

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DIVISION DE INGENIERIA ELÉCTRICA-ELECTRÓNICA**

**DENSÍMETRO DE MICROPARTÍCULAS BASADO EN**  
**EL USO DE UN SENSOR ÓPTICO DE**  
**DESPLAZAMIENTOS NANÓMETRICOS**

**TESIS**

**PARA OBTENER EL TITULO DE:**  
**INGENIERA ELÉCTRICA - ELECTRÓNICA**

**PRESENTA:**  
**RAMÍREZ IBARRA ANGÉLICA**

**DIRECTOR DE TESIS: DR. GABRIEL EDUARDO SANDOVAL ROMERO**

**CIUDAD UNIVERSITARIA**

**2006**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

## ÍNDICE

### INTRODUCCIÓN

### CAPÍTULO 1

#### ANTECEDENTES DE FOTÓNICA Y ÓPTICA

1.1. Funcionamiento interno de un láser.....	1
1.1.2. Teoría de las fuentes de emisión/radiación.....	5
1.2. Diodos emisores de luz (Leds) y Diodos láser.....	7
1.2.1. Características generales de láseres.....	9
1.3. Características del láser a implementar.....	14
1.4. Teoría de los fotodetectores.....	15
1.4.1. Características de los fotodetectores.....	17
1.5. Fotodiodos semiconductores y tipos de fotodetectores.....	20
1.6. Sistemas de medición y sus características generales. ....	22
1.7. Características de actuación del sistema y tipos de error.....	24
1.7.1 Características de la magnitud a medir.....	30
1.8. Características estáticas y sensibilidad.....	31
CONCLUSIONES.....	34
BIBLIOGRAFÍA.....	35

### CAPÍTULO 2

#### MÉTODO DE DEFLEXIÓN DE HAZ LÁSER.

2.1. Introducción al método de deflexión de haz láser.....	37
2.2 Analisis comparativo en terminos de sensibilidad entre el interferometro de Michelson y el OBDM.....	39
2.2.1 Características de señal a ruido del método OBDM.....	42
2.2.2. Análisis matemático de sensibilidad de los diferentes montajes en la técnica de deflexión de haz láser.....	46
2.3. Límites de los diferentes esquemas de detección implementados en el método de deflexión del haz láser. Comparación entre detectores de split y de efecto lateral PSD.....	48
2.4. Diversas fuentes de ruido en el sistema.....	52
2.5. Transducción óptica a electrónica, etapa de amplificación del fotodetector...56	
CONCLUSIONES.....	60
BIBLIOGRAFÍA.....	61

## CAPÍTULO 3

### ANÁLISIS Y APLICACIONES DEL DENSÍMETRO DE MICROPARTÍCULAS BASADO EN EL MÉTODO DE DEFLEXIÓN DE HAZ LÁSER OCUPANDO UN SENSOR ÓPTICO

3.1. Implementación del método de deflexión de haz láser en el densímetro de micropartículas.....	63
3.1.1. Justificación de la firmeza del sistema.....	68
3.1.2. Método de calibración tomando como líquido patrón el agua.....	72
3.2. Análisis de los resultados obtenidos mediante el método de deflexión del haz láser como sensor de desplazamientos.....	73
3.2.1. Cálculos matemáticos para las magnitudes de los desplazamientos.....	75
3.3. Aplicación de nuestro sistema como sensor de densidades de sustancias.....	84
CONCLUSIONES.....	86
BIBLIOGRAFÍA.....	88

## CAPÍTULO 4

### DISCUSIÓN, PERSPECTIVAS Y CONCLUSIONES

4.1. Importancia de la dependencia de la densidad con el tamaño de las partículas de la sustancias.....	90
4.2. Análisis y características de dispositivos análogos.....	92
4.3. Características particulares del densímetro de micropartículas.....	93
4.4. Perfeccionamientos a realizar al sistema.....	95
4.5. Aplicaciones inmediatas y futuras del sistema.....	96
CONCLUSIONES GENERALES.....	97
BIBLIOGRAFÍA.....	101

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES GENERALES.....	102
--	-----

#### PUBLICACIONES DESPRENDIDAS DE ESTE TRABAJO

Participación de esta investigación en el XIX Congreso SOMI (Sociedad Mexicana de Instrumentación).....	102
---	-----

Participación de esta investigación en el V Congreso de la optica en la industria CENAM (Centro Nacional de Metrología).....	109
--	-----

## INTRODUCCIÓN

La motivación de esta investigación esta inmiscuida de manera inherente a los avances tecnológicos en la ingeniería electrónica, porque éstos se están haciendo cada vez más eficientes, asimismo la miniaturización juega un papel decisivo en este principio de siglo. Es debido a esto que las innovaciones tecnológicas se encaminan hacia la nanotecnología y las posibles aplicaciones que ésta puede ofrecer en muchos campos de la ciencia; es aquí donde éste trabajo basa su importancia, al realizarse mediciones de desplazamientos en baja escala que pueden ser muy útiles en campos como la ingeniería, la física e incluso a la química o en la industria. Es una aplicación poderosa el lograr realizar mediciones de la densidad en micropartículas de manera confiable y eficiente aplicando el método deflexión de haz láser.

Como se analizará ampliamente en este trabajo, la técnica de deflexión de haz láser ha sido utilizada en muchas aplicaciones de diversos campos de investigación, y en todos ha sido muy útil, ya que ha podido utilizarse de muchas maneras y ahorrar costo, tiempo en proyectos, además de ser de simple implementación, en comparación con otros interferómetros que son utilizados con el mismo fin.

En el desarrollo del presente trabajo existieron muchos principios y teorías que se debieron establecer para entender de mejor manera esta investigación, para lograr su comprensión se analizarán conceptos y las ecuaciones a lo largo de todo este trabajo, principalmente en el análisis del método de deflexión de haz láser, del cuál se analizarán sus componentes a lo largo del capítulo uno y dos.

En la presente investigación se establece el planteamiento de dos objetivos que se pretenden alcanzar al concluir este trabajo, uno general y el segundo particular: el primero consiste en registrar desplazamientos de baja escala con alta sensibilidad, que posean la magnitud suficiente para conseguir la resolución que se requiere, una vez logrado sensar estos pequeños desplazamientos, se podrá alcanzar el segundo objetivo el cuál consiste en determinar la densidad de polvos con un método alterno a los que ya conocidos y con una buena eficiencia.

En el capítulo uno, se estudiarán las características de los elementos que conforman nuestro sistema, comenzando por el análisis del funcionamiento interno del láser, las fuentes de emisión y radiación, los tipos de láseres que existen y cuál es el que se utilizará, se explica también como opera un fotosensor y su importancia en este trabajo. En este capítulo se establecen los principios mínimos para comprender el proceso de emisión láser, su funcionamiento, la descripción y selección del que se utilizó así como el análisis de sus características, el porque es parte fundamental de esta investigación y de que manera ayuda a alcanzar los resultados obtenidos; analizamos las características que debe poseer un sistema de medición como el que se diseñó, tales como: precisión, calibración, exactitud, ancho de banda, linealidad, sensibilidad, rango de detección entre otras. Finalmente definimos las características estáticas del sistema y los cambios en las mediciones debido al medio ambiental.

En el capítulo dos se estudia detalladamente el método de deflexión de haz láser y algunas de sus aplicaciones, además de nuestro análisis particular en la medición de desplazamientos, así como el análisis matemático y los principios en los cuáles está basado el dispositivo diseñado. Se examina la manera en que afectan al sistema las características del medio ambiente, se analiza también la configuración mínima se debe implementar para alcanzar los resultados propuestos, etc.

Se ilustran algunas clases de ruido que se deben tomar en cuenta, el diseño óptico-electrónico del transductor que se debió realizar para lograr la interacción del dispositivo con la computadora y el multímetro. Se analiza la manera en la que influye el ambiente en él mediante los tipos de ruido que lo afectan, perturbaciones externas e internas, finalmente se realizan las conclusiones de esta etapa.

En el capítulo tres se estudian las características de los elementos que componen nuestro sistema, la importancia del proceso de calibración y la magnitud de los resultados obtenidos, también se analizan las gráficas obtenidas de las sustancias con las cuáles se midieron los desplazamientos, se realiza una descripción detallada del funcionamiento del sistema. Asimismo se explica la construcción del sistema, de que forma debe implementarse para obtener mejores resultados, se enuncian los cálculos matemáticos para obtener las magnitudes de los desplazamientos obtenidos, y se expone la aplicación del transductor como densímetro de micropartículas, finalmente se realizan las conclusiones referentes a los resultados obtenidos.

En el capítulo cuatro se fundamenta la importancia de las mediciones de micropartículas en polvos finos, se realiza la comparación de nuestro método con un equipo ya existente en el mercado, se estudian las características particulares del densímetro y se analizan las limitantes de nuestro diseño; igualmente se hace un análisis de la flexibilidad del método en cuánto a los posibles cambios que debemos realizar para hacerlo más eficiente, cuáles son los parámetros que se deben respetar de la configuración y posteriormente tenemos las conclusiones generales de esta investigación.

Finalmente se anexan las publicaciones en las cuáles ha participado esta investigación: en el Congreso XIX del SOMI (Sociedad Mexicana de Instrumentación, Pachuca Hidalgo 2004) como en el Congreso V del CENAM (Centro Nacional de Metrología, Querétaro 2005).

## ***CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES DE FOTÓNICA Y ÓPTICA.***

### **INTRODUCCIÓN**

El proceso del diseño de un transductor es muy interesante y en algunos momentos difícil, como se verá durante este trabajo, ya que aunque el trabajar con transductores esta muy ligado a la ingeniería de muchas ramas, el proceso de diseño consiste en varias etapas de diseño, calibración y características propias, así como el estudio del comportamiento característico del sistema. Además de que se deben tomar en cuenta características propias mínimas del sistema tales como: sensibilidad, fidelidad, reproducibilidad, linealidad entre otras más, las cuáles se analizan y son importantes en la magnitud de nuestros resultados.

En este primer capítulo se realiza un análisis de los requerimientos mínimos para llegar a comprender de manera general el funcionamiento de la propuesta de diseño, se hablará de los diferentes tipos de láseres y sus características generales, también se explicará el funcionamiento del fotosensor y su importancia en el método.

También se hará la discriminación de las clases de errores que se pueden presentar en el sistema y que pueden modificar la respuesta de este, por lo que es importante tomar en cuenta la magnitud de estos, su influencia en el comportamiento característico del sistema y se debe estudiar la relación señal a ruido del sistema, en orden a tratar de minimizarlos lo más posible.

Es en esta etapa cuando se puede ver que la magnitud de las aplicaciones de la optoelectrónica y en particular del láser en muchos campos de investigación ha venido a revolucionar no solo el campo de la ciencia y la tecnología, sino que además se ha podido aplicar exitosa y paulatinamente en nuestra vida diaria, desde la manera en que se guarda la información en formato de disco compacto, hasta la microcirugía realizada con láseres.

Como mencionamos en la introducción, hoy en día es muy importante el desarrollo de la ciencia hacia su aplicación de nuevas tecnologías con respecto al campo de la microelectrónica, es decir, que los avances mientras más se eficientizan, más se compactan, es por esto que este trabajo cobra su importancia bajo este principio, porque la nanotecnología se encuentra en un estado de avance constante, y sería interesante el poder aplicar este trabajo hacia otras áreas, así ésta técnica podría ser aplicada en otros campos de la ciencia que quizás en este momento no sea muy lógica su aplicación o no se tenga muy clara.

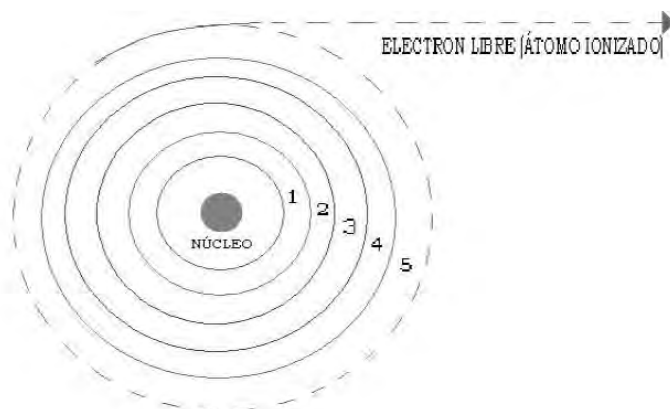
## 1.1 Funcionamiento interno de un láser

En 1913 el físico Niels Bohr propuso un modelo atómico<sup>1</sup> en el cuál los electrones únicamente pueden encontrarse en un número discreto de órbitas alrededor del núcleo; para que un electrón pase de una órbita a otra debe emitir o absorber según sea el caso un “cuanto” de energía. Para que el electrón pase de la primera a la segunda órbita (*figura 1.1*) necesita recibir un cuanto de energía entre las órbitas donde se encuentre. Tenemos también el caso cuando el electrón recibe tantos cuantos que ya no hay más órbitas a las cuáles pueda pasar, entonces se crea un electrón libre y se separará del átomo, ya que no hay más órbitas superiores a las cuáles pueda saltar. De esta manera Bohr sintetizó con su modelo los resultados experimentales de Rutherford y las proposiciones teóricas de Planck.

El principio fundamental del láser, se basa en 3 procesos de la interacción fotón-átomo, los cuáles son necesarios para comprender plenamente su operación: el primero, es el proceso de absorción, el cuál es la relación entre un fotón (cuanto de radiación electromagnética) y un átomo, que inicialmente se encuentra en su estado base (sin excitación), el resultado de la interacción es que el átomo “absorbe” al fotón y usa su energía para pasar a su siguiente estado de excitación. La segunda interacción del fotón-átomo es el proceso de emisión espontánea, ésta sucede cuando un átomo se encuentra excitado inicialmente, éste de forma espontánea y en un tiempo breve ( $10^{-8}$  segundos alrededor de 100 nanosegundos) vuelva a su estado base o estable, emitiendo en el proceso un fotón con energía igual a la diferencia de energía existente entre los 2 estados (excitado y base). El fotón se emite en una dirección totalmente aleatoria.

Finalmente, el tercer proceso importante de interacción átomo-fotón, es el proceso de emisión estimulada, su existencia fue propuesta por Albert Einstein en 1917, como ya se había mencionado es uno de los procesos fundamentales para el principio de funcionamiento láser.

En éste proceso se tiene la interacción entre un fotón y un átomo que inicialmente se encuentra en su estado excitado; como resultado de la interacción del fotón con el átomo, el átomo pasa a su estado base emitiendo en el proceso un fotón que adquiere las mismas características de dirección y fase que el fotón con el que interactúa inicialmente, debido a esto, decimos que la radiación electromagnética que resulta es coherente.



*Figura 1.1. Estructura de un átomo de acuerdo con la teoría de Bohr.*



El principio fundamental para lograr la amplificación coherente de la luz es la amplificación de la luz por emisión estimulada de radiación (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation por sus siglas en inglés*) conocida más cotidianamente como proceso LASER.

Sin embargo para el análisis del funcionamiento del láser real, se deben considerar simultáneamente los 3 procesos anteriores, el de absorción, el de emisión espontánea y el de emisión estimulada. Tenemos que el proceso de emisión estimulada tiende a amplificar el flujo incidente de fotones, dependiendo de la cantidad de átomos que se encuentren en el nivel superior o excitado, llamémosle  $N_2$ , mientras que el proceso de absorción tiende a disminuir el flujo incidente dependiendo de la cantidad de átomos que se encuentren en el nivel base inferior  $N_1$ , al considerar simultáneamente los dos procesos el resultado final dependerá de la cantidad de átomos que se encuentren en el estado excitado y en el base. Si estas cantidades son iguales, tendremos entonces, que en promedio, la amplificación y la absorción que sufre el flujo inicial son iguales, y el flujo final no será ni mayor ni menor que el flujo de fotones inicialmente incidente. Es decir que el cambio neto del flujo de fotones por unidad de longitud es cero:

$$N_2 = N_1 \quad (1.1)$$

La condición necesaria para tener amplificación del flujo inicial de fotones se define por *Si*, esto es que el número de átomos excitados  $N_2$  que se encuentran en la cavidad, sea mayor que el número de átomos que se encuentran en su estado base  $N_1$ . Para ello es necesario realizar una inversión de población, esto es, conseguir que la mayoría de los átomos que se encuentran en la cavidad amplificadora cambien de su estado base, (estado normal de los átomos sin excitación) a su estado de excitación, este proceso de cambio de estado es llamado inversión de población.

La emisión estimulada permite a un fotón inducir un átomo que se encuentra en un nivel más alto de energía o excitado, hacia un nivel de energía más bajo y en este proceso emitir un fotón con las mismas características del primero (misma frecuencia, dirección y fase). Estos dos fotones (el generado y el que interactúa) pueden servir para estimular la emisión de dos fotones adicionales, de esta manera sucesivamente, se preservarán las propiedades del flujo de fotones. El resultado es la amplificación de luz coherente, debido a que la emisión estimulada ocurre cuando la energía del fotón es casi igual a la diferencia de energía de transición atómica (estado base y estado excitado), este proceso está restringido por la banda de frecuencias determinadas por el ancho de las líneas atómicas.

Para que exista el cambio de estado de los átomos (del estado base al estado excitado), es necesario un tipo de dispositivo que proporcione la energía que los átomos de la cavidad amplificadora requieren, para lograr el cambio hacia su estado de excitación (inversión de población). Este dispositivo recibe el nombre de *sistema de bombeo*, de los cuales existen varios tipos, como el óptico (con un lámpara flash o un láser), eléctrico (con una descarga de gas, un electrón o un rayo iónico, o por medio de electrones y huecos), químico (mediante una flama) o incluso a través de explosiones nucleares para lograr acción láser de rayos X. De estos bombeos ópticos el más empleado es el de tipo eléctrico y es el se analizará por disponibilidad.

El dispositivo de bombeo óptico produce una intensa descarga eléctrica a través de los átomos que se encuentran en la cavidad amplificadora, es así como los electrones energéticos de la

## INTRODUCCIÓN

La motivación de esta investigación esta inmiscuida de manera inherente a los avances tecnológicos en la ingeniería electrónica, porque éstos se están haciendo cada vez más eficientes, asimismo la miniaturización juega un papel decisivo en este principio de siglo. Es debido a esto que las innovaciones tecnológicas se encaminan hacia la nanotecnología y las posibles aplicaciones que ésta puede ofrecer en muchos campos de la ciencia; es aquí donde éste trabajo basa su importancia, al realizarse mediciones de desplazamientos en baja escala que pueden ser muy útiles en campos como la ingeniería, la física e incluso a la química o en la industria. Es una aplicación poderosa el lograr realizar mediciones de la densidad en micropartículas de manera confiable y eficiente aplicando el método deflexión de haz láser.

Como se analizará ampliamente en este trabajo, la técnica de deflexión de haz láser ha sido utilizada en muchas aplicaciones de diversos campos de investigación, y en todos ha sido muy útil, ya que ha podido utilizarse de muchas maneras y ahorrar costo, tiempo en proyectos, además de ser de simple implementación, en comparación con otros interferómetros que son utilizados con el mismo fin.

En el desarrollo del presente trabajo existieron muchos principios y teorías que se debieron establecer para entender de mejor manera esta investigación, para lograr su comprensión se analizarán conceptos y las ecuaciones a lo largo de todo este trabajo, principalmente en el análisis del método de deflexión de haz láser, del cuál se analizarán sus componentes a lo largo del capítulo uno y dos.

En la presente investigación se establece el planteamiento de dos objetivos que se pretenden alcanzar al concluir este trabajo, uno general y el segundo particular: el primero consiste en registrar desplazamientos de baja escala con alta sensibilidad, que posean la magnitud suficiente para conseguir la resolución que se requiere, una vez logrado sensar estos pequeños desplazamientos, se podrá alcanzar el segundo objetivo el cuál consiste en determinar la densidad de polvos con un método alterno a los que ya conocidos y con una buena eficiencia.

En el capítulo uno, se estudiarán las características de los elementos que conforman nuestro sistema, comenzando por el análisis del funcionamiento interno del láser, las fuentes de emisión y radiación, los tipos de láseres que existen y cuál es el que se utilizará, se explica también como opera un fotosensor y su importancia en este trabajo. En este capítulo se establecen los principios mínimos para comprender el proceso de emisión láser, su funcionamiento, la descripción y selección del que se utilizó así como el análisis de sus características, el porque es parte fundamental de esta investigación y de que manera ayuda a alcanzar los resultados obtenidos; analizamos las características que debe poseer un sistema de medición como el que se diseñó, tales como: precisión, calibración, exactitud, ancho de banda, linealidad, sensibilidad, rango de detección entre otras. Finalmente definimos las características estáticas del sistema y los cambios en las mediciones debido al medio ambiental.

En el capítulo dos se estudia detalladamente el método de deflexión de haz láser y algunas de sus aplicaciones, además de nuestro análisis particular en la medición de desplazamientos, así como el análisis matemático y los principios en los cuáles está basado el dispositivo diseñado. Se examina la manera en que afectan al sistema las características del medio ambiente, se analiza también la configuración mínima se debe implementar para alcanzar los resultados propuestos, etc.

Se ilustran algunas clases de ruido que se deben tomar en cuenta, el diseño óptico-electrónico del transductor que se debió realizar para lograr la interacción del dispositivo con la computadora y el multímetro. Se analiza la manera en la que influye el ambiente en él mediante los tipos de ruido que lo afectan, perturbaciones externas e internas, finalmente se realizan las conclusiones de esta etapa.

En el capítulo tres se estudian las características de los elementos que componen nuestro sistema, la importancia del proceso de calibración y la magnitud de los resultados obtenidos, también se analizan las gráficas obtenidas de las sustancias con las cuáles se midieron los desplazamientos, se realiza una descripción detallada del funcionamiento del sistema. Asimismo se explica la construcción del sistema, de que forma debe implementarse para obtener mejores resultados, se enuncian los cálculos matemáticos para obtener las magnitudes de los desplazamientos obtenidos, y se expone la aplicación del transductor como densímetro de micropartículas, finalmente se realizan las conclusiones referentes a los resultados obtenidos.

En el capítulo cuatro se fundamenta la importancia de las mediciones de micropartículas en polvos finos, se realiza la comparación de nuestro método con un equipo ya existente en el mercado, se estudian las características particulares del densímetro y se analizan las limitantes de nuestro diseño; igualmente se hace un análisis de la flexibilidad del método en cuánto a los posibles cambios que debemos realizar para hacerlo más eficiente, cuáles son los parámetros que se deben respetar de la configuración y posteriormente tenemos las conclusiones generales de esta investigación.

Finalmente se anexan las publicaciones en las cuáles ha participado esta investigación: en el Congreso XIX del SOMI (Sociedad Mexicana de Instrumentación, Pachuca Hidalgo 2004) como en el Congreso V del CENAM (Centro Nacional de Metrología, Querétaro 2005).

## ***CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES DE FOTÓNICA Y ÓPTICA.***

### **INTRODUCCIÓN**

El proceso del diseño de un transductor es muy interesante y en algunos momentos difícil, como se verá durante este trabajo, ya que aunque el trabajar con transductores esta muy ligado a la ingeniería de muchas ramas, el proceso de diseño consiste en varias etapas de diseño, calibración y características propias, así como el estudio del comportamiento característico del sistema. Además de que se deben tomar en cuenta características propias mínimas del sistema tales como: sensibilidad, fidelidad, reproducibilidad, linealidad entre otras más, las cuáles se analizan y son importantes en la magnitud de nuestros resultados.

En este primer capítulo se realiza un análisis de los requerimientos mínimos para llegar a comprender de manera general el funcionamiento de la propuesta de diseño, se hablará de los diferentes tipos de láseres y sus características generales, también se explicará el funcionamiento del fotosensor y su importancia en el método.

También se hará la discriminación de las clases de errores que se pueden presentar en el sistema y que pueden modificar la respuesta de este, por lo que es importante tomar en cuenta la magnitud de estos, su influencia en el comportamiento característico del sistema y se debe estudiar la relación señal a ruido del sistema, en orden a tratar de minimizarlos lo más posible.

Es en esta etapa cuando se puede ver que la magnitud de las aplicaciones de la optoelectrónica y en particular del láser en muchos campos de investigación ha venido a revolucionar no solo el campo de la ciencia y la tecnología, sino que además se ha podido aplicar exitosa y paulatinamente en nuestra vida diaria, desde la manera en que se guarda la información en formato de disco compacto, hasta la microcirugía realizada con láseres.

Como mencionamos en la introducción, hoy en día es muy importante el desarrollo de la ciencia hacia su aplicación de nuevas tecnologías con respecto al campo de la microelectrónica, es decir, que los avances mientras más se eficientizan, más se compactan, es por esto que este trabajo cobra su importancia bajo este principio, porque la nanotecnología se encuentra en un estado de avance constante, y sería interesante el poder aplicar este trabajo hacia otras áreas, así ésta técnica podría ser aplicada en otros campos de la ciencia que quizás en este momento no sea muy lógica su aplicación o no se tenga muy clara.

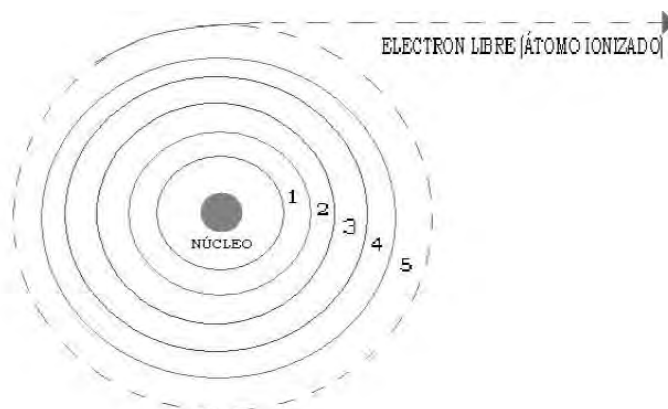
## 1.1 Funcionamiento interno de un láser

En 1913 el físico Niels Bohr propuso un modelo atómico<sup>1</sup> en el cuál los electrones únicamente pueden encontrarse en un número discreto de órbitas alrededor del núcleo; para que un electrón pase de una órbita a otra debe emitir o absorber según sea el caso un “cuanto” de energía. Para que el electrón pase de la primera a la segunda órbita (*figura 1.1*) necesita recibir un cuanto de energía entre las órbitas donde se encuentre. Tenemos también el caso cuando el electrón recibe tantos cuantos que ya no hay más órbitas a las cuáles pueda pasar, entonces se crea un electrón libre y se separará del átomo, ya que no hay más órbitas superiores a las cuáles pueda saltar. De esta manera Bohr sintetizó con su modelo los resultados experimentales de Rutherford y las proposiciones teóricas de Planck.

El principio fundamental del láser, se basa en 3 procesos de la interacción fotón-átomo, los cuáles son necesarios para comprender plenamente su operación: el primero, es el proceso de absorción, el cuál es la relación entre un fotón (cuanto de radiación electromagnética) y un átomo, que inicialmente se encuentra en su estado base (sin excitación), el resultado de la interacción es que el átomo “absorbe” al fotón y usa su energía para pasar a su siguiente estado de excitación. La segunda interacción del fotón-átomo es el proceso de emisión espontánea, ésta sucede cuando un átomo se encuentra excitado inicialmente, éste de forma espontánea y en un tiempo breve ( $10^{-8}$  segundos alrededor de 100 nanosegundos) vuelva a su estado base o estable, emitiendo en el proceso un fotón con energía igual a la diferencia de energía existente entre los 2 estados (excitado y base). El fotón se emite en una dirección totalmente aleatoria.

Finalmente, el tercer proceso importante de interacción átomo-fotón, es el proceso de emisión estimulada, su existencia fue propuesta por Albert Einstein en 1917, como ya se había mencionado es uno de los procesos fundamentales para el principio de funcionamiento láser.

En éste proceso se tiene la interacción entre un fotón y un átomo que inicialmente se encuentra en su estado excitado; como resultado de la interacción del fotón con el átomo, el átomo pasa a su estado base emitiendo en el proceso un fotón que adquiere las mismas características de dirección y fase que el fotón con el que interactúa inicialmente, debido a esto, decimos que la radiación electromagnética que resulta es coherente.



*Figura 1.1. Estructura de un átomo de acuerdo con la teoría de Bohr.*

El principio fundamental para lograr la amplificación coherente de la luz es la amplificación de la luz por emisión estimulada de radiación (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation por sus siglas en inglés*) conocida más cotidianamente como proceso LASER.

Sin embargo para el análisis del funcionamiento del láser real, se deben considerar simultáneamente los 3 procesos anteriores, el de absorción, el de emisión espontánea y el de emisión estimulada. Tenemos que el proceso de emisión estimulada tiende a amplificar el flujo incidente de fotones, dependiendo de la cantidad de átomos que se encuentren en el nivel superior o excitado, llamémosle  $N_2$ , mientras que el proceso de absorción tiende a disminuir el flujo incidente dependiendo de la cantidad de átomos que se encuentren en el nivel base inferior  $N_1$ , al considerar simultáneamente los dos procesos el resultado final dependerá de la cantidad de átomos que se encuentren en el estado excitado y en el base. Si estas cantidades son iguales, tendremos entonces, que en promedio, la amplificación y la absorción que sufre el flujo inicial son iguales, y el flujo final no será ni mayor ni menor que el flujo de fotones inicialmente incidente. Es decir que el cambio neto del flujo de fotones por unidad de longitud es cero:

$$N_2 = N_1 \quad (1.1)$$

La condición necesaria para tener amplificación del flujo inicial de fotones se define por *Si*, esto es que el número de átomos excitados  $N_2$  que se encuentran en la cavidad, sea mayor que el número de átomos que se encuentran en su estado base  $N_1$ . Para ello es necesario realizar una inversión de población, esto es, conseguir que la mayoría de los átomos que se encuentran en la cavidad amplificadora cambien de su estado base, (estado normal de los átomos sin excitación) a su estado de excitación, este proceso de cambio de estado es llamado inversión de población.

La emisión estimulada permite a un fotón inducir un átomo que se encuentra en un nivel más alto de energía o excitado, hacia un nivel de energía más bajo y en este proceso emitir un fotón con las mismas características del primero (misma frecuencia, dirección y fase). Estos dos fotones (el generado y el que interactúa) pueden servir para estimular la emisión de dos fotones adicionales, de esta manera sucesivamente, se preservarán las propiedades del flujo de fotones. El resultado es la amplificación de luz coherente, debido a que la emisión estimulada ocurre cuando la energía del fotón es casi igual a la diferencia de energía de transición atómica (estado base y estado excitado), este proceso está restringido por la banda de frecuencias determinadas por el ancho de las líneas atómicas.

Para que exista el cambio de estado de los átomos (del estado base al estado excitado), es necesario un tipo de dispositivo que proporcione la energía que los átomos de la cavidad amplificadora requieren, para lograr el cambio hacia su estado de excitación (inversión de población). Este dispositivo recibe el nombre de *sistema de bombeo*, de los cuales existen varios tipos, como el óptico (con un lámpara flash o un láser), eléctrico (con una descarga de gas, un electrón o un rayo iónico, o por medio de electrones y huecos), químico (mediante una flama) o incluso a través de explosiones nucleares para lograr acción láser de rayos X. De estos bombeos ópticos el más empleado es el de tipo eléctrico y es el se analizará por disponibilidad.

El dispositivo de bombeo óptico produce una intensa descarga eléctrica a través de los átomos que se encuentran en la cavidad amplificadora, es así como los electrones energéticos de la

descarga transfieren por colisiones electrón-átomo parte de su energía a los átomos contenidos en la cavidad, logrando que éstos pasen de su estado base a su estado excitado, además consideramos una cavidad amplificadora a la que se le colocan en sus extremos un par de espejos planos o ligeramente cóncavos; este sistema de un par de espejos paralelos recibe el nombre de *resonador óptico*, su importancia radica en que uno de los espejos del resonador es casi 100% reflejante y el otro tiene una reflectancia atípica de alrededor del 90%.

La presencia del resonador óptico, nos permite extraer en forma eficiente la energía que el sistema de bombeo ha depositado en los átomos contenidos en la cavidad amplificadora; a raíz de que uno de los espejos del resonador presenta una reflectancia menor (del 90%, figura 1.2), esto permite que el 10% de los fotones sean transmitidos fuera del resonador óptico, formando un haz de luz monocromático muy intenso (constituido por fotones de energía idéntica) y coherente (todos sus fotones están en fase ya que se produjeron durante el proceso de emisión estimulada), además es altamente direccional; estas son propiedades fundamentales de la luz láser, las cuáles son primordiales para nuestra investigación como se verá mas adelante.

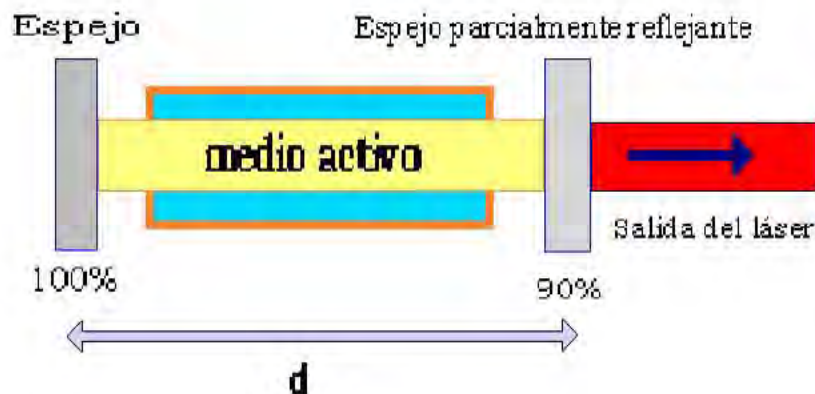


Figura 1.2. Resonador Óptico.

Generalmente el tiempo que dura un pulso de luz láser producido por un láser pulsado, depende de la duración del pulso óptico o eléctrico que produce el sistema de bombeo; para numerosas aplicaciones prácticas, la duración de tales pulsos láser es bastante grande y la intensidad del pulso es demasiado pequeña. Debido a esto, se han diseñado diversas técnicas que permiten obtener pulsos láser de duración muy corta y de alta intensidad, características que son vitales para toda aplicación de un láser pulsado.

La técnica para la obtención de pulsos cortos e intensos es llamada “conmutación de  $Q$ ” ( $Q$ -switching, término en inglés). En el estudio de los sistemas oscilantes se tiene el concepto de “factor de calidad” denotado habitualmente por  $Q$ , éste se define como el cociente de la energía  $E$  almacenada por el sistema oscilante dividido entre la rapidez con que dicha energía es perdida por el sistema. La rapidez con que un sistema pierde energía se denomina *Potencia*, la cuál esta relacionada con la expresión matemática de  $Q$ :

$$Q = \frac{\nu}{2\pi} \quad (1.2)$$

En donde  $\nu$  es la frecuencia natural de oscilación del oscilador, la constante  $\pi = 3.1416$ . Se observa que el factor de calidad nos permite caracterizar las pérdidas de un sistema oscilante. Un oscilador con bajas pérdidas se caracteriza por tener un alto valor de  $Q$ , mientras que un oscilador con altas pérdidas se caracteriza por tener un bajo valor de  $Q$ .

Es posible construir un oscilador óptico que contenga en el interior de su resonador un interruptor óptico que permita variar a voluntad propia el valor  $Q$  de la cavidad dependiendo de la necesidad requerida. En el caso en el cuál el sistema no pueda entrar en oscilación y por tanto no pueda perder energía emitiendo radiación láser hacia el exterior, toda su energía depositada por el sistema de bombeo será asimilada por los átomos contenidos en la cavidad amplificadora; así casi todos los átomos pasarán a su estado excitado y muy pocos permanecerán en su estado base. Debido a esto la cantidad  $N_2 = N_1$  (ecuación. 1.1) alcanzará un valor muy grande (nivel de inversión de población).

Si en el momento en que se presenta un valor muy alto de inversión de población, repentinamente se enciende el interruptor óptico (obteniéndose así un alto valor de  $Q$ ) el sistema entrará violentamente en oscilación y muy pronto se generará un corto e intenso pulso de luz láser. Los valores típicos de duración y potencia de pulsos láser generados son del orden desde  $10 \times 10^{-9}$  a  $100 \times 10^{-9}$  segundos de duración hasta de  $1 \times 10^6$  a  $1 \times 10^8$  [W] de potencia. En contraste con los amplificadores electrónicos, los láseres están basados en la diferencia de energía existente entre niveles, para proporcionar la selección de frecuencias primarias. Esto es natural en resonadores que seleccionan el ancho de banda y la frecuencia de operación; una característica esencial para lograr la amplificación, es la presencia de un gran número de átomos en un nivel de energía superior que en el nivel inferior (nivel de inversión de población) creando así una situación de desequilibrio.

Lograr esta inversión de población, requiere de una fuente de energía para excitar los átomos hacia un nivel más alto de energía (bombeo óptico), un amplificador ideal coherente o láser, es un sistema lineal que incrementa la amplitud de la señal de entrada por un factor fijo (ganancia); una entrada senoidal produce una salida senoidal de la misma frecuencia pero con una mayor amplitud. La ganancia del amplificador ideal es constante para todas las frecuencias dentro del ancho de banda espectral del amplificador, pero este puede generar en la señal de entrada un cambio de fase que variará linealmente con la frecuencia, correspondiendo a un retraso en la salida con respecto a la entrada.

### **1.1.2 Teoría de las fuentes de emisión/radiación.**

Los amplificadores coherentes reales entregan una ganancia y un cambio de fase que dependen de la frecuencia, ambos constituyen la función de transferencia del amplificador. Además de que la saturación introduce componentes armónicas hacia la salida (otras frecuencias), creando así que el ancho de banda del amplificador sea lo suficientemente extenso para dejarlas pasar. Los amplificadores reales también introducen componentes que fluctúan aleatoriamente (ruido), y se presentan a la salida del amplificador a pesar de que en la señal de entrada no se encuentren dichas componentes.



## Ganancia<sup>2</sup>

La densidad de probabilidad ( $s^{-1}$ ) de que un átomo no excitado absorba un solo fotón es (basándonos en la relación entre la transición de sección transversal y el tiempo de vida espontáneo):

$$W_i = \phi \sigma(\nu), \quad (1.3)$$

$$\sigma(\nu) = \left( \frac{\lambda^2}{8\pi t_{sp}} g(\nu) \right), \quad (1.4)$$

En donde  $\sigma$ , es la transición de sección transversal, a una frecuencia  $\nu$ ,  $g(\nu)$  es la función normalizada de forma de línea,  $t_{sp}$  es el tiempo de vida espontáneo,  $\lambda$  es la longitud de onda de la luz en el medio. Esta ecuación también se aplica para el proceso de emisión estimulada. La densidad promedio de fotones absorbidos (número de fotones por unidad de tiempo por unidad de volumen) es  $N_1 W_i$ ; análogamente la densidad promedio de los fotones emitidos (clonados) generada, da como resultado la emisión estimulada  $N_2 W_i$ .

El número de fotones ganados por segundo por unidad de volumen es por lo tanto  $NW_i$ , donde  $N=N_2-N_1$  y es la diferencia de densidad de población. Si  $N$  es positiva se tiene una inversión de población, en tal caso el medio puede actuar como un amplificador y el flujo de fotones puede incrementarse; si es negativo el medio actúa como un atenuador y la densidad del flujo de fotones decrece. En el caso de  $N=0$  el medio es transparente.

Suponiendo que el flujo incidente viaja en dirección de  $z$  (figura 1.3), los fotones de emisión estimulada también lo harán, el bombeo externo suministrará una inversión de población ( $N > 0$ , es decir positiva) que causará el incremento en la densidad del flujo de fotones  $\phi(z)$  al crecer en dirección  $z$ . Debido a que los fotones emitidos estimulan emisiones posteriores, el crecimiento en dirección  $z$  es proporcional a la población en esta posición  $\phi$ , entonces ( $z$ ) se incrementará de manera exponencial.

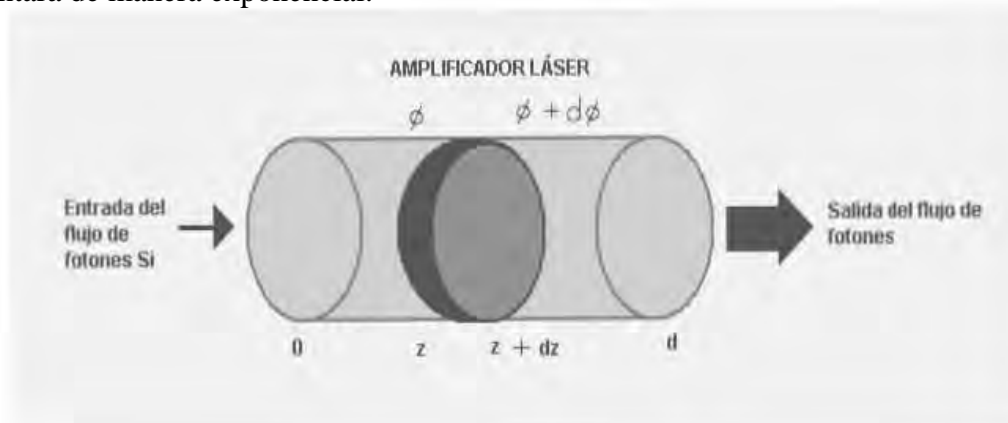


Figura 1.3. Principio de funcionamiento del láser.

Para demostrar este proceso explícitamente, en la figura 1.3, observamos un cilindro de longitud  $dz$  y la densidad de flujo de fotones  $\phi(z)+d\phi(z)$  que entra y sale del cilindro, respectivamente; donde  $d\phi(z)$  es la densidad del flujo de fotones emitido desde el interior del cilindro. El número de fotones incrementándose por unidad de área por unidad de tiempo  $d\phi(z)$

es simplemente el número de fotones aumentados (por el factor de ganancia) por unidad de tiempo por unidad de volumen,  $NW_i$  multiplicado por el espesor del cilindro  $dz$  podemos visualizarlo más fácilmente en la ecuación 1.5:

$$d\phi = NW_i dz; \quad (1.5)$$

Ahora las ecuaciones 1.3 y 1.4 podemos reescribirlas como la diferencial del flujo de fotones con respecto a  $z$  es igual a  $\gamma(v)\phi(z)$  es decir:

$$\frac{d\phi(z)}{dz} = \gamma(v)\phi(z) \quad (1.6)$$

$$\gamma(v) = N\sigma(v) = N \frac{\lambda^2}{8\pi t_{sp}} g(v) \quad (1.7)$$

Donde  $\gamma(v)$  representa la ganancia neta de la densidad de flujo de fotones por unidad de longitud del medio. La solución de la ecuación 1.6 es una función exponencial creciente. Asimismo tenemos que  $\gamma(z)$  también representa la ganancia de la intensidad por unidad de longitud del medio. La ganancia total de amplificación  $G(v)$  queda por tanto definida como la relación entre la densidad del flujo de fotones en la salida del cilindro y la densidad del flujo en la entrada (figura 1.3), en donde  $d$  es la distancia:

$$G(v) = \phi(d)/\phi(0), \quad (1.8)$$

$$G(v) = \exp[\gamma(v)d]; \quad (1.9)$$

## **1.2 Diodos emisores de luz (Leds) y Diodos láser**

La luz también puede ser emitida desde un material semiconductor como el resultado de la interacción electrón-hueco del mismo. Sin embargo, los materiales capaces de emitir tal luz, no brillan a temperatura ambiente, debido a que las concentraciones de electrones y huecos térmicamente excitados, son muy bajas para producir radiación perceptible. Por otro lado, podemos recurrir a fuentes externas de energía que exciten un número suficiente de electrones, para que produzcan grandes cantidades de radiación espontánea causando que el material sea luminiscente (emita fotones). Esto se puede lograr mediante la polarización directa de la juntura, causando así el efecto de inyectar electrones y huecos en la misma región del espacio, la radiación de recombinación resultante es llamada inyección electroluminiscente.

Al haber establecido los criterios necesarios para comprender el funcionamiento de las interacciones fotón-átomo, es claro que la naturaleza simultánea de los electrones y huecos conduce substancialmente a incrementar el flujo de fotones espontáneamente emitidos por un semiconductor. Los electrones son abundantes en un material tipo  $n$ , y los huecos o cavidades en un material tipo  $p$ , pero la generación de grandes cantidades de luz requiere que los

electrones y los huecos sean abundantes en la misma región del espacio; esta condición podría lograrse en la juntura de un diodo tipo  $p-n$  polarizado directamente. La polarización directa causa que una fuerza sea ejercida entre los huecos desde el lado del material  $p$  y los electrones del lado  $n$ , ésta es guiada hacia la región común de juntura por el proceso de inyección de portadores minoritarios, donde se recombinan y emiten fotones.

### Diodos emisores de luz (leds)

Cuando activamos una fuente, obtenemos energía en diversas formas (ya sea en forma de calor, reacciones químicas, corriente eléctrica o una fuente de luz bombeada) que es usada para crear un estado excitado en un material desde el cual la luz será emitida. Los materiales semiconductores pueden ser excitados hacia los estados de emisión-luz, mediante la creación de portadores (electrones-huecos) excesivos, producidos por un campo  $V$  (*forward-bias en inglés polarizado*) aplicado a través de las regiones  $p$  y  $n$  del material semiconductor. En el estado excitado pueden existir recombinaciones ya sea de manera radiativa, emitiendo un fotón de energía  $h\nu$  o bien de modo no radiativo recombinando y disipando en el mismo proceso energía en forma de calor.

