



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
POSGRADO DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA MECÁNICA – MECATRÓNICA

**SISTEMA DE MEDICIÓN DEL DESPLAZAMIENTO DEL JUEGO DE VÁLVULAS DE UN  
COMPRESOR DE REFRIGERACIÓN DOMÉSTICA.**

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

PRESENTA  
ING. GARCÍA HERNÁNDEZ MAYTE

TUTORES PRINCIPALES  
DR. GABRIEL EDUARDO SANDOVAL ROMERO  
CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

DR. ALEJANDRO C. RAMÍREZ REIVICH  
FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. SEPTIEMBRE 2016

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Borja Ramírez Vicente  
Secretario: Dr. Ramírez Reivich Alejandro C.  
Vocal: Dr. Sandoval Romero Gabriel Eduardo  
1<sup>er.</sup> Suplente: Dra. Corona Lira María Del Pilar  
2<sup>do.</sup> Suplente: Dr. García Valenzuela Augusto

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO (Grupo de sensores) Y FACULTAD DE INGENIERÍA (CIA)

**TUTOR DE TESIS:**

Dr. Sandoval Romero Gabriel Eduardo

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized initials and a surname, written over a solid horizontal line.

-----  
**FIRMA**

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Nacional Autónoma de México por darme la posibilidad de realizar mis estudios de maestría.

Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado para mis estudios de maestría.

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

Al Dr. Gabriel Eduardo Sandoval Romero por su apoyo y enseñanzas.

Al Dr. Alejandro C. Ramírez Reivich por brindar ideas y sugerencias de mejora para éste trabajo de tesis.

A mis compañeros de laboratorio que me apoyaron para poder realizar este trabajo.

A mi mamá, a mi hermana, a mi sobrino y a mi novio por su amor, cuidado y apoyo incondicional.

# ÍNDICE GENERAL

---

RESUMEN .....	1
INTRODUCCIÓN .....	2
OBJETIVOS .....	4
<b>1. ESTADO DEL ARTE</b>	
1.1 Contexto del estudio de compresores y eficiencia energética. ....	5
1.1.1 Pérdidas energéticas en un compresor reciprocante. ....	7
1.2 Efecto del movimiento de la válvula en la eficiencia volumétrica. ....	8
1.2.1 Análisis de válvulas en compresores. ....	9
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	
2.1 Fundamentos teóricos de refrigeración. ....	13
2.1.1 Ciclo de refrigeración por compresión de vapor .....	13
2.1.2 Compresor reciprocante .....	15
2.1.3 Sistema de válvulas.....	16
2.2 Fundamentos teóricos de un sensor óptico.....	18
2.2.1 Configuración básica de un sensor óptico. ....	18
2.2.2 Componentes de un sensor óptico.....	18
2.2.3 Características de un sensor.....	27
<b>3. MODELO DEL DESPLAZAMIENTO DE LA VÁLVULA DE SUCCIÓN</b>	
3.1 Modelo .....	30
3.2 Simulación de la válvula .....	31
<b>4. DISEÑO DE INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN</b>	
4.1 Requerimientos .....	33
4.2 Infraestructura .....	34
4.3 Propuestas de experimentos de medición .....	34
4.3.1 Propuesta 1. Técnica de deflexión de haz láser .....	35
4.3.2 Propuesta 2. Interferómetro de Michelson.....	40
4.4 Construcción de los instrumentos ópticos.....	45

4.4.1	Montaje de un dispositivo de deflexión de haz láser. ....	45
4.4.2	Montaje de un interferómetro de Michelson. ....	47
4.4.3	Fuente de presión. ....	49
4.4.4	Detección de la señal de salida. ....	50

## 5. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA VÁLVULA DE SUCCIÓN

5.1	Análisis de la válvula de succión con un dispositivo de deflexión de haz óptico (OBD). ....	52
5.1.1	Primera prueba con dispositivo OBD. ....	52
5.1.2	Segunda prueba con dispositivo OBD. ....	63
5.2	Análisis de la válvula de succión con un interferómetro de Michelson. ....	75
5.3	Evaluación de resultados. ....	79
5.4	Evaluación de los instrumentos de medición. ....	84
5.4.1	Repetibilidad. ....	84
5.4.2	Sensibilidad. ....	86

## 6. CONCLUSIONES..... 89

## REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA..... 91

## Anexo 1. Ecuación de la elástica de una viga. .... 94

## Anexo 2. Código de programación en MATHEMATICA del modelo de la válvula tipo lengüeta. .... 97

## Anexo 3. Procedimiento para desensamblar un compresor. .... 99

## Anexo 4. Código de programación en LabVIEW para adquisición de datos..... 100

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

## 1. ESTADO DEL ARTE.

Figura 1.1. Prospectiva del consumo nacional de electrodomésticos 2014-2020. (SE, PRO MEXICO, 2014).....	5
Figura 1.2. Consumo doméstico de energía eléctrica [PROFECO-CONNUEE, 2014]. .....	6
Figura 1.3. Influencia del desplazamiento de la válvula de succión en la eficiencia del compresor (Nagata, 2010). .....	8

## 2. MARCO TEÓRICO.

Figura 2.1. Ciclo ideal de Refrigeración por compresión de vapor (Cengel, 2012). .....	13
Figura 2.2. Ciclo real de Refrigeración por compresión de vapor (Cengel, 2012). .....	15
Figura 2.3. Ciclo de compresión de un compresor reciprocante. ....	16
Figura 2.4 Sistema de válvulas (ROBLES, 2015). .....	17
Figura 2.5. Sistema típico de una válvula tipo lengüeta (Ding, 2014). .....	17
Figura 2.6. Diagrama básico de un sensor óptico .....	18
Figura 2.7. La divergencia de una onda electromagnética plana debido a la difracción.....	20
Figura 2.8. Ejemplos de sistemas ópticos que usan refracción (a) y reflexión (a, b, c). (Franden, 2010)	21
Figura 2.9. Esquema de refracción (a) y reflexión (b). .....	22
Figura 2.10. Un espejo plano. (a) Reflexión de ondas. (b) Reflexión de rayos, (Hecht, 2000). .....	23
Figura 2.11. Geometría de una lente plano-convexa (Shepeliov, 2003). .....	24
Figura 2.12. Cubo divisor de haz. ....	26
Figura 2.13. Curva de calibración: puede ser usada para el cálculo de sensibilidad.....	27

## 3. MODELADO DEL DESPLAZAMIENTO DE LA VÁLVULA DE SUCCIÓN.

Figura 3.1. Forma de una válvula tipo lengüeta y dimensiones de importancia para su modelado.....	30
Figura 3.2. Esquema de una válvula como viga en voladizo .....	30
Figura 3.3. Esquema del desplazamiento de la válvula. ....	31
Figura 3.4. Válvula de succión tipo lengüeta de un compresor reciprocante MABE. ....	32
Figura 3.5. Curva de desplazamiento de la válvula de succión en función de $\Delta P$ para incrementos de 1.33 [kPa] usando la ecuación 3.3.....	32

## 4. DISEÑO DE INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN.

Figura 4.1. Detección por deflexión de haz óptico .....	35
Figura 4.2. Configuración básica de OBD .....	35
Figura 4.3. Esquema del dispositivo de medición de desplazamiento, basado en la técnica OBD. ....	36
Figura 4.4. Relación trigonométrica del desplazamiento de la válvula y deflexión del haz láser. Sin restricción de movimiento con una fuente de presión alejada a una cierta distancia .....	37
Figura 4.5. Esquema del dispositivo de medición de desplazamiento, basado en la técnica OBD con restricción de movimiento. ....	38
Figura 4.6. Relación trigonométrica del desplazamiento de la válvula y deflexión del haz láser. Con restricción de movimiento y una fuente de presión cerca de la superficie de la lengüeta.....	39
Figura 4.7. Esquema de un interferómetro de Michelson en óptica de volumen. ....	41
Figura 4.8. Esquema del dispositivo de medición basado en un interferómetro de Michelson.....	42
Figura 4.9. Sistema mecánico de posicionamiento para la fuente de luz láser y válvula de succión tipo lengüeta de un dispositivo de deflexión de haz láser. ....	45
Figura 4.10. Esquema del sistema mecánico de posicionamiento para un IM.....	47

Figura 4.11. Diagrama esquemático de la fuente de presión acoplada a la válvula tipo lengüeta de un compresor recíprocante .....	49
Figura 4.12. Esquema de detección de la señal de salida para los dispositivos de medición de desplazamiento. ....	51

## 5. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA VÁLVULA DE SUCCIÓN.

Figura 5.1. Montaje experimental del dispositivo OBD para medición de desplazamiento. ....	53
Figura 5.2. Relación del desplazamiento de la válvula de succión para libre movimiento. ....	54
Figura 5.3. Respuesta del dispositivo OBD ante incrementos de presión ( $\Delta P=0.4$ kPa) para determinar el desplazamiento X de la válvula de succión. ....	56
Figura 5.4. Sistema para restringir el movimiento de la válvula tipo lengüeta. ....	57
Figura 5.5. Relación del desplazamiento de la válvula de succión por restricción de movimiento. ....	58
Figura 5.6. Respuesta del dispositivo OBD ante incrementos de presión ( $\Delta P=0.9$ kPa) para determinar el desplazamiento de la válvula de succión por movimiento restringido. ....	59
Figura 5.7. Respuesta del dispositivo OBD ante incrementos de presión ( $\Delta P=1.33$ kPa) para determinar el desplazamiento de la válvula de succión de movimiento restringido. ....	62
Figura 5.8 Válvula con superficie reflejante .....	63
Figura 5.9. Montaje experimental del dispositivo OBD para medición de desplazamiento X, apoyado de una superficie reflejante (espejo). ....	64
Figura 5.10. Alargamiento del spot (m) debido a una frecuencia de resonancia de la válvula de succión. ....	65
Figura 5.11. Señal analógica en función del tiempo. ....	65
Figura 5.12. Respuesta del dispositivo OBD ante incrementos de presión ( $\Delta P=1.21$ kPa) para determinar el desplazamiento de la válvula de succión de movimiento restringido hasta $X_{m\acute{a}x}$ . ....	67
Figura 5.13. Respuesta del dispositivo OBD ante incrementos de presión ( $\Delta P=1.33$ kPa) para determinar el desplazamiento de la válvula de succión de movimiento restringido hasta $2.67$ [kPa]. ....	68
Figura 5.14. Señal que describe la frecuencia natural de la válvula de succión. ....	70
Figura 5.15. Comportamiento de la señal de un fotodetector variando la distancia L. ....	72
Figura 5.16. Montaje experimental del interferómetro de Michelson en óptica de volumen, para medición de desplazamiento. ....	75
Figura 5.17. Relación del desplazamiento de la válvula para un interferómetro de Michelson. ....	76
Figura 5.18. Respuesta del interferómetro de Michelson para determinar el desplazamiento de la válvula de succión. ....	77
Figura 5.19. Gráfica comparativa entre valores experimentales y valores teóricos del desplazamiento X de una válvula de succión tipo lengüeta. ....	79
Figura 5.20. Gráfica comparativa entre valores experimentales y valores teóricos del desplazamiento X de una válvula de succión tipo lengüeta, para presiones menores a $2.67$ [kPa]. ....	81
Figura 5.21. Gráfica comparativa entre valores experimentales y valores teóricos del desplazamiento X de una válvula de succión tipo lengüeta, para valores de presión $P<0.267$ y $P>0.267$ [kPa]. ....	82
Figura 5.22. Gráfica comparativa entre valores experimentales de un interferómetro de Michelson y valores teóricos del desplazamiento X de una válvula de succión tipo lengüeta, ....	83
Figura 5.23. Respuesta del dispositivo OBD para determinar la repetibilidad del sistema. ....	84
Figura 5.24. Respuesta del interferómetro de Michelson para determinar la repetibilidad del sistema. ....	85
Figura 5.25. Respuesta del dispositivo OBD a diferentes valores de presión. ....	86
Figura 5.26. Recta de calibración de la respuesta del dispositivo OBD para incrementos de presión $1.21$ kPa. ....	87
Figura 5.27. Recta de calibración de la respuesta del interferómetro de Michelson .....	87

## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1.1. Líneas de investigación en el funcionamiento del sistema de válvulas en compresores. ....	9
Tabla 4.1. Especificaciones del sistema de medición.....	33
Tabla 4.2. Características del sensor de presión modelo MPX2010DP. ....	50
Tabla 4.3. Especificaciones del fotodiodo FSD100.....	51
Tabla 5.1. Valores de presión y longitud (d) debidos al movimiento alternativo de la válvula. ....	55
Tabla 5.2. Incertidumbre relativa y porcentual de la longitud (d), para movimiento alternativo de la válvula.....	55
Tabla 5.3. Valores de presión y desplazamiento X, para movimiento libre de la válvula. ....	56
Tabla 5.4. Valores de longitud (d) con su incertidumbre relativa y porcentual, por movimiento restringido de la válvula. ....	58
Tabla 5.5. Valores de presión y desplazamiento X, por movimiento restringido de la válvula de succión. ....	59
Tabla 5.6. Valores de longitud (d) con su incertidumbre relativa y porcentual, por movimiento restringido de la válvula y acondicionamiento de la fuente de presión. ....	60
Tabla 5.7. Valores de presión y desplazamiento X por movimiento restringido de la válvula y acondicionamiento de la fuente de presión. ....	61
Tabla 5.8. Valores de presión y desplazamiento X, por movimiento restringido de la válvula de succión, con uso de una superficie reflejante sobre la válvula. ....	66
Tabla 5.9. Valores de presión y desplazamiento X, por movimiento restringido de la válvula de succión, con incrementos de presión de 0.27 [kPa]. ....	68
Tabla 5.10. Valores de la longitud (d) por la prueba de resonancia de la válvula de succión.....	69
Tabla 5.11. Valores de frecuencia de resonancia para una presión promedio de 32.78 [kPa] y un desplazamiento máximo de $1.55 \times 10^{-3}$ [m]. ....	71
Tabla 5.12. Valores de $X_{\min}$ para una presión promedio de 0.262 [kPa]. ....	74
Tabla 5.13. Valores del desplazamiento X de lengüeta determinados por un IM. ....	77
Tabla 5.14. Valores de diferencia de medición porcentual para evaluar del modelo matemático.....	80
Tabla 5.15. Valores de error relativo porcentual para evaluar del modelo matemático para presiones menores a 2.67 [kPa]. ....	81
Tabla 5.16. Valores de error relativo para evaluar del modelo matemático mediante un interferómetro de Michelson. ....	83

# RESUMEN

---

La medición de la apertura y cierre de las válvulas de succión y descarga, en un compresor recíprocante de refrigeración doméstica, permite obtener información que puede ser empleada para determinar la eficiencia volumétrica del sistema de compresión. Una manera de medir el desplazamiento de una válvula es por técnicas de medición óptica. En este trabajo se diseñan e implementan dos sistemas de medición y se realiza una comparación de la sensibilidad máxima, entre un dispositivo basado en el interferómetro de Michelson y un dispositivo por deflexión de haz óptico, para registrar mínimos y máximos desplazamientos. Los dispositivos son comparados por medio del registro del desplazamiento mínimo y máximo que realiza la lengüeta de una válvula de succión de un compresor recíprocante. Esta lengüeta puede reflejar una señal luminosa que incide en ella, a la cual se le puede medir, con ayuda de un interferómetro de Michelson, la intensidad y relacionarla con el desplazamiento provocado por una fuente de presión; por otro lado, utilizando un dispositivo de deflexión de haz óptico, también es posible determinar el desplazamiento. Este último dispositivo puede medir distancias mayores de las que puede medir el interferómetro de Michelson.

El trabajo se encuentra dividido en cinco capítulos los cuales se desarrollan de la siguiente manera:

En la primera sección del documento se da a conocer la importancia del análisis del sistema de válvulas en compresores recíprocantes tomando como base el estado del arte hecho para compresores y su relación con la eficiencia energética en refrigeración doméstica. En la segunda sección, se presentan los fundamentos teóricos que permiten describir el principio de funcionamiento del sensor de desplazamiento que fue diseñado e implementado para este trabajo de tesis.

En cuanto a la tercera sección, se describe el modelado de la válvula de succión considerada como una viga en voladizo. Se presenta la ecuación que caracteriza su desplazamiento, de tal forma, que es posible hacer un análisis comparativo entre datos teóricos y datos experimentales.

La cuarta sección comprende el diseño de los sistemas de medición para caracterizar el desplazamiento de una válvula de succión tipo lengüeta.

En la quinta sección se describen cada una de los protocolos de pruebas que se realizaron con los instrumentos diseñados en el capítulo anterior, así como los resultados generados para describir y caracterizar el comportamiento de la válvula de succión de un compresor recíprocante.

Finalmente, se presentan las conclusiones a partir de los resultados obtenidos al finalizar el trabajo de experimentación e investigación.

# INTRODUCCIÓN

---

En la refrigeración doméstica el compresor es el que aporta la potencia de entrada necesaria para aumentar la presión y temperatura del refrigerante. Entender el comportamiento de un compresor y sus componentes, permite predecir el funcionamiento e identificar posibles fallas en el diseño del sistema de compresión sin necesidad de construir prototipos. Entre los componentes principales de un compresor se encuentra el sistema de válvulas, que tiene como función el paso del gas refrigerante durante la operación del compresor.

La apertura y cierre del sistema de válvulas (válvulas de succión y descarga) es fundamental para determinar la eficiencia volumétrica de un compresor reciprocante. Las válvulas de descarga y succión abren debido a la diferencia de presión y efectos negativos, como el retorno de flujo, que puede producir disminución de la eficiencia del compresor. Entender el consumo de energía en el ciclo de refrigeración y sus pérdidas pueden contribuir a obtener mejores compresores. Analizando el desplazamiento del sistema de válvulas es posible reducir el escape del gas refrigerante a través de las válvulas de succión y descarga, lo que llevaría a incrementar la eficiencia volumétrica del sistema de compresión. [1]

Algunos métodos para comprender y analizar el sistema de válvulas en un compresor, estudian los fenómenos físicos de la válvula de descarga debido a la fuerza adhesiva y la eficiencia volumétrica bajo condiciones de funcionamiento del compresor, verificando que la eficiencia del compresor puede ser mejorada por la disminución de la fuerza adhesiva entre el refrigerante y la válvula de succión [2].

En otros trabajos, se realiza un análisis experimental de los efectos de la presión de descarga y las RPM (revoluciones por minuto) sobre las pérdidas en las válvulas de succión y descarga de un compresor reciprocante, mediante la medición de las variaciones de las áreas de los diagramas P-V (presión-volumen) que representan dichas pérdidas [3]. El análisis del comportamiento dinámico del juego de válvulas, se hace con mediciones que involucran el desplazamiento del compresor y la posición de su motor [4].

Las líneas de investigación vistas hasta ahora, ofrecen alternativas de solución a nuestra problemática desde el punto termodinámico y fluidos, que han sido importantes para comprender el funcionamiento y la importancia del juego de válvulas en el incremento de eficiencia volumétrica. Sin embargo, un complemento a dichas aportaciones es involucrar mediciones por métodos ópticos, que pueden hacer mediciones en el interior de mecanismos sumergidos en fluidos y en ambientes hostiles con alta temperatura y presión.

Para ejemplificar lo anterior, un método de medición cuasi invasivo para el movimiento del juego de válvulas en compresores herméticos para refrigeradores domésticos, tiene como objetivo principal mejorar la comodidad vibro acústico. Su metodología se basa en usar un

vibrómetro láser Doppler y sus pruebas requieren de un tipo especial de compresor equipado con ventanas transparentes para el acceso óptico para las válvulas. Se analiza los efectos sobre las señales ópticas tomando en cuenta efectos ambientales que afectan a la calidad de la señal, incertidumbre de medición, efectos de ángulo de incidencia del haz y rugosidad de la superficie de la válvula. En tales condiciones, el movimiento de la válvula se mide correctamente, como si las ventanas y gotas de aceite no estuvieran presentes. El método de medición proporciona información sin modificaciones considerables al compresor en su geometría y de sus volúmenes característicos, por lo tanto es mucho menos invasiva que cualquier otro método de medición [5]. Como segundo ejemplo, una metodología fue creada para medir el diagrama P-V de un compresor recíprocante de refrigeración sincronizado con el funcionamiento de su sistema de válvulas. La posición angular del cigüeñal se utilizó como referencia para la adquisición de datos, lo que permite adquirir cada 0,1 grados de desplazamiento angular del cigüeñal. Para medir el desplazamiento del juego de válvulas se utilizó un par de sensores de fibra óptica, debido a las características ópticas de los sensores se consideraron durante la calibración: la textura de la superficie, la presencia de luz sobre la punta y la flexión de la válvula. Se utilizaron bloques de calibración y micrómetro de profundidad para calibrar el desplazamiento de las válvulas [1]. De dicho análisis, se caracterizó el desplazamiento del sistema de válvulas y usando el diagrama PV fue posible conseguir las pérdidas en la válvula de succión y descarga.

Con lo anterior en mente, se pretende generar conocimiento en el sistema de compresión de los electrodomésticos. Lo cual se logra con el diseño y desarrollo de un sistema de medición de desplazamiento aplicado a una válvula de un compresor de refrigeración. La idea surge por la necesidad que tiene la empresa Mabe por conocer el comportamiento del sistema de válvulas y sus debilidades, para implementar mejoras en un futuro. Cabe mencionar que este trabajo complementa el modelo matemático de desplazamiento de una válvula de succión, realizado por el Mtro. Ulises Robles Ordoñez del Instituto Tecnológico de Celaya, cuyo modelo surge del tema de tesis "Incremento en la eficiencia energética de compresores mediante el rediseño del sistema de válvulas" [6,7].

# OBJETIVOS

---

## Objetivo general

Desarrollar un sistema óptico de medición de desplazamiento, para la caracterización del sistema de válvulas de un compresor de refrigeración doméstica, así como establecer las ventajas e importancia de este sistema de medición como método de evaluación.

## Objetivos particulares.

- Caracterizar el desplazamiento de la válvula de succión de un compresor recíprocante Mabe.
- Desarrollar un dispositivo que utiliza la deflexión del haz óptico como método de medición.
- Desarrollar un dispositivo de medición en base del Interferómetro de Michelson.
- Comparar los resultados de los dos dispositivos anteriores instrumentados con el modelo matemático del sistema de válvulas.
- Determinar la frecuencia de resonancia de la válvula de succión.

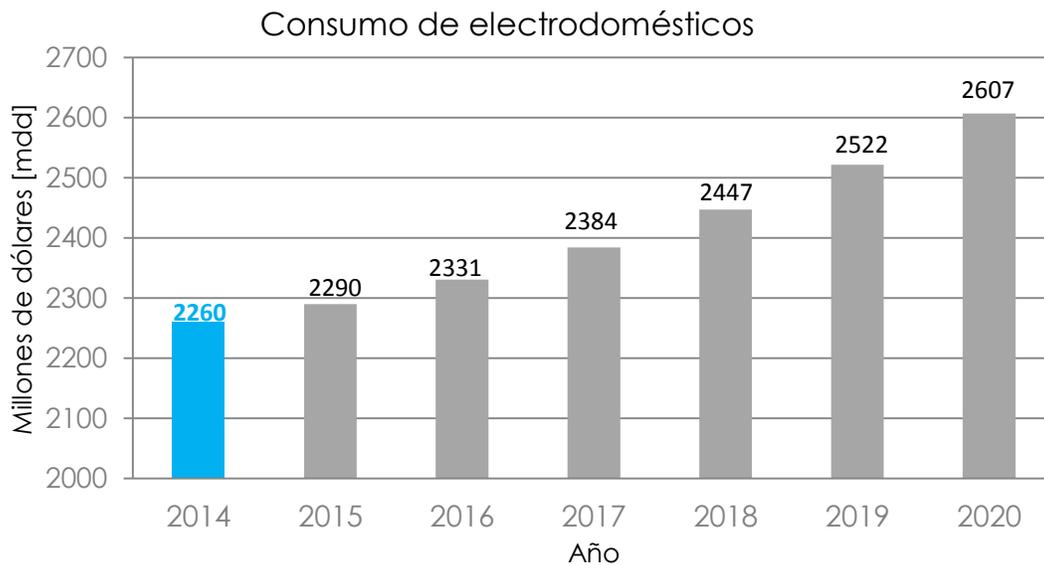
# 1. Estado del arte

*En este capítulo se aborda la importancia del análisis del sistema de válvulas en compresores recíprocos tomando como base el estado del arte hecho para compresores y su relación con la eficiencia energética en refrigeración doméstica.*

## 1.1 Contexto del estudio de compresores y eficiencia energética.

Actualmente, el consumo de aparatos electrodomésticos instalados en los hogares muestra un incremento con respecto a los últimos años, resultando un aumento del consumo y demanda eléctrica.

Se estima que el consumo nacional de electrónicos en 2014 fue de 2260 millones de dólares (mdd) y se pronostica una tasa media de crecimiento anual (TMCA) real de 2.4% en el periodo 2014-2020, [8,9].



**Figura 1.1. Prospectiva del consumo nacional de electrodomésticos 2014-2020. (SE, PRO MEXICO, 2014)**

Lo anterior ha provocado establecer nuevos requerimientos energéticos mediante el desarrollo y aplicación de normas enfocadas a reducir el consumo de energía en electrodomésticos, como los refrigeradores.

Las normas de desempeño energético mínimo (MEPS, por sus siglas en inglés) en México para refrigeradores domésticos han seguido una estrategia de homologación con el

programa administrado por el Departamento de Energía (DOE, por sus siglas en inglés) de EE.UU, que está vigente desde 1995 [10].

Como el sector doméstico es el que concierne al presente trabajo, debe analizarse la distribución del consumo de energía dentro de una vivienda. De acuerdo con la Comisión para el Uso Eficiente de la Energía CONUEE [11,12], el uso de energía promedio en una casa se divide como se muestra en la figura 1.2.

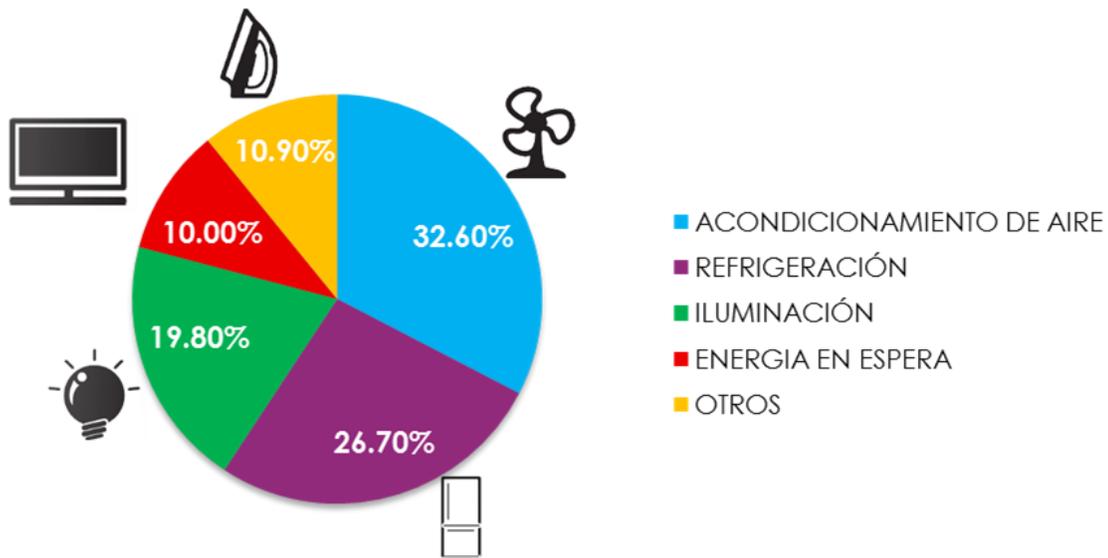


Figura 1.2. Consumo doméstico de energía eléctrica [PROFECO-CONNUEE, 2014].

Como se aprecia en la figura 1.2, los refrigeradores representa el 26.7% del consumo eléctrico residencial, debido a que son aparatos que están permanentemente conectados y tienen un alto nivel de uso en las viviendas. Aunque el porcentaje sea alto para la refrigeración de alimentos, esta energía no se aprovecha totalmente para producir el trabajo de enfriamiento.

En septiembre de 2010, la DOE publicó una notificación de propuesta regulatoria para refrigeradores y congeladores domésticos que entró en vigor en enero del 2014. Para satisfacer los nuevos requerimientos energéticos se ha optado por mejorar la eficiencia del sistema de refrigeración, cuya eficiencia está relacionada con el desempeño del compresor debido que con este valor es posible conocer que tan eficiente es un sistema para extraer calor de un medio cerrado utilizando o aprovechando la energía que se le suministra al compresor.

### 1.1.1 Pérdidas energéticas en un compresor reciprocante.

Las principales pérdidas de energía que tienen influencia en la eficiencia de un compresor hermético reciprocante de refrigeración son:

- Pérdidas termodinámicas: Se relacionan con el flujo de gas refrigerante dentro del compresor. En el sistema de succión se dan pérdidas por sobrecalentamiento y pérdidas de flujo en la mufla de succión, así como pérdidas en la válvula de succión. En el sistema de descarga se presentan pérdidas en la válvula y mufla de descarga.
- Pérdidas mecánicas: Se relacionan con el mecanismo que transforma el movimiento rotatorio del motor a movimiento lineal del pistón. La principal pérdida es por fricción en los componentes del mecanismo.
- Pérdidas eléctricas: Se relacionan con el motor eléctrico y el dispositivo de arranque. Las principales pérdidas tienen relación por los materiales que componen el motor y el dispositivo electrónico utilizado en el arranque del compresor.

De acuerdo a investigaciones realizadas en torno al desempeño de los compresores reciprocantes, las pérdidas termodinámicas representan un mayor porcentaje en cuanto a pérdidas mecánicas y eléctricas [13].

Al ser el compresor el foco de oportunidad para la disminución del consumo energético, se puede tomar como área de oportunidad el estudio de pérdidas termodinámicas atacando el sistema de válvulas para obtener mejoras en la eficiencia energética.

En el sistema compresor, una de sus principales pérdidas termodinámicas se lleva durante la succión, expansión y descarga del fluido, siendo en parte causadas por el sistema de válvulas, por lo que un análisis del funcionamiento del sistema de válvulas permitirá comprender y mejorar parámetros de diseño de una válvula y conseguir un impacto en la mejora de un compresor reciprocante.

## 1.2 Efecto del movimiento de la válvula en la eficiencia volumétrica.

El funcionamiento dinámico de la válvula de succión tiene una influencia significativa en la circulación del gas refrigerante en el ciclo de refrigeración. De acuerdo con investigaciones en torno a la eficiencia volumétrica se ha encontrado a ésta afectada por el desplazamiento de la válvula de succión.

El desplazamiento de la válvula de succión cambia con la velocidad de rotación del motor –compresor y este cambio en el movimiento de la válvula afecta la eficiencia volumétrica. En principio, el gas refrigerante puede fluir en el cilindro desde el momento que se abre la válvula de succión hasta el momento que el pistón llega al punto muerto inferior de su carrera. Si la válvula de succión no cierra completamente cuando el pistón pasa por el punto muerto inferior, el gas refrigerante fluye de regreso desde el cilindro a la mufla de succión. En otras palabras, es mejor cerrar completamente la válvula de succión antes que el pistón llegue al punto muerto inferior de su carrera para una mayor eficiencia volumétrica. Este cierre tardío de la válvula de succión que reduce la eficiencia volumétrica es causado por la relación entre el período de rotación del compresor y el periodo de vibración de la válvula de succión.

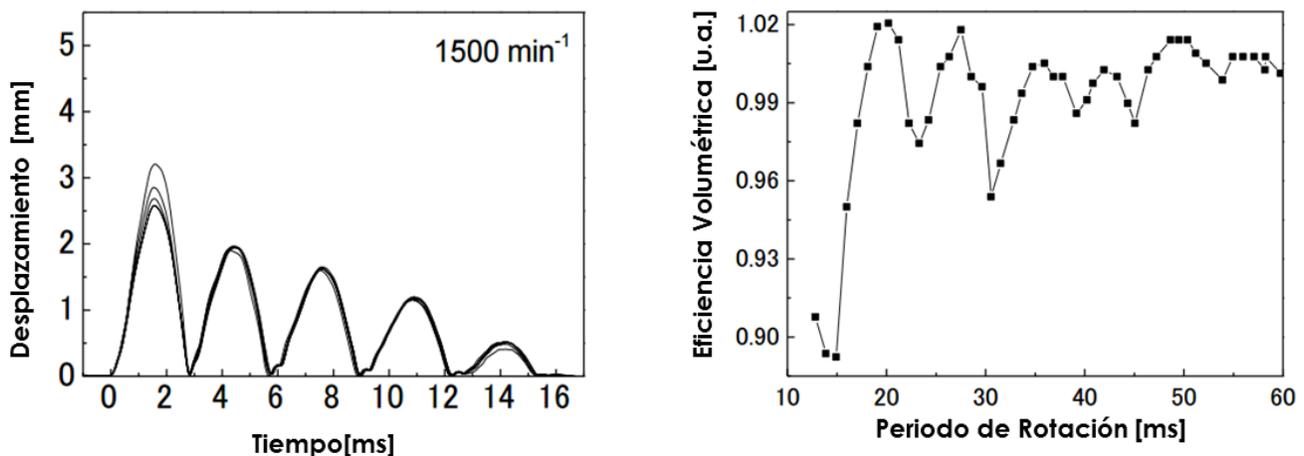


Figura 1.3. Influencia del desplazamiento de la válvula de succión en la eficiencia del compresor (Nagata, 2010).

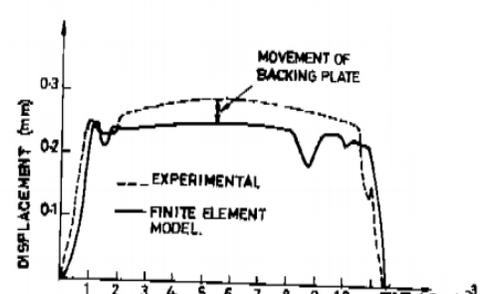
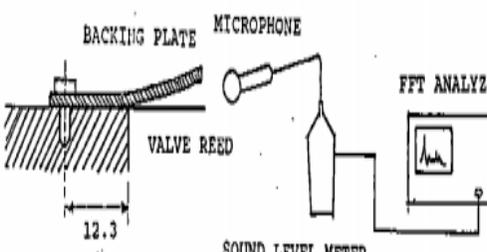
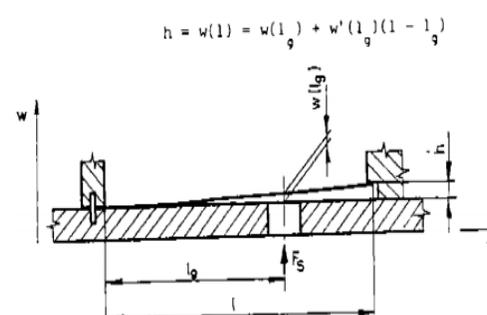
Los resultados del estudio que relaciona el movimiento de la válvula de succión y la eficiencia volumétrica, se resumen enseguida [14]:

- El desplazamiento máximo de la válvula de succión y el número de vibraciones disminuye a medida que aumenta la velocidad de rotación del compresor.
- El desplazamiento de la válvula a baja velocidad de rotación varía debido a la fuerza del aceite lubricante.
- El número de vibraciones de la válvula causa la fluctuación periódica de la eficiencia volumétrica con respecto a la velocidad de rotación del compresor. Se observa en la figura 1.3.

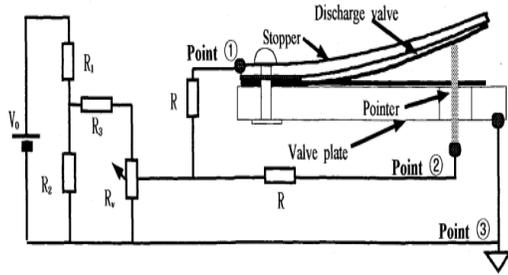
## 1.2.1 Análisis de válvulas en compresores.

El sistema de válvulas en un compresor, está siendo estudiado y perfeccionado por diversos centros de investigación y universidades alrededor del mundo. Enseguida se presentan algunas de las más importantes contribuciones en el análisis y medición del desplazamiento del sistema de válvulas en compresores. Dichos aportes se concentran en la tabla 1.1 con el fin de resaltar sus principales características.

Tabla 1.1. Líneas de investigación en el funcionamiento del sistema de válvulas en compresores.

Imagen	Datos	Características
<p>1.-</p> 	<p>Análisis de elemento finito en una válvula tipo lengüeta de un compresor recíprocante.[15]</p> <p>S. Papastergiou J. Brown</p> <p>Universidad de Strathclyde, U.K, 1982.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Predicción del <b>desplazamiento del sistema de válvulas por análisis de elemento finito.</b></li> <li>• Modificación del sistema compresor para la instalación de transductores de presión y desplazamiento.</li> <li>• Se obtiene una relación aceptable entre los datos teóricos y medidos para una válvula de descarga tipo lengüeta.</li> </ul>
<p>2.-</p> 	<p>Efecto de la placa de restricción sobre la fatiga de la válvula de descarga tipo lengüeta. [16]</p> <p>J. S. Ho R. Y. Chen</p> <p>Taiwan, R.o.c. 1992.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medición de frecuencia natural de una válvula de descarga con dos diferentes tipos de placa de restricción.</li> <li>• Solución por elemento finito ANSYS de la fatiga y desplazamiento de la válvula de descarga</li> <li>• <b>El estudio demuestra que la mala manufactura de la placa de restricción puede ocasionar la fractura de la válvula.</b></li> </ul>
<p>3.-</p> $h = w(l) = w(l_g) + w'(l_g)(l - l_g)$ 	<p>Desarrollo de un modelo matemático para válvulas de compresor recíprocante y su aplicación para válvulas de tipo lengüeta.[17]</p> <p>M. Luszczyccki P. Cyklis J. Zelasko</p> <p>Universidad tecnológica de Cracow, Polonia, 1992.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El modelo matemático es adaptable para describir el funcionamiento de diferentes tipos de válvulas.</li> <li>• Se valida el modelo matemático con <b>pruebas experimentales que monitorean el movimiento de la válvula mediante un transductor capacitivo y la presión en el cilindro.</b> Con dos diferentes compresores de refrigeración.</li> </ul>

4.-



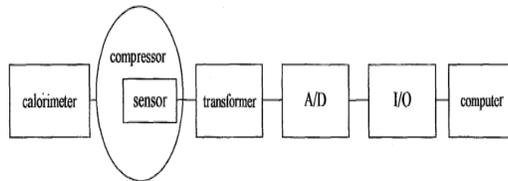
Diseño óptimo de una válvula para un compresor recíprocante.[18]

J. M. Joo, S. K. Oh ,G. K. Kim , S. H. Kim

Samsung Electronics  
Corea, 2000

- Se diseñó una válvula de descarga tipo lengüeta con una placa que limita su movimiento.
- **El diseño es validado y se concluye que se optimizó el movimiento de la válvula para disminuir pérdidas por compresión.**
- Se crea un sistema para medir la fuerza adhesiva que actúa sobre la válvula.

