número de incidencias y sabemos que la suma de cada avance angular en una sola orbita es igual a  $360^\circ$ , entonces al haber un número grande de incidencias significa que el valor de  $\theta_R$  debe ser pequeño de tal forma que si cambiamos alguno o algunos de los parámetros **d**, **R1** o **R2** veremos un cambio mayor en el ángulo lo que aumentará la sensibilidad de la celda. Esto se explicará con mayor detalle en el siguiente capítulo donde se explicará cómo aprovechar éstas condiciones para medir desplazamientos.

### Bibliografía

- [1]. R.C. Hibbeler., "Mecánica de Materiales," 6<sup>ta</sup> Edición, Ed. Pearson Prentice Hall, pág. 4.
- [2] Herriott D., et al., "Off-Axis Paths in Spherical Mirror Interferometers," Appl. Opt., vol.3 no.4, pp. 523- 526, (1964).
- [3] Herriott, D. R. and Schulte, H., "Folded Optical Delay Lines," Appl. Opt., Vol. 4, No. 8, pp 883-889 (Aug. 1965).
- [4] Hao, L.-Y., et. al., "Cylindrical Mirror Multipass Lissajous System For Laser Photoacoustic Spectroscopy," Rev. Sci. Instrum., Vol. 73, No. 5, pp. 2079-2085 (May 2002).
- [5] Silver J.A., "Simple dense-pattern optical Multipass cells," Applied Optics, Vol.44 No.31, p.6545- 6556, (2005).
- [6] 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).

### 3. SENSOR DE DESPLAZAMIENTO

Una vez descritos las características teóricas fundamentales para diseñar una celda, en éste capítulo veremos la forma de aprovechar éstos parámetros para cuantificar desplazamientos lineales. Se mostrarán simulaciones del cambio de posición de los puntos que forman el patrón en la celda, el ángulo entre reflexiones dentro de la celda y del ángulo de salida de la celda. El entendimiento del comportamiento de éstos valores a cambios físicos de la celda evidenciarán su viabilidad para usarse como transductor de desplazamiento.

#### 3.1. Diseño de celda Herriott como transductor de desplazamiento.

Hemos visto en las ecuaciones (2.1), (2.2) y (2.3) del capítulo anterior, los factores involucrados en la formación de los patrones dentro de la celda, los cuales, repercuten directamente en la sensibilidad de una cavidad tipo Herriott, así como en el valor del ángulo y posición de salida del haz en la celda. Dichos parámetros son variables físicas que dependen directamente de las dimensiones y la disposición de la celda. Es por ello que vamos a estudiar los parámetros controlables de la celda y ver su influencia sobre el número de puntos que forman el patrón de incidencias en los espejos y el ángulo de salida del haz.

##### 3.1.1 Ángulo entre reflexiones en función de la separación entre espejos.

Ya se han descrito los parámetros que determinan el funcionamiento de una celda Herriott de espejos cilíndrico los cuales son en su mayoría geométricos por lo que vamos a empezar conociendo el efecto de variar la distancia entre espejos en relación al ángulo entre reflexiones que es el valor que determina el número de puntos que se alcanzarán a formar en el patrón de incidencias y que por ende repercutirá en el haz de salida de la celda .

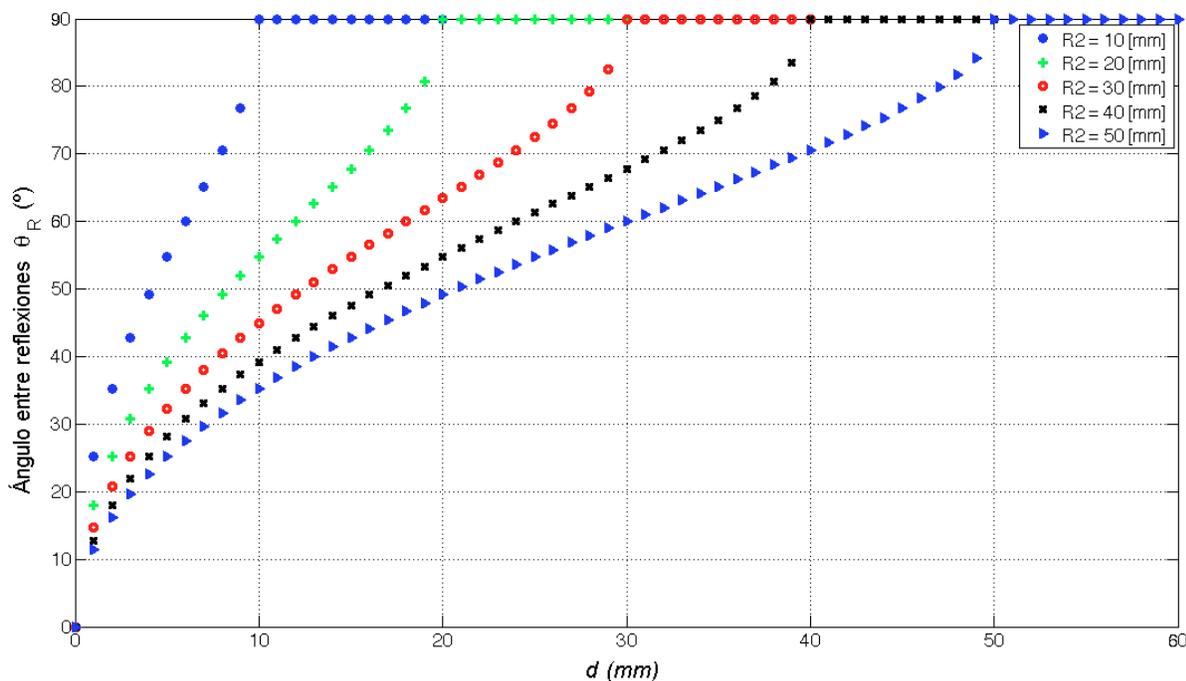


Fig. 3.1. Curva del ángulo entre reflexiones en función de la distancia  $d$  para diferentes valores de  $R$ .

Como se puede ver en la Fig. 3.1. se simularon diferentes valores de radio de curvatura y se realizaron aumentos progresivos del valor de la distancia entre espejos con intervalos de 1 mm. Puede verse que cuando el valor de la distancia va aumentando, también el valor del ángulo de reflexión crece, sin embargo, cuando la distancia es igual al radio de curvatura el valor del ángulo es  $\theta_R = 90^\circ$ , es decir, se vuelve inestable por lo que dejan de haber reflexiones en la cavidad lo que va de acuerdo al criterio de estabilidad de la celda (Ver ecuación 2.4). También puede verse en el grafico que los radios de curvatura pequeños tienen una mayor sensibilidad a la variación de la distancia puesto que el ángulo de reflexión varía más. Entonces, pensando en aumentar la sensibilidad del sensor de desplazamiento, podemos concluir que la distancia inicial que debe haber entre los espejos sería la que logre un número pequeño de ángulo entre reflexiones  $\theta_R$  lo cual podemos ver que ocurre cuando la curva esta con una mayor inclinación a distancias  $d$  en el orden de la mitad del valor de radio de curvatura y por debajo de estas.

### 3.1.2 Principio de funcionamiento de sensor de desplazamiento.

Si nosotros queremos utilizar la celda como sensor de desplazamiento, la forma más práctica de generar un dispositivo sería fabricar una celda con la distancia entre espejos fija, que como ya vimos en el apartado anterior, conviene que sea cercana al valor de radios de curvatura para aumentar su sensibilidad, y a partir de ahí modificar el radio de curvatura de uno de los espejos mediante la aplicación de una fuerza externa. La fuerza aplicada generará desplazamientos en la celda que se verán reflejados en un aumento del radio de curvatura del espejo. Analizaremos como afecta dicho aumento del radio de curvatura en relación al haz láser que viaja dentro de la cavidad y la forma en la que podemos aprovechar dichas afectaciones para determinar la magnitud del desplazamiento ocurrido. Ahora bien, el hecho de que el radio de curvatura del espejo aumente un cierto valor denotado por  $\delta R_2$  provoca de forma indirecta que en la misma proporción la distancia entre los espejos disminuya un valor de  $\delta d$ , por lo que podemos renombrar este efecto con la variable  $\delta D$  con la que se entiende que:

$$\delta D = \delta R_2 = -\delta d, \quad (3.1)$$

como puede verse en la Fig. 3.2.

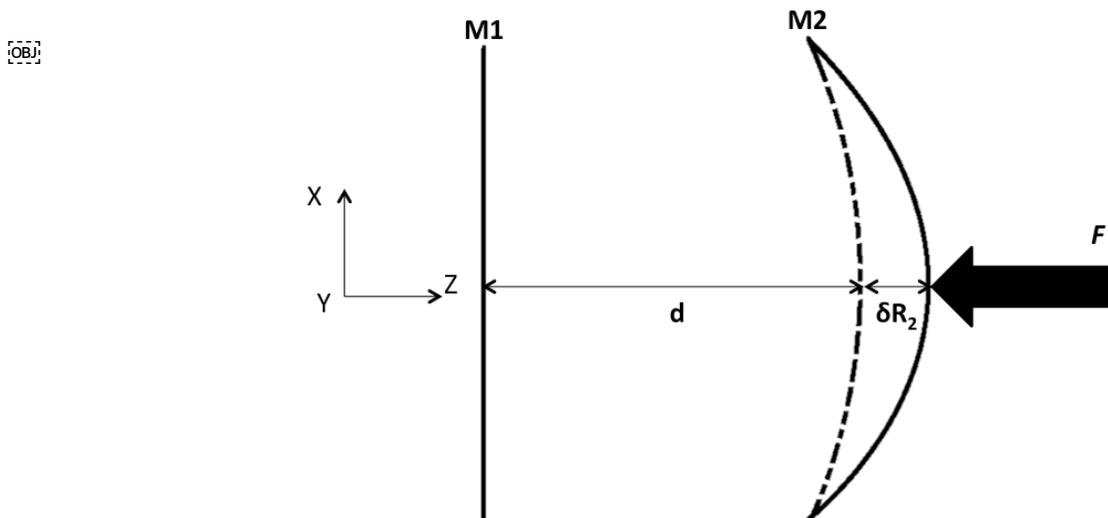


Fig. 3.2. Vista superior de la celda aplicando fuerza.

Como podemos ver en la Fig. 3.2. el espejo **M1** en vista superior se dibuja como una línea recta ya que la curvatura del espejo en éste caso se alinea con el eje **Y** por la rotación de  $90^\circ$  entre los espejos. También puede verse en la figura que la fuerza que se aplica no está distribuida sino que es puntual, el criterio que se tomó para trabajar de ésta forma se verá a detalle en el apartado 3.2 de éste capítulo. Por ahora para la simulación del sensor, basta con suponer que la fuerza aplicada genera un cambio uniforme del radio de curvatura.

Retomando el método matricial, el cual como ya se dijo, brinda información de la posición de cada punto de incidencia del haz en cada espejo, vamos a simular el cambio de posición de uno de éstos puntos de incidencia en el espejo **M2** conforme se modifica el radio de curvatura del espejo **M2** y la distancia entre espejos **d**.

### 3.1.3 Cambio de posición del patrón de incidencia.

Sabemos que el método matricial involucra un vector con la información de la posición en el plano **XY** de cada punto así como el valor de la inclinación que tiene al reflejarse en los espejos. Los puntos que se forman y dan lugar al patrón de incidencias, guardan distancias muy cercanas uno del otro, dicha posición depende del ángulo entre reflexiones por lo que si se modifica éste por un cambio en los radios de curvatura y distancia entre espejos  $\delta D$ , se verán afectados todos los puntos del patrón, es por ésta razón que para simplificar el análisis solo se simuló el primer punto de incidencia en el espejo **M2** probando con varios radios de curvatura y variando en la misma proporción la distancia entre espejos y el radio de curvatura de **M2**. Se ha decidido para la simulación que el valor de radio de curvatura para cada caso aumente un valor máximo de 10 mm con intervalos de 0.1 mm que será en proporción el mismo valor que disminuirá la distancia **d** entre espejos, también, el valor de la distancia entre espejos se ha fijado a un valor igual a la mitad del radio de curvatura para cada caso.

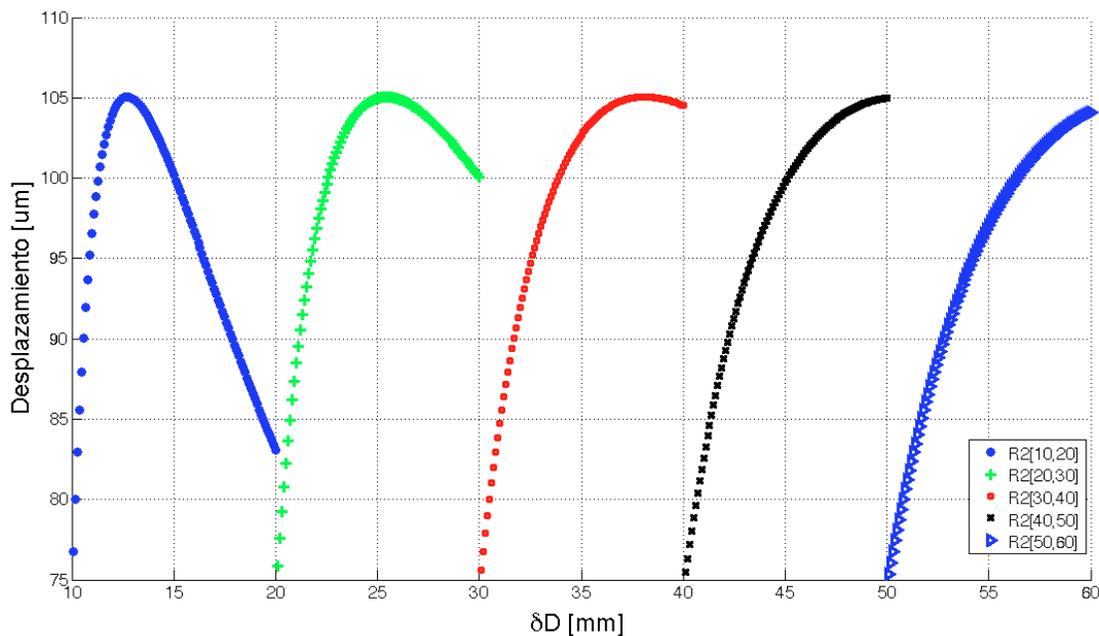


Fig. 3.3. Desplazamientos iguales para  $R_2 = 10, 20, 30, 40, 50$  mm,  $R \approx d$ .

Podemos observar que la sensibilidad, es decir, el cambio de posición del punto que da lugar a un desplazamiento del mismo, es mayor en la región cercana al radio de curvatura de  $M2$  y que de manera comparativa, es mayor la sensibilidad a radios de curvatura menores. Se puede observar en el eje de las abscisas que para cada caso se parte del valor inicial de radio de curvatura que es donde todavía no se ha generado ninguna deformación del espejo  $M2$  y a partir de ahí va en aumento el valor del radio de curvatura y en la misma proporción la distancia  $d$  disminuye.

Eventualmente se observa que después de un determinado aumento del radio de curvatura original para cada caso, los desplazamientos comienzan a disminuir. Esto es importante por que podemos entender que bajo ésta configuración el sensor de desplazamiento propuesto tendría un rango particular de medición dependiendo del valor de radio de curvatura original.

### 3.1.4 Número de incidencias en $M2$ .

Como ya sabemos, las celdas de camino óptico largo permiten obtener un gran número de reflexiones internas a lo largo de la cavidad, dichos “pasos” son determinados con el número  $N$  por lo que si queremos observar 4 puntos de incidencia en el espejo  $M2$  se deberá tener un número de pasos igual a  $N = 8$  mientras que con éste mismo número de pasos en el espejo  $M1$  solo veremos 3 puntos de incidencia ya que un paso es el correspondiente al haz de entrada por el orificio en  $M1$  y otro es el que se obtiene previo a la salida de la celda, lo cual como ya sabemos se llevará a cabo por el mismo orificio o puerto de entrada.