La eficiencia con la cuál el semiconductor emite luz depende del tiempo que tarda el estado excitado en decaer hacia su estado original; si  $\tau_r$  es el tiempo que le toma para generar una recombinación radiativa y  $\tau_n$  es el tiempo que necesita para una recombinación no radiativa, la eficiencia interna del dispositivo ( $\eta$ ) puede ser expresada de la siguiente forma por la ecuación:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\tau_r}{\tau_n}} \quad (1.10)$$

Se deduce que el estado excitado es creado por vía de la energía de bombeo activa, la cual puede ser un flujo de electrones que mueve la energía desde el estado de reposo hacia el estado de excitación.

La selección de materiales aspirantes a ser diodos emisores de luz y diodos láser está determinada en gran medida por el tiempo de vida radiativa del estado excitado  $\tau_r$ , el cuál debe ser tan corto como sea posible en base a obtener una alta eficiencia (podemos advertirlo de la ec.1.2 de factor de calidad). Los buenos aspirantes son los átomos de “banda de hueco directo”, que en su última órbita tengan electrones que puedan facilitar sus recombinaciones, son materiales tales como: GaAs, InAs, InP, AlGaAs y GaAsP, los cuáles permiten hacer las recombinaciones directamente hacia el estado no excitado con la emisión de un fotón. Estos materiales tienen tiempos de vida radiativa muy corta, del orden de  $10^{-8}$  a  $10^{-10}$  segundos. Uno de los aspectos importantes de estos materiales semiconductores son sus longitudes de onda de operación.

### 1.2.1 Características generales de láseres.

Si tenemos un semiconductor fijo, que confine luz en una región de longitud de onda guiada y el nivel de luz excede la emisión estimulada necesaria en el diodo, habremos formado un diodo láser<sup>3</sup>.

Esto se puede construir con una estructura de onda guiada a la cuál se le ha recortado la parte final de la estructura para formar espejos reflejantes (los materiales mas usados para diodos láser deben tener un índice de 3 para un buen funcionamiento) e incrementar la corriente por todo el dispositivo, hasta que el resultado del flujo de fotones circulando a través de la cavidad, exceda el nivel necesario para la emisión estimulada.

Podemos ver que la potencia media es superior a la que proporcionan los diodos de emisión láser (*LED-Light emission diode, por sus siglas en inglés*), así como la frecuencia máxima de modulación. En cuanto al espectro de emisión es de notar que varia, desplazándose a mayores longitudes de onda al aumentar la temperatura. Por la rapidez de la emisión estimulada, los láseres pueden ser modulados a velocidades más altas que los *LED*.

Otra característica importante del *LED* láser o diodo láser (*LD*) es la dependencia de la potencia de emisión con la temperatura, lo que obliga a incorporar en el modulo transmisor circuitos de control de corriente de polarización o bien a mantener el láser en un ambiente térmicamente estable.

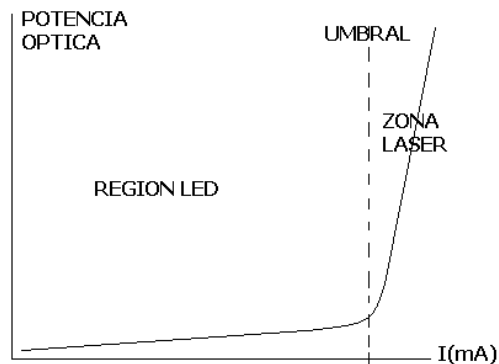
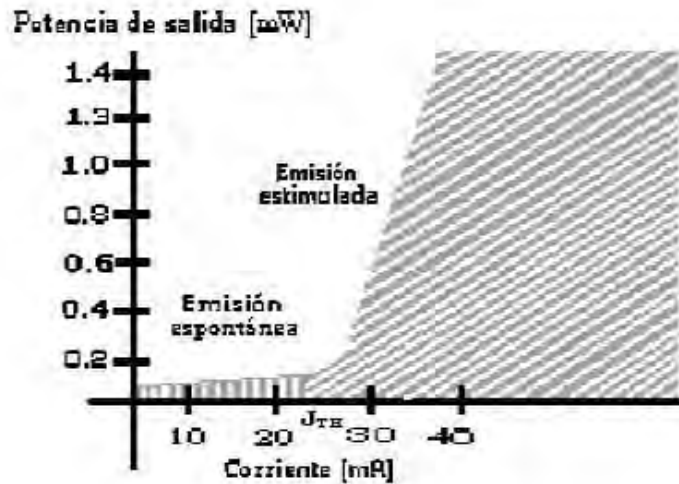


Figura 1.4. Curva corriente-potencia del diodo láser.

Los espejos para un diodo láser son recortados a una determinada distancia para inducir las condiciones de resonancia en la cavidad, estos espejos están separados por  $c/2ln$ , donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío,  $l$  es la longitud de la cavidad formada por los 2 espejos recortados y  $n$  es el índice de refracción de la estructura de luz guiada; cuando el nivel de corriente llega al punto donde, parte de la ganancia envuelta excede las condiciones de disparo necesarias para que se produzca el proceso de amplificación láser, el diodo láser comienza la oscilación y la potencia se incrementa, el número de líneas que recorre se va incrementando y la ganancia envuelta consigue exceder las condiciones de disparo, como se observa en la figura 1.5.



*Figura 1.5. Señal de salida de un diodo láser contra su corriente. Se observa que a muy baja corriente, la salida desde el diodo láser es dominada por emisión espontánea, cuando el nivel de corriente va incrementándose, la condición de disparo es alcanzada y la emisión de luz se genera predominantemente por la emisión estimulada.*

A diferencia de los diodos emisores de luz, el diodo láser tiene un comportamiento exponencial en la emisión estimulada, su nivel de luz de salida sube escalonadamente con el incremento de corriente. Cuando la luz es reflejada hacia el diodo láser operando en o cerca del disparo, el flujo de fotones efectivo en la cavidad cambia dependiendo de la fase relativa y el grado de coherencia circulando en la cavidad. El resultado nos da a la salida de la fuente, luz modulada coherente.

Un semiconductor de amplificación láser es un polarizador o re-enviador de corriente fuertemente dopado, fabricado con uniones *p-n* de material semiconductor de cavidades o huecos directos. La corriente inyectada es lo suficientemente grande como para proporcionar ganancia óptica.

Si se consigue que el coeficiente de ganancia sea lo suficientemente grande, la retroalimentación convierte la amplificación óptica en un oscilador óptico (como se vio en el principio del láser). El dispositivo es llamado semiconductor de inyección láser o diodo láser. El diodo láser (*LD*) es similar al LED (*light-emitting diode*), ya que en ambos la fuente de energía es una corriente eléctrica inyectada a una juntura o unión *p-n*; sin embargo, la luz emitida por un LED es generada por emisión espontánea, mientras que en el diodo láser surge de la emisión espontánea.

En comparación con otros tipos de láseres, los diodos láser poseen muchas ventajas, tales como: tamaño pequeño y debido a esto, facilidad de manipulación, integrabilidad con componentes electrónicos y disminución en el bombeo, así como modulación óptica a través de la corriente eléctrica. El ancho espectral de los diodos láser es típicamente más grande que en otros tipos de láseres. En el laboratorio existen 2 tipos de láseres, el que se utiliza para el proyecto de esta tesis es el diodo láser.

El coeficiente de ganancia  $\gamma(\nu)$  de un amplificador láser semiconductor tiene un valor pico  $\gamma_p$  que es aproximadamente proporcional a la concentración de portadores inyectados, la cuál, es también proporcional a la densidad de corriente inyectada  $J$ . Además, en la ecuación del coeficiente de ganancia pico y de la ecuación de densidad de corriente transparente  $J_T$ , tenemos que  $J$  es la densidad de corriente inyectada y  $l_d$  es el grosor de la juntura:

$$\gamma_p = \alpha \left( \frac{J}{J_T} - 1 \right) \quad (1.11)$$

$$J_T = \frac{el_D}{\eta_i \tau_r} \Delta n_T \quad (1.12)$$

$$\eta_i = \frac{\tau}{\tau_r} \quad (1.13)$$

Donde  $e$  es la carga eléctrica del electrón,  $\tau_r$  es el tiempo de vida de recombinación electrón-hueco radiativo,  $\eta_i = \tau/\tau_r$  es la eficiencia cuántica interna,  $l_D$  es el grosor de la región activa,  $\alpha$  es el coeficiente de equilibrio de absorción térmica, finalmente  $\Delta n_T$  y  $J_T$  es la concentración de portadores inyectados y la densidad de corriente respectivamente. La retroalimentación es usualmente obtenida en razón de la adhesión al plano normal del cristal hacia al plano de la juntura, o mediante pulir las dos superficies paralelas del cristal. La región activa de la juntura  $p-n$ , sirve además como resonador óptico de espejos-planos de longitud  $d$  y de área transversal  $lw$ . Los materiales semiconductores tienen típicamente grandes índices de refracción, con los que la potencia de reflectancia en la interfase del semiconductor-aire es:

$$R = \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2 \quad (1.14)$$

Además de que la ganancia en el medio es suficientemente grande, el índice refractivo discontinuo por si mismo puede servir como una superficie refractiva adecuada por lo tanto los espejos externos son innecesarios. La fuente principal de perdidas en el resonador pueden comenzar desde la reflexión parcial en la superficie del material; esta constituye la utilidad de la luz de láser transmitida. Para un resonador de longitud  $d$  la reflexión del coeficiente de pérdidas se puede expresar como:

$$\alpha_m = \alpha_{m1} + \alpha_{m2} = \frac{1}{2d} \ln \frac{1}{R_1 R_2}; \quad (1.15)$$

Si ambas superficies tienen la misma reflectancia  $R_1 = R_2$  entonces  $\alpha_m = (l_w/d) \ln(l_w/R)$ . El coeficiente total de pérdidas es:

$$\alpha_r = \alpha_s + \alpha_m \quad (1.16)$$

Donde  $\alpha_s$  representa otras fuentes de producción de pérdidas, por ejemplo la que da la absorción de portadores libres en el material semiconductor y el esparcimiento de inhomogeneidades ópticas; por otro lado  $\alpha_s$  incrementa la concentración de impurezas y de imperfecciones interfaciales en heteroestructuras, este puede llegar al valor del rango 10 a 100  $\text{cm}^{-1}$ . Tenemos que el término  $-\alpha$  en la expresión del coeficiente de la ganancia, corresponde a la absorción en el material, la cual también contribuye substancialmente a las pérdidas, sin embargo esta contribución se involucra en el coeficiente de ganancia neta pico  $\gamma_p$  que se definirá más adelante.

Otra aportación importante de las pérdidas en los resultados obtenidos, viene del esparcimiento de la energía óptica en el exterior de la capa activa del amplificador (en dirección perpendicular al plano de la junta).

Las perdidas causadas por esparcimiento óptico pueden ser fenomenológicamente calculadas definiendo el factor de confinamiento  $\Gamma$  para representar la fracción de la energía óptica que yace dentro de la región óptica; asumiendo que la energía fuera de la región activa es totalmente desperdiciada,  $\Gamma$  es el factor por el cuál la ganancia es reducida, o equivalentemente, el factor por el cuál el coeficiente de pérdidas se incrementa, la ecuación será expresada como:

$$\alpha_r = \frac{1}{\Gamma} (\alpha_s + \alpha_m) \quad (1.17)$$

### **Condición de ganancia: umbral del láser<sup>2</sup>**

La condición de oscilación láser es la que se presenta cuando la ganancia excede las pérdidas  $\gamma_p > \alpha_r$ ; el coeficiente de ganancia de umbral (máximo) es  $\alpha_r$  (ec. 1.16) Si hacemos que el coeficiente de ganancia neta pico  $\gamma_p = \alpha_r$  y la densidad de corriente inyectada  $J = J_t$ , tenemos que:

$$J_t = \frac{\alpha_r + \alpha}{\alpha} J_T \quad (1.18)$$

Esta es la densidad de corriente de umbral y con la densidad de corriente de transparencia queda por tanto:

$$J_T = \frac{e l_d}{\eta_i \tau_r} \Delta_n T \quad (1.19)$$

La densidad de corriente de umbral  $J_T$  es un parámetro clave en el desempeño de la caracterización de un diodo láser; valores pequeños de  $J_T$  indican un buen desempeño.

### **Potencia (flujo interno de fotones)**

Cuando la densidad de corriente láser se incrementa por encima de su valor de umbral (máximo) ( $J > J_T$ ), el coeficiente de amplificación de ganancia pico  $\gamma_p$  excede al coeficiente de pérdidas  $\alpha_r$ . La emisión estimulada entonces prevalece sobre la absorción y otras perdidas del resonador, así la oscilación puede comenzar y el flujo de fotones  $\phi$  en el resonador se

incrementa. Como con otros láseres homogéneamente ensanchados espectralmente, la saturación se mantiene mientras el flujo de fotones se vuelve más grande y la diferencia en la inversión de población se agota. El coeficiente de ganancia decrece entonces hasta que se vuelve igual al coeficiente de pérdidas, después de lo cual el estado estable es alcanzado.

Tenemos que la densidad interna de flujo de fotones y la densidad del número de fotones consideradas para otros tipos de láseres, el estado estable interno de flujo de fotones  $\phi$  es proporcional a la diferencia entre la razón de bombeo  $R$  y la razón de bombeo de umbral  $R_T$ . Puesto que  $R\alpha_i$  y  $R_T \propto i_T$ , puede enunciarse como una condición para el flujo interno láser de fotones en estado estable:

$$\phi = \begin{cases} n_i \frac{i - i_T}{e} \text{ con } \equiv i > i_T \\ 0, \text{ con } \equiv i \leq i_T \end{cases} \quad (1.20)$$

Así el flujo interno láser de fotones en estado estable (fotones por segundo generados dentro de la región activa) es igual al flujo de electrones (el cuál es el número de electrones inyectados por segundo) en exceso de los requeridos por el umbral, multiplicados por la eficiencia cuántica interna  $\eta_i$ . La potencia láser interna por encima del umbral esta relacionada con el flujo de fotones interno  $\phi$  por la relación  $P = h\nu\phi$  así la potencia interna del láser con  $\lambda_0$  en [ $\mu\text{m}$ ] y obtendremos:

$$P = n_i (i - i_T) \frac{1.24}{\lambda_0} \quad (1.21)$$

Un láser que se bombea cerca del punto para las condiciones de disparo ( $N_0 > N_i$ ) manifiesta una pequeña señal de coeficiente de ganancia  $\gamma_0(\nu)$ , la cuál debe ser más grande que el coeficiente de pérdidas  $\alpha_r$ , ya que para que la oscilación láser se produzca, requerimos que el coeficiente de ganancia de pequeña señal sea más grande que el coeficiente de pérdida (condición de ganancia de disparo):

$$\gamma_0(\nu) > \alpha_r \quad (1.22)$$

Solo cuando se satisface esta condición podemos decir que tendrá lugar la oscilación láser. Mientras que se incrementa la densidad de flujo de fotones  $\phi$  dentro del resonador, el coeficiente de ganancia  $\gamma(\nu)$  decrece de acuerdo con el medio homogéneamente ensanchado.

En tanto se cumpla la condición de que el coeficiente de ganancia siga siendo más grande que el coeficiente de pérdidas, el flujo de fotones continuará con el incremento. Finalmente cuando el coeficiente de ganancia saturada sea igual al coeficiente de pérdidas (o equivalente a  $N = N_i$ ), el flujo de fotones dejará de crecer y la oscilación alcanzará condiciones de estado estable.



### **Eficiencia**

El flujo láser de fotones a la salida  $\phi_0$  es el producto del flujo interno de fotones  $\phi$  y la eficiencia de emisión  $\eta_e$ , con la cuál la relación total de las pérdidas está asociada con la luz útil transmitida mediante los espejos y las pérdidas del resonador  $\alpha_r$ .

Si la luz transmitida en ambos espejos es usada, entonces  $\eta_e = \alpha_m / \alpha_r$ ; en este caso si ambos espejos poseen el mismo nivel de reflectancia (denotada por R), obtendremos que  $\eta_e = [(1/D/d) \ln(I_D/R)] / \alpha_r$ . Entonces la ecuación de flujo láser de fotones de salida es:

$$\phi_0 = \eta_e \eta_i \frac{i - i_T}{e} \quad (1.23)$$

De esta ecuación concluimos que la proporcionalidad existente entre el flujo láser de fotones en la salida y el flujo de fotones inyectado por encima del umbral es regido por la eficiencia cuántica diferencial externa:

$$\eta_d = \eta_e \eta_i \quad (1.24)$$

Por tanto  $\eta_d$  representa la razón de cambio del flujo de fotones al salir con respecto al flujo de fotones inyectado por encima del umbral.

### **1.3. Características del láser a implementar**

En el laboratorio de óptica Aplicada del CCADET (Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico) UNAM, se tienen algunos láseres, de diferentes tipos de materiales, potencia, ancho de banda, longitud de onda, sensibilidad al ruido, voltaje, resistencia y corriente. Por esto efectué un análisis de los láseres y sus características para decidir cuál de ellos podría ser el que más se ajustará a las necesidades del experimento a realizar.

Se analizó explícitamente el proceso de selección del láser, en general se puede decir que se realizó la clasificación de cada uno de ellos, efectuando pruebas para experimentar las pérdidas que se tendrían al reflejar el haz de luz hacia el primer espejo del sistema, que se sitúa en la base del cantilever; se eliminaron algunos por su tamaño que dificultaba su manipulación o por su baja calidad en el haz láser debido al tamaño inadecuado del spot. El diodo láser que escogí fue el más fácil de manipular (tomando en cuenta el espacio requerido por el sistema), además de que éste posee una polarización simple, su potencia máxima es de 0.95 a 4.2 [w] aproximadamente; la captación del spot del haz láser en el fotosensor, no presenta gran cantidad de pérdidas al enfocarlo directamente, este spot es de diámetro aproximado 3.0 [Mm.] el cuál es de un tamaño ideal para lograr una captación correcta en el área sensible del fotodetector que es un poco mayor al área del spot del láser.

La mayor parte de los láseres son direccionales, es decir altamente colimados<sup>4</sup>. El haz láser tiene generalmente una divergencia de solo un minuto de arco o menos, la cuál está determinada exclusivamente por la difracción en la abertura de salida; recordemos que la emisión está aproximada a una distribución Gaussiana de irradiancia, en otras palabras, la densidad de flujo cae de un máximo en el eje central del haz y no presenta aquí lóbulos laterales, ya que el haz consiste en ondas casi planas, por su característica de ser espacialmente

coherente. El término luz coherente quiere decir que tenemos partículas enfocadas en el mismo punto, sin dispersión, que presentan las mismas características, a diferencia de la luz que tenemos por ejemplo en un foco o en la luz del sol donde se emite luz incoherente esparcida sobre un ángulo sólido grande y también con un ancho de banda grande; podemos concluir que la direccionalidad puede ser considerada para nuestro experimento como una manifestación de la coherencia que existe en el haz de un láser.

Gracias al estudio anterior, el láser seleccionado tiene un voltaje de polarización máximo de alrededor de 6 [V], el voltaje típico de un diodo láser es de 6 [v]. Este opera con una corriente de 120 [mA], siendo un valor muy favorable, ya que existen en el laboratorio algunas fuentes con las cuáles se alimenta de manera eficiente el láser así como el circuito que habilita el fotosensor. El valor de la resistencia en la entrada del circuito es muy importante para evitar daños de sobretensión o sobrecorriente a la entrada de alimentación del láser, su valor de impedancia es de  $5500\Omega$ ; asumimos que las variaciones en la potencia de salida son importantes para realizar mediciones confiables y no tener grandes diferencias entre cada uno de los experimentos realizados y en cada una de las lecturas que conforman nuestros experimentos.

Este tipo de diodo láser permite modular y/o variar la potencia láser en la salida por medio de los cambios que se realicen en la entrada, logrando variar la potencia desde 0 hasta su máximo valor requerido; el ancho de banda es de 500 kHz y puede ser aplicado en transmisiones digitales que requieran un tiempo de levantamiento rápido, así como para señales analógicas transmitidas con gran fidelidad.

#### **1.4 Teoría de los fotodetectores.**

Un fotodetector es un dispositivo que mide un flujo de fotones o potencia óptica por medio de la conversión de energía de los fotones absorbidos hacia una forma más detectable ó medible. El ejemplo que probablemente es el más célebre es la película fotográfica<sup>5</sup>. Actualmente las clases de fotodetectores más utilizadas son los detectores térmicos y detectores fotoeléctricos. Los detectores térmicos funcionan mediante la conversión de la energía de fotones en calor, sin embargo, la mayoría de los detectores térmicos son de alguna manera ineficientes y relativamente lentos como resultado del tiempo requerido para llevar a cabo el cambio de temperatura.

Consecuentemente no son aplicables en nuestra área de fotónica. La operación de los detectores fotoeléctricos esta basada en el fotoefecto o efecto fotoeléctrico, en el cuál los fotones son absorbidos por algunos materiales resultando directamente en una transición electrónica debida a un nivel de energía más grande y la generación de portadores móviles cargados. Bajo el efecto de un campo eléctrico estos portadores se mueven y producen una corriente eléctrica detectable.

El foto-efecto puede darse de 2 formas: externa o interna: el proceso de formación envuelve emisión fotoeléctrica, en la cuál los electrones fotogenerados escapan del material como electrones libres. En el proceso interno de fotoconductividad, los portadores excitados permanecen dentro del material, ordinariamente un semiconductor sirve para incrementar su conductividad.

### El efecto fotoeléctrico externo: emisión de fotoelectrón

Si la energía de un fotón iluminando la superficie de un material en el vacío es suficientemente grande, el electrón excitado podrá escapar a través de la barrera potencial de la superficie del material y ser liberado hacia el vacío como un electrón libre. Este proceso es llamado “emisión de fotoelectrón”. La energía de un fotón  $h\nu$  incidente en un material de metal libera un electrón libre dentro de la banda de conducción parcialmente llena. La conservación de la energía requiere que los electrones emitidos desde debajo del nivel Fermi, donde se hallan de forma cuántica, presenten un máximo de energía cinética con  $W =$  diferencia de energía entre el nivel de vacío de Fermi del material y tenemos la ecuación de Einstein de fotoemisión:

$$E_{\max} = h\nu - W \quad (1.25)$$

Solamente si el electrón se encuentra inicialmente en el nivel Fermi puede recibir la energía cinética especificada en la ecuación 1.25. La eliminación de electrones que se encuentren más hacia el interior requiere energía adicional para transportarlos hacia el nivel Fermi, debido a esto se reduce la energía cinética del electrón liberado. La función más baja de trabajo para un metal es de alrededor de 2 [eV], es por esto que los detectores ópticos basados en el efecto fotoeléctrico externo de metales puros son útiles, solo en las regiones del espectro visible y ultravioleta.

### Eficiencia cuántica de detección

La eficiencia cuántica  $\eta$  de un fotodetector está definida como la probabilidad de que un único fotón incidente en el dispositivo genere un par de fotoportadores que contribuyan a la corriente del detector,  $\eta$  es la relación del flujo de los pares electrón-hueco generados que contribuyen a la corriente del detector del flujo de fotones incidentes. Como sucede generalmente cuando muchos fotones inciden, no todos los fotones incidentes producen pares electrones-huecos debido a que no todos los fotones incidentes son absorbidos. Algunos simplemente fallan al ser absorbidos debido a la naturaleza de la probabilidad del proceso de absorción; otros pueden ser reflejados en la superficie del detector y con esto reducir la eficiencia cuántica. Además de que si no se consigue un enfocamiento adecuado en el área activa del detector, algunos fotones pueden ser perdidos. Por lo anterior tenemos que la eficiencia cuántica es:

$$\eta = (1 - R)\xi [1 - \exp(-\alpha d)] \quad (1.25)$$

En donde  $R$  es la potencia óptica reflejada en la superficie,  $\xi$  es la fracción de pares electrón-cavidad que contribuyen eficazmente a la corriente del detector,  $\alpha$  es el coeficiente de absorción del material y  $d$  es profundidad del fotodetector.

Tenemos que el factor  $(1-R)$  representa el efecto de reflexión en la superficie del dispositivo, es decir, en el fotosensor; la reflexión puede ser reducida con el uso de capas antireflectivas. El factor  $\xi$  es la fracción de pares electrón-hueco que exitosamente anulan las posibles recombinaciones en la superficie del material y contribuye a la fotocorriente útil. La recombinación en la superficie puede reducirse cuidando el crecimiento del material.

### **1.4.1 Características de los fotodetectores**

Los detectores mas empleados en sensores ópticos son los semiconductores, fotodiodos y fotodiodos de avalancha. Estos detectores pueden ser utilizados para detectar intensidad o la componente discreta de un espectro cuadrado; son usados a la vez con componentes ópticos como filtros o polarizadores. Para la detección de distribución espectral, es importante la longitud de onda de detección, por lo que se emplean sistemas multiplexados y un arreglo de fotodetectores es empleado al mismo tiempo con un sistema de difracción y polarización.

La responsividad relaciona la corriente eléctrica que fluye en el dispositivo con la potencia óptica incidente. Si cada fotón generara un solo fotoelectrón, un flujo de fotones  $\phi$  (fotones por segundo) produciría un flujo de electrones  $\phi$ , correspondiendo a una corriente eléctrica de corto circuito  $i_p = e\phi$  [w] en la frecuencia  $\nu$ , esto debería causar un aumento a la corriente eléctrica  $p = h\nu\phi$ . Porque que la fracción de fotones produciendo fotoelectrones detectables es  $\eta$  en lugar de la unidad, la corriente eléctrica se calcula con:

$$i_p = \eta e \Phi = \frac{\eta e P}{h\nu} = RP \quad (1.26)$$

El factor de proporcionalidad  $R$ , entre la corriente eléctrica y la potencia óptica esta definido como la responsividad  $R$  del dispositivo.  $R = i_p/P$  tiene unidades de [A/W] (Ampere sobre Watt) y esta dada por la siguiente ecuación:

$$R = \frac{\eta e}{h\nu} = \frac{\lambda_0}{1.24} \eta \quad (1.27)$$

De esta relación concluimos que  $R$  se incrementa con  $\lambda_0$  debido a que los detectores fotoeléctricos responden más al flujo de fotones que a la potencia óptica. Como  $\lambda_0$  se va incrementando una potencia óptica dada esta contenida en más fotones, los cuáles, cada uno a su vez produce más electrones. La región en la cuál  $R$  se incrementa con  $\lambda_0$  esta limitada por la dependencia con la longitud de onda de  $\eta$  tanto para valores grandes y pequeños de la longitud de onda.

La responsividad puede degradarse si el detector presenta una potencia óptica excesivamente grande; esta condición es llamada “saturación del detector” y limita el rango dinámico lineal del detector, el cuál es el rango sobre el cuál responde linealmente con la potencia óptica incidente, para eliminar esta posible fuente de ruido, se implementó el efecto navaja en la entrada del detector, esto se analizará detalladamente.

### **Estadísticas de detección óptica.**

El proceso de detección envuelve la conversión de energía óptica<sup>3</sup> en forma de fotones en una señal eléctrica en forma de electrones; esta puede ser procesada por métodos electrónicos de filtrado, amplificación, conversión de parámetros eléctricos, etc. Si la probabilidad de que un fotón con energía  $h\nu$  produzca un electrón en un detector es  $\eta$ , entonces el promedio de producción de electrones,  $\langle r \rangle$ , para un haz incidente de potencia  $P$  esta dado por:

$$\langle r \rangle = \frac{\eta P}{h\nu} \quad (1.28)$$

La producción del par electrón-hueco debida a la incidencia de fotones como una razón constante  $\langle r \rangle$ , esta distribuida aleatoriamente en el tiempo y obedece a la distribución estadística de Poisson, así que la probabilidad de producción de  $m$  electrones en algún intervalo de medición  $\tau$  esta dado por:

$$P(m, \tau) = (\langle r \rangle \tau)^m \frac{1}{m!} e^{-\langle r \rangle \tau} \quad (1.29)$$

Esta distribución es válida para la detección en tiempo-variable de señales ópticas, donde el periodo de muestreo  $\tau$  es muy corto comparado con el periodo de la señal óptica. En suma la media de fluctuación de sucesos dentro del intervalo promedio sobre un número igual al periodo esta dado por:

$$\langle (n - \langle n \rangle)^2 \rangle = \langle n^2 \rangle - \langle 2n \langle n \rangle \rangle + \langle n \rangle^2 = \langle n^2 \rangle - \langle n \rangle^2 = \langle n \rangle \quad (1.30)$$

Las estadísticas que rodean a la detección óptica son muy importantes en la determinación de un mínimo detectable de los niveles de una señal para determinar la máxima sensibilidad en sensores. En este punto es suficiente notar que la corriente eléctrica es proporcional a la potencia óptica incidente en el detector, y esta relación esta dada por:

$$i = \langle r \rangle e = \frac{\eta e P}{h\nu} \quad (1.31)$$

Un cambio en la entrada de potencia óptica  $\Delta P$ , resulta en un cambio en la salida de corriente,  $\Delta i$ . Ya que la potencia eléctrica es proporcional a  $i^2$  de cualquier manera la potencia eléctrica de salida del detector varía cuadráticamente con la potencia óptica de entrada, haciéndolo un detector de ley cuadrática.

El término semiconductor se aplica a un material que posee la característica de conducir electricidad entre aislantes y conductores, haciendo que el material aislante obtenga la propiedad de conducir electricidad. Los materiales semiconductores mas importantes son el Silicio, Germanio y compuestos de Galio, Indio y Arsénico (pertenecientes a la misma familia y de características similares). Los semiconductores pueden ser del tipo  $n$ , los cuales tienen un exceso de electrones o de tipo  $p$  teniendo un exceso de huecos, es decir, la ausencia de electrones en una región permitida de energía.

Los electrones de los semiconductores tienen ciertos niveles de energía, los cuáles se encuentran cercanos entre ellos en bandas de valencia. Las bandas bajas de energía son ocupadas en primer lugar con el fin de solo permitir una determinada banda, determinado por las propiedades del sólido. Las dos bandas más energéticas, la banda de valencia y la banda de conducción, son muy importantes, como lo es también la región energética entre ellas, (figura 1.7). La banda de valencia representa el límite máximo de energía del material, asimismo la de conducción representa la mínima energía en la cual los electrones pueden moverse más libremente a través del canal del semiconductor.

La banda directa de un semiconductor es aquella en la cual el máximo de la banda de valencia y el mínimo de la banda de conducción ocurren en el mismo momento del electrón conocido como vector  $k$ . El Galio es un material con banda directa, en este, el máximo de la banda de

valencia y el mínimo de la banda de conducción ocurren en diferentes valores de  $k$ . El silicio es un material de banda indirecta. Si en algún tipo de material semiconductor ocurre que exista algún tipo de impureza, sin defectos en el canal entre las bandas de valencia y conducción, este tipo de material es conocido como *semiconductor intrínseco*. Para este tipo de material ocurre que a bajas temperaturas la banda de valencia está llena y la banda de conducción está vacía. La banda de energía en estos materiales es frecuentemente pequeña ( $\approx 1\text{eV}$ ), por lo que la excitación térmica de los electrones a una alta temperatura proporciona suficiente energía que permite a algunos electrones moverse hacia la banda de conducción. Es así como los electrones que se mueven dejan atrás una carga positiva o huecos en la banda de valencia. Bajo la aplicación de un campo magnético, esta corriente o movimiento de electrones puede fluir también.

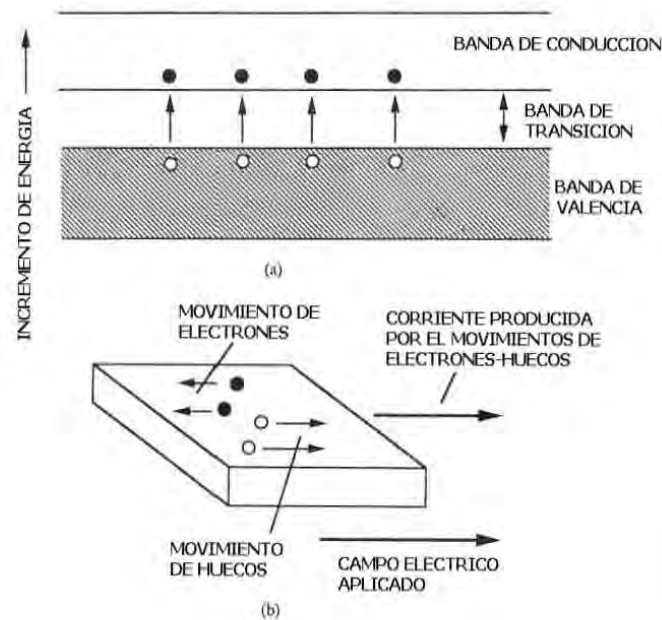


Fig. 1.7. Emisión espontánea de un fotón de un material semiconductor.

Para un semiconductor intrínseco a una temperatura uniforme, hay una concentración invariable de portadores (electrón-hueco); aunque los portadores son creados a través de una excitación térmica, estos también son destruidos por la misma recombinación electrón-hueco. Esto ocurre cuando un electrón en la banda de conducción realiza la transición a un hueco o a un estado vacante en la banda de valencia. Al realizar este proceso se desprende una cantidad de energía aproximadamente igual a  $E_g$  en forma de luz (emisión de un fotón) o vibración del canal entre las bandas de valencia y conducción (creación de fotón). Un ejemplo de esta emisión espontánea de fotón se muestra en la figura 1.8, también se puede generar el proceso inverso, la absorción de un fotón y transición del electrón de la banda de valencia a la banda de conducción:

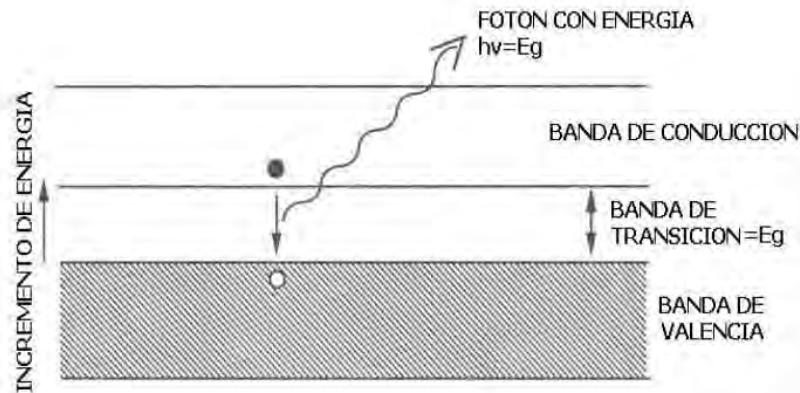


Figura 1.8. Emisión espontánea de un fotón de un material semiconductor

### **1.5. Fotodiodos semiconductores y tipos de fotodetectores**

Un fotodiodo consiste en una unión semiconductor *p-n*. Cuando tal unión es formada, una región de alto campo eléctrico existe entre los dos tipos de material esta se llama *región de deflexión*. Dentro de esta región los electrones y huecos son creados por la absorción de un fotón y son excitados fuera de la zona por el campo eléctrico, dejando un vacío de carga. Esta situación es mostrada en la figura 1.9.

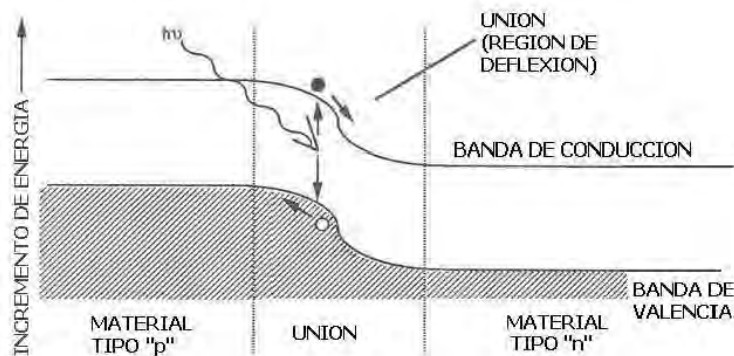


Figura 1.9. Portadores de fotones generados por un semiconductor de *p-n* juntura.

Esta unión sirve como un detector óptico cuando se configura de esta manera físicamente, la potencia óptica (fotones) incide en la región de deflexión, donde se convierten los pares electrón-hueco y son empujados fuera de esta zona creando una separación e incremento de cargas. Este aumento de cargas puede ser detectado de dos maneras dependiendo de cómo se conecte la unión eléctrica. Si la unión esta conectada como un circuito abierto, se tiene una configuración de modo fotovoltaico. Pero si la unión es un circuito cerrado, una corriente fluye a través del mismo, en esta configuración la corriente es medida de modo fotoconductorivo<sup>7</sup>.

El circuito equivalente a un fotodiodo se muestra en la figura 1.10, este circuito puede ser empleado de dos maneras: la primera parte del esquema muestra la configuración correspondiente al circuito fotovoltaico y en la segunda parte se el circuito corresponde a una medición de fotoconductividad.

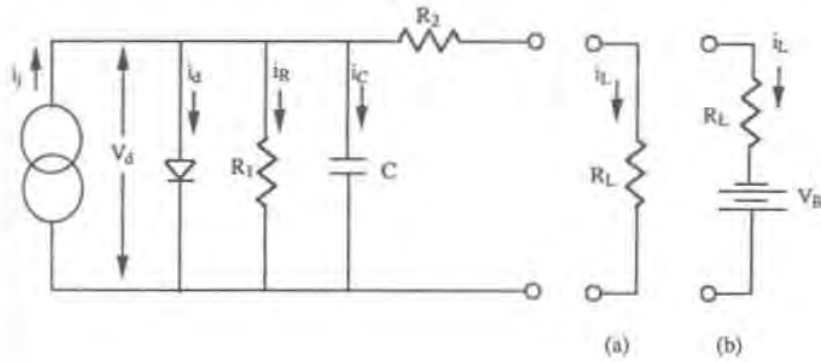


Figura 1.10. Circuito equivalente de un fotodiodo.

La respuesta típica de un fotodiodo (voltaje o corriente) se muestra en la figura:

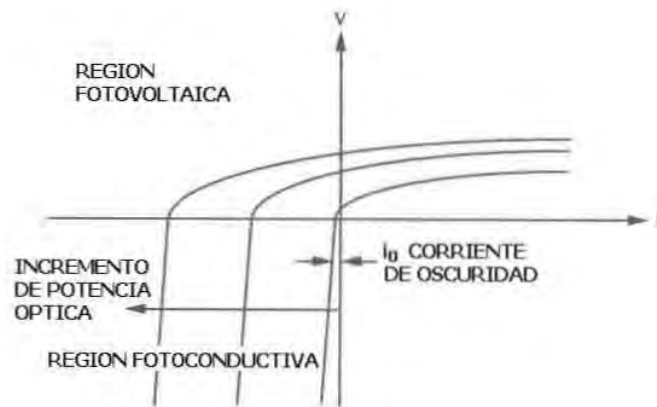


Figura 1.11. Respuesta de voltaje contra corriente de un fotodiodo típico.

La respuesta de circuito abierto puede ser analizada examinando las intersecciones entre las características de las curvas  $i-v$  para varias condiciones de iluminación. Como se puede ver para el caso de circuito abierto ( $i=0$ ), el voltaje cambiará de forma no lineal con el incremento de la incidencia de potencia óptica. De hecho esta variación es logarítmica. Para el caso de corto circuito ( $v=0$ ), su respuesta puede ser encontrada al examinar la intersección de las curvas con el eje  $v$ . En este caso la variación es lineal como se puede ver al incrementar la potencia óptica incidente y de acuerdo con la ecuación de la curva de corriente-voltaje de la respuesta de un fotodiodo.

$$i = i_0 \left( e^{eV/k_B T} - 1 \right) - i_s \quad (1.32)$$

Donde  $i_0$  es la corriente de oscuridad debido a la generación térmica de pares electrón-hueco;  $i_s$  es la corriente de detección óptica de acuerdo a la ecuación estadística de detección analizada anteriormente, por lo que combinando ambas ecuaciones tenemos:

$$i = i_0 \left( e^{eV/k_B T} - 1 \right) - \frac{\eta e P}{h\nu} \quad (1.33)$$



Esta ecuación describe la generación global de la característica corriente-voltaje de un fotodiodo en presencia de iluminación. La determinación de la eficiencia de conversión de potencia de un fotodiodo, puede ser realizada empleando la ecuación anterior y multiplicándola por el voltaje generado por el fotodiodo, por lo que la potencia eléctrica  $P_e$  entregada por el fotodiodo esta dada por:

$$P_e = iV \quad (1.34)$$

$$P_e = i_0 V \left( e^{eV/k_B T} - 1 \right) - \frac{\eta e P V}{h\nu} \quad (1.35)$$

## **1.6 Sistemas de medición y sus características generales.**

Se denomina sistema a la combinación de dos o más elementos, subconjuntos o componentes necesarios para realizar una o varias funciones. En los sistemas de medición, este es el objetivo primordial basado en la experimentación y en la interpretación de los resultados independientes del observador, estableciendo una relación entre lo numérico y las propiedades de los componentes y características.

De manera más específica se describe la estructura general de un sistema de medición desde el diseño de algunas estructuras implicadas en el sistema, adquisición de información de manera adecuada y eficaz, el procesamiento de esta información así como su presentación de resultados de manera que puedan ser comprendidos por nuestros sentidos hasta la más simple interfaz entre el sistema diseñado y la etapa de recopilación de datos.

Podemos afirmar que el sistema diseñado para esta tesis es un dispositivo que convierte una señal de forma física en una señal correspondiente pero de otra forma física distinta; es decir que es un dispositivo que convierte un tipo de energía entrante al sistema en otro tipo de energía saliente del sistema.

En nuestro estudio nos enfocaremos en los sistemas de medición electrónicos, los cuáles poseen ventajas que simplificarán nuestra investigación, algunas de estas son:

- ❖ Debido a la estructura electrónica de la materia, cualquier variación de un parámetro no eléctrico de un material viene acompañada por la variación de un parámetro eléctrico.
- ❖ Dado que en el proceso de medición no es conveniente extraer energía del sistema donde se está midiendo, lo mejor es implementar un amplificador para ampliar la señal de salida del transductor. En amplificadores electrónicos podemos obtener fácilmente ganancias de orden de  $10^{10}$  en una sola etapa, a baja frecuencia, sin afectar el desempeño del sistema.
- ❖ Si necesitamos realizar procesamiento de la señal, tales como modificaciones o atenuaciones podemos implementar circuitos integrados; actualmente existe una gran variedad, incluso hay transductores que incorporan físicamente en un mismo encapsulado parte de estos recursos.

- ❖ La transmisión de señales eléctricas es más versátil que la de señales mecánicas, hidráulicas o neumáticas, ya que en diversos dispositivos han sido sustituidas por las primeras.
- ❖ Existen muchos medios de almacenamiento de información, ya sea para presentación o registro de ella; se tiene un mejor control y una mayor exactitud si se realiza de manera electrónica, ya que se manejan no solo datos numéricos sino también textos, gráficas y diagramas, entre otros.
- ❖ Haciendo un resumen de todo lo anterior, afirmaremos que un sensor es un dispositivo que, a partir de la energía del medio donde se mide, da una señal de salida transducible que se encuentra en función de la variable medida.

Según su señal de salida, los sensores se pueden clasificar en analógicos o digitales<sup>8</sup>, en los analógicos la salida varía, a nivel diferencial de forma continua. Su información está en la amplitud (se suele incluir en esta categoría a los sensores con salida en el dominio temporal). Si es en forma de frecuencia, se denominan “a veces digitales” por la facilidad que poseen al convertir la señal en un salida digital. En los sensores digitales, la salida varía en forma de saltos o pasos discretos, no requieren conversión A/D y la transmisión de su salida es más fácil de realizar. Tienen también mayor fidelidad y algunas veces mayor exactitud, desafortunadamente no hay modelos digitales para las magnitudes físicas de mayor interés.

Si se atiende por su modo de funcionamiento, los sensores pueden ser de deflexión o de comparación; en los primeros la magnitud medida produce algún efecto físico, que engendra algún efecto similar, pero opuesto en alguna parte del instrumento y que esta relacionado con alguna variable útil. En los sensores que funcionan por comparación, se intenta mantener nula la deflexión mediante la aplicación de un efecto bien conocido, opuesto al generado por la magnitud a medir; hay un detector del desequilibrio y un medio para restablecerlo. La toma de lecturas realizadas por comparación suelen ser más exactas porque el efecto conocido opuesto se puede calibrar mediante un patrón de magnitud de referencia de calidad. El detector de desequilibrio solo mide alrededor de cero y, por lo tanto, puede ser muy sensible y no necesita estar calibrado; por el contrario, tienen en principio menor respuesta dinámica, y podría utilizarse un servomecanismo pero no se lograría normalmente una respuesta tan rápida como en los sistemas de deflexión.

Según el tipo de relación entrada-salida, los sensores pueden ser de orden cero, de primer, segundo orden o de orden superior. El orden esta relacionado con el número de elementos independientes que almacenan energía, incluyendo el sensor y esto repercute en su exactitud y velocidad de respuesta. Ahora bien, para el estudio de un gran número de sensores se suele acudir a su clasificación según la magnitud que midan: se encuentran sensores de temperatura, presión, flujo, humedad, posición, velocidad, aceleración, fuerza, par, etc.