5.-



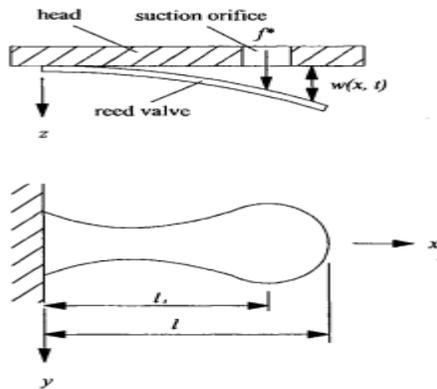
Análisis de parámetros de un compresor recíprocante con refrigerante R134a.[19]

H. Li , R. Wang

Universidad Politécnica de Beijing, China, 2000.

- Desarrollo de un sistema de monitoreo para examinar las condiciones de trabajo de un compresor entre ellas: presión, temperatura, desplazamiento de la válvula, velocidad, punto muerto, etc.
- **Se concluye que para mejorar el rendimiento del compresor es necesario aumentar la eficiencia del motor, estructura de la válvula, entre otros.**

6.-



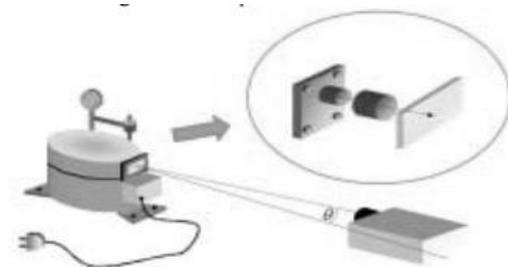
Modelado no lineal del desplazamiento de una válvula tipo lengüeta. [20]

Hong-Cheng Sheu  
Yie-Zu Robert Hu

Instituto de Investigación de Tecnología Industrial, Taiwan, 2000.

- **Se modela una válvula de succión como una viga en voladizo considerando su geometría.**
- Los resultados se obtuvieron tomando parámetros de diseño de un compresor recíprocante con R134a.
- Como resultados de simulación se obtuvieron graficas del desplazamiento de la válvula para diferentes espesores.

7.-



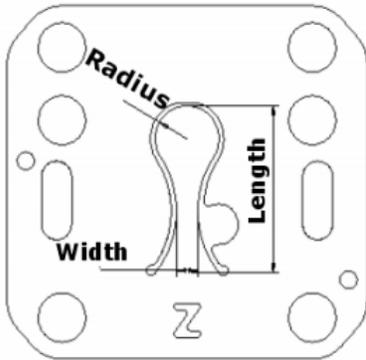
Medición del desplazamiento de una válvula mediante técnicas ópticas. [21]

G. Buligan  
N. Paone

Electrolux Compressor, Italia, 2002

- El instrumento óptico de medición es un vibrómetro láser Doppler.
- **Se utiliza un compresor equipado con una ventana transparente para el acceso óptico hacia el sistema de válvulas.**
- El método de medición proporciona información sin modificaciones a la geometría del compresor y a sus volúmenes.

8.-



Análisis dinámico de la válvula de un compresor hermético recíprocante. [22]

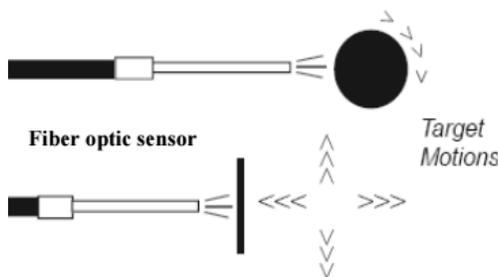
Junghyoun Kim  
Semyung Wang

Instituto de ciencia y tecnología Gwangju, Corea, 2006.

- Se consiguió experimentalmente el comportamiento dinámico del sistema de válvulas, el experimento se realizó utilizando una galga extensiométrica, un encoder y un sensor de presión. **Como resultado del experimento se obtuvo el desplazamiento de la válvula de succión y descarga, así como datos de presión-volumen.**

- Para complementar los datos experimentales se realiza un análisis por elemento finito con la finalidad de rediseñar la válvula de succión.

9.-



Uso del diagrama presión-volumen en conjunto con el desplazamiento de válvulas para incrementar la eficiencia en el compresor recíprocante. [23]

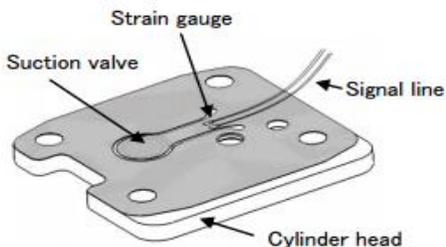
Marcelo Real.  
Eduardo Gomes.

Compañía Tecumseh, Brasil, 2010.

- El experimento se realizó utilizando un **sensor de desplazamiento en fibra óptica**, un encoder y un sensor de desplazamiento angular. **Como resultado del experimento se obtuvo el desplazamiento de la válvula de succión y descarga, así como datos de presión-volumen.**

- Se obtuvo un diagrama PV con el cual fue posible obtener el trabajo ejercido en el gas durante el ciclo de compresión, y las pérdidas en la válvula de succión y descarga debidas al retorno de flujo.

10.-

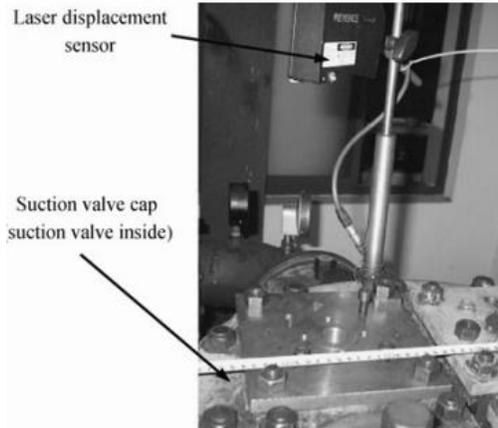


Análisis del funcionamiento dinámico de una válvula de succión usando una galga extensiométrica. [24]

Shuhei Nagata  
Tutomu Nozaki  
Hitachi, Japón, 2010

- Se caracterizó el desplazamiento de una válvula de succión con una galga extensiométrica.
- Se concluye, **el número de vibraciones de la válvula causa la fluctuación periódica de la eficiencia volumétrica** con respecto a la velocidad de rotación del compresor.

11.-



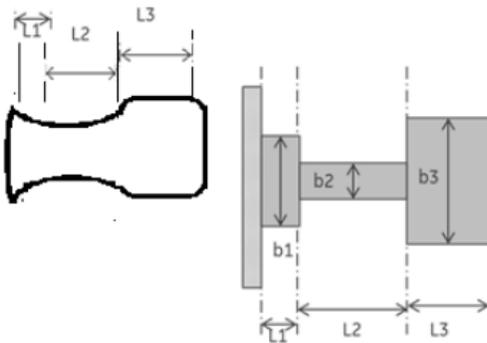
Modelo del ciclo térmico y el desplazamiento de la válvula.[25]

JIN Jiangming  
HONG Weirong

Universidad de tecnología Zhejiang,  
2012

- Los modelos matemáticos del ciclo termodinámico y la dinámica de la válvula se basaron en las ecuaciones de un gas ideal.
- **Para validar los valores teóricos del desplazamiento de una válvula de succión se instrumentó con un sensor láser de desplazamiento.**
- Se concluye que los resultados de simulación se ajustan a los resultados experimentales.

12.-



Diseño de la geometría de una válvula tipo lengüeta.[26]

Sandeep Dhar,  
Bhaskar Tamma.

India, 2014

- Se desarrolla un modelo en análisis de elemento finito para diseñar la geometría de una válvula tipo lengüeta. Los parámetros que se pueden estimar son: longitud, ancho y espesor.
- Es posible estimar la tensión que se puede inducir a fin de lograr un desplazamiento deseado en una válvula.

Al realizar observaciones a las diferentes líneas de investigación presentadas en la tabla 1.1, se puede apreciar que cuentan con algunas características comunes:

- Se pretende mejorar parámetros de diseño del sistema de válvulas para incrementar la eficiencia volumétrica del sistema de compresión.
- Modelan el desplazamiento de la válvula y evalúan sus estimaciones teóricas con datos experimentales al instrumentar un compresor recíprocante.
- Se monitorea principalmente en el compresor: desplazamiento del sistema de válvulas, presión y desplazamiento angular del motor.

## 2. Marco teórico

En este apartado se presentan los fundamentos teóricos mínimos que permiten explicar el funcionamiento de un refrigerador doméstico y la función de un compresor en la refrigeración. Así como los fundamentos que permiten describir el principio de funcionamiento de un sensor óptico de desplazamiento.

### 2.1 Fundamentos teóricos de refrigeración.

#### 2.1.1 Ciclo de refrigeración por compresión de vapor

El refrigerador doméstico es un electrodoméstico en el cual se almacenan alimentos para su conservación. Por lo general, se compone de dos compartimientos: el compartimiento de alimentos, manteniéndose a una temperatura de  $4^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  y por lo menos un compartimiento congelador a temperaturas de  $-17.8^{\circ}\text{C}$  o menores [27].

Un refrigerador doméstico opera con el ciclo de refrigeración por compresión de vapor. En su forma ideal, este ciclo se compone de cuatro procesos para un fluido de trabajo llamado refrigerante, normalmente R134a:

- 1-2 Compresión isentrópica en un compresor,
- 2-3 Rechazo de calor a presión constante en un condensador,
- 3-4 Estrangulamiento en un dispositivo de expansión,
- 4-1 Absorción de calor a presión constante en un evaporador.

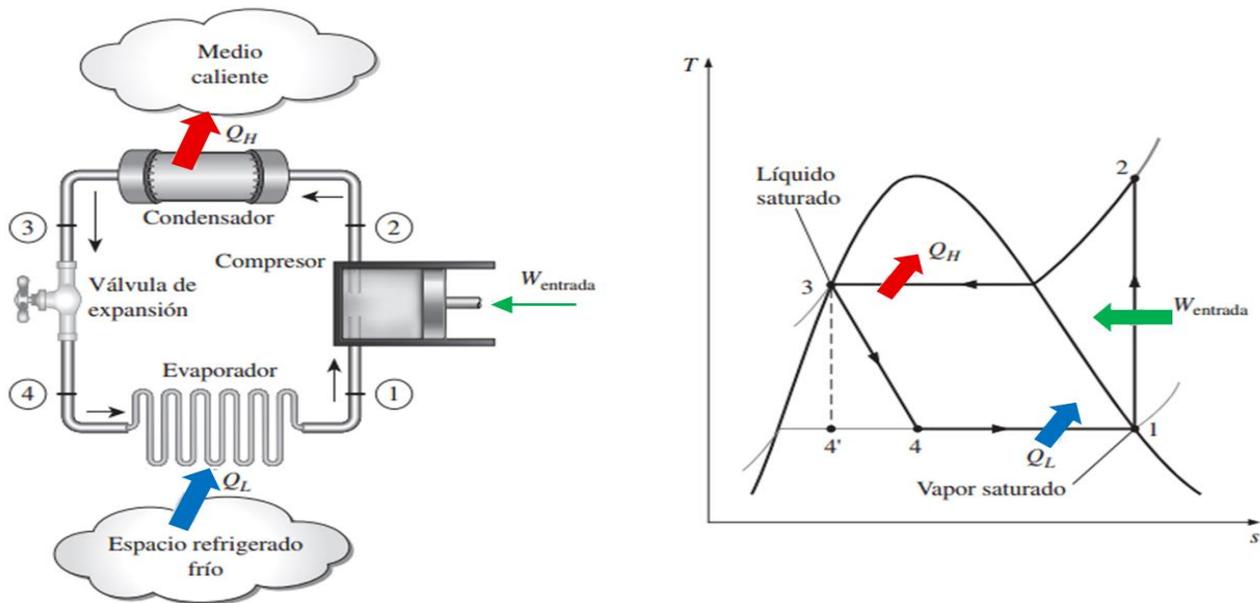


Figura 2.1. Ciclo ideal de Refrigeración por compresión de vapor (Cengel, 2012).

En un ciclo ideal, el refrigerante entra al compresor en el **estado 1** como vapor saturado y se comprime isentrópicamente hasta la presión del condensador. La temperatura del refrigerante aumenta durante el proceso de compresión isentrópica, hasta un valor bastante superior al de la temperatura del medio circundante. Después el refrigerante entra en el condensador como vapor sobrecalentado en el **estado 2** y sale como líquido saturado en el estado 3, como resultado del rechazo de calor hacia los alrededores. La temperatura del refrigerante en este estado se mantendrá por encima de la temperatura de los alrededores. El refrigerante líquido saturado en el **estado 3** se estrangula hasta la presión del evaporador al pasarlo por una válvula de expansión o por un tubo capilar. La temperatura del refrigerante desciende por debajo de la temperatura del espacio refrigerado durante este proceso. El refrigerante entra al evaporador en el **estado 4** como un vapor húmedo de baja calidad, y se evapora por completo absorbiendo calor del espacio refrigerado. El refrigerante sale del evaporador como vapor saturado y vuelve a entrar al compresor, completando el ciclo.

En la práctica, no es posible controlar el estado del refrigerante con tanta precisión para que entre al compresor como vapor saturado. En cambio, es fácil diseñar el sistema de modo que el refrigerante se sobrecaliente ligeramente en la entrada del compresor. Este ligero sobrecalentamiento asegura que el refrigerante se evapore por completo cuando entra al compresor. También, la línea que conecta al evaporador con el compresor suele ser muy larga; por lo tanto, la caída de presión ocasionada por la fricción del fluido y la transferencia de calor de los alrededores al refrigerante pueden ser muy significativas. El resultado del sobrecalentamiento, de la ganancia de calor en la línea de conexión y las caídas de presión en el evaporador y la línea de conexión, consiste en un incremento en el volumen específico y, por consiguiente, en un incremento en los requerimientos de entrada de potencia al compresor puesto que el trabajo de flujo estacionario es proporcional al volumen específico.

El proceso de compresión real incluirá efectos de fricción, los cuales incrementan la entropía y la transferencia de calor, lo que puede aumentar o disminuir la entropía, dependiendo de la dirección. Por consiguiente, la entropía del refrigerante puede incrementarse (proceso 1-2) o disminuir (proceso 1-2') durante un proceso de compresión real, dependiendo del predominio de los efectos.

En el caso ideal, se supone que el refrigerante sale del condensador como líquido saturado a la presión de salida del compresor. En realidad, es inevitable tener cierta caída de presión en el condensador, así como en las líneas que lo conectan con el compresor y la válvula de estrangulamiento. Además, no es fácil ejecutar el proceso de condensación con tal precisión como para que el refrigerante sea un líquido saturado al final, y es indeseable enviar el refrigerante a la válvula de estrangulamiento antes de que se condense por completo. En consecuencia, el refrigerante se subenfía un poco antes de que entre a la válvula de estrangulamiento. La válvula de estrangulamiento y el evaporador se localizan

muy cerca el uno del otro, de modo que la caída de presión en la línea de conexión es pequeña [28].

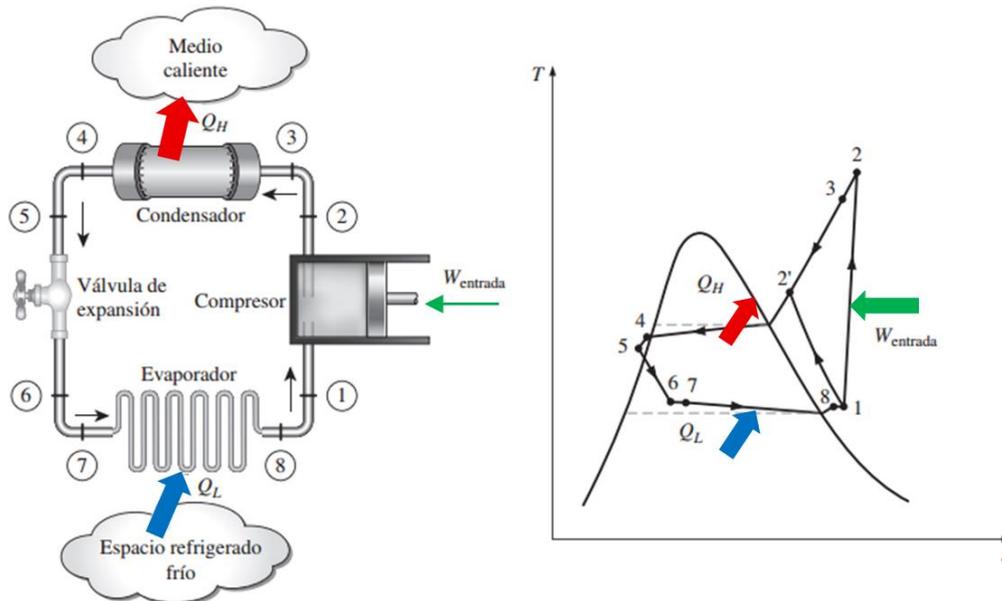


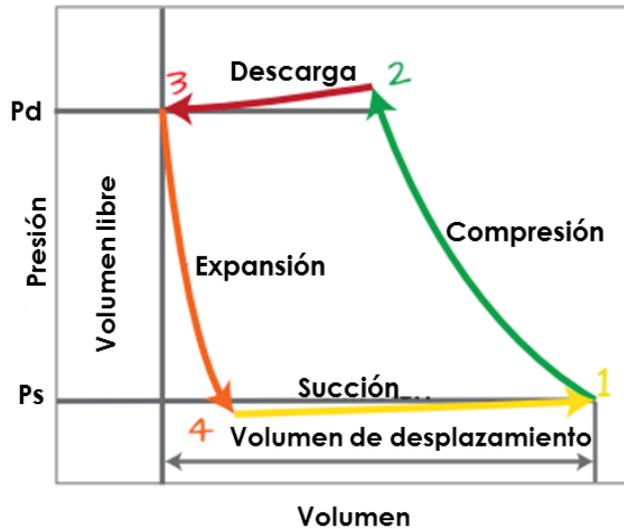
Figura 2.2. Ciclo real de Refrigeración por compresión de vapor (Cengel, 2012).

## 2.1.2 Compresor recíprocante

El compresor de desplazamiento positivo tipo recíprocante es una máquina que incrementa la presión de un volumen de gas, produciendo el aumento de presión por la reducción de volumen. Esta máquina es de desplazamiento positivo de flujo intermitente que actúa mediante un pistón dentro de un cilindro.

El elemento básico de la compresión en un compresor recíprocante es el cilindro, el cual comprime el gas en una sola dirección del pistón, lo cual se conoce como acción de simple efecto. Cuando existe compresión en ambos lados del pistón, se le nombra de doble efecto.

El compresor recíprocante utiliza válvulas automáticas de tipo resorte que se abren sólo cuando existe la diferencia de presión adecuada a través de las válvulas. La válvula de succión se abre cuando la presión en el cilindro es ligeramente inferior a la presión de succión, permitiendo el paso de gas dentro del cilindro. La válvula de descarga se abre cuando la presión en el cilindro es ligeramente superior a la presión de descarga, permitiendo que el gas a presión salga fuera del cilindro [29], observar figura 2.3.



Compresión  
1-2



Descarga  
2-3



Expansión  
3-4



Succión  
4-1



Figura 2.3. Ciclo de compresión de un compresor recíprocante.

### 2.1.3 Sistema de válvulas

Entre los componentes más importantes del compresor recíprocante están las válvulas de succión y descarga. Diseños exitosos proporcionan una larga vida y bajas pérdidas de presión. La vida de una válvula hecha apropiadamente y aplicada correctamente es determinada por el movimiento y la carga que experimenta en el desempeño de su función. Las pérdidas excesivas de presión a través de una válvula son resultado de altas velocidades de gas, de una mala acción mecánica, o ambas [30].

El sistema de válvulas tiene como función el paso del gas refrigerante durante la operación del compresor, en la entrada se encuentra la válvula de succión y en la salida la válvula de descarga, las cuales se abren o cierran debido a una diferencia de presión. En la válvula de succión actúa una presión de la cámara de succión y una presión del cilindro, para que ésta se abra la presión en la cámara de succión tiene que ser mayor que la del cilindro y por caso contrario en la válvula de descarga la presión en el cilindro tiene que ser mayor que en la cámara de descarga.

En la figura 2.4 se muestran todas las partes que componen un sistema de válvulas de un compresor hermético recíprocante.

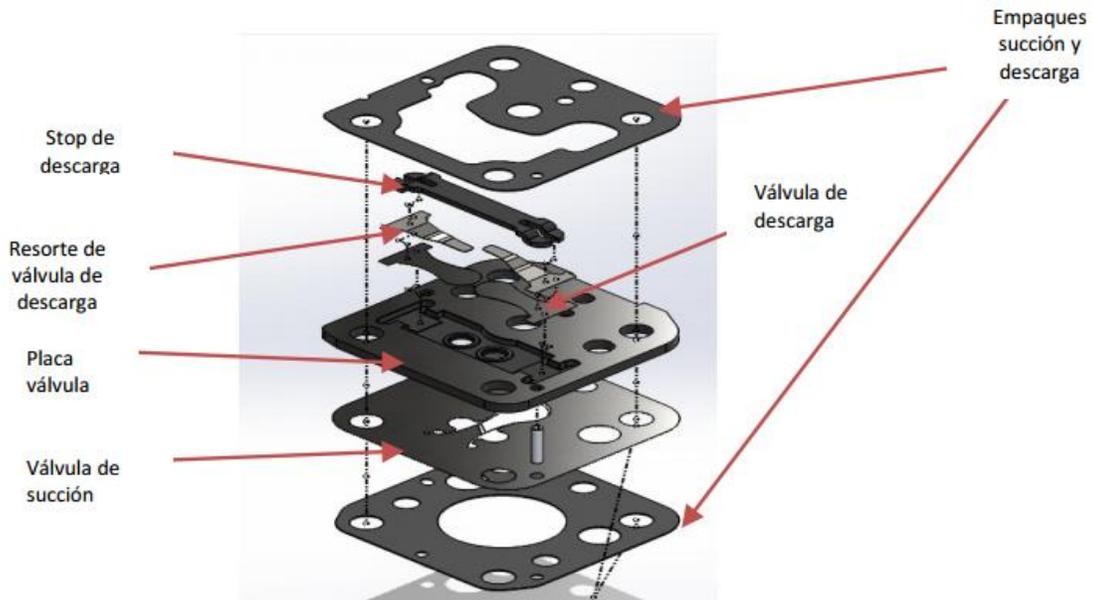


Figura 2.4 Sistema de válvulas (ROBLES, 2015).

Como se puede observar en la figura 2.4, las válvulas de succión y descarga son láminas con forma de lengüeta, estas son un tipo de válvula check que permite el flujo de fluidos en una sola dirección.

Una válvula laminar tipo lengüeta normalmente consiste de una válvula de lengüeta, una válvula de asiento y muy frecuentemente de una placa de restricción, ver figura 2.5.

Una válvula tipo lengüeta se fabrica regularmente de una capa delgada de metal u otro material, como plástico, con un extremo anclado mientras que el otro extremo está libre. Cuando la fuerza neta está en la dirección de apertura, la válvula se flexiona bajo la fuerza del fluido permitiendo que el fluido fluya a través de la válvula. Cuando la fuerza neta del fluido está en la otra dirección, la válvula será empujada hacia la válvula de asiento para cerrar el canal de flujo. Las válvulas tipo lengüeta son comúnmente usadas en compresores pequeños para detener el flujo opuesto en los puertos de succión y descarga. La placa de restricción es usada para limitar la deformación de la válvula tipo lengüeta [31].

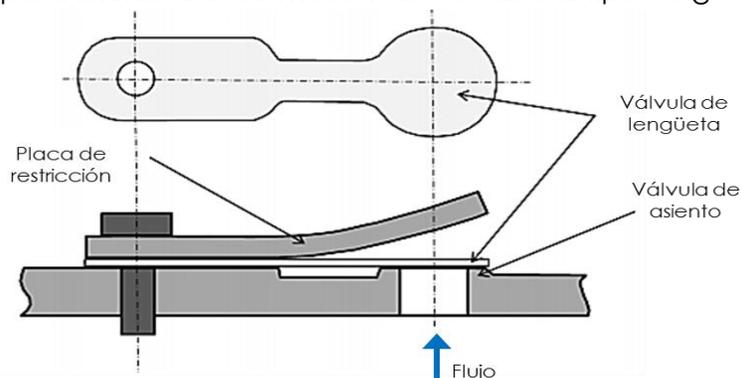


Figura 2.5. Sistema típico de una válvula tipo lengüeta (Ding, 2014).

## 2.2 Fundamentos teóricos de un sensor óptico.

Los sensores ópticos son muy populares para medir posición y desplazamiento. Sus principales ventajas son la simplicidad, la ausencia de un efecto de carga, y distancias de funcionamiento relativamente largas. Son insensibles a desviarse de campos magnéticos y de interferencias electrostáticas, lo cual los hace muy adecuados para muchas aplicaciones sensibles. Un sensor óptico de posición por lo general requiere al menos tres componentes esenciales: una fuente de luz, un fotodetector, y los dispositivos de guía de luz, que puede incluir lentes, espejos, fibras ópticas, etc.

### 2.2.1 Configuración básica de un sensor óptico.

Los sensores ópticos emplean la luz para medir perturbaciones externas. Su funcionamiento se basa en la emisión de un haz de luz que es interrumpido o reflejado por el objeto a detectar.

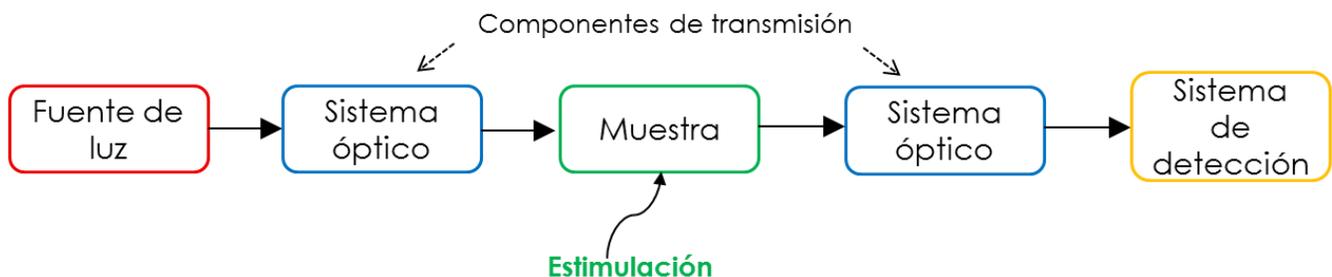


Figura 2.6. Diagrama básico de un sensor óptico

Los sensores ópticos tienen características en común, por ejemplo: utilizan componentes ópticos (lentes, espejos, etc.) como medio de transmisión de las señales producidas o como elemento sensitivo del dispositivo; fuente de luz (láser, superluminiscente, etc.); elementos de detección de luz (fotodetectores); elementos de registro y procesamiento de las señales optoelectrónicas.

### 2.2.2 Componentes de un sensor óptico.

#### ▪ Fuente de luz.

La utilización de un sensor óptico precisa su adaptación a la naturaleza de la radiación recibida: flujo, espectro, frecuencia de modulación. Por ello es la fuente quien determina las características primarias de dicha radiación. Enseguida se citan algunos tipos de fuentes más convencionales [32].

- Lámpara de filamento de tungsteno.
- Diodo electroluminiscente (LED).
- Láser.

Para fines prácticos de este trabajo de tesis se aborda las características que debe tener la luz láser, siendo un elemento primordial en el desarrollo del sistema de medición propuesto.

## Láser

Láser es el acrónimo de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, es decir amplificación de luz por emisión estimulada de radiación. Un láser es un dispositivo que produce una luz intensa cuya principal característica es ser coherente. La coherencia se logra cuando las amplitudes relativas de la onda del rayo de luz que se emite, están en fase. Esto quiere decir que un láser genera luz que viaja en la misma dirección de manera muy ordenada en tiempo y espacio. A los láseres también se les considera como fuentes de luz cuasi monocromáticas; esto es, que emiten luz a una sola frecuencia o en un solo color. Los láseres amplifican la luz generando un gran flujo de energía de salida. Por ello se dice que los láseres son altamente direccionales y muy brillantes [33].

### Características de la luz láser.

#### 1.- Monocromaticidad.

En resumen, podemos decir que esta propiedad se debe a dos circunstancias: (1) Sólo una onda electromagnética de frecuencia  $\nu_0$  dada por (2.1) puede ser amplificado. (2) Puesto que la disposición de dos espejos forman una cavidad resonante, la oscilación puede ocurrir solamente en las frecuencias de resonancia de esta cavidad.

$$\nu_0 = \frac{E_2 - E_1}{h} \dots (2.1)$$

Donde  $h$  es la constante de Planck [34].

#### 2.- Coherencia.

Para una onda electromagnética, se pueden presentar dos tipos de coherencia, llamadas coherencia espacial y coherencia temporal.

Para definir la coherencia espacial, consideremos dos puntos  $P_1$  y  $P_2$ , en el tiempo  $t = 0$ , se encuentran en el mismo frente de onda de alguna onda electromagnética y sean  $E_1$  y  $E_2$  los campos eléctricos correspondientes a estos dos puntos. Por definición, la diferencia entre las fases de los dos campos en el tiempo  $t = 0$  es cero. Ahora bien, si esta diferencia sigue siendo cero en cualquier tiempo  $t > 0$ , diremos que hay una coherencia perfecta entre los dos puntos. Si esto ocurre para cualquier par de puntos del frente de onda electromagnética, diremos que la onda tiene coherencia espacial perfecta. En la práctica, para cualquier punto  $P_1$ ,  $P_2$  punto debe estar dentro de un área finita alrededor de  $P_1$  si queremos tener una buena correlación de fase. En este caso diremos que la onda tiene una coherencia espacial parcial y, para cualquier punto  $P$ , podemos presentar una zona de coherencia adecuadamente definido  $S_c(P)$ .

Para definir la coherencia temporal, ahora consideramos el campo eléctrico de la onda electromagnética en un punto P dado, en los tiempos  $t$  y  $t + t_1$ . Si, para un dado tiempo de retardo  $t_1$ , la diferencia de fase entre los dos campo sigue siendo el mismo para cualquier tiempo  $t$ , diremos que hay una coherencia temporal durante un tiempo  $t_1$  [34].

### 3.- Direccionalidad.

Esta propiedad es una consecuencia directa del hecho de que el medio activo se coloca en una cavidad resonante. Para obtener una comprensión más profunda de las propiedades direccionales de un rayo láser (o, en general, de cualquier onda electromagnética), es conveniente tener en cuenta, por separado, el caso de un haz con coherencia espacial perfecta y el caso de la coherencia espacial parcial.

Consideremos en primer lugar el caso de coherencia espacial perfecta. Incluso para este caso, un haz de abertura finita tiene divergencia debido a la difracción. Esto puede ser entendido con la ayuda de la figura.2.7, donde un haz monocromático de intensidad uniforme y el plano de frente de onda sea incidente sobre una pantalla S que tiene una abertura D. Según el principio de Huyghens el frente de onda en algún plano P detrás de la pantalla puede ser obtenido de la superposición de las ondas elementales emitidas por cada punto de la abertura. Así vemos que, a causa del tamaño finito D de la abertura, el haz tiene una divergencia finita  $\theta_d$ . Su valor se puede obtener de la teoría de la difracción. Para una distribución de amplitud arbitraria obtenemos:

$$\theta_d = \frac{\beta\lambda}{D} \quad \dots (2.2)$$

Donde  $\lambda$  y D son la longitud de onda y el diámetro del haz. El factor  $\beta$  es un coeficiente cuyo valor depende de la distribución de amplitud, divergencia y diámetro del haz. Un haz cuya divergencia se puede expresar como en la ecuación 2.2 se describe como difracción limitada.

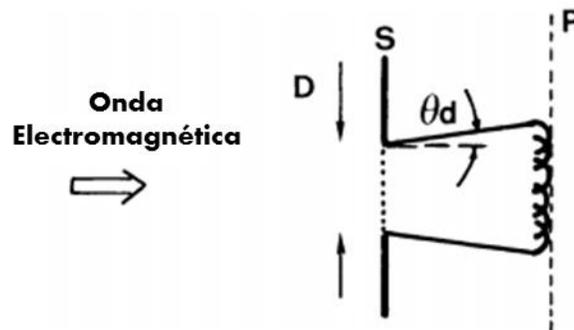


Figura 2.7. La divergencia de una onda electromagnética plana debido a la difracción.

Si la onda solo tiene coherencia espacial parcial, su divergencia será mayor que el valor mínimo establecido por la difracción. De hecho, para cualquier punto P' del frente de onda, el argumento de Huygens de la Figura 2.7 sólo puede aplicarse en puntos que se encuentran dentro del área de coherencia  $S_c$  alrededor del punto P'. Así, el área de

coherencia actúa como una abertura para la limitación de la superposición coherente de las ondas elementales. La divergencia del haz será ahora dado por:

$$\theta = \frac{\beta\lambda}{[S_c]^{1/2}} \dots (2.3)$$

Donde, otra vez  $\beta$  es un coeficiente cuyo valor depende de la divergencia  $\theta$  y del área de coherencia  $S_c$ .

Llegamos a la conclusión de esta discusión general de las propiedades direccionales de ondas electromagnéticas al señalar que, dadas las condiciones de operación adecuadas, el haz de salida de un láser se puede hacer de difracción limitada [34].

- **Componentes ópticos de transmisión.**

Después de que se genera la luz (láser), se puede manipular de muchas maneras. La figura 2.8 muestra varios ejemplos de la manipulación de la luz en sensores. La mayoría de estos métodos implican el cambio de dirección de la luz, mientras que algunos utilizan un bloqueo selectivo de ciertas longitudes de onda. Esto último es llamado filtrado (Fig. 2.8a). La dirección de la luz se puede cambiar mediante la reflexión con la ayuda de espejos, rejillas de difracción, guías de ondas ópticas y fibras. También, la dirección de la luz se puede cambiar por la refracción con la ayuda de lentes, prismas, ventanas, soluciones químicas, cristales, materiales orgánicos, y objetos biológicos. Mientras pasa a través de estos objetos, las propiedades de la luz pueden ser modificadas (modulada) por un estímulo medido. Entonces, la tarea de un diseñador de sensores es establecer una conversión de tal variación en señales eléctricas que pueden estar relacionados con el estímulo [35].

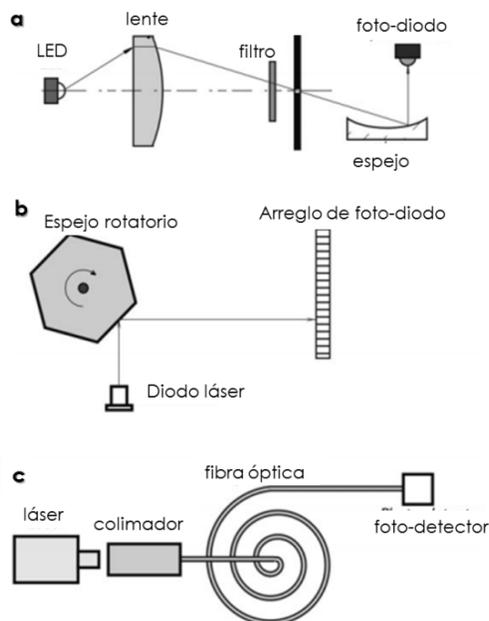


Figura 2.8. Ejemplos de sistemas ópticos que usan refracción (a) y reflexión (a, b, c). (Franden, 2010)

Como se puede apreciar en los ejemplos anteriores, al pasar de un medio a otro los rayos se refractan, como se muestra en la figura 2.9a. La relación entre el ángulo de refracción  $\varphi_{\text{refr}}$  y el ángulo de incidencia  $\varphi_{\text{inc}}$  se llama *ley de Snell*:

$$n_1 \text{ sen } \varphi_{\text{inc}} = n_2 \text{ sen } \varphi_{\text{refr}} \quad \dots (2.4)$$

La magnitud  $n$  se denomina índice de refracción.

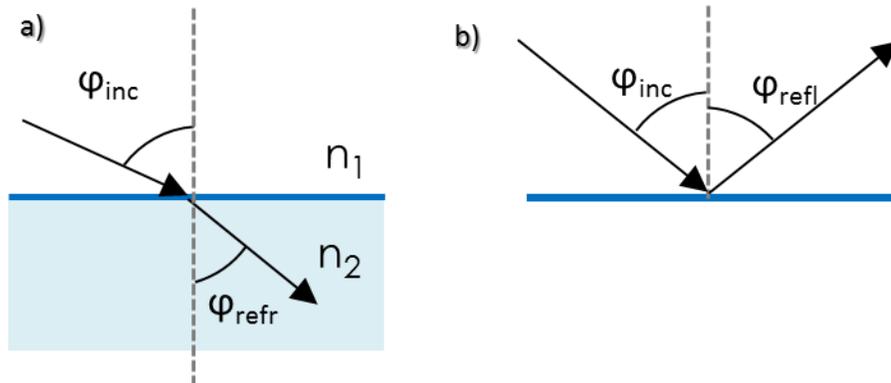


Figura 2.9. Esquema de refracción (a) y reflexión (b).