Puesto que nuestro espejo observable será  $M2$  la ecuación (2.3) puede modificarse para que ahora calculemos solo el número de incidencias en dicho espejo. El número de orbita  $M$  será igual a 1.

$$N = \frac{\pi}{\theta_R}. \quad (3.2)$$

Es posible simular las condiciones para que mientras se varía la distancia  $d$  entre los espejos podamos ver como se modifica el número de incidencias en el espejo  $M2$ .

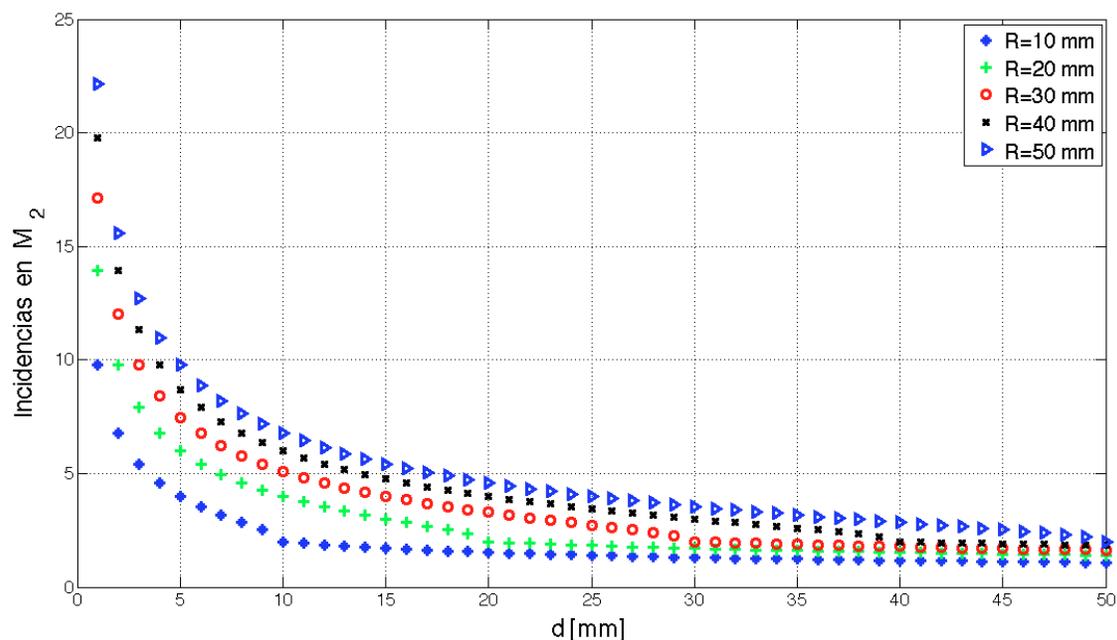


Fig. 3.4. Curvas del número de puntos en  $M2$  para diferentes valores de  $R$  variando  $d$ .

Puede verse en la Fig. 3.4. que el número de puntos de incidencia en el espejo  $M2$  aumenta conforme la distancia  $d$  disminuye. Se había mencionado en la Fig. 3.1. que la distancia entre espejos que permite una mayor sensibilidad se encuentra a distancias a un valor medio del radio de curvatura de los espejos y por debajo de este. Vemos en la Fig. 3.4 que el número de puntos es muy bajo con una distancia casi igual al radio de curvatura para cada caso.

### 3.1.5 Ángulo de salida.

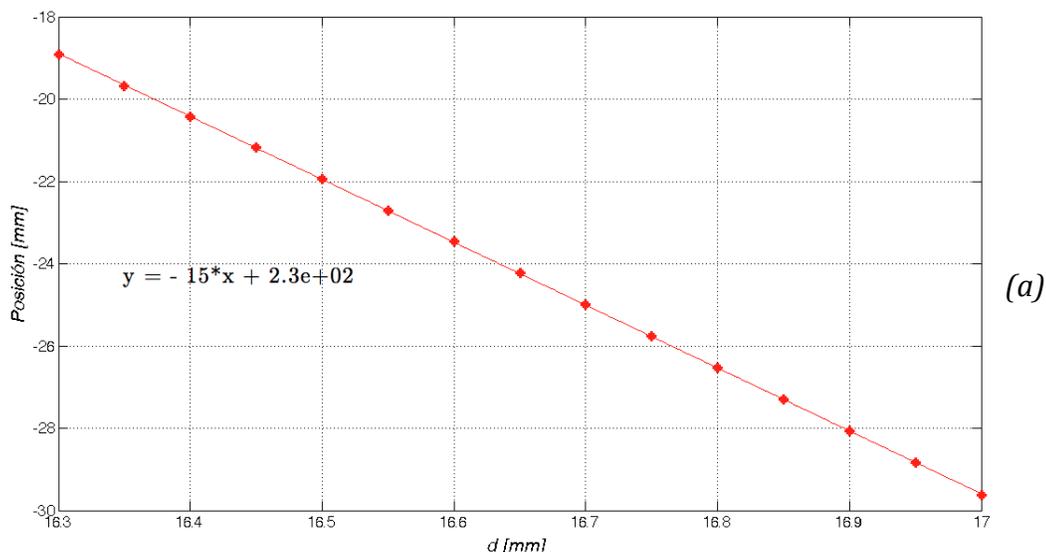
Ahora bien, independientemente del número de  $N$ , mientras se cumplan las condiciones de estabilidad para la reentrada del haz en la celda, lo que podremos medir es el haz de salida por lo que es conveniente seleccionar un caso de estudio donde podamos analizar los cambio del haz de salida, tanto en su posición de salida como el ángulo de salida, cuando se modifica la distancia entre espejos y el radio de curvatura de  $M2$ .

Para la simulación se escogieron los siguientes parámetros debido a que en la manufactura, un espejo de 30 mm resulta sencillo de fabricar y como hemos visto, una distancia entre espejos cercana a la mitad del radio de curvatura de  $M2$  permite un buen número de incidencias, además, estas dimensiones de la celda son las que finalmente se fabricaron para las pruebas experimentales.

Tabla 1. Parámetros de simulación de celda para el cálculo del ángulo de salida.

Parámetros físicos de la celda	Ángulos	Pasos	Rangos de deformación
$R1 = R2 = 30$ [mm].	$\delta = 90$ [°].	$N = 8$ .	$\Delta R_2 = 700$ [μm].
$d = 17$ [mm].	$\beta = 7$ [°].	$M = 1$ .	$\delta R_2 = 50$ [μm].

Inicialmente el valor de los radios de curvatura será igual a 30 [mm], la distancia entre ellos será un valor cercano a la mitad del de los radios, estarán rotados uno respecto del otro un valor de 90° lo que permitirá tener un número de pasos  $N = 8$  en la celda con una órbita  $M = 1$ . Tendrá un ángulo de entrada  $\beta = 7^\circ$  y se deformará un rango de  $\Delta R_2 = 700 \mu\text{m}$  con avances  $\delta R_2 = 50 \mu\text{m}$ . Vamos a analizar primero el cambio de posición que tendrá el haz de salida bajo éstas condiciones antes de abandonar la celda, es decir, la última posición del haz que incide en  $M2$  antes de salir de la celda que podemos encontrar usando la ecuación (2.14) .



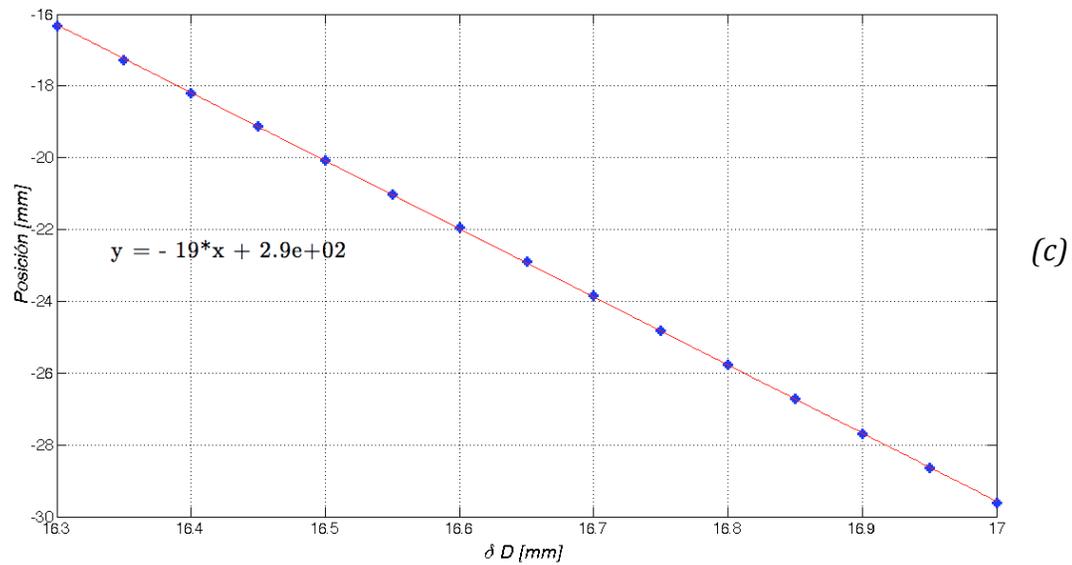
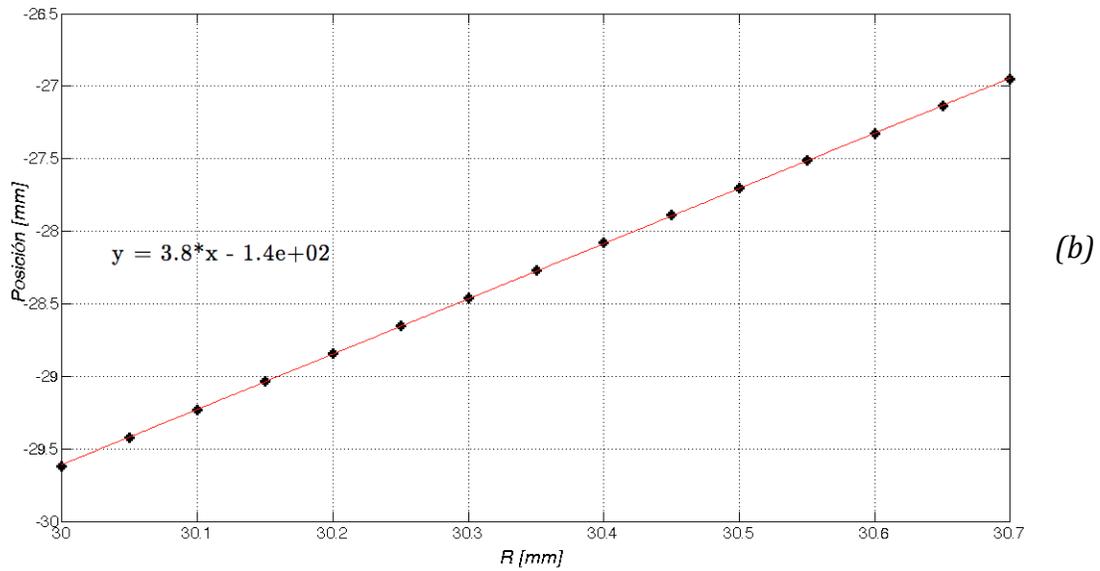


Fig. 3.5. Cambio de posición del último punto de incidencia en M2 para diferentes valores de  $R$  y  $d$ .  
(a) Cambio de posición del último punto de incidencia en M2 variando únicamente la distancia entre espejos  $d$ .  
(b) Cambio de posición del último punto de incidencia en M2 variando únicamente el radio de curvatura  $R_2$  manteniendo la distancia  $d$  constante.  
(c) Cambio de posición del último punto de incidencia en M2 con los dos efectos sumados, aumento del radio de curvatura  $R_2$  y disminución proporcional de la distancia  $d$  entre espejos..

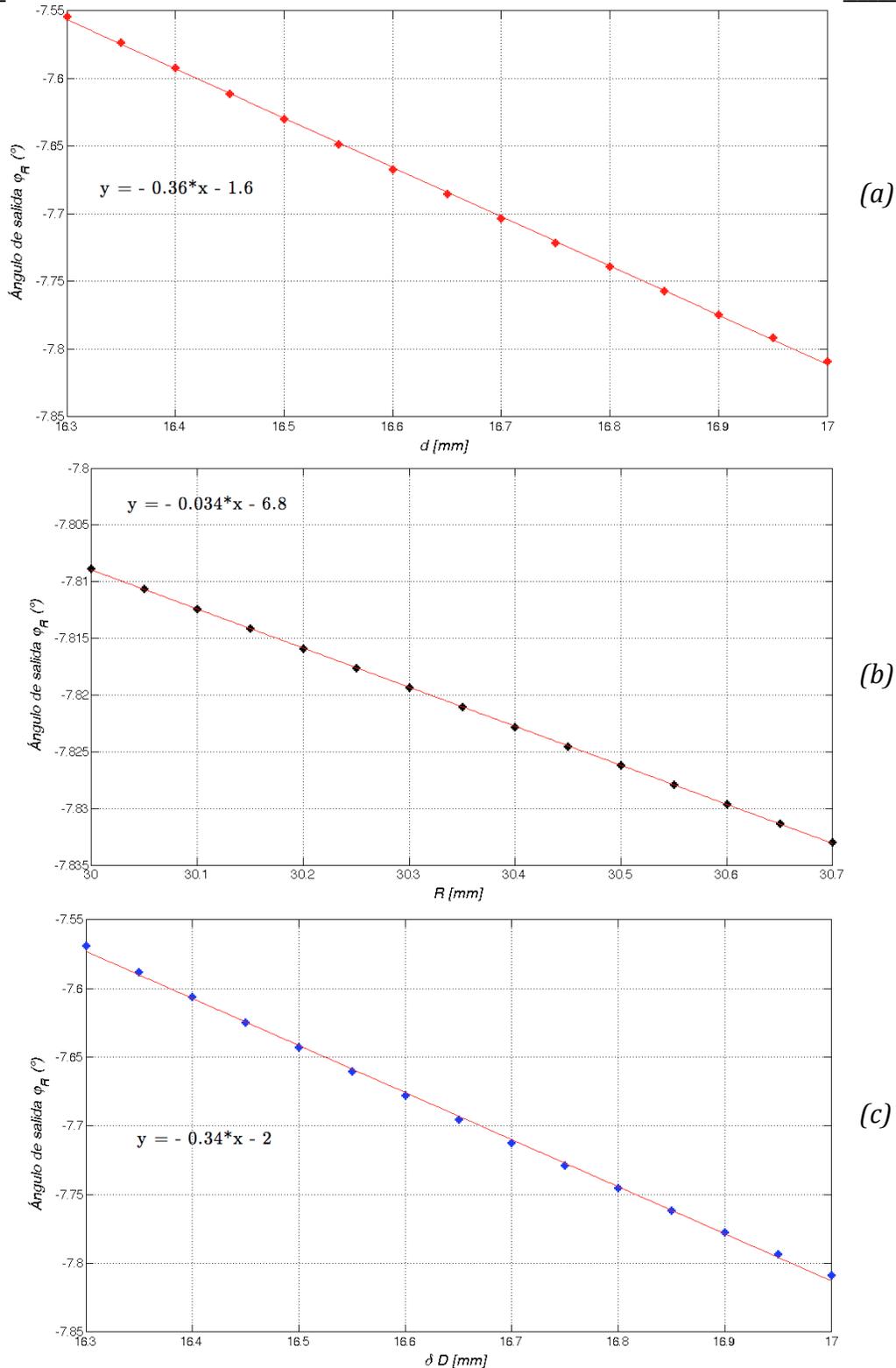


Fig. 3.6. Cambios en el ángulo se salida del último punto de incidencia en M2 para diferentes valores de R y d.

(a) Cambio del ángulo de salida variando únicamente la distancia entre espejos d.

(b) Cambio del ángulo de salida variando únicamente el radio de curvatura R2 manteniendo la distancia d constante.