Sin embargo esta clasificación difícilmente puede ser exhaustiva, ya que la cantidad de magnitudes que se pueden medir es casi inagotable. Desde el punto de vista de ingeniería electrónica, es más atractiva la clasificación de los sensores de acuerdo con un parámetro variable: resistencia, capacitancia o inductancia añadiendo después los sensores generadores de tensión, carga, corriente o potencia.

En un sistema de medición como éste, el sensor es el elemento dispuesto expresamente con la misión de obtener información, en forma de señal eléctrica, sobre la propiedad o parámetro físico medido. Se debe considerar que el sensor responda exclusivamente a la magnitud de interés, y que por otra parte el origen de las señales de salida fuera únicamente la señal presente a la entrada. Estas perturbaciones internas son aquellas señales que afectan indirectamente la señal de salida debido a su efecto sobre las características del sistema de medición, pueden perturbar tanto a las características relativas de la variable de interés como a las relativas a las interferencias.

Técnicas de compensación: los efectos causados por perturbaciones internas y externas del sistema de medición, pueden reducirse mediante una alteración del diseño o a base de añadir nuevos componentes al sistema. Un método para ello es el denominado “diseño con insensibilidad intrínseca”. Se trata de ser sensible sólo a las entradas deseadas. En nuestro caso de sensado de magnitudes mecánicas vectoriales, es el método aplicado para obtener una sensibilidad unidireccional y una baja sensibilidad “transversal”, es decir, en las direcciones perpendiculares a la de interés. El método de realimentación negativa se realiza para reducir el efecto de las perturbaciones internas, y es en este método en el que se basan los sistemas de medición por comparación.

Otra técnica muy usada para reducir las interferencias es el filtrado. Un filtro es todo dispositivo que separa señales de acuerdo con su frecuencia u otro criterio (por ejemplo tiempo o magnitud). Si los espectros frecuenciales de la señal y las interferencias no se solapan, la utilización de un filtro puede ser efectiva. El filtro puede colocarse en la entrada o en una etapa intermedia. En el primer caso puede ser de tipo eléctrico, mecánico, neumático, térmico o electromagnético. Los filtros dispuestos en las etapas intermedias son regularmente filtros electrónicos.

### **1.7. Características de actuación del sistema y tipos de error.**

#### **Clases de errores: sistemáticos y aleatorios**

La discrepancia entre la indicación del instrumento y el verdadero valor de la magnitud medida se denomina «error»<sup>8</sup>. La diferencia entre la indicación del instrumento y el verdadero valor se denomina error absoluto. A veces se da como porcentaje respecto al máximo valor que puede medir el instrumento (valor de fondo de escala) o con respecto a la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo medibles. A continuación tenemos las ecuaciones de errores:

$$\text{Error absoluto} = \text{resultado} - \text{valor verdadero}$$

Sin embargo lo más común es especificar el error como un cociente entre el error absoluto y el valor verdadero de la magnitud medida, este cociente es denominado error relativo. Este suele tener 2 términos: uno dado como porcentaje de la lectura, y otro constante, que puede estar especificado por un porcentaje en el fondo de escala o un umbral:

$$Error \text{ relativo} = \frac{Error \text{ absoluto}}{Valor \text{ verdadero}} \quad (1.36)$$

Al realizar mediciones, obtuvimos errores tanto absolutos como relativos muy grandes con respecto al voltaje, ya que el multímetro nos daba valores de  $\pm 1.5$  o hasta 2 [v], por lo que decidimos realizar las mediciones con otro aparato simultáneamente, mediante el programa de computadora que utiliza el multímetro, este realizaba promedios estadísticos respecto a los valores medidos, es decir, nos decía cuál era el valor verdadero, es decir el más repetido, y con esto pudimos reducir nuestros porcentajes de error, estos resultados se analizarán a fondo en el capítulo tres.

### **Errores sistemáticos**

La calibración estática de un sensor permite detectar y corregir los errores sistemáticos, esta se realiza durante varias mediciones de un algún determinado valor, estando bajo las mismas condiciones, permaneciendo constante el valor absoluto y su signo, o bien este puede variar de acuerdo con una ley definida cuando cambian las condiciones de medición; es decir son errores característicos del sistema. Dado que el tiempo es también una condición de medición, estas deben ser realizadas en un intervalo de tiempo breve, o en intervalos de tiempo iguales; porque los errores sistemáticos pueden generar un sesgo o desviación en las lecturas tomadas.

La magnitud de estos errores es tolerable si consideramos que en el resultado de una toma de lectura influyen los aparatos empleados para efectuarla, también en el método, el operario, (en algunos casos) y toda una serie de circunstancias (climáticas, mecánicas, eléctricas, condiciones iniciales y finales) que nunca son ideales pero que se pueden prever, de modo que sean considerables y constantes en los resultados.

La presencia de errores sistemáticos se descubre mediante la medición de la misma magnitud con dos aparatos distintos, o con dos métodos distintos, o que existan dos personas realizando la medición; también podrían irse cambiando de forma ordenada las condiciones de medición y viendo su efecto en los resultados; sin embargo deben realizarse criterios estadísticos para determinar la consistencia de los resultados.

### **Errores aleatorios**

Los errores aleatorios son aquellos que permanecen una vez eliminadas las causas de errores sistemáticos; se manifiestan cuando se mide repetidamente la misma magnitud, con el mismo instrumento y el mismo método, y presentan las siguientes propiedades:

- ❖ Los errores aleatorios positivos y negativos de igual valor absoluto tienen la misma probabilidad de producirse.
- ❖ Los errores aleatorios son tanto menos probables cuanto mayor sea su valor.
- ❖ Al aumentar el número de mediciones, la media aritmética de los errores aleatorios de una muestra –conjunto de medidas- tiende a cero.

- ❖ Para un método de medición determinado, los errores aleatorios no exceden de cierto valor. Las mediciones que lo superan deben repetirse, y en su caso estudiarse por separado.
- ❖ Los errores aleatorios se denominan también errores accidentales o fortuitos, y esto nos da a entender que pueden ser inevitables. La ausencia de variaciones de unas a otras lecturas obtenidas cuando se están realizando una serie de toma de lecturas de la misma magnitud con el mismo sistema de medición, no necesariamente es una indicación de ausencia de errores aleatorios.

Puede suceder, por ejemplo, que el instrumento no tenga suficiente resolución, es decir, que su capacidad para apreciar pequeños cambios en la magnitud medida sea muy limitada, de modo que no sean detectados por el operador en el dispositivo final de lectura o en este caso al realizar los cálculos matemáticos y obtener los resultados de la última etapa.

Si realizamos toma de datos de varias lecturas, los errores aleatorios se cancelan y quedan sólo los errores sistemáticos, ya que estos son reproducibles se conocen mediante las condiciones de medición y corrigiendo la lectura cuando se tome la lectura bajo las mismas condiciones.

Ésta situación es muy importante, ya que se determina la diferencia entre el valor verdadero y el valor obtenido por medio de la calibración, bajo unas condiciones dadas, y durante este proceso se ajusta el equipo y los instrumentos para eliminar dicho error. Cuando se realice una medición aislada, en las mismas condiciones, quedará sólo la componente aleatoria del error.

Sin embargo en la práctica con el proceso de calibración, sólo se pueden eliminar los errores sistemáticos en condiciones muy específicas, por lo que es posible que en otras condiciones se tengan errores de este tipo, incluso superiores a los aleatorios que el fabricante estipula en las especificaciones.

### **Características de actuación del sistema**

La exactitud<sup>9</sup> es la cualidad que caracteriza la capacidad de un instrumento de medición de dar indicaciones que se aproximen al verdadero valor de la magnitud medida. Es común emplear exactitud y precisión como sinónimos pero no tienen el mismo significado como veremos a continuación. El valor verdadero, exacto o ideal es el que se obtendría si la magnitud se midiera con un método «ejemplar». Consideramos como tal aquel método de medición en el que los expertos coinciden que es suficientemente exacto para la finalidad pretendida con los resultados que se obtengan.

La exactitud de un sensor se determina mediante la denominada calibración estática, esta consiste en mantener todas las entradas excepto una a un valor constante. La entrada a estudiar se varía entonces lentamente, tomando sucesivamente valores constantes dentro del margen de medición y se van registrando los valores que toma la salida. La representación de estos valores en función de los de la entrada define la curva de calibración.

Para conocer el valor de la magnitud de entrada, ésta debe tener un valor bien conocido, constituyendo lo que llamamos “valor patrón de referencia”. Su valor debe conocerse con una exactitud al menos 10 veces mayor que la del sensor que se calibra.

La fidelidad es la cualidad que caracteriza la capacidad de un instrumento de medición de dar el mismo valor de la magnitud medida, al medir varias veces bajo las mismas condiciones determinadas (ambientales, intervalos de tiempos iguales, perturbaciones etc.) prescindiendo de su concordancia o discrepancia con el valor real de dicha magnitud. La fidelidad implica que se tenga simultáneamente una conformidad en las sucesivas lecturas y un número alto de cifras significativas.

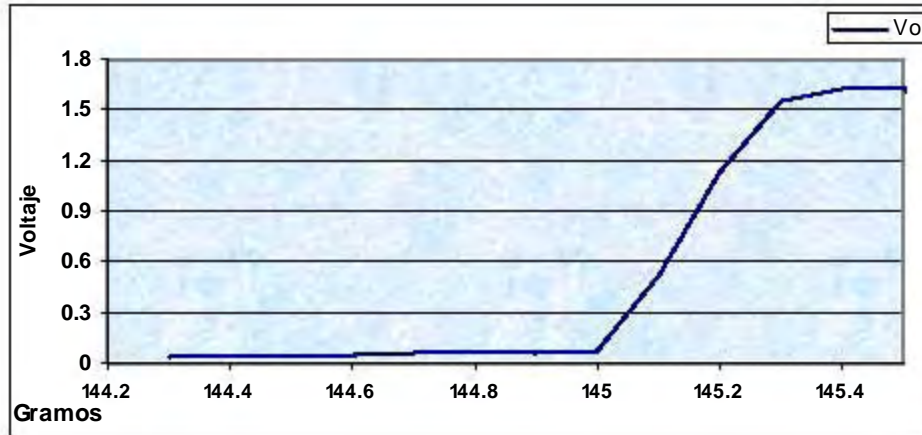
La reproducibilidad se refiere también al grado de coincidencia entre distintas lecturas individuales cuando se determina el mismo parámetro con un método concreto, pero con un conjunto de mediciones a largo plazo o que sean realizadas por personal distinto o con diferentes clases de aparatos simultáneos o en otros laboratorios. Cuantitativamente, es el valor por debajo del que se encuentra, con una probabilidad especificada, el valor absoluto de la diferencia entre los dos resultados individuales obtenidos en las condiciones anteriores.

En sensores cuando hay una variación de la salida a lo largo del tiempo se habla a veces de inestabilidades, en particular se especifican a veces las denominadas derivas de cero y derivas del factor de escala, la primera expresa la variación de la salida con entrada nula, la deriva del factor de escala expresa la variación de la sensibilidad.

La sensibilidad es simplemente la relación en el cambio en la salida con el cambio en el valor de la magnitud a medir y establece la pendiente de la curva de calibración. Existen 3 características que son suficientemente dependientes del tiempo como para ser categorizadas más propiamente como “características de fiabilidad”, sin embargo, pueden ser determinadas mediante una serie de calibraciones estáticas o con repeticiones de estas calibraciones después de un periodo de tiempo.

La sensibilidad o factor de escala es la pendiente de la curva de calibración, que puede ser o no constante a lo largo de la escala de medición. En los sensores interesa tener una alta sensibilidad y de ser posible constante, ya que para un sensor del tipo que estamos manejamos: La sensibilidad es  $S=k$  para todo el margen de valores de  $x$  aplicables, es decir:

$$Y=kX+b \quad (1.37)$$



*Figura 1.12 En esta gráfica se observa que la sensibilidad máxima del sistema se da en la pendiente de la curva, es decir, aproximadamente en el intervalo de 0.2 [v] hasta después de 1.5 [v]. Además se observa el comportamiento característico que presenta el dispositivo.*

La exactitud, la fidelidad y la sensibilidad son características suficientes para describir el comportamiento estático de un sensor. Otras características complementarias son la linealidad, histéresis y resolución.

La linealidad expresa el grado de coincidencia entre la curva de calibración y una línea recta determinada, es decir, que la linealidad indica hasta que punto es constante la sensibilidad del sensor, pero para que un sensor sea válido no es condición necesaria que sea lineal. El interés de la linealidad está en que la conversión lectura-valor medido es más fácil de leer si la sensibilidad es constante, pues entonces basta multiplicar la indicación de salida por un factor constante para conocer el valor de la entrada. Además en instrumentos lineales la no linealidad equivale a la inexactitud. Los principales factores que influyen en la linealidad son la resolución, el umbral y la histéresis. La linealidad expresa el comportamiento diferencial de la curva de calibración respecto a una línea recta especificada; se expresa como resultado de una calibración, es decir, como la máxima desviación de cualquier punto de calibración a partir del punto correspondiente en la línea recta especificada durante un ciclo de calibración. La linealidad independiente está referenciada con la “mejor línea recta” que es la línea intermedia entre las dos líneas paralelas en cuyo interior se mantienen todos los valores de salida de una curva de calibración. La mejor línea recta sólo se puede dibujar después de que se ha completado la calibración.

La repetibilidad (reproductividad) como ya habíamos mencionado, es la habilidad de un transductor a reproducir lecturas de salida cuando se aplica el mismo valor de la magnitud de manera consecutiva, bajo las mismas condiciones y en la misma dirección. Si el muestreo (toma de lecturas) se realiza aumentando el número de ciclos de calibración se obtiene una mejor medición estadística de la repetibilidad mejor.

La resolución y el umbral son dos representaciones del comportamiento del transductor con pequeños incrementos, pero presentan características diferentes. Cuando la magnitud varía continuamente dentro del rango, la salida de varios transductores no se mantiene perfectamente coherente, al contrario, la salida cambia con pequeños escalones; este comportamiento es típico de los transductores potenciométricos con elementos de bobinas.

El término resolución media se define como el recíproco del número total de escalones en la salida a lo largo del rango, multiplicado por 100 y expresado en porcentaje. La resolución máxima es la magnitud o el mayor de todos los escalones observados. En algunos transductores para ocasionar un cambio en su salida se requiere un cambio finito en la magnitud a medir. El cambio más pequeño en la magnitud a medir necesario para conseguir un cambio medible en la salida es el umbral del transductor, normalmente se define en términos de la magnitud a medir y puede tener valores diferentes en porciones diferentes del rango.

### Sistemas de medición de primer orden

Tenemos un sensor de primer orden donde existe un elemento que almacena energía y otro que la disipa. La relación entre la entrada  $x(t)$  y la salida  $y(t)$  esta dada por una ecuación diferencial de tipo:

$$a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = x(t) \quad (1.38)$$

Y cuya función de transferencia es:

$$\frac{Y(s)}{K(s)} = \frac{k}{\tau s + 1} \quad (1.39)$$

Donde  $k=1/a_0$  es la denominada sensibilidad estática y  $\tau=a_1/a_n$  se conoce como constante de tiempo de sistema. La frecuencia propia  $\omega_c$ , está dada por  $1/\tau$ . El sistema queda caracterizado por ambos parámetros:  $k$  para respuesta estática y  $\omega_c$  o  $\tau$  para la respuesta dinámica. La expresión de la señal de salida para cada una de las entradas más frecuentes (escalón, rampa y senoidal) se ilustran en la siguiente figura:

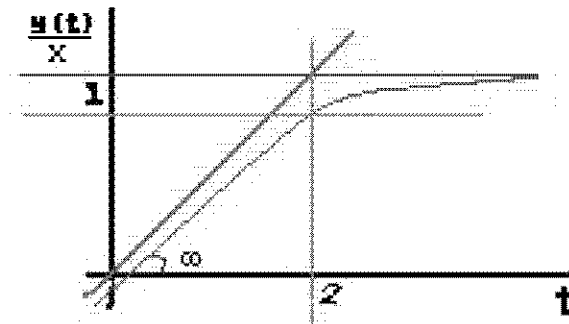


Figura 1.13. Respuesta de un sensor de primer orden a una entrada a escalón.

El error dinámico y el retardo de un sensor de primer orden dependen de la forma de la señal de entrada; los dos valores del error dinámico en el caso de una entrada rampa corresponden, respectivamente a dos definiciones distintas:

$$\begin{aligned} e_d &= y(t) - x(t) \\ e_d &= y(t) - \kappa x(t) \end{aligned} \quad (1.40)$$

El hecho de que el error dinámico este dado por expresiones bien definidas sugiere que es fácil de corregir, sin embargo en la práctica, difícilmente se estará midiendo una entrada con una variación tan simple como la definida por las expresiones consideradas.



### **1.7.1 Características de la magnitud a medir.**

Un transductor se diseña usualmente para medir una magnitud específica y responder únicamente a esta magnitud, otras magnitudes, en algunos casos pueden ser calculadas mediante la relación existente con otros parámetros medidos por transductores; así como determinadas mediciones pueden precisar de señales de salida de uno o más transductores.

El rango de un transductor se especifica como los límites superior e inferior de los valores de la magnitud a medir. El rango puede ser unidireccional (por ejemplo de 0 a 3 cm.) o bidireccional, simétrico ( $\pm 4.5^\circ$ ) o asimétrico (de -2 a 10 grs.), o desplazado (con cero suprimido), (por ejemplo 70 a 120 psig.). La diferencia algebraica entre los dos límites del rango es la amplitud de medición.

El sobrerango es denominado también como sobrecarga o medida máxima, es la magnitud máxima de la medición con que se puede aplicar el transductor y ocasionarle un cambio de prestaciones dentro de unas tolerancias definidas. Normalmente se especifica un determinado tiempo de recuperación, después de abandonar el estado de sobrerango, necesario para que el transductor recupere sus condiciones dentro de unas tolerancias especificadas.

A continuación se explicarán las características eléctricas de diseño básicas de un transductor, algunas de ellas son: excitación (referido a entrada dado que la magnitud a medir es también una entrada), salida, tierras e impedancias de salida, entrada, fuente y cargas.

#### **Excitación**

A excepción de los tipos autogeneradores, los transductores requieren una excitación, la cuál consiste en una tensión eléctrica (o corriente eléctrica) externa aplicada al mismo para su apropiada operación. La impedancia de la fuente de excitación, presentada al transductor, es la impedancia de la fuente ( $Z_s$ ). La impedancia de un transductor presentada a la fuente de excitación es la impedancia de entrada de la fuente ( $Z_{ent}$ ). La impedancia de los cables de excitación se considera parte de la impedancia de la fuente.

La impedancia presentada en las terminales de salida del transductor es la impedancia de salida ( $Z_{sal}$ ). La impedancia presentada en los terminales de salida del transductor por la de los circuitos externos asociados (por ejemplo, los circuitos de acondicionamiento de señal) se denomina la carga, y la impedancia debida al cableado entre el transductor y la carga es la impedancia de la carga ( $Z_L$ ).

La salida es la magnitud eléctrica (en nuestro caso el voltaje) producida por el transductor, se encuentra en función de la magnitud aplicada; la salida es usualmente una función continua de la magnitud a medir (salida analógica) en forma de una amplitud de tensión, una relación de tensiones, corriente o a veces como cambio de capacidad, inductancia y otros. La frecuencia de salida es el número de ciclos o pulsos por segundo que son dependientes de la magnitud a medir y cuyas salidas moduladas en frecuencia son desviaciones de esta misma a partir de la frecuencia central (por ejemplo  $2000 \pm 50\text{Hz}$ ) también son formas de salida analógica. Diremos también que existen las salidas digitales que representan a la magnitud a medir en una forma de

magnitudes discretas codificadas en determinado sistema de numeración (por ejemplo código binario).

Como en todos los dispositivos electrónicos, es importante que los transductores estén equilibrados e interconectados adecuadamente con el sistema de medición asociado. Uno de los aspectos más vigilados consiste en exista un equilibrio entre las impedancias de salida y de entrada. La falta de equilibrio ocasionará errores en la carga, que aumentarán la relación de la impedancia de salida y la impedancia de carga. Se debe prestar especial atención a las recomendaciones en la fuente de alimentación realizadas por el fabricante.

Algunas características eléctricas necesitan ser vigiladas y que se les considere cierta tolerancia cuando se incorporan en el sistema; por ejemplo podríamos tener la salida de un amplificador encapsulado integralmente que contenga perturbaciones aleatorias (ruido) y puede encontrarse sujeto a variaciones en las características de los componentes del amplificador que provocan inestabilidad de la ganancia.

### **Características mecánicas de diseño.**

Las características mecánicas de diseño se especifican en los transductores principalmente por tres razones: para facilitar su manejo e instalación, para prevenir utilizaciones inadecuadas o una degradación de los elementos, ocasionado por el parámetro físico a medir o por el ambiente, y para intercomunicar adecuadamente al transductor con el sistema que esta operando. Son de gran importancia en el diseño de un transductor su configuración, previsiones de montaje y sus dimensiones, así como el tipo, tamaño y localización de todas las conexiones eléctricas, mecánicas y como va interactuar con el parámetro físico a medir. Todas estas condiciones deben estar bien especificadas, así como las previsiones para ajustes de ganancia, rango, excitación, salida, número de componentes, incluso la marca del fabricante y especificaciones del transductor, y sobre todo identificación de las conexiones eléctricas externas.

Dentro de las propiedades mecánicas podríamos mencionar las especificaciones y características del sistema, es decir, de cada uno de sus elementos debemos saber la manera en que se comportarán, observar que sea así y si llegara a presentarse una conducta diferente, deducir de cual elemento se trata, deducir que efectos negativos puede originar en el sistema y como corregir el problema.

### **1.8 Características estáticas y sensibilidad.**

Son aquellas que describen la actuación en ciertas condiciones ambientales, con cambios muy lentos de la magnitud a medir y en ausencia de golpes, vibraciones o aceleraciones (a menos que sea esta la magnitud a medir), aunque existen ciertas distensiones acerca de qué condiciones constituyen las condiciones ambientales, generalmente se establecen de la siguiente manera; una temperatura de  $25 \pm 1^\circ \text{C}$  a una humedad relativa del 90% o menos, y una presión relativa del 90% o menos, y una presión barométrica entre 880 y 1080mbar.

Las características dinámicas son aquellas que relacionan la actuación de un transductor con las variaciones de la magnitud a medir en el campo. Las características del medio ambiental, son aquellas que relacionan la actuación de un transductor antes de su exposición (características ambientales no operativas) o durante la exposición (características ambientales operativas) a unas condiciones externas (como temperaturas, golpes, vibraciones). Características de

fiabilidad que relacionan la esperanza de vida del transductor con una serie de sucesos que pueden presentarse por la utilización inadecuada en un sistema en el que opera conjuntamente.

Para todo transductor existe una relación ideal o teórica entre la salida y la magnitud a medir. Si el transductor estuviera diseñado idealmente y fabricado de materiales perfectos utilizando métodos y técnicas ideales, la salida de este transductor ideal indicaría siempre el valor real de la medición. La salida seguiría exactamente la curva teórica prescrita que especifica la relación entre la salida y la magnitud aplicada sobre el rango del transductor.

Para considerar los errores del transductor se deben establecer las desviaciones máximas respecto de una línea o curva de referencia específica que define la relación entre la salida y la magnitud a medir sobre el rango del transductor (banda de error), la existencia de errores individuales como la no linealidad, no repetibilidad, histéresis, desplazamiento del cero y desplazamiento de la sensibilidad debe ser analizada aparte y debe ser entendida en la naturaleza de estos errores. El efecto de estos errores en el comportamiento del transductor y los datos obtenidos deben ser conocidos.

Las características del error se determinan mediante calibración, este término implica usualmente una calibración estática, correspondiente al análisis de características determinadas estáticamente. Una calibración (estática) es una prueba durante la cual se aplica una magnitud de valor conocido a un transductor y se registra la lectura de la salida correspondiente.

Cuando realizamos el registro en forma de gráfica se le llama curva de calibración y se obtiene a partir de un registro de calibración, ya sea manualmente o mediante la utilización de un programa de computadora. La realización de esta prueba sobre el rango completo del transductor con magnitudes crecientes y decrecientes se denomina ciclo de calibración; esta puede comprender usualmente dos o más ciclos de calibración que se indica como ciclo 1 o 2. Los errores individuales se determinan mediante calibración, figura 1.14.

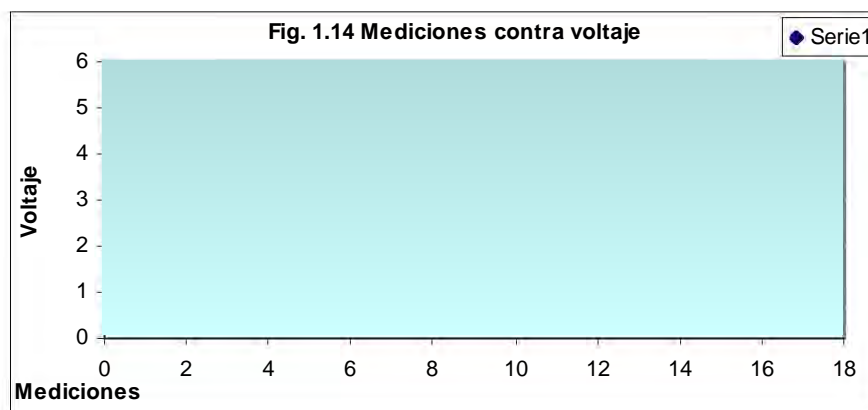


Figura 1.14. Ejemplo de la curva de calibración

Las características de fiabilidad comprenden la estabilidad temporal de la salida, el desplazamiento del cero y el desplazamiento de la sensibilidad; la estabilidad temporal de la salida es el cambio ocurrido en la salida en un periodo de tiempo específico cuando la magnitud que se mide se mantiene constante (y a un valor distinto de 0) y mientras todas las condiciones ambientales se mantienen constantes. El desplazamiento de cero es un cambio en la salida

correspondiente a la magnitud cero dentro de un periodo de tiempo específico, a temperaturas ambientales. La salida para magnitud cero es la salida de un transductor en condiciones ambientales, si no se requiere otra cosa, con excitación nominal y una magnitud aplicada 0. El desplazamiento de cero se caracteriza por ser un desplazamiento paralelo a la curva de calibración.

El desplazamiento de sensibilidad es una variación en la pendiente de la curva de calibración debido a un cambio en la sensibilidad, se especifica como el valor máximo observado durante un periodo de tiempo a temperaturas ambientales o con otras condiciones dadas.

La histéresis es la diferencia máxima a la salida, de un valor a medir para un valor determinado anteriormente cuando éste valor es alcanzado mediante el aumento o la disminución de la magnitud, en otras palabras, éste error se presenta cuando al realizar una medición resulta con un incremento en la magnitud y posteriormente se realiza en un decremento y los valores al llegar al mismo punto no coinciden (figura 1.15) La histéresis se expresa como un porcentaje de error.

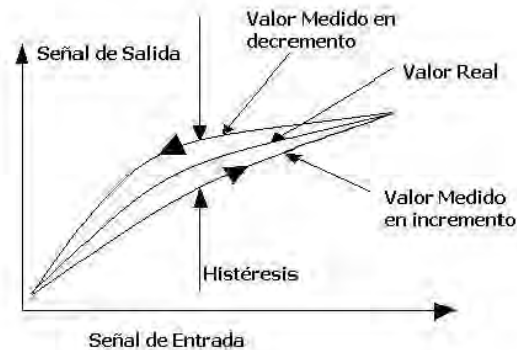


Figura 1.15. Curva característica de histéresis diferencia de salida para una misma entrada.

La histéresis es la máxima diferencia en la salida, de un valor de la magnitud a medir para un determinado valor interior al rango cuando este valor es alcanzado mediante el aumento y disminución de la magnitud. Muchos tipos de transductores tienen histéresis, que está ocasionada normalmente por una retención en la acción del elemento del sensor.

### **Cambios en la medición debido al medio ambiental**

Las características de actuación estática así como las características de actuación dinámica de los transductores se definen como aquellas que tiene el transductor en condiciones ambientales constantes y en ausencia de condiciones externas (condiciones del medio ambiental) que puedan afectar a la operación del transductor; es decir cuando esperamos que un transductor opere bajo condiciones distintas a aquellas en la que ha sido calibrado. Se deben conocer los efectos ambientales y las desviaciones resultantes de las actuaciones estáticas (errores ambientales), deben estar limitadas por tolerancias y determinadas mediante pruebas. Estas pruebas ambientales adicionales pueden realizarse sobre cada transductor utilizado, aunque es más frecuente hacerlo sobre una muestra.

Los efectos de montaje pueden aparecer durante la instalación del transductor, de manera que cambien las características del mismo por ejemplo porque la superficie del montaje no se

encuentra de la manera que deseamos o pensamos y por esto se presentan deformaciones en el sistema. El error de montaje puede ser originado por conexiones eléctricas o también por el fluido a medir.

Otros efectos ambientales que afectan un transductor durante su operación normal pueden ser la humedad, efectos externos como aislamiento y la corrosión, más específicamente en nuestro estudio pueden existir efectos de los campos magnéticos sobre los elementos de transducción y todos los circuitos integrados, así como efectos de impedancias de entrada, de salida y de la fuente. Es importante tener en cuenta el rango de temperaturas en el que oscilan la toma de mediciones, es decir, la temperatura más alta y la más baja a las cuáles el transductor puede estar expuesto sin que se le dañe o sufra alguna alteración en su desempeño.

## CONCLUSIONES

En este primer capítulo se dio un enfoque sobre el funcionamiento del haz láser, la teoría básica de su funcionamiento físico, los elementos principales, tipos de láseres; asimismo se explicó el funcionamiento de un resonador óptico, los tipos de bombeo existentes para activar un láser, algunas de sus ecuaciones para comprender este proceso, las condiciones que deben existir para que permanezca un flujo de fotones constante, etc.

Primeramente se expuso de forma sencilla un acercamiento detallado al comportamiento físico de los electrones y sus diferentes interacciones cuanto-átomo, tales como emisión espontánea, emisión estimulada y absorción; además de sus efectos en el flujo de fotones para mantener su frecuencia, dirección y polarización. Se analizó de forma general como las características de los láseres influyen en el desarrollo de nuestra investigación, por ejemplo la ganancia que está ligada con la intensidad óptica, el desfase está basado en la frecuencia y esta depende directamente del coeficiente de la ganancia, la eficiencia que esta relacionada con las ecuaciones de decaimiento, así como el tiempo de vida no radiativo, y principalmente la coherencia espacial, entre otras.

Se establecieron por lo tanto, las bases de funcionamiento físico de dos de los elementos principales del método de deflexión de haz láser, (el láser y el fotodetector). Para comprender el funcionamiento del método de deflexión de haz láser en los capítulos posteriores, se explicó además del funcionamiento del láser, el del fotodetector, conjuntamente hablamos de las clases de fotosensores que existen en el mercado utilizando en el sistema uno que posee características que facilitan su implementación mediante un circuito diseñado en el laboratorio de óptica aplicada.

También hicimos un análisis de algunos tipos de láseres disponibles en el laboratorio, estableciendo las condiciones mínimas necesarias para poder obtener resultados y lograr obtener un rango de confiabilidad aceptable, por tal motivo se selecciono un diodo láser, debido a las características de este dispositivo, tales como tamaño, potencia, polarización, divergencia del haz, entre algunas otras. Con este pequeño análisis y selección, podremos realizar modificaciones posteriores que nos ayuden a mejorar la sensibilidad en el método de deflexión de haz láser aplicado al dispositivo diseñado para esta tesis.

Además del análisis de dos de los elementos importantes en el método de deflexión de haz láser (láser y fotodetector), también se hizo un análisis de las características de los sistemas de medición y sensado en general. El dispositivo construido para esta tesis es un sistema de

medición o sensado, por tal motivo es necesario conocer los parámetros principales de estos sistemas. Al final de este capítulo se realiza un pequeño estudio sobre las características de los sistemas de medición, este comprende un análisis de las principales características y parámetros en general de los sistemas de sensado, tales como: sensibilidad, repetibilidad, exactitud, linealidad, histéresis, rango, etc. además de un estudio general de las causas que llevan a que un sistema no de la respuesta adecuada, estas variaciones son conocidas como errores de medición o sensado.

Finalmente tenemos los antecedentes necesarios para comprender el análisis enfocado hacia el método de haz láser, que será detallado en el segundo capítulo. Como se había mencionado, esta técnica es casi tan sensible como algunos sistemas interferométricos (Michelson, Match-Zendel o híbridos) con los que se realizan mediciones de desplazamientos de micrómetros, nanómetros o menores.

Todo el estudio y análisis teóricos realizados en este capítulo, son importantes para poder explicar y comprender el funcionamiento del método de deflexión de haz láser en el siguiente capítulo, y así posteriormente, poder comenzar la explicación del funcionamiento completo del sistema.

## BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO I

1. Aboites, Vicente “El láser” Colección La ciencia para todos, Capítulos I, II, III y IV. Fondo de Cultura Económica 2000.
2. Bahaa E. A. Saleh, Malvin Carl Teich, Fundamentals of Photonics, -Wiley Interscience publications, Cap. XIV, XVI, XVII, 1991
3. Eric Udd, “Fiber Optic Sensor, An introduction for engineers and scientist”, Wiley-Interscience Publication, First edition, pp 233-267, 1991
4. E. Hecht, *Optics* (Addison–Wesley Pub. Co., New York, 1990).
5. F. Sears, M. Zemansky, H. Young y R. Freedman, Física universitaria, vol. I y II (Adison-Wesley Longman, México, 1999)
6. Sensores y Acondicionadores de Señal, Ramón Pallás Areny, Ed. Marcombo-Boixre editores, 2ª Edición, 1994
7. Semiconductor sensors, S.M. Sze, Ed. John Wiley and Sons, 1994
8. Understanding Smart Sensors, Randy Frank, Ed. Artech House, 2a Edición, 2000
9. Engineering measurements, James W. Dally, William F. Riley, Kenneth G. McConnell. John Wiley & Sons. 1984 2<sup>nd</sup> Edition.1993.

## ***CAPÍTULO 2. MÉTODO DE DEFLEXIÓN DE HAZ LÁSER***

### **INTRODUCCIÓN**

El estudio del método de deflexión de haz láser es muy flexible, porque no tiene una configuración obligatoria o fija que deba utilizarse; esta flexibilidad puede ser una ventaja, pero a su vez para cada aplicación donde se ha ocupado se ha tenido una implementación diferente, por lo se estudió cuidadosamente el tipo de montaje que debería utilizar.

A lo largo de este capítulo, se siguen detallando las características del dispositivo diseñado; se explica en que consiste el método de deflexión de haz láser, las aplicaciones que se le ha dado y la manera en que ha simplificado la obtención eficaz de parámetros físicos; algunas de estas técnicas incluyen detección retroalimentada en el diodo láser, interferometría y deflexión óptica de un haz láser. Esta última configuración es la que se analizará, como una breve introducción, se puede afirmar que el desplazamiento del cantilever es medido a través de la desviación que sufre el haz láser reflejado, y esta desviación generada es colectada por el detector de posición sensible o sensor. Otro punto interesante es que en la entrada de éste se utilizará el llamado efecto navaja cuyo efecto sobre la respuesta en el fotosensor se explicará a detalle.

Después se estudia la etapa de transducción óptica a electrónica, siendo muy importante para lograr medir de manera exacta los desplazamientos realizados por el sistema. La amplificación requerida es fundamental, ya que la señal proporcionada por el fotosensor es de pequeña magnitud para que el equipo con que se sensorá puedan detectarla, es decir, del rango de [mV] milivolts, y es algo inestable. Al utilizar el circuito se pudieron leer apropiadamente los valores y se realizaron las pruebas necesarias para corroborar que los valores obtenidos fueran buenos, es decir, que el funcionamiento del montaje alcanzara una eficiencia suficiente; se observó que el circuito diseñado proporciona la amplificación necesaria para obtener los resultados esperados.

Asimismo, se observaron las diversas clases de ruidos limitantes de la respuesta del diseño propuesto y se realizó un análisis para clasificarlas y de esta manera poder minimizarlas; algunas clases de ruido ya habían sido consideradas, tales como el ruido mecánico, y el electrónico (el cuál habíamos logrado reducir bastante), pero no se había considerado el ruido mecánico y el ambiental, por lo que se debieron considerar como limitantes a la magnitud de los desplazamientos medidos y tratar de minimizarlos lo más posible.

En este capítulo se analizará también el porque está técnica es equivalente a otras más complejas, se hará una comparación entre diferentes tipos de sensores que se han utilizado en otros montajes y se analizará porque nuestro montaje tiene la eficiencia suficiente para alcanzar la resolución deseada. Se estudiarán las condiciones adecuadas para alcanzar un funcionamiento eficiente de la técnica, para obtener resultados que permitan medir desplazamientos en baja escala tan minúsculos como sean posibles.

### **2.1. Introducción al método de deflexión de haz láser.**

La técnica de deflexión de haz láser fue introducida por Meyer y Amer<sup>1</sup> y se caracteriza por su simplicidad y exactitud, debido a que se ha aplicado adecuadamente en algunos sistemas, sin importar si es en el campo de la física o la ingeniería o de alguna otra área, el método puede simplificar considerablemente el análisis; debido a esto es ampliamente utilizado en el campo de la investigación, la industria y consecuentemente en el comercial. La importancia del montaje de esta técnica radica en que aunque es simple y de fácil implementación, a simple vista parecería que solo podría dar resultados inexactos o ineficaces, sin embargo, los resultados que se pueden alcanzar son muy confiables y exactos.

Además de estas características que se han mencionado posee un extenso rango de escalas, es decir, gracias a esto se pueden medir hasta fracciones de Angstroms ( $1 \times 10^{-10}$ , tabla 1 figura 2.5) de forma muy exacta; se ha aplicado en técnicas de detección fototérmicas, en la cuál la deflexión de un haz láser produce un ángulo por inducción térmica en el medio y de esta manera se monitorean sus propiedades térmicas.

Debido a la gran sensibilidad que posee el método de deflexión de haz láser, se compara su eficiencia con la de algunos interferómetros, es por ello que es necesario hacer un análisis comparativo de estos métodos para observar las ventajas que se obtienen de emplear el método de deflexión de haz láser sobre otros sistemas de medición de desplazamientos similares. Se realizará una comparación del sistema propuesto contra algunas configuraciones equivalentes más complejas, y se analizará el porque es fundamental que el sistema tenga una determinada longitud, en razón de poder alcanzar la magnitud de los resultados esperados, y de esta manera cumplir con los objetivos propuestos. Asimismo se establecerán las condiciones de los factores de dependencia del método de deflexión de haz láser. (Suena mas como a introducción esta parte)

También se ha usado como patrón de detección de referencia; asimismo, ha sido utilizada para comprobar las inhomogeneidades físicas existentes en una superficie plana como su conductividad, para calibrar dispositivos de desplazamientos ó para hacer la medición del ángulo de rotación para balances de torsión muy sensibles<sup>2</sup>.

El análisis teórico detallado de esta técnica muestra que tanto la relación señal a ruido (SNR) como el ruido de disparo aunque son limitantes de los sistemas de detección, en el método proporcionan resultados lo suficientemente adecuados para llegar a la resolución atómica. La comparación muestra que la señal a ruido del método de deflexión de haz láser es comparable a la de las técnicas interferométricas.



**Análisis matemático del método de deflexión de haz láser.**

El principio físico del método de deflexión de haz láser, se explica a través del movimiento de un cantilever (una barra libre en un extremo y fija en el otro con un solo grado de libertad) el cual tiene en su parte superior una superficie reflejante (un espejo) a través del cual un haz de luz láser es reflejado. El motivo del empleo de una fuente láser, es debido a que esta presenta características de alta coherencia espacial y temporal, por lo que el análisis del haz de luz es mediante rayos (teoría paraxial de la luz).

Al incidir el haz láser en la superficie reflejante del cantilever, esta lo hace con un cierto ángulo de incidencia que será igual al ángulo reflejado a partir de la normal del cantilever como se muestra en la figura 2.1.

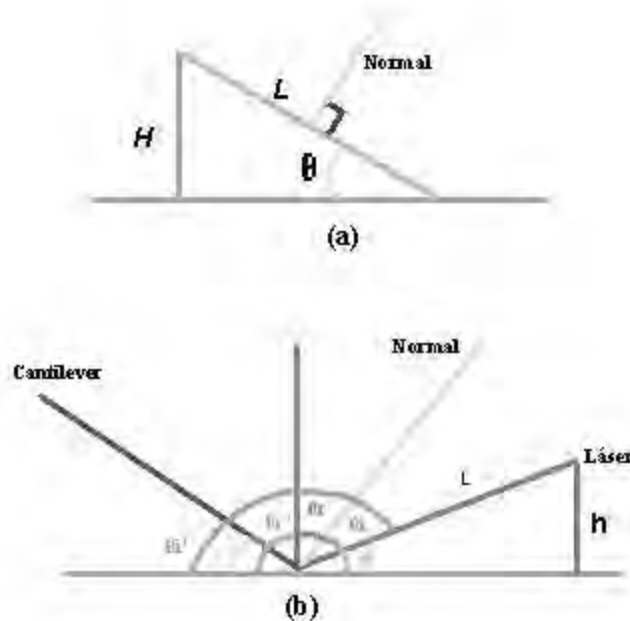


Figura 2.1. a) Cantilever con un ángulo de inclinación  $\theta$ . b) Haz láser incidente en el cantilever inclinado.

Ecuaciones referidas al cantilever:

$$\begin{aligned}
 N &= 90 + \theta (\text{Cantilever} = \theta) \\
 \theta_i &= \theta_r
 \end{aligned}
 \tag{2a}$$

Ecuaciones referidas al plano x (base):

$$\begin{aligned}
 \theta_i &= N + \theta_i \\
 \theta_r &= N - \theta_i
 \end{aligned}
 \tag{2b}$$

De estas ecuaciones y de los ángulos de la figura 2.1b) obtenemos que:

$$H = L \operatorname{sen} \theta; \text{ despejando: } \theta = \operatorname{sen}^{-1} H/L$$

Para h tenemos:

$$H = L \operatorname{sen} \varphi; \text{ despejando: } \varphi = \operatorname{sen}^{-1} h/L$$

Solución:

$$180^\circ = \operatorname{sen}^{-1} h/L + \theta_i'$$

$$\theta_i' = 180^\circ - \operatorname{sen}^{-1} h/L$$

Igualando:

$$N + \theta_i = 180^\circ - \operatorname{sen}^{-1} h/L$$

$$\theta_i = 180^\circ - N - \operatorname{sen}^{-1} h/L$$

De igual manera:

$$\theta_r = N - \left( 180^\circ - N - \operatorname{sen}^{-1} \frac{h}{L} \right)$$

$$\theta_r = 2N - 180^\circ + \operatorname{sen}^{-1} \frac{h}{L}$$

$$\theta_r = 2\theta + \operatorname{sen}^{-1} \frac{h}{L}$$

## **2.2. Análisis comparativo en términos de sensibilidad entre el interferómetro de Michelson y el OBDM**

En este estudio se presenta una comparación entre un interferómetro de Michelson y una configuración de deflexión de haz láser (ambos limitados por el ruido de disparo y difracción principalmente) en una aplicación para el microscopio de fuerza atómica (AFM). La comparación muestra que ambos métodos poseen esencialmente la misma sensibilidad. Este hecho sobresaliente se explica mediante la equivalencia física tanto del método de deflexión de haz láser como del interferómetro de Michelson.

El microscopio de fuerza atómica (AFM) fue explorado por Binnig, Quate y Gerber<sup>4</sup> como un método de alta resolución topográfica de imagenología para aisladores y conductores. En el AFM la muestra a ser capturada es acercada a una punta sensitiva con un pequeño cantilever, de esta manera existen fuerzas interactuando entre la muestra y la deflexión de la punta del cantilever. En el diseño original, el desplazamiento del cantilever es detectado por una punta de tipo túnel en el reverso del cantilever. La deflexión es detectada por medio de un detector de posición sensitiva (detector de split).

Deflexión de haz láser vs. interferometría: para la detección de desplazamientos de un cantilever en AFM, los límites fundamentales de cualquier sistema de detección óptica son fijados por la difracción y el ruido de disparo de fotones principalmente. Para un sistema de detección en sí, otras fuentes de ruido son de una naturaleza menos primordial, como lo son: vibraciones mecánicas, vibraciones acústicas, ruido electrónico, inestabilidades de la fuente de luz, así como ruido térmico. A continuación daremos la descripción de ambos métodos, asumiendo que la difracción y el ruido de disparo limitan nuestro sistema principalmente.