Por otra parte, al reflejarse la luz en un espejo, la magnitud del ángulo de incidencia es igual a la del ángulo de reflexión, ver figura 2.9b, es decir,

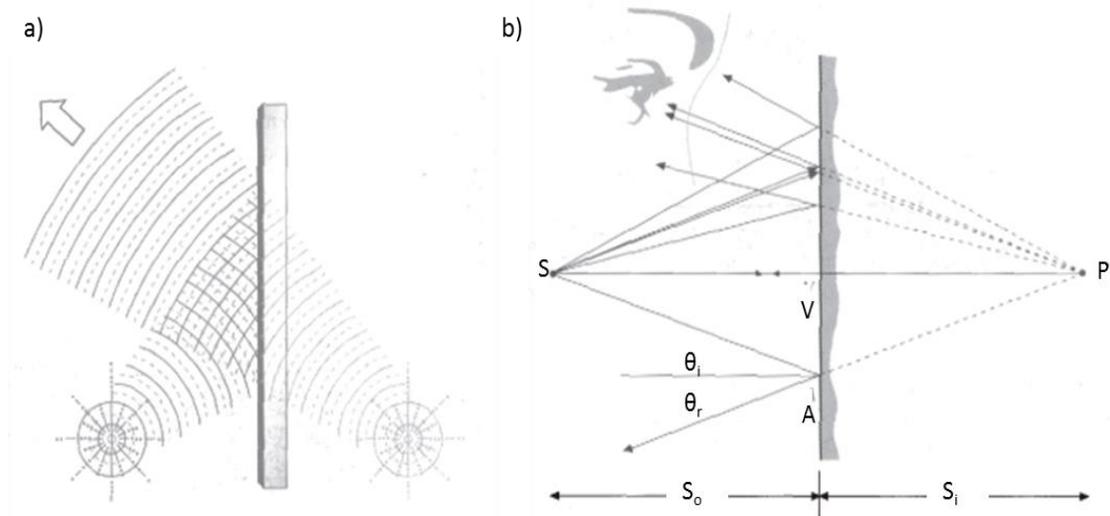
$$\varphi_{\text{inc}} = \varphi_{\text{refl}} \quad \dots (2.5)$$

Los rayos reflejado y refractado se encuentran en el plano de incidencia, que es el plano que contiene al rayo incidente y la normal a la superficie [36].

## Espejos.

Un espejo podría ser simplemente una pieza de vidrio negro o una superficie metálica finamente pulida. En el pasado, los espejos se hacían normalmente recubriendo el vidrio con plata, escogiéndose por su alta eficacia en el UV y el IR. Actualmente, los recubrimientos de aluminio evaporado al vacío sobre sustratos altamente pulidos han quedado como el estándar para espejos de calidad. Frecuentemente se colocan también capas protectoras de monóxido de silicio o fluoruro de magnesio sobre el aluminio. En aplicaciones especiales, como en láseres, donde no pueden tolerarse pérdidas pequeñas debidas a las superficies metálicas, los espejos formados por películas dieléctricas múltiples se están haciendo indispensables.

Los espejos planos se utilizan con mucha frecuencia. Son los que usamos en la vida diaria porque permite que la cubierta metálica reflectora quede completamente protegida detrás del vidrio. Por el contrario la mayoría de los espejos diseñados para uso técnico, se recubren en la superficie frontal, ver figura 2.10.



**Figura 2.10. Un espejo plano. (a) Reflexión de ondas. (b) Reflexión de rayos, (Hecht, 2000).**

Para determinar las características de la imagen de un espejo plano, examinemos la fuente puntiforme y la disposición de espejos de la figura 2.10, de donde se puede demostrar rápidamente que  $|S_o| = |S_i|$ , es decir, la imagen P y el objeto S son equidistantes de la superficie. Se sabe,  $\theta_i = \theta_r$ , de la ley de reflexión;  $\theta_i + \theta_r$  es el ángulo exterior del triángulo SPA siendo, por consiguiente, igual a la suma de los ángulos internos alternos  $\sphericalangle VSA + \sphericalangle VPA$ . Pero  $\sphericalangle VSA = \theta_i$  y, por lo tanto  $\sphericalangle VSA = \sphericalangle VPA$ . Esto hace que los triángulos VAS y VPA sean congruentes, en cuyo caso  $|S_o| = |S_i|$  [37].

## Lentes.

Un lente es un dispositivo refractor (es decir, una discontinuidad en el medio dominante) que reconfigura la distribución de la energía emitida. Esto se aplica a los rayos UV, a las ondas cortas, a los rayos IR, a las microondas, radioondas e incluso hasta a las ondas sonoras. Los lentes son útiles en los sensores y detectores para desviar la dirección de los rayos de luz [37].

Supongamos que sobre una lente plano-convexa (es decir, limitada por un plano y una esfera de radio R) incide una onda esférica procedente de una fuente que se encuentra en el punto 1 a una distancia  $l_1$  de la lente (ver figura 2.11). Determinemos la forma del frente de onda luego de atravesar la lente.

El tiempo que necesita la onda para propagarse desde el punto 1 hasta el punto 3 a lo largo del eje (el punto 3 está situado en la intersección del eje con la superficie esférica de la lente) es:

$$t = \frac{l_1}{c} + \frac{l_0}{v} = \frac{l_1}{c} + \frac{nl_0}{v} = \frac{1}{c} (l_1 + nl_0) \dots (2.6)$$

Donde  $l_0$  es el espesor de la lente,  $v$  es la velocidad con que la luz la atraviesa y  $n$  es el índice de refracción. Durante este tiempo, la onda correspondiente a un punto de la lente alejado a una distancia  $x$  del eje alcanza a recorrer la distancia  $a$  desde la fuente hasta la lente, la distancia  $l$  dentro de la lente, la distancia  $b$  desde la lente hasta el plano perpendicular al eje y tangente a la lente en el punto 3, y cierta distancia complementaria  $\Delta$ . La función  $\Delta(x)$  determina la forma del frente de onda después de que la onda atraviesa la lente.

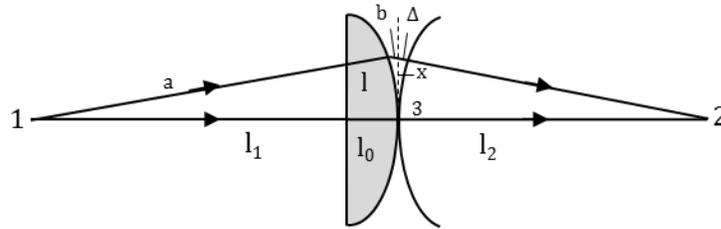


Figura 2.11. Geometría de una lente plano-convexa (Shepeliov, 2003).

En adelante utilizaremos un hecho conocido de las matemáticas: una circunferencia de radio  $l_1$  se puede aproximar mediante la parábola  $y = \frac{1}{2l_1} x^2$ . También consideremos que los rayos inciden sobre la lente formando ángulos pequeños respecto al eje (los rayos con esa característica se denominan rayos paraxiales). Teniendo en cuenta esta aproximación, se tiene:

$$l = l_0 - \frac{1}{2R} x^2, \quad b = \frac{1}{2R} x^2 \dots (2.7)$$

La distancia  $a$  es igual a la suma  $l_1 + \frac{1}{2l_1} x^2$ . El tiempo  $\frac{\Delta(x)}{c}$ , durante el cual la onda recorre la distancia  $\Delta(x)$ , es igual a la diferencia del tiempo  $t$  y el tiempo de propagación de la radiación a la distancia  $a + l + b$ :

$$\frac{\Delta(x)}{c} = \frac{1}{c} (l_1 + nl_0) - \left[ \frac{1}{c} \left( l_1 + \frac{1}{2l_1} x^2 \right) + \frac{n}{c} \left( l_0 - \frac{1}{2R} x^2 \right) + \frac{1}{c} \left( \frac{1}{2R} x^2 \right) \right] \dots (2.8)$$

Tras una serie de transformaciones simples, obtenemos

$$\Delta(x) = \left( \frac{n-1}{2R} - \frac{1}{2l_1} \right) x^2 \dots (2.9)$$

De este modo, después de atravesar la lente, el frente de onda tiene forma parabólica, es decir, en nuestra aproximación es una onda esférica. Es evidente que el radio de curvatura del frente de onda  $l_2$  se determina a partir de la expresión

$$\frac{1}{2l_2} = \frac{n-1}{2R} - \frac{1}{2l_1} \dots (2.10)$$

De donde obtenemos que

$$\frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} = (n - 1) \frac{1}{R} \dots (2.11)$$

La ecuación 2.11 es la fórmula de la lente plano-convexa. Efectuando cálculos análogos, se puede obtener la fórmula general de la lente.

$$\frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} = (n - 1) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \dots (2.12)$$

Donde  $R_1$  y  $R_2$  son los radios de las superficies esféricas que limitan la lente. Se debe señalar que la fórmula de la lente es válida sólo para lentes delgadas y rayos que se propagan casi paralelamente al eje.

Ahora, supongamos que sobre una lente incide una onda plana (por ejemplo, la radiación de una fuente puntual alejada de la lente a una gran distancia), además que  $l_1 = \infty$  y  $\frac{1}{l_1} = 0$ ; entonces, de acuerdo a la fórmula de la lente (ecuación 2.12),

$$\frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} = \frac{1}{l_2} = (n - 1) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \dots (2.13)$$

es decir, después de incidir sobre la lente, la onda plana converge en un punto alejado de la lente a una distancia

$$l_2 = \left[ (n - 1) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \right]^{-1} = f \dots (2.14)$$

La magnitud  $f$  se denomina distancia focal de la lente, y el punto en el que converge la onda plana que incide sobre la lente, foco de la lente [36].

### **Divisor de haz.**

Un divisor de haz es un dispositivo óptico que puede dividir un haz de luz incidente (por ejemplo, un rayo láser) en dos o más haces, que pueden o no pueden tener la misma potencia óptica. Existen diferentes tipos de divisores de haz, como: espejos dieléctricos, cubo divisor de haz, entre otros, y se utilizan para fines muy diferentes. Por ejemplo, se utilizan divisores de haz para interferómetros, cámaras, proyectores y sistemas láser.

Muchos divisores de haz tienen la forma de un cubo, en donde la división del haz se produce en una interfaz dentro del cubo (Figura 2.12). Un cubo de este tipo se hace a menudo de dos prismas de vidrio triangulares que están pegadas entre sí con un poco de resina transparente o cemento. Las caras de la hipotenusa de ambos prismas son planas y

paralelas, y se colocan de tal manera que transmitan y reflejen cualquier fracción deseada de la densidad de flujo incidente [38].

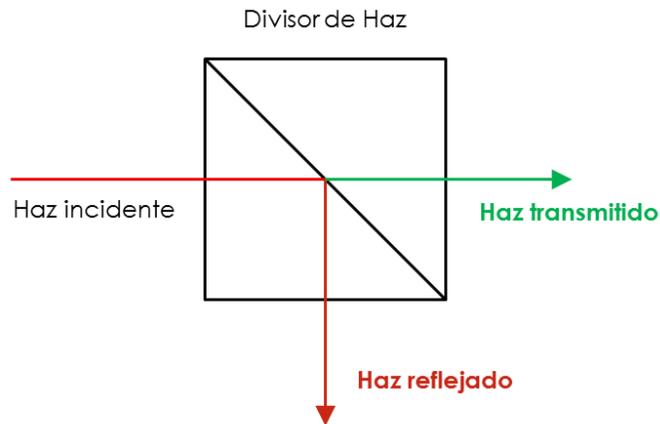


Figura 2.12. Cubo divisor de haz.

- **Detector de luz.**

Detectores de radiación electromagnética en el rango espectral desde el ultravioleta al infrarrojo lejano son llamados detectores de luz. Desde el punto de vista de un diseñador de sensores, la absorción de fotones por un material de detección puede resultar en una respuesta cuántica o térmica. Por lo tanto, todos los detectores de luz se dividen en dos grupos principales: detectores cuánticos o fotodetectores y detectores térmicos. Los primeros dependen de los efectos producidos por la radiación, mediante fotones, sobre los electrones del material detector. En cuanto a los detectores térmicos, responden a la energía radiante que incide totalmente sobre ellos; su uso inicial estuvo orientado a la radiación infrarroja, aunque actualmente se ha ampliado el espectro de utilización [32].

### **Fotodiodo.**

Los fotodiodos son sensores ópticos semiconductores construidos con una unión p-n. De una manera simple, la operación de un fotodiodo se puede describir como sigue:

Si el fotodiodo es polarizado en directa, la luz que incide no tendría efecto sobre él y se comportaría como un diodo semiconductor normal.

Si el fotodiodo es polarizado en inversa, cuando la luz incide sobre el semiconductor, la corriente aumentará muy notablemente por absorber fotones [35].

### 2.2.3 Características de un sensor.

Todo sensor óptico, cuenta con características intrínsecas propias de los materiales con que fueron construidos. Estas características dependen de la respuesta del sensor a un estímulo externo. Algunas características importantes se enuncian enseguida:

#### Repetibilidad.

Cuando todas las condiciones operativas y ambientales se mantienen constantes, la repetibilidad es la capacidad del sistema de medición para producir la misma respuesta en mediciones sucesivas. Las estimaciones de repetibilidad a corto plazo y a largo plazo pueden ser importantes para un sistema de medición.

Por ejemplo, para un sistema de sensado de temperatura, cuando la temperatura ambiente se mantiene constante en 21°C, y si el sistema mide 21.0, 21.1, y 21.0 °C en intervalos de 1 min, y después de 1 h mide 22.0, 22.1 y 22.2 °C, en mismos intervalos de 1 min, el sistema tiene una buena repetibilidad a corto plazo pero mala repetibilidad a largo plazo [39].

#### Sensibilidad.

La sensibilidad es la relación de cambio incremental en la salida del sensor ( $\Delta y$ ) entre el cambio incremental de la magnitud a medir en la entrada ( $\Delta x$ ). La pendiente de la curva de calibración,  $y = f(x)$ , se puede utilizar para el cálculo de la sensibilidad. Como se puede ver en la Fig.2.13, el sensor eventualmente alcanza la saturación, un estado en el que ya no puede responder a cualquier cambio.

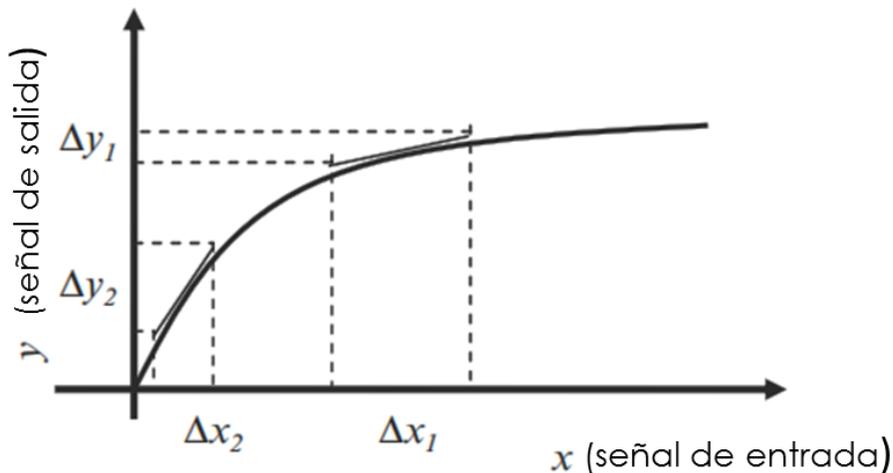


Figura 2.13. Curva de calibración: puede ser usada para el cálculo de sensibilidad

Por ejemplo, en un sistema de medición de temperatura, si el voltaje de salida se incrementa en 1 V, cuando la temperatura cambia en 0.1 °C, entonces la sensibilidad será 10 V/ °C [39].

### **Mínimo detectable.**

En un sistema de medición, la señal mínima detectable (MDS, por sus siglas en inglés) es el incremento mínimo de la señal que puede ser observada, cuando todos los factores que actúan se han tomado en cuenta. Cuando el incremento es evaluado desde cero, el valor se refiere generalmente como umbral o límite de detección. Si las señales resultantes son grandes en relación a la entrada, será difícil de extraer una señal clara y un pequeño MDS no puede ser obteniendo [39].

### **Rango de Medición.**

Los valores máximo y mínimo de la magnitud a medir que se pueden medir con un sistema de sensado se llaman el rango de medición, que también se llama el rango dinámico o el intervalo. Todos los sistemas de medición están diseñados para funcionar en un rango especificado. Las señales fuera de este rango pueden ser incomprensibles, inexactas, e incluso pueden resultar en un daño irreversible en el sensor.

En general, se especifica el rango de medición de un sistema de medición en su ficha técnica. Por ejemplo, si el rango de medición de un sensor de temperatura está entre -100 y 800 °C, exponiéndolo a temperaturas fuera de este rango puede causar daño o generar lecturas inexactas [39].

### **Ruido.**

Las fluctuaciones no deseadas en la señal de salida del sistema de sensado, cuando la magnitud a medir no está cambiando, se le conoce como *ruido*. La relación señal a ruido (S/N) es un valor utilizado comúnmente en aplicaciones de sensado. Se define como [39,40]:

$$\frac{S}{N} = \frac{\mu}{\sigma} = \frac{\text{Valor promedio de la señal}}{\text{Desviación estandar del ruido}} \dots (2.15)$$

En algunas situaciones, la media describe lo que se está midiendo, mientras que la desviación estándar representa el ruido.

El ruido puede ser causado por fuentes internas o externas. Las señales electromagnéticas, como las producidas por los circuitos de transmisión / recepción y fuentes de alimentación, vibraciones mecánicas, y los cambios de temperatura ambiental son ejemplos de ruido

externo, que puede causar errores sistemáticos. Sin embargo, la naturaleza de los ruidos internos es bastante diferente y se pueden clasificar como sigue:

1. El ruido electrónico: la energía térmica causa que los portadores de carga se mueva en movimientos aleatorios, da resultado a variaciones aleatorias de corriente y / o voltaje. Es inevitable y está presente en todos los sistemas de detección que funcionan a temperaturas superiores a 0 K.
2. Generación-recombinación (o ruido g-r): Este tipo de ruido se produce a partir de la generación y la recombinación de electrones y huecos en los semiconductores. Se observan en dispositivos electrónicos de unión.
3. El ruido rosa (o ruido 1/f): En este tipo de ruido los componentes del espectro de frecuencia de las señales no deseadas son inversamente proporcionales a la frecuencia. El ruido rosa es más fuerte en las frecuencias más bajas y cada octava lleva una cantidad igual de potencia de ruido [39].

### **Deriva (drift).**

La deriva se observa cuando un cambio gradual en la salida del sistema de sensado es detectado, mientras que la magnitud a medir en realidad se mantiene constante. La deriva es el cambio no deseado que no está relacionado con la magnitud a medir. Se considera un error sistemático, que puede ser atribuido a los parámetros no deseados como la inestabilidad mecánica y la inestabilidad de la temperatura, la contaminación, y la degradación de los materiales del sensor. Es muy común evaluar la deriva con respecto a la referencia del sensor. La referencia es el valor de salida, cuando el sensor no está expuesto a un estímulo. Lógicamente para un sensor sin deriva, la referencia debe permanecer constante.

Por ejemplo, en un sensor de gas semiconductor, un cambio gradual de temperatura puede cambiar la referencia. Además, la difusión gradual de metal del electrodo en el sustrato o capa sensible puede cambiar gradualmente la conductividad del elemento sensible, lo que deteriora el valor de referencia y causa deriva [39].

# 3. Modelo del desplazamiento de la válvula de succión

El presente capítulo describe el modelado de la válvula de succión considerada como una viga en voladizo. Se presenta la ecuación que caracteriza su desplazamiento, de tal forma, que es posible hacer un análisis comparativo entre datos teóricos y datos experimentales más adelante.

## 3.1 Modelo

Con el objetivo de tener una representación esquemática de la válvula de succión tipo lengüeta, en la Figura 3.1, se muestra la forma que tiene la válvula de succión, y dimensiones necesarias para su modelado.

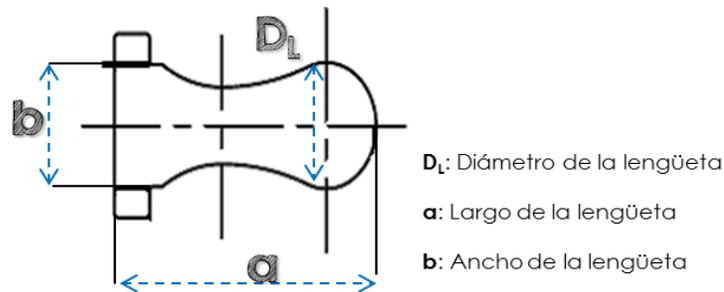


Figura 3.1. Forma de una válvula tipo lengüeta y dimensiones de importancia para su modelado.

Para analizar el comportamiento de la válvula, es posible considerarla como una viga en voladizo y aplicar la ecuación de la elástica (Anexo1). Además, es necesario considerar un solo grado de libertad y despreciar la masa de la lengüeta. Entonces, se analiza el desplazamiento de la válvula con los siguientes esquemas.

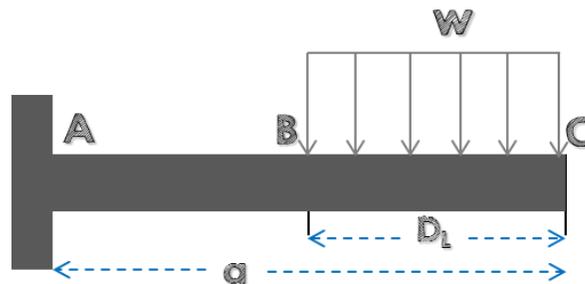


Figura 3.2. Esquema de una válvula como viga en voladizo

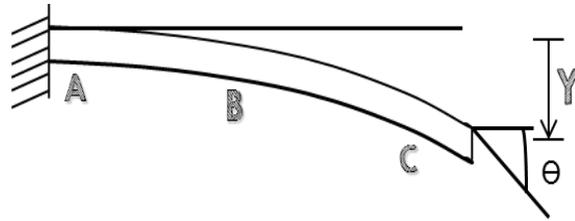


Figura 3.3. Esquema del desplazamiento de la válvula.

De acuerdo a los esquemas anteriores, se tiene las siguientes ecuaciones, de acuerdo al análisis realizado en [6,7]:

Carga distribuida:  $w = \Delta P * \frac{A_L}{D_L}$  [N/m] ..... (3.1)

Momento de Inercia  $I = \frac{b*h^3}{12}$  [m<sup>4</sup>] ..... (3.2)

Desplazamiento:  $Y = - \left[ \frac{-\frac{W*D_L*a^3}{3} + \frac{W*D_L^2*a^2}{4} - \frac{W*D_L^4}{24}}{E*I} \right]$  [m] ..... (3.3)

Para evaluar y obtener resultados de la ecuación (3.2), se requieren datos como: el espesor de la válvula (h), el módulo de elasticidad (E), el diámetro de la lengüeta (D<sub>L</sub>), la superficie donde está la presión (A<sub>L</sub>) y la diferencia de presiones (ΔP) para la apertura de la válvula.

### 3.2 Simulación de la válvula

Con el objetivo de modelar numéricamente a la válvula que se desea caracterizar, se desarrolló un algoritmo de simulación para la válvula de succión empleando la plataforma MATHEMATICA (Anexo 2). En dicho algoritmo se programaron las ecuaciones que describen el comportamiento de la válvula de succión. La implementación del algoritmo se fundamenta con el hecho de poder obtener valores teóricos del comportamiento del desplazamiento de la válvula que deberán ser considerados para comprobar una vez fabricado el sistema de medición, que el desplazamiento de la válvula corresponda a las aproximaciones numéricas realizadas

mediante el algoritmo, además de tener la representación gráfica del desplazamiento debido a la diferencia de presiones.

En la Figura 3.4 se muestra la válvula de succión que se analizará en este trabajo de tesis, con dimensiones conocidas como: espesor ( $h$ ), el diámetro de la lengüeta ( $D_L$ ), Largo de la lengüeta ( $a$ ), Ancho de la lengüeta ( $b$ ), módulo de elasticidad ( $E$ ) y superficie donde está la presión ( $A_L$ ).



Figura 3.4. Válvula de succión tipo lengüeta de un compresor recíprocante MABE.

La figura 3.5 muestra el desplazamiento de la válvula obtenido mediante el algoritmo de simulación programado. El comportamiento de la figura 3.5 muestra cómo es que al incrementar la diferencia de presión, el desplazamiento de la válvula también lo hace.

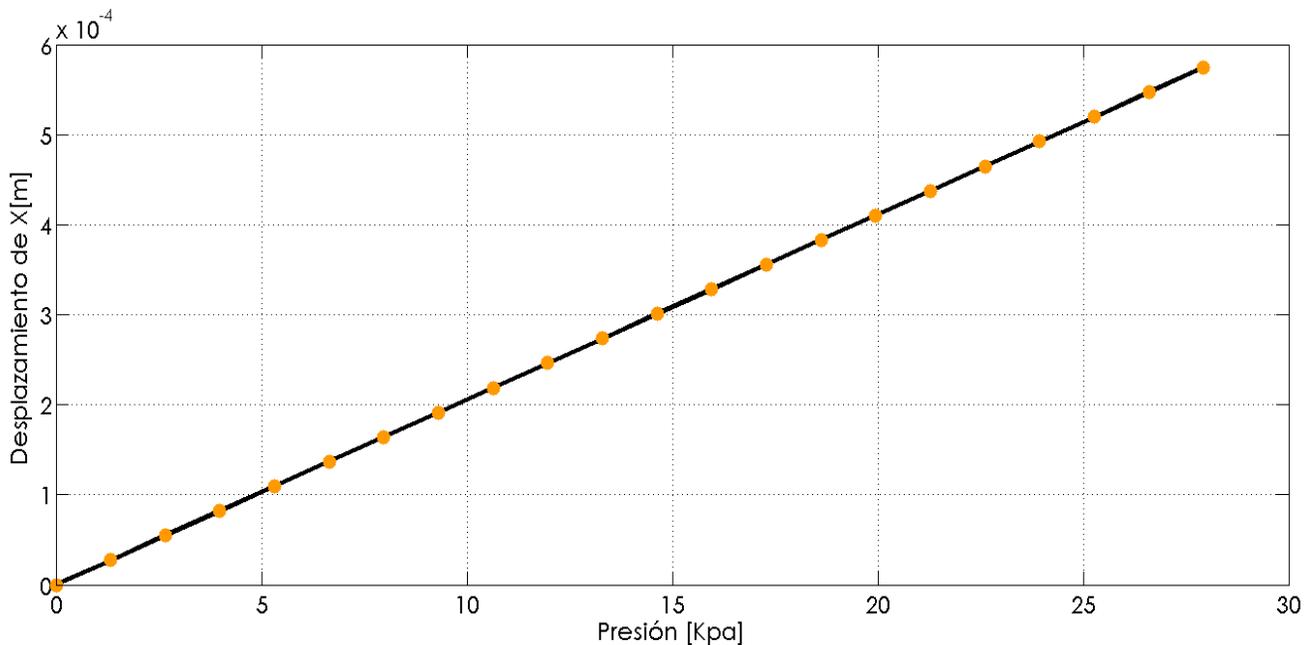


Figura 3.5. Curva de desplazamiento de la válvula de succión en función de  $\Delta P$  para incrementos de 1.33 [kPa] usando la ecuación 3.3.

## 4. Diseño de instrumentos de medición

El propósito de este capítulo es describir el diseño de los sistemas de medición para caracterizar el desplazamiento de una válvula de succión tipo lengüeta. El proceso involucra dos técnicas ópticas: técnica por deflexión haz láser y un interferómetro de Michelson.

### 4.1 Requerimientos

La única necesidad dada por la empresa de electrodomésticos, para el análisis del sistema de válvulas fue medir su desplazamiento. Sin embargo se consideraron otras necesidades para lograr caracterizar su comportamiento, las cuales se enfocan en el sistema de medición para el desplazamiento de la válvula y el principio de funcionamiento del sistema de válvulas.

Para poder caracterizar y entender el funcionamiento del sistema de válvulas, se requiere tomar en cuenta las siguientes necesidades:

- *Caracterización del desplazamiento de la válvula succión de un compresor, mediante su modelo matemático propuesto en la literatura [7] y presentado en el apartado anterior. Además de ser validado con la propuesta del sistema de medición a presentar en esta sección.*
- *Principio de funcionamiento del sistema de válvulas.*
- *Evaluación de los sistemas de medición, mediante su rango de medición, sensibilidad y repetibilidad.*

Considerando las necesidades ya mencionadas, se establecieron especificaciones que se muestran en la tabla 4.1. Cada especificación se le asignó una métrica y un valor ideal con el fin de tener parámetros medibles para saber si se cumplen o no las especificaciones.

Número	Especificación	Unidad	Valor ideal
1	Desplazamiento máximo de la válvula	[m]	$4 \times 10^{-3}$
2	Presión máxima sobre la válvula	[kPa]	30
3	Frecuencia de resonancia de la válvula	[Hz]	<300
4	Sensibilidad del sistema de medición	[m/ kPa]	$<1 \times 10^{-3}$

Tabla 4.1. Especificaciones del sistema de medición.

## 4.2 Infraestructura

Los componentes del sistema de medición están dados por el equipo que se dispone en el Laboratorio de óptica integrada y fibra óptica, ubicado en Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET), UNAM. Los dispositivos se enlistan enseguida:

- Tarjeta DAQ NI USB-9162
- Sensores: fotodetector y de presión.
- Software LabVIEW.
- Equipo de cómputo.
- Fuentes de alimentación.
- Osciloscopio.
- Fibra óptica.
- Fuente de alta coherencia (láser).
- Divisores de haz óptico.
- Material optomecánico.
- Fuente de presión.

Por otra parte, se obtiene el sistema de válvula de un compresor recíprocante de refrigeración (Anexo 3).

## 4.3 Propuestas de experimentos de medición

La concepción del sistema de medición óptico tiene por objeto conocer el desplazamiento del sistema de válvulas tipo lengüeta, por simplicidad, se requiere el estudio exclusivo de la válvula, es decir, fuera del sistema de compresión. Trabajar solo con la válvula permite tener una idea de su comportamiento antes de estar inmersa en el compresor.

Para la investigación y compresión del sistema de válvulas a estudiar, se estableció la condición de suministrar aire a la válvula de succión a una presión constante, para que el desplazamiento de la válvula solo dependa de un incremento de presión en un intervalo de tiempo. También se considera la localización de la fuente de presión, y la máxima presión que se le puede hacer incidir antes de comenzar a vibrar.

Como resultado de lo anterior, se muestran dos propuestas como métodos de medición para la solución del problema, con el objetivo de evaluar su desempeño y así determinar cuál es la mejor técnica para medir máximos y mínimos desplazamientos.

### 4.3.1 Propuesta 1. Técnica de deflexión de haz láser

Una de las maneras de medir desplazamiento y entender el comportamiento de una de las válvulas de un compresor recíprocante, es mediante la técnica de deflexión de haz óptico, también conocida como técnica OBD (por sus siglas en inglés "Optical Beam Deflection").

Meyer y Amer introdujeron la técnica de deflexión de haz óptico usando un haz colimado de un láser HeNe, que era incidente en un espejo cuadrado unido a la parte posterior de un cantilever de tungsteno, como se muestra en la figura 4.1. El desplazamiento del cantilever se mide mediante la detección de la deflexión de un haz láser reflejado desde el cantilever. La deflexión es detectada por un detector sensible a la posición (detector Split).

En la figura 4.1, un haz de luz, normalmente de una fuente láser, es reflejado por la superficie superior de un cantilever. El cantilever está chapado en oro, lo que refleja la luz roja casi perfectamente. La deflexión del cantilever mecánico desvía el haz óptico, cambiando así la proporción de luz que cae sobre las dos mitades de la separación del fotodetector [41-43].

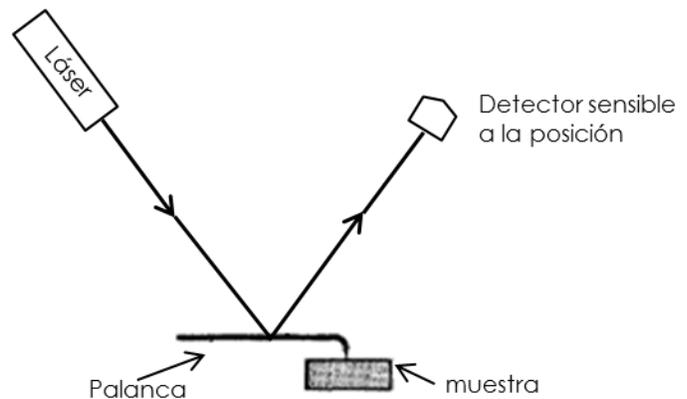


Figura 4.1. Detección por deflexión de haz óptico

Otro diagrama esquemático de una configuración básica de detección OBD se ilustra en la figura 4.2. En este caso, el desplazamiento,  $u$ , de la superficie hace que la posición del haz reflejado en el sensor de posición (PSD) se mueva desde el punto P a P'; en este caso, el cambio de la posición produce un cambio en la tensión de salida del PSD. El voltaje de salida,  $V$ , del PSD se puede calibrar en términos del desplazamiento real,  $u$ , mediante la medición de  $V$  para valores conocidos de desplazamientos de  $u$ .

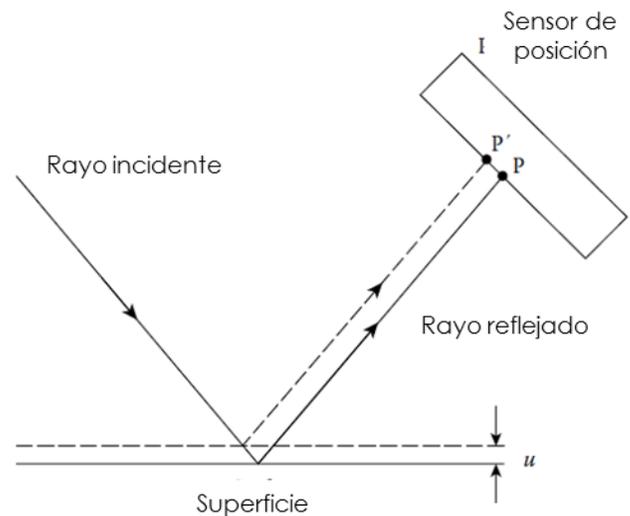


Figura 4.2. Configuración básica de OBD

La técnica OBD se ha utilizado en una variedad de aplicaciones, incluyendo deflexión fototérmica (PTOBD), medición absoluta de la atenuación óptica, PTOBD de formación de imágenes de superficie y estructura del subsuelo, microscopio de fuerza atómica, y caracterización de materiales.

También se ha utilizado como un sencillo, sensible y preciso método de medición de movimiento de superficie para transductor ultrasónico de imágenes [44, 45].

Existen varios elementos de detección que se pueden utilizar como componente del OBD; los más comunes son:

1. Un fotodetector detrás de una pantalla de forma afilada (efecto navaja). Cuya técnica se implementa en este trabajo [46, 47].
2. Una pequeña matriz de fotodetectores separados por áreas relativamente pequeñas.
3. Un sensor de posición continua, también conocido como fotodiodo de efecto lateral.

Las características de detección de un dispositivo OBD se determinan por el efecto del desplazamiento del haz óptico en la distribución de potencia del fotodetector. Dado que los rayos láser se usan comúnmente en los dispositivos OBD, el análisis implica la suposición de que la distribución espacial de la intensidad del haz en el plano perpendicular a la dirección de propagación de la onda es axialmente simétrica con una variación radial de Gauss.

#### 4.3.1.1 Descripción de propuesta por técnica OBD

La característica principal del sistema es que se puede construir con una configuración básica y simple de la técnica OBD, como se muestra en las figuras 4.1 y 4.2.

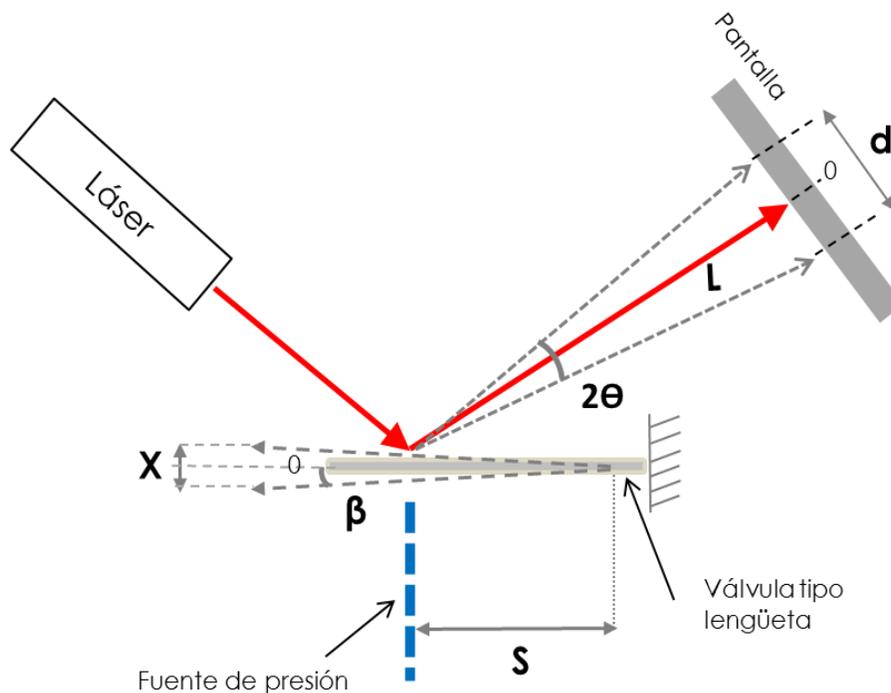
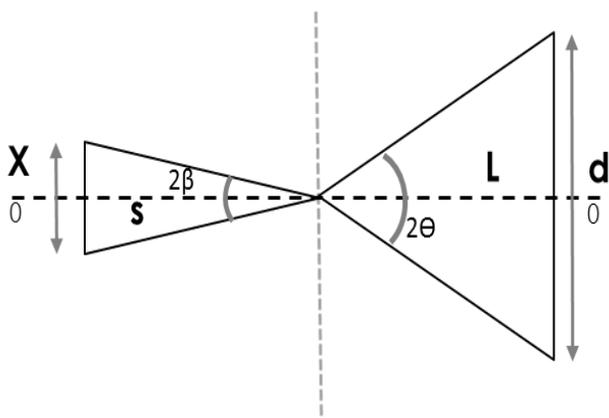


Figura 4.3. Esquema del dispositivo de medición de desplazamiento, basado en la técnica OBD.