(c) Cambio del ángulo de salida con los dos efectos sumados, aumento del radio de curvatura R2 y disminución proporcional de la distancia d entre espejos..

Podemos ver en la Fig. 3.5. tres casos de estudio denotados por las leras *(a)*, *(b)* y *(c)* donde en el primer inciso se ha simulado el cambio de posición del haz de salida en su última incidencia en **M2** previo a la salida del haz mientras disminuimos la distancia entre espejos **d**. Podemos ver en el caso de la Fig. 3.5. *(a)* que la pendiente tiene un valor de -15. En el siguiente caso, *(b)*, la distancia entre los espejos se mantiene constante y lo que modificamos es el radio de curvatura de **M2**, esto resulta muy complicado a nivel experimental ya que conforme se modifica el radio sería necesario re ajustar la distancia entre espejos para mantenerla constante y vemos en la simulación que en éste caso la pendiente tiene un valor muy inferior al caso *(a)* apenas de 3.8. Por último tenemos el caso *(c)* donde los dos efectos se ven simultáneamente, un aumento en el radio de curvatura y una reducción de la distancia entre espejos. Podemos ver en la simulación que la pendiente en éste caso es superior a los dos casos anteriores con un valor de -19. Esta claro entonces que tiene un mayor efecto trabajar con los dos efectos al mismo tiempo y que de hecho a nivel experimental es más sencillo trabajar de ésta forma.

Los cambios en el ángulo de salida  $\phi_R$  pueden verse en la Fig. 3.6. donde también se tienen tres casos de estudio con las mismas condiciones que en la Fig. 3.5. Podemos ver que el ángulo cambia más cuando se modifica el valor de la distancia entre espejos, no cuando se combinan los dos efectos de aumento de radio y disminución de distancia entre espejos como en el caso anterior, sin embargo, las pendientes de la Fig. 3.6. *(a)* y *(c)* son muy cercanas. Tanto en la Fig. 3.5 y la Fig. 3.6 la pendiente es pequeña cuando solo modificamos el radio de curvatura manteniendo la distancia entre espejos fija. Puesto que a la salida de la celda nosotros podremos observar el cambio de ángulo  $\phi_R$  y dado que éste cambia más cuando se modifican distancia entre espejos y radio de curvatura de **M2** ésta será la configuración principal para el sensor de desplazamiento, teniendo inicialmente una distancia entre espejos que nos permita un número determinado de puntos de incidencia en el espejo **M2** (por ejemplo 4) y a partir de ahí aplicar una fuerza para deformar el radio de curvatura que genere un cambio en posición y ángulo del haz de salida.

### 3.2. Diseño mecánico.

Ya se han encontrado las características de funcionamiento del sensor de desplazamiento con base en la celda Herriott de espejos cilíndricos. Ya se estableció que el espejo **M2** sufrirá una deformación del radio de curvatura y que deberá ser uniforme en todo el espejo. Ahora estudiaremos el diseño mecánico que efectivamente logré una deformación uniforme del espejo y los aditamentos necesarios para el montaje experimental.

#### 3.2.1 Diseño de los espejos que conforman la celda.

Como se ha mencionado, una necesidad para poder utilizar la celda como transductor de desplazamientos, es que el espejo **M2** se deforme de manera significativa y que ésta deformación sea uniforme en todo el radio de curvatura, simulando de ésta forma, como si se estuviesen utilizando espejos de diferentes radios de curvatura.

Con base en lo anterior, se exploró el diseño de espejos deformables mediante simulaciones en Solidworks® para entender cuales son las propiedades más adecuadas para el diseño.

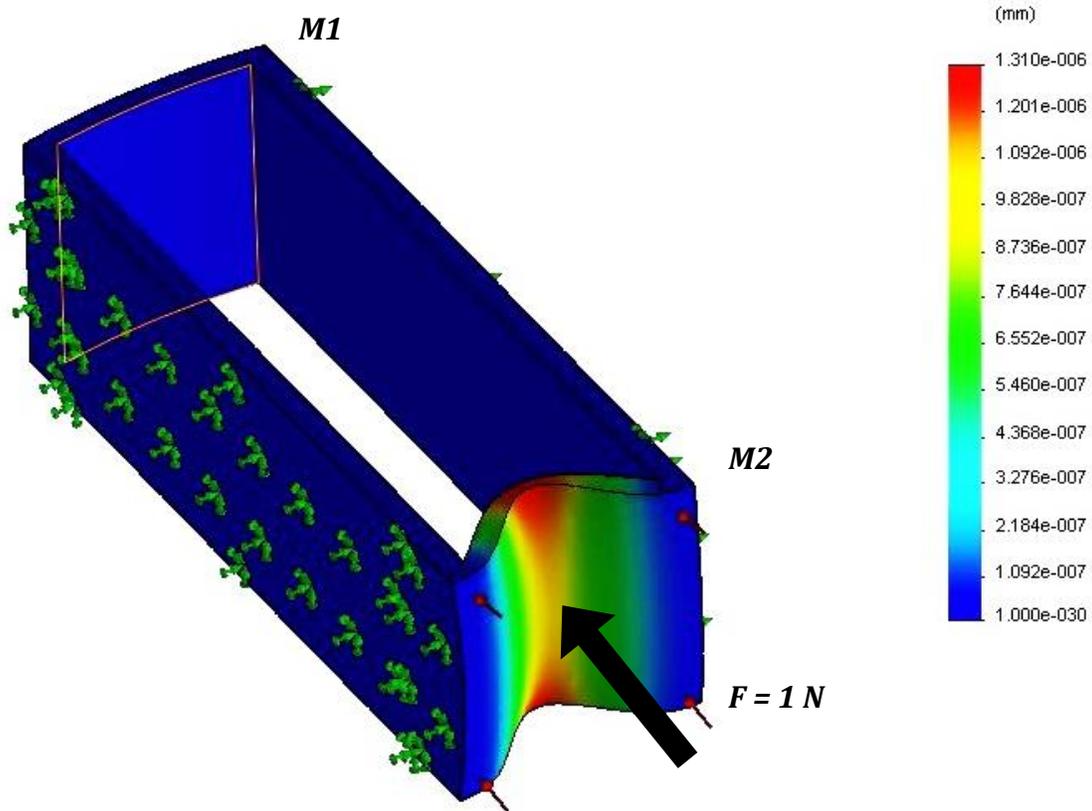


Fig. 3.7. Estructura básica de la celda tipo Herriott.

Como podemos ver en la Fig. 3.7. la estructura general de una celda tipo Herriott está compuesta por dos espejos rotados  $90^\circ$ . Para este ejemplo la celda está formada en una sola pieza de acrílico. El acrílico es uno de los materiales más usados en óptica y uno de los que se tiene mayor conocimiento de sus propiedades. Además, se ha comprobado la utilidad de realizar depósitos de metal en éste material logrando buenos acabados para usarse como superficie reflejante. Es por ello que para las simulaciones se utilizó dicho material pensando eventualmente en su fabricación dentro del laboratorio. Regresando a la figura, podemos ver que en el espejo **M2** es aplicada una fuerza de 1 N y que la celda está sujeta en los lados laterales. El resultado es que el espejo se deforma sin uniformidad, los colores indican las zonas dónde se deforma más el material y es notorio que el espejo no cambia uniformemente en su radio de curvatura. Cabe mencionar que el programa exagera las deformaciones con el fin de tener una mejor apreciación visual aunque en realidad la deformación máxima (color rojo) no supera los 1.31 nm debido a la fuerza tan pequeña con la que se simuló la celda. Sin embargo, es suficiente para entender que de ésta manera la deformación no será uniforme en todo el espejo.

### 3.2.2 Análisis de esfuerzos con fuerza distribuida.

Debido a que en la simulación previa es evidente que la deformación generada en el espejo no es uniforme en toda la superficie al aplicar una fuerza se diseñó un artefacto que por su geometría distribuyera la fuerza en toda el área en contacto para lograr la misma deformación en todo el espejo.

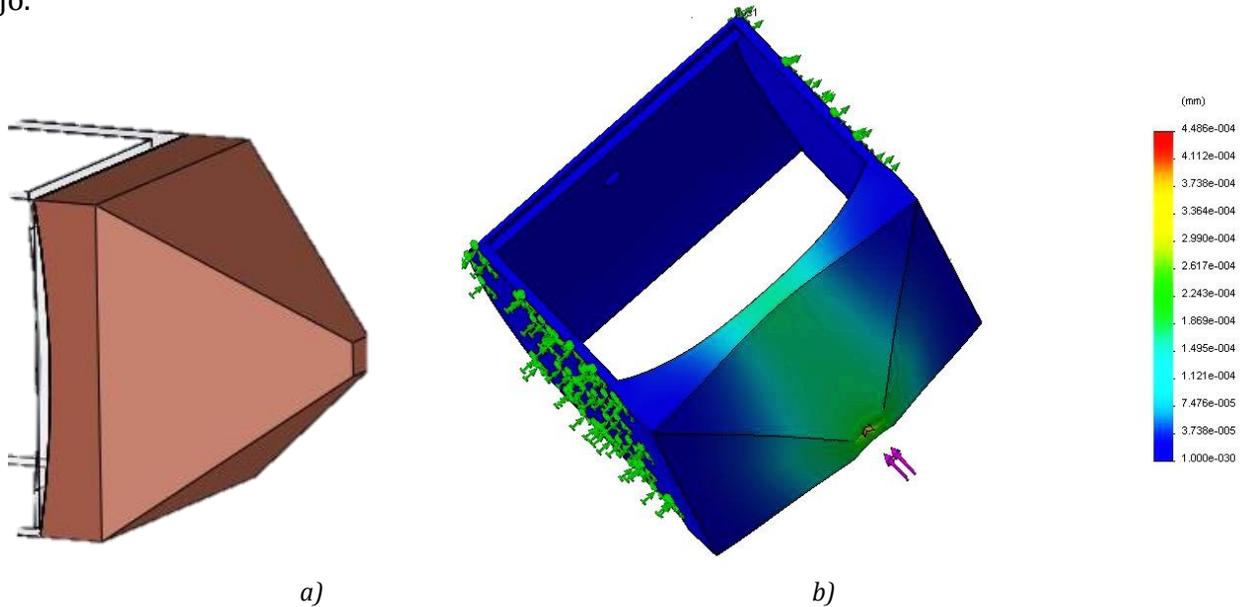


Fig. 3.8. (a) Imagen del objeto para distribuir la fuerza. (b) Simulación de la celda con el objeto para distribuir la fuerza al aplicar una fuerza puntual en la parte superior del objeto.

Como se ve en la Fig. 3.8. el objeto colocado en la simulación tiene una forma “piramidal” con la curvatura del espejo en la base. El material bajo el cual se simuló es de cobre. Está colocado encima de la superficie del espejo **M2** y en la parte superior tiene un área plana para aplicar una fuerza puntual. Puede verse en los resultados de la simulación, Fig. 3.8. b), aplicando nuevamente 1 N de fuerza, que el objeto colocado atenúa la fuerza de tal forma que se genera muy poca deformación en el espejo, logrando una deformación máxima en la simulación de 336 nm muy por arriba de la Fig. 3.7. y ésta deformación no se presenta en el espejo si no en el objeto colocado. En realidad lo que se deforma el espejo es un máximo de 149.5 nm.

### 3.2.3 Análisis de esfuerzos con fuerza puntual.

Hasta ahora hemos visto que se decidió simular los esfuerzos en el espejo bajo una fuerza distribuida utilizando un objeto que la propagase uniformemente sobre todo el espejo, sin embargo, los resultados obtenidos indican que dicha configuración es poco funcional por lo que se decidió realizar nuevas simulaciones pero ahora sin ningún objeto intermediario, además, también se decidió que a nivel de manufactura, fabricar la celda en una sola pieza resulta complejo y poco práctico pues por un lado lograr un vaciado del material donde las partes internas del cubo tengan radios de curvatura y que además dichos radios tengan una rotación entre ellos de 90° resulta imposible para las maquinas de CNC y fresado convencionales y por otro lado, incluso si se lograra fabricar la celda en una sola pieza, se requiere después realizar un

depósito de material que genere la superficie reflejante. Los métodos disponibles para realizar dicho depósito son el método de evaporación de material en una campana al vacío y el método de erosión catódica también llamada “sputtering”. En ambos casos se requiere espacio libre para colocar el material en la superficie pulida que actuará como espejo, lo cual sería imposible en una celda fabricada en la misma pieza ya que el depósito de material debería de ser colocado en la curvatura interna de los espejos ya que al aplicar una fuerza, si el depósito se hiciera externamente, al entrar en contacto con cualquier objeto se correría el riesgo de arrancar el material depositado. Es por todo esto que se tienen que fabricar los espejos por separado y luego unirse para formar la celda.

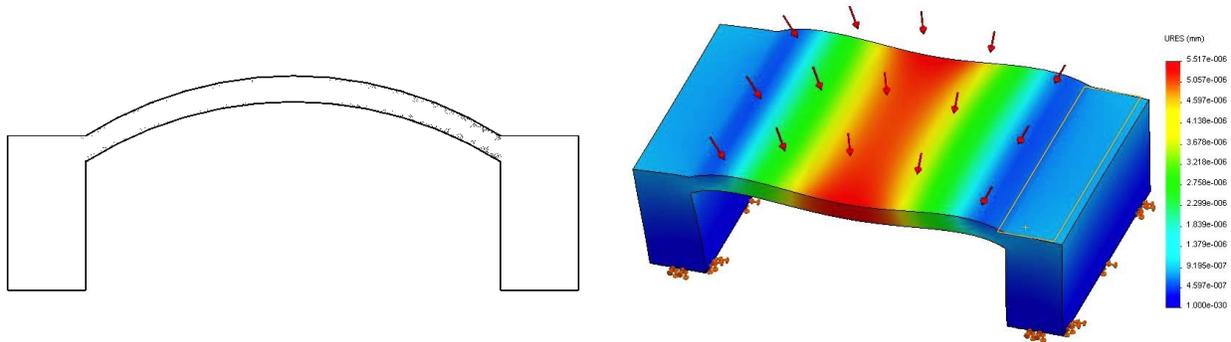


Fig. 3.9. Simulación mecánica de uno de los espejo de la celda.

Podemos ver en la Fig. 3.9. uno de los espejos de la celda en material de acrílico con 1 [mm] de espesor, al cual se le aplica 1 N de fuerza. La deformación en la parte central del espejo es más uniforme dejando fija la base del espejo. Ésta deformación uniforme (color rojo) está distribuida sobre un solo eje del espejo con un valor máximo de 5.52 nm.

El perfil del espejo permite ser fabricado en una placa de acrílico por mediante una máquina de chorro de agua con la cual cuenta el CCADET y posteriormente realizar el depósito de metal. El método seleccionado para realizar el depósito fue el método sputtering por que resultó ser el más rápido de utilizar para generar la superficie reflejante.

Se fabricaron los primeros prototipos y se realizaron pruebas destructivas sobre los espejos llegando a la falla del material con apenas 3.7 mm de deformación en el radio de curvatura.



Fig. 3.10. Fabricación de uno de los espejo de la celda.

Como puede verse en la Fig. 3.10. se fabricó el espejo *M2* y se unió a una estructura de apoyo fijada en una base para realizar las primeras pruebas de deformación. La deformación se logró usando un tornillo micrométrico colocado en la cara externa del espejo en la parte central de la superficie. Se encontró que el material fallaba pues al estar fijo en la parte lateral de la estructura, los esfuerzos se concentraban totalmente en la curvatura del espejo generando la ruptura del material. Dicha situación resultó ser un inconveniente pues no solo reducía el rango bajo el cual el espejo podía ser deformado si no que también requería una mayor fuerza para deformar el espejo, reduciendo la sensibilidad que el sensor puede llegar a tener. Fue necesario rediseñar el espejo y la estructura que lo sostiene para solucionar éstos problemas.