En primer lugar consideraremos el interferómetro de Michelson que se usa ampliamente en muchas aplicaciones de la optoelectrónica, la respuesta del interferómetro como una función de la posición de la punta en el caso ideal (visibilidad de margen igual a 1) se muestra en la figura 2.1. En el punto de cuadratura (punto  $Q$ ) para pequeños desplazamientos de la punta  $\Delta z$ , el cambio en el número de fotones incidentes en el detector durante la toma de lectura (duración:  $ts$ ), puede ser aproximado por:

$$\Delta N = \frac{tN_{tot}\Delta z 2\pi}{\lambda} \tag{2.1}$$

Donde  $N_{tot}$  es la cantidad total de fotones emitidos en el láser por segundo y  $\lambda$  es la longitud de onda de la luz láser. La relación señal a ruido (SNR-signal to noise ratio, por sus siglas en inglés) para la medición de  $\Delta z$ , en términos de los fotones incidentes en un detector ideal (con eficiencia cuántica igual a uno y sin corriente de oscuridad) esta dada por:

$$SNR_{inf} = \frac{(8\pi^2 tN_{tot})^{1/2} \Delta z}{\lambda} \tag{2.2}$$

Donde asumimos que el valor del estado de equilibrio (cuadratura) se ha establecido durante un largo periodo de tiempo para lograr minimizar la incertidumbre de la señal.

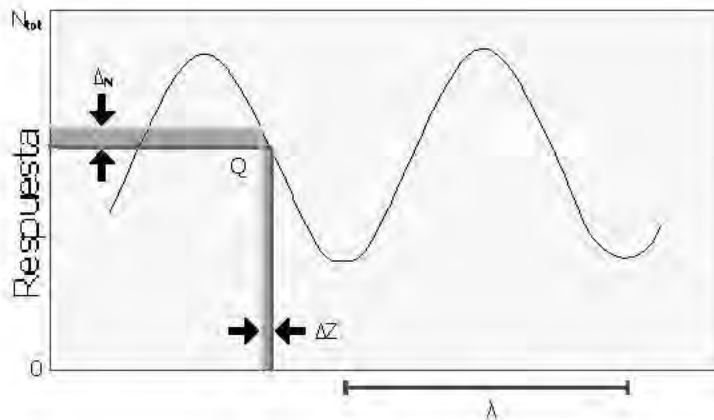
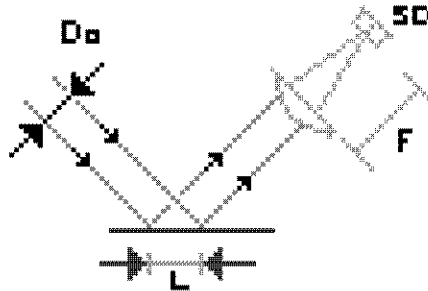


Figura 2.2. En la figura se muestra la respuesta de un interferómetro expresada como el número de fotones incidente en el detector por segundo en función de la posición de la punta en  $z$  del cantilever; en el punto de cuadratura, punto  $Q$ , un cambio en la posición del cantilever  $\Delta z$  causa un cambio en la cantidad de fotones incidentes en el detector  $\Delta N$ .

Para el análisis se considerarán las siguientes condiciones ideales: un haz láser gaussiano colimado con un diámetro  $D_0$  que incide en la parte trasera del cantilever (parte superior donde el láser es reflejado), con longitud igual a  $L$ ,  $D_0 < L$ . Este tiene una superficie plana reflectiva.

El haz gaussiano reflejado es enfocado por un lente (con longitud focal  $f$ ) en un detector sensitivo de posición, que consiste en 2 detectores espaciados adyacentes (detector de split). La hipótesis se basa en que el ancho de la separación entre ambos detectores es muy pequeña comparada con el tamaño del haz del láser en el detector; desde este punto se asume durante todo nuestro estudio la condición que  $D_0 < L$ , haciendo así que toda la luz sea reflejada por el cantilever, en el plano focal de los lentes la distribución de intensidad es también Gaussiana con un diámetro de:

$$D_{sd} = \frac{4\lambda' f'}{\pi D_0} \tag{2.3}$$



*Figura 2.3. Se observa el haz láser de diámetro  $D_0$  incidiendo en el cantilever de longitud  $L$ . La luz reflejada es enfocada por el lente de distancia focal  $F$ , hacia el detector de split  $SD$ .*

Evidentemente se observa que un desplazamiento en el cantilever  $\Delta z$  da lugar a un desplazamiento en el spot del láser  $\Delta s$  (punto del láser reflejado en la zona sensible detector) en el detector de split; se asume que el cantilever gira alrededor de su base como un cuerpo sólido y que no existen perturbaciones internas en el. De ser así  $\Delta s$  está dado por:

$$\Delta s = 2' f' \frac{\Delta z}{l} \tag{2.4}$$

El factor 2 se debe a que la desviación angular del haz láser que se refleja es 2 veces la desviación angular del cantilever. De esta relación podríamos suponer que solo desplazamientos más grandes que el tamaño del spot del láser podrían ser detectados apropiadamente (criterio de Rayleigh), sin embargo no es así. Si el detector de split se sitúa en el plano focal del lente, desplazamientos mucho más pequeños se pueden detectar restando las señales de ambos detectores. El límite de detección está determinado por la exactitud de la diferencia o resta de las señales de ambos detectores. Esta diferencia de señal en términos de fotones incidentes en el detector puede calcularse mediante las ecuaciones 2.4 y 2.5, así como por el perfil de irradiancia en el detector de split Gaussiano:

$$\Delta N = tN_{tot} \sqrt{2} (2\pi)^{1/2} \frac{D_0}{L} \frac{\Delta z}{\lambda} \quad (2.5)$$

Donde el factor numérico es debido a la forma Gaussiana del haz láser y la difracción. La SNR se calculará con la ecuación:

$$SNR_{OBD} = \frac{\Delta N}{(tN_{tot})^{1/2}} = (8\pi tN_{tot})^{1/2} \frac{D_0}{L} \frac{\Delta z}{\lambda} \quad (2.6)$$

Esta ecuación indica que  $D_0$  debe ser tan grande como sea posible para maximizar la SNR. Sin embargo, nuestro análisis es válido solo para  $D_0 < L$ . Si tuviéramos  $D_0 > L$  la difracción del haz láser en el cantilever habría de alterar la distribución de irradiancia Gaussiana en el haz reflectado. En el caso límite  $D_0 = L$ , cuando es captada toda la luz la relación  $SNR_{inf}$  y  $SNR_{OBDM}$  es  $\pi^{1/2} \approx 1$  (rel. SNR 2.2 y 2.6).

Esto lleva a la conclusión de que para casos ideales, en términos de sensibilidad, el OBDM (Método de deflexión de haz láser) y el interferómetro de Michelson son equivalentes. De esta manera justificamos la elección del OBDM sobre un interferómetro de Michelson en términos de sensibilidad para la construcción del dispositivo de esta tesis.

### **2.2.1. Características de señal a ruido del método OBDM**

Meyer y Amer<sup>1</sup> introdujeron la técnica de deflexión de haz láser usando un rayo colimado de He-Ne, el cuál se hacía incidir en un espejo cuadrado relativamente amplio sujeto en el reverso de un cantilever de Tungsteno. El montaje es igual al de la sección anterior (figura 2.3), exceptuando el lente situado frente al detector; una derivación en este caso lleva a la siguiente ecuación:

$$SNR_2 = \left( \frac{\lambda \eta P_{tot}}{2hcB} \right)^{1/2} 2g_1g_2 \frac{x}{D(x)} \frac{\Delta z}{L} \quad (2.7)$$

Donde  $P_{tot}$  es la potencia total incidente en el detector,  $\eta$  es la eficiencia cuántica del detector,  $h$  es la constante de Planck,  $c$  es la velocidad de la luz en el aire,  $B$  es el ancho de banda del sistema de detección,  $X$  es la distancia entre el cantilever y el detector.  $g_2$  es un factor geométrico igual a  $4(\pi/2) \approx 2.50$  para los láseres Gaussianos.

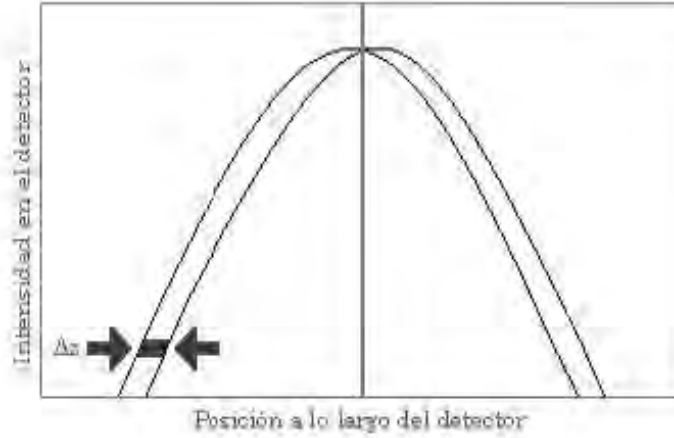


Figura 2.4. En la deflexión de haz óptico un pequeño desplazamiento de la punta  $\Delta z$  causa un cambio  $\Delta s$  en la posición de la distribución de intensidad en el detector de split. El pequeño desplazamiento es detectado sustrayendo las señales de los 2 segmentos del detector.

Se concluye que haciendo  $X$  tan grande como sea posible, la relación SNR alcanzará un valor ilimitado; sin embargo, este valor no es constante cuando  $X$  se vuelve demasiado grande, es decir que si aumentamos la longitud entre el láser y el detector, llegará un punto en el cuál la sensibilidad alcanzará su máximo, es decir, su valor se mantendrá constante, pero la SNR nos proporcionará un valor que nos facilite el registro de desplazamientos en baja escala.

La parte en donde el haz se hace más delgado (waist) fig. 2.4 con un diámetro  $D_0$ , se calcula el diámetro de un haz láser Gaussiano como una función de  $X$  está dada por:

$$D(x) = D_0 \left[ 1 + \left[ \frac{4\lambda X}{\pi D_0^2} \right]^2 \right]^{1/2} \quad (2.8)$$

Donde  $SNR_2$  es máxima cuando  $X$  se vuelve muy grande, se aproxima al límite de la difracción, cuyo valor está dado por la relación:  $x > \pi D_0^2 / 4\lambda$  y la razón  $x/D(x)$  está fijada por la difracción. En este caso la ecuación 2.8 se reduce a la ecuación 2.7; pero si la ecuación 2.7 la reescribimos usando la potencia óptica en lugar de los fotones incidentes en el detector, obtendremos:

$$SNR_1 = \left( \frac{\lambda \eta P_{tot}}{2hcB} \right)^{1/2} g_1 g_2 \frac{\pi x}{2L} \frac{\Delta z}{\lambda} \quad (2.9)$$

De esta manera concluimos que cuando utilizamos un haz láser colimado, la distancia entre el cantilever y el sensor debe ser grande:  $x > \pi D_0^2 / 4\lambda$ . En el caso límite puede obtenerse también por medio de montar un lente en la parte frontal de detector (esto lo llevamos a cabo tanto en el detector como en el cantilever sin obtener mejores resultados, debido a que no estamos en el caso limite, por lo que decidimos dejarlo como estaba, sin el lente).

Como se ha analizado anteriormente esta relación está limitada por la difracción. Se pensaba que por medio de la implementación de un lente enfocado hacia el detector aumentaría la

sensibilidad o habría un gran cambio afectando el sistema, pero esto no incrementó la sensibilidad debido a  $\Delta S/D_{PSD}$  ya que esta determinada por la difracción.

Intensidad en el detector: en primer lugar se considerará la situación en la cuál el haz láser Gaussiano es enfocado hacia el cantilever como vemos en la figura 2.5. En este caso la potencia óptica es pequeña. Asumiendo que el detector está situado lejos de la región en donde el haz se vuelve más fino (waist), el desplazamiento relativo del haz láser Gaussiano en el detector puede ser escrito como:

$$\frac{\Delta S}{D_{PSD}} = g_1 \frac{\pi x \Delta z}{2L \lambda} \quad (2.10)$$

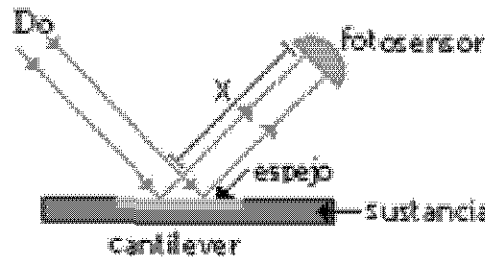


Figura. 2.5 El diodo láser es enfocado en el cantilever de longitud  $L$ , el haz reflejado es detectado por el detector (fotosensor). La distancia entre el cantilever y el detector es  $X$ , la cuál se debe maximizar.

Donde  $D_o$  es el diámetro del spot del láser en el cantilever, obteniendo esta ecuación y haciendo cálculos matemáticos logramos que:

$$SNR_3 = \left( \frac{\lambda \eta P_{tot}}{2hcB} \right)^{1/2} g_1 g_2 \frac{\pi x \Delta z}{2L \lambda} \quad (2.11)$$

Observamos que esta ecuación es la misma que la de ecuación 2.9, la expresión describe el montaje ocupando un haz láser colimado; cuando se examinan detalladamente ambas configuraciones, es muy claro que son comparables. Sólo la región donde el haz es más delgado (WAIST) en el montaje enfocado hacia el cantilever es mucho mas pequeña (restringido por la difracción) y en el caso límite ya se ha alcanzado cuando el detector se encuentra a una distancia muy cercana del cantilever.

Podemos observar desde la ecuación 2.10 que la SNR es independiente de la distancia  $X$  entre el cantilever y el detector (mientras consigamos que el tamaño del spot sea más pequeño que el área sensible del detector y este se situé lejos del WAIST). El factor de amplificación geométrica no es tan importante como se pensaba en un principio. Es cierto que el desplazamiento del spot en el detector es proporcional a  $X$ , pero este también limita al tamaño del diámetro del spot.

De hecho la SNR decrece lo cuál es perjudicial para nuestras mediciones. En el caso donde el cantilever es reflejado hacia el detector ninguna señal debe ser sensada (calibración del sistema que se analizará más a fondo en el capítulo 3), esto contrasta con la configuración del haz láser colimado.

**Análisis del haz láser enfocado en el fotodetector.**

Anteriormente vimos que la SNR es proporcional al desplazamiento relativo del haz en el detector con respecto al diámetro del haz en esa posición. Las dimensiones de los cantilevers son tales que solo la parte central del haz láser Gaussiano puede reflejarse, lo cuál nos limita a que solo una fracción de la potencia óptica sea captada, además debido a la difracción, el tamaño en la luz del spot en el detector se incrementa. Ambos efectos dan como resultado un decremento en la SNR. Conjuntamente para lograr obtener una expresión para la SNR en este caso, debemos tomar algunos efectos importantes en cuenta.

Para obtener un análisis menos complejo se realizarán aproximaciones del haz láser al cantilever por medio de ondas planas. La superficie reflectiva del cantilever es aproximada por un disco circular (de diámetro  $D_c$ ). Asumimos que la refracción en las ondas reflejadas es dominada por las pequeñas dimensiones de este disco. Esta afirmación es válida solo cuando el diámetro del haz láser en él es casi perpendicular al cantilever, la potencia óptica que es reflejada hacia el detector puede ser aproximada por:

$$P_{det} = 2 \frac{(a + b)^2 D_c^2}{b^2 D^2} P_{tot} \tag{2.12}$$

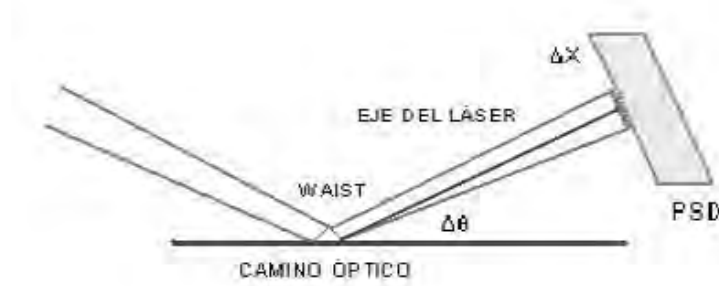


Figura 2.6. Zona de deflexión (waist).

Donde  $D_c$  es el diámetro del haz láser,  $a$  es la separación entre los lentes y el cantilever,  $b$  es la distancia entre el cantilever y la posición de enfoque. El factor 2 se debe al hecho de que la intensidad máxima en un haz láser Gaussiano es 2 veces la intensidad promedio. Se muestra que el tamaño en la luz del spot en el detector está dado por el diámetro en la primera zona de Fresnel,  $D_{psd} = 2(\lambda x)^{1/2}$ ; el desplazamiento relativo está dado por:

$$\frac{\Delta s}{D_{psd}} = g_1 \left( \frac{x}{\lambda} \right)^{1/2} \frac{\Delta z}{L} \tag{2.13}$$



Usando las ecuaciones 2.12, 2.13, y fijando  $x=ab$ , la expresión para la SNR puede ser derivada como:

$$SNR_4 = \left( \frac{\lambda \eta P_{tot}}{2hcB} \right)^{1/2} g_1 g_2 \frac{a+b}{b} \frac{Dc}{D} \frac{2b}{\lambda} \frac{\Delta z}{L} \quad (2.14)$$

Donde  $g_3$  es un factor geométrico<sup>2</sup>  $8/\pi \approx 2.54$ . Una variación del esquema pasado se obtiene cuando la luz reflejada se colecta por medio de un lente y se enfoca hacia el detector. En ese caso la situación puede ser descrita por la teoría de difracción de Fraunhofer, un disco de aire se forma en el detector con el tamaño del diámetro del spot central:

$$D_{aire} = 2.44 \frac{\lambda f}{D_c} \quad (2.15)$$

Utilizando esta ecuación y la ecuación 2.12 la SNR es:

$$SNR_5 = \left( \frac{\lambda \eta P_{tot}}{2hcB} \right)^{1/2} 0.58 g_1 g_2 \frac{a+b}{b} \frac{Dc}{D} \frac{Dc}{L} \frac{\Delta z}{\lambda} \quad (2.16)$$

### **2.2.2. Análisis matemático de sensibilidad de los diferentes montajes de la técnica de deflexión de haz láser.**

Del análisis de la sección anterior, vemos que la relación SNR no está en función de la frecuencia. El uso práctico de los montajes no se aprecia a simple vista. Pero si deseáramos construir un AFM en el cual la punta y no la muestra se escaneara, el spot del láser en el cantilever debería ser lo suficientemente grande para minimizar las fluctuaciones en la señal captadas por el detector, causadas por el movimiento del cantilever y maximizar la señal de los desplazamientos que es la de mayor interés.

Se ha hecho una comparación de la razón SNR del método de deflexión de haz láser con la SNR de un interferómetro, llegando a la conclusión de que la precisión de los desplazamientos del cantilever medidos en ambas técnicas son equivalentes. Esto se puede apreciar más claramente si nos basamos en que los principios implícitos en ambos métodos son similares y el método de deflexión de haz láser es esencialmente también una técnica interferométrica.

En la siguiente parte se restringe a la situación descrita en la parte donde el tamaño del cantilever es grande  $D_0 < L$ . Suponemos que dividimos el haz colimado en 2 haces colimados, uno que incide en la base del cantilever y el otro en la parte superior del cantilever.

Los lentes hacen que ambos haces se intersecten en el detector y un patrón de interferencia se forme; un desplazamiento de la punta causará una diferencia de fase entre ambos haces, el cual generará un cambio en el patrón de interferencia en el detector. Para obtener mediciones de buena calidad en el patrón de interferencia se debe detectar exactamente la diferencia de fase introducida por los desplazamientos del cantilever.

Ambos rayos láser pueden ser considerados como rayos de salida del haz colimado, en adición a estos rayos, existen otros numerosos rayos formando el perfil de intensidad Gaussiana. En el

plano focal de los lentes en el detector todos estos rayos interfieren y forman un patrón de interferencia, el cuál se da ahora como un simple cambio de la parte más delgada (WAIST) del spot láser. Este cambio se detecta mediante el detector de split, y es de esta manera que la técnica de deflexión de haz láser puede considerarse como una técnica interferométrica.

Fijando la  $SNR_{inf}$  (ecuación 2.2) igual a 1 y reescribiendo la ecuación obtenemos:

$$\frac{2\pi}{\lambda} 2\Delta z_{min} = \frac{1}{\left[\frac{tN_{tot}}{2}\right]^{1/2}} \quad (2.17)$$

Donde  $\Delta Z_{min}$  es el desplazamiento mínimo detectable del cantilever. El término de la izquierda puede sustituirse por  $\Delta\phi$ , que es la incertidumbre en la diferencia de fase entre ambos haces interfiriendo. El término de la raíz cuadrada puede sustituirse por  $\Delta n$ , que es la incertidumbre en el número de fotones incidentes en el detector (cuadratura) entonces la ecuación 2.17 se convierte en:

$$\Delta\phi\Delta n=1 \quad (2.18)$$

Este es de acuerdo con la relación de incertidumbre para un oscilador armónico,  $\Delta\phi\Delta n > 1$  donde  $\phi$  es la fase y  $n$  el número de cuantos. Además se observa que el interferómetro de Michelson es un método ideal y muy adecuado para detectar diferencias de fase entre ambos haces. Después de haber realizado los cálculos pertinentes y analizando las características del sistema, podemos afirmar que la sensibilidad de la técnica de deflexión de haz láser depende de tres factores muy importantes.

- 1) La diferencia en la longitud del camino óptico introducida por el desplazamiento del cantilever debe ser maximizada iluminando la superficie del cantilever totalmente. ( $D_o/L=1$ ).
- 2) La interferencia de los rayos provenientes de varios puntos del cantilever debe ser óptima. En el caso cuando se sitúa una lente enfocando hacia el detector se esta en el plano focal de los lentes. Si no ocupamos lentes (montajes 3 y 4 de la tabla 1) se está en el campo de la región lejana (WAIST) en la parte donde es más delgado el haz láser.
- 3) Toda la potencia óptica debe ser utilizada.

MONTAJE DE LAS SECCIONES	Desplazamiento mínimo detectable ( $\Delta Z_{min}$ )
MONTAJES 1	$7.9 \times 10^{-15}$
MONTAJE 4	$8.5 \times 10^{-14}$
MONTAJE 5	$2.1 \times 10^{-13}$
Método de deflexión de haz láser (montaje 3)	$1.0 \times 10^{-13}$
Interferometría (Montaje 2)	$1.7 \times 10^{-13}$

Tabla 2. 1. Se hace una comparación de la sensibilidad de los desplazamientos ópticos en la implementación de la técnica de deflexión de haz láser: Montaje 1, láser colimado enfocado en el cantilever; montaje 4, haz láser sin colimar enfocado en el cantilever y después en el fotodetector; montaje 5, el mismo que el 4 pero con un lente enfocando enfrente del detector.

De lo anterior se concluye que la sensibilidad de los montajes es la misma, ya sea ocupando un haz láser colimado o un láser enfocado hacia el cantilever. Esto es debido a que el cambio en el camino óptico permanece constante en ambos casos, exactamente la misma área del cantilever es ocupada por el haz Gaussiano (montajes 4 y 5); la diferencia es un factor de 10 menor que el de los montajes 1 y 3. Se debe a que no toda la potencia óptica disponible es captada. También podemos concluir de la tabla 1 que la resolución atómica en un ancho de banda de 10 kHz es alcanzable para todos los montajes usando esta técnica de deflexión de haz láser.

Además en resultados prácticos tanto el método de deflexión de haz láser como los interferómetros poseen la misma sensibilidad y los valores medidos difieren 10 veces en los límites teóricos fijados por las ecuaciones 2.2 y 2.6, esto es debido a que hemos precisado que los sistemas sean limitados solo por el ruido de disparo.

Pero en la práctica existen muchas otras fuentes de ruido contribuyendo al nivel de ruido total, como las vibraciones mecánicas, las cuáles tienen por naturaleza una baja frecuencia  $<100\text{Hz}$ ; el ruido acústico se puede reducir ampliamente si se aísla el sistema. El ruido electrónico es creado por la línea y la potencia suministrada por las fuentes electrónicas. Tanto el factor dominante de  $60\text{Hz}$  como las altas armónicas contribuyen al ruido electrónico, los amplificadores a bajo ruido, amplificadores estables de alto voltaje son esenciales para reducir el nivel de ruido electrónico especialmente en el caso particular del AFM.

Asimismo las inestabilidades del láser como las inestabilidades en el detector (zona de enfoque) contribuyen al ruido. Además debido a la excitación térmica el cantilever muestra fluctuaciones aleatorias hasta alcanzar el equilibrio (estado estable). Se realizará el análisis de ruido en el capítulo 3.

### **2.3. Límites de los diferentes esquemas de detección implementados en el método de deflexión de haz láser. Comparación entre detectores de split y de efecto lateral PSD.**

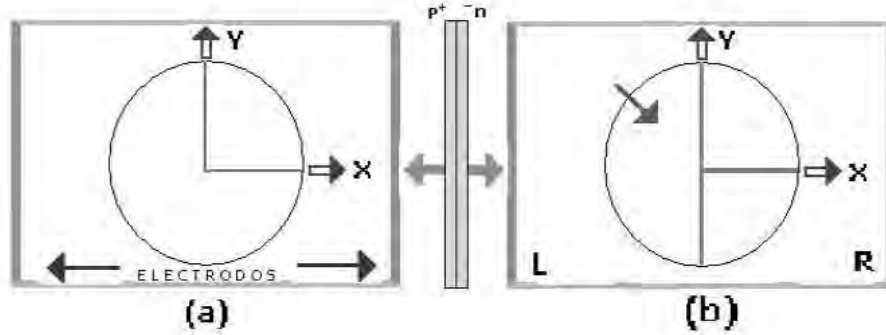
Existen varios tipos de PSD (fotodetectores de split) comúnmente utilizados con el método de deflexión de haz láser, pero en este caso analizaremos solo 2 de ellos:

- ❖ Un detector de split. Un detector bloqueado parcialmente (tapando una sección del spot con una navaja)
- ❖ Un detector de efecto lateral

A menudo el método de deflexión de haz láser es referido como una técnica de “detección de efecto navaja”, ésta consiste en bloquear el spot del haz justo antes de la captación en el detector usando una pantalla delgada opaca con un borde afilado, en orden para evitar la saturación en el fotosensor. Se observa que el efecto navaja es casi equivalente a la magnitud que se obtiene con el detector de split; en el caso del sistema propuesto se utilizará el detector de efecto navaja por simplicidad y disponibilidad. La sensibilidad y el mínimo ángulo detectable son la mitad y dos veces respectivamente los que se tienen en el detector de split, además de que ambas técnicas son equivalentes.

**Comparación de detectores de split y de efecto lateral PSD**

La primera cuestión en aclarar es que, existe una diferencia fundamental en usar uno u otro detector. Sin embargo, para el propósito de esta comparación es conveniente considerar las versiones más simples de ambos detectores PSD.



*Figura 2.6. PSD duolateral. a) para el de efecto lateral PSD. b) detector de split. Cabe mencionar que otras geometrías para detectores de efecto lateral han sido investigadas por muchos autores.*

Los dos detectores adyacentes R y L en la figura 2.6, son asumidos como idénticos e independientes de cada uno respectivamente. El spot del láser en ambas figuras se muestra como un círculo; el origen de este sistema coordenado se asume como el centro geométrico en el detector. A través de esta investigación asumimos que tenemos un haz láser Gaussiano, cuando éste haz de luz está incidiendo en el PSD de efecto duolateral como vemos en figura 2.6. a) pares de electrón-hueco son generados y un foto-potencial no uniforme es creado. Esto provoca que fluya una corriente hacia los electrodos, se asume que el  $p^+$  y  $n$  en la juntura está inversamente polarizada. Las corrientes en los electrodos en  $x^-$  y  $x^+$  elevándose desde un “punto” en la condición  $X=X_0$  son  $I_{x^-} = I_s(I-X_0/l)$ , donde  $I_s$  es la corriente total fotogenerada (notar que  $I_{x^-} + I_{x^+} = I_s$ ).

Para un tamaño finito del spot láser debemos integrar sobre el área iluminada las contribuciones de la corriente en cada electrodo. La densidad de corriente generada es  $j_s(x,y) = \kappa I(x,y)$ , donde:

$$\kappa = \frac{q\eta}{h\nu} \tag{2.19}$$

Donde  $q$  es la carga electrónica,  $\eta$  es la eficiencia cuántica;  $h$  es la constante de Planck;  $I(x,y)$  es la intensidad de la luz en el punto  $(x,y)$ . Se asumirá que el campo óptico esta linealmente polarizado. Entonces, si el detector esta situado lo suficientemente lejos del acinturamiento (waist) del haz, los frentes de onda son esféricos y el spot Gaussiano en el detector esta dado por  $E(x,y)$ :

$$E(x,y) = \hat{a}_x E_x(x,y) \text{Re} \left\{ e^{jk_0z + j\omega t} \right\} \tag{2.20}$$

$$E_x(x, y) = \frac{1}{W_d} \sqrt{\frac{4P_0}{c\pi\epsilon_0}} e^{\left[ \frac{-(x-x_0)^2}{w_d^2} \right]} e^{\left[ \frac{-(y-y_0)^2}{w_d^2} \right]} \quad (2.21)$$

Donde:  $P_0$ = Es la potencia promedio en el haz (en el tiempo).  $W_d$ =Diámetro del haz en el PSD.  $c$ = Velocidad de la luz en el vacío. De las ecuaciones de Maxwell y del vector de Poynting, encontramos que la intensidad en el detector PSD esta dada por:

$$I(x, y) = \langle P \rangle = \left( \frac{1}{2} \right) \left( \frac{\epsilon_0}{\mu_0} \right)^{1/2} E_x^2(x, y) \quad (2.22)$$

La señal de salida dada desde el PSD esta dada por la siguiente ecuación donde  $A$ = es el área del PSD:

$$S = I_{x^-} - I_{x^+} = \frac{\kappa}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \int \left[ \int_A |E_x|^2 \left( 1 - \frac{2x}{L} \right) dx \right] dy \quad (2.23)$$

Para maximizar la respuesta de nuestro sistema al realizar la captación, se debe asegurar que todo el haz láser sea detectado por el fotodetector,  $L \geq W_d$  y debemos reemplazar los límites de integración por  $\pm \alpha$  en la ecuación anterior (durante todo este estudio se hará esta suposición); tomando la derivada con respecto a  $X_0$  después de integrar (2.23) se tiene:  $dS/dX_0 = 4\kappa P_0/l$ .

Además para obtener la máxima sensibilidad con el detector de efecto lateral PSD se debe hacer que  $L \cong W_d$  (asumiendo que el haz láser está centrado dentro del detector). A continuación se analiza el caso de utilizar un detector de split como un PSD. El detector de split consiste en 2 detectores adyacentes pero independientes mostrados en la *figura 2.6 b*). El cambio en la señal de salida es igual al cambio en la diferencia de las corrientes fotoinducidas en cada detector.

La corriente inducida en cada detector es proporcional a la potencia óptica recibida en cada uno de ellos. En términos de la señal de salida, un desplazamiento ( $\Delta X_0$ ) del spot del haz láser en el detector es equivalente a un desplazamiento igual del detector en la dirección opuesta mientras se tiene el haz fijo. Además, si asumimos que el spot esta inicialmente centrado en el detector de split (*en*  $X_0=0, Y_0=0$ ), la señal debida al desplazamiento  $\Delta X_0$  del spot Gaussiano desde el centro del detector puede ser calculada como:

$$\approx 2 \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \frac{2\kappa P_0}{w_d^2 c \epsilon_0 \pi} \left[ \int_{-\alpha}^{\alpha} e^{\left( \frac{-2y^2}{w_d^2} \right)} dy \right] \Delta x_0 \quad (2.24)$$

La segunda aproximación es válida para un  $\Delta X_0$  suficientemente pequeño. Veremos que la señal es proporcional a la potencia contenida dentro de una franja de ancho  $2\Delta X_0$ . Tomando el límite  $\Delta X_0 \Rightarrow 0$  y obteniendo la integral en paréntesis tenemos:

$$dS = dx_0 = 2\sqrt{\frac{2\kappa P_0}{\pi w_d}} \quad (2.25)$$

El diámetro del haz  $W_d$  se incrementa con la distancia mientras  $W_d = [1 + (\lambda r / \pi W_0^2)^2]^{1/2} W_0$ , donde  $W_0$  es la parte central del haz láser y  $r$  es la distancia de la parte central a lo largo del eje de propagación del haz. Alejado de la parte central ( $r > W_0^2 / \lambda$ ) el diámetro del haz se incrementa con la distancia mientras  $W_d \cong (\lambda / \pi W_0)$  y  $dX_0 \cong A d\theta$  ( $A$  es la distancia desde el punto de deflexión del detector) en las expresiones para  $dS/dX_0$ , obtenemos la sensibilidad del ángulo de deflexión  $dS/d\theta = 4\kappa P_0 L/A$  y:

$$dS / d\theta = 2\sqrt{\frac{2}{\pi} \frac{\kappa P_0 \pi w_0}{\lambda} \frac{A}{r}} \quad (2.26)$$

Para el PSD de efecto duolateral y el detector de split, respectivamente. Si asumimos que la situación más común (la deflexión es inducida de cerca de la parte central, la más delgada (waist) donde el diámetro del haz es el más pequeño) y  $l = w_d$  para el PSD de efecto lateral (para sensibilidad máxima), se concluye que la sensibilidad del ángulo de deflexión es:

$$dS / d\theta = 2\sqrt{\frac{2}{\pi} \kappa P_0 \frac{\pi w_0}{\lambda}} \quad (2.27)$$

Para el PSD de efecto duolateral y el detector de split. Además la difracción del haz Gaussiano fija el límite de la sensibilidad del ángulo de deflexión; la sensibilidad no se incrementa más allá de sus límites (2.26), mientras la distancia de detección se incrementa. De (2.27) vemos que el PSD de efecto duolateral puede tener una sensibilidad más grande solo por un factor de  $(2\pi)^{1/2} = 2.50$  que el del detector de split.

Además, ya sea el detector de split o el PSD ambos tienen esencialmente el mismo límite de sensibilidad; debemos percatarnos sin embargo, que la sensibilidad de un PSD de efecto duolateral va a ser más pequeña que la del detector de split cuando el tamaño del detector sea mucho más grande que el del spot del haz.

El límite fundamental de la resolución puede ser cuantificado con el (MDA) mínimo ángulo detectable teórico; el MDA en este caso está fijado por el ruido de disparo (debido a la naturaleza de partícula de la luz) y por la sensibilidad (limitada por la difracción).

Algunos otros parámetros pueden, en principio, ser reducidos lo suficiente como para que sean intrascendentes en la respuesta obtenida. Asumimos que la juntura  $p-n$  está basada en el fotodetector. La corriente debido al ruido de disparo conjuntamente con la naturaleza de la partícula de la luz tiene una amplitud cuadrada.  $(i_{noise})^2 = 2q(i_{total})B$ , donde  $q$  es la carga

electrónica, ( $i_{total}$ ) es la corriente promedio, y B es el ancho de banda del detector más los demás componentes electrónicos. El cambio en la señal debido a la deflexión del láser es  $\Delta S = (dS/d\theta)\Delta\theta$ . El MDA es igual a  $\Delta\theta$  cuando  $\Delta S$  es igual a  $[2q(i_{total})B]^{1/2}$ . Además el  $MDA = [2q(i_{total})B / (\partial S / \partial \theta)]^{1/2}$  y obtenemos:

$$MDA = \sqrt{\frac{qB\lambda}{\kappa\pi P_0 2w_0}} \quad (2.29)$$

Para el PSD duolateral y el detector de split, respectivamente. Veremos que el MDA del detector duolateral es  $1/[2\pi]^{1/2}$  veces el del detector de split.

## **2.4 Diversas fuentes de ruido en el sistema**

### **Ruido en fotodetectores**

El fotosensor o fotodetector genera una corriente eléctrica aleatoria<sup>5</sup>, la cuál produce un valor que se encuentra cerca del promedio de la fotocorriente; este promedio se puede caracterizar por medio de la desviación estándar:

Tenemos que los fotodetectores semiconductores y los semiconductores fotónicos generadores son dispositivos inversos. Los detectores convierten la entrada de flujo fotónico en una salida de corriente eléctrica, los generadores realizan la operación opuesta. Se utiliza el mismo material semiconductor para fabricar ambos dispositivos.

Las principales fuentes de ruido para dispositivos de fotodetectores son:

- ❖ Ruido fotónico: La principal fuente de ruido está relacionada con el arribo y absorción aleatorios de fotones, lo cuál se determina por medio de procesos estadísticos, particularmente la curva de Poisson.
- ❖ Ruido fotoeléctrico: Para un fotodetector con eficiencia cuántica menor a uno, un solo fotón generará un par de portadores con una probabilidad de falla de  $(1-\eta)$  y por tener una probabilidad aleatoria es una fuente de ruido.
- ❖ Ruido de ganancia: En el proceso de amplificación se genera ruido debido a la naturaleza aleatoria de la absorción de fotones y a la misma amplificación, ya que los dispositivos amplificadores no son ideales.
- ❖ Ruido en el circuito receptor: Los diferentes componentes electrónicos en un circuito receptor óptico tales como resistencia, transistores, capacitores, entre otros, contribuyen al ruido del circuito receptor.
- ❖ La señal entra al detector como ruido intrínseco del fotón. De esta manera el fotoefecto o efecto fotoeléctrico convierte los fotones en fotoelectrones. En este proceso la señal principal decrece por el factor  $\eta$  (eficiencia cuántica); el ruido también decrece. Así el promedio de señal a ruido de los fotoelectrones es bajo con respecto a los fotones

incidentes. Si existe un mecanismo de amplificación en los detectores, el ruido también introduce su propia ganancia.

- ❖ Características de desempeño de medición: Razón de señal a ruido (SNR), señal mínima detectable, sensibilidad del receptor.
- ❖ Otras fuentes de ruido aún no determinadas tales como “dark current” corriente de oscuridad y “background current” corriente del entorno.
- ❖ La corriente de entorno: es la que esta asociada con la detección de fuentes extrañas de luz como la solar o la luz eléctrica.
- ❖ La fotodetección genera una corriente de oscuridad que simplemente es la corriente producida en ausencia de luz, este tipo de ruido –por corriente de oscuridad- es generado por sintonización y por calor, genera un par de portadores que producen la corriente.
- ❖ Para evaluar el desempeño de los semiconductores fotodetectores en varias aplicaciones es necesario entender sus propiedades de ruido.
- ❖ El ruido es producido por diferentes y variadas fuentes, pero las principales son debidas al carácter mismo del fotón, (ruido fotónico), la conversión de fotones a fotodetectores (ruido fotoelectrónico), por la generación de portadores secundarios para la amplificación interna (ruido de ganancia) así como el ruido del circuito receptor.

Los ruidos debidos a todas estas fuentes, pueden ser minimizados al máximo dependiendo de la configuración, análisis de detección y métodos diversos de filtrado en cualquier sistema de sensado o detección. Se ha realizado un análisis de varias fuentes de error durante la toma de mediciones en nuestro montaje experimental, y aunque la mayoría de estas fuentes se han logrado minimizar, sin embargo algunas se comportan de manera inherente al sistema.

Los sistemas de mediciones diseñados en laboratorios normalmente alcanzan niveles de exactitud del 2 al 5%, cabe mencionar que estos fueron realizados con un presupuesto precario, a comparación con sistemas que brindan la misma información y con el mismo rango de confiabilidad, pero tienen un presupuesto destinado a su construcción.

En nuestro sistema los errores que no pudimos eliminar como el del láser y algunas pequeñas perturbaciones en el cantilever dadas por la sustancia que se mide se mantuvieron constantes durante todo el experimento, por lo que este tipo de errores no degradará al sistema.

La siguiente guía para prevención de errores en sistemas de medición no es infalible, pero nos da una buena idea de los posibles errores inherentes en nuestro sistema; sin embargo es un método bastante útil para diversas clases de errores.

- ❖ Seleccionar cuidadosamente los elementos más importantes del sistema como el transductor y estudiar su comportamiento característico, así como verificar la



polarización de todos los elementos, y la manera en que afectan al método, y como consecuencia a nuestro sistema.

- ❖ Revisar la exactitud de cada elemento en el sistema y determinar el error acumulado aceptado, desde la entrada del haz láser hasta la sección de detección.
- ❖ Calibrar cada instrumento del sistema para constatar que se encuentre operando dentro del rango de sus especificaciones, es decir, de la manera esperada.
- ❖ Realizar un estudio de las condiciones ambientales en las cuáles el sistema de instrumentación estará funcionando. Se debe poner más atención en las variaciones de temperatura, los tiempos requeridos para la toma de lecturas, y en que los incrementos de sustancias sean de la misma cantidad en cada toma. También es importante tener un rango de estimación de errores aceptable (lo que se conoce como margen de error).
- ❖ Aterrizar los equipos que necesitan de conexiones a tierra, desde la mesa óptica hasta el osciloscopio, además de verificar si las conexiones realizadas son las adecuadas.
- ❖ Evaluar el sistema para monitorear el ruido electrónico, si es posible implementar filtros de las características necesarias para el sistema (paso altas, paso bajas, etc.) o alguna clase de cableado alterno (hacia otra ruta u otro equipo para comparar resultados desde diferentes módulos).
- ❖ Crear un sistema de calibración confiable, que proporcione una respuesta del sistema precisa, además de que el sistema sea solo sensible a la variable de interés, que pueda minimizar otras señales que sean intrascendentes para nuestro análisis.
- ❖ Realizar un estudio de todas las posibles fuentes de error, considerar su magnitud y la posibilidad de que sea acumulado (como ya se había mencionado tener un valor máximo aceptado para el error).

### La relación señal a ruido

La naturaleza aleatoria del número de fotones<sup>6</sup> que arriban a un fotodetector es una fuente fundamental de ruido que debemos tomar en cuenta cuando tenemos una “onda de luz” para transmitir una señal. Si representamos por  $\bar{n}$  al medio en que viaja una señal y su ruido por medio de la raíz cuadrada de  $\sigma_n^2$ , una aproximación de la medición del desempeño de la onda de luz como información del medio de la portadora es la SNR:

$$SNR = \frac{(\text{medio})^2}{\text{varianza}} = \frac{\bar{n}^2}{\sigma_n^2} \quad (2.30)$$

Para la distribución de Poisson  $SNR = \bar{N}$ .

Por ejemplo la relación señal a ruido<sup>5</sup> crece si se incrementa el número de fotones en el medio. Asimismo la SNR mide la aleatoriedad de la señal.

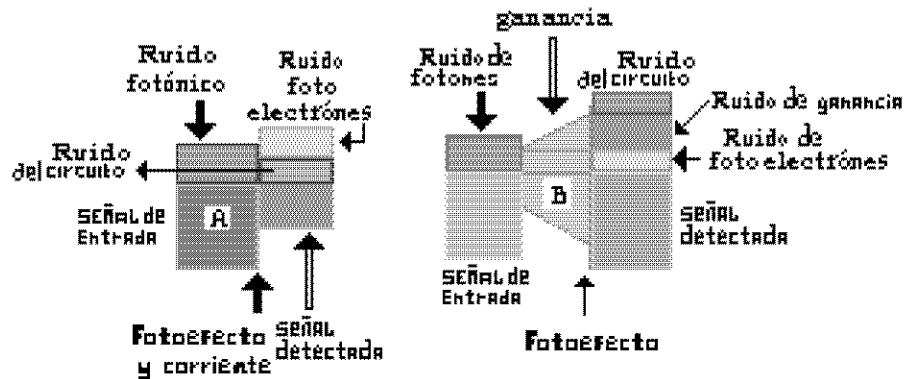


Figura 2.7. La señal de entrada de fotones y diversas fuentes de ruido; para A: tenemos un fotosensor sin ganancia (fotodiodo P-i-n) B: Fotodetector con ganancia.

La señal mínima detectable que está definida como la señal del medio que permite llegar a  $SNR=1$ . La sensibilidad del receptor esta definida como la señal correspondiente cuando  $SNR=SNR_0$  seleccionando  $SNR_0=1$ . Sin embargo un valor más grande se ha elegido para asegurar un buen nivel de exactitud.

Estas 4 fuentes de ruido ilustradas esquemáticamente en la figura 2.7, la señal que entra en el detector (señal de entrada) posee un ruido de fotones intrínseco. El fotoefecto convierte los fotones en fotoelectrones, pero en el proceso la señal del medio decrece por el factor  $\eta$ . El ruido también decrece pero en una cantidad más pequeña que la señal; además la SNR de los fotodetectores es más baja que la de los fotones incidentes. Si existe algún mecanismo de ganancia en un fotodetector se amplificarán tanto la señal como el ruido de los fotoelectrones y éste introduce su propio ruido de ganancia también.

### Ruido de los fotoelectrones

Como se ha visto un flujo de fotones asociado con una potencia óptica es inherentemente incierto; el flujo de fotones fluctúa aleatoriamente, de acuerdo con la ley de probabilidad dependiente de la naturaleza de la fuente de luz; el número de fotones  $n$  contado en un intervalo  $T$  es aleatorio en el medio  $\bar{n} = \Phi T$ . El número de fotones para luz proveniente de un láser ideal obedece a la distribución de probabilidad de Poisson:

$$\sigma_n^2 = \bar{n} \tag{2.31}$$

$SNR = \bar{n}$ , Con el número mínimo de fotones detectados  $\bar{n} = 1$

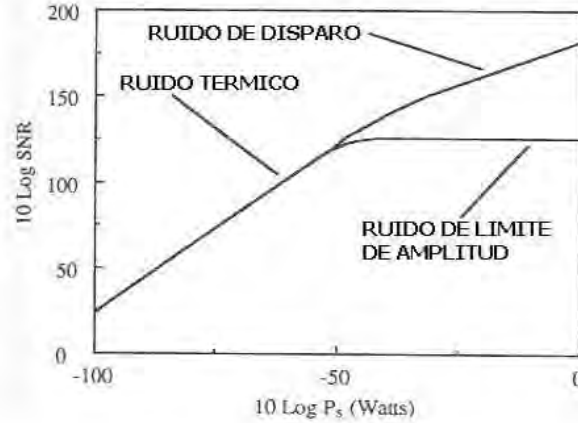


Figura 2.8. Relación señal a ruido del sistema, se observa la relación entre las diferentes clases de ruido.