El esquema del montaje propuesto para medir desplazamientos se ve en la figura 4.3, en donde se observa una fuente de luz láser, una válvula tipo lengüeta cuya superficie es reflejante y una pantalla a donde llega el haz reflejado. Con ayuda de este esquema se puede implementar un sistema para realizar mediciones del desplazamiento de la lengüeta, al incidirle una presión incremental de aire comprimido por un lado y por el otro un haz láser incidente. De acuerdo al esquema de la figura 4.3, se observa ciertas variables, las cuales se pueden relacionar para desarrollar ecuaciones matemáticas que permitan obtener el valor del desplazamiento  $X$ .

En primer lugar, sin presión de excitación al sistema se observa que un dispositivo emisor láser, emite un haz hacia la lengüeta de una válvula en voladizo, y este haz es reflejado hacia una pantalla a una distancia  $L$  (punto de incidencia del haz en la válvula, hasta la pantalla), reflejándose con el mismo ángulo con el cual fue emitido desde el láser. Ahora, si a la lengüeta de la válvula se le induce una presión constante, con la fuente de presión alejada a una cierta distancia, la lengüeta tendrá un desplazamiento  $X$  (producto de la presión a la que se somete) la cual es la que nos interesa saber. Este desplazamiento  $X$ , al ser proyectado en una pantalla fija, se puede observar como una línea con longitud  $d$ , y en consecuencia se formara un triángulo a un ángulo  $\theta$  producto del desplazamiento  $X$ . Si se toma como referencia el haz reflejado cuando la válvula no se le aplica una presión, vemos que el triángulo formado se divide en dos, por lo tanto, tendremos que el ángulo sería  $2\theta$ , y de esta manera podemos formular una relación como sigue:



**Figura 4.4. Relación trigonométrica del desplazamiento de la válvula y deflexión del haz láser. Sin restricción de movimiento con una fuente de presión alejada a una cierta distancia.**

$$2 \sin \theta \cong \frac{d}{L} \Rightarrow 2\theta = \frac{d}{L} \Rightarrow \theta = \frac{d}{2L} \quad \dots (4.1)$$

Para el desplazamiento  $X$  de la válvula, se hace un razonamiento similar:

$$2 \sin \beta \cong \frac{X}{s} \Rightarrow 2\beta = \frac{X}{s} \Rightarrow \beta = \frac{X}{2s} \quad \dots (4.2)$$

Entonces se puede relacionar  $\theta$  y  $\beta$ , considerando que:

$$\theta \approx \beta$$

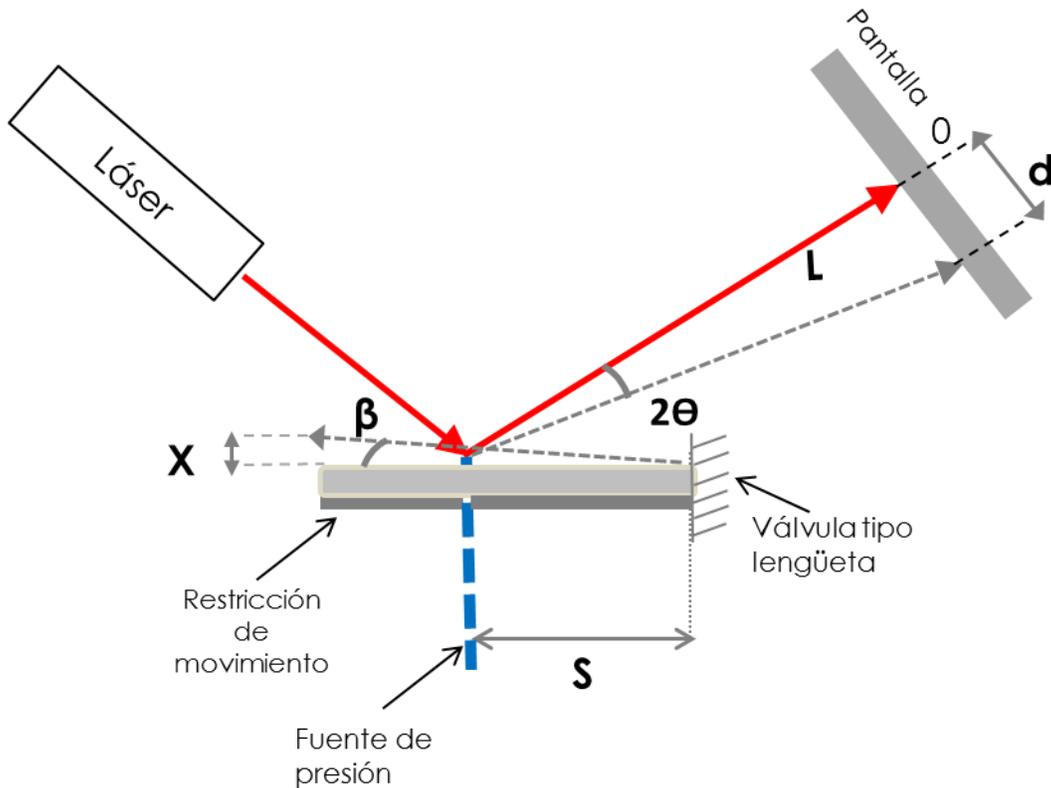
Asumiendo lo anterior, se sustituye en  $\theta$  y  $\beta$ , obteniendo la siguiente ecuación:

$$\frac{X}{2s} = \frac{d}{2L}$$

$$X = \left( \frac{d * s}{L} \right) \quad \dots (4.3)$$

La ecuación 4.3 permite calcular el desplazamiento  $X$  de la lengüeta al incidirle una presión, una vez que obtengamos los resultados de las mediciones de la longitud  $d$  [41, 48-50].

En el análisis anterior, la fuente de presión se encuentra alejada de la válvula, lo que hace que la lengüeta se mueva alternativamente, es decir, si se considera como posición inicial aquella donde no hay presión y la lengüeta cambia de forma sucesiva de sentido respecto de esta referencia, ha esto se le considera movimiento alternativo. Debido a que el comportamiento de la válvula cambia por la localización de la fuente de presión, se realiza el siguiente planteamiento.



**Figura 4.5. Esquema del dispositivo de medición de desplazamiento, basado en la técnica OBD con restricción de movimiento.**

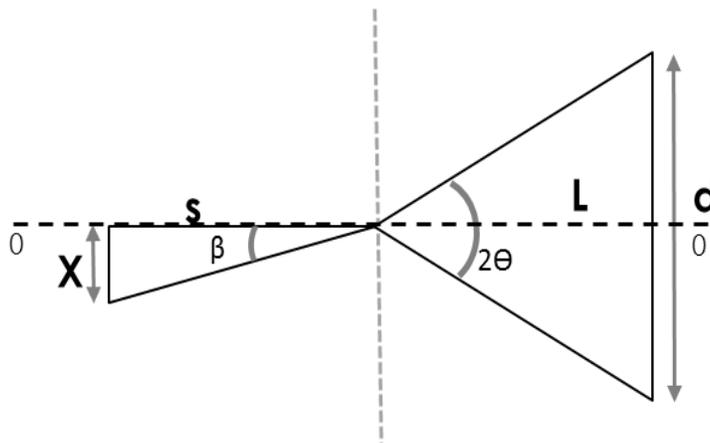
De acuerdo al esquema de la figura 4.5, se observa ciertas variables, las cuales se pueden relacionar, y de esta manera, desarrollar ecuaciones matemáticas que permitan obtener el valor del desplazamiento  $X$ , cuando se restringe el movimiento de la válvula en un sentido.

Primero, sin presión de excitación al sistema se observa que un dispositivo emisor de láser, emite un haz hacia la lengüeta de una válvula en voladizo, y este haz es reflejado hacia una pantalla a una distancia  $L$  (punto de incidencia del haz en la válvula, hasta la pantalla), al mismo ángulo al cual fue emitido del láser. Después, si a la lengüeta de la válvula se le induce una presión constante lo suficientemente cerca de su superficie, la lengüeta tendrá

un desplazamiento  $X$  (producto de la presión a la que se somete) la cual es la que nos interesa saber. Este desplazamiento  $X$ , al ser proyectado en una pantalla fija, se puede observar como una línea con longitud  $d$ , y en consecuencia se formara un triángulo a un ángulo  $\theta$  producto del desplazamiento  $X$ . Si se toma como referencia el haz reflejado cuando la válvula no tiene incidido una presión, vemos que el triángulo formado se divide en dos, por lo tanto, tendremos que el ángulo sería  $2\theta$ , y de esta manera podemos formular una relación como sigue:

$$2 \sin \theta \cong \frac{d}{L} \Rightarrow 2\theta = \frac{d}{L} \Rightarrow \theta = \frac{d}{2L} \quad \dots (4.4)$$

Para el desplazamiento  $X$  de la válvula, se hace un razonamiento similar:



$$\sin \beta \cong \frac{X}{S} \Rightarrow \beta = \frac{X}{S} \quad \dots (4.5)$$

Entonces se puede relacionar  $\theta$  y  $\beta$ , considerando que:

$$\theta \approx \beta$$

Asumiendo lo anterior, se sustituye en  $\theta$  y  $\beta$ , obteniendo la siguiente ecuación:

$$\frac{X}{S} = \frac{d}{2L}$$

**Figura 4.6. Relación trigonométrica del desplazamiento de la válvula y deflexión del haz láser. Con restricción de movimiento y una fuente de presión cerca de la superficie de la lengüeta.**

$$X = \left( \frac{d * S}{2L} \right) \quad \dots (4.6)$$

La ecuación 4.6 permite calcular el desplazamiento  $X$  de la lengüeta con restricción de movimiento al incidirle una presión, una vez que obtengamos los resultados de las mediciones de la longitud  $d$  [41, 48-50].

### 4.3.2 Propuesta 2. Interferómetro de Michelson

Otra manera de medir desplazamiento y entender el comportamiento del sistema de válvulas de un compresor recíprocante, es mediante un interferómetro de Michelson (IM).

La *interferencia* se puede definir brevemente como el debilitamiento o la amplificación mutua de las ondas (en nuestro caso luz coherente) al superponerse. Este fenómeno es inherente a todos los procesos ondulatorios [36].

Los instrumentos que usan el fenómeno de interferencia se llaman interferómetros, los cuales se pueden clasificar como: interferómetros de división del frente de onda e interferómetros de división de amplitud. Esta última clasificación es la que analiza en este trabajo.

La función de un interferómetro de división de amplitud, consiste en que una onda luminosa incide en un espejo semiplatedado o simplemente en una placa de vidrio. Parte de la onda será transmitida y la otra parte se reflejará. Las amplitudes tanto de la onda transmitida como la de la reflejada serán inferiores a la original, por lo tanto, podrá decirse que la amplitud ha sido "dividida".

Si las dos ondas separadas pueden reunirse de alguna manera en un detector, se producirá interferencia siempre y cuando la coherencia original entre las ondas no haya sido destruida. Si las longitudes de caminos difieren en una distancia mayor de la del tren de onda (por ejemplo, la longitud de coherencia), las partes reunidas en el detector corresponderían a diferentes grupos de onda [37].

Existe una gran cantidad de interferómetros de división de amplitud, pero se pueden mencionar tres configuraciones principales:

- a) Interferómetro de Michelson.
- b) Interferómetro de Mach- Zehnder.
- c) Interferómetro de Sagnac.

El primero de estos instrumentos es el que se analiza en este trabajo por su configuración básica y simple, del efecto de división de amplitud.

Por simplicidad, el interferómetro de Michelson es uno de los instrumentos de interferencia más conocido, por sus múltiples aplicaciones. Usando este instrumento, Michelson y Morley demostraron la inconsistencia de la teoría del éter, cuyo hecho contribuyó al desarrollo de la teoría de la relatividad.

La configuración del interferómetro de Michelson puede realizarse en fibra óptica o en óptica de volumen (con espejos), siendo esta última la configuración analizada en el presente apartado.

Un interferómetro de Michelson se basa en el principio de división de un haz luminoso por un divisor de haz o espejo semireflectivo, su propiedad principal es reflejar el 50 % de la luz incidente y transmitir el otro 50%. El haz reflejado (haz 1) llega a un espejo fijo y se refleja nuevamente hacia el divisor de haz para recombinarse con el haz transmitido proveniente de un espejo móvil (haz 2), de tal forma que las dos ondas llegarán en diferentes fases, porque recorren distancias distintas, la distancia  $L1$  será siempre fija y  $L2$  variará dependiendo del movimiento del espejo móvil. Por lo tanto, al ser diferente la fase, pero la amplitud y la frecuencia de los haces iguales se producirán franjas o patrones de interferencia, ver figura 4.7 [37,45].

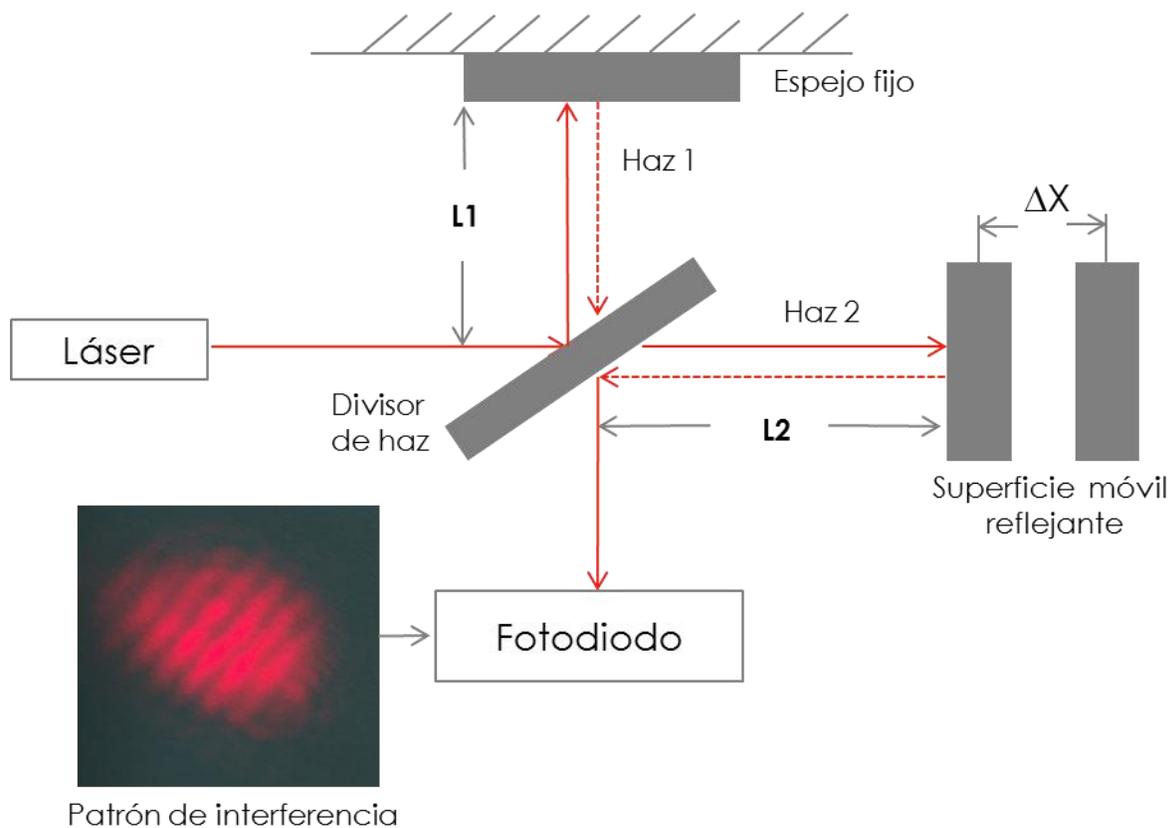


Figura 4.7. Esquema de un interferómetro de Michelson en óptica de volumen.

### 4.3.2.1 Descripción de propuesta por IM

La característica principal del sistema es que se puede construir con una configuración básica y simple de IM, como se muestra en las figura 4.7

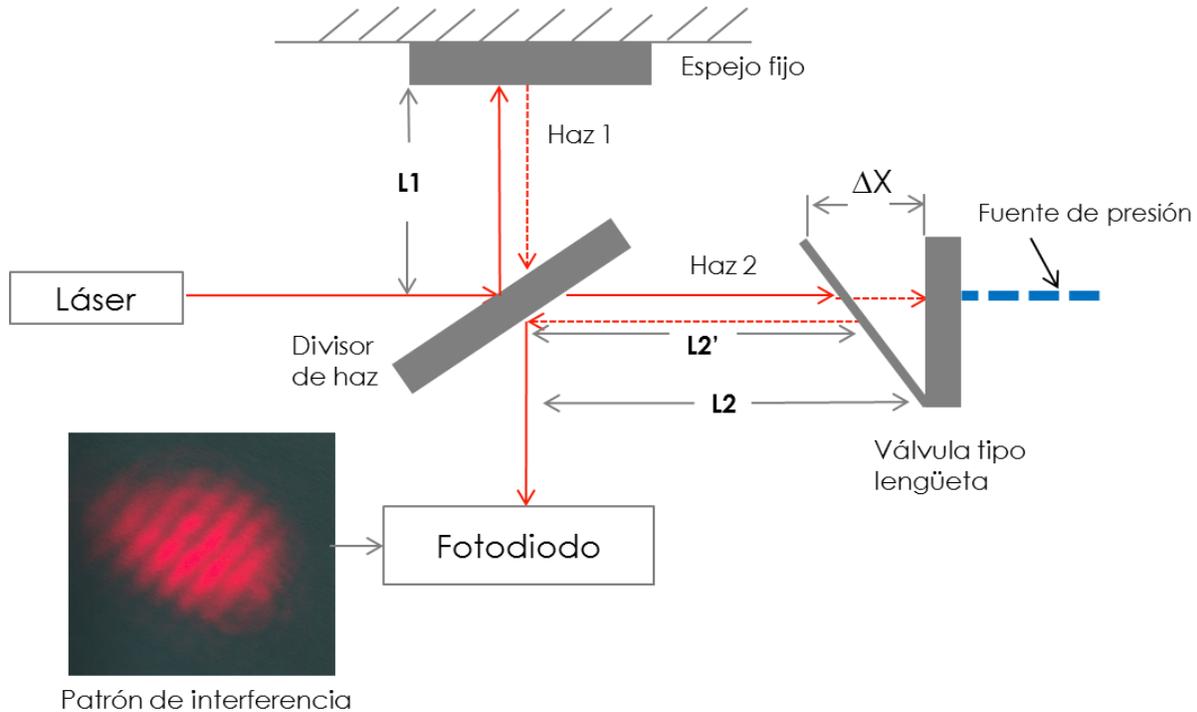


Figura 4.8. Esquema del dispositivo de medición basado en un interferómetro de Michelson.

De acuerdo al esquema de la figura 4.8, se observa ciertas variables, las cuales se pueden relacionar, y de esta manera, desarrollar ecuaciones matemáticas que permitan obtener el valor del desplazamiento  $\Delta X$ .

En primer lugar, sin presión de excitación al sistema se observa que un dispositivo emisor de láser, emite un haz hacia un divisor de haz, que divide el haz en dos: un segmento se desplaza a la derecha (haz 2) y el otro hacia arriba (haz 1). El haz 1 es reflejado hacia un espejo fijo a una distancia  $L1$  (punto de incidencia del haz en el divisor, hasta el espejo fijo) y se refleja nuevamente hacia el divisor de haz para recombinarse con el haz 2 transmitido proveniente de la válvula tipo lengüeta, a una distancia  $L2$  (punto de incidencia del haz en el divisor, hasta la válvula), de tal forma que los dos haz se unen y producen interferencia.

Después, si a la lengüeta de la válvula se le induce una presión constante lo suficientemente cerca de su superficie, la lengüeta tendrá un desplazamiento  $\Delta X$  (producto de la presión a la que se somete) la cual es la que nos interesa saber; entonces, al incidir el haz 2 en la lengüeta metálica, este tendrá de igual manera un desplazamiento  $L2'$  (producto del movimiento de la lengüeta), y en consecuencia se formara una diferencia en

los caminos ópticos (L1 y L2). Si se toma como referencia los caminos ópticos podemos formular una relación como sigue:

Cada haz se puede representar respectivamente por su amplitud [37]

$$E_1 = \frac{E_0}{2} \sin(\omega t + \varphi_1) \quad \dots (4.7)$$

$$E_2 = \frac{E_0}{2} \sin(\omega t + \varphi_2) \quad \dots (4.8)$$

Donde  $E_0$  es la amplitud de la onda que se propaga,  $\omega$  es la frecuencia angular y  $\varphi$  es la fase óptica.

Después de que los dos haz se unen en el divisor de haz y producen interferencia, la amplitud del haz resultante es igual a

$$E = \frac{E_0}{2} \sin(\omega t + \varphi_1) + \frac{E_0}{2} \sin(\omega t + \varphi_2) \quad \dots (4.9)$$

Al desarrollar la ecuación 4.9

$$E = \frac{E_0}{2} [\sin(\omega t) \cos(\varphi_1) + \cos(\omega t) \sin(\varphi_1)] + \frac{E_0}{2} [\sin(\omega t) \cos(\varphi_2) + \cos(\omega t) \sin(\varphi_2)] \quad \dots (4.10)$$

Al separar los términos que dependen del tiempo, se tiene

$$E = \frac{E_0}{2} [\cos(\varphi_1) + \cos(\varphi_2)] \sin(\omega t) + \frac{E_0}{2} [\sin(\varphi_1) + \sin(\varphi_2)] \cos(\omega t) \quad \dots (4.11)$$

Dado que los términos entre paréntesis son constantes en el tiempo, sea

$$E_0 \cos(\varphi) = \frac{E_0}{2} \cos(\varphi_1) + \frac{E_0}{2} \cos(\varphi_2) \quad \dots (4.12)$$

$$E_0 \sin(\varphi) = \frac{E_0}{2} \sin(\varphi_1) + \frac{E_0}{2} \sin(\varphi_2) \quad \dots (4.13)$$

No se trata de una sustitución obvia pero será legítima siempre que podamos resolver  $E_0$  y  $\varphi$ . Para ello elevamos al cuadrado y elevamos al cuadrado y se suman las ecuaciones (4.12) y (3.13) para obtener.

$$E_0^2 = \left(\frac{E_0}{2}\right)^2 + \left(\frac{E_0}{2}\right)^2 + 2 \left(\frac{E_0}{2}\right) \left(\frac{E_0}{2}\right) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \quad \dots (4.14)$$

La intensidad a la salida del interferómetro se obtiene tomando en cuenta que la intensidad de una onda es proporcional al cuadrado de su amplitud.

$$I \approx E^2 \quad \dots (4.15)$$

Para resolver la ecuación 4.14 en términos de la intensidad se utiliza la ecuación 4.15 y se obtiene la ecuación 4.16 que está en función de la diferencia de fase entre la señal del camino óptico L1 y L2.

$$I(\varphi) = \frac{I_0}{2} * [1 + \cos(\varphi)] \quad \dots (4.16)$$

Donde  $\varphi$  es la diferencia de fase y se define como:

$$\varphi = (\varphi_1 - \varphi_2) = kn\Delta x \quad \dots (4.17)$$

Donde  $\Delta X = L1 - L2$  es la diferencia de camino óptico,  $k = 2\pi/\lambda$  donde  $\lambda$  es la longitud de onda de luz y  $n=1$  es el índice de refracción en el aire. Reescribiendo la ecuación 4.16 para estar en función de la diferencia de camino óptico. Finalmente se obtiene la intensidad de la salida del interferómetro [37], ecuación 4.18.

$$I(\Delta X) = \frac{I_0}{2} * \left[ 1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} * \Delta X\right) \right] \quad \dots (4.18)$$

Se puede calcular la distancia que se mueve la lengüeta para pasar de una intensidad máxima a una mínima, analizando la ecuación 4.18.

- *Primer caso.* Cuando  $I(\Delta X) = I(\Delta X)_{m\acute{a}x}$   
Si  $I(\Delta X)_{m\acute{a}x} = I_0$  entonces  $\Delta X = 0$  ( $L1 = L2$ )
- *Segundo caso.* Cuando  $I(\Delta X) = I(\Delta X)_{m\acute{i}n}$   
Si  $I(\Delta X)_{m\acute{i}n} = 0$  entonces  $\Delta X = \lambda/2$

También se puede definir el sentido en el que se mueve la lengüeta, analizando la diferencia de camino óptico.

- Cuando  $L2 > L1$   
 $\Delta X = L1 - L2 \Rightarrow \Delta X (-)$  Es un desplazamiento negativo (movimiento hacia la derecha).
- Cuando  $L2 < L1$   
 $\Delta X = L1 - L2 \Rightarrow \Delta X (+)$  Es un desplazamiento positivo (movimiento hacia la izquierda).

Por último, despejando  $\Delta X$  de la ecuación 4.18 se conoce el desplazamiento de la válvula debido a un incremento de presión.

$$\Delta X(I) = \frac{\lambda}{2\pi} * \arccos\left(\frac{2I}{I_0} - 1\right) \quad [m] \dots (4.19)$$

## 4.4 Construcción de los instrumentos ópticos.

El objetivo de este apartado es presentar como cada una de las propuestas anteriormente mencionadas se integran con más elementos, para conformar un sensor de desplazamiento para caracterizar el movimiento de una válvula tipo lengüeta. Se aborda la descripción del montaje y material implementado en cada configuración; la fuente de presión que causa el desplazamiento de la lengüeta, así como la detección del haz a la salida de cada dispositivo.

### 4.4.1 Montaje de un dispositivo de deflexión de haz láser.

Un proceso fundamental en la operación del dispositivo OBD es el ajuste angular y de posicionamiento del haz que incide en la lengüeta de la válvula de succión. El ajuste debe ser realizado de forma precisa para lograr que el haz incida en el centro de la fuente de presión (tubo flexible de 6 mm). Para lograr esto es necesario implementar un sistema de posicionamiento mecánico en donde tanto la fuente de luz láser, como la válvula tipo lengüeta puedan ser desplazadas y orientadas a fin de hacer incidir el rayo láser en la superficie de la válvula. En la figura 4.9 se muestra un diagrama esquemático del sistema de posicionamiento mecánico.

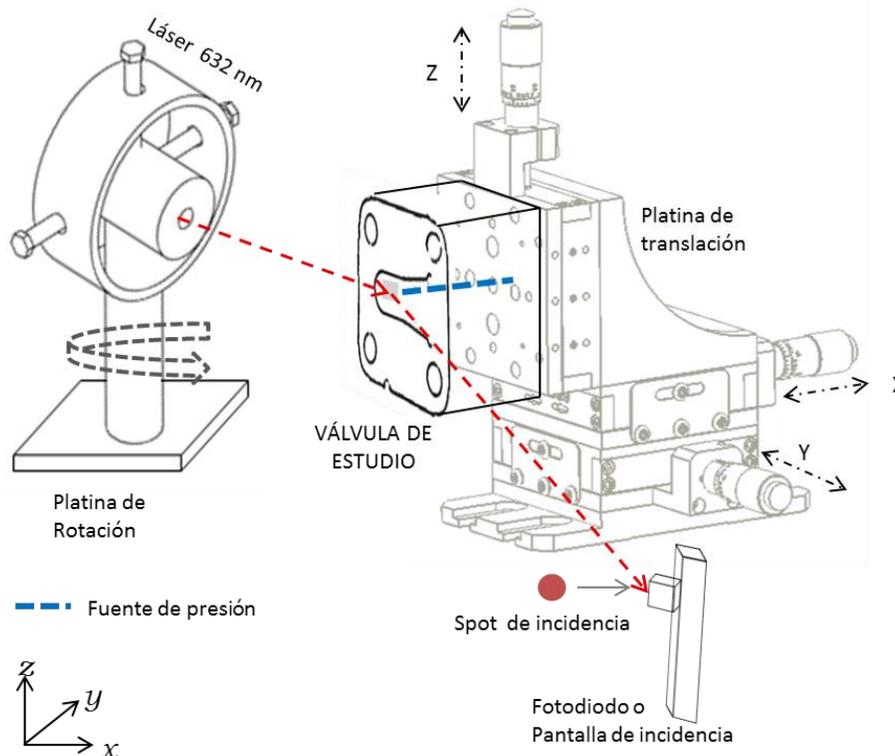


Figura 4.9. Sistema mecánico de posicionamiento para la fuente de luz láser y válvula de succión tipo lengüeta de un dispositivo de deflexión de haz láser.

El funcionamiento del sistema mecánico de posicionamiento se divide en dos partes, como se describe a continuación:

- a) La fuente de luz, un diodo láser de la marca *COHERENT*® emitiendo a una longitud de onda  $\lambda = 632$  [nm], se fija mediante tornillos a una base giratoria, la cual gira 360°. La rotación se hace de manera manual por medio de la base cilíndrica con la cual es posible posicionar angularmente el láser, para hacer incidir el haz en la válvula.
- b) La válvula de succión, se encuentra montada sobre una platina de desplazamiento lineal MT3/M de *Thorlabs*™. La translación se hace manualmente en los ejes x, y, y z, los cuales se asocian al desplazamiento horizontal, desplazamiento vertical y altura de posicionamiento de la válvula de succión tipo lengüeta, los movimientos tienen una resolución de 10 [ $\mu$ m]. Con este montaje es posible compensar la incidencia del haz láser al localizarlo con la base giratoria, mediante el ajuste de los ejes para lograr que el haz incida en la región donde se encuentra la fuente de presión.

Por otra parte, para lograr una estabilidad del sistema de medición se realizó la instalación sobre una mesa óptica flotada, la cual permite minimizar las vibraciones externas a nuestro sistema. Los elementos se encuentran sujetos a la mesa mediante tornillos Allen de 1/4".

En general, el sensor por deflexión de haz láser consta de los siguientes elementos:

- Una fuente de alta coherencia (láser) de *COHERENT*®.
- Una válvula de succión tipo lengüeta, de un compresor recíprocante.
- Sistema de posicionamiento. Mediante platinas se da el posicionamiento mecánico de la fuente de luz y de la válvula de succión.
- Un fotodiodo o pantalla de incidencias. Según el experimento se requiere un registro de la actividad de la válvula y se puede hacer mediante la señal de salida de un fotodiodo que varía al hacerle llegar el haz reflejado debido al desplazamiento de la válvula. Otra manera, es medir longitud de desplazamiento del spot láser sobre una pantalla y después relacionar con el análisis matemático que se vio en el apartado 4.3.1.
- Fuente de presión, que consiste en el suministro de aire comprimido que incide en la válvula, además de integrar un sensor de presión, para registrar los cambios de presión que inciden sobre la válvula de succión.

Cabe mencionar, según la necesidad del experimento se puede agregar u omitir elementos, esto se puede hacer debido a la facilidad de su instalación y su versatilidad.

#### 4.4.2 Montaje de un interferómetro de Michelson.

Como en el dispositivo anterior un interferómetro de Michelson, necesita implementar un sistema de posicionamiento mecánico en donde tanto la fuente de luz láser, como la válvula tipo lengüeta puedan ser desplazadas y orientadas a fin de hacer incidir el rayo láser en la superficie de la válvula, además de alinear el interferómetro de Michelson.

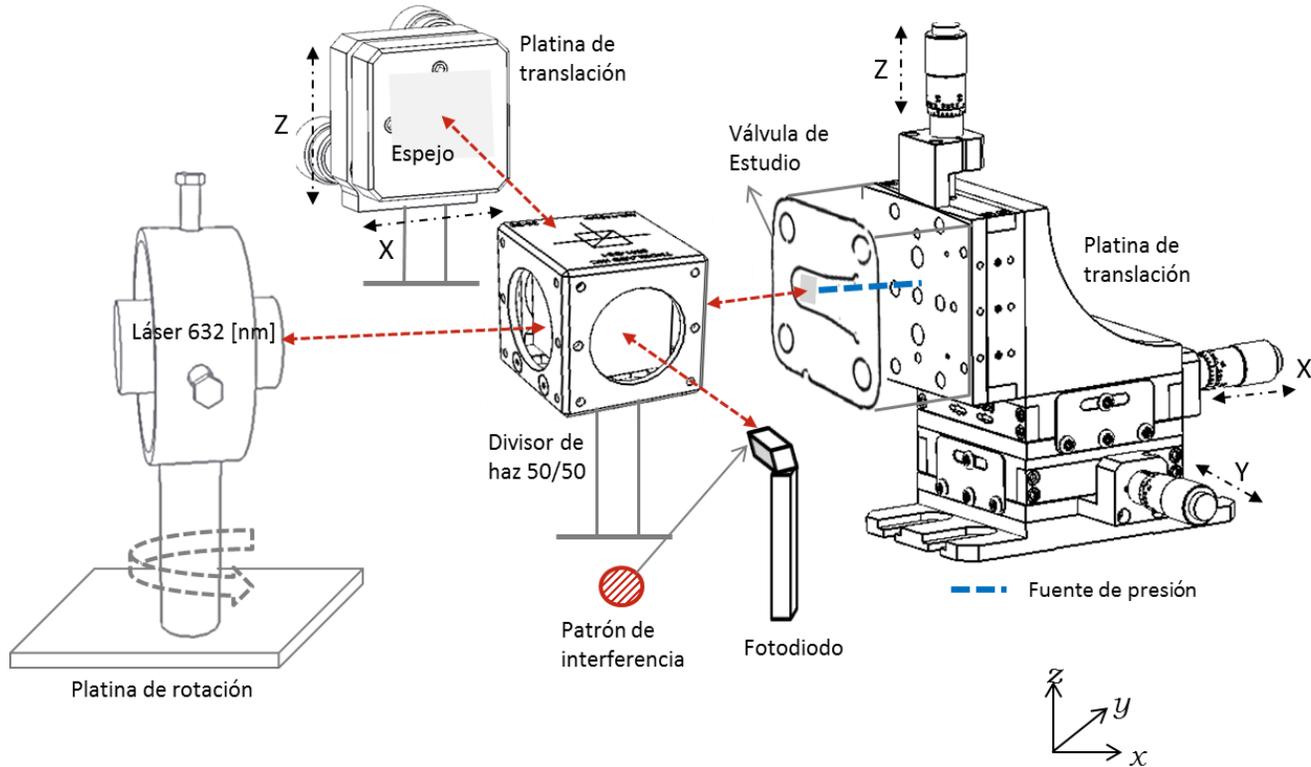


Figura 4.10. Esquema del sistema mecánico de posicionamiento para un interferómetro de Michelson.

Por otra parte, para lograr una estabilidad del sistema de medición se realizó la instalación sobre una mesa óptica flotada, la cual permite minimizar las vibraciones externas a nuestro sistema. Los elementos se encuentran sujetos a la mesa mediante tornillos Allen de 1/4".

El funcionamiento del sistema mecánico de posicionamiento se divide en cuatro partes, las cuales permiten alinear los elementos que conforman un interferómetro de Michelson, de tal manera que el rayo láser atraviese por cada uno de los elementos y se reconviene en el divisor de haz para que haya interferencia. Enseguida se describe cada parte que conforma el sistema de posicionamiento:

- La fuente de luz, un diodo láser de la marca COHERENT® emitiendo a una longitud de onda  $\lambda = 632$  [nm], se fija mediante tornillos a una base giratoria, la cual gira 360°. La rotación se hace de manera manual por medio de la base cilíndrica con la cual es posible posicionar angularmente el láser, para hacer incidir el haz en la válvula.

- b) La válvula de succión, se encuentra montada sobre una platina de desplazamiento lineal MT3/M de *Thorlabs™*. La translación se hace manualmente en los ejes x, y, y z, los cuales se asocian al desplazamiento horizontal, desplazamiento vertical y altura de posicionamiento de la válvula de succión tipo lengüeta, los movimientos tienen una resolución de 10 [µm]. Con este montaje es posible compensar la incidencia del haz láser al localizarlo con la base giratoria, mediante el ajuste de los ejes para lograr que el haz incida en la región donde se encuentra la fuente presión. La importancia de este montaje radica en el hecho de poder ajustar la posición de la válvula para lograr que el haz que incide en ella se refleje y se ubique por el mismo camino óptico de entrada.
- c) Un espejo fijo de referencia, se encuentra montado sobre una platina de desplazamiento lineal KMS/M de *Thorlabs™*. La translación se hace manualmente en los ejes X y Z, dado nuestro sistema de referencia, los cuales se asocian a un desplazamiento vertical y horizontal en el plano XZ. Con este montaje se puede ajustar la posición del haz que llega al espejo y hacer que se refleje de tal manera que se recombine con el haz que viene de la válvula de succión.
- d) Un Divisor de haz 50/50 CM1-BS1 de *Thorlabs™*, se fija mediante tornillos a una base giratoria, la cual gira 360°. La rotación se hace de manera manual por medio de la base cilíndrica con la cual es posible posicionar angularmente y alinear el divisor principalmente con la válvula tipo lengüeta.