### 3.2.4 Diseño final de espejo.

Se hizo un rediseño del espejo considerando lo aprendido en las simulaciones previas y en las pruebas mecánicas hechas con el primer prototipo. Se descubrió un aspecto clave en el perfil del espejo en relación a su funcionamiento ya que la forma de la curvatura en los puntos de apoyo podía generar concentración de esfuerzos o bien distribuirlos en toda la curvatura del espejo (Ver Fig. 3.10.).

También resulto conveniente que al aplicar una fuerza para deformar el espejo, éste se desplazara libremente perpendicular a la dirección de la fuerza para que los esfuerzos se concentraran al mínimo por lo que se hizo un rediseño de la estructura que sujeta al espejo (Ver anexo A) de tal forma que el espejo estuviese dentro de una cavidad donde pudiera deslizarse libremente para que los esfuerzos no se concentraran totalmente en la parte central del espejo.

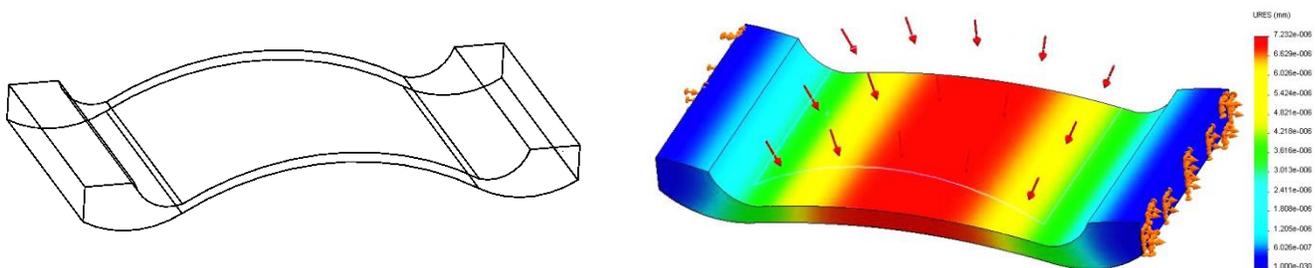


Fig. 3.11. Diseño mecánico de los espejos

Como puede verse en la Fig. 3.11, después de varias pruebas se decidió darle un perfil curvo en las orillas de los espejos pues se encontró que de ésta forma se evita la concentración de esfuerzos permitiendo aumentar el rango de deformación del espejo antes de llegar a la fractura. En la misma figura también tenemos un ejemplo de las pruebas de elemento finito bajo una carga que resulta en una deformación uniforme del radio de curvatura cerca del eje óptico del espejo. Esto resulta conveniente pues evita el uso de un intermediario entre la fuerza aplicada y el espejo que distribuya dicha fuerza.

A continuación se presenta el espejo fabricado prototipo que se utilizó para las pruebas. Podemos ver en la Fig. 3.12 (a) que el depósito de plata genera una buena superficie reflejante permitiendo ver la imagen de la cámara con la que se obtuvo la foto. En la Fig. 3.12 (b) vemos el perfil del espejo con un espesor de 1 mm cortado con chorro de agua.



Fig. 3.12. Espejos fabricados en acrílico con depósito de plata, (a) depósito de plata y (b) perfil del espejo.

Para demostrar que el diseño del espejo permite una deformación uniforme aunque la fuerza aplicada no sea distribuida se realizó una sencilla prueba que permite visualizar de manera muy clara el funcionamiento del espejo deformable.



Fig. 3.13. Espejo de acrílico previo a ser pulido y realizar depósito, (a) espejo sin deformar, (b) espejo totalmente deformado.

Podemos ver en la Fig. 3.13. (a) que el espejo no tiene el depósito de metal por lo que fue posible manipularlo sin preocuparnos por no rayar la superficie reflejante (parte inferior), se ha tomado la foto permitiendo ver que el punto dónde se aplicará una fuerza parcialmente puntual usando un dedo, no está centrado en la superficie del espejo y en la Fig. 3.13. (b) podemos ver que dicha condición no impide que el espejo se deforme de manera uniforme siempre y cuando los extremos del espejo tengan libertad de desplazarse. Esta cualidad de desplazarse sumada al perfil del espejo, permiten deformaciones totales sin llegar a la fractura del material por lo que resulta ideal para realizar pruebas.

### 3.3. Integración del detector al sensor de desplazamiento.

Recordando el principio de funcionamiento del sensor de desplazamiento con base en la celda Herriott, se aplicará una fuerza puntual en el centro de la superficie del radio de curvatura  $R_2$  del espejo  $M_2$  que generará desplazamientos lineales en dirección al eje óptico de la celda. Dichos desplazamientos serán iguales al aumento de radio de curvatura  $\delta R_2$  y cambiarán el patrón de incidencia del haz en la celda, el camino óptico recorrido y por ende el haz de salida. Debido a que

el haz de salida cambiará su posición y el ángulo con el que viaja, es necesario cuantificar dichos cambios a fin de determinar la magnitud del desplazamiento ocurrido.

Puede verse en la Fig. 3.14. que el cambio angular del haz  $\delta\phi_R$  de salida genera un cambio lineal  $\delta d_p$  perpendicular al eje óptico, el cual podemos proyectar en una pantalla a una distancia  $D$ .

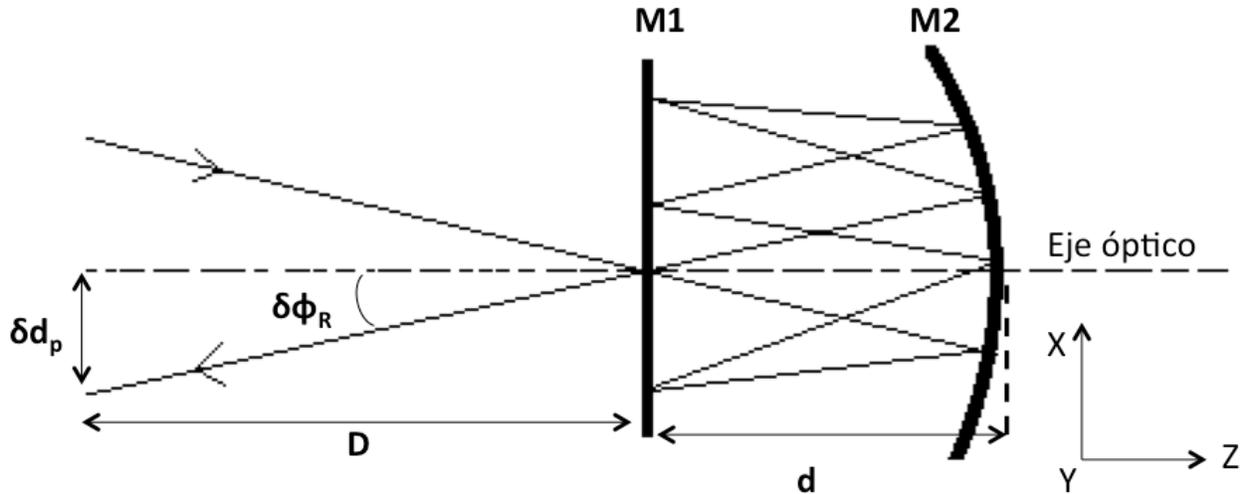


Fig. 3.14. Relación del desplazamiento lineal con el desplazamiento angular.

La figura anterior muestra la manera en que un desplazamiento angular da lugar a un desplazamiento lineal proyectado a una distancia  $D$ . Entonces, matemáticamente podemos encontrar la siguiente relación:

$$\delta d_p = D * \tan(\delta\phi_R). \quad (3.3)$$

Es posible entonces cuantificar la deflexión angular del haz de salida midiendo pequeños desplazamientos lineales del haz los cuales podemos medir con un detector colocado perpendicularmente al eje óptico de la celda para cuantificar el desplazamiento del haz de salida. De la ecuación (3.3), vemos que conforme aumenta la distancia  $D$  el cambio en los desplazamientos lineales será mayor.

Puesto que se está usando un láser a 633 nm de longitud de onda, es conveniente el uso de un fotodetector en el campo visible que convierta la luz en una señal eléctrica de corriente o voltaje y de ésta forma realizar la detección y cuantificación del haz de salida de la celda.

### 3.3.1. Detección fotométrica de la señal.

Dentro de la gama de detectores ópticos podemos encontrar aquellos que son capaces de cuantificar la posición del spot de luz que incide en su área sensible como son: pantallas CCD, detectores de cuadrante (4QD) y detectores de efecto lateral. Cada uno tiene ventajas y desventajas que pueden verse en la siguiente tabla.

Tabla 2. Tabla comparativa entre detectores disponibles.

Nombre	PRINCIPIO DE OPERACIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS	RANGO	RESOLUCIÓN	Referencia
 Pantalla CCD lineal LC100	Efecto fotoeléctrico, arreglo de detectores (pixeles) que al incidir luz en ellos generan carga eléctrica que se almacena en condensadores generando diferentes voltajes.	Implementación sencilla, software integrado.	Rango de medición pequeño, saturación rápida de los pixeles, Dimensiones del dispositivo muy grandes. Rango de medición muy pequeño.	18mm dependiendo del modelo	0.1µm dependiendo del modelo	Modelo LC100, Thorlabs
 Detector de cuadrante QD	Efecto fotoeléctrico, conjunto de cuatro fotodiodos individuales con el mismo sustrato en común. La parte segmentada son los ánodos y la parte trasera del dispositivo es el cátodo.	Alta resolución, Económico.	Se requiere acondicionamiento de las señales de salida, el spot del haz no localiza los cuatro sectores del sensor el error en la medición aumenta.	10mm dependiendo del modelo	0.1µm dependiendo del modelo	Modelo SPOT-9D, Optoelectronics
 Detector de efecto lateral	Efecto fotoeléctrico, consiste en un sólo fotodiodo que tiene dos capas resistivas en cada lado del fotodiodo con contactos en los extremos. En total son extremos que generan corriente al incidir luz en el detector.	Buena resolución, sensible en toda el área del detector, económico.	Se requiere acondicionamiento de las señales de salida, el rango de medición es pequeño y el tamaño del dispositivo limita su integración a la celda.	2mm dependiendo del modelo	0.5µm dependiendo del modelo	Modelo DLS-2, Optoelectronics

De primera intención se podría pensar en utilizar algún sensor de posición de los mencionados en la Tabla 2, sin embargo, como se ha estudiado, el comportamiento del haz de salida del sensor de desplazamiento se ve por los cambios angulares a razón de la deformación del radio de curvatura  $M2$ . Dichos cambios de posición son muy notorios conforme se aleja de la salida de la celda, pero en un campo cercano, los cambios llegan a ser inferiores a la micra, por otro lado, se busca un diseño integrado por lo que colocar el detector lo más cerca de la salida del sensor de desplazamiento es algo indispensable.

Ya se ha dicho que el sensor de desplazamiento tiene solo un puerto o punto de entrada y salida del haz por lo que colocar un detector muy cercano a la salida tiene una limitante y ésta es que no debe impedir o bloquear la entrada del haz a la celda. Las dimensiones de los detectores comerciales considerados para ésta parte restringen la proximidad a la que pueden ser colocados antes de que obstruyan la entrada de luz y por otro lado si se colocan relativamente lejos de la salida del sensor, el rango de medición se ve reducido pues el área sensible de los detectores es muy pequeña.

Existe un detector de potencia de la marca Thorlabs® modelo PM100D que tiene un fotodetector con acoplamiento a fibra óptica el cual por sus dimensiones permite que sea colocado muy próximo a la salida del sensor de desplazamiento ya que la cabeza del detector tiene apenas 5 [mm] de diámetro. La única aparente desventaja es que al ser un detector de potencia no proporciona información de la posición del haz que incide en su área sensible y dado que a la distancia más cercana permitida a la salida del sensor los desplazamiento lineales producidos por

la deformación del espejo son más pequeños que el área activa del detector de potencia óptica es necesario utilizar el método de la navaja para cortar el haz y así detectar los cambios de potencia en relación al cambio de posición del haz de salida.

El detector utilizado para las primeras pruebas incluye una interfaz con LabVIEW<sup>®</sup> que permite cuantificar la potencia del haz incidente, se acondicionó dicha interfaz para poder ver los valores en una grafica y guardarlos en un archivo .txt para su posterior procesamiento (Ver anexo B).

La técnica de la navaja ha sido utilizada para encontrar el perfil del haz de un láser. También se usa para medir el desplazamiento de vigas en voladizo para los microscopios AFMs (atomic force microscopes) [1] por sus siglas en ingles.

Como se sabe, el haz de un diodo láser tiene una distribución de intensidad Gaussiana, dicha distribución se propaga simétricamente en el eje Z y dado que los desplazamientos lineales a la salida del sensor de desplazamiento ocurren perpendiculares a dicho eje, fue posible colocar la navaja centrando el spot del láser en el filo de la navaja antes del iniciar las pruebas de manera que al inicio el 50 % de la potencia total del haz de salida incide en el fotodiodo y el otro 50 % esta bloqueado (Ver Fig. 3.15.).

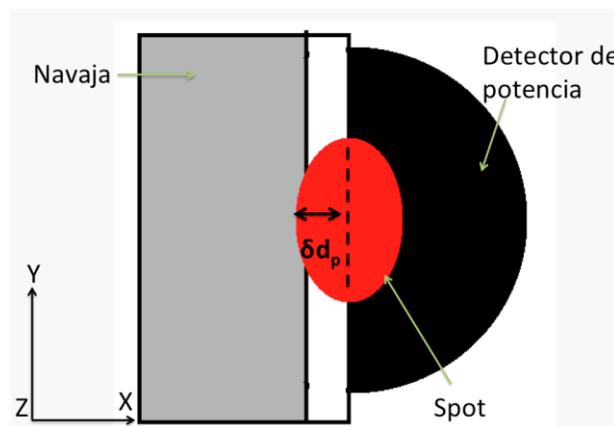


Fig. 3.15. Esquema del detector empleando el método de la navaja para medir la señal de salida del sensor.

La intensidad óptica en función de propagación axial en el eje Z y la posición radial dada por  $\rho = \sqrt{X^2 + Y^2}$ , como se describe en [2], está dada por:

$$I(\rho, Z) = I_0 \left[ \frac{W_0}{W(Z)} \right]^2 \exp \left[ -\frac{2\rho^2}{W^2(Z)} \right]. \quad (3.3)$$

donde  $W_0$  es el radio a  $1/e^2$  del haz y  $I_0$  es la intensidad máxima. De ésta ecuación podemos encontrar una expresión para la potencia, que sería el área bajo la curva:

$$P = \int_0^{\infty} I(\rho, Z) 2\pi\rho d\rho. \quad (3.4)$$

Considerando que el filo de la navaja está situado paralelamente al eje Y, y que el haz se desplaza

en dirección  $X$ , la potencia incidente en el área activa del detector está dada por:

$$P = \frac{1}{2} P_{Tot} \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{\sqrt{2}x}{W_0} \right) \right], \quad (3.5)$$

donde el termino  $\operatorname{erf}(x)$  es una integral de la función error complementario igual a:

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\left(\frac{2x^2}{W_0^2}\right)^2} . \quad (3.6)$$

De las ecuaciones anteriores podemos ver entonces que se tendrá un valor de potencia máximo cuando los desplazamientos sean  $x = 0$ , e irá decreciendo exponencialmente con una pendiente  $-dP/dx$  negativa hasta cero que será cuando el spot abandone por completo la navaja y toda la luz deje de incidir en el detector.

En [1] se menciona que si los desplazamientos son muy inferiores a  $W_0$  los cambios de potencia detectados en conjunto con la navaja son lineales. Pero fuera de ésta condición se presentan nolinearidades (Ver Fig. 3.16.).