Un fotón que incide en un fotodetector de eficiencia cuántica  $\eta$  genera un evento (por ejemplo, libera un fotoelectrón o crea un par fotoelectrón-cavidad) de probabilidad  $\eta$ , o falla para hacerlo con probabilidad  $1-\eta$ . Los fotoeventos son asumidos como seleccionados de un rango aleatorio de la cadena de fotones, por lo que el flujo de fotones  $\Phi$  (fotones/seg.) resulta en un flujo de fotoelectrón  $f/s$  en el medio.

$$\bar{m} = \eta \bar{n} \tag{2.33}$$

**2.5. Transducción óptica a electrónica, etapa de amplificación del fotodetector.**

**Etapa de amplificación para el fotodetector**

Un sistema de instrumentación como el diseñado, contiene algunos elementos que son empleados a la salida del transductor, con el fin de realizar un acondicionamiento adecuado de la señal a sensar, para que se pueda medir de mejor manera, en cierto intervalo o para que posea las características apropiadas para la obtención de resultados.

Debido a que la señal puede ser una señal eléctrica de voltaje o una corriente, los circuitos electrónicos de acondicionamiento, son sistemas diseñados para manipular la señal de salida que entrega el transductor. Existen muchos circuitos de acondicionamiento de señales eléctricas, estos funcionan de acuerdo a las necesidades requeridas por el sistema, ya que cada sistema de medición requiere diferentes tipos o etapas de acondicionamiento, incluso si contienen las mismas etapas podemos ver una diferencia en cada una de ellas, ya que los transductores y los equipos de sensado obedecen a diferentes rangos de sensibilidad, ancho espectral, condiciones de operación, etc., esta condición los hace diferentes entre si.

Los acondicionadores electrónicos de señal tienen una gran variedad de características propias de acuerdo a las necesidades requeridas; entre estos circuitos tenemos amplificadores, preamplificadores, atenuadores, diversos filtros (de acuerdo a lo que se necesite filtrar de la señal: paso banda, paso bajas, paso altas, supresores de banda), convertidores de voltaje a corriente o viceversa, convertidores analógico-digitales (ADC), convertidores digital-analógico

(DAC), retardadores de señal (*delay*), convertidores de corriente alterna a directa (AC-DC), convertidores de corriente directa a corriente alterna (DC-AC), entre otros, pero estos son los más importantes. Para los objetivos de esta tesis solo mencionaré los acondicionadores de señal que se emplearon y porque se escogieron estos; también se realizará un análisis sencillo de cada uno de ellos.

El sistema electrónico de medición patrón<sup>5</sup>, del cuál nos hemos basado para el diseño en esta tesis, consta de las etapas que se muestran en la figura:

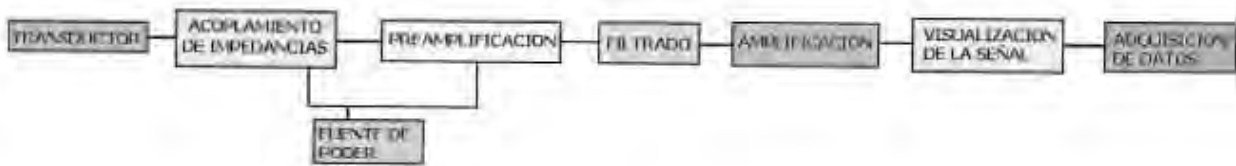


Figura 2.9. Etapas del sistema electrónico de sensado.

La primera etapa del sistema de medición es un transductor; para el caso de un sistema de medición óptico por lo regular es un fotodetector o fotosensor, muchas veces estos sistemas constan de varios transductores ópticos en arreglos de fotodetectores para obtener una sensibilidad mayor del sistema. El fotodetector empleado en este sistema es un fotodiodo de avalancha de la marca *Edmund Optics*.

La etapa posterior al transductor, es una etapa de amplificación o algún otro tipo de acondicionamiento de la señal; si el transductor nos entrega una señal lo suficientemente clara para realizar la medición eléctrica directamente, se podrían medir fácilmente los parámetros requeridos, pero la mayoría de los transductores requieren etapas de acondicionamiento, habitualmente de amplificación.

Pero al tratarse de un sistema del cual no se conoce el comportamiento de sus parámetros eléctricos al funcionar, cuando se inicia la etapa de acondicionamiento se debe anteponer una etapa de acoplamiento de la señal de salida del transductor con la señal de entrada del acondicionamiento, ya que la señal puede perderse o atenuarse por el cambio de impedancias, es por esto que la etapa intermedia es una etapa de acoplamiento de impedancias y de esta forma se garantiza que la mayor parte de la señal se mantendrá en las etapas posteriores.

La etapa de acoplamiento de impedancias se logra de diferentes maneras, una de estas puede ser a través de un amplificador operacional. Este circuito integrado puede ser empleado como acoplador de impedancias, debido a sus características de entrada con un valor grande de impedancia (de megaohms) y salida con impedancia muy pequeña (50 ohms), es ideal para que la señal pueda ser acoplada sin conocer sus parámetros eléctricos o si es una señal extremadamente pequeña, como la que se está midiendo en nuestro fotosensor.

De la teoría de circuitos integrados podemos emplear el circuito en una configuración de seguidor, que no es más que un acoplamiento de impedancias evitando una amplificación o una atenuación de la señal de sensado, esta misma configuración se conoce también como amplificación unitaria. Debido a que no hay amplificación no se requiere de cálculos para esta etapa. El esquema del circuito empleado para esta etapa es el mostrado a continuación.

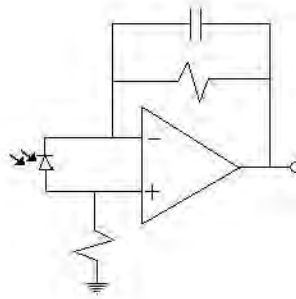


Figura 2.10. Circuito de acoplamiento de impedancias.

Las señales entregadas por un transductor por lo regular son señales muy pequeñas que requieren de una amplificación posterior a la etapa de transducción. Para el caso de un fotosensor es casi siempre necesario realizar esta etapa de amplificación, y muchas veces una de preamplificar para manipular la señal que nos entrega el transductor.

La etapa posterior a la de acoplamiento es una preamplificación, debido a que los circuitos integrados son sistemas no ideales, tenemos algunas pérdidas de la señal en ellos, como una atenuación. Para el circuito de medición empleado en el sensado, la tercera etapa es una preamplificación de la señal. Un amplificador es uno de los más importantes componentes o etapas de un sistema de instrumentación, porque tiene la función de incrementar una señal de niveles muy bajos a niveles necesarios para su procesamiento o medición.

Existen varios tipos de amplificadores y por tanto, circuitos de amplificación, ya que dependen de las necesidades requeridas, entre estos podemos citar, circuitos amplificadores a base de transistores y a su vez con diferentes configuraciones de amplificación. Asimismo existen varios circuitos integrados que realizan toda la operación de amplificación sin necesidad de cálculos de amplificación, elementos electrónicos, linealidad del sistema o análisis de configuraciones, como en el caso de los transistores.

Por sus características, estos circuitos nos ahorran una gran cantidad de problemas de análisis, cálculos y ensamblado del circuito amplificador. Los circuitos más empleados para amplificación de señales son los amplificadores operacionales, los cuales constan de una miniaturización de transistores, diodos, resistencias, capacitores, etc. en un solo circuito integrado. Los amplificadores operacionales tienen varios propósitos, ya que son muy fáciles de adaptar a los procesos electrónicos y no necesitan un gran número de elementos pasivos externos, y sólo demandan cálculos muy sencillos para su empleo.

Estos circuitos también cuentan con una impedancia de entrada muy grande, (ya se había analizado) de alrededor de  $4\text{ M}\Omega$ , con una capacitancia de  $8\text{ pf}$  y con una máxima amplificación de hasta  $1 \times 10^5$ . Estos circuitos tienen distintas configuraciones en las cuales pueden funcionar como sumadores, restadores, amplificadores inversores o no inversores, todas éstas son las más utilizadas en la electrónica.

Para el circuito diseñado se utilizó un amplificador operacional *TL082*, el cual consta de dos amplificadores operacionales, esta característica fue de gran utilidad, porque con este circuito

pudimos realizar la etapa de acoplamiento de impedancias y de preamplificación con un solo circuito integrado y en un solo circuito impreso.

La etapa de amplificación fue una configuración de amplificador no inversor, lo cual es solo una amplificación directa sin la necesidad de invertir la señal. El esquema y cálculos de la etapa de preamplificación se muestran a continuación en la figura 2.11.

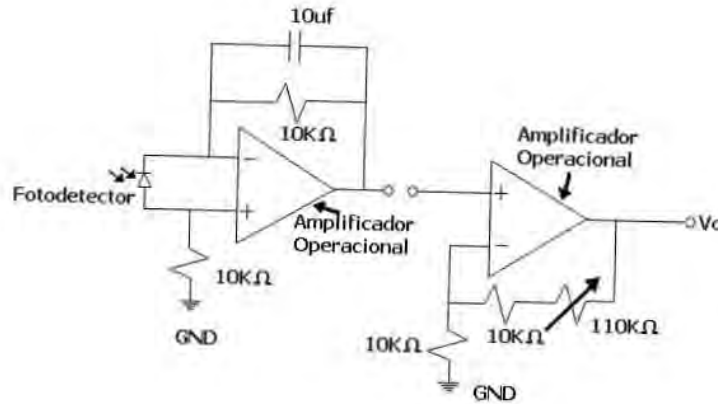


Figura 2.11. Circuito electrónico para la etapa de amplificación de sensado.

Calculo de ganancia de la etapa de preamplificación:

$$\text{Ganancia} = (1 + R_b/R_a).$$

$$\text{Donde: } R_a = 10K\Omega; R_b = 10K\Omega + 100K\Omega = 110K\Omega$$

Por lo tanto:

$$\text{Ganancia} = 1 + (110K\Omega/10K\Omega) = 12 \text{ La amplificación es directamente proporcional a la velocidad a la que se someta el sistema.}$$

Al concluir con esta parte del circuito electrónico de sensado de la señal óptica, se observa que se pueden obtener buenos resultados, ya que la magnitud de la señal de medición es buena para su medición. Las etapas posteriores de registro de datos y graficación de resultados nos ayudarán a realizar los cambios pertinentes, para lograr alcanzar mejores resultados.

En la mayoría de los sistemas de medición se emplean fuentes que polarizan a las etapas de acondicionamiento de señal, pero el voltaje suministrado por la fuente puede ser variable e influir en los resultados, para reducir este inconveniente y evitar errores de medición, se propone polarizar el circuito de sensado electrónico con pilas. También esta propuesta es muy útil, ya que al suministrar corriente directa y no alterna no se generan armónicas que pueden afectar mucho en el ruido recibido en la respuesta del sistema, así que en el sistema electrónico de detección empleado en esta tesis, se utilizaron pilas, que se debían cambiar en un periodo de 2 o 3 semanas para mantener esta condición constante.

El circuito de amplificación se diseño y construyó en el laboratorio de óptica aplicada, y está compuesto por los siguientes elementos: resistencias, capacitores, el circuito amplificador

*TL082*, una tableta para montar todos los componentes. Mediante este circuito diseñado se logra hacer un sensado del haz láser. Primero se enfoca el haz láser hacia el área sensible del fotodetector que está conectado al circuito electrónico y posteriormente a un multímetro, que mide la variación de la magnitud de captación del haz láser por el fotodetector desde los [miliVolts] hasta los [Volts].

## CONCLUSIONES

En este capítulo se analizaron las configuraciones más comunes empleadas en el método de deflexión de haz láser, así como las bases teóricas físicas del método. Para ello se hace una breve reseña de algunas de las aplicaciones más sobresalientes de este método y de los alcances logrados con él. Los resultados que se han alcanzado con este método son particulares del montaje donde se ha usado.

Se comparó el interferómetro de Michelson y la técnica de deflexión de haz láser obteniendo que los dos sistemas, la sensibilidad que proporcionan (de deflexión de haz láser y de interferometría) alcanzan es similar o igual. La ventaja que podemos encontrar del OBDM sobre un método de interferometría, es que el número de componentes del sistema y la sencillez del mismo (matemática y físicamente) lo hacen más interesante. El análisis del método de deflexión de haz láser se realizó a través de un análisis matemático con el que comprobó que la dependencia de la sensibilidad del método, está ligada a la longitud entre el cantilever y el fotodetector ( $X$ ), esto se ve más concretamente en la figura 2.3. Sin embargo, en un análisis de la relación señal a ruido (SNR) llevada a cabo en el punto 2.2.1. se observa que haciendo  $X$  tan grande como sea posible, la relación SNR alcanzará un valor grande, pero este no es constante cuando  $X$  se vuelve muy grande, es decir que si aumentamos la longitud entre el láser y el detector, llegará un punto en el cuál la sensibilidad alcanzará su máximo. También se estableció para esta comparación, que las 2 únicas limitantes entre los montajes fueran la difracción y el ruido de disparo.

Se hizo un estudio de la razón SNR del método de deflexión de haz láser con la SNR de un interferómetro, y se llegó a la conclusión de que la precisión de los desplazamientos del cantilever medidos en ambas técnicas son equivalentes. Se aprecia más claramente si nos basamos en que los principios implícitos en ambos métodos vienen del mismo análisis y el método de deflexión de haz láser es también una técnica interferométrica.

Asimismo se analizaron las diferencias al usar un detector de split o un detector de efecto lateral PSD en el método de deflexión de haz láser. Se encontró que el límite de resolución en ambos casos es igual. A lo largo del análisis de este estudio se comprobó que al implementar una lente en el sistema no se aumentó la sensibilidad ni tampoco ayudó a confinar el haz debido a que en nuestra etapa de entrada, la distancia entre la fuente y el cantilever es muy pequeña, por lo que las distancias focales de los lentes con los que se cuentan no son las adecuadas y aun poniéndolas a la entrada del sensor donde la distancia es más grande, no conseguimos que aumentara la sensibilidad.

Con el estudio realizado sobre el OBDM en este capítulo, se analizaron y aplicaron los 3 factores que rigen el método, porque la diferencia en la longitud del camino óptico introducida por el desplazamiento del cantilever se maximizó y se iluminó la superficie del cantilever

totalmente; asimismo la intensidad del camino óptico se enfocó totalmente hacia el detector, por lo que no hubo necesidad de utilizar lentes que enfocaran el haz; y finalmente se logró captar toda la potencia óptica suministrada por el láser, ya que el área sensible del fotosensor fue la adecuada para la máxima captación del spot láser.

Al realizar el estudio de la intensidad en el fotodetector, se analizó el comportamiento del sistema con respecto a la relación señal a ruido, y se concluyó que se debía ampliar la señal recibida por el sensor sin amplificar también el ruido. Debido a esto se implementó la etapa de amplificación y la transducción óptica a electrónica se pudo conocer la magnitud de la señal sensada, así como calcular la amplificación requerida ya que la señal era muy pequeña, solo se debía amplificar, esta parte de fotodetección y sensado electrónico, se analizó en el punto 2.5 de este capítulo en forma general, aplicando estos conocimientos en el sistema electrónico diseñado para esta tesis.

Finalmente con el estudio de los tipos de ruido en sistemas de medición y sensado realizado al final del capítulo, se identificaron las posibles fuentes de ruido, cuales podían presentarse y la forma en que se pueden minimizar o eliminar, como el ruido electrónico y el mecánico, sin embargo se identificaron algunas otras clases de ruido, y algunos de estos no pudieron ser eliminados por completo en el sistema diseñado para esta tesis, pero se observó que estas fuentes de ruido, presentan un comportamiento constante, por lo que no afectaron en la respuesta del diseño que se propone.

## BIBLIOGRAFÍA

1. G. Meyer and N.M. Amer, Appl. Phys. Lett. 53, 2400 (1988).
2. A. García Valenzuela “Limits of different detections schemes used in the optical beam deflection method” 1997 American Institute of Physics.
3. J.C. Murphy and L. C. Aamodt, J. Appl. Phys. 51, 4580 (1980).
4. Bart G. De Grooth, Niek F. Van Hulst, and Jan Greve. “ A detailed analysis of the optical beam deflection technique for use in atomic force microscopy” 1992 American Institute of Physics.
5. Bahaa E. A. Saleh, Malvin Carl Teich, Fundamentals of Photonics, -Wiley Interscience publications, Cap. XIV, XVI, XVII, 1991.
6. Engineering measurements, James W. Dally, William F. Riley, Kenneth G. McConnell. John Wiley & Sons. 1984 2<sup>nd</sup> Edition.1993.



***CAPÍTULO TRES. ANÁLISIS Y APLICACIONES DEL DENSÍMETRO DE MICROPARTÍCULAS BASADO EN EL MÉTODO DE DEFLEXIÓN DE HAZ LÁSER OCUPANDO UN SENSOR ÓPTICO***

**INTRODUCCIÓN**

Durante los dos capítulos teóricos anteriores, se establecieron las bases necesarias para explicar el funcionamiento del densímetro de micropartículas, basado en el método de deflexión de haz láser; es importante observar que al tener magnitudes de desplazamientos muy pequeñas se consiguen hacer cálculos de las mediciones de la densidad de sustancias con exactitud. Es por esto que es importante tener una buena implementación de la técnica de haz láser, para alcanzar a sensar microdesplazamientos (de ser posible nanodesplazamientos de alrededor de  $1 \times 10^{-9}$ ) alcanzando la sensibilidad necesaria en nuestros cálculos del densímetro de sustancias.

En el diseño de nuestro montaje y su configuración particular requerimos que el sistema sea estable, que sea inmune a movimientos tanto pequeños como perturbaciones de tipo mecánico en el cantilever y en el líquido. Para lograr una buena respuesta y desempeño en la obtención de resultados se hicieron estudios de las condiciones existentes en el laboratorio, las cuáles podrían alterar nuestro sistema mediante una perturbación que genere cambios a lo largo de las tomas de lecturas en las mediciones. Estas podrían ser: variación de temperatura (ambientales), vibraciones acústicas de la mesa en donde se implemente el sistema (mecánicas), así como otras perturbaciones existentes en el cantilever.

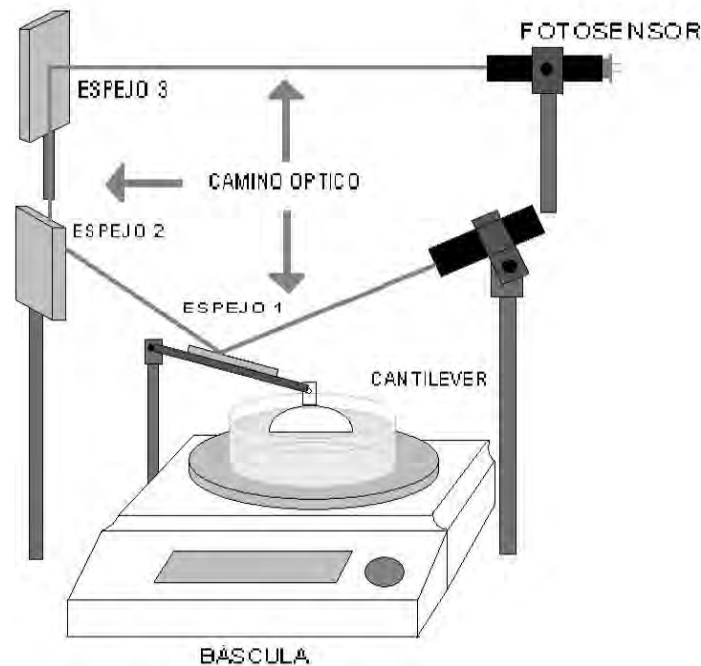
También se hicieron estudios de las condiciones que afectarían directamente al sistema y a sus elementos, por ejemplo a los espejos que conforman el camino óptico, las oscilaciones verticales (desde el nivel del líquido hacia arriba) que presenta el cantilever, las posibles perturbaciones del agua (olas) al depositar en ella las sustancias a evaluar, el rango que seguirá el haz láser desde que comience a entrar en el área sensible del detector hasta que salga de ella.

Se realizó un diseño cuidadoso del sistema, se comenzó el cálculo de la longitud del sistema, basado en la reflexión de los espejos para el camino óptico, se planteó la manera en que el sensor midiera completamente el haz láser empleando el efecto navaja para conseguir minimizar las pérdidas. Otra manera de minimizarlas es mediante el control de la reflectancia del haz láser en los puntos donde debe sufrir las desviaciones necesarias, además se debe vigilar que la superficie del líquido no sufra olas durante las mediciones, así como conocer las características de las sustancias con las cuáles se estará trabajando.

En el presente capítulo exponemos íntegramente nuestra propuesta de configuración del método, los resultados alcanzados, además del análisis detallado de los cálculos matemáticos de los resultados y de los valores tanto de las masas y volúmenes de las diversas sustancias como agua, alcohol, azul de metileno y óxido de titanio: asimismo se presenta el análisis de las gráficas obtenidas, así como algunas combinaciones de las variables que han sido medidas plasmadas en estas gráficas.

### 3.1 Implementación del método de deflexión de haz láser en el densímetro de micropartículas.

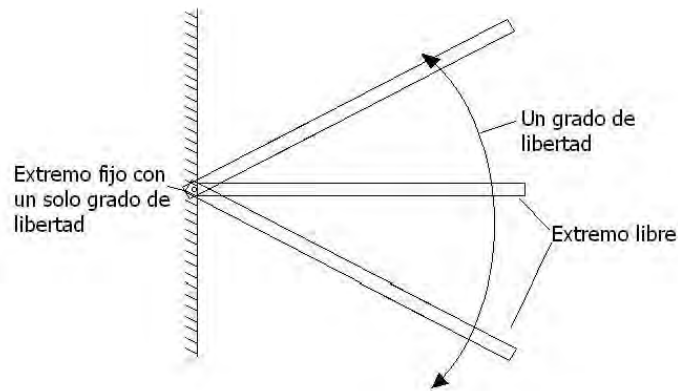
El método de deflexión de haz láser que se implementó esta formado por algunos elementos básicos como: un cantilever con superficie reflectora, un haz láser a 630 [nm], la etapa de detección que depende mas de la configuración y el tipo de sensado que se va a realizar con el método. En el sistema que se propone para medir la densidad de micropartículas, se emplean además de los elementos mencionando, otros elementos adicionales que van enfocados a la detección y medición de densidades de micropartículas. Para ello es necesario hacer una descripción de cada uno de los elementos con los que cuenta el sistema propuesto y como trabaja cada uno dentro del sistema completo, además de las mejoras que se pueden realizar a cada elemento para tener una mayor sensibilidad y desempeño en el sistema completo. En la figura 3.1 se muestra el sistema propuesto con los elementos que cuenta.



*Figura 3.1. Se muestra el esquema propuesto con sus elementos y su ubicación.*

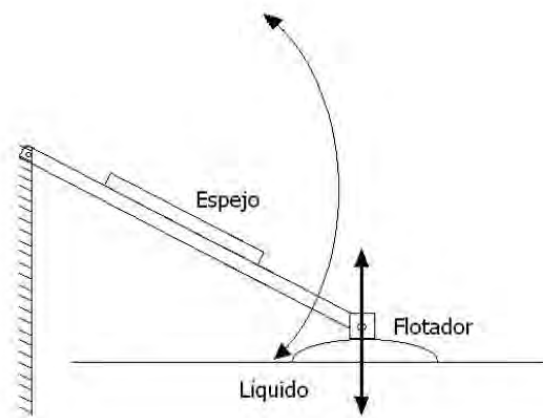
#### CANTILEVER

Este es un término para el cuál no existe traducción directa del inglés al español, por lo que trataremos de realizar una definición de la actividad que lo caracteriza enfocándolo a lo que representa para nuestra investigación; un cantilever es como una barra libre en uno de sus extremos y fija en el otro con un solo grado de libertad vertical (sin movimientos laterales). Así cuando se presenta un cambio de posición del extremo libre del cantilever, este cambiará de posición angular únicamente.



*Figura 3.2 Cantilever*

En particular, para nuestra investigación, cantilever se refiere a un elemento del sistema que solo cambiará su posición con los incrementos en el nivel del líquido contenido en el recipiente, como se observa en la siguiente figura 3.2.



*Figura 3.3 Funcionamiento del cantilever.*

Sobre este cantilever se ha colocado un espejo de alta reflectancia, de un lado se encuentra unido al flotador y del otro está fijo por un eje que le permite un grado de libertad (únicamente vertical). La variación angular que presenta el cantilever está condicionada directamente con el desplazamiento o variación de altura en el nivel del líquido, es decir, el incremento provocado por la cantidad de la sustancia que se adicione; el recipiente contiene el líquido, que servirá como patrón de referencia en el primer caso utilizaremos agua. Una de las condiciones para esta propuesta de diseño es que el cantilever oscile solo en forma perpendicular con respecto a la horizontal alcanzando hasta la máxima deflexión posible del haz.

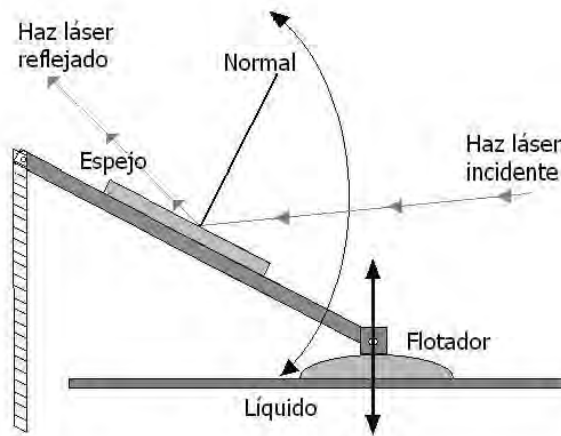


Figura 3.4. Ilustración del funcionamiento del cantilever.

Otra restricción importante se presenta cuando el eje del cantilever no debe ser afectado por perturbaciones externas como: movimientos en la mesa óptica, movimientos bruscos en el líquido, vibraciones acústicas generadas por corrientes de aire e incluso por las que se generan cuando hablamos cerca del recipiente, ya que las vibraciones repercuten en la toma de mediciones, esto revela que nuestro sistema ha alcanzado una sensibilidad muy grande, debido a la amplia distancia del camino óptico.

### Diseño del cantilever

Para el diseño del cantilever nos basamos en una pieza cuya forma es parecida a una U, haciéndole algunas perforaciones a ésta para formar nuestro eje de libertad en las mediciones. Logramos atravesarla con una aguja, la cuál embonó perfectamente en los agujeros realizados, así que logramos ponerle un eje y toda la pieza formada se consolidó como una sola, es decir que no existieron perturbaciones entre el cantilever y su eje, esto se comprobó al realizar movimientos ascendentes, ya que solo se movía el dispositivo con respecto a la variación de la altura del nivel del agua en el recipiente; es decir que logramos consolidar en una sola pieza el espejo al montarlo sobre el cantilever cuyo eje le permitirá alcanzar la sensibilidad necesaria para nuestro objetivo.

Algunos materiales fueron probados para que flotaran en el agua al fabricar el flotador del cantilever, se trabajó con esponja y madera, pero al realizar las pruebas llegamos a la siguiente conclusión: como en el cantilever comenzaba el camino óptico, estos materiales debían soportar el peso del espejo, y no lo hacían, por lo que se experimentó con algunos otros materiales, porque ninguno mantenía el mismo nivel de flotación durante todas las mediciones (nivel de flotación constante).

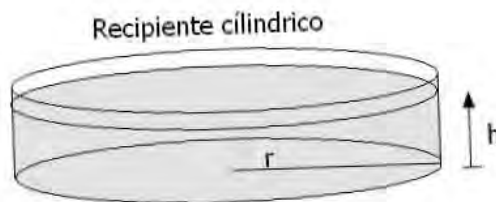
Después de realizar experimentos con diferentes opciones, vimos que se necesitaba un material que flotara muy bien en el agua, pero asimismo que tuviera una buena estabilidad para sostener el espejo situado en el cantilever y coordinar la reflectancia del haz láser, y por consecuencia el camino óptico. Se logró con una pieza de plástico, que fue fijada a la del cantilever que ya se había fabricado, el espejo y una base de madera como sostén del espejo; de esta manera conseguimos que el peso del espejo no provocara perturbaciones de tipo mecánico en el líquido, y por consecuencia al sistema.

**RECIPIENTE**

En el laboratorio existen algunos diferentes tipos de recipientes que podrían servir para nuestras mediciones, sin embargo, se ocupó uno de vidrio de forma cilíndrica, cuya altura es de 1cm. Las dimensiones de dicho recipiente son: el radio  $r=8.945\text{cm}$  y puede albergar un volumen de  $252\text{ cm}^3$  o mililitros aproximadamente. Éste envase se montará sobre la báscula (que es casi del tamaño del diámetro del recipiente 9cms.) durante todo el experimento, a manera de saber los incrementos de la sustancia que estamos agregando al sistema. En el interior del recipiente se pudo observar la distribución de las sustancias tanto sólidas como líquidas; además al observar directamente el asentamiento en el fondo del recipiente comprobamos que el nivel de flotación permaneciera sin perturbaciones externas mientras se realizaban las mediciones a excepción de la que debía sensarse. Al ser el recipiente cilíndrico es fácil conocer el volumen contenido con la ecuación 3.1

$$V = \pi r^2 h \quad 3.1$$

$$h = \frac{V}{\pi r^2} \quad 3.2$$



*Figura 3.5 Ilustración del recipiente.*

El tamaño del recipiente esta relacionado con la sensibilidad de nuestro sistema gracias a la fórmula 3.1 para obtener su volumen, ya que si hacemos que el volumen sea lo mas grande posible, podemos conseguir que nuestras mediciones puedan ser de menor magnitud, al conocer la altura y despejar  $h$  de la ecuación 3.1, así obtenemos la ecuación 3.2.

**BÁSCULA**

El empleo de la bascula esta relacionado con la densidad que deseamos sensar, así al poder determinar el volumen (con ayuda del recipiente analizado anteriormente), se necesita el peso de la sustancia a analizar para determinar su densidad con estos dos parámetros. Ahora al conocer el volumen y el peso de la sustancia, la densidad es fácil de determinar.

La báscula utilizada posee las siguientes características: un rango de 0 a 200 grs. y de resolución mínima de 0.1 grs. estas características fueron suficientes para medir la variación de las sustancias en cada evento.

Se realizaron mediciones de la cantidad de sustancia a adicionar en otra báscula, se consiguió realizar muestras exactas pero al transportarlas se perdía exactitud (ya que la resolución de ambas básculas era distinta). En consecuencia optamos por seguir con la báscula de menor resolución debido a su tamaño y a las necesidades del montaje. Los únicos errores que esta báscula proporcionó, fueron los que se presentaban entre un incremento de sustancia y el siguiente, ya que se debían de agregar cantidades exactas de 0.1 [gr.], debido a la resolución.

### **FOTODETECTOR O FOTOSENSOR**

Una parte fundamental del método de deflexión de haz láser es el fotosensor, también conocido como fotodetector, sus especificaciones de implementación son muy sencillas, y su desempeño depende de las características del láser empleado (longitud de onda y potencia).

Para conocer a fondo el modo en que opera el sensor, se elaboró un análisis de los parámetros a medir con el fotosensor (intensidad óptica principalmente); al obtener este estudio, se observó que para obtener un nivel de sensibilidad aceptable, la etapa de detección óptica necesitaba una etapa de amplificación para lograr registrar los cambios de los desplazamientos en baja escala. La etapa de amplificación se logró gracias al diseño de una etapa electrónica como ya se analizó en el capítulo anterior.

El detector empleado es de tipo avalancha y posee una buena sensibilidad de la intensidad óptica del haz láser de acuerdo a las especificaciones del fabricante. La implementación y construcción del sistema de sensado óptico-electrónico fue analizado anteriormente, esto se hizo con la finalidad de lograr la forma más adecuada de desempeño del fotodetector, y de esta manera obtener buenos resultados; la sensibilidad alcanzada por el sistema óptico-electrónico diseñado es excelente, pero aún así y debido a que se desea la mejor operación del diseño, es necesario amplificar la señal obtenida aún más. La señal recibida por el detector se envía a la etapa electrónica y es amplificada para su registro, logrando así medirla con un multímetro, en escala de voltaje en DC, desde un rango de [miliVolts] hasta [volts].

### **ESPEJOS**

El camino óptico que recorre el haz láser, está formado por 3 espejos de diferentes tamaños para llegar a la magnitud demandada por el camino óptico (de 90 [cm.]). Los 3 espejos tienen la misma reflectancia (mismo porcentaje de reflexión, es decir, que reflejan la misma cantidad de luz), ya que si la tuvieran diferente se daría origen a que existieran pérdidas de la luz láser en el sistema; y esto nos llevaría a tener una disminución en la sensibilidad de los resultados. Es importante que a través de todo el camino óptico se tenga el mismo valor en la señal proporcionada por el haz láser, desde que sale del diodo láser, hasta que entra al detector.

Se realizaron varias pruebas con espejos de diferente fabricación que tenían distintos índices de reflexión, además al reflejar el haz láser directamente en el espejo, encontramos que algunos espejos presentaban pérdidas considerables, debido a que la luz del láser se filtraba hacia el reverso del espejo, perdiendo la magnitud del voltaje medido con el fotosensor del haz láser a lo largo del camino óptico. Se concluyó entonces que se deberían realizar pruebas con espejos que

fueran de material reflejante en ambas caras, por esto en lugar de tres espejos utilizamos seis, pegando dos espejos, es decir, formamos un solo espejo con dos espejos, de ésta manera se fabricó un espejo de bajas pérdidas a lo largo del camino óptico, y esto nos generó una buena reflexión en la magnitud de la luz del haz láser al enfocarlo hacia el detector.

Los tres espejos utilizados tienen las siguientes características: el mismo grado de reflexión, diferente tamaño, (para el primer espejo es de aproximadamente 3 cm. de largo por 1 cm. de ancho debido a las dimensiones del cantilever). El espejo 2 y el 3 debían ser de forma rectangular de 5cm. de largo por 3 de ancho, para montarlos en soportes y poder manipular la dirección de la reflexión, y así poder crear el camino óptico por donde fuera mas conveniente.

Los espejos como se mencionó, deben tener los tres el mismo grado de reflexión y deben ser capaces de transmitir la mayor potencia suministrada por el láser a lo largo de todo el camino óptico. Las pérdidas que presentaron los espejos con los que realizamos los primeros experimentos eran muy grandes, debido a la baja reflexión, la cuál originaba pérdidas de potencia desde el espejo uno situado en el cantilever hasta que llegaba al espejo tres donde se tenían pérdidas del haz láser de casi el 50%.

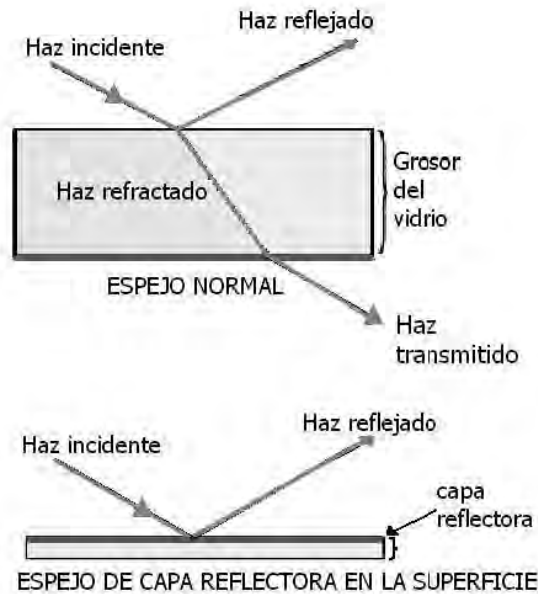


Figura 3.6. a) espejo con pérdidas, b) espejo sin pérdidas con capa reflectora en la superficie

### 3.1.1 Justificación de la firmeza del sistema.

Es importante que nuestro sistema no sea interrumpido por ninguna clase de perturbación externa o interna (a esto se debe la importancia de que el sistema este fijo y del estudio de las características ambientales), asimismo los incrementos en la sustancia a analizar deben ser lo más exactos posibles en cuanto a peso (mismos gramos de la sustancia para cada incremento), tiempos iguales entre cada medición, y en cada adición de sustancia. Como ya mencionamos, al

realizar estudios sobre las condiciones bajo las cuales se tomarían las lecturas de nuestro sistema, nos dimos cuenta que la temperatura difícilmente variaba dentro del laboratorio, así que tuvimos un valor patrón de 20 °C.

Un especial cuidado era el que se tenía en los desplazamientos que hacía el cantilever, ya que es muy sensible y pueden existir datos inesperados o fuera del rango, lo cuál puede alterar las mediciones consecutivas o posteriores. Para realizar estas mediciones fue preciso tomar en cuenta todas las consideraciones anteriores, así como evitar un número determinado de personas dentro del laboratorio, ya que podrían ser fuentes de ruido.

Otro factor no menos importante que es fuente de ruido en las mediciones, fue la magnitud de polarización con la cuál se alimentaba el circuito de amplificación del fotosensor; si las baterías eran nuevas teníamos un rango de medición en el multímetro desde 100 [mV] aproximadamente, hasta 6 [Volts], que era el máximo en sensibilidad; pero si las baterías ya no daban el mismo voltaje que cuando nuevas, el rango se recortaba desde 100[mV] hasta 4 o 4.5 [Volts], disminuyendo la sensibilidad por la pérdida en la amplificación del sensor electrónico.

### **Implementación del diseño propuesto**

Ahora que ya se han analizado todos los elementos del sistema propuesto, se examinaron las dimensiones requeridas para el diseño, por disponibilidad se empleó una mesa óptica cuadrada (Honeycomb) de 50 x 50 [cm.] aproximadamente. En la mesa óptica se fijaron los elementos del sistema completamente, utilizando postes y tornillos. La fijación de los elementos es con el fin de evitar movimientos no deseados traducidos en ruido, los cuáles podrían provocar que se presenten errores en la medición.

Otro factor que se considera que afecta la respuesta del sistema es el nivel de evaporación que existe en los líquidos como el agua contenida en el recipiente, ya que no tenemos variaciones importantes con respecto a la temperatura, se midió el nivel de evaporación de nuestro líquido patrón, para observar la manera en que afectaría nuestra toma de mediciones. Afortunadamente este fue muy bajo de alrededor de 0.05grs por hora, es decir 1.2 gramos por día, lo que no afecta la respuesta del sistema; debido a que la toma de lecturas de nuestro experimento no pasaba de 1 hora como máximo lo que da 0.05grs, como se ve en la figura 3.7.



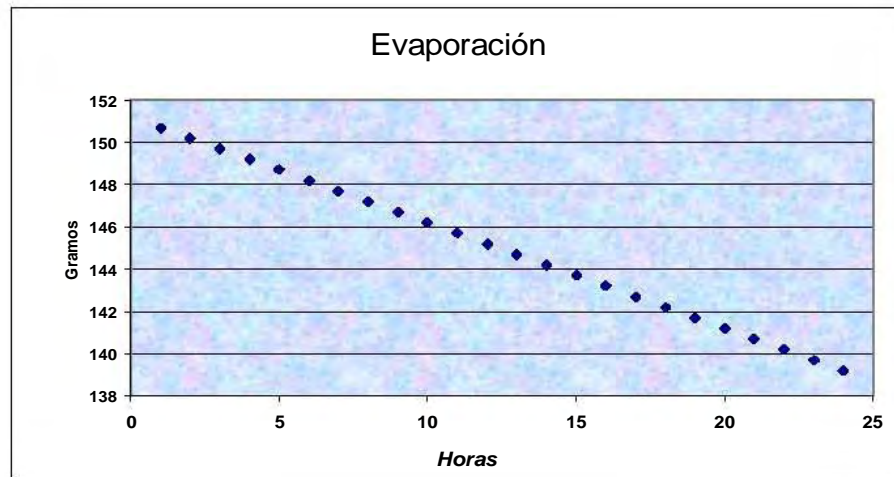


Figura 3.7. Gráfica del nivel de evaporación del agua.

Una vez que tenemos montado el sistema con la longitud necesaria del camino óptico, se pasó a montar los espejos en postes y mediante unos tornillos quedaron completamente fijos a la mesa óptica, lo cual ayuda a que no existan movimientos inesperados en ellos o en los otros elementos del montaje, es por esto que el sistema se montó en la mesa óptica, para que quede completamente fijo; debido a que se necesitan realizar mediciones precisas de los desplazamientos que realice el cantilever. Además se requiere que no existan tales cambios o movimientos en los elementos, ya que un pequeño movimiento alteraría los resultados de las mediciones de desplazamientos.

La trayectoria del camino óptico es la siguiente: comienza en la salida del láser y llega al espejo que se encuentra montado en el cantilever, desde aquí viaja hacia el espejo no. 2 montado en un poste en la mesa óptica, con la altura e inclinación necesaria, continuando el camino óptico, y llegar al espejo no.3, de aquí sale directamente hacia el área sensible del detector y este pueda medir el cambio de intensidad debida a el movimiento en el cantilever.

Al tener listo el sistema para medir la deflexión del haz con respecto a la cantidad de agua requerida (líquido patrón), se fue agregando la sustancia a analizar, y el volumen en el nivel del contenedor aumentó, incrementándose el nivel del líquido, de esta manera cambió la inclinación del cantilever, el cual varió el camino óptico del haz láser y así la magnitud de voltaje captada por el fotosensor. De este modo se estableció una relación entre la cantidad de sustancia añadida con respecto a la magnitud del voltaje colectado por el fotodetector.

Al realizar el estudio del método a emplear se determinó que entre más grande sea la distancia entre el cantilever y el detector, mayor sería la sensibilidad del sistema, y como ya se ha mencionado obtendríamos desplazamientos de menor magnitud, con lo que nuestro sistema tendría mejores resultados.

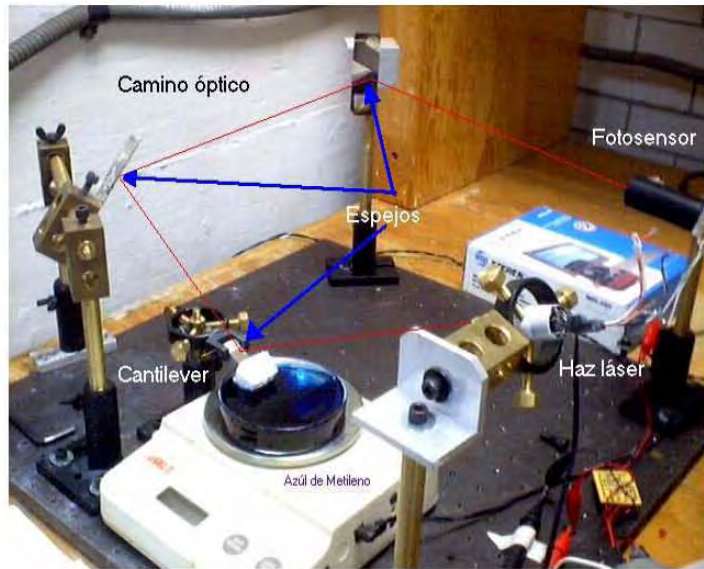


Figura 3.8. Imagen del sistema diseñado con todos sus componentes.

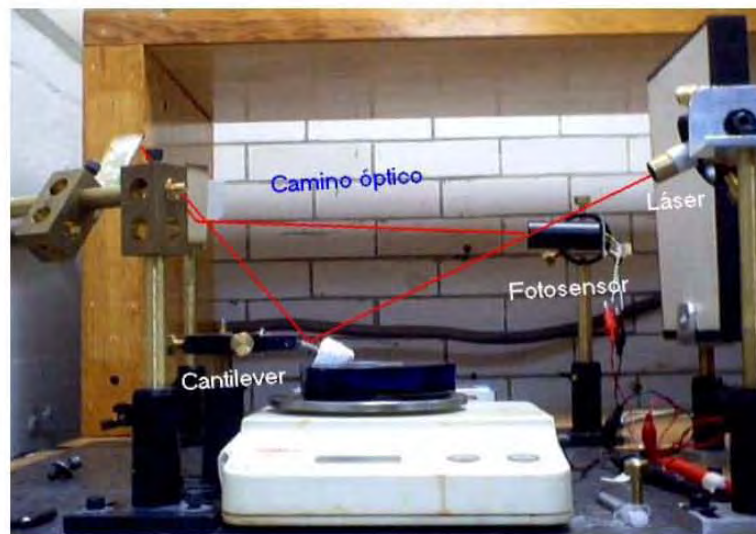


Figura 3.9. Vista frontal del sistema diseñado.