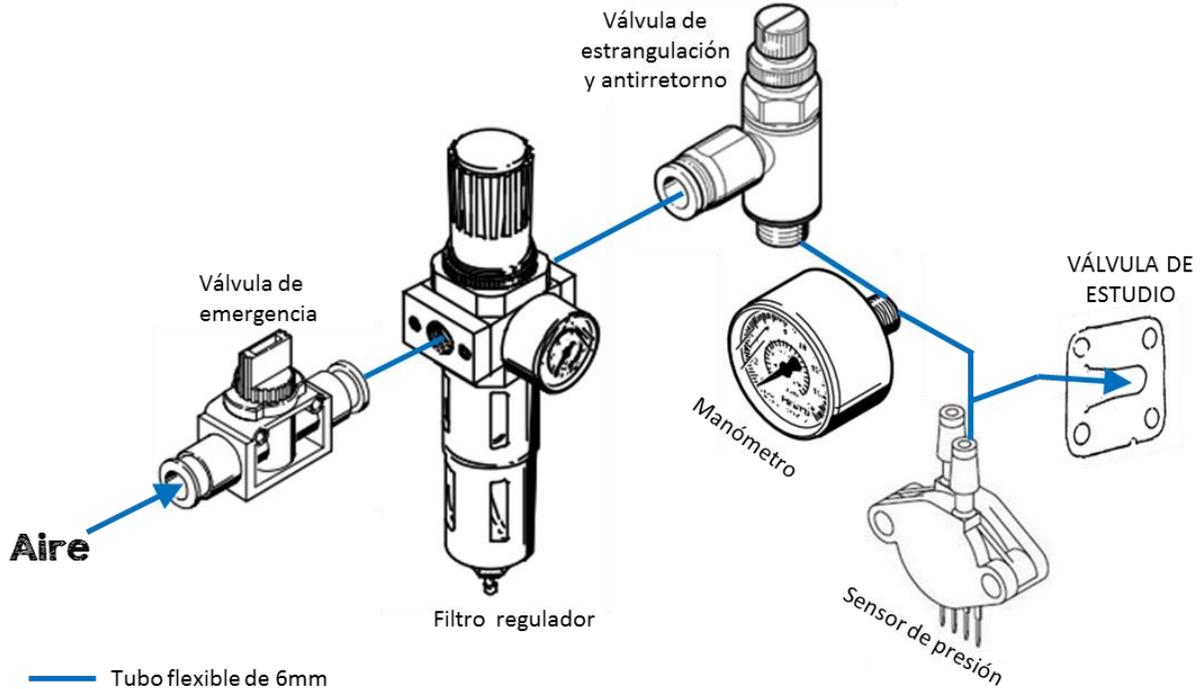
En general, el sensor basado en un interferómetro de Michelson consta de los siguientes elementos:

- Una fuente de alta coherencia (láser) de COHERENT®.
- Un divisor de haz 50/50 CM1-BS1 de *Thorlabs™*.
- Un espejo de alta reflexión.
- Una válvula de succión tipo lengüeta, de un compresor recíprocante.
- Sistema de posicionamiento. Mediante platinas se da el posicionamiento mecánico de: la fuente de luz, la válvula de succión, un espejo de referencia y un divisor de haz.
- Un Fotodiodo. Se requiere un registro de la actividad de la válvula y se puede hacer mediante la señal de salida de un fotodiodo que varía al hacerle llegar el haz reflejado debido al desplazamiento de la válvula.
- Fuente de presión, que consiste en el suministro de aire comprimido que incide en la válvula, además de integrar un sensor de presión, para registrar los cambios de presión que inciden sobre la válvula de succión.

Cabe mencionar, según la necesidad del experimento se puede agregar u omitir elementos, esto se puede hacer debido a la facilidad de su instalación y su versatilidad.

### 4.4.3 Fuente de presión.

La fuente de presión corresponde a una red de aire comprimido provista de las instalaciones del CCADET. Para nuestros fines, se realizó la siguiente instalación, observar figura 4.11.



**Figura 4.11. Diagrama esquemático de la fuente de presión acoplada a la válvula tipo lengüeta de un compresor recíprocante**

La instalación se compone, primero de una válvula de emergencia, la cual impide que el fluido siga circulando en el momento en el que se requiera por alguna falla en el sistema o en los demás elementos. Le sigue un filtro regulador, que combina las funciones de *filtrado* de partículas, agua condensada y aceite del aire comprimido; y *regulación* de la presión de funcionamiento de la instalación y compensar oscilaciones de presión. Después sigue una válvula de estrangulación y antirretorno, su función es regular caudal mediante el bloqueo del paso de aire en un sentido para fluir a través de una válvula de estrangulación, la sección de esta válvula puede regularse mediante un tornillo, dando a nuestro sistema un control más fino de la apertura y cierre de la fuente de presión hacia el sistema de estudio. Finalmente se tiene un manómetro seguido de un sensor de presión, ambos instrumentos tienen la función de medir la presión en la tubería.

La conexión entre cada elemento se hizo con tubo flexible de 6 [mm] de diámetro y racores (conexión rápida de tubería) rectos, en L y en T.

Para determinar la presión que incide en la válvula tipo lengüeta, se usa el sensor MPX2010DP que utiliza como transformación de energía una lámina metálica conocida

como galga extensiométrica (strain gauge), la cual está basada en el efecto piezorresistivo, ésta es la propiedad que poseen algunos materiales cuando se someten a esfuerzos y se deforman cambiando de manera nominal su resistencia eléctrica. Esta propiedad permite que la salida del sensor sea precisa y lineal, así como directamente proporcional a la presión aplicada. Las características del sensor de presión se muestran en la tabla 4.2.

Sensor de Presión MPX2010DP		
	Rango de Presión	0 a 10 [kPa]
	Presión máxima	75 [kPa]
	Señal de salida	0 a 26 [mV]
	Alimentación	10 a 16 [V]
	Sensibilidad	2.5 [mV/kPa]
	Acondicionador de señal	TL082

Tabla 4.2. Características del sensor de presión modelo MPX2010DP.

#### 4.4.4 Detección de la señal de salida.

Para determinar valores de desplazamiento de la válvula de succión que no sean medibles con un vernier para hacer una relación trigonométrica como en el caso del dispositivo de deflexión haz láser, o medir el desplazamiento de las líneas de interferencia del interferómetro de Michelson, debido a que no es percibido por el observador, se hace uso de un fotodiodo o fotodetector.

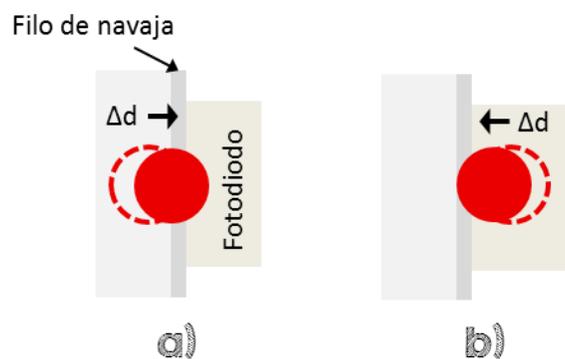
El desplazamiento de la válvula inducido por la fuente de presión, a ciertas presiones es más pequeño que el área activa de un fotodiodo, el valor del desplazamiento de la válvula no podrá ser captado mediante el fotodetector por sí solo, por lo tanto es necesario emplear una técnica de detección, por ejemplo el efecto navaja.

El método de efecto navaja se basa en hacer incidir el haz láser sobre el filo de una navaja, la cual es desplazada típicamente en micrómetros, tales desplazamientos se ven reflejados como una disminución en la potencia óptica medida con el fotodetector conforme el filo de la navaja bloquea los rayos de luz que inciden en el área de detección del fotodiodo. Dicho de otra manera, partiendo de un estado inicial donde el haz no incide en la navaja sino en el fotodiodo, se detecta la máxima potencia óptica, conforme el desplazamiento de la navaja se incrementa, el filo de la navaja bloquea cada vez más rayos de tal manera que la potencia óptica disminuye cuando mayor es el desplazamiento [46,47].

En los dispositivos OBD y IM, el desplazamiento del haz de salida del instrumento puede asociarse al efecto navaja si se considera qué quien se desplaza es el haz mientras que la

navaja queda fija, cuya configuración producirá el mismo resultado que cuando la navaja se desplaza y el haz se encuentra estático.

Tomando en cuenta lo anterior, el desplazamiento de la válvula asociado al desplazamiento del haz de salida del dispositivo de medición ( $\Delta d$ ), puede ser traducido como un decremento en la potencia óptica detectada por un fotodiodo acoplado con una navaja. También es posible asociar el desplazamiento del haz como un incremento en la potencia óptica detectada por un fotodiodo, siempre y cuando el estado inicial del haz incida en la navaja, conforme se desplace el haz cada vez más rayos incidirán en el fotodiodo de tal manera que la potencia óptica incrementa. En la figura 4.12, se muestra el esquema representado la operación del efecto navaja.



**Figura 4.12. Esquema de detección de la señal de salida para los dispositivos de medición de desplazamiento.**  
a) Haz que incide en la nava, b) haz que incide en el fotodiodo.

El fotodiodo encargado de la detección de la señal es un fotodetector FDS-100 de *Thorlabs™*, el cual puede funcionar a una longitud de onda  $\lambda=632$  [nm], sus características se resumen en la tabla 4.3.

Fotodiodo FDS100		
	Rango de longitud de onda	350-1100 [nm]
	Longitud de onda pico $\lambda$	980 [nm]
	Responsividad	0.60 [A/W]
	Alimentación máxima	25 [V]
	Responsividad	0.60 [A/W]
	Área activa	13 [mm <sup>2</sup> ]
	Acondicionador de señal	TL082

**Tabla 4.3. Especificaciones del fotodiodo FSD100.**

# 5. Análisis del comportamiento de la válvula de succión

---

*En este capítulo se describirán cada una de los protocolos de pruebas que se realizaron con los instrumentos diseñados en el capítulo anterior, así como los resultados generados para describir y caracterizar el comportamiento de la válvula de succión de un compresor recíprocante.*

## 5.1 Análisis de la válvula de succión con un dispositivo de deflexión de haz óptico (OBD).

*En este apartado se presentan dos pruebas aplicando el dispositivo de deflexión de haz óptico. En el primer montaje se considera la superficie de la válvula como un metal con reflexión cuasiespecular, y la fuente de presión se encuentra alejada de la válvula. En el segundo experimento, se coloca una superficie reflejante (espejo) sobre la región donde incide el flujo de aire y la fuente de presión se encuentra cerca de la válvula.*

### 5.1.1 Primera prueba con dispositivo OBD.

Como primer experimento, se implementa el dispositivo de deflexión de haz óptico sobre la superficie reflejante de la lengüeta y con la fuente de presión alejada de la válvula, induciendo un movimiento alternativo en la lengüeta de la válvula, es decir, un cambio sucesivo de sentido respecto de una posición inicial.

#### Objetivo de la medición por OBD

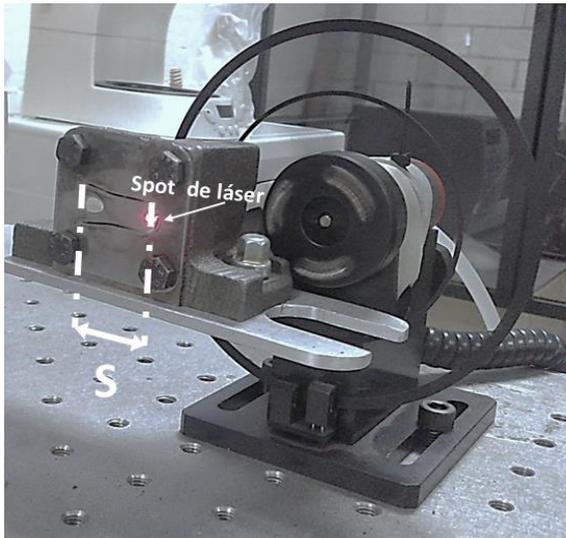
Determinar mediante el dispositivo de deflexión de haz óptico las curvas de desplazamiento contra presión, del movimiento de la válvula tipo lengüeta desde el momento que inicia su desplazamiento hasta el momento en que no sea medible por la técnica de medición.

#### Protocolo de prueba

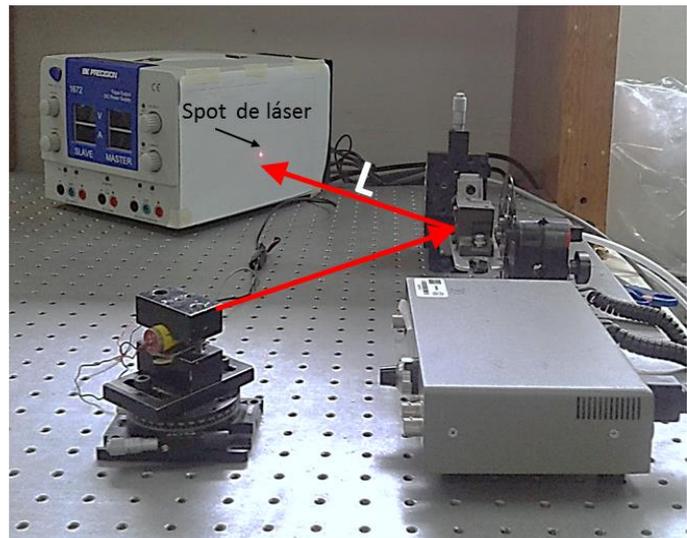
La prueba se realiza con una válvula tipo lengüeta obtenida de un compresor recíprocante Mabe (Anexo 3. Desensamble de un compresor). La válvula tiene una masa de 1.4942 [g].

**1.- Condiciones iniciales.** En la figura 5.1 se observa el montaje del dispositivo OBD sobre una mesa anti vibratoria. Además se aprecia la trayectoria del haz láser y el spot al incidir el rayo láser sobre la superficie de la lengüeta.

La fuente de presión (aire comprimido) se encuentra alineada con respecto al spot del rayo láser que incide en la lengüeta de la válvula, la presión en este punto es de 0 [kPa]. Un rotor hace girar un disco entre la lengüeta de la válvula y la presión incidente, esto vuelve más estable el desplazamiento del haz láser reflejado contra la pantalla (hoja cuadrículada). Con la ayuda de un variador de frecuencia se establece la velocidad a la cual gira el disco. La frecuencia establecida es de 56Hz.



a)



b)

**Figura 5.1. Montaje experimental del dispositivo OBD para medición de desplazamiento. a) Haz incidente sobre lengüeta y b) trayectoria del haz láser por los elementos.**

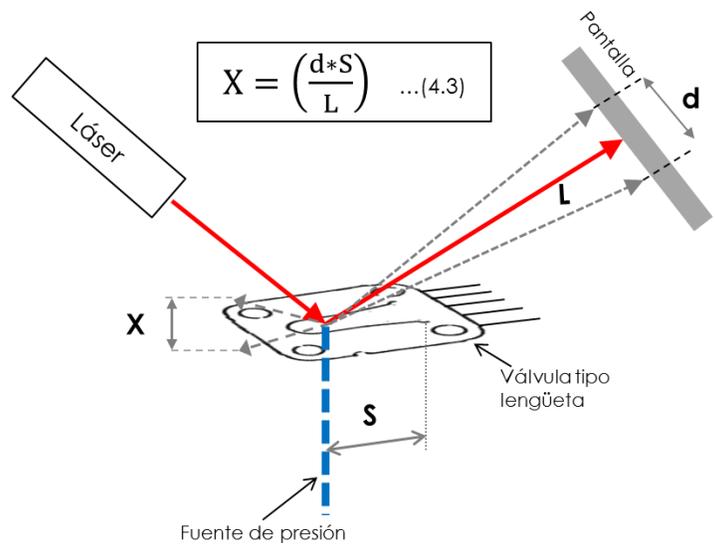
Se recomienda antes de iniciar con el experimento medir las siguientes longitudes:

- a) Distancia desde donde se encuentra empotrada la válvula, hasta el spot del rayo láser incidente en la superficie de la válvula (**S**).
- b) Distancia desde el spot en la superficie de la lengüeta hasta la pantalla (**L**).

**2.- Incremento de presión.** El siguiente paso es aumentar la presión de un punto distinto al inicial (0 kPa), una vez que esta sea establecida se monitorea con un transductor de presión (SPTW-P10R-G14-A-M12 de Festo), al inicio y al final de la prueba.

**3.- Medición de deflexión.** Se obtienen las mediciones de la longitud (**d**) en la pantalla (hoja cuadrículada) dada por la deflexión del haz láser originado por el incremento de presión. Se mide esta longitud con un vernier que tiene una resolución de 0.02 [mm], se repite la medición 15 veces, para una misma presión y una frecuencia de rotación del disco de 56 [Hz]. Se debe repetir el paso número dos, cuando se hayan recolectado la información necesaria para este paso.

**4.- Obtención del desplazamiento de la válvula de succión.** Recurriendo a la ecuación (4.3) que se planteó en la sección 4.3.1.1, se calcula el valor del desplazamiento de la lengüeta ( $X$ ), sustituyendo todos los valores obtenidos de las mediciones anteriores.



**Figura 5.2. Relación del desplazamiento de la válvula de succión para libre movimiento.**

**Análisis de resultados para dispositivo OBD**

**a) Valor reportado.** Toda medición es susceptible de error o incertidumbre que debe ser evaluada en magnitud. Por esta razón al reportar una medición, que no se puede precisar cuál es el valor exacto de ella, se especifica un intervalo. Cuantificar la incertidumbre es importante para poder estimar el grado de validez de los datos. Para esta prueba, se realizaron varias mediciones (15 repeticiones) de la longitud  $d$  a una misma presión y frecuencia de rotación de disco, resultando diferentes en cada repetición. Dado esta circunstancia toda medición  $d$ , debe ser expresada de la manera:  $X = X_0 \pm \delta X$  [51], donde  $X_0$  es el valor promedio que se calcula como en la ecuación (5.1) y  $\delta X$  es la magnitud del error o incertidumbre, se obtiene como en la ecuación (5.2).

El valor más probable está dado por:

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} \dots (5.1)$$

Donde  $X_1, X_2, \dots, X_n$  son las lecturas particulares para  $d$  y  $n$  es el número de repeticiones.

Se asigna como incertidumbre la desviación absoluta máxima (d.a.m), que es la mayor de las diferencias absolutas entre el valor promedio y las lecturas obtenidas. La mayor de las diferencias ocurre en los valores extremos de los datos [mínimo, máximo] [51].

$$\pm \delta_x = |valores\ extremos - \bar{X}| \dots (5.2)$$

Los resultados reportados de estas operaciones se puede observar en la tabla 5.1.

Presión [kPa]	d [mm]	
0.000	0.00	± 0.00
0.476	7.93	± 1.07
0.952	10.87	± 1.13
1.234	17.53	± 2.47
1.800	21.93	± 2.07
2.089	28.00	± 2.00
2.372	31.40	± 3.60
2.751	40.47	± 3.53
3.130	47.67	± 2.33
3.696	52.27	± 2.73

**Tabla 5.1. Valores de presión y longitud (d) debidos al movimiento alternativo de la válvula.**

Otra manera de evaluar la incertidumbre es mediante la incertidumbre relativa e incertidumbre porcentual. Como el valor real es desconocido, se usara como incertidumbre absoluta ( $\delta_x$ ) la incertidumbre asociada a la medición. Para calcular la incertidumbre relativa de la medición, efectuamos el cociente entre la incertidumbre absoluta y la magnitud observada [51]:

$$\delta_r\chi = \frac{\delta_x}{x_0} \quad \dots (5.3)$$

Otro concepto que se calculara es la incertidumbre porcentual ( $\delta_{\%}\chi$ ), que es la más usada para especificar la precisión de una medida y se evalúa multiplicado la incertidumbre relativa por 100% [51]:

$$\delta_{\%}\chi = (\delta_r\chi) \times 100\% \quad \dots (5.4)$$

Los resultados de las operaciones anteriores se ven en la tabla 5.2, para cada valor de presión.

Presión [kPa]	S <sub>r</sub> d	S <sub>%</sub> d [%]
0.000	0.000	
0.476	0.134	13.4
0.952	0.104	10.4
1.234	0.141	14.1
1.800	0.094	9.4
2.089	0.071	7.1
2.372	0.115	11.5
2.751	0.087	8.7
3.130	0.049	4.9
3.696	0.052	5.2

**Tabla 5.2. Incertidumbre relativa y porcentual de la longitud (d), para movimiento alternativo de la válvula.**

**b) Resultados: gráfica del desplazamiento X de la válvula por movimiento alternativo.**

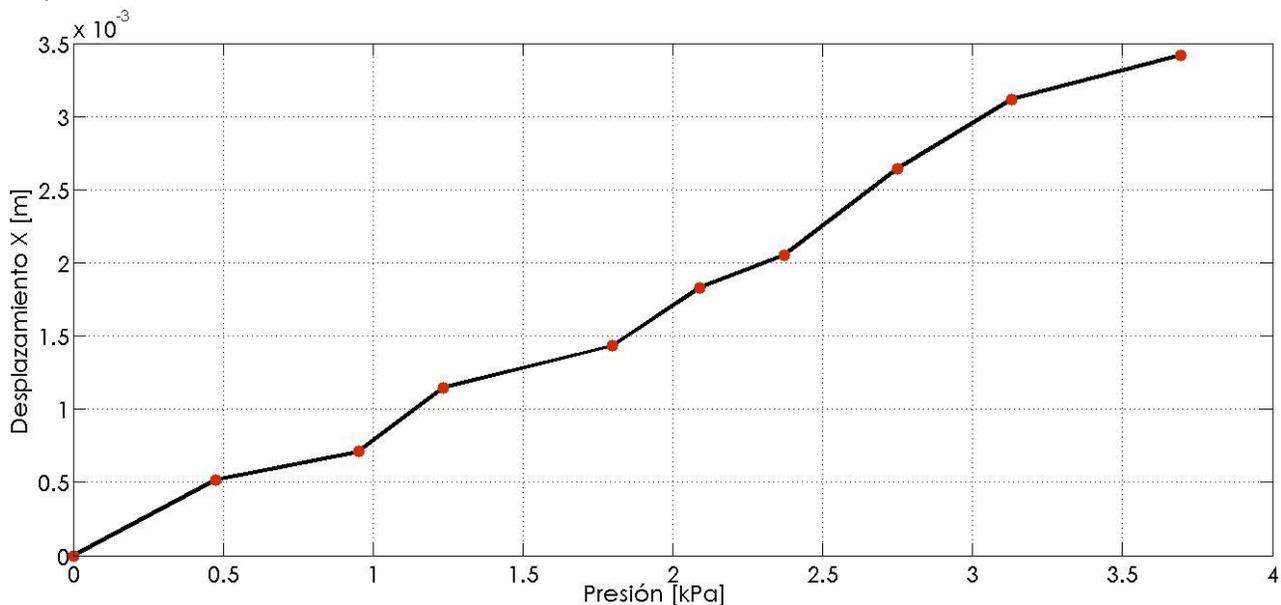
Con un flexómetro se midió, la longitud del haz reflectado **L**, dando un valor de  $(36.1 \pm 0.05)$  cm. Por otra parte con el vernier, se obtuvo **S**, que es la longitud del extremo del soporte de la leva hasta el punto de deflexión del haz láser, dando como resultado  $(2.46 \pm 0.01)$  cm.

Ahora, retomando la ecuación (4.3), se calcula el valor del desplazamiento **X** de la lengüeta, sustituyendo todos los valores obtenidos de las mediciones. De esta manera se obtienen los siguientes resultados para cada incremento de presión. También, se graficó los valores finales de **X** para observar el comportamiento de los resultados.

Presión [kPa]	$X \pm \delta_x$ [m]
0.000	0.00 $\pm$ 0.00
0.476	$0.54 \times 10^{-3} \pm 0.07 \times 10^{-3}$
0.952	$0.74 \times 10^{-3} \pm 0.08 \times 10^{-3}$
1.234	$1.19 \times 10^{-3} \pm 0.17 \times 10^{-3}$
1.800	$1.49 \times 10^{-3} \pm 0.15 \times 10^{-3}$
2.089	$1.91 \times 10^{-3} \pm 0.14 \times 10^{-3}$
2.372	$2.14 \times 10^{-3} \pm 0.25 \times 10^{-3}$
2.751	$2.76 \times 10^{-3} \pm 0.25 \times 10^{-3}$
3.130	$3.25 \times 10^{-3} \pm 0.17 \times 10^{-3}$
3.696	$3.56 \times 10^{-3} \pm 0.20 \times 10^{-3}$

**Tabla 5.3. Valores de presión y desplazamiento X, para movimiento libre de la válvula.**

En la figura 5.3, se muestra el comportamiento del desplazamiento **X** para cada incremento de presión.



**Figura 5.3. Respuesta del dispositivo OBD ante incrementos de presión ( $\Delta P=0.4$  kPa) para determinar el desplazamiento X de la válvula de succión.**

En la gráfica anterior, se observa la variación del desplazamiento  $X$  con respecto al incremento de presión. El rango de desplazamiento y presión son (0.52 – 3.42) mm y (0.476 – 3.696) kPa respectivamente. Se aprecia una relación cuasi lineal, es decir, con cada incremento promedio de 0.4 [kPa] la respuesta del sistema fue creciendo de manera proporcional, debido a la inestabilidad que presenta la lengüeta al flexionarse por el movimiento alternativo que se establece para esta prueba.

### Restricción de movimiento de la válvula.

Para lograr una estabilidad en las mediciones de la longitud  $d$  en la pantalla, originada por la deflexión del haz láser, se da como solución restringir el movimiento de la válvula como se puede observar en la figura 5.4. Con este montaje solo se permite a la lengüeta de la válvula moverse en un sentido, siendo el mismo en el que fluye la fuente de presión (aire comprimido), está se encuentra lo suficientemente cerca, de tal forma que se asegura el movimiento en un solo sentido.

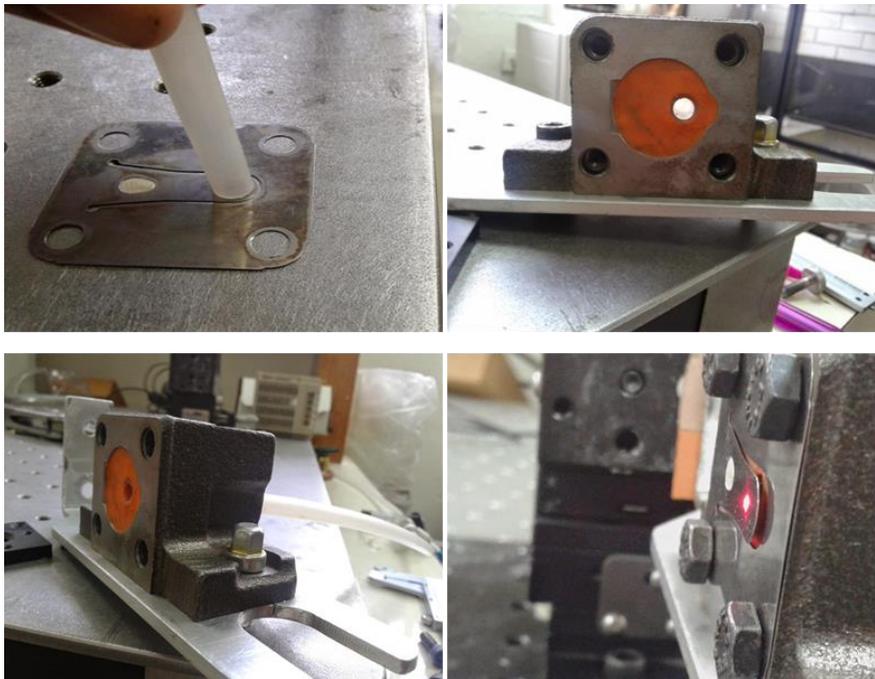


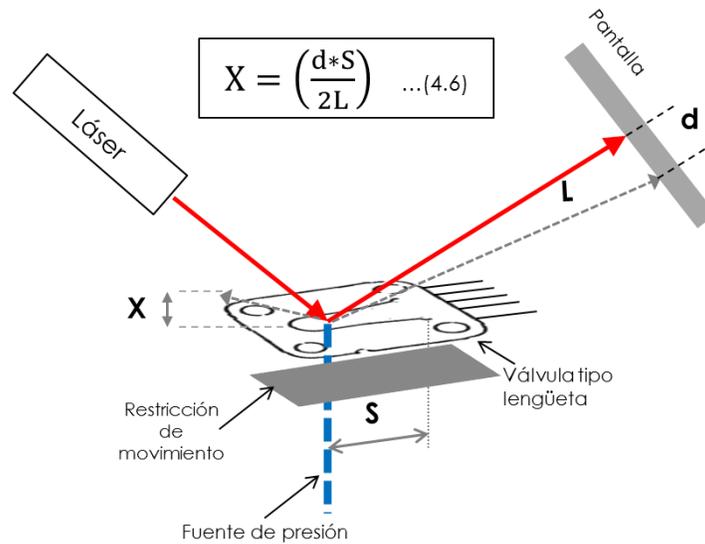
Figura. 5.4. Sistema para restringir el movimiento de la válvula tipo lengüeta.

Con la modificación anterior se retira el variador de frecuencias usado en el experimento pasado, siendo la única alteración en el sistema de medición, el montaje del dispositivo OBD queda distribuido de la misma manera como se ve en la figura 5.1. Para mejorar la sensibilidad del sistema se amplía la distancia  $L$ , cuya distancia debe recordarse como aquella desde el spot en la superficie de la lengüeta hasta la pantalla.

**c) Resultados: gráfica del desplazamiento  $X$  de la válvula, por movimiento restringido.**

Con un flexómetro se midió, la longitud del haz reflectado  $L$ , dando un valor de  $(177.6 \pm 0.05)$  cm. Por otra parte con el vernier, se obtuvo  $S$ , que es la longitud del extremo del soporte de la leva hasta el punto de deflexión del haz láser, dando como resultado  $(2.46 \pm 0.01)$  cm.

Se aplicó el método de medición antes descrito hasta el paso número tres, porque debido a la restricción del movimiento se recurre a la ecuación (4.6) que se planteó en el apartado 4.3.1.1, para calcular el valor del desplazamiento de la lengüeta ( $X$ ).



**Figura 5.5. Relación del desplazamiento de la válvula de succión por restricción de movimiento.**

Los resultados al aplicar el método, se reportan en la siguiente tabla.

Presión [kPa]	d [mm]	$S_T d$	$S_{\%} d$ [%]
0	0.00 ± 0.00	0.000	
0.376	13.63 ± 1.37	0.100	10.0
0.563	25.57 ± 0.97	0.038	3.8
1.221	40.00 ± 0.00	0.000	0.0
1.878	52.60 ± 1.20	0.023	2.3
2.379	64.59 ± 0.81	0.012	1.2
2.911	78.75 ± 0.85	0.011	1.1
4.382	99.33 ± 2.07	0.021	2.1
5.884	122.43 ± 2.97	0.024	2.4
7.575	139.77 ± 2.13	0.015	1.5

**Tabla 5.4. Valores de longitud (d) con su incertidumbre relativa y porcentual, por movimiento restringido de la válvula.**

Ahora, retomando la ecuación (4.6), se calcula el valor del desplazamiento  $X$  de la lengüeta, sustituyendo todos los valores obtenidos de las mediciones antes mencionadas. De esta manera se obtienen los siguientes resultados para cada incremento de presión. También, se graficó los valores finales de  $X$  para observar el comportamiento de los resultados.

Presión [kPa]	$X \pm \delta_x$ [m]
0.000	0.00 $\pm$ 0.00
0.376	0.09 $\times 10^{-3} \pm 0.02 \times 10^{-3}$
0.563	0.18 $\times 10^{-3} \pm 0.01 \times 10^{-3}$
1.221	0.28 $\times 10^{-3} \pm 0.00 \times 10^{-3}$
1.878	0.36 $\times 10^{-3} \pm 0.02 \times 10^{-3}$
2.379	0.45 $\times 10^{-3} \pm 0.01 \times 10^{-3}$
2.911	0.55 $\times 10^{-3} \pm 0.01 \times 10^{-3}$
4.382	0.69 $\times 10^{-3} \pm 0.03 \times 10^{-3}$
5.884	0.85 $\times 10^{-3} \pm 0.05 \times 10^{-3}$
7.575	0.97 $\times 10^{-3} \pm 0.03 \times 10^{-3}$

Tabla 5.5. Valores de presión y desplazamiento  $X$ , por movimiento restringido de la válvula de succión.

En la figura 5.6, se muestra el comportamiento del desplazamiento  $X$  para cada incremento de presión y con restricción de movimiento.

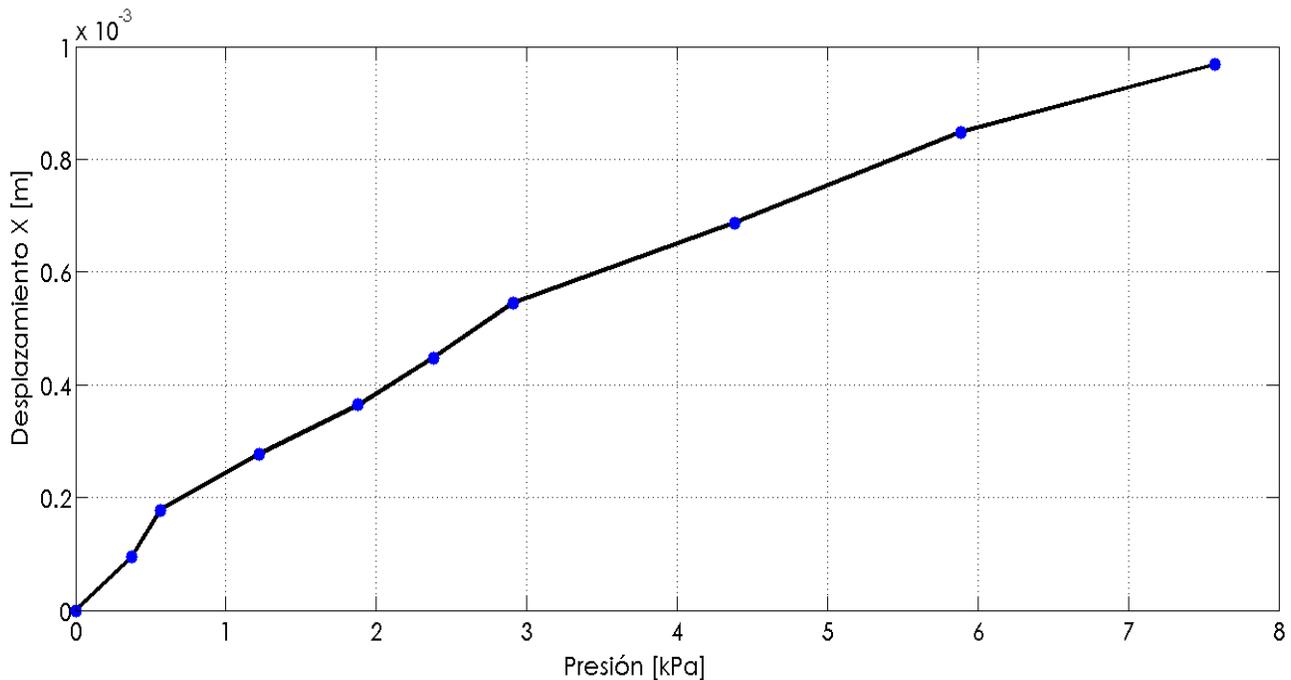


Figura 5.6. Respuesta del dispositivo OBD ante incrementos de presión ( $\Delta P=0.9$  kPa) para determinar el desplazamiento de la válvula de succión por movimiento restringido.

En la gráfica anterior, se observa la variación del desplazamiento  $X$  con respecto al incremento de presión. El rango de desplazamiento y presión son (0.094 – 0.968) mm y (0.376 – 7.575) kPa respectivamente. Se aprecia una relación casi lineal, es decir, con cada incremento promedio de 0.9 [kPa] la respuesta del sistema fue creciendo de manera proporcional.

Por otra parte, la inestabilidad que se presentaba en la lengüeta se logra controlar mediante el sistema de restricción, siendo menor la incertidumbre de las mediciones para la longitud ( $d$ ) y por consiguiente es repetible la toma de mediciones. Así mismo, incrementar la distancia  $L$  contribuyó a la sensibilidad del instrumento, porque los valores de  $d$  incrementaron y con ello se facilita la toma de medidas de esta variable.

### Acondicionamiento de la fuente de presión y restricción de movimiento de la válvula.

Para complementar esta curva de aprendizaje, se implementa finalmente la configuración de la fuente de presión (vista en el apartado 4.4.3 de esta tesis), cuyo esquema se muestra en la figura 4.9. Dicha configuración será usada de aquí en adelante.

Considerando el método de medición para cuando la válvula se encuentra restringida, se obtuvieron los siguientes datos, ver tabla 5.6.

Presión [kPa]	$d$ [mm]	$S_{\tau d}$	$S_{\%d}$ [%]
0.000	0.00 ± 0.00	0.0000	
2.666	43.50 ± 1.80	0.0414	4.14
4.000	60.97 ± 1.03	0.0169	1.69
5.333	75.11 ± 0.19	0.0025	0.25
6.666	88.20 ± 0.80	0.0091	0.91
7.999	98.90 ± 0.90	0.0091	0.91
9.333	109.67 ± 0.67	0.0061	0.61
10.666	119.20 ± 0.20	0.0017	0.17
11.999	128.00 ± 1.00	0.0078	0.78
13.332	136.40 ± 0.80	0.0059	0.59
14.665	144.87 ± 0.93	0.0064	0.64
15.999	153.37 ± 0.87	0.0057	0.57
17.332	162.67 ± 0.53	0.0033	0.33
18.665	170.13 ± 0.93	0.0055	0.55

**Tabla 5.6. Valores de longitud ( $d$ ) con su incertidumbre relativa y porcentual, por movimiento restringido de la válvula y acondicionamiento de la fuente de presión.**

Con un flexómetro se midió, la longitud del haz reflejado **L**, dando un valor de  $(136.5 \pm 0.05)$  cm. Por otra parte con el vernier, se obtuvo **S**, que es la longitud del extremo del soporte de la leva hasta el punto de deflexión del haz láser, dando como resultado  $(1.98 \pm 0.01)$  cm.

Retomando la ecuación (4.6), se calcula el valor del desplazamiento **X** de la lengüeta, sustituyendo todos los valores obtenidos de las mediciones antes mencionadas. De esta manera se obtienen los siguientes resultados para cada incremento de presión. También, se graficó los valores finales de **X** para observar el comportamiento de los resultados.