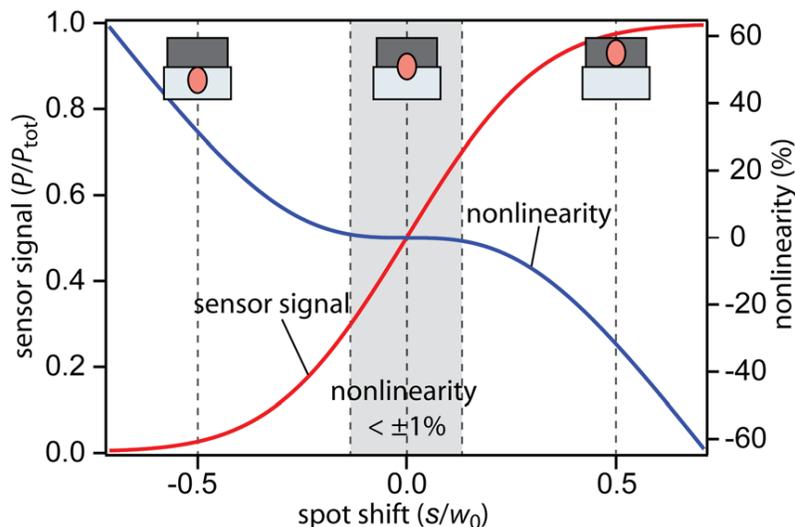


Fig. 3.16. Linealidad y no linealidad de la señal del detector de potencia óptica calculada en función los desplazamientos en  $X$  relativos a  $W_0$ . [1]

Podemos ver en la figura anterior que cuando el spot abandona la navaja entramos en las nolinealidades del sistema por lo que resulta conveniente para éstas primeras pruebas experimentales trabajar dentro de la zona lineal aunque disminuya el rango dinámico del sensor de desplazamiento.

### 3.3.2. Caracterización de detector de potencia.

Se midió la respuesta del sensor excitado con la iluminación del laboratorio, Fig. 3.17. (a), y también la respuesta de off-set que resulta en ausencia de luz, Fig. 3.17. (b). Para éste último caso fue necesario tapar la cabeza del detector con una cartulina negra y apagar las luces del laboratorio.

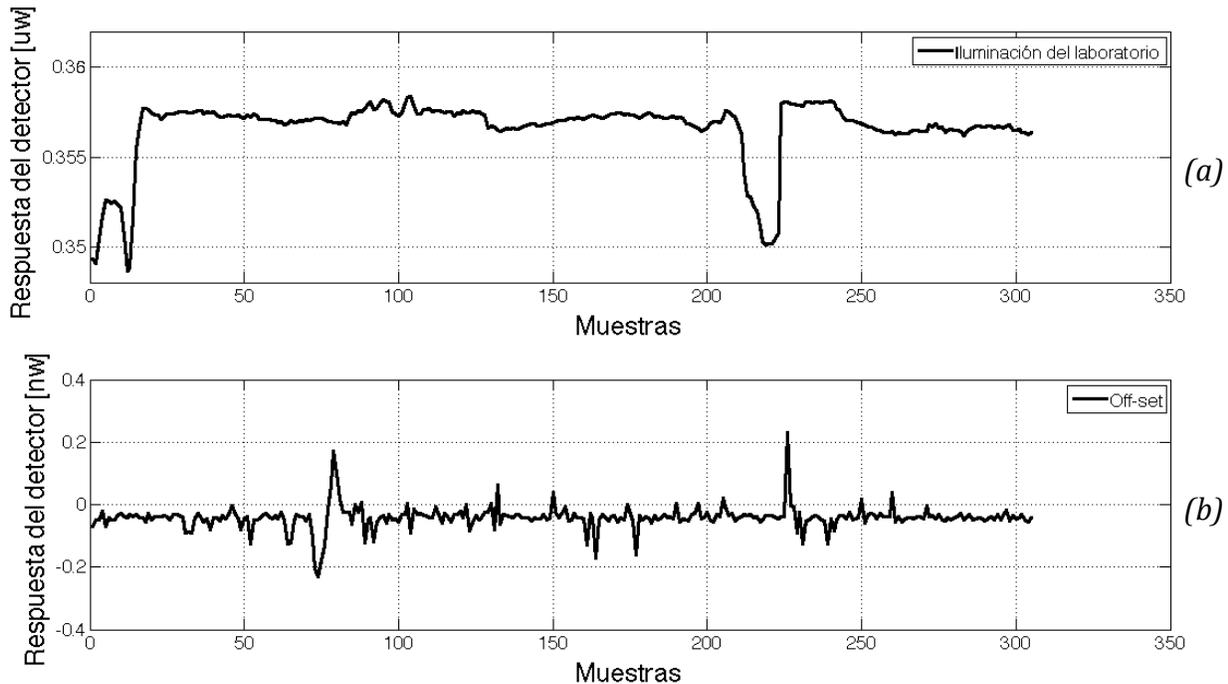


Fig. 3.17. Gráficas de ruido. (a) Ruido de fondo del sistema y (b) es el Off-set del sistema

Como podemos ver en la Fig. 3.17. (a) se encontró que la iluminación del laboratorio contribuye un  $0.358 \mu\text{W}$  en la medición del detector y por otro lado, el valor de off-set visto en la Fig. 3.17. (b) oscila en un ancho de  $450.12 \text{ pW}$  en un rango de  $-230.877 \text{ pW}$  a  $229.243 \text{ pW}$  de potencia medida. Dichos valores contribuyen al error en las mediciones experimentales hechas posteriormente y deberán ser consideradas para compensar el error en la medición.

Ya se cuenta con todas las herramientas para las pruebas experimentales, la fabricación de los espejos, la estructura de soporte para los espejos y ahora ya se tiene el detector que permitirá cuantificar los cambios del haz de salida producidos por los desplazamientos generados con el tornillo micrométrico. En el siguiente capítulo se mostrarán los resultados experimentales que se obtuvieron con el sensor de desplazamiento diseñado.

### Bibliografía

- [1] Christoph Brauns mann., et al., "Optical knife-edge displacement sensor for high-speed atomic force microscopy," *Appl. Phys. Lett.* 104, 103101 (2014)
- [2] Saleh B.E.A., Teich M.C., "Fundamentals of photonics", Ed. Wiley, 2a. Edición, pp. 77-79, 2007

## 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este capítulo se presentan los resultados experimentales obtenidos mediante el voltímetro óptico. Se muestra la diferencia entre el esquema de medición mediante la variación de la distancia entre los espejos y la deformación del radio de curvatura  $R_2$  para comprobar la hipótesis planteada al inicio del trabajo.

### 4.1 Procedimiento de medición del desplazamiento.

Para las pruebas experimentales se montó un experimento como se ve en la Fig. 4.1. Podemos ver que el haz de entrada está dispuesto con un cierto ángulo  $\beta$  y después de un cierto número de reflexiones internas, el haz sale por el mismo orificio por donde entró pero ahora con un ángulo  $\phi$ . Dicho ángulo comienza a variar conforme se aumenta el radio de curvatura al aplicarse una fuerza y en forma proporcional la distancia entre espejos se reduce. El detector se colocó a una distancia tal que permitiera el paso del haz de entrada y alineado perpendicularmente con el eje óptico con el objetivo de medir los cambios de ángulo transversalmente que se verán como cambios de posición del haz de salida a lo largo del eje  $X$ .

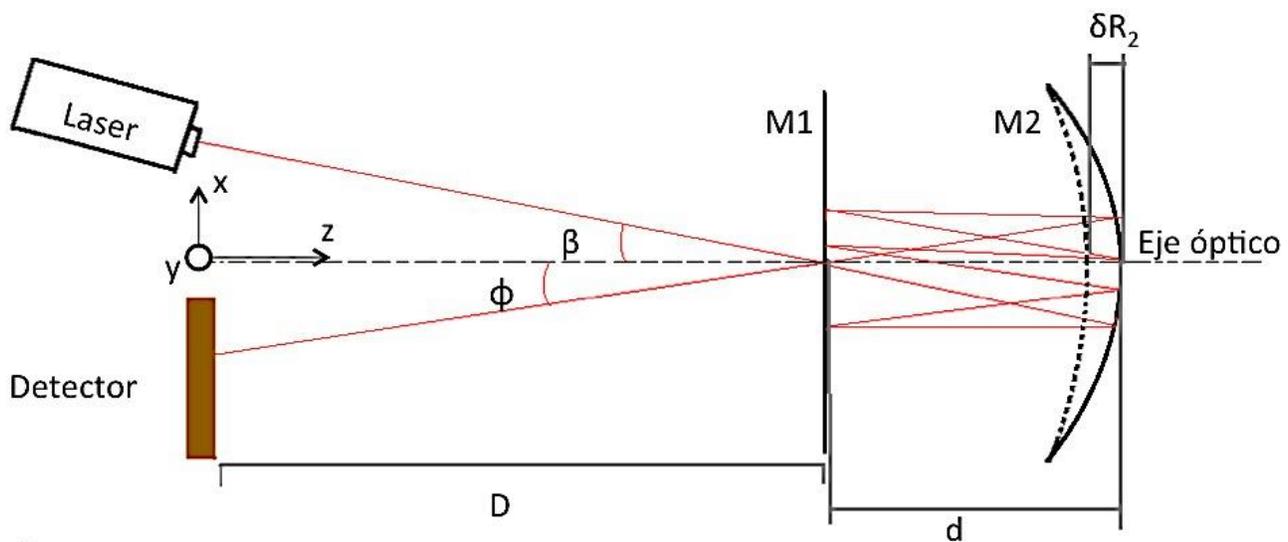


Fig. 4.1. Montaje experimental en vista superior.

Tenemos en la Fig. 4.1. que los espejos que conforman la celda están dispuestos a una distancia  $d$  entre ellos. En la entrada del espejo  $M1$  incide un haz láser a una longitud de onda de 633 nm con un ángulo de entrada  $\beta$ .

El detector se colocó a una distancia  $D$  a la salida de la celda y se tienen aumentos de radio de curvatura  $\delta R_2$  en el espejo  $M2$  que genera un cambio de posición del haz de salida incidente en el detector. El ángulo de salida de la celda se nombra con la variable  $\phi$ .

## 4.2 Prueba experimental cualitativa del principio de funcionamiento del sensor de desplazamiento.

Es posible sustituir el detector por una pantalla para observar el comportamiento del haz de salida y de ésta forma entender mejor qué está pasando con el sensor de desplazamiento.

Los parámetros a considerar en la prueba y simulación se muestran en la tabla siguiente donde  $\Delta R_2$  es el aumento total del radio de curvatura de **M2** y  $\Delta d_p$  es el cambio de posición total del haz de salida medido en la pantalla (hoja milimétrica, ver Fig. 4.2. (b)).

Tabla 3. Parámetros de simulación de celda.

Parámetros
$d = 17 \text{ mm.}$
$\beta = 7^\circ .$
$D = 164 \text{ mm.}$
$\Delta R_2 = 1050 \text{ }\mu\text{m.}$
$\delta R_2 = 50 \text{ }\mu\text{m.}$
$\Delta d_p = 40 \text{ mm.}$
$\delta d_p = 2 \text{ mm.}$

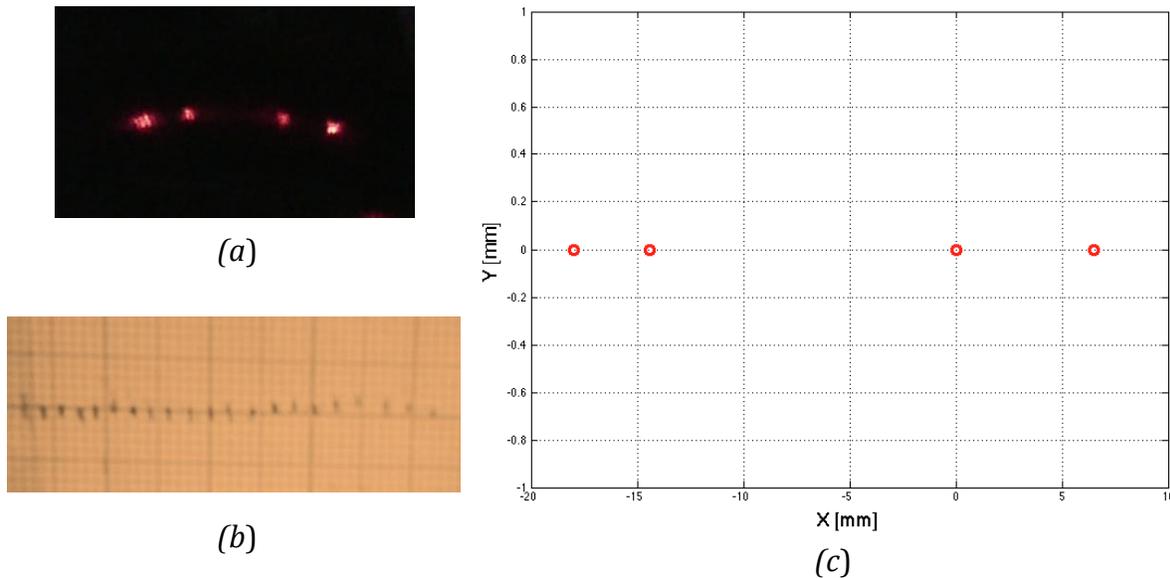


Fig. 4.2. Prueba cualitativa con  $N = 8$ . (a) fotografía del patrón de incidencias en **M2**, (b) trazo de desplazamiento de la incidencia a la salida del sensor en función de las deformaciones de **M2**, (c) simulación del patrón de incidencias en **M2**.

Como se observa en la Fig. 4.2. (a) se colocó la celda en una configuración para lograr cuatro puntos de incidencia en el espejo **M1** que podemos corroborar que coincide con las simulación en MATLAB de la Fig. 4.2. (c). En la Fig. 4.2. (b) se marcaron los puntos donde el haz de salida incidía en la pantalla conforme se aumentaba el radio de curvatura de **M2**.

### 4.3 Prueba experimental cuantitativa

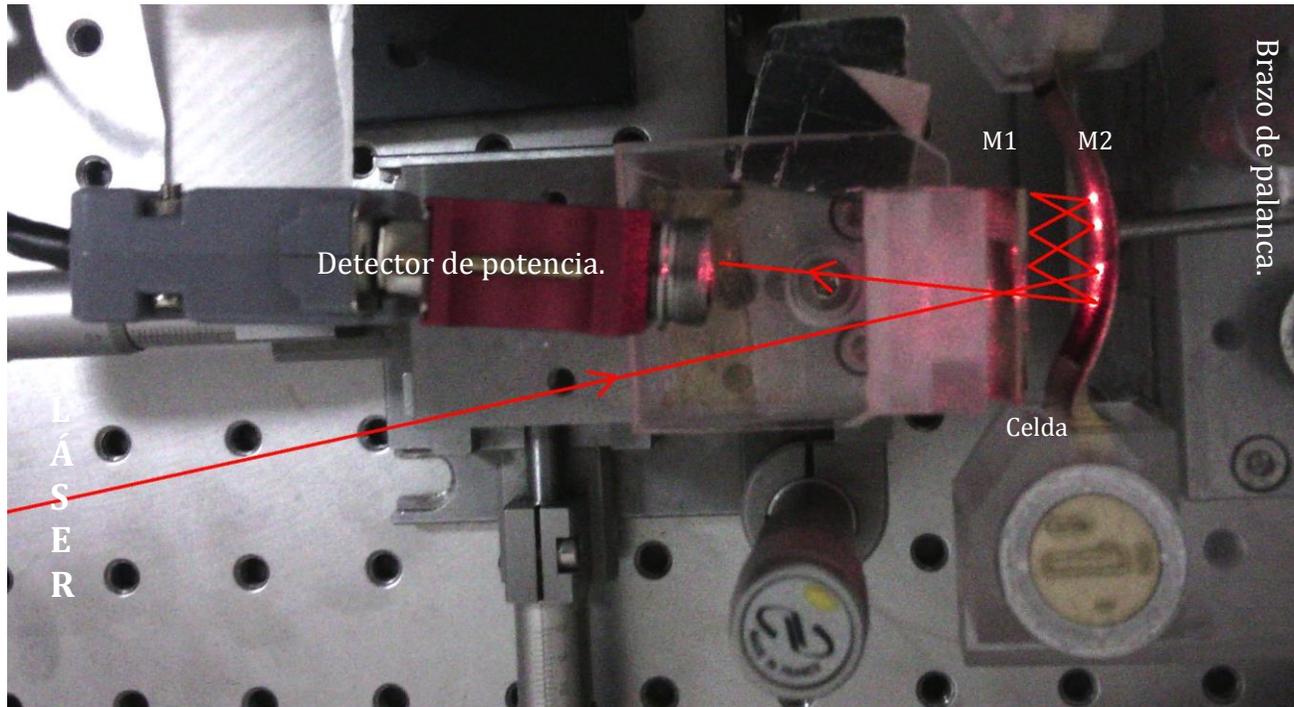


Fig. 4.3. Montaje experimental.