En éstas ilustraciones se presenta el arreglo experimental de nuestro diseño para detectar la variación del nivel del liquido en el recipiente cilíndrico; por medio de la deflexión del haz láser que se encuentra directamente enfocado hacía el espejo sobre el cantilever, que inicia el camino óptico a través de los espejos 2 y 3, este tercer espejo enfoca el haz láser hasta la entrada del fotodetector.

Al adaptar la configuración del método para nuestro caso en particular, y de las condiciones mínimas requeridas, encontramos que la longitud para el camino óptico es donde se alcanza la sensibilidad máxima que se desea; en este montaje es cuando  $X=90[\text{cm}]$  o mayor, es decir, que  $X$  tenga esta magnitud desde el cantilever hasta el sensor (el camino óptico que recorrerá el láser).

Como no se contaba con una mesa óptica de 90[cm.] de largo, sino con una de de 50x50 [cm.] no se podía alcanzar esta longitud en línea recta, ya que además de que los elementos saldrían de la mesa, esto afectaría en la toma de lecturas al no tener todo el sistema montado en el mismo plano. Es debido a esto que se realizó un sistema con forma de U (como vemos en la figuras 3.8 y 3.9) para maximizar el área de trabajo, aprovechando que se tienen alrededor de 250[cm<sup>2</sup>] y poder llegar a los 90[cm.] e incluso a una mayor distancia.

De las ecuaciones 2.8 y 2.9 (capítulo 2) obtuvimos la relación entre X y la SNR, cuando logramos que el camino óptico alcanzara los 90 [cm.], la sensibilidad comenzó a crecer hasta tener un comportamiento constante.

### **3.1.2 Método de calibración tomando como líquido patrón el agua.**

El método de calibración es fundamental para resultados esperados; observamos que el sistema no presenta un valor inicial de calibración constante en las diferentes tomas de mediciones, ya que algunas veces comenzamos en un rango de 110 a 114 [gr.], y aunque este no sea el mismo, siempre se logran obtener los mismos valores de voltaje, con diferente cantidad de masa, ya que la calibración se realizaba con diferente cantidad de sustancia en el recipiente. Es debido a esta condición que este proceso es de suma importancia, ya que sin él, no sería posible alcanzar los objetivos que se han propuesto.

Para el proceso de la calibración, el sistema queda de la siguiente manera: se pesa el recipiente vacío y se descuenta su peso (con el peso del recipiente conteniendo el líquido patrón en la báscula y se regresa el display a ceros: tarar), para el sensado que va a comenzar. Una vez que se ha llevado a cabo la taración (teniendo la báscula en ceros lista para medir) debemos agregar nuestra sustancia de densidad conocida, a la cuál llamaremos “sustancia patrón”; por sencillez tomaremos al agua como nuestra referencia en todos nuestros eventos, ya que su densidad es de 1grs/cm<sup>3</sup>.

El flotador del cantilever debe estar en el fondo del recipiente al cuál se le agrega agua hasta que el haz láser incida en el espejo del cantilever; los 3 espejos se encuentran alineados de tal manera que al comenzarse a mover el haz modificará su posición con los incrementos de la sustancia, el detector comienza a sensar los cambios en la posición del haz láser con respecto a la inicial y medirá el cambio en la magnitud del voltaje provocado por la deflexión del haz.

Se agrega 0.1 [gr.] de agua en el recipiente, sensando en cada adición el valor de voltaje medido por el fotodetector debido al incremento de la sustancia. De esta manera obtenemos una curva que relaciona el voltaje medido con respecto al nivel de altura del agua. Esta es la curva de calibración que nos indica el voltaje que se obtendrá a una cierta altura, o entre diferentes alturas.

Una vez calibrado el sistema y obtenida su curva respectiva, se puede conocer el incremento de sustancia con respecto al voltaje; ahora si quitamos agua del recipiente y agregamos una sustancia diferente, podemos saber la cantidad de sustancia que ha sido agregada, ya que se conoce cuál fue el voltaje obtenido mediante la curva de calibración.

Es en este punto donde se comenzará a adicionar la sustancia a estudiar, las cuáles son agua, alcohol, azul de metileno, y finalmente  $\text{TiO}_2$ , (óxido de titanio), es decir, es aquí donde se comienzan a adicionar las sustancias que usaremos, en cantidades conocidas para evaluar el comportamiento tanto de sólidos como de líquidos.

### **3.2 Análisis de los resultados obtenidos mediante el método de deflexión de haz láser como sensor de desplazamientos.**

Esta es la síntesis de la manera en que se efectuaban las mediciones paso a paso:

- ❖ Se debe tener listo el sistema para comenzar con las mediciones de desplazamientos: el cantilever debe estar flotando a nivel del agua, sin sumergirse demasiado ni estar muy por encima de esta, sino debe mantener el mismo nivel constante durante todo el proceso.
- ❖ Al tener el haz láser reflejándose en el primer espejo (espejo no. 1), es decir sobre el cantilever, se debe hacer que el haz se intersecte con el espejo número dos para continuar el camino óptico. El espejo dos se colocó en una posición adecuada, para que pueda dirigirse hacia el espejo 3 y de éste al fotosensor, y de esta manera prolongar el camino óptico.
- ❖ En los espejos 2 y 3 se tiene un grado de libertad para lograr la intersección con el tercer espejo y de éste al fotosensor; recordemos que si no conseguimos que el camino óptico sea largo no conseguiremos la sensibilidad mínima suficiente.
- ❖ Al conseguir la reflexión total del haz láser en el cantilever, éste irá recorriendo la superficie del espejo uno y mientras lo hace, al reflejarse el haz en el espejo 2 y enviarlo al espejo 3, el fotodetector estará sensando la magnitud del haz láser entrando en la zona sensible del sensor en el ángulo requerido, generando la variación del voltaje reflejada en el multímetro.
- ❖ Al iniciar el experimento observamos que el sensor no mide ningún valor de voltaje fijo, pero al ir agregando incrementos de 0.1 gramos de sustancia comienza a medir valores de [miliVolts], hasta llegar a [Volts].
- ❖ Cuando se comienza a leer en este rango estable de voltaje, la respuesta del sistema tiende a estabilizarse y a cada adición de la sustancia le toma algunos segundos para hacerlo, debido a que la sustancia que analizamos comienza a mezclarse en el agua, distribuyéndose en el fondo del recipiente y es así como se asienta o se disuelve (en caso de ser líquida) sin alterar el valor de la medición, ni generar vibraciones en la superficie.
- ❖ Después de realizar muchas repeticiones de los experimentos y posteriormente al plasmar las gráficas de los resultados obtenidos, la sensibilidad máxima se observa estadísticamente en las mediciones que oscilan entre 2 y 4 [Volts]. Esto es debido a que añadiendo la misma cantidad de sustancia constantemente, cuando pasamos de 1 a 2 [Volts] la respuesta se duplica alcanzando su punto máximo, obteniendo así la máxima sensibilidad con la misma cantidad de incremento en todo el sistema.

- ❖ Posteriormente al pasar los 4.5 [Volts] la respuesta decrece de 1 a 2 [Volts], presentando el mismo comportamiento pero inverso, porque la respuesta comienza a decaer, debido a que la gráfica obtenida es una campana de Gauss. Pero la parte que más nos interesa es donde se presenta la máxima sensibilidad de los resultados obtenidos, ya que esta respuesta es típica de un sistema lineal, como el que hemos diseñado.
- ❖ La parte de la gráfica más importante, es aquella donde el sensor comienza a detectar grandes cambios de voltaje, es decir su desplazamiento en la escala más baja, donde se presenta la máxima sensibilidad, y la curva se hace lo más recta posible.

El principio o punto inicial donde se comienza a medir un voltaje mayor a [miliVolts] a través del detector conectado al multímetro, es cuando se agregan las pequeñas muestras de 0.1 [gr.] de la sustancia que se pretende estudiar, y el cantilever vence su nivel mínimo de flotación; con esto se pretende establecer una relación entre la variación del nivel del líquido en el recipiente con respecto al voltaje sentido en cada evento y es así como se establece un método alternativo a los que existen para corroborar o saber el valor de la densidad de la sustancia a evaluar. Cuando se presenta el cambio en el voltaje colectado por el fotosensor se empiezan a registrar los datos de los niveles alcanzados por el sistema, a través del multímetro mediante un programa de computadora, el cual es muy preciso, además de que se pueden analizar las gráficas en tiempo real de estos cambios, donde se aprecia la magnitud de cada una de las mediciones de voltaje, si fue desplazado el mismo volumen, y si el valor obtenido se encuentra dentro del rango esperado.

Con base en estas gráficas distinguimos los errores en cada una de las mediciones en tiempo real, cuál fue el valor patrón en los incrementos, el voltaje máximo y mínimo captado por el sensor, si existieron perturbaciones en el sistema, el número de eventos que se realizaron y la variación originada por los desplazamientos del cantilever.

Una de las posibles perturbaciones que surgió y que se logró minimizar, fue que cuando al ir agregando el agua los incrementos generaban perturbaciones en el líquido, y esto daba origen a que existieran oscilaciones en el registro de los datos, es decir, se repetía varias veces la misma medición y se tomaba la media de la muestra, es decir, su valor más repetido. Por esta cuestión se realizaron los incrementos de sustancia a través de una jeringa, para el caso de sustancias líquidas, evitando estas perturbaciones y obteniéndose valores confiables en los experimentos realizados; también se implementó el efecto navaja en la entrada del fotosensor para alcanzar la sensibilidad requerida; el corte fino que hace la navaja con respecto al haz láser nos ayuda a una mejor captación en el fotodetector, esto provocó que se disminuyera el voltaje para evitar saturación.

**3.2.1 Cálculos matemáticos para las magnitudes de los desplazamientos.**

En la tabla no. 1 se muestran los resultados obtenidos, así como los datos y los resultados de los cálculos realizados.

**RESULTADOS CON AGUA**

Peso medido	Voltaje	Altura	Incremento de altura
[Gramos]	[Volts]	[m]	[m]
144.3	0.04086	$1.89366 \times 10^{-02}$	$13.1231 \times 10^{-06}$
144.4	0.04387	$1.89498 \times 10^{-02}$	$13.1231 \times 10^{-06}$
144.5	0.04668	$1.89629 \times 10^{-02}$	$13.1231 \times 10^{-06}$
144.6	0.05103	$1.89760 \times 10^{-02}$	$13.1231 \times 10^{-06}$
144.7	0.0569	$1.89891 \times 10^{-02}$	$13.1231 \times 10^{-06}$
144.8	0.0696	$1.90023 \times 10^{-02}$	$13.1231 \times 10^{-06}$
144.9	0.0592	$1.90154 \times 10^{-02}$	$13.1231 \times 10^{-06}$
145	0.0741	$1.90285 \times 10^{-02}$	$13.1231 \times 10^{-06}$
145.1	0.52	$1.90416 \times 10^{-02}$	$13.1231 \times 10^{-06}$
145.2	1.123	$1.90547 \times 10^{-02}$	$13.1231 \times 10^{-06}$
145.3	1.55	$1.90679 \times 10^{-02}$	$13.1231 \times 10^{-06}$
145.4	1.62	$1.90810 \times 10^{-02}$	$13.1231 \times 10^{-06}$
145.5	1.63	$1.90941 \times 10^{-02}$	$13.1231 \times 10^{-06}$

Tabla 3.1. Se han registrado los resultados con adiciones de agua, observamos que por cada incremento de 0.1 grs. de sustancia (agua), la respuesta del voltaje va cambiando, hasta que el sistema alcanza su voltaje máximo. Después en la siguiente columna, calculamos con el peso medido por la báscula, la altura con la ecuación 3.2 y finalmente realizamos las restas entre la altura dos menos la altura uno, para encontrar el desplazamiento realizado por el cantilever.

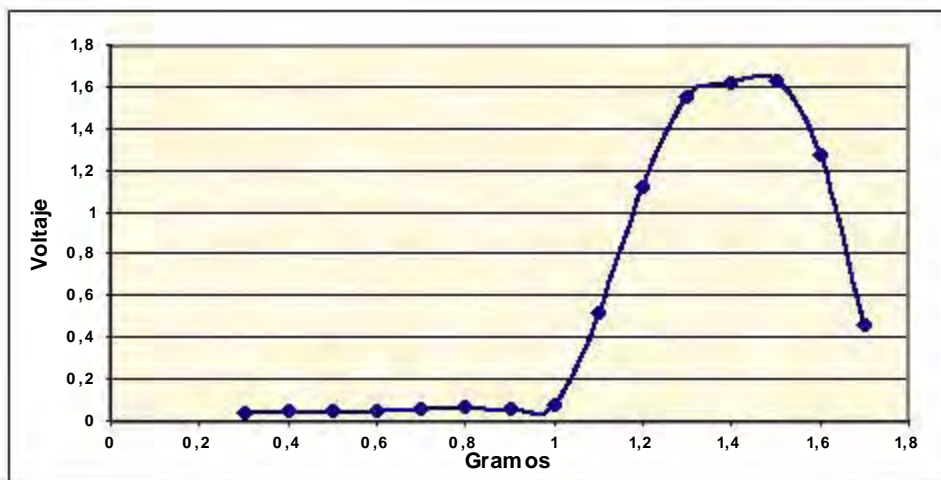


Figura 3.10. En esta gráfica se observa la respuesta de nuestro sistema con incrementos iguales de 0.1 [gr.] y su variación del voltaje; se nota que entre 0.6 y 1.6 [Volts] se presenta la sensibilidad máxima.

De los datos obtenidos y la gráfica correspondiente se observa que el sistema presenta una buena respuesta a incrementos de esta magnitud. Las perturbaciones externas han podido minimizarse, y hemos alcanzado resultados de  $13.13 \times 10^{-6}$  [m], es decir, 13 micrómetros. Con esta magnitud de desplazamiento alcanzada distinguimos que nuestro sistema es lo suficientemente sensible para detectar micrómetros; esta magnitud de desplazamiento se ha calculado restando la primera medición de altura con la segunda, la segunda menos la tercera y así sucesivamente.

Se considera que estos resultados son correctos, ya que sus magnitudes nos demuestran que se ha caracterizado el sistema de modo apropiado, pero queremos llegar a obtener mejores resultados, de menor magnitud, maximizando el diseño para obtener una mejor respuesta, por lo que se realizaron más repeticiones de nuestro experimento para saber las modificaciones a efectuar para mejorar su respuesta, qué otras sustancias se podrían utilizar, y reducir al máximo las perturbaciones tanto internas como externas del montaje.

Para alcanzar a sensar desplazamientos de menor escala se ha llegado a conclusiones importantes: en líquidos es difícil tener una buena exactitud de los incrementos de sustancia, por tanto debemos aumentar el tamaño de nuestro recipiente o empezar a trabajar con sustancias con las que podamos realizar incrementos más exactos, que posean características distintas a las del agua, como su densidad.

Para aprovechar los recursos existentes, se estudiaron las sustancias en existencia de densidad conocida, que podrían servirnos para mejorar nuestros resultados, sus propiedades, su interacción con el agua (que no reaccionaran con esta) y conocer las posibles repercusiones que causarían. Se comenzó por elegir otras sustancias líquidas con valores menores y mayores de densidades a la del agua, para evaluar su comportamiento en nuestro sistema.

Se evaluó el alcohol cuya densidad es más pequeña que la del agua de  $0.78$  [gr./cm<sup>3</sup>] y se trataron de realizar mediciones tal y como se había hecho con el agua, pero debido a su alto nivel de evaporación, no arrojó buenos resultados, porque no se llegaron a realizar las mediciones necesarias para conocer su respuesta en el sistema; con este comportamiento comprobamos que el alcohol en nuestro sistema no presenta una mejoría a la ya alcanzada con el agua, por lo que no se pudieron obtener mediciones eficientes y de exactitud confiable: a continuación presentamos los resultados.

Exp#2 Alcohol	Voltaje	$V = \frac{W}{\rho}$	$H = \frac{V}{\pi r^2}$	Desplazamientos
Gramos	Volts	Cm <sup>3</sup>	m	m
118.9	0.11	0.1282	0.5100289x10-3	0.5099881x10-3
119	1.08	0.2564	1.0200171x10-3	0.5100085x10-3
119.1	4.84	0.3846	1.5300256x10-3	0.5100855x10-3
119.2	3.57	0.5128	2.0400345x10-3	

Tabla 3.2 Resultados con alcohol, en la última columna advertimos que los desplazamientos realizados con esta sustancia no son mejores que ya habíamos alcanzado con el agua, en la etapa anterior.

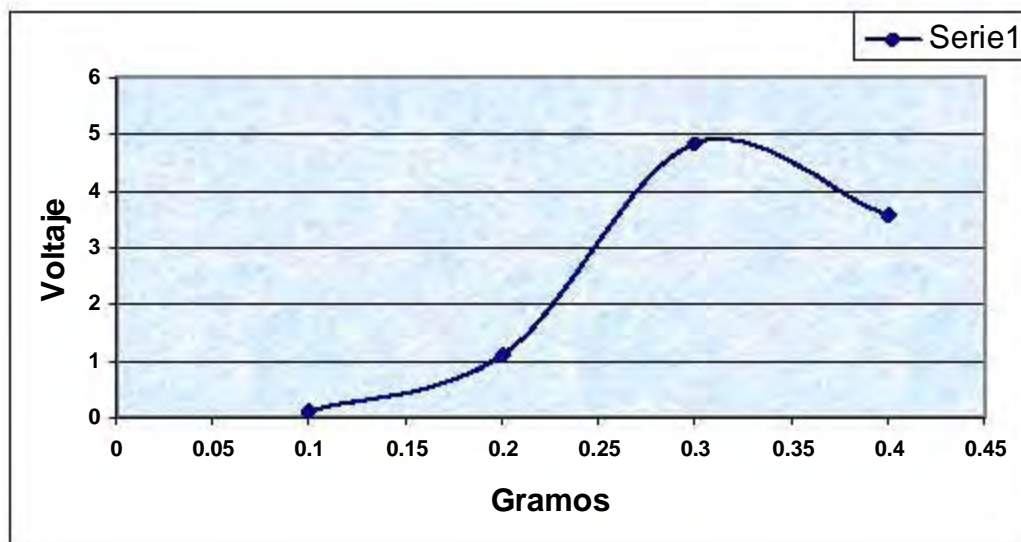


Figura 3.11. De la comparación de esta figura del alcohol con respecto a la que ya se había obtenido con agua, figura. 3.10 podemos ver que los incrementos de sustancia no son constantes, debido al alto nivel de evaporación del alcohol y a su densidad; debido a esto el voltaje tuvo un comportamiento muy bajo con respecto a los anteriores, ya que ni siquiera pudo llegar a 1 [Volt] que es donde comienza a estabilizarse el sistema, solo llegó al rango de [milivolts].

De la figura 3.11 observamos que no es recomendable hacer mediciones con el alcohol; ahora trabajaremos con una sustancia que tiene una densidad más alta que la del agua y vamos a evaluar su respuesta en el sistema. El azul de metileno tiene una densidad 4.5 [gr/cm<sup>3</sup>] a 20°C; al tener el sistema listo para medir (calibrado), comenzamos a realizar los incrementos con el azul de metileno, haciendo que una gota de la sustancia fuera de 0.1gr; ésta medida la realizamos con una jeringa, ya que este líquido es más denso que el agua por lo que debíamos esperar a que se diluyera. La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos con esta sustancia:



Exp#1 Azul de metileno	Voltaje	$V = \frac{W}{\rho}$	$H = \frac{V}{\pi r^2}$	$\Delta H$
Gramos	Volts	Volumen [cm <sup>3</sup> ]	Altura [cm]	Incremento de altura [m]
119.4	0.0552	85.285	1.357128	10.34336x10 <sup>-06</sup>
119.5	0.0648	85.35	1.358163	11.13900x10 <sup>-06</sup>
119.6	0.114	85.42	1.359277	12.73029x10 <sup>-06</sup>
119.7	0.364	85.5	1.360550	11.29813x10 <sup>-06</sup>
119.8	2.11	85.571	1.361679	11.29813x10 <sup>-06</sup>
119.9	2.32	85.642	1.362809	11.45726x10 <sup>-06</sup>
120	4.03	85.714	1.363955	11.29813x10 <sup>-06</sup>
120.1	4.6	85.785	1.365085	11.45726x10 <sup>-06</sup>
120.2	5.53	85.857	1.366230	10.02510x10 <sup>-06</sup>
120.3	5.73	85.92	1.367233	

En la tabla 3.3 podemos ver la magnitud de las mediciones realizadas con Azul de Metileno, en la primera columna tenemos los gramos adicionados en el recipiente sensados por la báscula, después obtuvimos el volumen en el recipiente en cada uno de los eventos, de estos podemos calcular las siguientes columnas que son de diferencia de alturas e incrementos respectivamente.

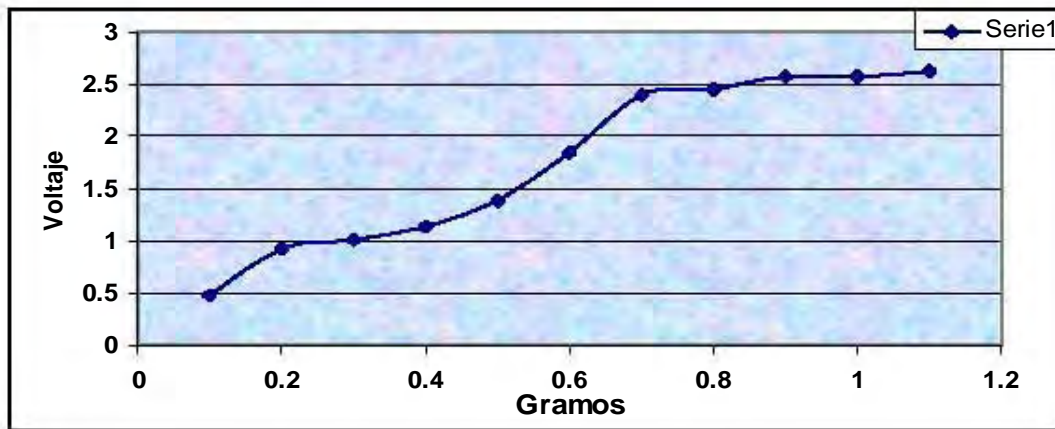
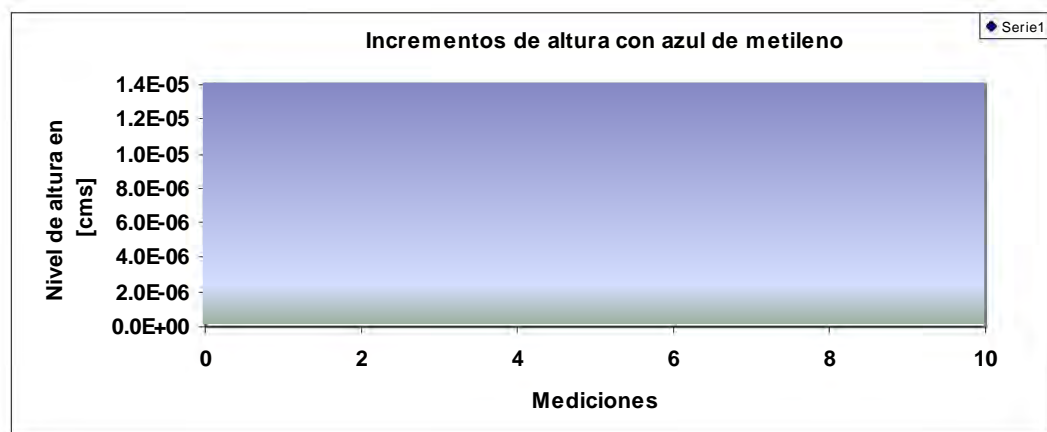


Figura 3.12. Gráfica obtenida al realizar las mediciones con azul de metileno. En esta gráfica advertimos que los resultados con azul de metileno presentan el comportamiento característico del sistema que ya había sido obtenido, sin embargo, solo tienen buena exactitud ya que son de una magnitud menor que los obtenidos con el agua.



*Figura 3.12. En esta gráfica verificamos los resultados obtenidos con Azul de Metileno, la magnitud de los incrementos fue buena y de rango constante, los resultados son mayores de los esperados.*

De las pruebas realizadas, con agua, alcohol y azul de metileno, con la sustancia que obtuvimos mejores resultados, o sea el menor desplazamiento fue el azul de metileno, ya que sus resultados fueron los de menor escala registrada, porque se obtuvieron desplazamientos  $10.12 \times 10^{-6}$ , es decir que en la escala de nanómetros sería 10,025 [nm]. De este modo se concluye que los resultados con el azul de metileno fueron mejores que los proporcionados por el agua y el alcohol, ya que los desplazamientos sentidos por el sistema fueron menores debido a la densidad del azul de metileno es mayor.

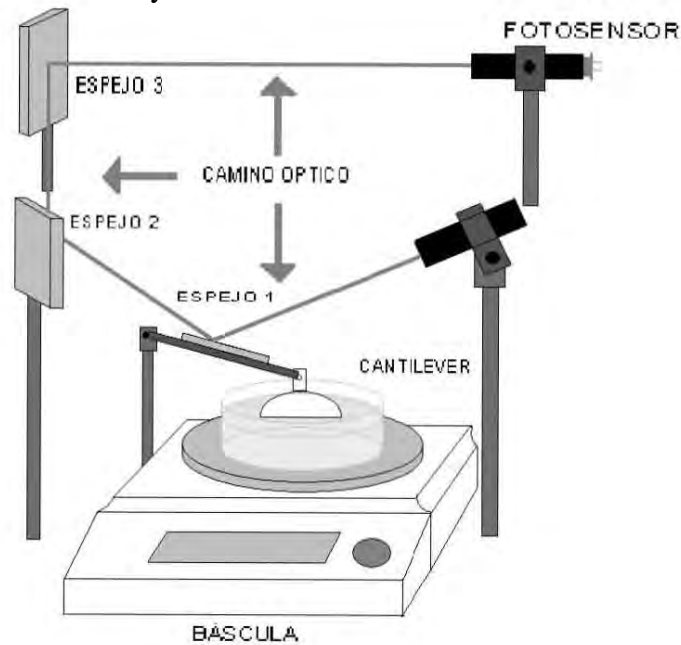
Para lograr el objetivo de mejorar estos resultados obtenidos con el agua y el azul de metileno, se comenzaron a estudiar las posibles modificaciones del sistema, las condiciones que debíamos cambiar para sensar desplazamientos más pequeños y al mismo tiempo que nuestro diseño tenga una sensibilidad mayor de la que se ha alcanzado con el mismo método pero en diferentes aplicaciones. Se me sugirió que trabajara también con sustancias sólidas, ya que se podría mantener un buen control de la cantidad de la sustancia, a diferencia de las líquidas porque al adicionarla se pueden minimizar las perturbaciones en las mediciones, si se trabaja con sólidos se podrían agregar cantidades más pequeñas de las que se han estado adicionando.

Se probaron la clase de resultados que obtendríamos con algunos polvos, como la anilina de diferentes marcas y colores, para analizar si habría o no un mejor control de la cantidad de sustancia, y al controlar esta variable inmediatamente los resultados obtenidos fueron de mejor calidad. Sobre esta base analicé algunos tipos de sustancias en polvo del laboratorio de química, y trabajé con  $\text{TiO}_2$  (Óxido de Titanio) de diferentes fabricantes; la densidad del  $\text{TiO}_2$  es variable con respecto a muchos factores, tales como: marca, fabricante, tiempo de almacenaje (desde su fabricación), diámetro del partículas, granulación, etc.

En el caso de una sustancia sólida como ésta, posee mejor absorción respecto a las anteriores, al machacar con mortero y pistilo la sustancia se reducen así los espacios entre partículas, generando la minimización de errores que antes nos daban las sustancias líquidas.

Al utilizar el Óxido de Titanio se observa claramente que se moja completamente en el agua, esta condición ayudó mucho a mejorar los resultados, y mientras se asentaba en el recipiente no se tenía un valor fijo de voltaje, debido a las perturbaciones provocadas por la adición de la misma, por lo tanto se debía esperar a que se estabilizara el sistema.

Cada vez que se agregaba 0.1 [gr.] del óxido de titanio, el sistema nos proporcionaba una diferencia de volumen entre una muestra y la siguiente, con este aumento en el volumen del recipiente se obtuvo la deflexión del haz y se sensó el voltaje; con estos datos calculamos cual fue el desplazamiento entre una y otra lectura.



*Figura. 3.14. En esta ilustración podemos ver el esquema de nuestro diseño, nótese que el cantilever debe permanecer en el mismo nivel de flotación durante todas las mediciones. Se observa que es importante para la respuesta del sistema una buena alineación de los espejos, que son responsables de que el camino óptico mantenga su longitud.*

$$V = \frac{w}{\rho} \tag{3.3}$$

$$h = \frac{v}{\pi r^2} \tag{3.4}$$

De las ecuaciones 3.3 y 3.4 observamos que mientras mas grande sea la densidad  $\rho$  de la sustancia con la que estamos realizando los desplazamientos en el recipiente con el agua, mejores resultados de desplazamientos obtendremos. Es decir, si obtenemos valores menores de volumen  $v$ , al hacer los cálculos para saber la magnitud del desplazamiento realizado, se obtendrá de la ecuación 3.4. Al sustituir este valor en la fórmula para hacer el cálculo de la resta entre mediciones del nivel del recipiente, se puede ver que si tenemos un valor muy pequeño de volumen en la fórmula 3.4.

Los resultados obtenidos con el TiO<sub>2</sub> fueron excelentes porque además de que realizar los cambios necesarios al sistema, se incrementó la sensibilidad sin alterar la SNR, además de que al hacer más pequeña la longitud del cantilever y por consecuencia del espejo no. 1, se modificó el camino óptico que recorre el láser haciéndolo más eficiente en el nivel de voltaje, además de la implementación del efecto navaja; esto ha cambiado la magnitud de los resultados, y como veremos en las siguientes tablas de resultados, podremos establecer de mejor modo la relación de deflexión entre el voltaje y los incrementos del TiO<sub>2</sub>. Se incrementa la sensibilidad y el rango de medición pasando del intervalo obtenido con la primera longitud de 20 [miliVolts] a 3 [Volts], hasta 100 [mV] a 5.123 [V] y alcanzando 88.1 [nm] aproximadamente. En el siguiente análisis se podrá estudiar esto con más detalle.

Peso [gr.]	Voltaje [volts]	$V = \frac{W}{\rho}$ [cm <sup>3</sup> ]	$H = \frac{V}{\pi r^2}$ [cm]	INCREMENTO DE ALTURA [m]
0.0947	0.28	0.02104	<b>8.371955159x10<sup>-5</sup></b>	8.840811350x10 <sup>-8</sup>
0.0948	0.363	0.02107	<b>8.380795970x10<sup>-5</sup></b>	8.840413540x10 <sup>-8</sup>
0.0949	0.479	0.02109	<b>8.389636384x10<sup>-5</sup></b>	8.840413530x10 <sup>-8</sup>
0.095	0.985	0.02121	<b>8.398476798x10<sup>-5</sup></b>	8.839220060x10 <sup>-8</sup>
0.0951	1.36	0.02114	<b>8.407317211x10<sup>-5</sup></b>	8.840811360x10 <sup>-8</sup>
0.0952	1.49	0.02116	<b>8.416158022x10<sup>-5</sup></b>	8.840413430x10 <sup>-8</sup>
0.0953	1.65	0.02118	<b>8.424998436x10<sup>-5</sup></b>	8.840811360x10 <sup>-8</sup>
0.0954	2.53	0.02120	<b>8.433838849x10<sup>-5</sup></b>	8.840413530x10 <sup>-8</sup>
0.0955	3.01	0.02123	<b>8.442679263x10<sup>-5</sup></b>	8.840413530x10 <sup>-8</sup>
0.0956	3.25	0.02125	<b>8.451519677x10<sup>-5</sup></b>	8.840811360x10 <sup>-8</sup>
0.0957	3.62	0.02127	<b>8.460360488x10<sup>-5</sup></b>	8.840413530x10 <sup>-8</sup>
0.0958	3.854	0.02129	<b>8.469200901x10<sup>-5</sup></b>	8.840413960x10 <sup>-8</sup>
0.0959	4.294	0.02132	<b>8.478041315x10<sup>-5</sup></b>	8.840416990x10 <sup>-8</sup>
0.096	4.52	0.02134	<b>8.486881728x10<sup>-5</sup></b>	8.840811360x10 <sup>-8</sup>
0.0961	4.97	0.02136	<b>8.495722540x10<sup>-5</sup></b>	8.840413530x10 <sup>-8</sup>
0.0962	5.138	0.02138	<b>8.504562953x10<sup>-5</sup></b>	8.840413530 x10 <sup>-8</sup>
0.0963	5.123	0.02140	<b>8.513403367x10<sup>-5</sup></b>	

*En la tabla 3.4 Se observan las mediciones hechas con TiO<sub>2</sub>, la primera columna nos da los incrementos de sustancia en cada evento, a continuación la segunda columna nos da el voltaje respecto a este incremento; en la tercera columna tenemos la magnitud del volumen despejado por el TiO<sub>2</sub>, a continuación en la cuarta columna tenemos el cálculo de la altura del recipiente con cada uno de los incrementos de las mediciones; finalmente en la última columna tenemos el cálculo de las diferencias entre las mediciones segunda y primera para conocer el desplazamiento realizado por nuestro sistema antes y después del incremento de la sustancia.*



Figura 3.15. Gráfica de desplazamientos realizados con  $TiO_2$ , podemos observar la variación de el voltaje (deflexión de haz láser captada por el sensor) con respecto a la sustancia agregada, observamos que el sistema presenta un comportamiento casi-lineal, es decir, con cada incremento de 0.1 [gramos], la respuesta del sistema fue creciendo de manera proporcional, gracias al nivel de sensibilidad que nos proporciona la técnica hasta alcanzar su punto máximo de voltaje.

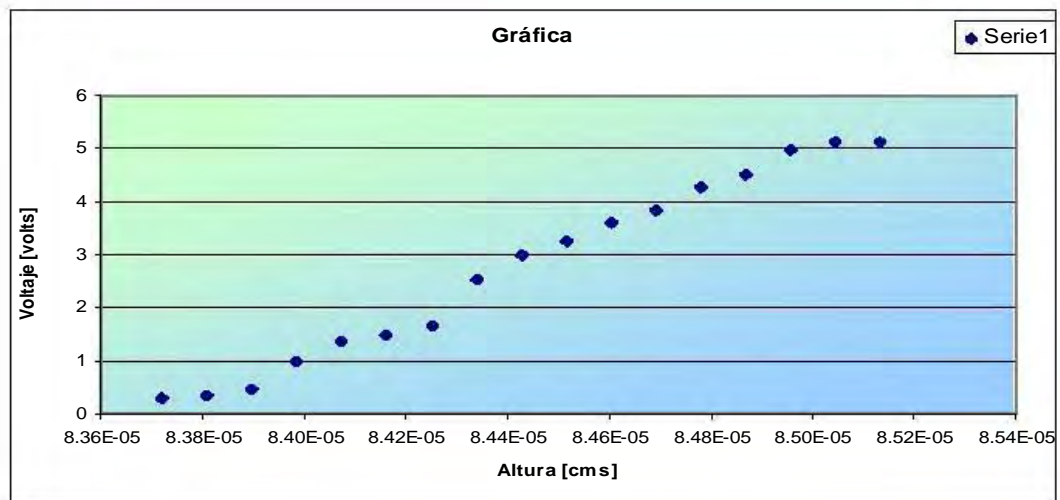


Figura 3.16. En esta gráfica observamos que los incrementos de altura causados por el  $TiO_2$  se realizaron de manera constante, es decir, que la cantidad de sustancia agregada en cada evento permaneció constante, permitiendo así tener desplazamientos de la misma magnitud, esto fue ratificado por medio de la báscula que se implementó en el sistema.

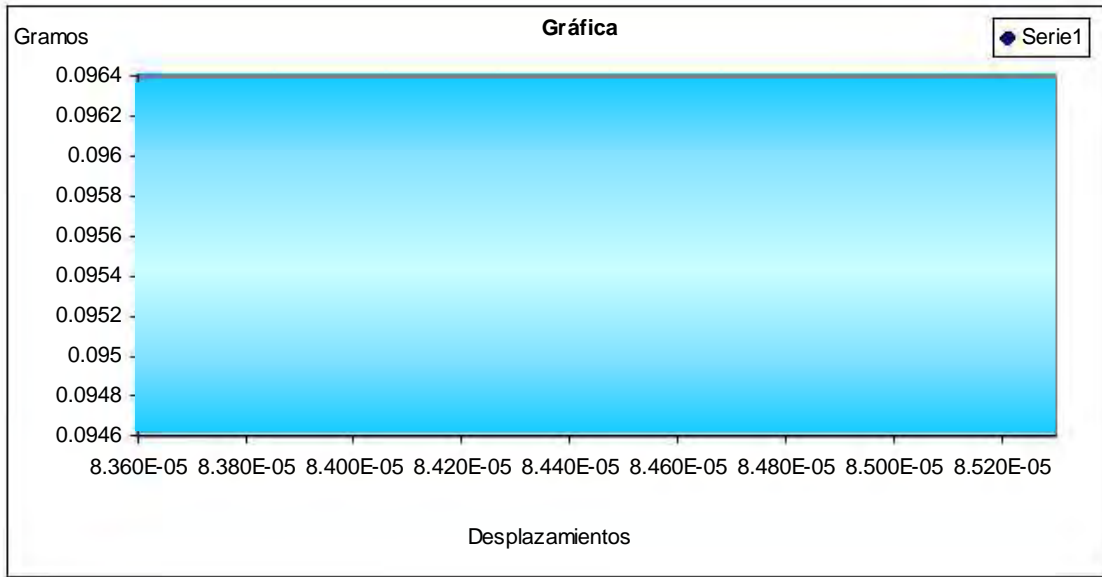


Figura 3.17. En la siguiente gráfica de comportamiento lineal, notamos que los desplazamientos causados por la adición de la sustancia fueron constantes, esto fue logrado gracias a que la sustancia  $TiO_2$  es más fácil de controlar que las sustancias anteriores, la precisión ayudó a decrementar los desplazamientos.

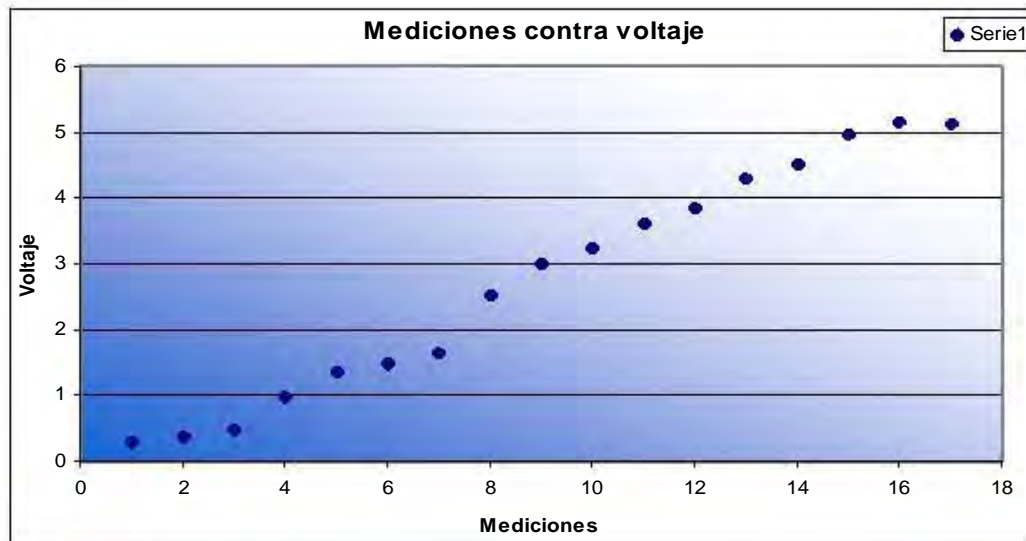


Figura 3.18. En esta figura observamos que al cambiar a una sustancia sólida manejamos un número suficiente de mediciones, además de que el rango donde la sensibilidad se maximiza se ha logrado ampliar, gracias a las modificaciones realizadas al montaje, esto repercute en los desplazamientos conseguidos que han sido los mejores desplazamientos hasta el momento.

Incremento de altura con Agua [cms]	Incremento de altura con alcohol [Cm.]	Incremento de altura Azul de Metileno [cms]	INCREMENTO DE ALTURA TiO <sub>2</sub> [cm]
1.31231368E-05	[Cm.]	1.03433631x10 <sup>-03</sup>	8.840811350x10 <sup>-8</sup>
1.31231368E-05	0.5099881x10-3	1.11390064x10 <sup>-03</sup>	8.840413540x10 <sup>-8</sup>
1.31231369E-05	0.5100085x10-3	1.27302930x10 <sup>-03</sup>	8.840413530x10 <sup>-8</sup>
1.31313680E-05	0.5100855x10-3	1.12981351x10 <sup>-03</sup>	8.839220060x10 <sup>-8</sup>
1.31231369E-05	0.5099881x10-3	1.12981350x10 <sup>-03</sup>	8.840811360x10 <sup>-8</sup>
1.31231369E-05		1.14572638x10 <sup>-03</sup>	8.840413430x10 <sup>-8</sup>
1.31231368E-05		1.12981350x10 <sup>-03</sup>	8.840811360x10 <sup>-8</sup>
1.31231369E-05		1.14572637x10 <sup>-03</sup>	8.840413530x10 <sup>-8</sup>
1.31231368E-05		1.00251058x10 <sup>-03</sup>	8.840413530x10 <sup>-8</sup>
1.31231369E-05			8.840811360x10 <sup>-8</sup>
1.31231368E-05			8.840413530x10 <sup>-8</sup>
1.31231368E-05			8.840413960x10 <sup>-8</sup>
1.31231369E-05			8.840416990x10 <sup>-8</sup>
1.31231368E-05			8.840811360x10 <sup>-8</sup>
			8.840413530x10 <sup>-8</sup>
			8.840413530 x10 <sup>-8</sup>

*Tabla 3.5 Comparación de los resultados obtenidos con diferentes sustancias: en la primera columna se observa que los desplazamientos con agua alcanzaron la magnitud de  $13.123 \times 10^{-6}$ , en la segunda columna vemos que los resultados con alcohol no fueron del número de eventos suficientes ni mejores que los que se alcanzaron con el agua. Para las mediciones con el azul de metileno se comprobó el comportamiento característico del montaje, pero los resultados mejoraron. Los mejores resultados fueron obtenidos con el TiO<sub>2</sub>, debido a que el polvo se absorbe completamente en el agua y se pudieron controlar de mejor manera los incrementos de sustancias, a diferencia de las sustancias líquidas.*

**3.3. Aplicación de nuestro sistema como sensor de densidades de sustancias.**

Es en este punto donde pasamos al segundo objetivo, relacionar los resultados obtenidos de la masa o cantidad de contenido en nuestro recipiente con el voltaje medido y así con la densidad de la sustancia. Al haber alcanzado una magnitud de los desplazamientos alrededor de los 90 [nm] se tiene una mejor sensibilidad del sistema, por lo tanto la relación entre el volumen con respecto al voltaje tiene una mejor exactitud.

En este método se debe tener mucho cuidado en la calibración del sistema antes de cada toma de lecturas, ya que es fácil tener errores a tal sensibilidad. La curva de calibración nos ayuda a que permanezca proporcional el desplazamiento generado por la sustancia con respecto al voltaje. Al conocer estos incrementos podremos alcanzar nuestros objetivos planteados, tanto el de sensar desplazamientos lo más pequeños que se puedan lograr, así como corroborar la densidad de polvos, específicamente en el caso del TiO<sub>2</sub>.

Se tomaron los valores de la última tabla de las mediciones de nuestros experimentos para ejemplificar la manera en que se pueden relacionar estas dos magnitudes (peso y voltaje): Si tenemos la magnitud de los desplazamientos alcanzados por el sistema, podemos utilizar los pasos que se han estado siguiendo pero inversamente:

- ❖ Si se han obtenido registros de desplazamientos de  $8.8408 \times 10^{-8}$ , podemos comenzar a relacionar la primera medición con la segunda y obtener el desplazamiento anterior a las mediciones.
- ❖ A partir de este se obtiene la altura entre las mediciones, comenzando por el valor de  $8.37195 \times 10^{-5}$ , con esta magnitud de desplazamiento calculamos el volumen con la ecuación 3.3.
- ❖ Al despejar el volumen de la ecuación tenemos  $V = r^2(8.840811350E-08)$  de la tabla 3.16, obteniendo  $V = 3.1416 (8.945 \text{cm})^2 \times 8.371955159 \times 10^{-5} \text{cm} = 2.10445 \times 10^{-2}$ .
- ❖ Teniendo este valor de volumen lo sustituimos en la ecuación 11, se despeja el valor de densidad, y queda como la ecuación 3.3:

$$V = \frac{\text{Peso}[\text{gramos}]}{\text{densidad}[\text{gramos} / \text{cm}^3]}$$

- ❖ De esta manera, debemos realizar el despeje de la ecuación anterior de la densidad teniendo:

$$\rho = \frac{\text{Peso}[\text{gramos}]}{\text{volumen}[\text{cm}^3]}$$

- ❖ Se obtiene al sustituir los valores en la ecuación  $4.49998957217 [\text{gr./cm}^3]$ . Debemos mencionar que esta es una buena aproximación del valor de densidad del  $\text{TiO}_2$ , pero una manera de corroborarlo es mediante la relación volumen contra voltaje; recordemos que es de suma importancia la calibración desde el comienzo de la toma de lecturas, por ejemplo si quisiéramos saber que volumen tenemos cuando estamos a la mitad del experimento, es decir cuando se han realizado 10 adiciones de sustancia de 0.1 [gr.], podemos ver que tenemos 3.25 [Volts], lo cuál quiere decir que tenemos un volumen en el recipiente de  $0.02125 [\text{cm}^3]$  de los incrementos de la mezcla de sustancias (agua y  $\text{TiO}_2$ ).