Presión [kPa]	$X \pm \delta_x$ [m]		
0.000	0.00	±	0.00
2.666	$0.32 \times 10^{-3}$	±	$0.03 \times 10^{-3}$
4.000	$0.44 \times 10^{-3}$	±	$0.02 \times 10^{-3}$
5.333	$0.54 \times 10^{-3}$	±	$0.01 \times 10^{-3}$
6.666	$0.64 \times 10^{-3}$	±	$0.02 \times 10^{-3}$
7.999	$0.72 \times 10^{-3}$	±	$0.02 \times 10^{-3}$
9.333	$0.80 \times 10^{-3}$	±	$0.01 \times 10^{-3}$
10.666	$0.86 \times 10^{-3}$	±	$0.01 \times 10^{-3}$
11.999	$0.93 \times 10^{-3}$	±	$0.02 \times 10^{-3}$
13.332	$0.99 \times 10^{-3}$	±	$0.02 \times 10^{-3}$
14.665	$1.05 \times 10^{-3}$	±	$0.02 \times 10^{-3}$
15.999	$1.11 \times 10^{-3}$	±	$0.02 \times 10^{-3}$
17.332	$1.18 \times 10^{-3}$	±	$0.01 \times 10^{-3}$
18.665	$1.23 \times 10^{-3}$	±	$0.02 \times 10^{-3}$

**Tabla 5.7. Valores de presión y desplazamiento X por movimiento restringido de la válvula y acondicionamiento de la fuente de presión.**

La gráfica de la figura 5.7, presenta la variación del desplazamiento **X** con respecto al incremento de presión. El rango de desplazamiento y presión son  $(0.32- 1.23)$  mm y  $(2.666 - 18.665)$  kPa respectivamente. Su dispersión es cuasi lineal, es decir, con cada incremento de 1.33 [kPa] la respuesta del sistema fue creciendo de manera proporcional.

Por otra parte, la inestabilidad que se presentaba en la fuente de presión se logra controlar mediante el sistema de regulación de caudal, siendo menor la incertidumbre de las mediciones para la longitud (**d**) y por consiguiente es repetible la toma de mediciones. Así mismo, colocar el spot del láser a la mitad de la fuente de presión (tubo flexible de 6 mm) contribuye a la sensibilidad del instrumento, porque el spot del láser se encuentra estratégicamente localizado en un área afectada por la perturbación del incremento de presión.

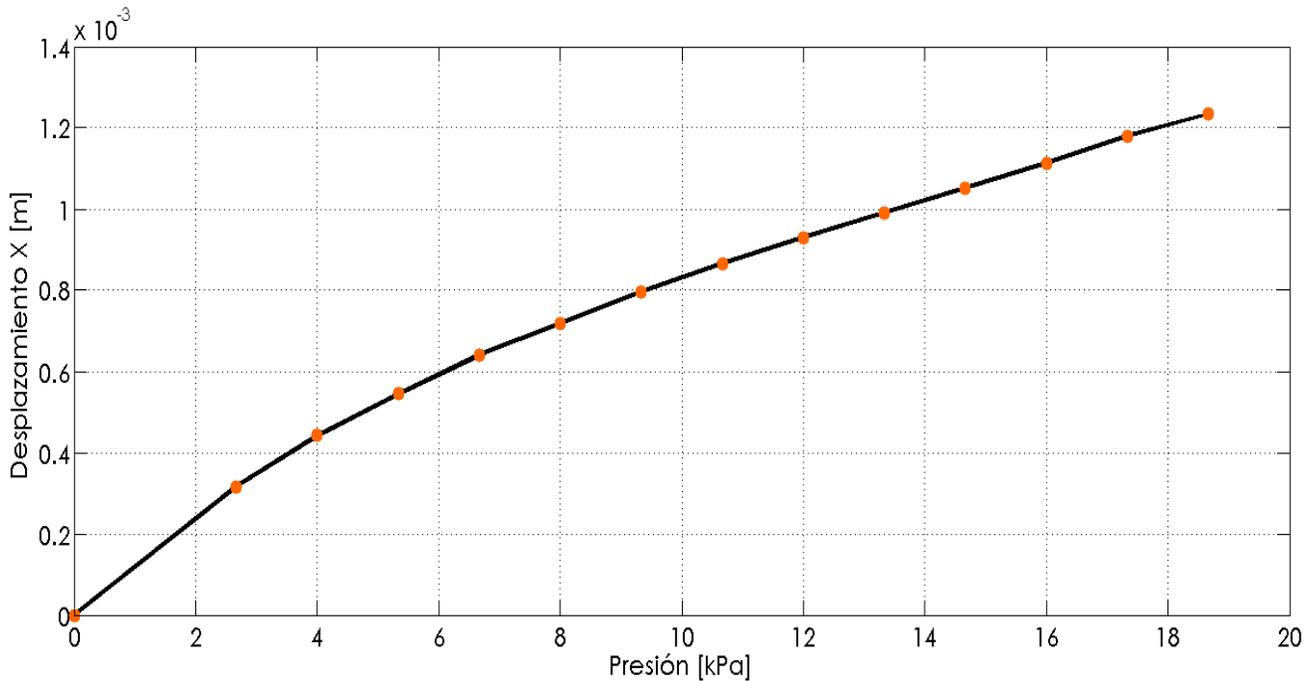


Figura 5.7. Respuesta del dispositivo OBD ante incrementos de presión ( $\Delta P=1.33$  kPa) para determinar el desplazamiento de la válvula de succión de movimiento restringido.

### Discusión sobre la primera prueba con dispositivo OBD

En las primeras mediciones, se permite observar mediante la incidencia de haz láser el desplazamiento positivo –negativo de la lengüeta de la válvula y a su vez cuantificar este desplazamiento. Sin embargo, el valor cuantificado es absoluto, es decir, este valor toma en cuenta un desplazamiento positivo- negativo, sin poder determinar cuál es el valor positivo o negativo desde el punto de referencia.

Por lo anterior, se decide restringir el movimiento para determinar el desplazamiento de alguno de los sentidos de movimiento de la lengüeta, siendo este el “sentido positivo”, es decir aquel que tiene la misma dirección y sentido del flujo incidente, de esta manera se permite cuantificar el rango del desplazamiento en la apertura positiva (ver figura 5.4).

Comparando los resultados obtenidos: en la primera prueba se observa que los desplazamientos de **X** alcanzaron la magnitud  $3.56 \times 10^{-3}$  [m] a una presión de 3.7 [kPa], debido a la inestabilidad que presentaba la longitud **d** debido al movimiento alternativo de la lengüeta; en la segunda prueba se obtuvo como desplazamiento máximo de **X** la magnitud  $0.968 \times 10^{-3}$  [m] a una presión de 7.6 [kPa], por el control de la fuente de presión y la restricción del movimiento; y finalmente la tercera prueba reporta como máximo desplazamiento de **X** la magnitud  $1.23 \times 10^{-3}$  [m] a una presión de 18.7 [kPa], cuyas mediciones se caracterizan por su repetibilidad y por una incertidumbre por debajo del 5%.

## 5.1.2 Segunda prueba con dispositivo OBD.

Como resultado de mejorar la calidad de las mediciones anteriores, se implementa la configuración anterior del dispositivo de deflexión de haz óptico, con la diferencia de una superficie reflejante (espejo) sobre la región donde incide el flujo de aire. La fuente de presión se encuentra lo suficientemente cerca, de tal forma que se asegura el movimiento en una solo sentido, es decir, si se considera como posición inicial aquella donde no hay presión y la lengüeta siempre se mueve en la misma dirección y sentido respecto de la referencia, diremos que tiene un movimiento restringido.

El motivo de colocar una superficie reflejante sobre la válvula, es debido a que la superficie de la válvula presenta una mezcla de reflexión especular y reflexión difusa, mientras que la superficie propuesta presenta una reflexión especular.

### Objetivo de la medición por OBD

Determinar mediante el dispositivo de reflexión de haz óptico las curvas de desplazamiento contra presión, del movimiento de la válvula tipo lengüeta desde el momento que inicia su desplazamiento hasta el momento en que la válvula comience a vibrar.

### Protocolo de prueba

La prueba se realiza con una válvula tipo lengüeta obtenida de un compresor recíprocante Mabe (Anexo 3. Desensamble de un compresor). La válvula junto con la superficie reflejante tiene una masa de 1.5605 [g].

**1.- Condiciones iniciales.** En la figura 5.9 se observa el montaje del dispositivo OBD sobre una mesa anti vibratoria. Además se aprecia la trayectoria del haz láser a través de la válvula y la pantalla de incidencia.

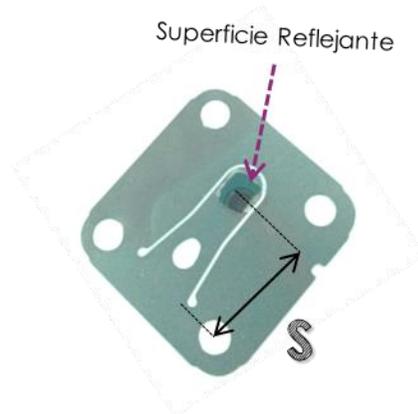


Figura 5.8 Válvula con superficie reflejante

La fuente de presión (aire comprimido) se encuentra alineada respecto al spot del rayo incidente en la lengüeta de la válvula, la presión en este punto es de 0 [kPa] y por lo tanto el valor inicial de  $d$  es 0 [m].

Se recomienda antes de iniciar con el experimento medir las siguientes longitudes:

- Distancia desde donde se encuentra empotrada la válvula, hasta donde se encuentra el spot del rayo incidente en la superficie de la válvula ( $S$ ).
- Distancia desde el spot en la superficie de la lengüeta hasta la pantalla ( $L$ ).

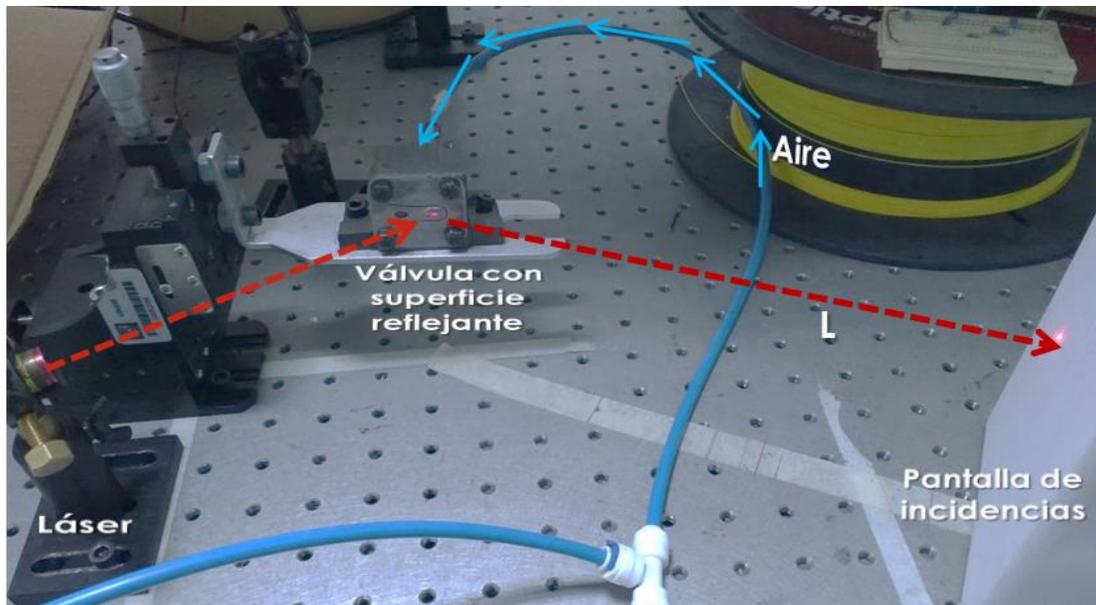


Figura 5.9. Montaje experimental del dispositivo OBD para medición de desplazamiento X, apoyado de una superficie reflejante (espejo).

**2.- Incremento de presión.** El siguiente paso es aumentar la presión de un punto distinto al inicial (0 kPa), una vez que esta sea establecida se monitorea con un transductor de presión (MPX2010DP), durante toda la prueba.

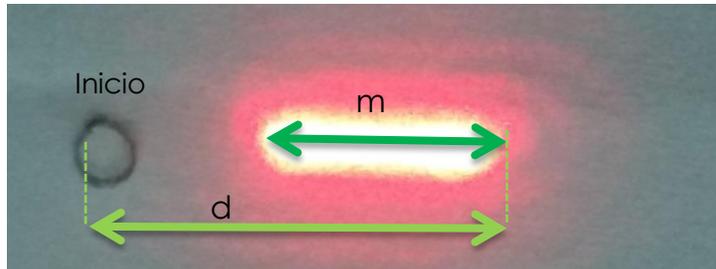
**3.- Mediciones de deflexión láser.**

- a) Se obtienen mediciones de la longitud **d** con un vernier que tiene una resolución de 0.02 mm de resolución, se repite la medición 2 veces, para una misma presión. Se aplican incrementos de 1.33 [kPa] hasta llegar al máximo desplazamiento. Se debe repetir el paso número dos, cuando se hayan recolectado la información necesaria para este paso.
- b) Se obtienen las mediciones de la longitud **d** en la pantalla (pared) dada por la deflexión del haz láser originado por el incremento de presión. Se mide esta distancia con un vernier que tiene una resolución de 0.02 [mm], se repite la medición 2 veces, para una misma presión. Se aplican incrementos de 0.27 [kPa] hasta llegar 2.67 [kPa]. Se debe repetir el paso número dos, cuando se hayan recolectado la información necesaria para este paso.

**4.- Medición de resonancia y mínimo detectable del instrumento.**

- c) Se realizan incrementos de presión, buscando zonas de resonancia de la válvula, cuyas zonas se caracterizan por formar una especie de línea con el spot del rayo láser, ver figura 5.10. Encontrada la zona de resonancia a una determinada presión,

se mide el tamaño del alargamiento del spot (**m**) y longitud **d**. Para medir la frecuencia de resonancia, se pondrá como pantalla de incidencia un fotodetector, con el cuál mediante la técnica de efecto navaja se obtendrá una señal que oscila a la frecuencia de la lengüeta.



**Figura 5.10. Alargamiento del spot (m) debido a una frecuencia de resonancia de la válvula de succión**

- d) Para determinar el mínimo detectable del instrumento, se varía **L**, la longitud de la lengüeta a la pantalla (fotodetector), se busca una longitud en la cual haya un cambio considerable en la amplitud de la señal de un fotodetector, para un desplazamiento inmediato al estado de reposo.

Se obtienen mediciones de un desplazamiento conocido y un desplazamiento inmediato al estado de reposo, para ambos estados se mide presión e intensidad.

**5.- Obtención del desplazamiento de la válvula de succión.** Debido a la restricción del movimiento se recurre a la ecuación (4.6) que se planteó en el apartado 4.3.1.1, para calcular el valor del desplazamiento de la lengüeta (**X**), sustituyendo todos los valores obtenidos de las mediciones anteriores.

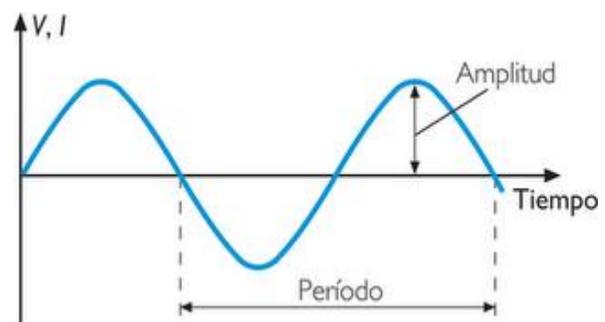
**6.- Obtención de frecuencia de resonancia y mínimo detectable.**

Para determinar la frecuencia de resonancia, se espera tener una señal analógica en la que es variable su amplitud y periodo en función del tiempo, sobre todo el periodo de la señal para calcular la frecuencia mediante la siguiente relación:

$$f = \frac{1}{T} \text{ [Hz]} \quad \dots (5.5)$$

Donde T, es el periodo en segundos.

Para el mínimo detectable se espera tener una señal analógica en la que es variable su amplitud en función del tiempo, para hacer una relación de magnitudes de la amplitud y presión.



**Figura 5.11. Señal analógica en función del tiempo**

## Análisis de resultados de la segunda prueba con el dispositivo OBD.

### a) GRÁFICAS DE DESPLAZAMIENTO X, HASTA UN DESPLAZAMIENTO MÁXIMO

Una vez obtenidos los resultados por el dispositivo OBD, se midió la longitud del haz reflectado **L**, dando un valor de 85.5 [cm]. De igual manera, se obtuvo **S**, que es la longitud del extremo del soporte de la lengüeta y el punto de reflexión del haz laser en la placa de metal, dando como resultado 2.16 [cm].

Ahora, retomando la ecuación (4.6), se calcula el valor de desplazamiento de la lengüeta **X**. De esta manera, se obtienen los siguientes resultados para incrementos de presión promedio de 1.21 [kPa].

Presión [kPa]	$X \pm \delta_x$ [m]		
0.000	0.00	$\pm$	0.00
1.259	$0.16 \times 10^{-3}$	$\pm$	$0.001 \times 10^{-3}$
2.596	$0.27 \times 10^{-3}$	$\pm$	$0.002 \times 10^{-3}$
3.946	$0.37 \times 10^{-3}$	$\pm$	$0.002 \times 10^{-3}$
5.280	$0.43 \times 10^{-3}$	$\pm$	$0.003 \times 10^{-3}$
6.669	$0.49 \times 10^{-3}$	$\pm$	$0.003 \times 10^{-3}$
7.979	$0.55 \times 10^{-3}$	$\pm$	$0.003 \times 10^{-3}$
9.283	$0.60 \times 10^{-3}$	$\pm$	$0.004 \times 10^{-3}$
10.605	$0.65 \times 10^{-3}$	$\pm$	$0.004 \times 10^{-3}$
11.922	$0.71 \times 10^{-3}$	$\pm$	$0.004 \times 10^{-3}$
13.171	$0.76 \times 10^{-3}$	$\pm$	$0.005 \times 10^{-3}$
14.422	$0.82 \times 10^{-3}$	$\pm$	$0.005 \times 10^{-3}$
15.524	$0.87 \times 10^{-3}$	$\pm$	$0.005 \times 10^{-3}$
16.712	$0.93 \times 10^{-3}$	$\pm$	$0.006 \times 10^{-3}$
17.906	$0.97 \times 10^{-3}$	$\pm$	$0.006 \times 10^{-3}$
19.088	$1.02 \times 10^{-3}$	$\pm$	$0.006 \times 10^{-3}$
20.281	$1.08 \times 10^{-3}$	$\pm$	$0.006 \times 10^{-3}$
21.316	$1.12 \times 10^{-3}$	$\pm$	$0.007 \times 10^{-3}$
22.462	$1.17 \times 10^{-3}$	$\pm$	$0.007 \times 10^{-3}$
23.463	$1.21 \times 10^{-3}$	$\pm$	$0.007 \times 10^{-3}$
24.734	$1.25 \times 10^{-3}$	$\pm$	$0.008 \times 10^{-3}$
25.816	$1.30 \times 10^{-3}$	$\pm$	$0.008 \times 10^{-3}$
26.900	$1.35 \times 10^{-3}$	$\pm$	$0.008 \times 10^{-3}$
27.925	$1.40 \times 10^{-3}$	$\pm$	$0.008 \times 10^{-3}$

Tabla 5.8. Valores de presión y desplazamiento X, por movimiento restringido de la válvula de succión, con uso de una superficie reflejante sobre la válvula.

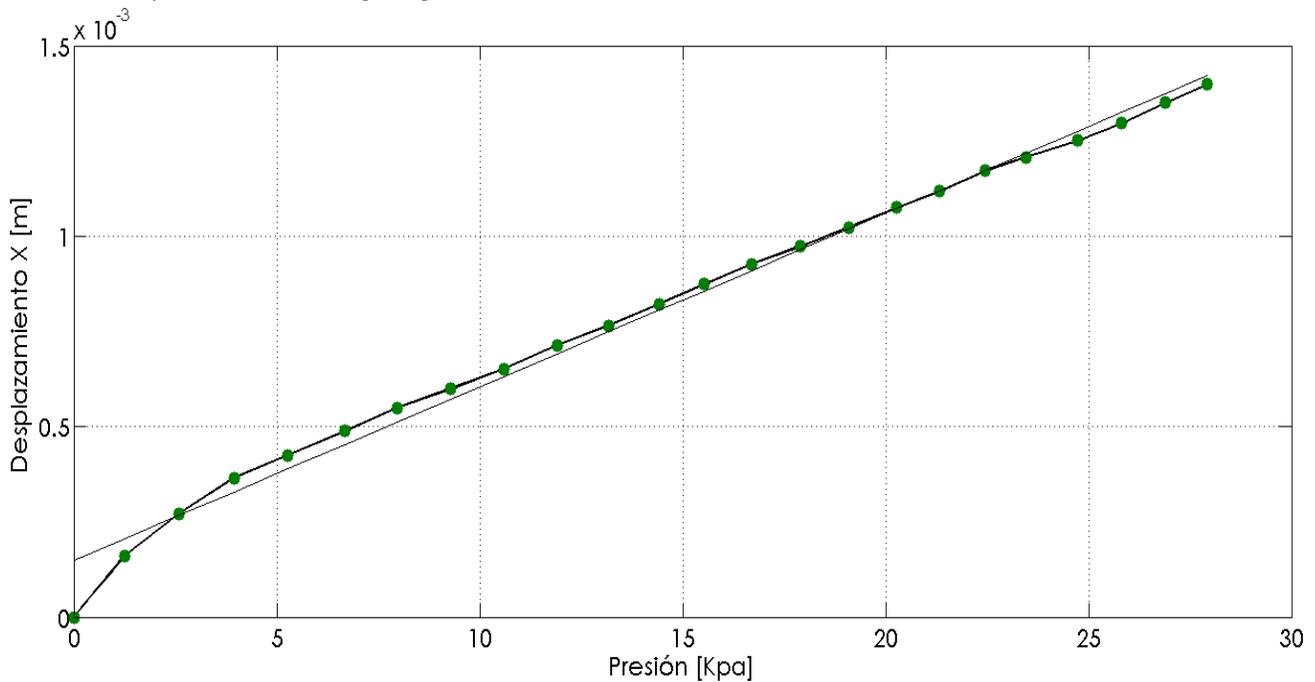
La gráfica de la figura 5.12, muestra el comportamiento de la válvula con restricción de desplazamiento positivo. El rango de desplazamiento y presión son [0.16 –1.4] mm y [1.259 – 27.925] kPa, respectivamente. Se observa una relación casi lineal, es decir, con cada incremento de 1.21 [kPa] la respuesta del sistema fue creciendo de manera proporcional.

Mediante un ajuste lineal, se tiene la siguiente ecuación para aproximar la relación de dependencia entre desplazamiento de la lengüeta ( $X$ ) y la presión que origina dicho movimiento.

$$X = (P_{kPa}(0.05 \times 10^{-3}) + 0.15 \times 10^{-3}) \text{ [m]} \quad \dots (4.6)$$

Donde:  $P_{kPa}$  es la presión dada en kPa.

La regresión lineal se ajusta muy bien a la respuesta del dispositivo OBD, sobre todo para valores mayores de 2.596[kPa].



**Figura 5.12. Respuesta del dispositivo OBD ante incrementos de presión ( $\Delta P=1.21$  kPa) para determinar el desplazamiento de la válvula de succión de movimiento restringido hasta  $X_{m\acute{a}x}$ .**

**b) GRÁFICAS DE DESPLAZAMIENTO X, MENOR A 2.67 [kPa].**

Para observar el comportamiento del desplazamiento de la válvula menor a 2.596 [kPa], se tienen los siguientes resultados.

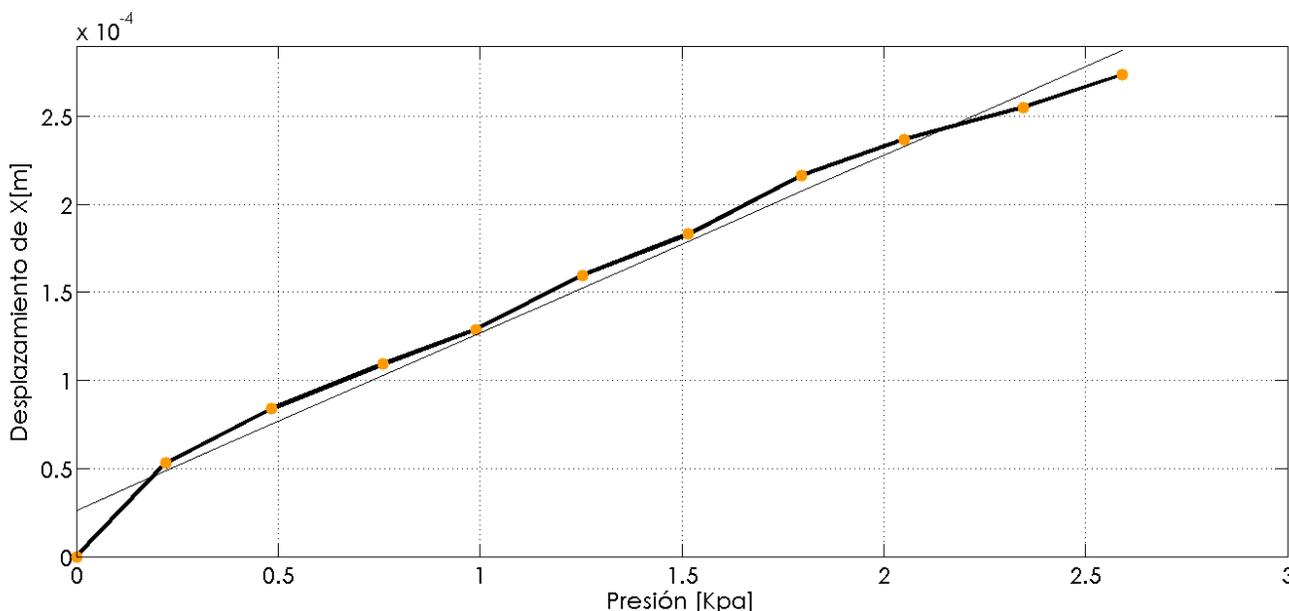
Una vez obtenidos los resultados por el dispositivo OBD, se midió la longitud del haz reflectado  $L$ , dando un valor de 85.5 [cm]. De igual manera, se obtuvo la longitud  $S$ , dando como resultado 2.16 [cm].

Ahora, retomando la ecuación (4.6), se calcula el valor de desplazamiento de la lengüeta **X**, de esta manera, se obtienen los siguientes resultados para incrementos de presión de 0.27 [kPa].

Presión [kPa]	$X \pm \delta_x$ [m]
0.000	0.00 ± 0.000
0.221	$0.53 \times 10^{-4} \pm 0.006 \times 10^{-4}$
0.484	$0.84 \times 10^{-4} \pm 0.007 \times 10^{-4}$
0.761	$1.09 \times 10^{-4} \pm 0.009 \times 10^{-4}$
0.990	$1.29 \times 10^{-4} \pm 0.010 \times 10^{-4}$
1.254	$1.60 \times 10^{-4} \pm 0.012 \times 10^{-4}$
1.516	$1.83 \times 10^{-4} \pm 0.013 \times 10^{-4}$
1.798	$2.17 \times 10^{-4} \pm 0.015 \times 10^{-4}$
2.050	$2.37 \times 10^{-4} \pm 0.016 \times 10^{-4}$
2.346	$2.55 \times 10^{-4} \pm 0.017 \times 10^{-4}$
2.591	$2.73 \times 10^{-4} \pm 0.018 \times 10^{-4}$

**Tabla 5.9. Valores de presión y desplazamiento X, por movimiento restringido de la válvula de succión, con incrementos de presión de 0.27 [kPa].**

La gráfica siguiente, muestra el comportamiento de la válvula con restricción de desplazamiento positivo. El rango de desplazamiento y presión son [0. – 0.027] [cm] y [0 – 2.59] [kPa] respectivamente.



**Figura 5.13. Respuesta del dispositivo OBD ante incrementos de presión ( $\Delta P=1.33$  kPa) para determinar el desplazamiento de la válvula de succión de movimiento restringido hasta 2.67 [kPa].**

Mediante un ajuste lineal, se tiene la siguiente ecuación para aproximar la relación de dependencia entre desplazamiento de la lengüeta (**X**) y la presión que origina dicho movimiento.

$$X = (P_{\text{kPa}}(0.1 \times 10^{-3}) + 0.03 \times 10^{-3}) \text{ [m]} \quad \dots (5.7)$$

Donde:  $P_{\text{kPa}}$  es la presión dada en kPa.

La regresión lineal se ajusta muy bien a la respuesta del dispositivo OBD, sobre todo para valores menores de 3.888 [kPa].

### c) FRECUENCIA DE RESONANCIA DE LA VÁLVULA DE SUCCIÓN.

Se encontró una zona de resonancia para la válvula de succión, a una presión promedio de 32.785 [kPa]. Esta zona, se caracteriza por formar una especie de línea con el spot del rayo láser, ver figura 5.10. En seguida se muestran los resultados de presión, tamaño del alargamiento del spot (**m**) y la longitud **d** sobre la pantalla.

	Presión [kPa]	d [cm]	m [mm]
	31.247	12.76	7.00
	32.888	12.78	7.40
	33.063	12.76	7.00
	32.862	12.69	7.40
	33.096	12.86	7.00
	33.121	12.70	7.00
	32.906	12.70	6.80
	32.992	12.80	7.40
	32.888	12.80	7.50
$X_0 \pm \delta_x$	<b>32.785 ± 1.538</b>	<b>12.76 ± 0.10</b>	<b>7.17 ± 0.37</b>

Tabla 5.10. Valores de la longitud (d) por la prueba de resonancia de la válvula de succión.

Considerando los valores promedios se calcula el desplazamiento **X** de la válvula a una presión de 32.785 [kPa], recurriendo a la ecuación 4.6. Así mismo se determina el desplazamiento de vibración, cuya distancia es análoga al alargamiento del spot (**m**).

**Primero**, se calcula un  $X_1$ , con  $d_1 = 0.1276$  [m],  $S = 0.0212$  [m] y  $L = 0.873$  [m]. Este valor es el desplazamiento **X** de la válvula a una presión de 32.785 [kPa].

$$X_1 = \frac{d_1 * S}{2L} = \frac{0.1276 * 0.0212}{2(0.873)} = 1.55 \times 10^{-3} \text{ [m]} \quad \dots (5.8)$$

Se reporta el valor del desplazamiento **X** como,  $X_1 = 1.55 \times 10^{-3} \pm 0.009 \times 10^{-3}$  [m].

**Segundo**, para calcular el valor del desplazamiento de vibración ( $X_v$ ), se calcula un  $X_2$ , con  $d_2=d_1- m = 0.1204$  [m],  $S=0.0212$  [m] y  $L= 0.873$  [m].

$$X_2 = \frac{d_2 * S}{2L} = \frac{0.1204 * 0.0212}{2(0.873)} = 1.46 \times 10^{-3} \text{ [m]} \dots (5.9)$$

Se reporta el valor del desplazamiento  $X_2$  como,  $X_2= 1.46 \times 10^{-3} \pm 0.009 \times 10^{-3}$  [m].

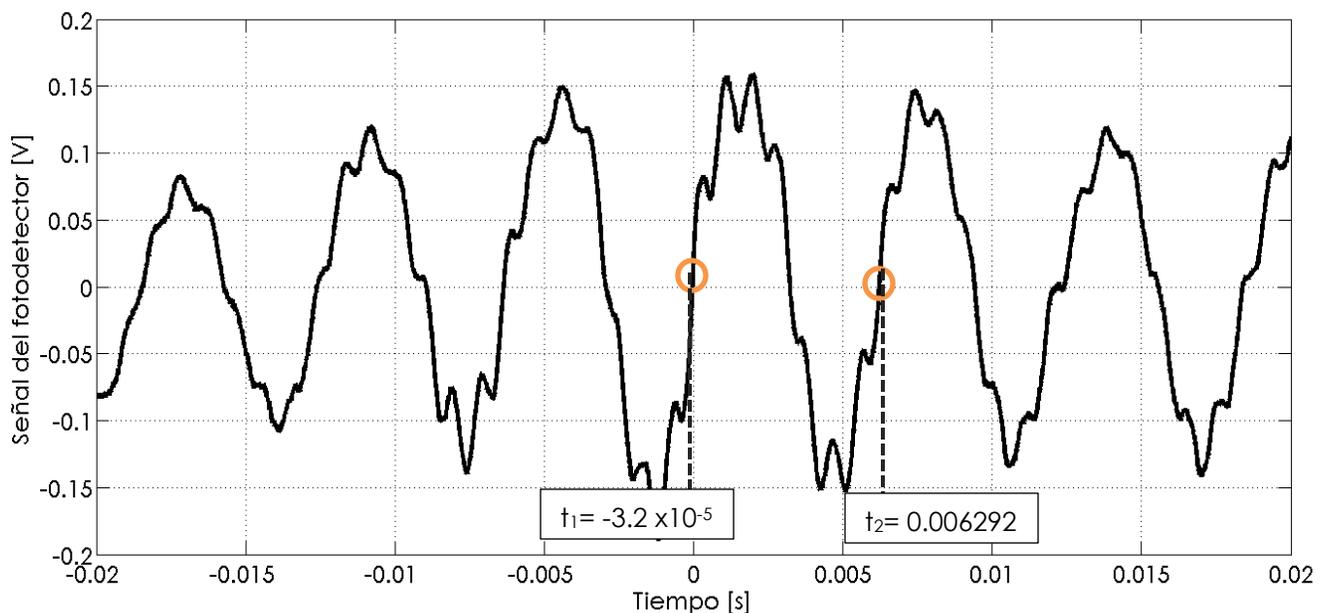
Finalmente, se define como valor del desplazamiento de vibración ( $X_v$ ):

$$X_v = X_1 - X_2 \dots (5.10)$$

$$\pm \delta v = \delta X_1 + \delta X_2 \dots (5.11)$$

Es decir,  $X_v=87.02 \times 10^{-6} \pm 18.14 \times 10^{-6}$  [m].

**Tercero**, de la señal obtenida del fotodetector se determina el periodo de vibración de la válvula de succión para una presión promedio de 32.785 [kPa].



**Figura 5.14.** Señal que describe la frecuencia natural de la válvula de succión.

Una vez que se obtienen los datos de vibración se hace el siguiente análisis matemático:

$$T = |t_1| + t_2 \dots (5.12)$$

Con los valores de la figura 4.14 se tiene un periodo de  $T=6.324 \times 10^{-3}$  [s], dando una frecuencia:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{6.324 \times 10^{-3}} = 158.13 \text{ [Hz]} \dots (5.13)$$

Finalmente, analizando cada una de las gráficas obtenida de cada medición se tienen los siguientes valores de frecuencia.

	Presión [kPa]	Frecuencia [Hz]
	31.247	158.13
	32.888	159.44
	33.063	159.80
	32.862	155.96
	33.096	161.19
	33.121	159.54
	32.906	157.93
	32.992	159.85
	32.888	156.35
$X_0 \pm \delta_x$	<b>32.785 ± 1.538</b>	<b>158.69 ± 2.73</b>

**Tabla 5.11. Valores de frecuencia de resonancia para una presión promedio de 32.78 [kPa] y un desplazamiento máximo de  $1.55 \times 10^{-3}$  [m].**

Resuelto el procedimiento que se planteó en el protocolo de pruebas se obtiene la magnitud de frecuencia de resonancia de la válvula de succión, la cual es:

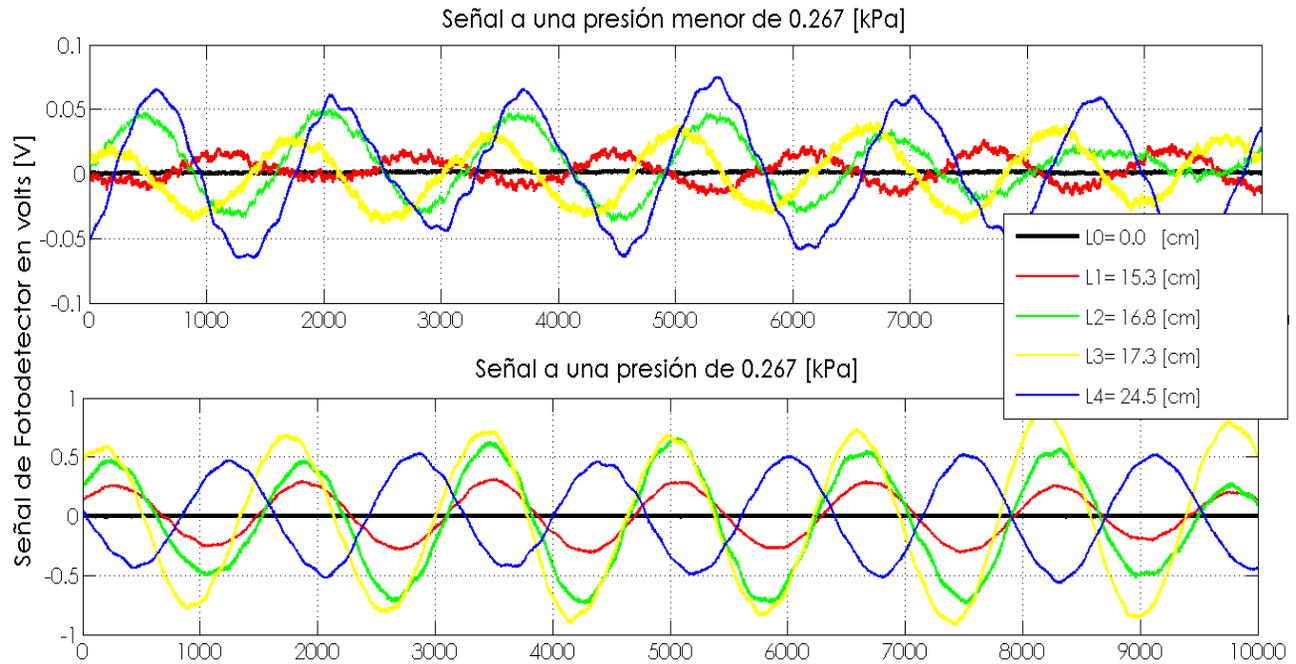
$f = 158.69 \pm 2.73$ [Hz]
----------------------------

**d) MÍNIMO DETECTABLE  $X_{\min}$ .**

Para determinar el mínimo detectable del instrumento OBD, se varía **L**, la longitud de la lengüeta a la pantalla (fotodetector), se busca una longitud **L<sub>x</sub>** en la cual haya un cambio considerable en la amplitud de la señal del fotodetector, para un desplazamiento inmediato al estado de reposo ( $P=0$  [kPa] y  $X=0$  [m]) y menor a un desplazamiento conocido.