Para las pruebas, sustituimos la pantalla por el detector de potencia para medir el cambio posición del haz de salida de la celda como se ve en la Fig. 4.3. dicho cambio de posición de incidencia en el detector indican un cambio de ángulo de salida  $\phi_r$ . Puede verse que los espejos están dispuestos en una estructura donde el espejo **M2** está sujetado entre dos resortes que lo mantienen alineado y además permiten disipar esfuerzos evitando que el espejo llegue a la fractura incluso si la deformación de su radio de curvatura es hasta el caso de volverlo un espejo plano.

Debido a que el haz de salida se obtiene por el mismo puerto de entrada y dado que el tamaño de la carcasa del detector de potencia es de 1.52 cm lo más próximo que pudo colocarse, sin que obstruyese el haz de entrada, fue de aproximadamente 2 cm a la salida de la celda.

En un principio se utilizó un tornillo micrométrico para generar las deformaciones en el espejo **M2**, sin embargo, solo permitía pasos de 10  $\mu\text{m}$  y debido a la distancia a la que se colocó el detector de potencia, solo fue posible realizar unas cuantas mediciones antes de que el haz abandonara por completo el área sensible del detector. Es por ello que se diseñó un brazo de palanca (Ver Fig. 4.4.) de tal forma que aplicando de un lado los 10  $\mu\text{m}$  se lograrán pasos de 500 nm, 250 nm y 125 nm para una relación de brazo de palanca de  $A = 20, 40$  y 80 cm respectivamente con  $B = 1$  cm en los tres casos.

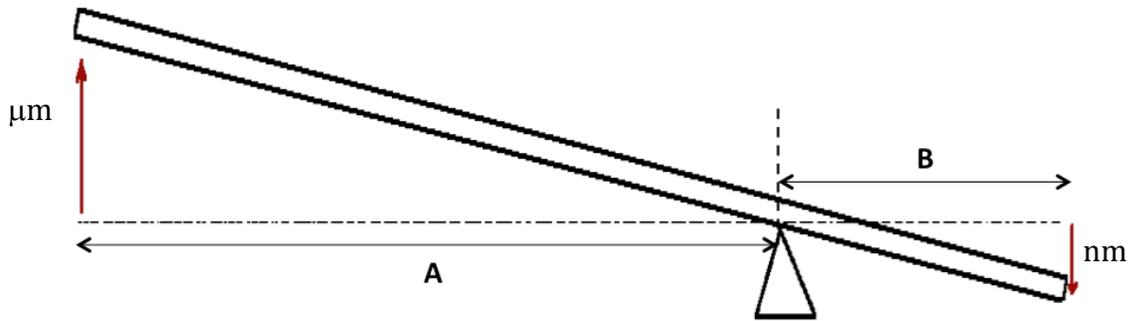


Fig. 4.4. Brazo de palanca para generar desplazamientos menores a la micra.

Se realizaron seis pruebas con el sensor de desplazamiento las cuales se describen en la siguiente tabla:

Tabla 4. Parámetros característicos de las pruebas experimentales.

Prueba	N	Longitud A	Longitud B	$\delta R_2$
Prueba 1	4	20 [cm]	1 [cm]	500 [nm]
Prueba 2	4	20 [cm]	1 [cm]	500 [nm]
Prueba 3	5	20 [cm]	1 [cm]	500 [nm]
Prueba 4	4	40 [cm]	1 [cm]	250 [nm]

Podemos ver en la Tabla 4 que se realizaron 4 pruebas aplicando diferentes desplazamientos generados por un brazo de palanca. Podemos ver que las dos primeras pruebas conservan los mismos parámetros de longitud de segmento **A**, desplazamientos en intervalos de  $\delta R_2 = 500$  nm y número de incidencias en el espejo **M2** = 4, sin embargo, existe una diferencia debido a un ajuste manual de la posición del detector lo que no permitió mantener constante la distancia de este a la salida del sensor. Veremos más adelante en las gráficas de resultados que este factor influye en la adquisición de datos pues como veremos enseguida, el haz conserva su perfil Gaussiano y dependiendo de la colocación del detector, podemos estar midiendo todo el perfil o una parte de él. En la prueba 3 se aplicó la misma magnitud de los desplazamientos en intervalos de  $\delta R_2 = 500$  nm pero disminuyendo la distancia **d** entre espejos para aumentar en uno el número de incidencias en el espejo **M2**. La prueba 4 fue con una longitud del segmento **A** del brazo de palanca igual a 40 cm lo que generó desplazamientos de 250 nm.

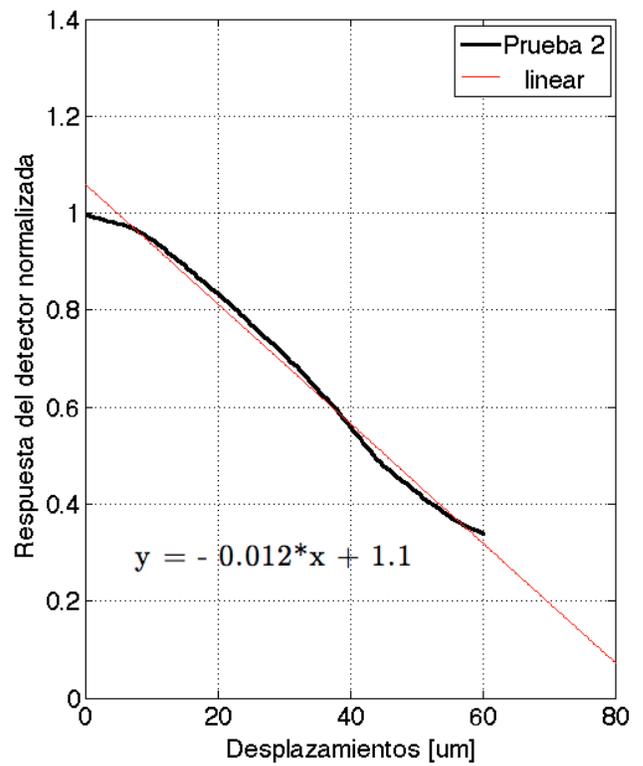
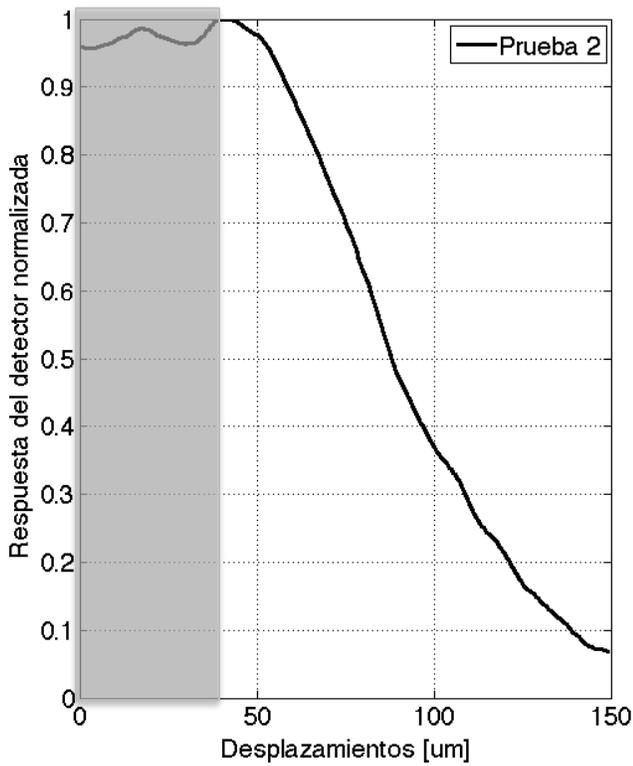
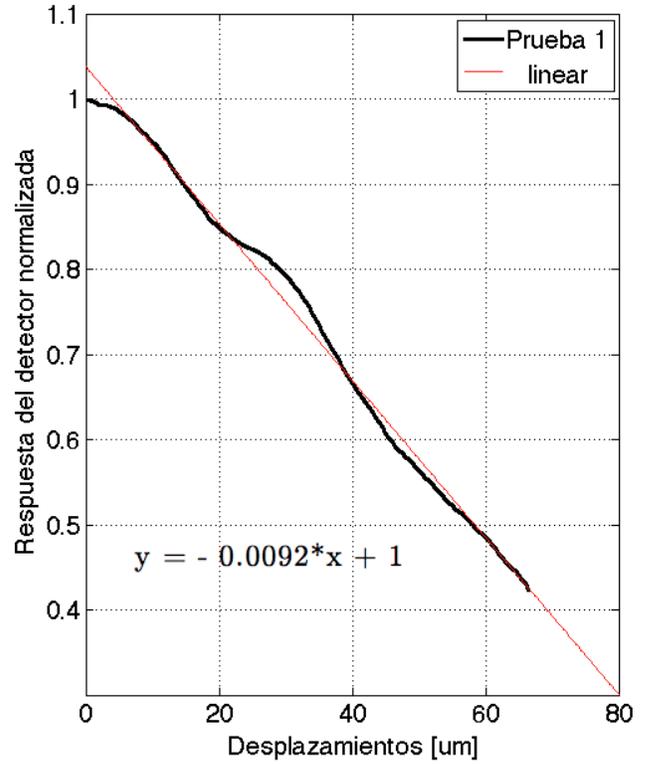
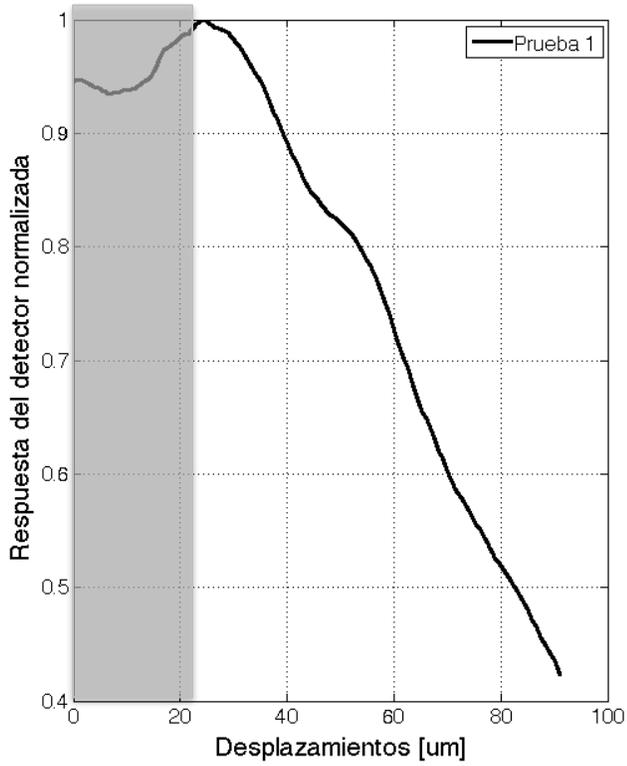


Fig. 4.6. Gráfica de la Prueba 2, con ajuste de recta.  $A = 20 \text{ cm}$ ,  $\delta R_2 = 500 \text{ nm}$ ,  $N = 4$ .

Podemos ver en las Fig. 4.5. y 4.6. que el comportamiento al principio de las pruebas no es por completo la forma gaussiana del haz láser y que existe una zona donde hay “saltos”. Podría pensarse que es debido a ruido en la señal sin embargo, puesto que el brazo de palanca se ha colocado manualmente cerca de la superficie de **M2** no es posible asegurar a simple vista si realmente ya esta en contacto con el espejo, por lo que al principio lo que vemos en el área sombreada es la respuesta del sensor pero sin detectar una deformación del espejo, podríamos decir que es una salida relativamente sin cambio. Una vez que el brazo de palanca hace contacto directo en la superficies el espejo es cuando podemos ver de manera más clara la curva gaussiana propia del haz láser. En la grafica que esta delante de la sombreada es un ajuste que se hizo en MATLAB donde se tomaron solo los datos de la parte del decaimiento donde se tiene una mayor sensibilidad por cada deformación. Podemos ver que es posible ajustarla a una recta donde las pendientes en ambas pruebas son muy parecidas.

Ahora bien, en los antecedentes se explico que es posible generar un número grande de incidencias en los espejos en función del número  $N$ . En espectroscopia se utiliza ésta cualidad para aumentar la sensibilidad del dispositivo por lo que se realizó una tercer prueba para explorar si en el caso de una variable mecánica ocurre lo mismo. (Ver Fig. 4.7.)

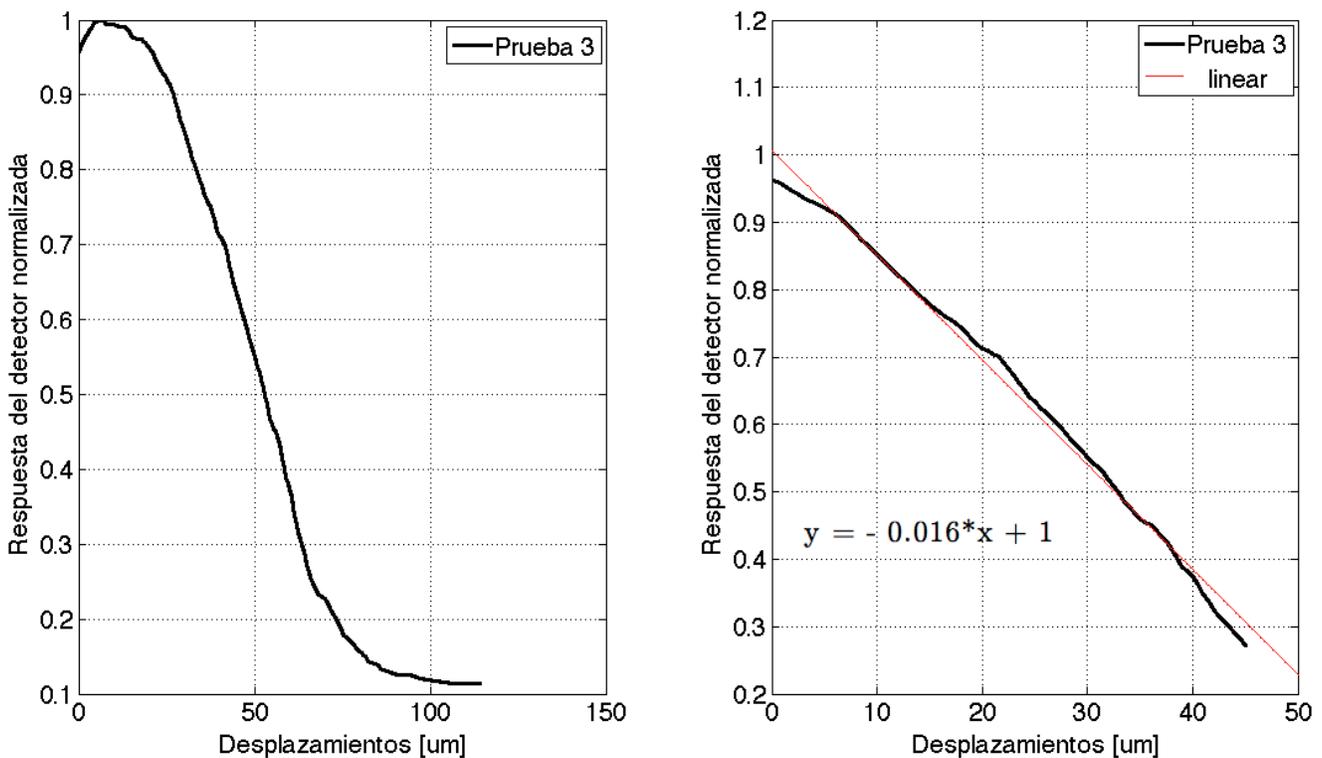


Fig. 4.7. Gráfica de la Prueba 3, con ajuste de recta.  $A = 20 \text{ cm}$ ,  $\delta R_2 = 500 \text{ nm}$ ,  $N = 5$ .