A través de todos los experimentos que se han realizado y de estudiar cuidadosamente el comportamiento del montaje propuesto, se ha podido establecer esta importante relación, ya que al calibrar antes de cada serie de eventos, podemos saber la curva de comportamiento del sistema relacionando el voltaje con la cantidad de sustancia agregada. Al saber la cantidad de volumen tenemos en el recipiente (gracias a la relación anterior), con un buen valor de exactitud, (que se observa en la tabla siguiente), podemos comenzar con nuestro segundo objetivo: conocer la densidad a partir del volumen contenido.



- ❖ En esta serie en particular comenzamos a sensar a partir de 0.0947 [gr.] de peso de la mezcla, y en cada medición se han agregado 0.1[gr.].
- ❖ Con este valor de volumen leído mediante la báscula se sustituye en la formula 3.4.
- ❖ Si tenemos el desplazamiento realizado por el sistema, se multiplica por  $\pi$  y por el radio al cuadrado del recipiente, dando como resultado:  $v= 2.10444439998e^{-2}$
- ❖ Se sustituye en la ec. 3.11 obteniendo 2.34659152616, este valor es dividido entre 0.0947 entre el anteriormente obtenido, dándonos como resultado 4.50000009508.
- ❖ Los valores de esta sustancia son variables, ya que pueden estar en el rango desde 4.2 a 4.5, dependiendo de su proceso de manufactura, el tiempo de almacenamiento, y del tamaño de sus partículas (fineza).

De esta manera obtenemos el valor de densidad por el método propuesto en esta tesis, el cual es bastante exacto, ya que nos un intervalo de mediciones desde 4.49996 hasta de 4.509508, estos resultados nos muestran que la exactitud del experimento permanece invariable, es decir que nos da casi el mismo valor en cada evento, dando lugar a que podamos tener una alta fidelidad, así el error es de  $8.88 \times 10^{-4}$  [%] y una exactitud 99.9% y su repetibilidad es muy alta, característica muy importante para un sistema de medición.

## CONCLUSIONES

Se analizó cuidadosamente la técnica de deflexión de haz láser, su principio y funcionamiento, igualmente se mostraron las características básicas de un sistema de medición o transductor en el capítulo anterior; y finalmente en este tercer capítulo hemos sentado los principios y las razones para justificar nuestro diseño basado en el método de deflexión de haz láser, los elementos que lo conforman y su apropiado funcionamiento, la mejor implementación para su desarrollo y su respuesta característica, además de estudiar cuidadosamente sus elementos y sus propiedades de funcionamiento como el láser, la báscula, el cantilever, los espejos y el fotosensor hasta su configuración correcta para conseguir mediciones de desplazamientos muy pequeños.

Al estudiar la manera en la cuál nuestro dispositivo debe operar de forma eficiente, logramos realizar las mediciones que nos habíamos planteado desde el principio, aunque encontramos algunos obstáculos tales como: fuentes de error inesperadas, unas más grandes de lo que esperamos, y otras perturbaciones inesperadas de tipo interno como externo, pero a todas pudimos darles alguna solución con la cuál sacamos adelante el diseño de nuestro sistema.

Después de analizar estos resultados se evaluaron las limitaciones del sistema y los cambios a realizar para obtener la mejor respuesta que nuestro diseño pueda proporcionarnos. El ancho de banda del sistema está dado por el tiempo de integración del multímetro; como se están midiendo señales de DC, se integra la señal en tiempo finito, este sería similar al funcionamiento de un filtro paso-bajas. Regularmente el multímetro integra durante 300ms, cuyo inverso nos da la magnitud del periodo de las mediciones, que fue de  $1/300= 33$ Hertz.

Los espejos implementados tienen una alta reflectancia para evitar pérdidas o fugas de los haces de luz, además de que estos espejos tienen la peculiaridad de ser de primer plano, esto es, que la

capa reflectora se encuentra en la superficie del vidrio y no en la parte posterior del mismo; con este tipo de espejos se evita que el índice de refracción del vidrio intervenga en la etapa de detección y a la vez evita ruidos como la doble reflexión del mismo haz, ya que con un espejo común, los haces de luz se reflejan tanto en la superficie del vidrio como en la capa reflectora en la parte posterior del vidrio, dando lugar a una segunda división de los haces de luz y a una interferencia entre estos que depende del grosor del vidrio.

Se ha concluido que en la parte práctica de la técnica, se requieren menos componentes ópticos que algunos dispositivos análogos, es mucho más fácil de alinear el haz láser, a diferencia de interferómetros más complejos. Sin embargo encontramos que al realizar su montaje no fue tarea fácil para tratar de conseguir que los tres espejos del sistema coincidieran para conformar el camino óptico; además la luz externa del laboratorio introduce ruido al sistema, así que lo más recomendable fue hacerlo un filtrado mediante un camino oscuro antes de llegar al sensor, así como apagar todas las luces e incluso lograr que la claridad del día no afectara nuestras mediciones.

Se logró establecer la relación entre el voltaje y el desplazamiento realizado por una sustancia debido a su volumen, y con él una curva de comportamiento del sistema. La relación entre el voltaje y el nivel del agua alcanzado por la sustancia son mutuamente dependientes, y con los cuales se pueden alcanzar a medir desplazamientos de alrededor de  $8.84042 \times 10^{-08}$ .

Una vez que se ha obtenido la curva de comportamiento del sistema, es posible conocer los incrementos de altura debidos a cualquier sustancia utilizada, por lo que se trabajó con diferentes sustancias de densidades conocidas para corroborar las mediciones realizadas y la curva de comportamiento del sistema. Las sustancias usadas fueron: agua, alcohol, azul de metileno y finalmente Óxido de Titanio, la cuál resultó ser la mejor para sensar desplazamientos a baja escala, debido a su densidad.

Después de haber obtenido estos resultados y al observarlos detalladamente con las diversas gráficas, podemos establecer la relación de correspondencia entre el voltaje y los desplazamientos realizados por el sistema. Cuando comenzamos a agregar los incrementos para obtener los desplazamientos, observamos detenidamente como fue variando el voltaje en el fotosensor; al estudiar de cerca este comportamiento decidimos que el rango de medición en el sensor podría limitarse para incrementar la sensibilidad a través del efecto navaja.

Al restringir el rango de recepción en el fotosensor podemos analizar algunas variaciones y consecuencias: El corte fino que hace la navaja con respecto al haz láser nos ayuda a afinar la entrada en el fotodetector, ya que se tiene un corte muy exacto en el haz hacia la entrada en la zona sensible del fotosensor, esto provoca que se disminuya el voltaje para evitar saturación, y con esto incrementamos la sensibilidad. Al principio de nuestro estudio al comenzar a graficar los resultados obtenidos no nos daba una recta como ahora lo manejamos, la respuesta del sistema era de la forma de una Campana de Gauss, de la siguiente manera:

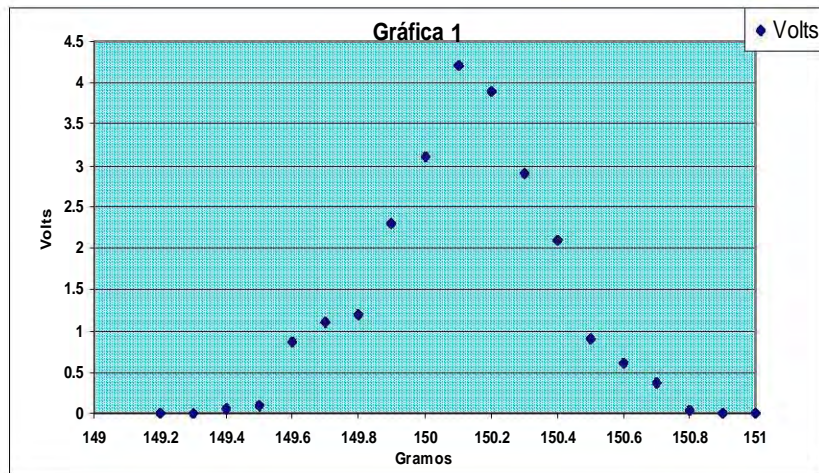


Figura 3.18 Gráfica del comportamiento del sistema sin las modificaciones realizadas.

Esta gráfica presenta una forma de campana de Gauss debido a que el haz láser comienza a entrar en la zona de detección del fotodetector incrementándose el voltaje medido, llegando a un máximo cuando todo el spot del haz láser está dentro del área sensible del fotodetector, para posteriormente comenzar a salir de ésta y disminuyendo el voltaje medido. Al incrementarse y descender el voltaje con el incremento de altura, se tienen dos valores de peso con el mismo voltaje. De esta forma, debido a la simetría de la campana de Gauss se limitó el intervalo de altura a la primera mitad.

La parte de la gráfica donde se presenta la mayor sensibilidad es en la parte lineal de la curva, es decir, desde 2.0 hasta 4.5 [Volts]; y cuando se redujo el intervalo de mediciones con el efecto navaja fue de 0.5 a 2 [Volts], evitando así la saturación.

## BIBLIOGRAFÍA

<sup>1</sup> G. Meyer and N.M. Amer, Appl. Phys. Lett. 53, 2400 (1988).

<sup>2</sup> G.Y. Chang, R.B. Givens, J.W. M. Spicer, R. Osiander, and J.C. Murphy, Appl. Lett. 63, 645 (1993).

<sup>3</sup> G.C. Wetsel, Jr., S.E. McBride, R.J. Warmack, and B. Van de Sande, Appl. Phys. Lett. 55, 528 (1989).

<sup>4</sup> Steven R. Cook, Mark A. Hoffbauer, and Jon B. Cross, Rev. Sci. Instrum. 67, 1781 (1996).

<sup>5</sup> J.C. Murphy and L. C. Aamodt, J. Appl. Phys. 51, 4580 (1980).

A. Salazar, A. Sánchez-Lavega, and J. Fernández, J. Appl. Phys. 65, 4150 (1989).

<sup>6</sup> A. García-Valenzuela "Limits of different detections schemes used in the optical beam deflection method" 1997 American Institute of Physics.

## ***CAPÍTULO CUATRO. DISCUSIÓN, PERSPECTIVAS Y CONCLUSIONES***

### **INTRODUCCIÓN**

Los materiales de partículas finas y objetos incorporados o producidos se encuentran en cualquier lugar a nuestro alrededor y a veces no se es consciente de su existencia; frecuentemente se encuentran productos que provienen de materiales fabricados a partir de polvos, tales como: cemento, limo fertilizante, polvo facial (maquillaje), azúcar, sal de mesa, detergentes, así como polvos para baño y dentales, crema para el café (sustituto de leche), bicarbonato e infinidad de productos para el hogar. Otros ejemplos de productos en los cuáles no es tan lógica su incorporación son: pintura, pasta de dientes, lápiz labial, rimel, chicle, medios de grabación (almacenamiento) magnéticos, productos medicinales, capas para la elaboración de portadas de revistas, recubrimientos de pisos y llantas de automóviles.

En el campo de los productos alimenticios algunos ejemplos usuales son: que para el sabor de la crema de cacahuete y el chocolate en polvo se afecta por el tamaño de las partículas de sus ingredientes; la silicona amorfa y extremadamente fina es agregada al catsup o salsa de tomate, para controlar su consistencia. Las tabletas farmacéuticas que son disueltas en nuestro sistema se fabrican en cantidades determinadas, de determinado tamaño de partículas y la cantidad de superficie de las tabletas expuestas.

Con respecto a la fabricación de pinturas, el tamaño de los pigmentos controla el brillo y la saturación de estas, el tiempo de fijación del concreto, el yeso dental y el yeso para huesos rotos, todos dependen del tamaño de las partículas así como del área donde se aplicará; los removedores de olores son efectivos solo mientras el área activa de la superficie este en contacto con el área absorbente.

Muchos otros ejemplos existen acerca de los materiales en polvos para diversos propósitos, es por ello que es un gran esfuerzo en determinar las propiedades de los polvos se realiza en muchos laboratorios en el mundo. Una de estas investigaciones esta basada en determinar la densidad de los polvos, ya que con esta propiedad se pueden determinar otras características del material del cual esta constituido el polvo. Esto debido a que aunque muchas empresas crean los mismos tipos de sustancias, estas son de características diferentes; así que aunque aparentemente sean iguales las sustancias, a través de un análisis de su densidad se puede corroborar la diferencia.

El estudio realizado en esta tesis esta basado en un método óptico para determinar un parámetro físico de la materia (la densidad); es por ello que el análisis teórico realizado en los capítulos 1 y 2 es imprescindible para poder comprender la metodología realizada en ésta investigación, su propuesta, diseño, construcción y experimentación sobre el densímetro de micropartículas.

En este capítulo se abordarán nuevamente los objetivos propuestos en la investigación de esta tesis para poder cotejarlos con los resultados obtenidos, además de dar un panorama mas amplio de estos y sus pormenores; para ello es necesario dar un pequeño análisis teórico acerca del parámetro físico analizado y de la aplicación del método propuesto para su medición. Finalmente se abordaran las perspectivas de esta investigación y la dirección de esta a futuro para poder realizar mejoras a todo el sistema.

#### **4.1 Importancia de la dependencia de la densidad con el tamaño de las partículas de las sustancias.**

Excepto en la superficie, las moléculas de todos los sólidos están rodeadas completamente por moléculas vecinas, consecuentemente las fuerzas en el interior se encuentran balanceadas en asociación con sus moléculas vecinas. Asimismo, las moléculas en la superficie están solo por un lado sometidas a las moléculas interiores, dejando expuestas fuerzas atómicas y moleculares en la superficie; estas fuerzas atraen a las moléculas gaseosas y líquidas tanto como iones cuando se encuentran en un electrolito. La fuerza de atracción es conocida como fuerza de Van Der Waals, esta aumenta el fenómeno de absorción física térmica (fisisorción) siendo responsable de la tensión en la superficie y condensación de líquidos.

Si todas las partículas finas fueran de forma esférica, su tamaño estaría definido explícitamente por el radio o su diámetro; si fueran de forma cúbica, la longitud a lo largo de sus lados sería una condición característica: desafortunadamente la gran mayoría de partículas son de forma irregular, y una definición arbitraria es el único recurso al que podemos recurrir, haciendo un examen de cada partícula. Desde este punto debemos realizar una definición práctica del tamaño de partícula, que nos permita que se examinen un gran número de partículas en un corto periodo de tiempo. El método a seguir consiste en realizar equivalencias de los diámetros asignadas a una forma de partículas irregulares como en una forma regular, la cuál presenta un comportamiento idéntico cuando ambas son expuestas al mismo proceso.

Los equipos modernos para evaluar el tamaño de las partículas miden las velocidades de equilibrio de las partículas fijándolas mediante un líquido bajo la influencia de la gravedad. La ley de Stokes relaciona estas velocidades de los diámetros de las partículas con las partículas esféricas. El instrumento de Micromeritics determina la velocidad de asentamiento de las partículas de cualquier forma que sean y aplica la ley de Stokes para determinar diámetros; esta característica representa una gran ventaja en el proceso de medición de partículas, por ejemplo cuando se tiene alguna mezcla de polvos en un punto de un compuesto con un líquido y prediciendo el comportamiento de esta mezcla, es más probable que sea exitosa si los diámetros de las partículas son conocidos.

#### **INTRODUCCIÓN A LA DENSIDAD**

La densidad es una propiedad física de toda la materia; es simplemente la masa de una cantidad de materia dividida por el volumen que ocupa ésta. Si se mide de manera cuidadosa y exacta, puede revelar mucha información acerca de una sustancia, y con esta información se puede mantener un proceso bajo condiciones controladas, además nos da información acerca de la riqueza del cuerpo de un mineral, entre otras.

Las mediciones en densidad tienen un papel fundamental en muchos campos de aplicación y pueden tener importantes desarrollos: en algunos casos es determinante prevenir la porosidad, en algunos otros es una característica importante para diversos productos, de aquí que se deduzca que es muy importante la densidad de una sustancia y de esto es inherente el tamaño de las partículas que la conformen.

Por ejemplo, un productor de películas plásticas, tiene problemas en prevenir las rupturas en la película, y esto depende directamente de las mediciones de densidad en las materias primas, supliendo a aquellos productos que contienen pequeñas burbujas de aire. En contraste, burbujas de aire encerradas en celdas son deseables en materiales para aislamiento, sin embargo, estructuras de celda abierta son requeridas para filtros de hornos y automóviles.

En una diferente operación, es necesaria la exposición al calor para convertir un mineral en otra forma cristalina deseada. La diferencia aparente es mínima, pero la exactitud antes y después de realizar las mediciones puede cuantificar el cambio, estas mediciones sustentan la industria desde las materias primas hasta el producto final terminado.

### DEFINICIONES DE DENSIDAD

La masa de una sustancia o material se determina literalmente con un balance analítico, y si el material es un objeto sólido y rígido de simple geometría podemos calcular su volumen; ahora bien, si posee una geometría irregular este puede presentar dificultades para determinarse. En el primer caso la densidad puede ser fácilmente calculada; sin embargo, cuando tenemos el segundo caso se puede utilizar el principio de Arquímedes, recordemos que para medir la densidad de la corona del Rey Hiero II, Arquímedes pesó la corona y determinó su volumen mediante su inmersión en el agua, midiendo el volumen de agua desplazado. Esta técnica conocida como picnometría es apropiadamente empleada para objetos no porosos, y con algunas variaciones para objetos porosos.

Existen tres densidades asociadas con polvos, la densidad absoluta (también llamada densidad verdadera o skeletal), esta excluye dos características, los poros que pueden estar en las partículas y los espacios entre partículas; la densidad de envoltura (envelope también llamada densidad aparente) incluye los poros pero excluye los espacios entre partículas; y la densidad de vacío (bulk), esta densidad incluye ambas la de los poros y la de los espacios entre partículas.

Para el caso que nos interesa, utilizaremos la densidad absoluta por razones de sencillez, además de que los resultados obtenidos para la medición de densidades de partículas en esta tesis, fueron con la sustancia  $\text{TiO}_2$ .

Dificultades en las mediciones aparecen cuando el material en el que se harán las mediciones es de forma irregular, es decir el recipiente no tiene un volumen fácil de determinar y especialmente cuando la sustancia posee muy pequeños granos o gránulos; la dificultad se incrementa si, además, el material tiene poros, grietas, o regiones profundas convexas.

La densidad absoluta y de envoltura (envelope) difieren en este caso y requieren técnicas de separación para obtener un valor confiable. La densidad absoluta por definición en este caso excluye todos los poros que puedan tener acceso hacia fuera del líquido donde se encuentra el cantilever.

#### **4.2 Análisis y características de dispositivos análogos al densímetro de micropartículas.**

La marca Micromeritics fabrica instrumentos, específicamente para determinar la densidad absoluta; estos son de dos tipos, uno manualmente operado y otro automático. Estos dispositivos usan gas helio como medio de trabajo estándar, pero otros gases pueden ser utilizados (nitrógeno, carbono o aire libre de humedad). Posteriormente en lugar de ventilar el helio a elevada presión, es llevado hasta la presión atmosférica y después es enviado y liberado en otra cámara de volumen conocido; la presión en ambas cámaras se conoce, antes y después de la expansión del gas. Mediante este proceso se puede calcular el volumen de la muestra y dividiendo este entre el peso de la muestra podemos conocer la densidad.

En ambos casos de los instrumentos (manual y automático), se toma una muestra del material en cuestión y se coloca en una cámara sellada de volumen conocido, para ser expuesta a series de elevadas presiones de gas, que después son liberadas en vapor y gas hacia la atmósfera. Las condiciones en las que este aparato debe funcionar son a temperatura constante, en cámaras aisladas de diferentes tamaños; la expansión de los gases provoca una diferencia de presiones, y este proceso está basado en las leyes de los gases. Estos instrumentos se conocen como picnómetros, que son instrumentos basados en el principio de Arquímedes.

El resultado es un valor de densidad absoluta debido a que el Helio llena todos los espacios abiertos incluyendo aquellos de los poros. Si se logra que los materiales posean poros cerrados en granos más pequeños, un picnómetro de densidad absoluta puede ser empleado para evaluar la proporción de poros abiertos y cerrados. En Micromeritics se produce también un instrumento para determinar la densidad de envoltura (envelope); este dispositivo opera bajo el principio de inmersión de un objeto u objetos para ser evaluados en un fluido de volumen conocido y medir el volumen del desplazamiento (Principio de Arquímedes). El medio en lugar de usar un líquido como en el principio de Arquímedes, consiste en un flujo libre de partículas finas y esféricas que caen en un cilindro que contienen a ambos (flujo y el objeto). El espacio se va reduciendo gradualmente y un émbolo se va introduciendo hasta que una fuerza calculada es alcanzada.

En el lugar en el cuál se detenga el émbolo, cuando las gotas son compactadas por el objeto, se obtiene una medición del volumen del objeto y los poros no están inmiscuidos en las gotas. Dividiendo este volumen entre el peso del objeto obtenemos la densidad de envoltura (envelope) que envuelve el objeto.

El instrumento de la marca Micromeritics tiene como ventaja que puede realizar las mediciones de manera automática o manual según lo requiera el experimento, nuestro diseño es completamente manual, ya que uno mismo realiza las adiciones de sustancias y pueden existir errores al realizar los incrementos manualmente, pero si seguimos mejorando el diseño como hasta ahora, y se le efectúan las innovaciones que se han estado estudiando, es posible realizar una etapa de control y automatización del dispositivo.

El rango de sensado máximo que maneja el diseño de Micromeritics es de un volumen de 0.1 a 350 cm<sup>3</sup>, la propuesta de nuestro diseño es del rango de 0.02222 cm<sup>3</sup> hasta 502 cm<sup>3</sup>, además

nuestro diseño posee cierta flexibilidad, porque si se necesita medir un volumen más grande, solo se debe calcular el volumen del recipiente que se utilizará (se puede utilizar uno más grande o más pequeño), una báscula de mejor resolución que la utilizada para que se registre de forma eficiente los desplazamientos con una buena exactitud de acuerdo a la requerida, y que el cantilever se situó en el nivel de flotación, sin importar el tamaño elegido del recipiente.

Además el picnómetro de Micromeritics ocupa un área más grande, que necesita una interacción entre las cámaras que estarán en contacto continuamente durante todo el proceso. Asimismo, el sistema requiere un proceso de calibración más largo que el nuestro diseño, ya que para el picnómetro se debe realizar la calibración por medio de cambios de presión en las cámaras, además de que se deben purgar antes y después de cada experimento. En contraste, la propuesta que realizamos sólo debe calibrarse una vez por cada toma de lecturas, y se hace con agua agregada en el recipiente para medir el rango de voltaje alcanzado con cada incremento de sustancia (como se analizó en el capítulo 3).

Otra característica importante de nuestro diseño es que toda la manufactura fue de bajo costo, ya que los componentes más caros fueron el sensor y el láser; en contraste con el equipo de la marca de Micromeritics, ya que además de que es más complicado de manejar, utiliza gases, y estos después son liberados a la atmósfera, por lo que implica un costo extra en la calibración, y aunque se utilizara el aire libre de humedad (que es la sustancia más barata), a este se le debe someter a un proceso para que esté libre de humedad.

En el instrumento de Micromeritics se deben estar leyendo diferentes datos, para asegurar que el dispositivo se encuentre operando en óptimas condiciones, que los valores de la temperatura permanezcan constantes, así como los valores de presión en las cámaras donde se realiza la expansión de gases, realizar una y otra vez la secuencia desde la cámara 1 hacia la cámara 2 (desde la cámara de la muestra hacia la cámara de expansión) y vigilar los valores de presión de ellas.

El picnómetro es compatible con diferentes interfaces de computadoras, e incluso puede conectarse a la impresora y realizar gráficas muy exactas de los valores que han sido sensados. Nuestro dispositivo también se conectó a la computadora HP BenchLink Meter, y al efectuar las mediciones de voltaje, el programa utilizado realizaba promedios estadísticos para saber cuál era la moda o valor más repetido del evento, para saber con exactitud el valor de voltaje medido; los valores de peso en las mediciones fueron sensados de forma precisa por medio de la báscula que habilitamos.

#### **4.3 Características particulares del densímetro de micropartículas diseñado.**

La desventaja más grande para el densímetro sería que no se contará con un área suficiente para poder alcanzar la sensibilidad mínima requerida por el camino óptico (más de 60 [cm]), dando así valores muy inexactos, de escala muy grande, con lo cuál nos arrojaría datos no muy precisos de los desplazamientos medidos, y en consecuencia los valores de densidad que estamos midiendo podrían tener muchos errores.



Se puede decir que con el sistema que se ha diseñado se han alcanzado buenos resultados, sin embargo, esta configuración no se puede utilizar en un sistema que no este fijo, es decir que debe montarse en una mesa óptica y quedar completamente firme a los postes, por lo que aunque esto reduce algunas clases de ruido que puedan existir, también es una limitante, porque si no queda bien afianzado no se llegarán a los resultados propuestos.

Con respecto al funcionamiento de este diseño se debió caracterizar muchas veces antes de conocer su comportamiento característico, ya que si no se conoce la respuesta que nos da el transductor, no podemos saber como cambiará con respecto a la sustancia adherida. Para conocer su respuesta fueron implementados el multímetro conectado hacia la computadora y la báscula, y de esta manera pudimos conocer la respuesta del sistema con los desplazamientos. Otra característica que podría ser tomada como desventaja es que la reflectancia en el camino óptico debe ser alta, debido a que las pérdidas ocasionan errores que repercuten en la sensibilidad del sistema, y por ende en los resultados que se requieren medir.

A grandes rasgos se puede decir que nuestro montaje es sencillo, que tiene una gran sensibilidad gracias a que el cantilever se logró consolidar como una sola pieza, conjuntamente, la concordancia del camino óptico que es indispensable para la magnitud de los resultados obtenidos; el efecto navaja, que nos ayuda a que el haz tenga un corte perfecto al entrar en el fotosensor, nos permite evitar la saturación en la zona sensible del fotodetector, reducir la magnitud del ruido fotónico, que es inherente al láser, el ruido térmico, y otras clases de ruido que se han analizado, como el de la transducción óptica-electrónica.

Además de que el costo requerido fue muy bajo, porque ya se contaba con el láser, la báscula, el fotodetector, la mesa óptica y los postes para montar los espejos que constituyen el camino óptico, lo que debimos conseguir aparte fue el recipiente, el circuito de amplificación, sus componentes electrónicos, y los espejos diseñados en el laboratorio de películas delgadas.

Otra posible desventaja que podría tenerse, es el trabajar solo con sustancias sólidas, es decir, solo con polvos, ya que con sustancias líquidas pueden existir re-arreglos moleculares más complejos, de esto que no se pueda tener un buen control; esto se observó al realizar las adiciones en el densímetro con el alcohol y el azul de metileno.

Nuestro diseño necesita algunas condiciones iniciales especiales: que se encuentre en un lugar amplio para alcanzar la longitud mínima del camino óptico, que no haya perturbaciones de tipo mecánico a su alrededor, y que exista la menor cantidad de luz posible, de tipo natural como artificial, para aumentar al máximo su respuesta, y minimizar los errores que pudieran existir entre cada una de las lecturas.

Al utilizar el Óxido de Titanio se logró conseguir además de un mejor control del proceso, las mediciones de 88nm de desplazamientos aproximadamente, gracias a su valor más grande de densidad comparado con el alcohol y el azul de metileno.

Si la sustancia a la que se requiere evaluar no es soluble en agua al 100%, es decir que genere reacciones con el líquido patrón o que produzca burbujas, no podrán realizarse las mediciones ni el proceso que hemos estado explicando; la restricción es que debe ser totalmente soluble en agua y que esto no genere algún tipo de reacción en el líquido patrón.

#### **4.4 Perfeccionamientos a realizar al sistema.**

Gracias a la magnitud de los buenos resultados que se lograron sensar con el transductor diseñado, podemos pensar en un futuro próximo en realizar otro que se base en esta investigación pero que pueda alcanzar mejores resultados. Se conocen ahora las desventajas en la aplicación de este método, y aunque este sistema fue calculado cuidadosamente, muchas variables no quedaron claras en la teoría, solo se supusieron, se supieron con seguridad hasta que se realizaron las pruebas para conocer el comportamiento característico del diseño; es por esto que es importante saber cuáles son los perfeccionamientos que se le deben realizar al sistema, tanto para mejorar los desplazamientos medidos como la exactitud de las densidades de las sustancias empleadas.

Al haber reconocido las diversas fuentes de ruido, se puede concluir que ha sido reducido hasta su mínimo valor en todo el sistema, debido a que las mediciones efectuadas nos proporcionaron muy buenos resultados, de hecho mejores de lo que se esperaban; si en un nuevo diseño o en este mismo se puede montar una báscula de mayor resolución que la que se utilizó, se podrían tener resultados más precisos, ya que al realizar incrementos de sustancia menores de 0.1 [gr.] la sensibilidad del sistema aumentaría, pero esto conlleva a que se alcance una buena exactitud en la cantidad de estas adiciones. En un principio se quiso hacer esto, pero la báscula no detectaba los incrementos menores de 0.1 gramos, fue por esto que no se logró.

Se ha dicho que la longitud del camino óptico es fundamental para alcanzar una buena sensibilidad en el sistema, pues se puede señalar que si se logra obtener un diodo láser de mayor potencia que el que se ocupó (650nm de longitud de onda, su potencia es de 4.2 mW aprox.) se podría analizar si la sensibilidad del diseño puede crecer; esto también lleva a que se debería aumentar el nivel de reflectancia de los espejos, porque se aumentaría la intensidad captada por estos. Cabe decir, como ya se había mencionado, que el sistema no puede tener una sensibilidad infinita, esta mantiene un comportamiento creciente hasta cierto valor (máxima sensibilidad), después de este, ya no se incrementará, sino que permanecerá constante aunque se aumente la longitud entre el láser y el fotosensor.

De la relación entre el peso añadido y el volumen, lo cuál nos da el valor de densidad de la sustancia examinada, se puede afirmar que:

$$\rho = \frac{\text{Peso}[\text{gramos}]}{\text{volumen}[\text{cm}^3]} \quad (4.1)$$

Si se utiliza un recipiente más grande que el que se montó de diámetro=8.945cm, podremos mejorar la respuesta del sistema de acuerdo a la relación anterior; si el volumen contenido en el

envase es más grande que el que se logró obtener, tendremos que esta relación generará mejores y más exactos resultados. En caso de que no se pueda conseguir un recipiente más grande (como nuestro caso debido al tamaño pequeño de la báscula) lo recomendable es disminuir lo más que se pueda la cantidad a adicionar dentro del recipiente, así como minimizar la longitud del cantilever.

Otra posible recomendación sería que si solo se requiere comprobar el valor de la densidad de la sustancia, se podría procurar utilizar que no se evaporen, tal como nos pasó en el caso del alcohol. Y si además se controla que la sustancia sea sólida y que se puedan controlar adiciones menores a 0.1 [gr.], se habrá obtenido una mayor y mejor sensibilidad del transductor diseñado. Esto se resume en que en el método que se ha diseñado, es mejor tener menores incrementos de masa que se puedan agregar y mayor sea el recipiente que contenga el volumen del líquido patrón; además de que este debe tener una altura mínima de 2 [cm.] y máxima de 3[cm.], para que el cantilever tenga un buen desempeño.

Finalmente se puede afirmar que para este diseño fue necesario un total aislamiento de luz natural y artificial, porque la alta sensibilidad que presenta el sensor óptico nos registraba incluso valores que no se tenían contemplados ya que todavía no se empezaban a realizar las pruebas, sino desde la calibración. Y también se necesitó aislarlo del medio ambiente que podía generar corrientes de aire; gracias a que el cantilever fue construido y soldado como una sola pieza, pudimos alcanzar este nivel de sensibilidad y llegar a los resultados antes mencionados, pero cualquier aire nos generaba ruido dentro del recipiente, en el líquido patrón, por lo que se le aisló por medio de una caja. Se puede afirmar que una modificación importante sería aislar completamente el sistema, tanto de luz como de aire, para evaluar la cantidad de ruido que estas condiciones nos generen.

#### **4.5 Aplicaciones inmediatas y futuras del sistema.**

Si se llevan a cabo algunas de estas mejoras que se han analizado, y se comienza a profundizar en este aparato de medición, podría comenzarse a usar en un nivel no sólo de la óptica y la electrónica, sino también podrían realizarse trabajos junto con los departamentos de química y física, ya que el poder medir desplazamientos de manera muy exacta puede servir para calibración de otros aparatos utilizados en estos departamentos.

En relación a la aplicación química, podemos decir que para conseguir medir desplazamientos exactos tal vez no sea tan importante como el realizar rectificaciones de densidad de sustancias de las cuáles no se tiene un valor patrón de densidad; es decir, en nuestro caso del óxido de titanio, su densidad va desde valores de 3.8 hasta 4.7, y en la cuál obtuvimos entre 4.49 y 4.50, lo cual puede ser muy relevante cuando se requiere saber la densidad de la sustancia sólida con la cuál se está trabajando. Incluso otra aplicación importante, que pienso en la cuál se debe profundizar en su estudio, es el saber la densidad de la sustancia con la cuál se está trabajando, pero si no se conoce de que sustancia se trata, con el valor de densidad obtenido podría saberse con cierta certidumbre de que sustancia se trata.

En un principio este dispositivo pensaba tener una aplicación muy importante dentro del CCADET, desafortunadamente, no se pudo lograr la coordinación entre los departamentos para llegar a realizarla. Se trataba de que si este método podía sensor nanómetros, podría llegar a calibrar una mesa mecánica que funciona en 3 direcciones y que realiza desplazamientos de exactamente 30 [nm.] Esta habría sido una buena aplicación para el transductor, pero en este momento la mesa se está utilizando en otro proyecto, además de que habría que construirse un programa de computadora (software) que sirviera como interfaz a estos 2 aparatos.

Y aunque comencé a estudiar los tipos de programas que podrían servir para esto, siendo el Labview el más apropiado, no se pudo llegar a un acuerdo. De todas maneras esto no se descarta para futuras colaboraciones con el laboratorio de micromecánica, además de que sería muy interesante poder comprobar que esta mesa mecánica realmente se desplace cada 30nm exactamente, estudiar su funcionamiento y sobre todo demostrar que mi diseño sirve y no solo en esta sino en otras aplicaciones.

El sistema que se diseñó posee una gran importancia, por los resultados que nos ha arrojado, además de que la posible aplicación del densímetro de micropartículas se puede realizar en muchos campos de la investigación científica, como son aplicados los sensores en todo tipo de campos. El conocer la densidad de las sustancias es crucial cuando requerimos saber la composición o el volumen que ocupa una sustancia. En el campo de la geología o la ingeniería petrolera es muy importante, ya que se debe estudiar el tamaño, la porosidad y los tipos de estratos profundos de la tierra. Este sistema podría también utilizarse en el campo de la oceanografía para conocer la densidad y el tipo de los sedimentos marinos, también puede aplicarse a la agricultura, para analizar la composición de la tierra, claro que todas estas posibles aplicaciones deben ser en sólidos. En el campo de la ingeniería civil también podría servir nuestro sistema para estudiar la superficie del suelo y sus características para la planeación de cimientos.

Estas son solo algunas muestras de los alcances de nuestro diseño, el cuál tiene algunas desventajas que ya se han analizado, pero si se comparan con respecto a los resultados que nos arroja, vemos que el sistema es eficiente y que puede aplicarse en muchos campos de la ciencia y tecnología.

### **CONCLUSIONES GENERALES**

En esta investigación pude conocer todo el proceso que implica la fabricación de un sensor, desde su planeación, construcción, caracterización, el funcionamiento esperado y su comportamiento característico, también las posibles fallas que puede llegar a presentar, y sus posibles soluciones, las clases de ruido que lo afectan, y en si, todo el proceso que involucra el convertir una magnitud física de una forma determinada, en otra que se pueda medir de diferente manera.

Desde el comienzo de este proyecto se observaron los alcances del mismo, por lo que se requirió estudiar y analizar los temas necesarios para realizar un buen desarrollo matemático y teórico de esta investigación. Se investigaron temas relacionados con las bases teóricas en las

que esta sustentado el diseño, tales como el proceso de emisión láser, las clases de láser para la aplicación, el funcionamiento de un fotosensor y sus diversos tipos, el método de deflexión de haz láser en otros proyectos, sus ventajas y desventajas de aplicación, teoría de fuentes de radiación, etc.

Para comenzar a preparar esta investigación y el diseño del montaje, se propusieron algunas etapas y se fueron modificando durante el desarrollo del diseño: la primera fue la etapa de investigación del tema, esto fue comenzar a estudiar el método, leer acerca del tema, y aunque ya tenía idea, gracias a mis asesores y a las clases tomadas durante la carrera, fue mas sencilla su comprensión y el como este método podría alcanzar resoluciones tan pequeñas siendo tan simple. Gracias a estos estudios pude pasar a la segunda etapa, la parte experimental que se realizó satisfactoriamente, aunque también tuvo sus complicaciones como se analizó previamente en el capítulo tres.

Se estudiaron muchas posibles configuraciones muy interesantes, pero al ver el material y equipo disponible tuve que ir descartando algunas de ellas, debido a que se ha concluido que para cada tipo de aplicación, regularmente se maneja una configuración diferente, por lo que se deben estudiar cuidadosamente las condiciones en las cuáles se estarán desarrollando los experimentos. Por esto tuve que calcular donde se iba a montar el sistema, el equipo y material disponible para el diseño, sus características y los requerimientos que serían necesarios para su buen funcionamiento (fuentes de DC, multímetro, circuitos), así como la interacción entre ellos, sobre todo la relación que se evaluó principalmente fue la del láser y el fotodetector, y de esta manera logré determinar el nivel de captación de luz proveniente del haz hacia el sensor.

Lo siguiente a diseñar fue el cantilever a partir de los requerimientos de las mediciones que debían hacerse, además de que está sería una pieza fundamental en la investigación; me costó un poco de trabajo que flotar en el mismo nivel de la superficie del líquido durante todas las tomas de mediciones, pero sobre todo, que quedara consolidado como una sola pieza, para la reducción del ruido y para minimizar las perturbaciones que se pudieran generar en la superficie del líquido.

Posteriormente al haber diseñado el cantilever, monté el sistema en una mesa óptica que estaba disponible, teniendo en cuenta que debía alcanzar más de 70cm de longitud desde el láser hasta el fotosensor, para contar con una buena sensibilidad del sistema, además se montaron los postes para los espejos, las piezas para sujetarlos, una nuez y 3 postes más para modificar según se necesitara la dirección del camino óptico.

Al estudiar este método me di cuenta que es amigable y que tendría que desarrollar un montaje muy preciso pero de fácil implementación, lo difícil sería la reflectancia total durante todo el camino óptico; además de realizar cálculos para la distancia mínima del camino óptico, conocer la reflectancia de los espejos, las fuentes de ruido que afectarían al sistema, mantener las condiciones constantes en la toma de mediciones, y todo esto para que se pudieran medir desplazamientos muy finos por medio de la deflexión del láser.

Al evaluar todas las condiciones de trabajo y realizar el montaje del diseño, los primeros resultados obtenidos fueron trabajando con agua, ya que esta tiene la característica de tener una densidad de  $1 \text{ gr/cm}^3$ , lo que sirvió de base para poder conocer el comportamiento del montaje y obtener la curva de calibración del mismo. Los resultados obtenidos de desplazamientos fueron de 10 micras aproximadamente. Al cambiar de sustancia se trabajó con una de menor densidad, esta fue alcohol cuya densidad es de  $0.75 \text{ gr/cm}^3$ , pero debido a la gran evaporación de este líquido y a su baja densidad, los resultados fueron 13 micras, por lo que se midieron desplazamientos menores a los esperados.

De los resultados obtenidos en mediciones de diferentes sustancias, se comprobaron los cálculos que se habían hecho, se graficaron los resultados obtenidos, se analizaron las magnitudes de los desplazamientos obtenidos, los cuales fueron de micras, y consecuentemente con esta sensibilidad alcanzada se propusieron cambios para mejorar al sistema. Estos cambios fueron reducir el tamaño del cantilever, incrementar el diámetro del recipiente y aumentar la distancia entre el cantilever y el fotosensor. Además de los cambios físicos en el diseño, se cambió la sustancia con la que se medían los desplazamientos por una de mayor densidad, esta sustancia fue el  $\text{TiO}_2$ , la cual tiene una densidad de  $4.5 \text{ gr/cm}^3$ .

Un cambio importante realizado fue la aplicación del efecto navaja, para evitar la saturación del sistema y discriminar los valores captados por el fotodetector de manera eficiente, porque se pudo reducir la cantidad de ruido en el fotosensor y las mediciones fueron de valores más fieles al valor verdadero de voltaje dado por el sistema. Y de no haberse usado este efecto las gráficas obtenidas hubieran sido muy diferentes y no se habrían alcanzado a sensor la magnitud de desplazamientos que se logró alcanzar.

Con los cambios realizados al diseño mencionados anteriormente, se logró mejorar la sensibilidad del sistema notablemente, alcanzando desplazamientos de nanómetros. Además de la sensibilidad alcanzada se comenzó a trabajar con la curva de comportamiento del sistema para poder caracterizar el sistema y determinar los desplazamientos obtenidos con una sustancia patrón (agua). Este paso fue trascendente, ya que al tener la curva de comportamiento del sistema se pudo realizar el proceso inverso, esto es que conociendo el desplazamiento realizado por la adición de una cantidad de sustancia, se pudo conocer la densidad de la sustancia; para ello se comprobó el método a través de la experimentación de una sustancia de densidad conocida ( $\text{TiO}_2$ ), lo cual nos arrojó un error de  $8.8 \times 10^{-4}\%$ . Estos resultados no muestran la exactitud del sistema, ya que se realizó repetidamente el mismo experimento para comprobarlo, arrojando el mismo resultado. La sustancia empleada fue  $\text{TiO}_2$  por ser con la que se obtuvieron mejores resultados en la medición de desplazamientos, con una buena exactitud y de esta manera se pudo conseguir el segundo objetivo, calcular la densidad de una sustancia por un método alternativo, confiable y eficiente.

Se observó que además al aislar el sistema, oscurecer el ambiente y realizar la toma de mediciones en intervalos de tiempo iguales, se obtuvieron mediciones de alrededor de 88 nanómetros de desplazamientos con el  $\text{TiO}_2$ .

Este resultado fue muy alentador, porque gracias a esta magnitud, podría obtener valores muy exactos de los desplazamientos realizados por el sistema, y además se conocería una buena aproximación de la densidad de la sustancia que se ocupó.

Para la obtención de los cálculos de la densidad, fue difícil relacionar el voltaje con los gramos de la sustancia adicionada en el recipiente, ya que el sistema daba un intervalo diferente de valores de los gramos agregados al sistema en cada toma de lecturas, y esto no nos daba una respuesta constante. Debido a esto, comencé a realizar un análisis detallado de los resultados que se habían venido obteniendo; si se tenía el voltaje y los gramos con diferentes datos, ¿cómo se podría llegar a resultados constantes o similares?, después de analizarlo, llegué a la conclusión de que en la calibración estaba la clave de esta relación, porque antes de cada medición se tenía que calibrar el sistema y de esta manera conocer el voltaje que se alcanzaría y poder establecer la relación entre la cantidad de sustancia suministrada y el voltaje que la deflexión de haz nos proporcionaría.

También se realizó el cálculo para la obtención de la densidad de la sustancia agregada; aquí me encontré con un problema, ya que existen muchos tipos de densidad (analizados al principio de este capítulo), por lo que debí estudiar los tipos de densidades y tuve que clasificar la que se había obtenido, llegué a la conclusión de que el tipo de densidad que obtuvimos con este montaje y con esta técnica, es la densidad absoluta, ya que los poros y los espacios entre partículas son llenados por el agua por lo que la densidad absoluta es la que se ha estado midiendo con este sistema.

Gracias a las características que este diseño presenta, tales como la repetibilidad, la sensibilidad y la reproducibilidad han sido de carácter fundamental para la obtención de nuestros resultados. Otras características que también fueron importantes son: exactitud y el intervalo de linealidad, ya que sin estas no se hubieran alcanzado los resultados obtenidos.

Ahora que este análisis ha dado estos resultados podemos decir que fue un buen proyecto, en el cuál se cumplieron los objetivos que se habían planteado, el sistema dio buenos resultados e incluso podrían mejorarse si se realizan algunas de las modificaciones enunciadas en este capítulo, para obtener mejores mediciones de desplazamientos; con esto se logró comprobar que este es un sistema simple pero poderoso, que arroja buenos resultados, y el cuál puede tener muchas aplicaciones inmediatas y a futuro, solo se deben tomar en cuenta los requerimientos mínimos de su implementación para que los resultados sean los deseados e incluso mejores, como lo fueron en nuestra investigación.