En la figura 5.15 se observa la respuesta de un fotodetector al variar **L**, para una presión menor a 0.263 [kPa] con una distancia **d<sub>x</sub>**, considerada desconocida porque su valor está por debajo de las presiones antes medidas. En el segundo gráfico de la misma figura 5.15, se observa el comportamiento para una presión igual a 0.263 [kPa] con una distancia **d**, que es medible sobre una pantalla al variar L.

Para  $L_4 = 24.5$ , **d<sub>x</sub>** es mayor en amplitud, lo que indica que el fotodetector es más sensible para percibir desplazamientos muy pequeños.



**Figura 5.15. Comportamiento de la señal de un fotodetector variando la distancia L.**

Considerando que el fotodetector mejora su sensibilidad para percibir desplazamientos pequeños, con un valor de  $L = 24.5$  [cm], se siguió explorando un valor óptimo de L mayor a las longitudes anteriores. Se encontró que con un valor de  $L_x = 35.6$  [cm], el fotodetector mejora la detección del desplazamiento X de la lengüeta.

Enseguida se calculará el desplazamiento  $X_{\min}$ , tomando a  $L_x = 35.6$  [cm], como la distancia más sensible para detección de cambios menores a 0.27 [kPa], y con  $S = 2.16$  [cm].

**Primero**, se tiene como valor conocido de presión  $P_c = 0.267$  [kPa] con un valor de 0.391 [V] por el sensor de presión MPX2010DP.

Para calcular cualquier valor de presión P menor de  $P_c$ , se usará una relación de proporcionalidad entre las magnitudes de presión y voltaje, dado que la salida del sensor es directamente proporcional a la presión aplicada. Dando valores, la relación queda de la siguiente manera:

$$\frac{0.267 \text{ [kPa]}}{P} = \frac{0.3910 \text{ [V]}}{0.3852 \text{ [V]}} \quad \dots (5.14)$$

Despejando P

$$P = \frac{0.267 \text{ [kPa]} * 0.3852 \text{ [V]}}{0.3910 \text{ [V]}} = 0.263 \text{ [kPa]} \quad \dots (5.15)$$

Ahora de manera general, se tiene

$$P = \frac{0.267 \text{ [kPa]} * V_p \text{ [V]}}{0.3910 \text{ [V]}} \quad \dots (5.16)$$

Donde  $V_p$  es el voltaje de presión medido, para una presión menor a 0.267 [kPa].

**Segundo**, partiendo de los valores de voltaje pico-pico de las mediciones obtenidas del fotodetector, se tiene:

- Para  $P_c \rightarrow V_{Pc} [0.6339, -0.7802] \therefore V_{Pc} \approx 1.414 \text{ [V}_{PP}]$
- Para  $P \rightarrow V_{PP1} [0.3564, -0.4706] \therefore V_{PP1} \approx 0.827 \text{ [V}_{PP}]$

Se midió el desplazamiento  $d$  en una pantalla a una presión y un voltaje pico-pico, conocidos. Con estos datos se hace una relación de proporcionalidad de los datos y se obtiene el valor  $d_x$ , siendo el desplazamiento que no es medible sobre la pantalla.

Dando valores,

- $d = 3.3 \times 10^{-3} \text{ [m]} \rightarrow V_{Pc} = 1.414 \text{ [V}_{PP}]$
- $d_x = \text{?} \text{ [m]} \rightarrow V_{PP1} = 0.827 \text{ [V}_{PP}]$

la relación queda de la siguiente manera:

$$\frac{3.3 \times 10^{-3} \text{ [m]}}{d_x} = \frac{1.414 \text{ [V}_{PP}]}{0.827 \text{ [V}_{PP}]} \quad \dots (5.17)$$

Despejando P

$$d_x = \frac{3.3 \times 10^{-3} \text{ [m]} * 0.827 \text{ [V}_{PP}]}{1.414 \text{ [V}_{PP}]} = 1.93 \times 10^{-3} \text{ [m]} \quad \dots (5.18)$$

Ahora de manera general, se tiene

$$d_x = \frac{3.3 \times 10^{-3} \text{ [m]} * V_{PP1} \text{ [V}_{PP}]}{1.414 \text{ [V}_{PP}]} \quad \dots (5.19)$$

Donde  $V_{PP1}$  es el voltaje pico-pico de la señal del fotodetector, para una presión menor a 0.267 [kPa].

**Tercero**, partiendo de la ecuación (4.6) ahora se calcula el desplazamiento mínimo ( $X_{min}$ ), teniendo como valores:  $L_x=0.356$  [m],  $S=0.0216$  [m] y valor de  $d_x$ .

$$X_{min} = \frac{S * d_x}{2L_x} \quad \dots (5.20)$$

$$X_{min} = \frac{0.0216[m] * 1.93 \times 10^{-3} [m]}{2(0.356 [m])} = 58.6 \times 10^{-6} [m] \quad \dots (5.21)$$

De manera general, se tiene:

$$X_{min} = \frac{0.0216[m] * d_x [m]}{2(0.356 [m])} \quad \dots (5.22)$$

Finalmente, se repite cada paso para cada valor de  $d$ , y se obtienen los siguientes valores.

	Presión [kPa]	Xmin [m]
	0.263	58.6 x10 <sup>-6</sup>
	0.262	60.6 x10 <sup>-6</sup>
	0.263	30.6 x10 <sup>-6</sup>
	0.262	50.8 x10 <sup>-6</sup>
	0.261	61.0 x10 <sup>-6</sup>
	0.263	36.5 x10 <sup>-6</sup>
$X_0 \pm \delta_x$	<b>0.262 ± 0.001</b>	<b>49.66 x10<sup>-6</sup> ± 19.04 x10<sup>-6</sup></b>

**Tabla 5.12. Valores de  $X_{min}$  para una presión promedio de 0.262 [kPa].**

De la tabla anterior se puede concluir que el mínimo detectable del instrumento, se encuentra en el intervalo  $(30.62 - 68.70) \times 10^{-6}$  [m], o bien, el valor promedio es:

$X_{min} = 49.66 \times 10^{-6} [m]$

El intervalo se define por la incertidumbre de la medición, cuyo valor porcentual

$$\delta_{\%} X_{min} = \frac{\delta_x}{x_0} \times 100\% = \frac{19.04 \times 10^{-6}}{49.66 \times 10^{-6}} \times 100\% \quad \dots (5.23)$$

$$\delta_{\%} X_{min} = 38.35 \%$$

Como la magnitud de la incertidumbre porcentual es elevada se deben describir la posible causa por la cual el intervalo de incertidumbre es amplio. La principal causa se debe a que el desplazamiento de la válvula varía cada vez que se mide, a pesar de que se haga en las mismas condiciones, debido a factores externos como la fuente de presión o por su comportamiento natural.

## 5.2 Análisis de la válvula de succión con un interferómetro de Michelson.

En este apartado se presentan la medición de desplazamiento de la válvula de succión aplicando un interferómetro de Michelson. Una condición del experimento, es colocar una superficie reflejante (espejo) sobre la región donde incide el flujo de aire y que la fuente de presión se encuentra cerca de la válvula. Dicha condición se desprende de los experimentos de la sección anterior.

### Objetivo de la medición con interferómetro de Michelson (IM)

Determinar mediante un interferómetro de Michelson las curvas de desplazamiento contra presión, del movimiento de la válvula tipo lengüeta desde el momento que inicia su desplazamiento hasta el momento en que no sea medible por la técnica de medición.

### Protocolo de prueba

La prueba se realiza con una válvula tipo lengüeta obtenida de un compresor recíprocante Mabe (Anexo 3. Desensamble de un compresor). La válvula junto con la superficie reflejante tiene una masa de 1.5605 [g].

**1.- Condiciones iniciales.** En la figura 5.16 se observa el montaje del IM sobre una mesa anti vibratoria. Además se aprecia la trayectoria del haz láser a través del dispositivo de medición.

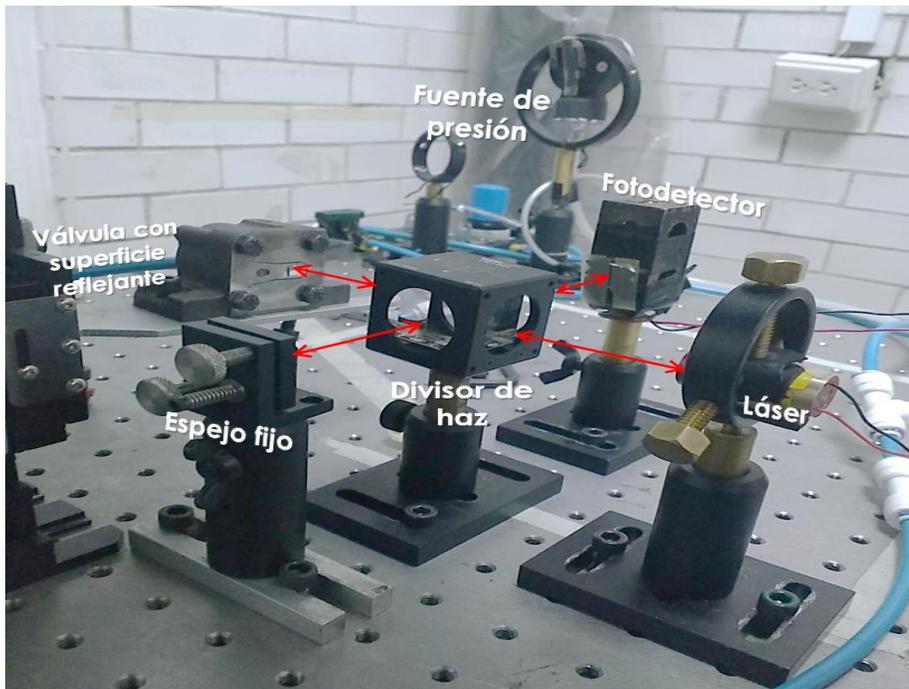


Figura 5.16. Montaje experimental del interferómetro de Michelson en óptica de volumen, para medición de desplazamiento.

La fuente de presión (aire comprimido) se encuentra alineada respecto al spot del rayo incide en la lengüeta de la válvula, la presión en este punto es de 0 [kPa] y por lo tanto el valor inicial dado por el fotodetector para  $I$  es  $I_{\text{máx}} = I_0$ , como se analizó en el apartado 4.3.2.1.

Se recomienda antes de iniciar con el experimento medir las siguientes magnitudes:

- Adquirir datos para la intensidad inicial  $I_0$  con el fotodetector durante un minuto y medio.
- Medir la longitud de onda  $\lambda$  del láser con un multímetro óptico (ILX Lightwave OMM-6610B) durante un minuto y medio, ésta medición se recomienda hacerse solo una vez por ronda de mediciones.

**2.- Incremento de presión.** El siguiente paso es aumentar la presión de un punto distinto al inicial (0 kPa), una vez que esta sea establecida se monitorea con un transductor de presión (MPX2010DP), durante toda la prueba. Se aplican incrementos de presión hasta llegar al máximo desplazamiento medible.

**3.- Mediciones de intensidad.** Se obtienen mediciones de la intensidad  $I$  con un fotodetector, se repite la medición 2 veces, para una misma presión. Se debe repetir el paso número dos, cuando se hayan recolectado la información necesaria para este paso.

**4.- Obtención del desplazamiento de la válvula de succión.** Recurriendo a la ecuación (4.19) que se planteó en la sección 4.3.2.1, se calcula el valor del desplazamiento de la lengüeta ( $X$ ), sustituyendo todos los valores obtenidos de las mediciones anteriores de intensidad.

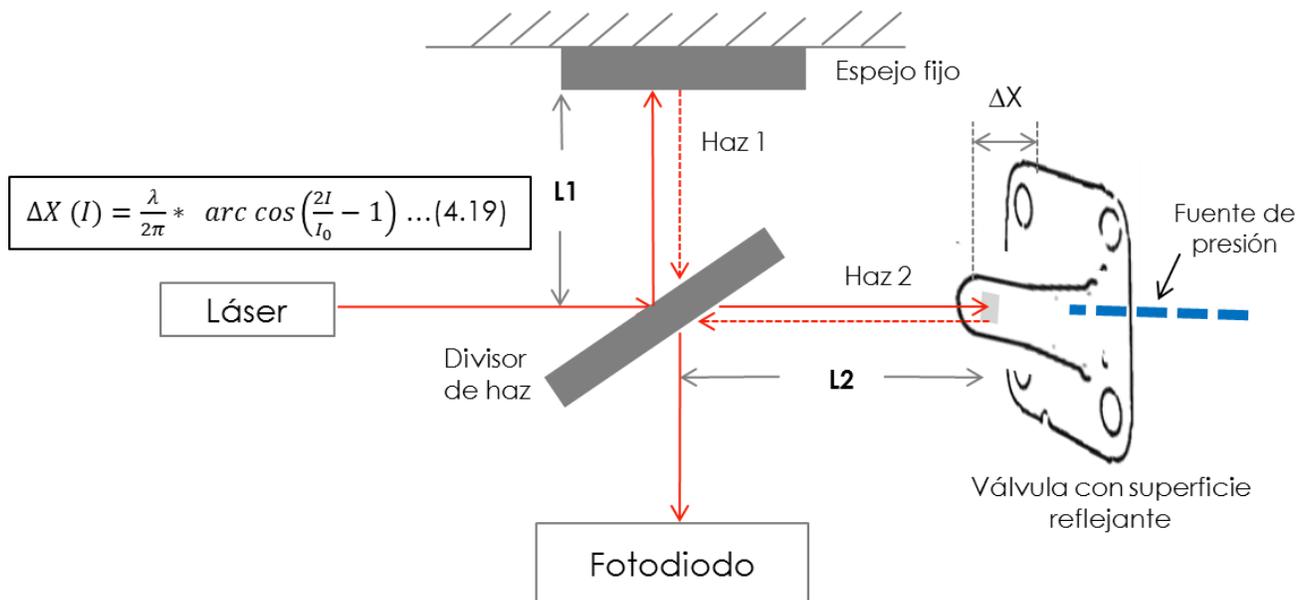


Figura 5.17. Relación del desplazamiento de la válvula para un interferómetro de Michelson.

## Análisis de resultados del IM

Previo a las mediciones con el IM, se determinó la longitud de onda del láser, la cual se encuentra en el rango de espectro visible del rojo. La medición con el multímetro óptico nos dio un valor de  $\lambda = 632.21$  [nm].

En términos de la respuesta del fotodetector, se entiende que la intensidad es igual:

- a)  $I_0$  es equivalente al voltaje máximo que se tiene a la salida del fotodetector, debido a que no hay una diferencia de camino óptico en los brazos  $X_1$  y  $X_2$  del IM.

$$I_0 \rightarrow [V_{\text{máx}}]_{pp} \text{ cuando } X_1 = X_2$$

- b)  $I(\Delta x)$  es equivalente al voltaje que se tiene a la salida del fotodetector, debido a que hay una diferencia de camino óptico en los brazos  $X_1$  y  $X_2$  del IM.

$$I(\Delta x) \rightarrow [V_s]_{pp} \text{ cuando } X_1 \neq X_2$$

Ahora retomando la ecuación 4.19, se calcula el desplazamiento  $X$  de la lengüeta de la válvula debido a un incremento de presión.

Presión [kPa]	X [m]
0.000	0.000
$0.080 \pm 0.020$	$0.882 \times 10^{-7} \pm 0.347 \times 10^{-7}$
$0.145 \pm 0.043$	$4.509 \times 10^{-7} \pm 5.915 \times 10^{-7}$

Tabla 5.13. Valores del desplazamiento X de lengüeta determinados por un IM.

Enseguida se muestra la relación de proporcionalidad que tiene el desplazamiento de la válvula por cada incremento de presión.

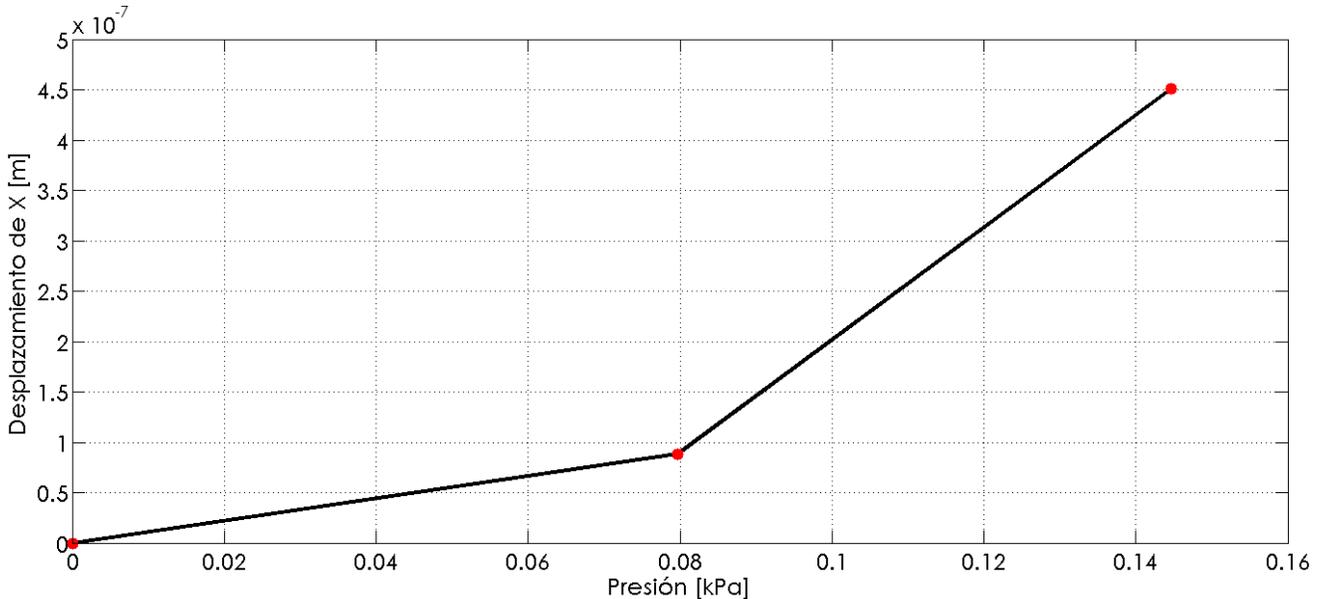


Figura 5.18. Respuesta del interferómetro de Michelson para determinar el desplazamiento de la válvula de succión.

## Discusión del IM

Con el diseño implementado de un interferómetro de Michelson, se permite determinar el desplazamiento positivo –negativo de la lengüeta de la válvula y a su vez cuantificar este desplazamiento. Sin embargo, para tener un punto de comparación con el dispositivo de deflexión de haz láser, se decide restringir el movimiento de la válvula para determinar el desplazamiento de la lengüeta en un sentido, siendo este el “sentido positivo”, es decir, aquel que tiene la misma dirección y sentido del flujo de aire, de esta manera se permite cuantificar el rango del desplazamiento en la apertura positiva (ver figura 5.4). Además de colocar una superficie reflejante (espejo) sobre la lengüeta de la válvula de succión.

El valor cuantificado de desplazamiento  $X$  y presión son  $(0.000- 4.509) \times 10^{-7}$  [m] y  $(0. - 0.145)$  [kPa] respectivamente. Se puede apreciar en la figura 5.18 una relación casi lineal entre los datos, es decir, con cada incremento de presión la respuesta del sistema fue creciendo de manera proporcional.

Se observa que los desplazamientos de  $X$  alcanzaron la magnitud promedio  $4.509 \times 10^{-7}$  [m] a una presión promedio de 0.145 [kPa], y solo se obtuvieron dos puntos de interés en cada uno de las rondas de medición debido a la regulación de apertura de la fuente presión y por el rango de medición del interferómetro de Michelson, cuya técnica para nuestros fines es mejor método para medir desplazamiento pequeños dado por bajas presiones.

Para tener más valores de medición por este método es necesario implementar una fuente de presión con mejor regulación y obtener incrementos de presión más pequeños que los obtenidos en este trabajo de tesis. Para nuestros fines se consideran aceptables los incrementos de presión que se implementaron dada las condiciones de la instalación de la fuente de presión propuesta.

### 5.3 Evaluación de resultados.

En este apartado se hace un análisis comparativo de los datos experimentales del desplazamiento  $X$  de la válvula, con los datos de desplazamiento del modelo matemático descrito en el capítulo 3 de este trabajo de tesis.

#### a) Análisis comparativo de dispositivo OBD vs modelo matemático

Se consideran como mejores datos experimentales los reportados en el apartado 5.1.2, con la técnica deflexión haz láser. Tomando los valores de presión experimentales se calculó mediante el modelo matemático los valores para un desplazamiento  $X$  teórico con el fin de comparar apropiadamente.

Enseguida se muestra el comportamiento de los valores experimentales y valores teóricos para cada incremento de presión de 1.27 [kPa]. Se aprecia que el comportamiento para valores de  $X$  teóricos es linealmente dependiente del incremento de presión, además los resultados se encuentran por debajo de los datos experimentales.

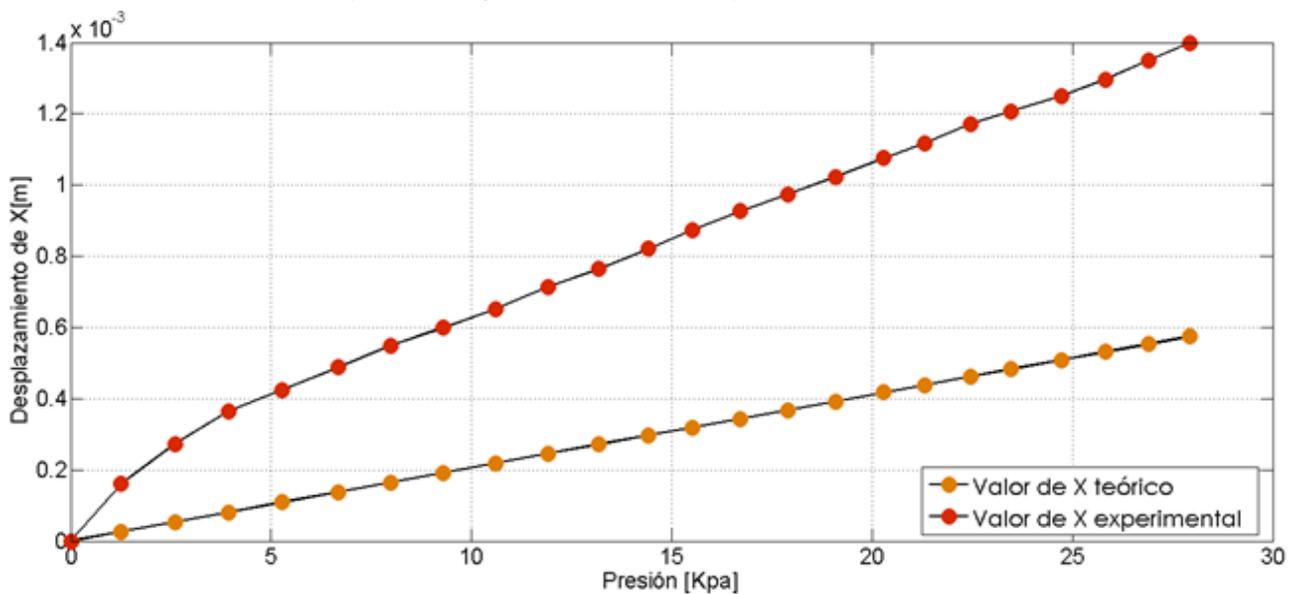


Figura 5.19. Gráfica comparativa entre valores experimentales y valores teóricos del desplazamiento  $X$  de una válvula de succión tipo lengüeta.

El modelo matemático da una *aproximación* a la solución del desplazamiento de la válvula, por esto hay que medir la diferencia de resultado con los datos experimentales, para tener una idea de que tan aproximado está a la solución, tomando como valores reales las mediciones obtenidas. Para evaluar la discrepancia de resultados se calcula la *diferencia de medición porcentual* ( $DM\%$ ) y se define como:

$$DM\% = \frac{|X_{\text{experimental}} - X_{\text{teórico}}|}{X_{\text{experimental}}} \times 100\% \quad \dots (5.24)$$

Donde  $X_{\text{teórico}}$  es una aproximación al resultado  $X_{\text{experimental}}$ .

En la siguiente tabla se muestra la diferencia de medición porcentual para cada valor de presión con el que se obtuvo un valor del desplazamiento de la válvula de succión.

Presión [kPa]	X experimental [m]	X teórico[m]	DM %
0.000	0.00	0.00	
1.259	0.16 x10 <sup>-3</sup>	0.026 x10 <sup>-3</sup>	83.86%
2.596	0.27 x10 <sup>-3</sup>	0.053 x10 <sup>-3</sup>	80.39%
3.946	0.37 x10 <sup>-3</sup>	0.081 x10 <sup>-3</sup>	77.77%
5.280	0.43 x10 <sup>-3</sup>	0.109 x10 <sup>-3</sup>	74.46%
6.669	0.49 x10 <sup>-3</sup>	0.137 x10 <sup>-3</sup>	71.91%
7.979	0.55 x10 <sup>-3</sup>	0.164 x10 <sup>-3</sup>	70.14%
9.283	0.60 x10 <sup>-3</sup>	0.191 x10 <sup>-3</sup>	68.15%
10.605	0.65 x10 <sup>-3</sup>	0.218 x10 <sup>-3</sup>	66.54%
11.922	0.71 x10 <sup>-3</sup>	0.245 x10 <sup>-3</sup>	65.68%
13.171	0.76 x10 <sup>-3</sup>	0.271 x10 <sup>-3</sup>	64.59%
14.422	0.82 x10 <sup>-3</sup>	0.297 x10 <sup>-3</sup>	63.91%
15.524	0.87 x10 <sup>-3</sup>	0.319 x10 <sup>-3</sup>	63.48%
16.712	0.93 x10 <sup>-3</sup>	0.344 x10 <sup>-3</sup>	62.93%
17.906	0.97 x10 <sup>-3</sup>	0.368 x10 <sup>-3</sup>	62.19%
19.088	1.02 x10 <sup>-3</sup>	0.393 x10 <sup>-3</sup>	61.61%
20.281	1.08 x10 <sup>-3</sup>	0.417 x10 <sup>-3</sup>	61.23%
21.316	1.12 x10 <sup>-3</sup>	0.438 x10 <sup>-3</sup>	60.77%
22.462	1.17 x10 <sup>-3</sup>	0.462 x10 <sup>-3</sup>	60.60%
23.463	1.21 x10 <sup>-3</sup>	0.482 x10 <sup>-3</sup>	60.02%
24.734	1.25 x10 <sup>-3</sup>	0.509 x10 <sup>-3</sup>	59.33%
25.816	1.30 x10 <sup>-3</sup>	0.531 x10 <sup>-3</sup>	59.04%
26.900	1.35 x10 <sup>-3</sup>	0.553 x10 <sup>-3</sup>	59.03%
27.925	1.40 x10 <sup>-3</sup>	0.574 x10 <sup>-3</sup>	58.95%

**Tabla 5.14. Valores de diferencia de medición porcentual para evaluar del modelo matemático.**

Para evaluar de manera general el modelo matemático se obtiene el *promedio de diferencia de medición porcentual* de los valores obtenidos de la columna *DM%*, de la tabla anterior.

En conclusión, la *diferencia de medición porcentual promedio* es de 65.94%, por lo tanto el modelo matemático nos da una aproximación **34.06%** al resultado.

Como la magnitud de *diferencia de medición porcentual* es elevada se deben describir las posibles causas por la cual el valor teórico difiere del valor experimental. La principal causa se debe a que la forma de la válvula planteada idealmente es muy diferente a la forma de la válvula real, además de despreciar la masa de la misma, considerar que está hecha de acero, considerar incidencias de flujo constantes presentándose en la realidad ligeras pulsaciones.

Ahora se hace el mismo análisis anterior, para los valores obtenidos en el experimento para incrementos de presión 0.27 [kPa] hasta 2.59 [kPa].

Enseguida se muestra el comportamiento de los valores experimentales y valores teóricos para cada incremento de presión de 0.27 [kPa]. Se aprecia que el comportamiento para valores de X teóricos es linealmente dependiente del incremento de presión, además los resultados se encuentran por debajo de los datos experimentales. Mientras los resultados experimentales tienen una tendencia cuasi lineal.

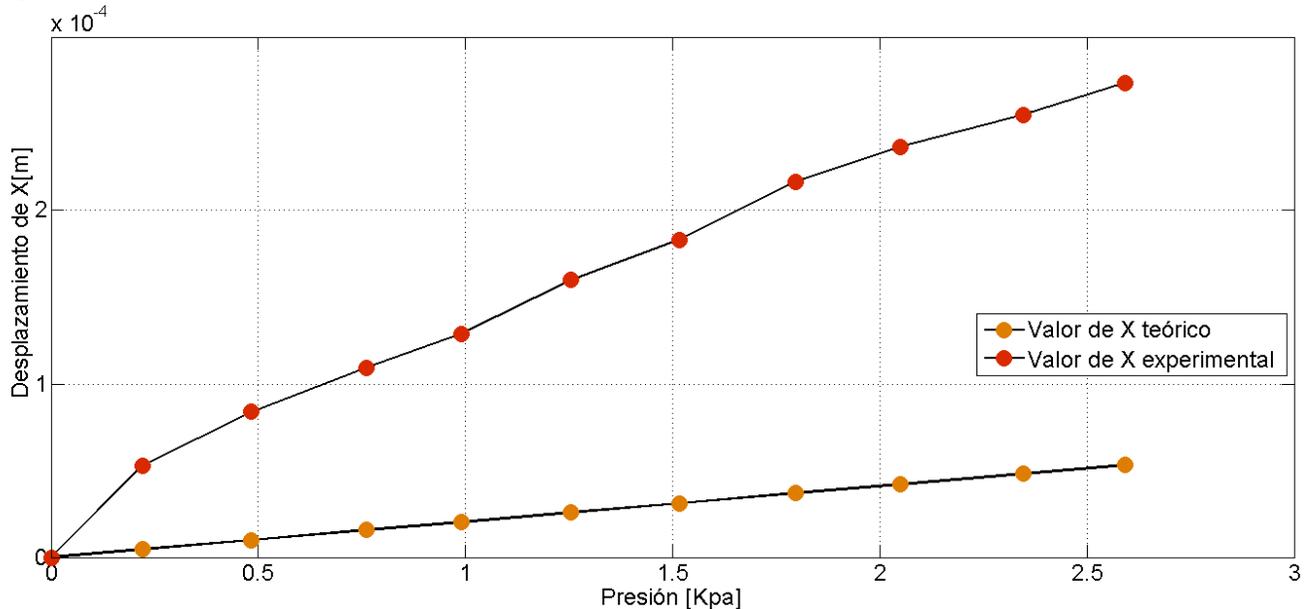


Figura 5.20. Gráfica comparativa entre valores experimentales y valores teóricos del desplazamiento X de una válvula de succión tipo lengüeta, para presiones menores a 2.67 [kPa].

Para evaluar la diferencia de resultados se calcula el *DM porcentual* por medio de la ecuación 5.24. En la tabla 5.15 se registran los valores obtenidos.

Presión [kPa]	X experimental [m]	X teórico[m]	DM %
0.000	0.00	0.00	
0.221	0.53 x10 <sup>-4</sup>	0.05 x10 <sup>-4</sup>	91.43%
0.484	0.84 x10 <sup>-4</sup>	0.10 x10 <sup>-4</sup>	88.15%
0.761	1.09 x10 <sup>-4</sup>	0.16 x10 <sup>-4</sup>	85.68%
0.990	1.29 x10 <sup>-4</sup>	0.20 x10 <sup>-4</sup>	84.20%
1.254	1.60 x10 <sup>-4</sup>	0.26 x10 <sup>-4</sup>	83.86%
1.516	1.83 x10 <sup>-4</sup>	0.31 x10 <sup>-4</sup>	82.98%
1.798	2.17 x10 <sup>-4</sup>	0.37 x10 <sup>-4</sup>	82.93%
2.050	2.37 x10 <sup>-4</sup>	0.42 x10 <sup>-4</sup>	82.20%
2.346	2.55 x10 <sup>-4</sup>	0.48 x10 <sup>-4</sup>	81.09%
2.591	2.73 x10 <sup>-4</sup>	0.53 x10 <sup>-4</sup>	80.52%

Tabla 5.15. Valores de error relativo porcentual para evaluar del modelo matemático para presiones menores a 2.67 [kPa].

Evaluando de manera general, la *diferencia de medición porcentual* promedio es de 84.30%, es decir el modelo matemático tiene un **15.7%** de ser una buena aproximación al resultado.

Como la magnitud de *diferencia de medición porcentual* es elevada se deben describir las posibles causas por la cual el valor teórico difiere del valor experimental. La principal causa se debe a que la forma de la válvula planteada idealmente es muy diferente a la forma de la válvula real, además de despreciar la masa de la misma y considerar que está hecha de acero, y los parámetros que se consideran en la solución del modelo matemático.

Por otra parte, los resultados experimentales se pueden evaluar mediante la *incertidumbre porcentual*, el cual es el índice más comúnmente usado para especificar la precisión de una medida y se evalúa multiplicando la incertidumbre relativa por 100%, como se observa en la ecuación 5.4. ( $\delta_{\%}\chi = (\delta_r\chi) \times 100\%$ ). Dicha evaluación dio los siguientes resultados:

- Promedio de incertidumbre porcentual para incrementos de presión 1.27 [kPa] hasta 27.9 [kPa], del desplazamiento X.  $\delta_{\%}\chi_{m\acute{a}x} = 0.62\%$
- Promedio de incertidumbre porcentual para incrementos de presión 0.27 [kPa] hasta 2.59 [kPa], del desplazamiento X.  $\delta_{\%}\chi_{P<2.67\text{ kPa}} = 0.77\%$

Como la magnitud de las incertidumbres porcentuales es pequeña, se consideran como basta aceptables las mediciones del desplazamiento de la válvula de succión.

Finalmente, en la siguiente gráfica se observa el comportamiento de los valores teóricos y valores experimentales para presiones mayores a 0.267 [kPa] y menores a esta presión.

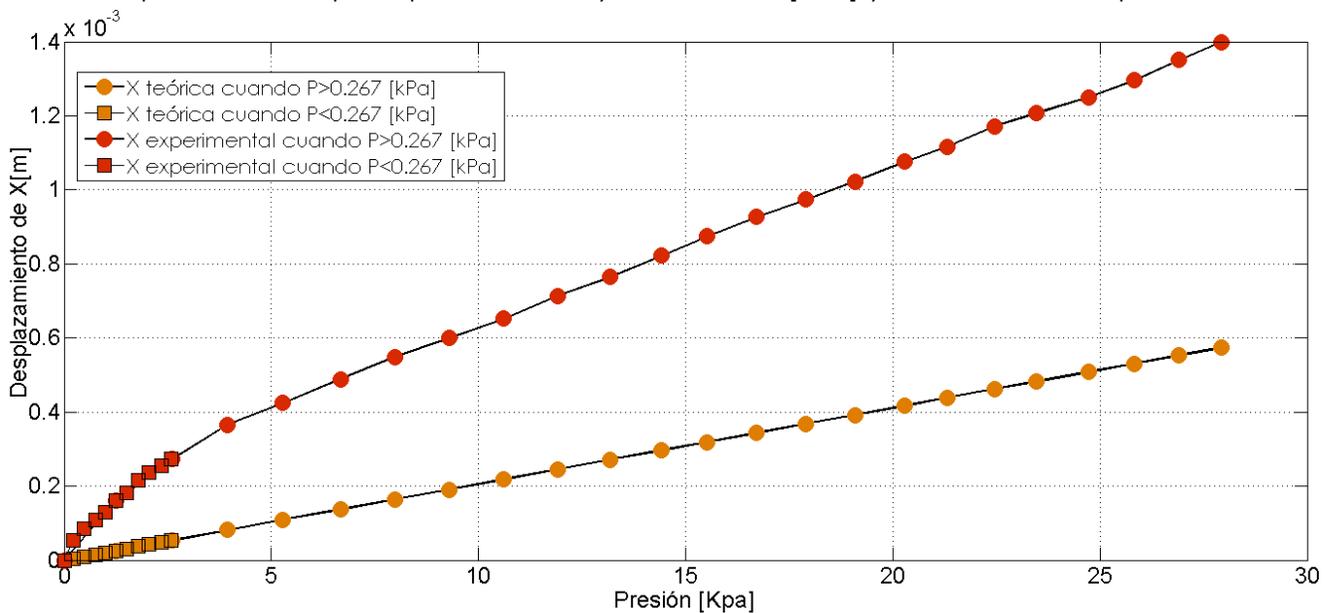


Figura 5.21. Gráfica comparativa entre valores experimentales y valores teóricos del desplazamiento X de una válvula de succión tipo lengüeta, para valores de presión P < 0.267 y P > 0.267 [kPa].

### b) Análisis comparativo de IM vs modelo matemático.

En la gráfica de la figura 5.22 se muestra el comportamiento de los valores experimentales usando un interferómetro de Michelson y valores teóricos obtenidos del modelo matemático (ecuación 3.3), para cada incremento de presión establecido en la parte experimental con el fin de hacer una correcta comparación de datos. Se aprecia en la gráfica que los valores de X teóricos son linealmente dependiente del incremento de presión, además los resultados se encuentran por encima de los datos experimentales.