Podemos ver en la Fig. 4.7. el perfil del haz gaussiano donde en este caso, al iniciar el experimento, el brazo de palanca estaba en contacto con el espejo, por lo que puede verse el cambio de potencia desde el primer desplazamiento. Por otro lado, para esta prueba se redujo la distancia  $d$  entre espejos hasta lograr cinco incidencias en el espejo **M2**. Puede verse que el valor de la pendiente tienen un valor de -0.016 el cual es superior a la Fig. 4.5. y Fig. 4.6 donde solo se

tienen cuatro incidencias en el espejo por lo que se comprueba que generando un mayor número de incidencias en los espejos, la sensibilidad del sensor de desplazamientos aumenta, sin embargo, existe una limitante pues por cada incidencia que se aumenta decae la potencia del haz de salida. Esto lo podemos calcular con la formula (4.1) dónde  $P_T$  es la potencia total del haz de entrada,  $P_M$  es la potencia medida a la salida del sensor de desplazamiento y  $\% P_S$  es el porcentaje de potencia de salida . Consideramos entonces el valor de  $P_T$  como el 100 % de la potencia de entrada en la celda. La formula permite encontrar el porcentaje de potencia que se obtiene a la salida de la celda después de un determinado número de pasos.

$$\% P_S = \frac{P_M}{P_T} (100\%). \quad (4.1)$$

Es posible entonces calcular el porcentaje de pérdidas conforme aumentamos el número de incidencias en los espejos. (Ver Ecuación 4.2).

$$\% \text{Pérdidas} = (100\%) - (\%P_S). \quad (4.2)$$

Tabla 5. Datos experimentales para el calculo de las perdidas por propagación.

$P_T$	N	$P_M$	$\% P_S$	$\% \text{Pérdidas}$
983 $\mu\text{W}$	4	167 $\mu\text{W}$	17.049	82.951
	5	103 $\mu\text{W}$	10.523	89.477
	>5	56 $\mu\text{W}$	5.683	94.317

Puede verse en la Tabla 5 que las perdidas son grandes con tan solo 4 incidencias en el espejo **M2** obteniendo tan solo un 17 % de la potencia original de entrada a la salida del sensor de desplazamiento lo que representa una pérdida casi del 83 %. Esto indica que existen problemas de manufactura en los espejos dónde la reflectividad es inferior al 100 %, por otro lado, el pulido de la superficie de los espejos debe ser defectuoso generando dispersión de la luz.

También otro fenómeno que esta ocurriendo es que al incidir el haz dentro de la cavidad se usó una platina con tres grados de libertad para realizar ajustes finos, sin embargo, debido a que el puerto de entrada de la celda es de apenas un par de milímetros, es posible que parte de la luz sea obstruida por las paredes del orificio de entrada y además en alguna protuberancia del depósito de metal que quedará en las paredes del puerto.

Corrigiendo éstos errores sería posible aumentar el número de incidencias en los espejos lo que repercutiría directamente en un aumento de la sensibilidad del sensor de desplazamientos.

Ahora veamos los casos dónde el brazo de palanca es más largo, 40 cm, dónde los desplazamientos generados son de 250 nm con 4 incidencias en el espejo **M2**.

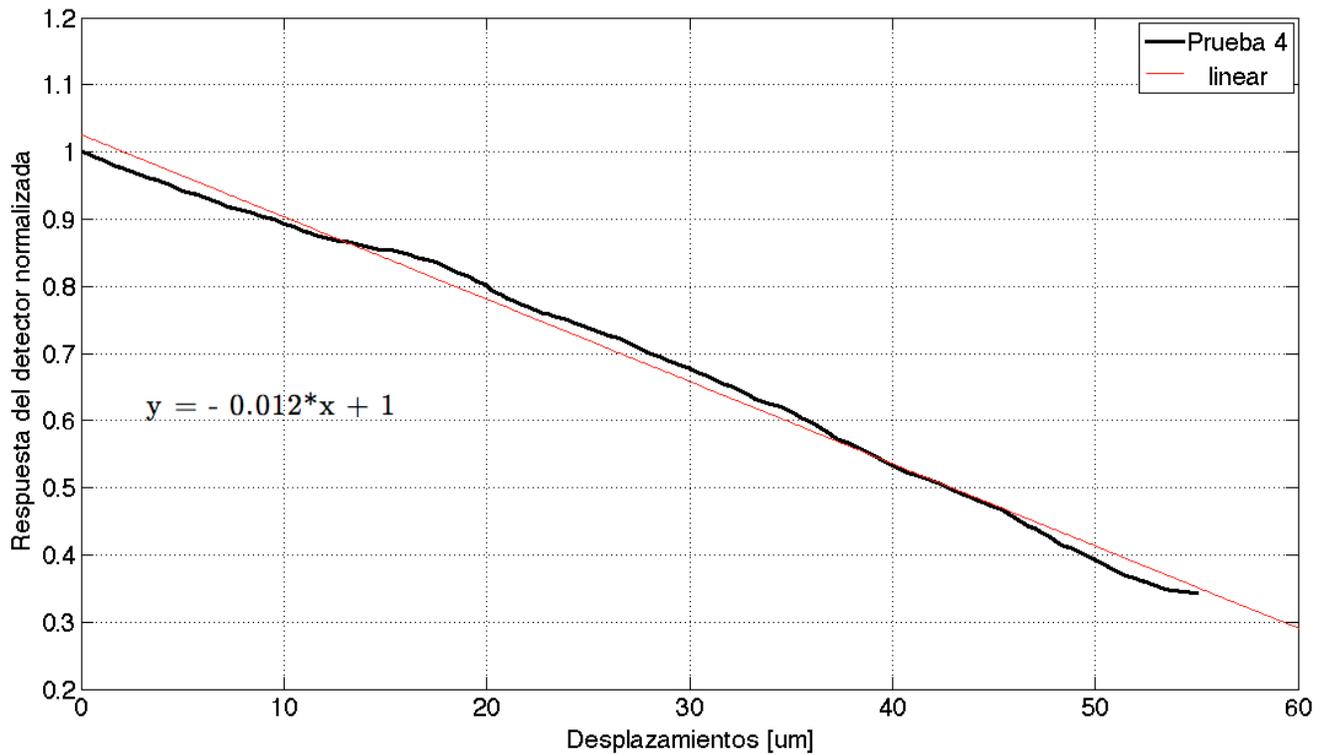


Fig. 4.8. Gráfica de la Prueba 4, con ajuste de recta.  $A = 40$  cm,  $\delta R_2 = 250$  nm,  $N = 4$ .

Vemos en la Fig. 4.8. que la pendiente es muy cercana al caso de las pruebas 1 y 2 donde las deformaciones fueron en intervalos de 500 nm.

Puede pensarse que sería posible realizar mediciones de 1 nm debido a que el detector de potencia tiene una resolución nominal de 100 pW, siempre y cuando no cayéramos en el ruido de Off-set que medimos en el capítulo anterior en la sección 3.3.2 que tiene un valor de 450.12 pW y bloqueando la contribución de la iluminación del laboratorio colocando una “caja” que únicamente permitiera incidir el haz de luz proveniente de la salida del sensor de desplazamiento.

Durante las pruebas no se logró deformar demasiado el radio de curvatura de **M2** debido a que la carrera del micrómetro solo puede desplazarse un total de 13 mm en pasos de 10  $\mu$ m por lo que para las pruebas donde el brazo de palanca tenía una longitud de 20 cm, sólo fue posible deformar el espejo **M2** un máximo de 650  $\mu$ m y para el caso de 40 cm de longitud, el rango máximo fue de 325  $\mu$ m.

### 4.3.1. Repetibilidad.

Es posible determinar que tan repetible es una medición respecto a otra en razón de que tanto varían los datos experimentales obtenidos durante una prueba u otra bajo las mismas condiciones de medición. En la Fig. 4.9 tenemos el caso de dos pruebas iguales con el brazo de palanca de 20 cm.

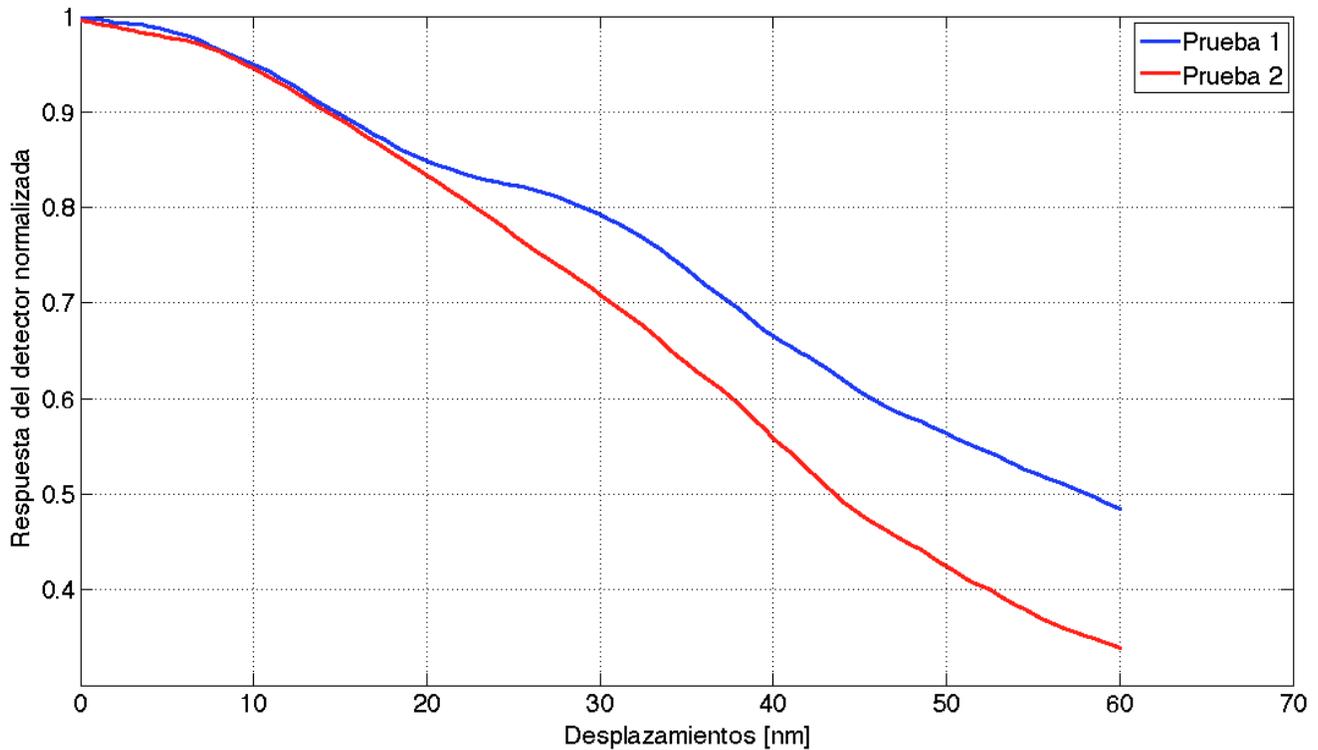


Fig. 4.9. Respuesta del sensor de desplazamiento a desplazamientos de 500 nm para determinar la repetibilidad.

En la Fig. 4.9. se presentan las señales de respuesta del sensor obtenidas con el detector de potencia en función de los desplazamientos generados de 500 nm. Ambas curvas se normalizaron para permitir la comparación entre una y otra. Para determinar la repetibilidad del sensor de desplazamiento podemos tomar dos puntos de cada una de las curvas donde ocurre el decremento máximo de potencia óptica normalizada. Teniendo de ésta forma dos valores de potencia mínima al final de los desplazamientos en cada prueba denotados por  $P_1 = 0.484$  y  $P_2 = 0.339$ . Si aplicamos el porcentaje de error, es posible determinar con un buen margen el porcentaje de error de la repetibilidad en el sensor de desplazamientos:

$$\% E_{REP} = \frac{|P_1 - P_2|}{P_1} (100\%) = 29.95 \%. \quad (4.3)$$

Si bien el porcentaje de error supera el 1 %, éste valor de error puede ser considerado como aceptable aunque no podemos despreciarlo y da lugar a una precisión del 70.04 % en las mediciones. Naturalmente es necesario un mayor número de pruebas y controlar más los factores involucrados con la medición para obtener un valor de repetibilidad más preciso.

### 4.3.2. Sensibilidad.

Entendiendo la sensibilidad como la relación de la señal de salida o respuesta del instrumento al cambio de la entrada o variable medida, que en nuestro caso particular se refiere a los cambios de potencia medida con el detector como respuesta a un desplazamiento que modifique el radio de curvatura de  $M2$ , vamos a estudiar la sensibilidad que tiene el sensor de desplazamiento propuesto. Ya se han presentado curvas de respuesta del sensor y se encontró que conserva la forma de un haz gaussiano pero dicha forma no brinda información de la sensibilidad del sensor, es por ello, que fue necesario observar los datos y extraer la parte donde hay un mayor decremento de potencia para realizar un ajuste lineal. Como ya se ha explicado el valor de potencia cambia debido a varios factores, en mayor medida por problemas de manufactura, sin embargo, al normalizar las curvas fue posible comparar su comportamiento una con otra y determinar la reproducibilidad del sensor. Ahora, para determinar la sensibilidad para un caso en particular, por ejemplo, para el caso de prueba 2, tomamos los datos de potencia sin normalizar y ajustamos a una recta como se muestra en la Fig. 4.10.

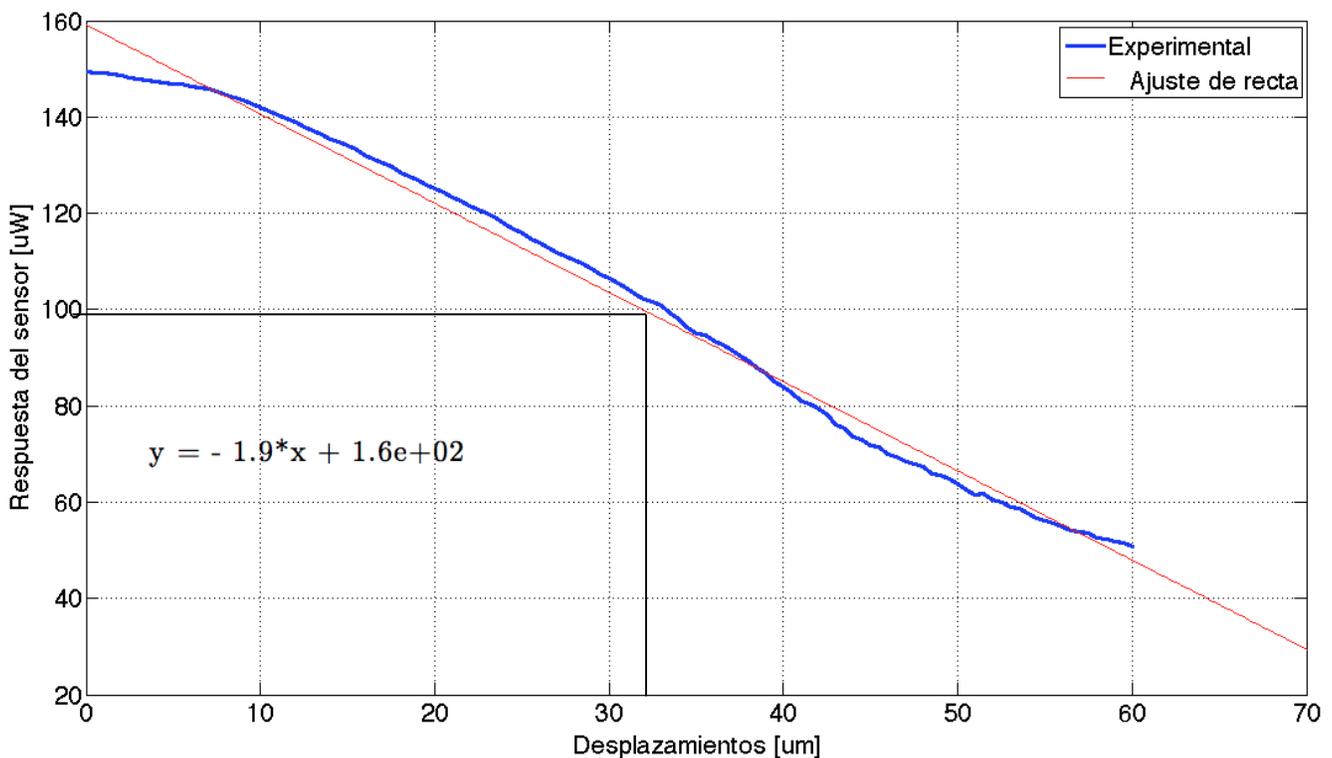


Fig. 4.10. Recta de calibración a la respuesta del sensor de desplazamiento.