Después de que realicé algunas pruebas con el agua, midiendo los desplazamientos que hacía el sistema, fue cuando realmente pude asimilar la teoría y conjuntarla con la práctica, pasando a la etapa tres que fue la caracterización del dispositivo, sólo con el agua como sustancia de sentido. La etapa siguiente fue la de rectificar que el comportamiento del sistema fuera coherente con algunas otras sustancias además de los resultados obtenidos con el agua; como se observó, la mayor parte de los resultados obtenidos fueron satisfactorios, aunque solo los desplazamientos medidos con el óxido de Titanio en polvo fueron los mejores.

La fase consecutiva fue efectuar conjeturas y analizar profundamente los resultados obtenidos, para posteriormente realizar las modificaciones que pudieran llevar a sensar desplazamientos de menor magnitud. Al realizar estos cambios pude obtener mejores resultados, como se observó en las gráficas del capítulo anterior, se incrementó la sensibilidad del sistema, el ruido pudo reducirse en un 30% aproximadamente gracias a las medidas tomadas respecto al ambiente con luz y aire que rodeaban el sistema.

### **BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO**

1. A. García-Valenzuela , “Limits of different detections schemes used in the optical beam deflection method” *Apple. Phys.* 985, American Institute of Physics (1997)
2. A. García-Valenzuela, R. Díaz Uribe “Approach to improve the angle sensitivity and resolution of the optical beam deflection method using a passive interferometer and a Ronchi grating”, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers* 1997.
3. Paul A. Webb, Clyde Orr. “Analytical methods en fine particle technology” *Micromeritics Instruments Corporation, Norcross, Ga. USA* 1997.



## **PUBLICACIONES DESPRENDIDAS DE ESTE TRABAJO**

**Participación de esta investigación en el Congreso SOMI (Sociedad Mexicana de Instrumentación). Memorias SOMI XIX CONGRESO DE INSTRUMENTACIÓN**

### **SENSOR DE DESPLAZAMIENTOS EN BAJA ESCALA**

#### **(SUBMULTIPLoS DE UNIDADES)**

*Angélica Ramírez Ibarra, G. Eduardo Sandoval Romero, Augusto García Valenzuela, Salvador*

*Palma Vargas [aribarra2@hotmail.com](mailto:aribarra2@hotmail.com), [eduardos@aleph.cinstrum.unam.mx](mailto:eduardos@aleph.cinstrum.unam.mx),*

*[garciaa@aleph.cinstrum.unam.mx](mailto:garciaa@aleph.cinstrum.unam.mx), [ingsalvargas@yahoo.com.mx](mailto:ingsalvargas@yahoo.com.mx) Centro de Ciencias Aplicadas y*

*Desarrollo Tecnológico, Universidad Nacional Autónoma de México, Apartado Postal 70-186, México*

*D. F., 04510, México.*

### **INTRODUCCIÓN**

En el presente trabajo se analizará la técnica de deflexión de haz láser, el procedimiento a aplicar, así como su implementación ideal para lograr obtener mediciones de desplazamientos que puedan llegar a ser lo más exactas y de menor escala posible obteniendo resultados desde micras, micrómetros y hasta nanómetros.

La importancia de este trabajo radica en que esta técnica aunque es simple y de fácil implementación, los resultados que puede alcanzar son muy confiables; a través de esto el método de deflexión del haz láser ha sido muy difundido en muchos campos de la ciencia y tecnología no solo en el de la óptica, sino también en aquellos donde su aplicación es innovadora; está ha llegado a ser una técnica de gran utilidad y de uso interdisciplinario, que se ha empleado para medir parámetros físicos en una gran variedad de experimentos.

La técnica de deflexión de haz láser fue introducida por Meyer y Amer<sup>5</sup>, por su simplicidad y exactitud es sorprendente, ya que cuando es utilizada adecuadamente en algún sistema, no importando de que rama de la física o la ingeniería se trate, esta puede simplificar considerablemente nuestro análisis; por esto es ampliamente utilizada en el campo de investigación (laboratorio) y comercialmente (en el microscopio de fuerza atómica). Los resultados arrojados son equivalentes a los de los interferómetros más complejos y su sensibilidad es tan alta que puede alcanzar la resolución atómica.

Además de estas características posee un extenso rango de escalas, se pueden medir hasta fracciones de angstroms de forma muy exacta; se utiliza en técnicas de detección fototérmicas, en la cuál la deflexión de un haz láser produce un ángulo por inducción térmica en el medio y se monitorean sus propiedades térmicas<sup>1</sup>.

## Publicaciones desprendidas de éste trabajo

Desde un principio esta técnica se ha aplicado ampliamente, ya que se ha usado también como patrón de detección de referencia; además, ha sido utilizada para comprobar las inhomogeneidades físicas existentes en una superficie plana como su conductividad<sup>2</sup>, para calibrar un dispositivo de desplazamiento<sup>3</sup> ó para hacer la medición del ángulo de rotación para balances de torsión muy sensibles<sup>4</sup>.

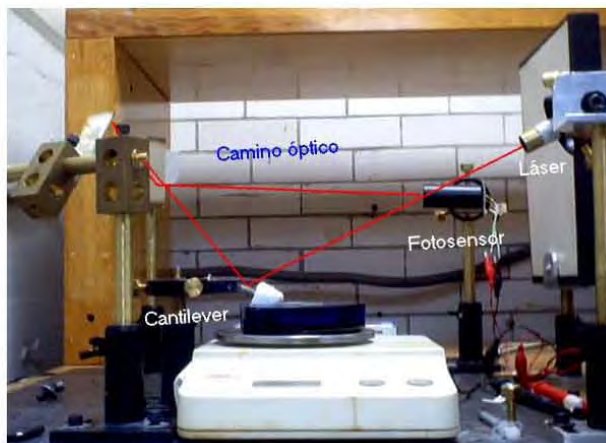
Este método (OBDM) tiene muchas configuraciones, una de ellas (que es la que se utilizará) puede consistir en reflejar un haz bien definido desde una superficie plana y proyectarlo hacia un detector de posición sensitivo<sup>6</sup> (PSD, por sus siglas en inglés). Esta configuración se analizará más adelante.

### CONTENIDO

Para este caso particular empleamos la siguiente configuración: en una mesa óptica de 50 cm x 50 cm aproximadamente comencé a examinar la mejor configuración para mi montaje, ya que en este método al hacer más grande la distancia entre el detector y el cantilever, el sistema incrementa su sensibilidad, lo cuál es una condición fundamental para la magnitud de los resultados a calcular.

En primer lugar necesité encontrar un diodo láser de luz coherente a 670 nm. de longitud de onda, ya que se necesita una fuente de luz cuasimonocromática sin distorsiones, y el haz que proporciona el láser es altamente colimado, con un ancho de banda de frecuencia extremadamente angosto, es decir que por estas características se facilita el análisis en el sistema. Pude conseguir uno que coloqué fácilmente y no de gran tamaño para poder montarlo en una base y lograr realizar cambios en el sistema sin llegar a afectarlo considerablemente.

En el laboratorio se tienen fotodetectores, los cuáles son fundamentales para la medición precisa del haz láser, así que implementé un fotodetector por medio de un circuito que ya existía, diseñado previamente para otros experimentos; solo tuve que conseguir los componentes electrónicos y una tableta, realizar las perforaciones de la configuración del circuito y finalmente soldar los componentes. Mediante este circuito se logrará hacer la integral captación del haz láser enfocándolo hacia la salida del fotodetector y de este a un multímetro y se medirá su magnitud que va desde milivolts hasta volts. En la figura no. 1 podemos apreciar la configuración del sistema.



Explicación de la foto

## Publicaciones desprendidas de éste trabajo

El diodo láser nos proporciona el haz que está directamente enfocado hacia el cantilever que se encuentra sumergido en el émbolo del líquido, variando el nivel de la sustancia (del desplazamiento del cantilever se obtendrá la variación de la altura del sistema, respecto al líquido); en este émbolo se coloca un espejo como parte de un camino óptico de tres espejos, el cual dirige el haz hacia el sensor de posición. El paso posterior a realizar para obtener mediciones de los volúmenes que se iban a emplear fue el de introducir bajo el recipiente del cantilever una báscula que contendría la sustancia que va a ir variando con respecto a su adición para estar sensando el cambio del peso, ya sea en mezclas de sustancias o de un solo elemento. Es importante tener presente la manera en que las propiedades de las sustancias pueden generar repercusiones en el sistema, tanto en la medición del voltaje como en la de los gramos, ya que dependiendo de esta podrá hacer una relación de los resultados.

Además de la sustancia que se irá incrementando en el recipiente, en la superficie del líquido se colocó el flotador en donde se encuentra el cantilever flotando en la sustancia a analizar. El cantilever tendrá la función de permanecer en la superficie del líquido al mismo nivel de inmersión y no debe presentar perturbaciones laterales ni vibraciones eólicas o mecánicas, solamente puede oscilar hacia abajo o hacia arriba; esta oscilación dependerá tanto de las propiedades de la sustancia con que se trabaja, como de la cantidad que se vaya adicionando en el recipiente; dependiendo de la magnitud de estos desplazamientos, partiendo de una a otra medición podremos saber en que escala estamos midiendo, ya sea micras, micrómetros o hasta nanómetros.

A partir de que se tienen lecturas de peso y voltaje se pretende establecer una relación entre el voltaje obtenido y la variación del peso que se lee en la báscula para determinar la densidad de la sustancia a analizar. Esto no se ha realizado aún, ya que no he podido establecer exactamente un punto de partida, además de que la relación entre el voltaje y la variación de los gramos no ha sido constante, siempre ha ido cambiando de una toma de lecturas a otra.

En nuestro laboratorio no se tiene una báscula con una gran resolución como se necesita en este experimento para conseguir sensar los desplazamientos en escala micrométrica necesarios; la única con la que se cuenta tiene una resolución de 0.1 grs. así que si se requiere medir cantidades mas pequeñas de la sustancia con que se quiere hacer el análisis como 0.05 o 0.025 gramos se tienen que hacer mediciones aparte en otra báscula con una resolución más alta y con un mejor control de la muestras a evaluar, pero esto no perturba nuestros resultados.

Para el caso de los sólidos como el óxido de titanio no hay problema al adicionar cantidades menores de 0.1 gramos, ya que obtuve muestras desde 0.05 y hasta 0.002 gramos; el problema surgió al trabajar con sustancias líquidas, tales como agua, azul de metileno y alcohol. Este problema lo solucioné empleando una jeringa para que en la superficie del líquido no existieran demasiadas olas o burbujas alterando el intervalo de mediciones.

En la báscula de resolución 0.1 grs. Comencé a hacer mi análisis así como a realizar los cálculos necesarios para determinar si la resolución iba a ser suficiente para poder aproximarme a la medición de micrómetros. Mediante esta báscula se fueron registrando los cambios de peso que se iban a presentar durante todo el experimento.

## Publicaciones desprendidas de éste trabajo

Ahora para obtener una sensibilidad aceptable del dispositivo, se me explicó que la longitud del camino óptico debía ser de por lo menos de 60cm desde el haz láser, es decir a partir del diodo láser y hasta el detector (fotosensor), para poder alcanzar una sensibilidad aceptable.

Para conseguir una mayor sensibilidad determiné que el camino óptico fuera constituido por 3 espejos logrando así una distancia mayor que la requerida; el primer espejo se ajustó sobre la base del cantilever que está sumergido en el líquido, el cuál será fundamental para poder medir los cambios de altura conforme fluctúen las lecturas. El segundo espejo esta montado en una nuez para poder manipular su dirección hacia el tercer espejo y con respecto del haz que proviene del primer espejo, simultáneamente para lograr que sea congruente con el tercer espejo y para ampliar la longitud del camino óptico. Este último espejo es muy importante, ya que desde éste se refractará el haz directamente hacia el detector.

Éste tercer espejo se montó sobre un pieza que fue diseñada en base a otra que ya se tenía en el laboratorio y solo se le hicieron algunas innovaciones como tamaño y facilidad de implementación para lograr que sostuviera de mejor modo el tercer espejo que es sumamente importante.

Todos estos elementos se han fijado firmemente a la mesa óptica de manera que no sufran ningún movimiento o perturbación externa mientras se está incrementando la cantidad de sustancia en el recipiente, ya que de no ser así se tendrían otras variables desconocidas que podrían alterar los datos y resultados obtenidos o de otra manera se tendrían más parámetros por controlar.

### MÉTODO

Al tener ya montado el sistema con los 3 espejos, la sustancia con la que se realizará el análisis (en este primer experimento con agua), la báscula ya con el peso del recipiente restado para solamente medir el peso del agua (esta se vacía en el recipiente hasta llegar hasta su borde), la sustancia a agregar en la cantidad necesaria dependiendo del número de muestras, el multímetro conectado en la salida del fotodetector y la fuente para alimentar el láser.

Principié en implementar el equipo que se iba a necesitar, en primer lugar el multiméetro con un programa especial para realizar mediciones que se conectó en la computadora, ya que estas requieren ser muy exactas y además se hacen promedios estadísticos fácilmente en poco tiempo gracias a este programa.

Después de haber alineado las 3 espejos del camino óptico hacia el fotodetector, observé que el rango de captación es muy pequeño, es decir, el área que recorre el haz desde que comienza a entrar en el detector hasta que termina; esto es conveniente para no manejar demasiados datos, ya que la variación oscila entre 10 o 12 muestras desde que el haz comienza a entrar en la zona captación hasta que alcanza su punto máximo y sale de la zona sensible del sensor.

En esta fase pude detectar fácilmente desplazamientos menores de micras, adicionando una gota de agua en la parte mas cercana al recipiente, esta aumentaba por cada gota casi 0.1 gramos de peso, lo que equivale en desplazamiento a  $3.9 \times 10^{-4}$  cm lo que da 0.0003978 m lo que es en micrómetros  $397.823 \times 10^{-6}$ . Este resultado nos indica que el agua es una buena sustancia para obtener resultados determinantes, porque su nivel de evaporación es de 0.7 [grs/hr], así

## Publicaciones desprendidas de éste trabajo

que no afecta las mediciones ya que permanece constante durante todo el análisis. De esta manera se trataron de mantener las condiciones del laboratorio invariables para lograr así resultados análogos, las mediciones se tomaron casi a la misma hora y con el mismo intervalo de tiempo entre ellas, además que el laboratorio tiene un clima frío, por lo que no hay alteraciones debido al clima.

Haciendo el análisis de este experimento se me recomendó utilizar otras sustancias que podrían ayudarme a incrementar la sensibilidad, así que comencé a experimentar con azul de metileno que es una sustancia más densa que el agua, así que pensé que esta sería una característica determinante para llegar a desplazamientos de menor escala. Pero al realizar las mediciones con el azul de metileno encontré que estaba obteniendo resultados muy similares a los que ya había logrado con el agua, siendo que el azul de metileno es una sustancia con la que cuesta más trabajo medir que con el agua. Por esto busqué de que forma podría realizar desplazamientos menores.

Después de considerar los parámetros a modificar para medir desplazamientos mucho más pequeños, realicé modificaciones a todo el sistema. Cambié la longitud del camino óptico cambiándolo de los 60 cm. que medía a 90 cm. aproximadamente, después recorté la longitud del cantilever así como la del espejo que monté sobre él, que era de 4 cm. a 1 cm aprox. con esto logré que la sensibilidad aumentara pasando desde el orden de  $397.823 \times 10^{-6}$  hasta  $1.273 \times 10^{-6}$ . Con estos cambios logré incrementar mucho la sensibilidad del sistema, pero para lograr que fuera aún más pequeño el empuje que recibe el cantilever, empecé a investigar con que otras sustancias podría lograría esto.

Recibí la sugerencia de que podía comenzar a medir desplazamientos pero ya no con sustancia líquidas en un cien por ciento, sino que realizara mezclas y advirtiera la magnitud de los desplazamientos que podría obtener. Así que comencé a mezclar con agua y alcohol, pero los resultados obtenidos no fueron alentadores, ya que debido al alto nivel de evaporación de la mezcla se midieron desplazamientos  $1.9095 \times 10^{-3}$  cm.

Entonces se me propuso usar sustancias sólidas, ya que basandome en que con cada gota de agua se tenía un cambio de peso de 0.1 gramos aproximadamente, pero con el óxido de titanio podría ir adicionando en cantidades más diminutas y de esta forma lograr medir desplazamientos menores de los ya obtenidos. Para esto tuve que conseguir suficiente cantidad de este polvo la cuál debí machacar en un mortero y con un pistilo para reducir los espacios que pudieran existir entre las partículas y sus espacios. Posteriormente comencé a sensar las lecturas de los desplazamientos realizados por la mezcla de agua con óxido de titanio. Con el recipiente casi hasta su máxima capacidad logré que el haz láser fuera entrando en la zona de captación del fotosensor, recorriendo todo el camino óptico desde el cantilever hasta el fotosensor.

Al principio tuve algunos problemas para determinar el comportamiento del sistema con el polvo, ya que la respuesta del sistema proporcionó que el empuje recibido por el cantilever era negativo; es decir que en lugar de comenzar a entrar en la zona de captación del sensor, se iba alejando. Así que decidí usar otro polvo para hacer una comparación entre los resultados, y obtuve una respuesta similar aunque la anilina con la que trabajé es de densidad diferente que la del óxido de titanio. Mi problema era que debía adicionar al principio más sustancia de la que había calculado y al ir avanzando sobre las mediciones ir disminuyendo la cantidad adicionada;

## Publicaciones desprendidas de éste trabajo

por ejemplo comenzar con 0.05 o 0.1 gramos e ir disminuyendo hasta observar un cambio considerable en el voltaje.

En la parte donde presenta una mayor sensibilidad el sistema es cuando pasa de la tercera o cuarta adición de sustancia, ya que empieza a estabilizarse el aumento de óxido de titanio. En esta parte tenemos que pasa la lectura desde 1.5 o 2 volts hasta casi 3.5 o 4, cuando su rango va desde que comienza a entrar a la zona de captación de 100 mv aprox. hasta casi 5.8 o 6 volts considerando que tenemos intervalos de mediciones casi constantes de 60 segundos. Además de esto, estar realizando las lecturas y estar repetidamente haciendo el experimento me dí cuenta que los resultados arrojados por el óxido de titanio no eran tan contundentes de los que ya había obtenido con la primera sustancia que fue el agua y con esta se obtuvieron los desplazamientos más pequeños que he conseguido medir.

Así que respecto a los resultados con el óxido de titanio, preferí regresar a trabajar con agua por simplicidad, además de que los resultados obtenidos son satisfactorios, pero aún deseaba decrementar la escala de la medición de los desplazamientos; por lo que decidí implemetar en el área de captación del fotosensor una navaja para reducir el área que se estaba captando en este. Lo que sucede conel efecto navaja es que el borde que tiene la navaja comienza a recortar el haz del láser con un corte fino y constante, ya que de una captación máxima de 5.8 volts con la navaja se ha reducido el voltaje y así podemos hacer una análisis más a fondo, ya que es como si hiciera una partición del haz e ir quitando partes que podrían ser más nocivas que favorables.

El haz láser a lo largo de todo el camino óptico tiene una pérdida máxima desde 1 a 1.5 volts aproximadamente, esto depende del voltaje que posean las pilas con que se alimente el circuito del sensor así como de el tiempo de medición entre cada lectura. Finalmente

También se pretende hacer una medición exacta de una plataforma que tiene desplazamientos de 30 nm y por esto se requiere comprobar que se hagan estos mismos con mucha exactitud.

MICRA: Millonésima parte de un metro

NANÓMETRO: División de un metro en mil millones de partes; cada una de éstas es un nanómetro. Un átomo tiene de diámetro 1.5 nanómetros aprox.  $1 \times 10^{-9}$ ,  $0.001 \times 10^{-6}$ ,  $0.000001 \times 10^{-3}$ ,  $1.000 \times 10^{-12}$ .

MICRÓMETRO: División de un metro en 1 millón de partes.  $1000 \times 10^{-9}$ ,  $0.001 \times 10^{-3}$ ,  $0.000001$ ,  $1\ 000\ 000 \times 10^{-12}$ .

En este trabajo se analiza la implementación ideal del método de deflexión de haz láser para lograr obtener mediciones de desplazamientos que puedan llegar a ser lo más exactos y de menor escala posible obteniendo resultados desde micras, micrómetros y hasta nanómetros. El sistema consta de los 3 espejos que constituyen el camino optico cuya longitud depende de la sensibilidad del sistema, la báscula ya con el peso del recipiente restado para solamente medir el peso del agua (esta se vacía en el recipiente hasta llegar hasta su borde), la sustancia a agregar en la cantidad necesaria dependiendo del número de muestras, el multímetro conectado en la salida del fotodetector y la fuente para alimentar el láser.

## Publicaciones desprendidas de éste trabajo

Al aplicar el método de detección de haz láser en un cantilever podremos obtener al adicionar cantidades pequeñas de sustancias mediciones en baja escala, para poder llegar hasta fracciones de milímetros de desplazamientos; se desea realizar también hacer la medición de la densidad de algunas sustancias que no tienen un valor constante tales como el  $\text{TiO}_2$  (óxido de titanio), azul de metileno entre otras, ya que este valor depende del tipo y la marca de la sustancia.

### BIBLIOGRAFIA

- [1] J.C. Murphy and L. C. Aamodt, J. Appl. Phys., **51**, 4580, 1980.
- A. Salazar, A. Sánchez-Lavega, and J. Fernández, J. Appl. Phys. **65**, 4150, 1989.
- [2] G.Y. Chang, R.B. Givens, J.W. M. Spicer, R. Sander, and J.C. Murphy, Appl. Let. **63**, 645, 1993.
- [3] G.C. Wetzel, Jr., S.E. McBride, R.J. Wrack, and B. Van de Sander, Appl. Phys. Let. **55**, 528, 1989.
- [4] Steven R. Cook, Mark A. Hoff Bauer, and Jon B. Cross, Rev. Sci. Instrum. **67**, 1781, 1996.
- [5] G. Meyer and N.M. Amery, Appl. Phys. Let. **53**, 2400, 1988.
- [6] A. García-Valenzuela “Limits of different detections schemes used in the optical beam deflection method”, American Institute of Physics, 1997.
- [7] Ramírez Ibarra Angélica, Tesis en proceso para obtener el grado de Ingeniero Eléctrico-Electrónico “Densímetro de micropartículas basado en el método de deflexión haz láser usando un sensor óptico de desplazamientos nanometricos” “Sistema de posicionamiento nanométrico” Laboratorio de Óptica aplicada, Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, UNAM

**Participación de esta investigación en el V congreso de la óptica en la industria CENAM  
(Centro Nacional de Metrología).**

**Low scale displacement sensor (Unities multiples)**

Angélica Ramírez-Ibarra<sup>a\*</sup>, G. Eduardo Sandoval-Romero<sup>a</sup>, Augusto García-Valenzuela<sup>a</sup>,  
Salvador Palma-Vargas<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico,  
Universidad Nacional Autónoma de México, A. P. 70-186, D. F., 04510, México

**ABSTRACT**

Throughout all this paper we are going to analyze one application of the optical beam deflection method, the procedure for its development, as well as its ideal implementation to reach measurements of displacements that could be the most accurate and of the smaller scale possible, this condition is essential for the magnitude of the results to evaluate. We also give and introduction of the optical beam deflection method, it is characteristics and some of their latest applications as an auxiliary technique on research and commercial fields.

This present work will be analyzed the laser beam deflection technique, the procedure to apply, as well as its ideal implementation in order to obtain measures of displacements that can sense to the most exact and of smaller possible scale, obtaining results from microns, micrometers and until nanometers.

The importance of this work resides in that the technique although is simple and has easy implementation, the results that can hurtle they are very reliable; thanks to it, the laser beam method of deflection has been not only diffused in many fields of the science and the technology of the optics, but also in those where its application is innovating. This has ended up being a technique of huge utility on interdisciplinary use and has been used to measure physical parameters in a great variety of experiments.

**Keywords:** Optical beam deflection method, Cantilever, Density of Substances Method (Densimeter), Optical path.

***1. INTRODUCTION***

The laser beam deflection technique was introduced by Meyer and AMER [5], a cause of their simplicity and accuracy is extraordinary, since it has been applied properly in some systems, without caring the branch of the physics or the engineering that is, the method can simplify our



## Publicaciones desprendidas de éste trabajo

analyses considerably. For that reason, this technique is broadly used in the investigation field (laboratory) and the commercialization (in the atomic force microscope) [3]. The obtained results are equivalent to those given by more complex interferometers and its sensibility is so high that it can reach the atomic resolution. [4].

Besides these characteristics, it possess an extensive range of scales, it can be measured until fractions of angstroms in a very exact manner; it has been applied in technical thermal detection picture, in which the laser beam deflection produces an angle for thermal induction on means for monitoring its properties[1].

This technique has been used thoroughly, thanks to the use that has been given as pattern of reference detection; also, it has been used to check the existent physical inhomogeneities in a plane surface as their conductivity [2], to gauge a device of displacement or make the rotation angle measures for very sensitive torsion balances.

This method (OBDM) has several configurations, one of them (the one that we will used) consists on reflect a very defined laser from a plane surface (an optical path made up of three mirrors) projected toward a position sensor detector (PSD), which collect the total answer of the deflection system will be obtained, by means of a photo-detector, which will capture the magnitude of the voltage (brought by the laser beam) and the cantilever begins it's displacements, these will depend of the added substance that will be analyzed later.

For this particular case we will follow the next configuration: in an optic table of 50 cm. x 50 cm. approximately, we begin to examine the best distribution for the assembly, don't forget that with this method, when we maximize the distance between the detector and the cantilever, the system increases its sensibility, this is a fundamental condition and a decisive factor for the magnitude of the results that we will be calculating. [6].

In order to obtain a good answer of the system, it was indispensable to find a diode laser of coherent light at 670nm. wavelength, since it is necessary a source of light cuasi-monocromatic without distortions; it has also required that the laser beam provided by the laser diode was highly collimate with an extremely narrow width on the band of frequency; under these conditions the analysis in the system would be easier.

In the laboratory we have some lasers and diodes laser, with them we could implement the system with the previously mentioned characteristics, after have studied its behavior. The laser diode was easily placed a cause of it's small size, allows its assembly on an optic base, as well as the application of changes in the system without ended up affecting it considerably.

The laboratory also counts with photo-detectors, which are fundamental for the precise measured of the laser beam, so we implemented one by electronic designs that had been already made previously for other different experiments. The electronic components and a battery should be possible to mount it for implement into the system. By means of this circuit it would be possible to make the integral reception of the laser beam focusing it towards the exit of the photo-detector and to a multimeter that would measure the magnitude from milivolts until volts. In the figure no. 1 we can appreciate the configuration of our system.



Fig.1 and 2. In these figures the experimental arrangement is presented for the detection of the variation of the height of the level on the liquid that is inside a glass recipient, by means of the deflection of the laser beam that is directly focused toward the cantilever, on the cantilever it has been placed a mirror like initial part of the optic path of three mirrors, which directs the beam towards the entrance position of the photosensor.

## 2. CONFIGURATION OF THE DESIGN SYSTEM

The diode laser provides us of the beam which is directly focused towards the cantilever, and it's submerged in the piston of the liquid, by means of the variation of the level of the recipient because of the addition of the substance (the displacement of the cantilever will caused a variation of the height on the recipient, and it depends of the quantity in the liquid); on this piston it's placed a mirror like part of the optical path of three mirrors, which directs the laser beam towards the position sensor.

The following step was made to obtain measures of the volumes that are going to be used; the substance was put on the recipient, and the cantilever in a position that would measure the displacement, that would be subject to modifications. When we add small quantities of substance periodically, we would go registering the changes of weight by a scale (báscula), carrying out mixtures of substances, or, of one element only (water and other substance). It is important to know the way that the properties of the substances to study can modify the answer of the system, overall in the measure of the voltage. Because depending on this could make a relationship of the results. Also, the substance would leave adding in the recipient, in the surface of the liquid, (without causing waves) the float was placed where the cantilever is floating immerse in the substance and water.

The cantilever would have the function of remaining in the surface of the liquid at the same immersion level and it should not present lateral interferences caused by external agents either eolic or mechanical vibrations, it can only oscillate down or up due to the addition of the substance. This oscillation would strongly depend of the characteristics of the substance, as also of the quantity that left adding in the recipient, depending on the magnitude of these displacements, leaving from one to another measure, we would minimize the scale in that we were already been measuring outside in micrometers and going to nanometers. [7].

## Publicaciones desprendidas de éste trabajo

In our laboratory we wont had a scale (báscula) of a great resolution like the one needed in this experiment to get to sense the displacements in the necessary scale (micrometrical), we simply have one whose resolution is of 0.1 grs. Because of this, it was necessary to measure quantities but smaller as 0.05 or 0.025 grams should be made measures in separate way, to get in another scale with a higher resolution and with a better control of the samples to evaluate.

In case of the solids substances, as the titanium oxide is not a problem, when we add quantities smaller than 0.1 grams because we obtained samples from 0.05 and up to 0.002 grams. To work with liquid substances, such as water, blue of metileno (azul de metileno) and alcohol we use a syringe to achieve that in the surface of the liquid too many waves or bubbles exist altering the interval of measures. We begin to make the analysis as well as to obtain the necessary calculations to determine if the resolution will be enough, to be able to approach to the measure of micrometers. By means of this scale of resolution 0.1grs. We registered the changes of weight that will be adding during the whole experiment.

To obtain an enough sensibility of the device, the longitude of the optic path should be of at least of 60cm from the laser beam; we mean, starting from the diode laser and until the entrance of the detector (photo-sensor). In order to achieve a bigger sensibility we determine that the optical path was built by three mirrors achieving this way a bigger distance than 60cm., the first mirror was adjusted on the cantilever remaining on the cantilever, this last one would be fundamental to be able to measure the changes of height. The second mirror was on a post that would be mounted in a nut to be able to manipulate its direction, towards the third mirror and with regarding the beam.

This beam comes simultaneously from the first mirror to achieve the appropriated path with the third mirror, as well as to enlarge the longitude of the optical path. This last mirror is very important, since from him the laser beam would be refracted directly toward the detector. This third mirror was mounted on a piece designed with base in another one that has been design on our laboratory for a previous experiment, only carrying out on it some innovations like size and implementation easiness to achieve that it holds in a better way the third mirror whose function would be very important.

All these elements were firmly fix to the optic table so that they didn't suffer any movement or external interference while the quantity of substance was increasing in the recipient. If we won't be paying attention to this, it would be given this way to other unknown variables that could change our data and obtained results, or otherwise, more parameters would be out of control.

### ***3. MEASUREMENT METOD***

Our system is ready to take the measures when we had:

- ❖ The three mirrors line up.
- ❖ The substance which will be added on the recipient.
- ❖ The scale already with the weight of the recipient subtracted to measure only the weight of the water to add (this one empties in the recipient until arriving to their border).

- ❖ The substance to add in the necessary quantity depending on the number of samples.
- ❖ The multimeter connected in the exit of the photo-detector.
- ❖ The source to feed the laser.

We prepare the implementation of the equipment that we will need, as we had described, with the system ready, the multimeter was connected to a computer with a special program to carry out measures, since we require a very high accuracy also that would be carried out statistical processes easily in this program. After having aligned the three mirrors of the optical path, the laser beam was direct towards to the photo-detector, we observe that the reception range was very small, what we meant is that the area that the laser beam cover since it begins to enter in the detector until it finishes on the sensor. The above-mentioned is convenient for not managing too much data, since the variation oscillates between 10 or 12 samples depending on the substance, because the laser beam begins to enter in the reception area until it reaches its maximum point and it leaves the sensitive area of the sensor. In this phase can be detected displacements easily, of smaller scale than micrometers, adding a drop of water that it slides in the part but near to the recipient, for each drop an increase was obtained of almost 0.1 grams of weight, what is equal in displacement to  $3.9 \times 10^{-4}$  cm. what gives 0.0003978 m. what is equivalent in micrometers at  $397.823 \times 10^{-6}$ .

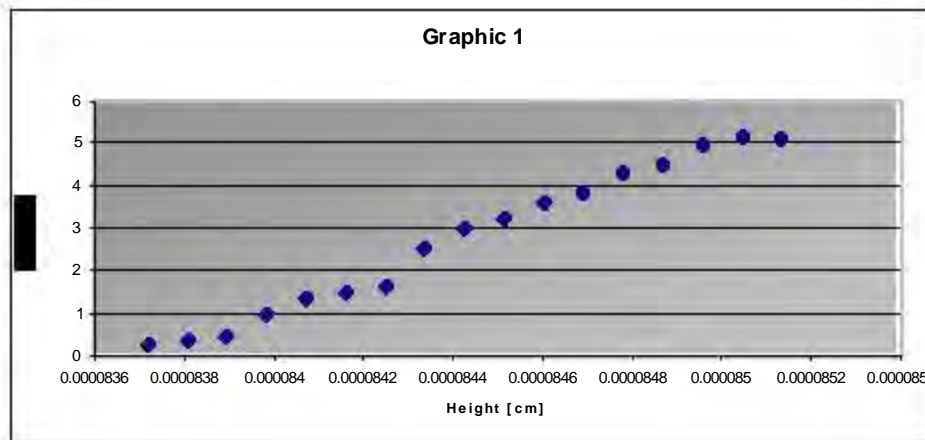


Fig.3. Measures of the first experiment

This result indicates us that, although the carried out measures were adapted, we still needed them to be smaller. The environmental conditions of the laboratory were always constant since the evaporation level is of .0007 Kg/hr, so it was not affecting our taking on the experiments.

The measures were taken with the same interval of time among them, also that the laboratory has a cold climate, that's why there were not alterations as a result of the climate. Making the analysis of this experiment, it was recommended to use other substances that could help us to the registration of smaller displacements of the system; in such a way, it was experienced with blue of metileno (azul de metileno) which is denser substance if we compare with water, analyzing this, it could be a decisive characteristic to arrive to displacements of smaller scale.

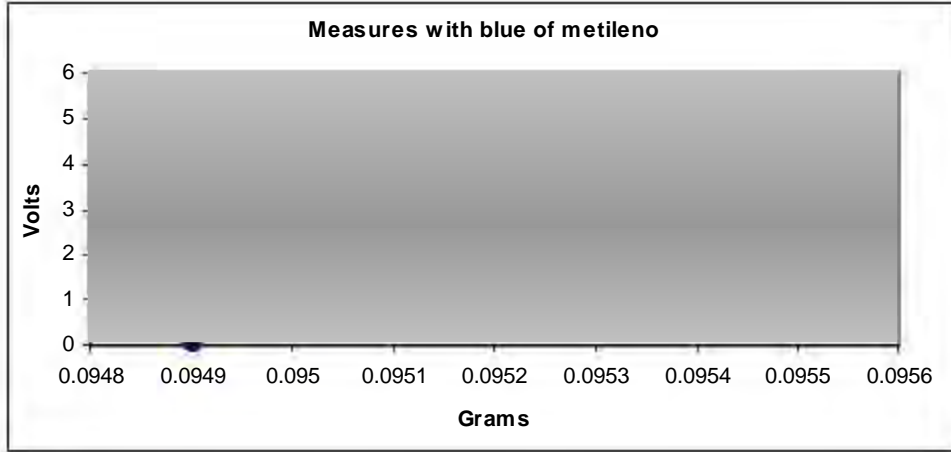


Fig. 4 Displacements with azul de metileno

However, in the moment of making the measures with the metileno blue, we find that very similar results were obtain that those that had already been achieved with water. In contrast the metileno blue is a substance more complex to carry out measures that with the water. After considering the parameters to modify to measure much smaller displacements, we carry out modifications to the whole system. The longitude of the optical path was replaced changing it from the 60 cm. that we had achieved, to approximately to 90 cm., the longitude of the cantilever was clipped until get the size of their mounted mirror on top, that was from 4 cm. to 1 cm aprox. with this we achieve that we had increased the sensibility passing from the order of  $397.823 \times 10^{-6}$  up to  $1.273 \times 10^{-6}$ .

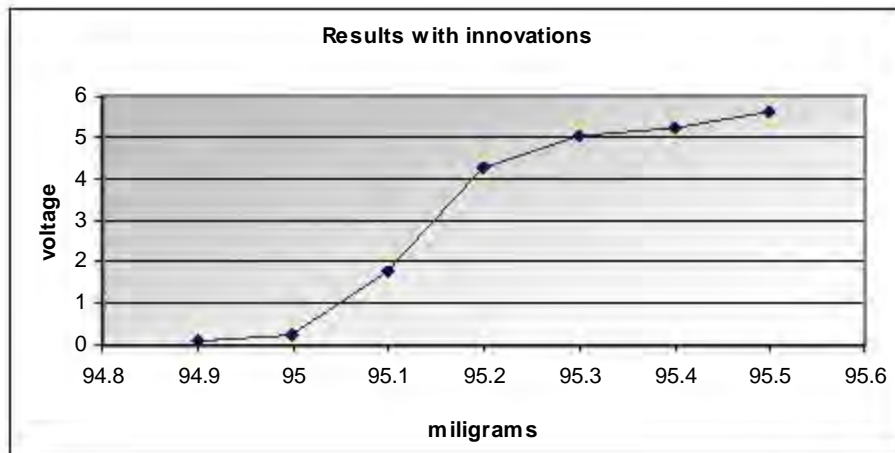


Fig. 5 Results with the system innovations.

With these changes we are able to increase the sensibility of our system almost twice, like we can see in the figure 5, but to achieve that, it was even smaller the push that receives the cantilever; that is why we investigate about which other changes could we made. I adapted the suggestion that it could measure displacements but no longer with liquid substances by a hundred percent, but rather we carried out mixtures, that is to say, we add volumes and we noticed the magnitude of the displacements that it could obtain.

So we began to mix with water and alcohol, but the obtained results were not encouraging as we show in the figure 5, since due to the high level of evaporation of the mixture displacements of  $1.9095 \times 10^{-3}$  cm were measured, that is to say 0.0019095 m.



Fig. 6 graph of results of water and alcohol

#### 4. EVALUATIONS OF RESULTS

We decide to use solid substances basing us in that each drop of water gave us a change of weight of 0.1 grams approximately; however, it was imprecise to measure exactly from a drop to another. With the titanium oxide we could go adding in smaller and accurate quantities and in this way to be able to measure displacements smaller than those which has been obtained. To achieve the above-mentioned, it was indispensable to get enough quantity of this powder and to pulverize it in a mortar with pistil, to reduce the spaces that could exist among his particles; consequently, we register the readings of the displacements given by water with titanium oxide. With the recipient almost until their maximum capacity, we made the laser beam enters in the area of reception of the photo-sensor by means of the addition of TiO<sub>2</sub> in 0.05grs. constantly and in this manner, that the laser beam was traveling the path, here in this point we have sensed milivolts in the detector until it reaches the maximum point of voltage (around 5 Volts).

The part where the system presents a bigger sensibility it is when it passes of the third or fourth substance addition, since the increase of titanium oxide is stabilized. In this part, the reading happens with less than a gram from 1.5 or 2 volts until almost 3.5 or 4, that is to say, it duplicates it, when its range goes since it begins to enter to the area of reception of 100 mv approximately until almost 4.5 to 5 volts, considering that we have intervals of almost constant measures of 60 seconds among each reading. After been making the experiment repeatedly, we notices that the results hurtled by the titanium oxide were better of those already obtained with the liquid substances, mainly because we could have more control on the quantity of added grams. With this oxide the smallest displacements were obtained that we have achieved, because with the TiO<sub>2</sub> it's possible to measure around 90nm in the data registered as smaller.

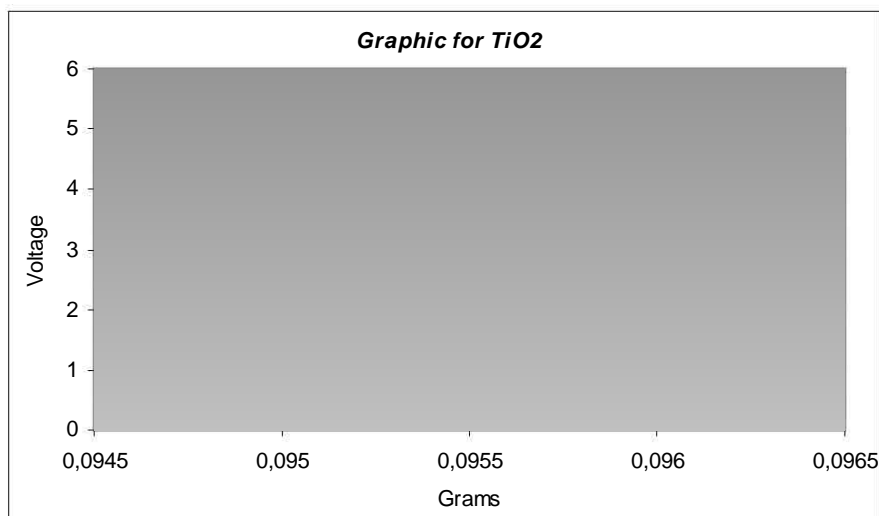


Fig.7 graphic for TiO<sub>2</sub>

Although the results gotten by the titanium oxide are satisfactory, we still want to decremented the scale of the measures of the displacements, because the objective is to measure the smallest possible magnitude, because of this, we decide to implement in the area of reception of the photo-sensor a knife to reduce the area of the laser beam capturing.

What happens to the effect knife is that the border that has begins to clip the laser beam with a fine and constant cut, because of a maximum reception of 4.5 to 5 volts with this has decreased the voltage until almost the half approximately. The maximum value gives of 2 volts and we can clip this way the borders and to eliminate part of the noise.

The laser beam along the whole optical path reaches a maximum loss from 0.5 to 1.5 volts like maximum approximately, this depends on the voltage that we give, the batteries for the circuit of amplification of the sensor, as well as of the measuring time among each experiment. Finally, the multimeter presents some fluctuations in the measures, in the case of the titanium oxide, adding to the recipient the 0.05 grs. of substance, the reading registers a value and while it settles to the bottom of the recipient, by means of the program readings that are oscillating but it also gives us a statistical chart with the value that more repeated (fashion) and this how we find the true value that the system gives us.

## 5. CONCLUSIONS

With this research we achieved two main objectives:

1. To manufacture a device that could carry out exact measures of displacements in nanometric scale with the purpose of ratify values of density of some substances (solids).
2. To maximize the operation of the device to obtain displacements of the smallest possible scale, as well as to consider the possible innovations to reach better magnitudes of displacements on low scale.

## Publicaciones desprendidas de éste trabajo

To reach the objective of reducing the scale we should make some changes in the system, as clipping the longitude of the cantilever, but it is very difficult to get a mirror of less than 1 cm of long, with a good level of transmittance and reflectance. One could also make the longitude of the biggest optic road, but the most advisable thing is to get a recipient of radio 15cm. since this way it could arrive to sense smaller displacements. Also, while grater than the one of the water density of the substance with those that will work, better and smaller displacements they will be gotten, due to the relationship between the mass and the volume corresponding to the obtaining of the density. Also, if we intend to work with finer powders that won't present many spaces among generating particles of bubbles in the measures, it will be possible to carry out displacements of much smaller scale.

Finally we establish another method to measure the density of the substances, a relationship settled down, among the voltage against the grams and between the reached height and the voltage, since directly this cannot settle down.

They have been carried out numerous experiments trying to establish a direct relationship between the voltage and the obtained mass so that this way to establish this relationship has been possible to calculate a relative density of 4.5 gr/cm<sup>3</sup> of the TiO<sub>2</sub>.

We suggest some improvements in order to get to a better magnitude of results, we can say that the smallest displacements that we have achieved of an efficient manner are of  $8.840811350 \times 10^{-8}$ , and this indicates us that we have sensed up to 88.41nm. approximately. The above-mentioned has been achieved with the TiO<sub>2</sub>. This has been the best substance in order to control in a better way, that which helps us to reduce the impact in the system and, therefore, the noise that can exist among the measures.

## REFERENCES

- [1] J.C. Murphy and L. C. Aamodt, J. Apple. Phy., **51**, 4580, 1980.
- A. Salazar, A. Sánchez-Lavega, and J. Fernández, J. Appl. Phys. **65**, 4150, 1989.
- [2] G.Y. Chang, R.B. Givens, J.W. M. Spicer, R. Sander, and J.C. Murphy, Apple. Let. **63**, 645, 1993.
- [3] G.C. Wetzal, Jr., S.E. McBride, R.J. Wrack, and B. Van de Sander, Apple. Phys. Let. **55**, 528, 1989.
- [4] Steven R. Cook, Mark A. Hoff Bauer, and Jon B. Cross, Rev. Sci. Instrum. **67**, 1781, 1996.
- [5] G. Meyer and N.M. Amery, Apple. Phys. Let. **53**, 2400, 1988.
- [6] A. García-Valenzuela "Limits of different detections schemes used in the optical beam deflection method", American Institute of Physics, 1997.
- [7] Ramírez Ibarra Angélica, Tesis en proceso para obtener el grado de Ingeniero Eléctrico-Electrónico "Densímetro de micropartículas basado en el método de deflexión haz láser usando un sensor óptico de desplazamientos nanometricos" "Sistema de posicionamiento nanométrico" Laboratorio de Óptica aplicada, Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, UNAM