Podemos ver en la Fig. 4.10. que conforme aumentamos las deformaciones en el radio de curvatura de  $M2$ , es decir, que se presenten desplazamientos lineales a lo largo del eje óptico del sensor, podemos ver un decremento en la potencia registrada por el detector. Podemos establecer que la pendiente de la recta determina la sensibilidad del sensor de desplazamiento, ya que justamente guarda la información de la razón de cambio de potencia óptica conforme se registran desplazamientos.

Dicho lo anterior podemos decir que la sensibilidad en el caso de cuatro incidencias en los espejos y desplazamientos de 500 nm es de:

$$\text{Sensibilidad} = -1.9 \frac{[\mu W]}{[\mu m]} = -1.9 \frac{[nW]}{[nm]} \quad (4.4)$$

Hemos estado reportando en los resultados vistos en las gráficas, desplazamientos en el orden de  $\mu m$ , debido a que resultaba poco práctico describir el eje de desplazamiento en  $nm$ , sin embargo, la sensibilidad puede cambiarse a unidades de nanómetros y conservar el valor original que la Fig. 4.10 describe. Y como ya hemos visto la resolución del detector de potencia óptica utilizado, podemos decir que nuestro sensor de desplazamientos es capaz de medir en el orden de nanómetros.

### 4.3.3. Resolución y rango de medición.

Entendiendo como resolución al cambio más pequeño en el valor medido para el cual el instrumento responderá, para poder determinar la resolución del sensor de desplazamiento es necesario considerar que el detector de potencia óptica que se está usando dice en su hoja de datos que tiene una resolución nominal de  $100 \text{ pW}$  valor que como hemos registrado entra dentro del valor de off-set registrado en las pruebas de caracterización del detector pero que en realidad oscila con un ancho de  $450.12 \text{ pW}$ . Este valor determinará por el momento la resolución del sensor de desplazamiento considerando una relación señal a ruido de  $SNR = 3$ , donde si multiplicamos nuestro valor de off-set medido por este factor, el resultado es de  $1.35 \text{ nW}$ , por lo que podemos decir que una medición que de cómo respuesta un valor por arriba de  $1.35 \text{ nW}$  será una medición confiable.

En la prueba 2, que fue el experimento que usamos para determinar la sensibilidad del sensor en la sección 4.3.2, los intervalos de desplazamiento debido a la relación de brazo de palanca, fueron de  $500 \text{ nm}$  o bien  $0.5 \mu m$ , si utilizamos la ecuación del ajuste de recta:

$$y = -1.9x + 160. \quad (4.5)$$

Si despejamos “ $x$ ” y sustituimos un valor cual sea, por ejemplo  $y = 100 \mu W$  y obtenemos su valor en desplazamiento y luego sustituimos el valor con el aumento del factor señal a ruido, es decir  $100 \mu W + 1.35 \text{ nW}$ , será posible determinar la resolución del sensor de desplazamiento que puede medir por arriba del ruido de off-set.

$$x = \frac{y - 160}{-1.9} = \frac{100 - 160}{-1.9} = 31.57894737 \mu m \quad (4.6)$$

$$x = \frac{y - 160}{-1.9} = \frac{100.00135 - 160}{-1.9} = 31.57823684 \mu m \quad (4.7)$$

Si restamos ambos valores:

$$31.57894737 - 31.57823684 = 0.00071053 \mu m = 0.71053 \text{ nm} \quad (4.8)$$



Tenemos entonces en la ecuación (4.8) que nuestro sensor de desplazamientos será capaz de medir desplazamientos de 0.7 nm.

En teoría, el rango de medición puede ser tal como el valor de radio de curvatura de  $M2$ , puesto que puede ser deformado hasta llegar al caso de un espejo plano, las limitantes son que si el haz de salida deja de incidir en el detector por causa de una gran deformación en el radio de curvatura sería poco práctico tener que reacomodar la posición del detector para seguir registrando, en cuyo caso es aconsejable cambiar el detector a uno con un área sensible mayor al usado en el presente trabajo. Hasta ahora, con los resultados obtenidos podemos establecer un rango de medición de 0 – 500  $\mu\text{m}$ .

## 5. CONCLUSIONES GENERALES.

Se ha presentado el diseño de un nuevo sensor de desplazamiento con base en la celda de camino óptico largo tipo Herriott donde se ha explicado la teoría de diseño detrás de éstas cavidades y la forma de aprovechar sus cualidades para traducir desplazamientos lineales en el eje óptico del sistema. Se ha comprobado que una de las características más útiles que brinda la celda como transductor es que a medida que se aumentan el número de pasos internos en la cavidad la sensibilidad del sensor aumenta.

La propagación de la luz dentro de la celda se analizó mediante la óptica geométrica para el trazo de rayos usando el método matricial. Gracias a esto fue posible entender cada una de las variables involucradas en la generación de los patrones de incidencia en los espejos y la manera que repercute cambiar su valor en relación al haz de salida. Eso se logró realizando simulaciones en MATLAB programando un algoritmo con base en las matrices de trazo de rayos de la óptica geométrica. También se calculaba el número de pasos en función del cambio del radio de curvatura y la separación entre espejos, producidos por un desplazamiento aplicado a uno de los espejos.

Se realizó también un diseño mecánico donde las características del acrílico fueron de gran ayuda para la manufactura del primer prototipo del sensor por lo que fue posible fabricar un dispositivo relativamente pequeño que por lo que se encontró, dependiendo del uso que se le quiera dar, puede ser de menor o mayor tamaño.

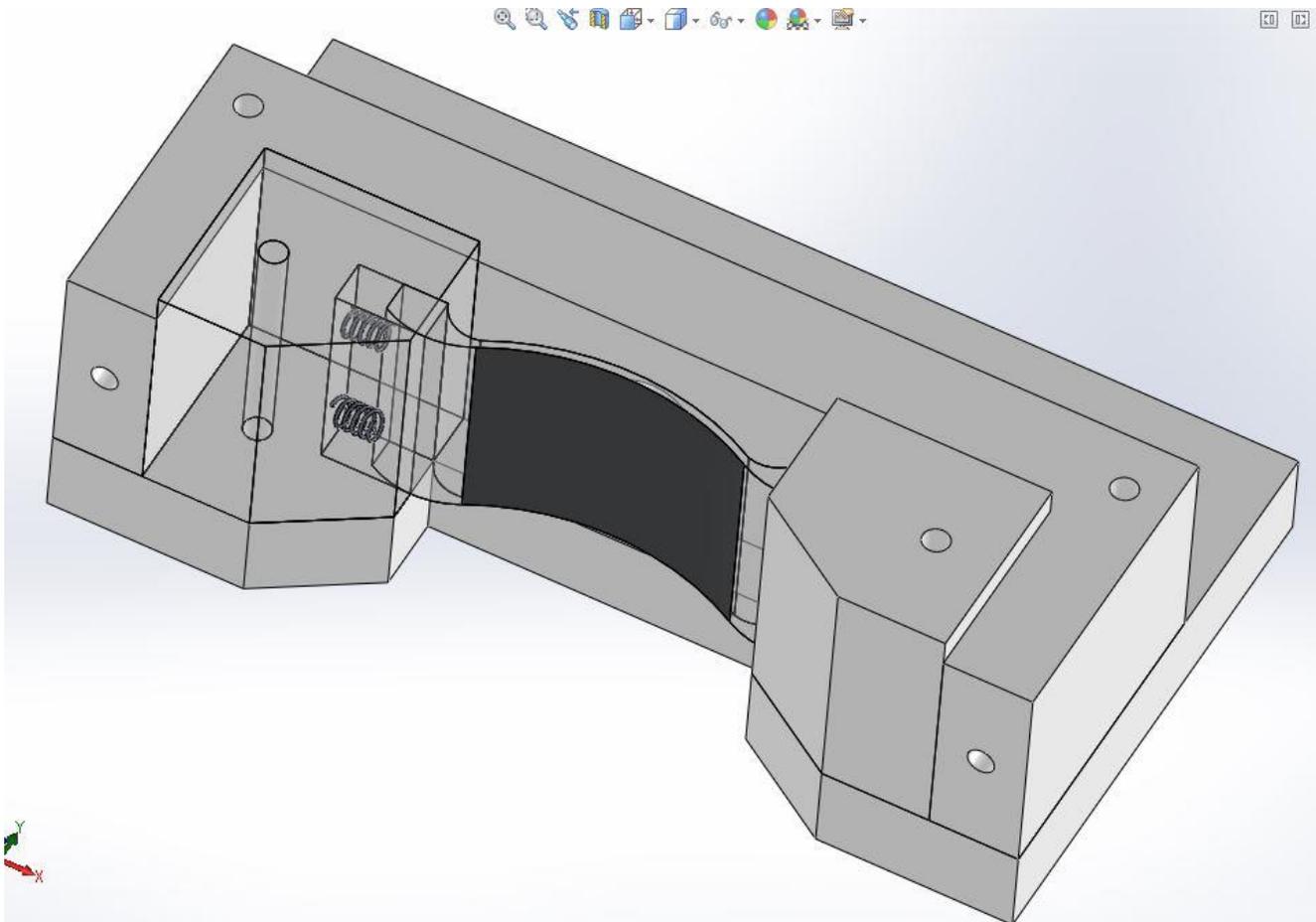
Los resultados experimentales demostraron que el sistema es capaz de medir desplazamientos en el orden de 0.7 [nm] con 70 % de repetibilidad en las pruebas y aunque el rango máximo no fue posible medirlo experimentalmente se comprobó que el diseño de los espejos puede alcanzar deformaciones tan grandes como su radio de curvatura (por ejemplo 30 mm) llegando a ser completamente planos, claro que en este caso se pierde por completo la condición de reentrada en la celda dado que se saldría de las condiciones de estabilidad, sin embargo, es posible deformar el espejo varios milímetros antes de que esté fuera del área sensible del detector.

Se demostró que el diseño de éste sensor de desplazamiento es una propuesta prometedora en la que la sensibilidad aumenta considerablemente con el número de incidencias en los espejos, dejando abierta la posibilidad de obtener sensores de alta sensibilidad que puedan llegar a aplicaciones de relevancia en el monitoreo de riesgos en estructuras, entre otras muchas.

Se encontró que de mejorarse el método de pulido de los espejos, el cual se hizo manualmente, es posible mejorar considerablemente las características de medición del sensor de desplazamiento. Es importante resaltar que no se hizo un estudio profundo de las aberraciones generadas en el sistema, que debe ser abordado en un trabajo a futuro.

## ANEXOS

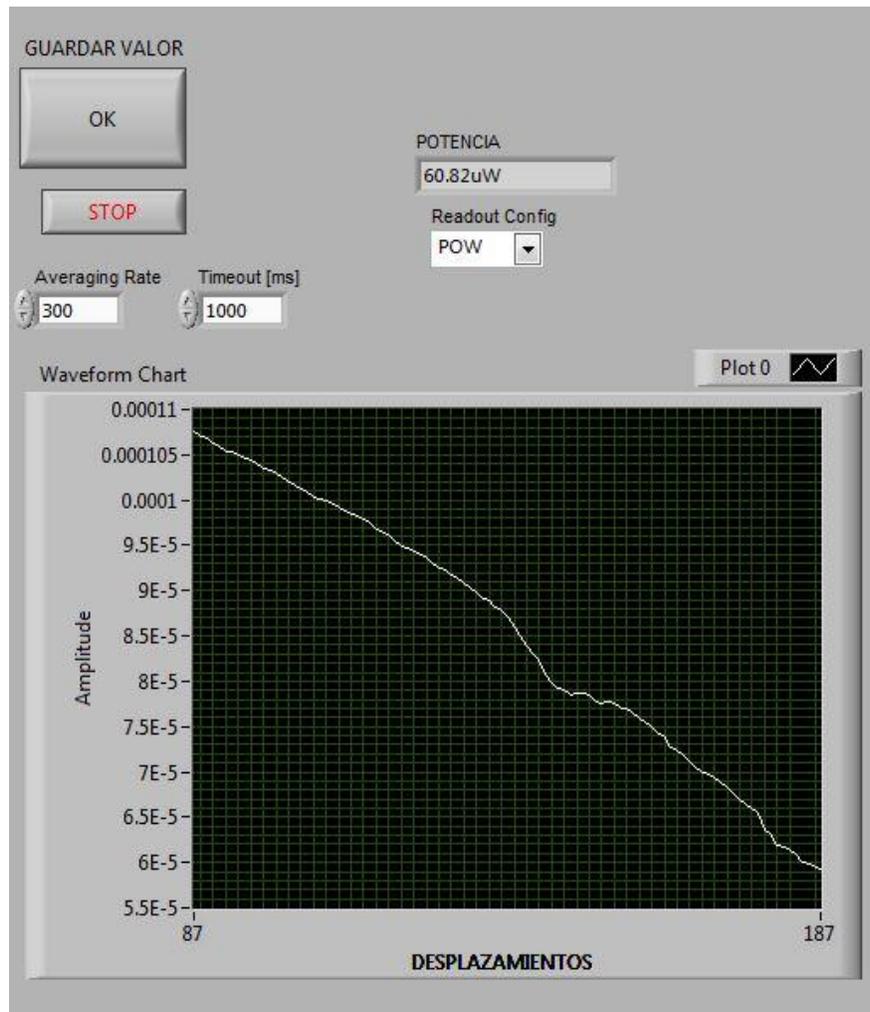
### A) Estructura rediseñada con resortes y carcasa.



Podemos ver en la imagen que la estructura diseñada incluye una cavidad donde se han colocado un par de resortes que tienen como función mantener siempre alineado al espejo **M2** y permitir que el espejo se deslice dentro de la cavidad cuando se aplica una fuerza para evitar la concentración excesiva de esfuerzos en el espejo evitando así su fractura.

También incluye barrenos para sujetarse con tornillos sobre una platina con tres grados de libertad, de ésta manera facilita la alineación del sensor.

## B) Interfaz y adquisición de valores para pruebas con detector de potencia óptica.



El detector de potencia óptica de Thorlabs® modelo PM100USB incluye el software con los drivers para poder interactuar con LabVIEW®. Incluye los bloques de programa para inicio y lectura de datos con el detector. Dichos bloques fueron usados para generar la interfaz de la imagen anterior, agregando un bloque para almacenar los datos y otro para visualizarlo en una gráfica previa. Dado que los desplazamientos generados a través del brazo de palanca y el tornillo micrométrico no están sujetos al tiempo si no más bien a la ocurrencia de los eventos, se colocó un botón para que cada vez que se aplicara un nuevo desplazamiento en el sensor éste fuera guardado y desplegado en la pantalla a través de la gráfica, de ésta forma y dado que el spot del haz se colocó de manera inicial a la mitad de la navaja, podemos generar gráficas con pendientes negativas por el decaimiento de la potencia incidente en el detector.