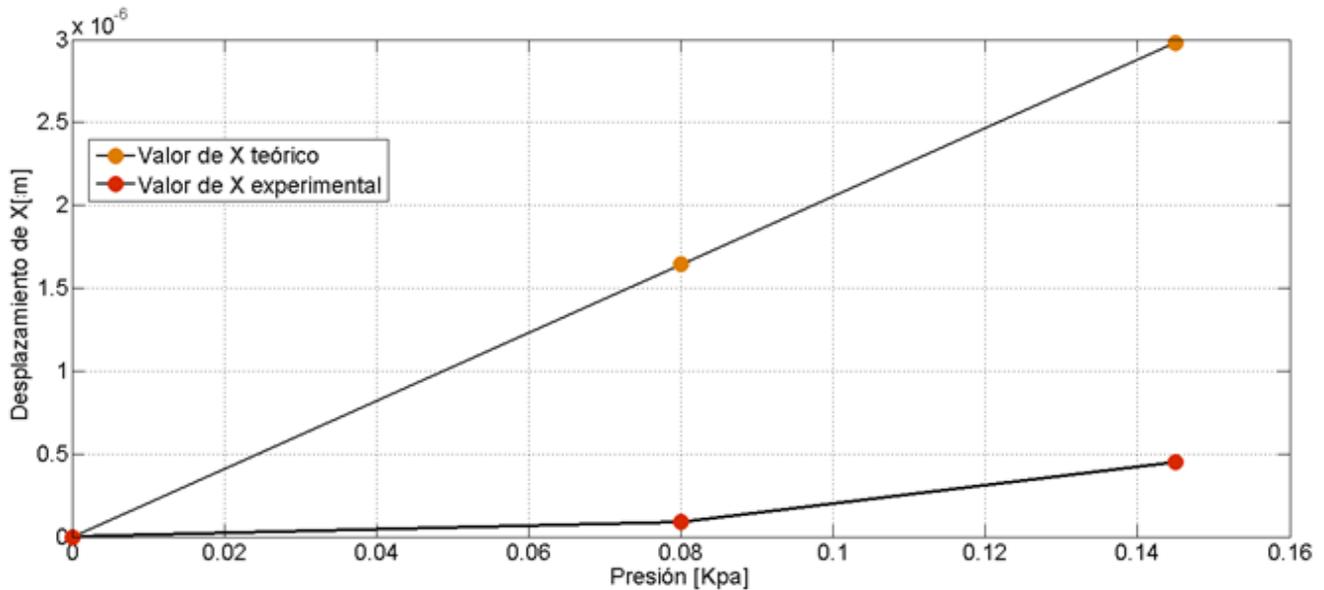


Figura 5.22. Gráfica comparativa entre valores experimentales de un interferómetro de Michelson y valores teóricos del desplazamiento X de una válvula de succión tipo lengüeta,

Para evaluar la diferencia de resultados se calcula la *diferencia de medición* y se tienen los resultados que se muestran en la tabla 5.16, cuyo promedio es de **11.64**, el cual expresado en porcentaje es un valor considerablemente grande, evaluando al modelo matemático como una aproximación alejada del resultado. Sin embargo también debe considerarse que los valores experimentales obtuvieron una precisión del **15 %** en las mediciones.

Presión [kPa]	X experimental [m]	X teórico [m]	Error relativo
0.000	0.000	0.000	
0.080	0.088 × 10 <sup>-6</sup>	1.645 × 10 <sup>-6</sup>	17.66
0.145	0.451 × 10 <sup>-6</sup>	2.982 × 10 <sup>-6</sup>	5.61

Tabla 5.16. Valores de error relativo para evaluar del modelo matemático mediante un interferómetro de Michelson.

## 5.4 Evaluación de los instrumentos de medición.

En este apartado se presenta la caracterización de los dispositivos de medición OBD e IM con el objetivo de obtener parámetros más relevantes del instrumento de medición y poder evaluar su desempeño como instrumento para medir desplazamientos en un sistema de válvulas de un compresor recíprocante.

### 5.4.1 Repetibilidad.

La repetibilidad se refiere a la capacidad de un instrumento para producir la misma respuesta en mediciones sucesivas de una misma magnitud de interés, dichas mediciones son realizadas en las mismas condiciones de medición, llamadas condiciones de repetibilidad.

Para determinar experimentalmente la repetibilidad de la respuesta de cada sistema de medición, se realizaron pruebas en las siguientes condiciones:

**Primero**, El valor de **d**, longitud en la pantalla de incidencias, es la respuesta del dispositivo OBD para determinar el valor de desplazamiento de la válvula de succión.

Entonces, para determinar la repetibilidad del dispositivo OBD se realizaron cuatro mediciones de la longitud **d** para cada incremento de presión. En la figura 5.23 se muestran los resultados obtenidos.

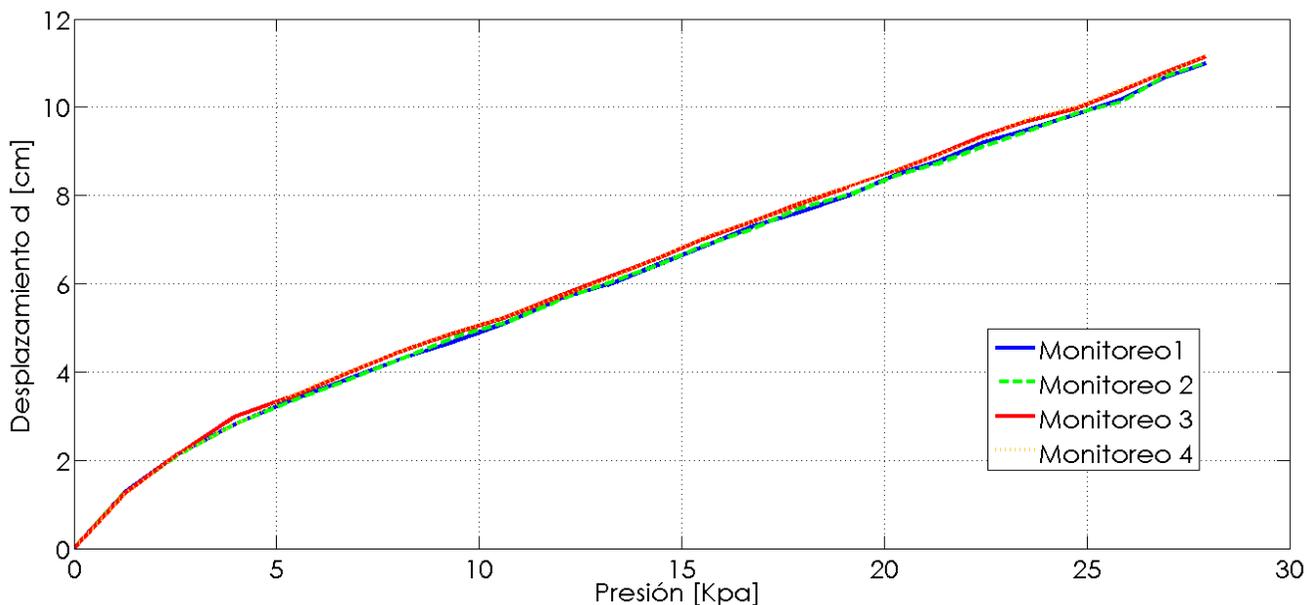


Figura 5.23. Respuesta del dispositivo OBD para determinar la repetibilidad del sistema.

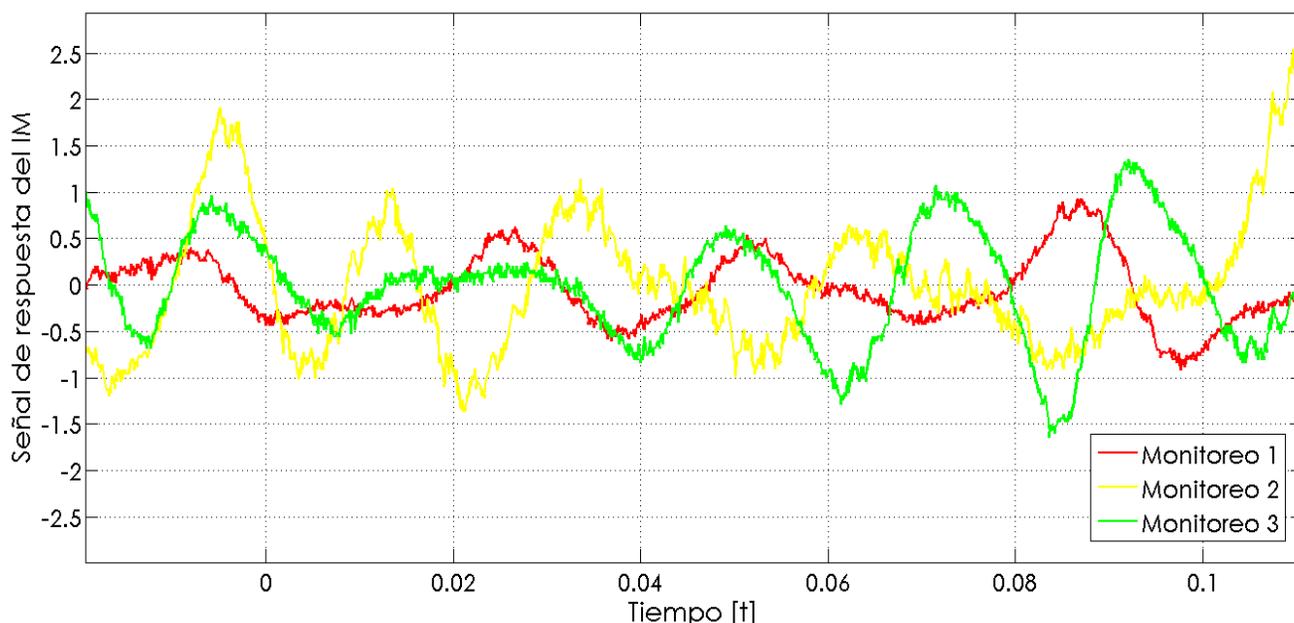
En la figura anterior se presentan las señales de respuesta del dispositivo OBD en función de la presión, medida en kPa. Con el objetivo de determinar la repetibilidad del sistema de medición se toman los puntos de cada una de las cuatro señales para un incremento de

presión, de los cuales se selecciona los valores mínimo y máximo con la finalidad de obtener la máxima variación entre mediciones cuyo valor corresponde a la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo. Se puede calcular, el efecto de repetibilidad en las mediciones dado el porcentaje de error:

$$\%E_{rep} = \frac{|d_{m\acute{a}x} - d_{m\acute{i}n}|}{d_{m\acute{a}x}} * 100 \quad \dots (5.25)$$

Aplicando la ecuación (5.25) para cada incremento de presión con las cuatro señales, se obtiene un error promedio de **2.76%**, dado el porcentaje de error se puede decir que el sistema de medición por OBD cumple con la característica de repetibilidad ya que el error puede ser despreciado, garantizando una precisión del **97.2%** en las mediciones.

**Segundo**, para determinar experimentalmente la repetibilidad del dispositivo basado en un interferómetro de Michelson, se realizaron tres mediciones de desplazamiento con un valor de presión igual a 0.080 [kPa]. En la figura 5.24 se muestran los resultados obtenidos.



**Figura 5.24. Respuesta del interferómetro de Michelson (IM) para determinar la repetibilidad del sistema.**

Se puede observar en la figura 5.24 las señales de respuesta del IM obtenidas con el fotodiodo en función del tiempo. Con el objetivo de determinar la repetibilidad del proceso de medición se toma el valor máximo pico a pico de cada señal, con los cuales se seleccionan los valores mínimo y máximo siendo estos  $V_{PP\_min} = 1.64$  y  $V_{PP\_max} = 2.32$ , respectivamente. Con los valores anteriores aplicamos la ecuación (5.25) y obtenemos un error porcentual del 29.3%, se puede decir que el dispositivo cumple con la característica de repetibilidad, garantizando una precisión del **70.7%**. Dicho valor se relaciona con la estabilidad y control de la fuente de presión, porque debido a esta se presentan pequeñas pulsaciones en la lengüeta de la válvula que son percibidas por el sistema.

### 5.4.2 Sensibilidad.

La sensibilidad de los instrumentos de medición corresponde a la variación del desplazamiento de la válvula de succión como respuesta a una entrada de presión, es decir, indica de manera cuantitativa como es que los instrumentos:

- El dispositivo OBD responde en términos del incremento del desplazamiento del spot láser reflejado en una pantalla, debido a la deflexión del haz láser.
- El interferómetro de Michelson responden en términos del incremento de intensidad en el fotodetector debido a la interferencia de los caminos ópticos.

**Primero**, para determinar la sensibilidad del dispositivo OBD se realizaron 2 mediciones del desplazamiento X de una válvula de succión y se obtuvieron las curvas de respuesta del dispositivo OBD, mostradas en la figura 5.25. Dichas curvas ofrecen directamente obtener la curva de sensibilidad o calibración.

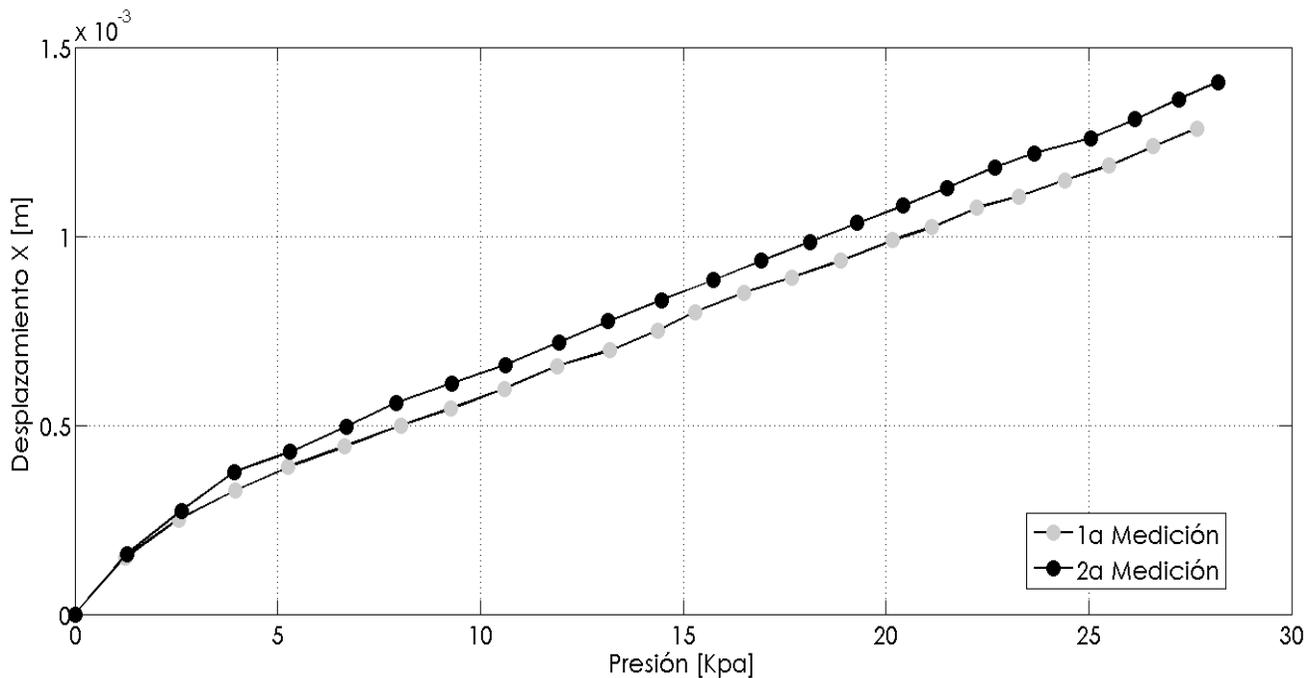


Figura 5.25. Respuesta del dispositivo OBD a diferentes valores de presión.

Para obtener la sensibilidad es necesario obtener la mejor recta que pase por los puntos de desplazamiento X en función de la presión P al que responden, es decir un ajuste lineal. Dado que se tienen dos curvas de medición se realiza un promedio de ellas para tener una curva promedio, de esta manera es posible obtener el mejor ajuste lineal como se muestra en la figura 5.26.

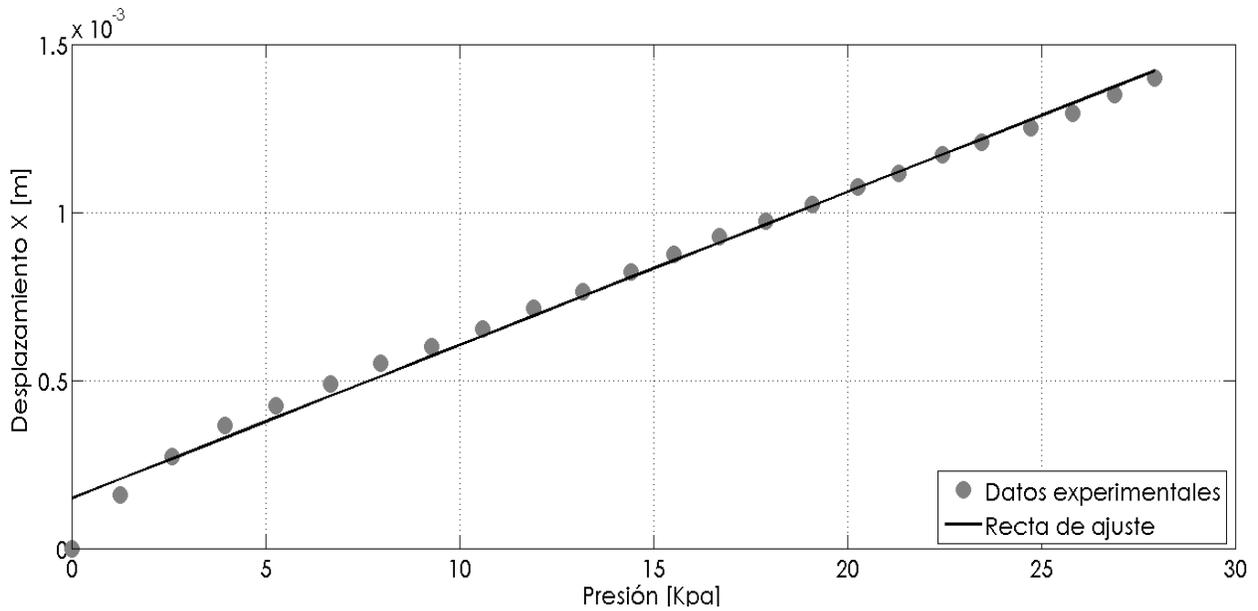


Figura 5.26. Recta de calibración de la respuesta del dispositivo OBD para incrementos de presión 1.21 kPa.

En la recta de calibración se grafican los valores del desplazamiento X de la válvula de succión como función de la presión aplicada, en ella es posible comprobar que cuanto mayor es esta última, mayor es el incremento del desplazamiento X de la válvula. Por otro lado, la pendiente de la recta da información sobre la sensibilidad del sensor, porque indica la razón de cambio del desplazamiento X dado un valor de presión, así la sensibilidad es igual a  $S_1 = 0.05 \times 10^{-3} \left[ \frac{\text{m}}{\text{kPa}} \right]$ .

**Segundo**, para determinar la sensibilidad del dispositivo IM se realizaron 2 mediciones del desplazamiento X de una válvula de succión, de las curvas obtenidas se tiene un curva promedio, de esta manera es posible obtener el mejor ajuste lineal como se muestra en la figura 5.27.

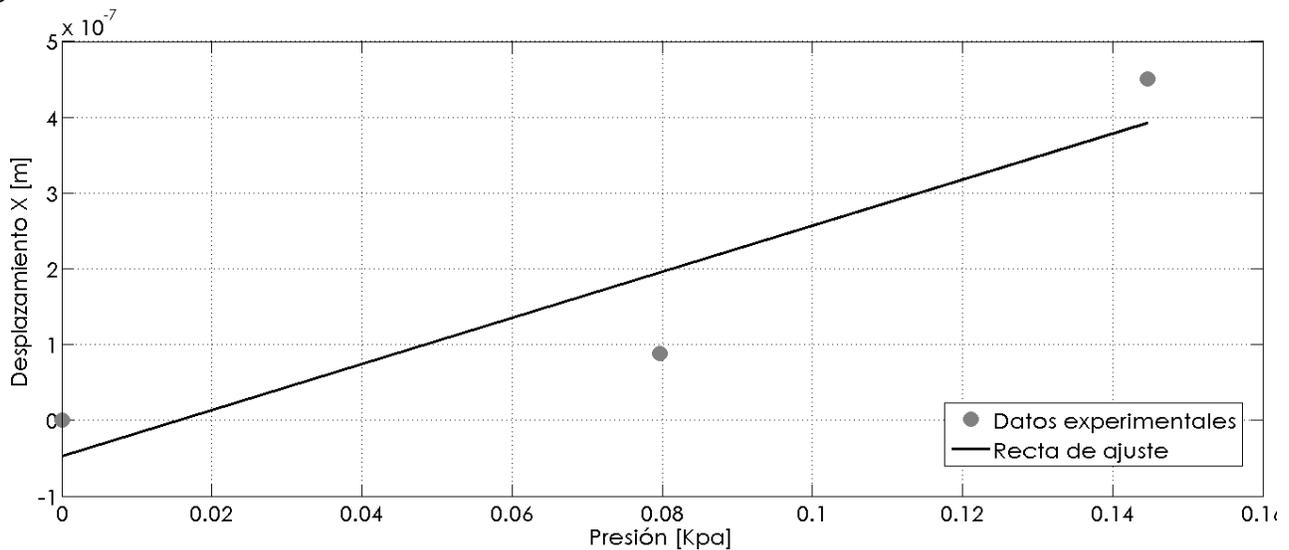


Figura 5.27. Recta de calibración de la respuesta del interferómetro de Michelson

En la recta de calibración se grafican los valores del desplazamiento X como función de la presión aplicada, en ella es posible comprobar que cuanto mayor es esta última, mayor es el incremento del desplazamiento X de la válvula. Por otro lado, la pendiente de la recta da información sobre la sensibilidad del sensor, porque indica la razón de cambio del desplazamiento X dado un valor de presión, así la sensibilidad es igual a  $S_2 = 3.04 \times 10^{-6} \left[ \frac{\text{m}}{\text{kPa}} \right]$ .

## 6. Conclusiones

---

*“Lo que no se define no se puede medir.  
Lo que no se mide no se puede mejorar.  
Lo que no se mejora se degrada siempre.”*

*(Lord Kelvin, 1885)*

En el presente trabajo se mostró el diseño, construcción e implementación de dos sensores ópticos de desplazamiento, uno de ellos basado en deflexión de haz láser y el otro en un interferómetro de Michelson. El uso de estos dispositivos tuvo como objetivo principal caracterizar el desplazamiento de una válvula de succión tipo lengüeta de un compresor recíprocante, cuyo valor es un parámetro importante para el rediseño de válvulas y aumento de la eficiencia energética de refrigeradores de uso doméstico. Contar con estos dispositivos se tiene la posibilidad de realizar múltiples pruebas en otras válvulas tipo lengüeta, con la finalidad de analizar y ajustar parámetros de diseño.

Se propuso una metodología de medición, indispensable para cuantificar el desplazamiento de una válvula de succión, desde el punto de vista práctico – experimental que se aproxima a su aplicación en el mundo real. De esta manera se obtienen por primera vez curvas características que representan una relación entre los distintos valores de presión proporcionados por una fuente con el desplazamiento de la válvula tipo lengüeta.

Los resultados experimentales demostraron que mediante el dispositivo de deflexión haz láser, el valor máximo de desplazamiento de la válvula de succión, fue de 1.4 [mm] a una presión de 27.9 [kPa], dicho valor fue antes de que apareciera una vibración en la lengüeta, por otro lado se obtuvo un desplazamiento mínimo de 49.66 [ $\mu\text{m}$ ]. Como complemento a estas mediciones se identificó una frecuencia de resonancia de 158.7 [Hz] a una presión de 32 [kPa] con un desplazamiento de vibración de  $87.02 \times 10^{-6}$  [m], dicha medición complementa la caracterización de la válvula, y sirve como parámetro de diseño en análisis de elementos finito [16 ,22].

Con el interferómetro de Michelson, se obtuvo como lectura máxima 0.45 [ $\mu\text{m}$ ] a 0.145 [kPa], debido a que la válvula tiene desplazamientos por encima de la capacidad de medición del instrumento, y una lectura mínima de 0.088 [ $\mu\text{m}$ ] a 0.08 [kPa]. Tomando en cuenta los valores anteriores, se puede concluir que el dispositivo de deflexión de haz láser es apto para medir desplazamientos máximos de la válvula de succión, mientras que el dispositivo de interferencia es preferible para determinar mínimos desplazamientos.

Para caracterizar la efectividad de los sistemas de medición se obtuvo su sensibilidad, siendo para el dispositivo de deflexión haz de  $0.05 \times 10^{-3} \left[ \frac{\text{m}}{\text{kPa}} \right]$ , mientras que para el

interferómetro de Michelson es de  $3.04 \times 10^{-6} \left[ \frac{\text{m}}{\text{kPa}} \right]$ . Como se puede apreciar el interferómetro de Michelson es más sensible que el dispositivo de deflexión haz láser.

Previo a este trabajo se propuso un modelo matemático del desplazamiento de la válvula de succión, como complemento se realizó un análisis comparativo de los datos experimentales y teóricos del desplazamiento de la válvula. Se observaron dos zonas de interés predominantes en la gráfica de presión contra desplazamiento, ver figura 5.21, concluyéndose un comportamiento de doble linealidad dado que se tiene una curva con pendiente diferente para cada área detectada. Se corroboró el modelo teórico utilizado, en cuanto al intervalo de mediciones perteneciente al mismo rango de magnitudes de los datos experimentales, es decir los valores encontrados están en escala de milímetros tal como en el modelo teórico, apoyando de esta manera la validez de ambas investigaciones.

Finalmente, se pretende que el trabajo realizado sirva como base para futuras investigaciones, y poder caracterizar confiablemente futuros diseños de válvulas para ser implementados en la refrigeración doméstica, tomando en cuenta que:

- Se obtuvieron los primeros parámetros de diseño para continuar en la misma línea de investigación de sensores ópticos, como son el rango de medición, repetibilidad y sensibilidad, con el objetivo de medir y mejorar.
- Se logró cuantificar de manera experimental, por primera vez el desplazamiento de una válvula de succión, cuyos valores se pueden tener en cuenta en los procesos de diseño y rediseño de válvulas tipo lengüeta o sistema compresor, considerándose como parámetro de diseño el rango de desplazamiento absoluto y desplazamientos positivos- negativos, dado un punto de referencia.

## REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- [1] Real, Marcelo Alexandre and Gomes Pereira Eduardo Augusto. Using PV Diagram Synchronized With the Valve Functioning to Increase the Efficiency on the Reciprocating Hermetic Compressors (2010). International Compressor Engineering Conference. Paper 1966. <http://docs.lib.purdue.edu/icec/1966>
- [2] Joo, J. M.; Oh, S. K.; Kim, G. K.; and Kim, S. H. Optimal Valve Design for Reciprocating Compressor (2000). International Compressor Engineering Conference. Paper 1421. <http://docs.lib.purdue.edu/icec/1421>
- [3] H. Espinoza. Experimental study of losses in one stage alternative compressor valves on variations of the revolutions and the discharge pressure. Puerto La Cruz, Venezuela. Universidad de Oriente, 2003.
- [4] Kim, Junghyoun; Wang, Semyung; Park, Sungwoo; Ryu, Kioh; and La, Jongpill. Valve Dynamic Analysis of a Hermetic Reciprocating Compressor (2006). International Compressor Engineering Conference. Paper 1805. <http://docs.lib.purdue.edu/icec/1805>
- [5] Buligan, G.; Paone, N.; Revel, G. M.; and Tomasini, E. P. Valve Lift Measurement By Optical Techniques in Compressors (2002). International Compressor Engineering Conference. Paper 1556. <http://docs.lib.purdue.edu/icec/1556>
- [6] Robles Ordoñez Ulises. Incremento en la eficiencia energética de compresores mediante el rediseño del sistema de válvulas. Celaya, Gto., México, Instituto Tecnológico de Celaya, 2015.
- [7] Robles Ordoñez U., Sánchez Rodríguez A. Modelo teórico de la termodinámica y carrera de un compresor recíprocante (2015). Revista electrónica en ingeniería mecánica. Volumen 26, pág. 14-27.
- [8] Secretaría de Economía, PRO MÉXICO. Electrodomésticos. Consulta realizada el 15 de mayo de 2016, en: [http://mim.promexico.gob.mx/work/sites/mim/resources/LocalContent/322/2/150113\\_Electrodomesticos\\_ES.pdf](http://mim.promexico.gob.mx/work/sites/mim/resources/LocalContent/322/2/150113_Electrodomesticos_ES.pdf)
- [9] Secretaría de Economía, PRO MÉXICO. Industria de electrodomésticos en México. Consulta realizada el 15 de mayo de 2016, en: <http://www.promexico.gob.mx/documentos/diagnosticos-sectoriales/electrodomesticos.pdf>
- [10] Virginie Letschert. Normas de desempeño energético mínimo para refrigeradores en México (2011). Informe para CONUEE. Consulta realizada el 17 de mayo 2016, en: <http://www.conuee.gob.mx/pdfs/normalizacion/Normasdedesempenioenergeticominimopara refrigeradoresenMexico.pdf>
- [11] Revista del consumidor. Energía. Consulta realizada el 17 de mayo de 2016, en: [https://issuu.com/profecoco/docs/revista\\_del\\_consumidor\\_conue\\_](https://issuu.com/profecoco/docs/revista_del_consumidor_conue_)
- [12] Comisión federal de electricidad (2012). Ahorro de energía. Consulta realizada el 17 de mayo de 2016, en: [http://www.cfe.gob.mx/casa/4\\_Informacionalcliente/Paginas/Ahorro-de-Energia.aspx](http://www.cfe.gob.mx/casa/4_Informacionalcliente/Paginas/Ahorro-de-Energia.aspx)
- [13] C. P. Fabricio, L. T. Marcio, "A Review of Household Compressor Energy Performance". International Compressor Engineering Conference 2004, July 12-15, West Lafayette, Indiana, USA, 2004. <http://docs.lib.purdue.edu/icec/1711>
- [14] Nagata, Shuhei; Nozaki, Tsutomu; and Akizawa, Takehiro, "Analysis of Dynamic Behavior of Suction Valve Using Strain Gauge in Reciprocating Compressor" (2010). International Compressor Engineering Conference. Paper 1979. <http://docs.lib.purdue.edu/icec/1979>
- [15] Papastergiou, S.; Brown, J.; and MacLaren, J. F. T., "Finite Element Analysis of Cantilever Valve Reeds in Reciprocating Gas Compressors" (1982). International Compressor Engineering Conference. Paper 404. <http://docs.lib.purdue.edu/icec/404>

- [16] Ho, J. S. and Chen, R. Y., "The Effect of Profile of Backing Plate Upon the Fatigue Life of a Cantilever Discharge Valve Reed" (1992). International Compressor Engineering Conference. Paper 886. <http://docs.lib.purdue.edu/iccec/886>
- [17] Luszczycski, M.; Cyklis, P.; and Zelasko, J., "Developed Mathematical Model of the Self-Acting Valves of the Reciprocating Compressor and Its Application for Tongue Valves" (1992). International Compressor Engineering Conference. Paper 918. <http://docs.lib.purdue.edu/iccec/918>
- [18] Joo, J. M.; Oh, S. K.; Kim, G. K.; and Kim, S. H., "Optimal Valve Design for Reciprocating Compressor" (2000). International Compressor Engineering Conference. Paper 1421. <http://docs.lib.purdue.edu/iccec/1421>
- [19] Li, H. and Wang, R., "Performance Improvement of R134a Refrigerator Compressor" (2000). International Compressor Engineering Conference. Paper 1435. <http://docs.lib.purdue.edu/iccec/1435>
- [20] Sheu, H. C. and Hu, Y. Z. R., "Nonlinear Vibration Analysis of Reed Valves" (2000). International Compressor Engineering Conference. Paper 1419. <http://docs.lib.purdue.edu/iccec/1419>
- [21] Buligan, G.; Paone, N.; Revel, G. M.; and Tomasini, E. P., "Valve Lift Measurement By Optical Techniques in Compressors " (2002). International Compressor Engineering Conference. Paper 1556. <http://docs.lib.purdue.edu/iccec/1556>
- [22] Kim, Junghyoun; Wang, Semyung; Park, Sungwoo; Ryu, Kioh; and La, Jongpill, "Valve Dynamic Analysis of a Hermetic Reciprocating Compressor" (2006). International Compressor Engineering Conference. Paper 1805. <http://docs.lib.purdue.edu/iccec/1805>
- [23] Real, Marcelo Alexandre and Pereira, Eduardo Augusto Gomes, "Using PV Diagram Synchronized With the Valve Functioning to Increase the Efficiency on the Reciprocating Hermetic Compressors" (2010). International Compressor Engineering Conference. Paper 1966. <http://docs.lib.purdue.edu/iccec/1966>
- [24] Nagata, Shuhei; Nozaki, Tsutomu; and Akizawa, Takehiro, "Analysis of Dynamic Behavior of Suction Valve Using Strain Gauge in Reciprocating Compressor" (2010). International Compressor Engineering Conference. Paper 1979. <http://docs.lib.purdue.edu/iccec/1979>
- [25] JIN Jiangming<sup>1</sup> and HONG Weirong, "Valve Dynamic and Thermal Cycle Model in Stepless Capacity Regulation for Reciprocating Compressor" (2012). Chinese Journal of Mechanical Engineering. Vol. 25, No. 6.
- [26] Dhar, Sandeep; Tamma, Bhaskar; Bhakta, Aditya; and Krishna, Murali, "An Approach Towards Reed Valve Geometry Design" (2014). International Compressor Engineering Conference. Paper 2261. <http://docs.lib.purdue.edu/iccec/2261>
- [27] Diario Oficial de la Federación, Normas oficiales. Norma Oficial Mexicana NOM-015-ENER-2012, Eficiencia energética de refrigeradores y congeladores electrodomésticos. Límites, métodos de prueba y etiquetado. Consulta realizada el 15 de mayo de 2016, en: <http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4646/sener/sener.htm>
- [28] Cengel, Y. & Boles, M. (2012). Termodinámica (7ª Ed.). México: McGraw-Hill.
- [29] Heinz P. Bloch. A practical guide to compressor technology (2º Ed.). EE.UU: A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION
- [30] 2000 ASHRAE Handbook HVAC Systems and Equipment.
- [31] Ding, Hui and Gao, Haiyang, "3-D Transient CFD Model For A Rolling Piston Compressor With A Dynamic Reed Valve" (2014). International Compressor Engineering Conference. Paper 2362. <http://docs.lib.purdue.edu/iccec/2362>
- [32] Consejo Superior de Investigaciones Científicas (España); Centro para el Desarrollo Tecnológico Industria (CSIC, CDTI). Introducción a los sensores. Madrid, 1987.
- [33] Basilio Sánchez Gilberto. Del LASER I Principio de funcionamiento del láser, en [www.cienciorama.unam.mx](http://www.cienciorama.unam.mx)
- [34] Svelto Orazio (2010). Principles of Lasers (5ª Ed.). NY, USA: Springer.
- [35] Fraden Jacob (2010). Handbook of Modern Sensors (4ª Ed.). NY, USA: Springer.
- [36] A.V. Shepeliov. Óptica. URSS, Moscú, 2003.

- [37] Hecht Eugene. Óptica. Addison Wesley Iberoamericana. Madrid, 2000.
- [38] RP Photonics Encyclopedia. Beam Splitters, en <https://www.rp-photonics.com>
- [39] Kourosh Kalantar-zadeh (2013). Sensors an Introductory Course. NY, USA: Springer.
- [40] B. M. Golam Kibria. Methods for Testing Population Signal-to-Noise Ratio. Communications in Statistics: Simulation & Computation.2014, Vol. 43 Issue 3, p443-461.
- [41] C. A. J. Putman, B. G. De Grooth, N. F. Van Hulst, and J. Greve. A detailed analysis of the optical beam deflection technique for use in atomic force microscopy. J. Appl. Phys. 72,6(1992).
- [42] C. Julian Chen. Introduction to Scanning Tunneling Microscopy. Oxford University Press, 1993.
- [43] Augusto García-Valenzuela and Rufino Diaz-Uribe. Detection limits of an internal-reflection sensor for the optical beam deflection method. APPLIED OPTICS y Vol. 36, No. 19 (1997).
- [44] L.Y. Beaulieu, Michel Godin, Olivier Laroche, Vincent Tabard-Cossa, Peter Grütter. A complete analysis of the laser beam deflection systems used in cantilever-based systems. Ultramicroscopy 107 (2007) 422–430.
- [45] John G. Webster, Halit Eren. Measurement Instrumentation and Sensors Handbook. Taylor & Francis Group, 2014.
- [46] A. H. Firester, M. E. Heller, and P. Sheng. Knife-edge scanning measurements of subwavelength focused light beams. APPLIED OPTICS y Vol. 16, No. 7 (1977).
- [47] D. Karabacak, T. Kouh, C. C. Huang, and K. L. Ekinici. Optical knife-edge technique for nanomechanical displacement detection. Applied Physics Letters 88, 193122 (2006).
- [48] Xinran Xiaoa and Daniel Schleh. Refractive error correction for in situ curvature measurement using laser beam deflection method. J. Appl. Phys. 107, 013508(2010).
- [49] Maja Dukic, Jonathan D. Adams & Georg E. Fantner. Piezoresistive AFM cantilevers surpassing standard optical beam deflection in low noise topography imaging. Scientific Reports 5, Article number: 16393 (2015).
- [50] Rodolfo I. Hermans and Benjamin Dueck. Optical diffraction for measurements of nano-mechanical bending. Scientific Reports 6, Article number: 26690 (2016).
- [51] Berta Oda Noda. Introducción al análisis grafico de datos experimentales. (Facultad de Ciencias, UNAM) 2013.

## Anexo 1. Ecuación de la elástica de una viga.

Cuando una viga con un eje longitudinal recto se carga con fuerzas laterales, el eje se deforma y adopta una forma curva, denominada curva elástica o elástica de la viga, también llamada curva de deflexión.

La mayor parte de los procedimientos para determinar las deflexiones se basan en ecuaciones diferenciales de la curva elástica y sus relaciones asociadas; por esta razón en el siguiente apartado se deduce la ecuación básica para la curva elástica de una viga.

Para fines de análisis, considere una viga en voladizo con una carga concentrada que actúa hacia arriba en el extremo libre (ilustración 1.1a). Debido a la acción de esta carga el eje de la viga se deforma y adopta una forma curva, como se muestra en la ilustración 1.1b. Los ejes de referencia tienen su origen en el empotramiento de la viga, con el eje  $x$  dirigido hacia la derecha y el eje  $y$  dirigido hacia arriba. El eje  $z$  está dirigido hacia fuera de la figura (hacia el observador) <sup>[A], [B]</sup>.

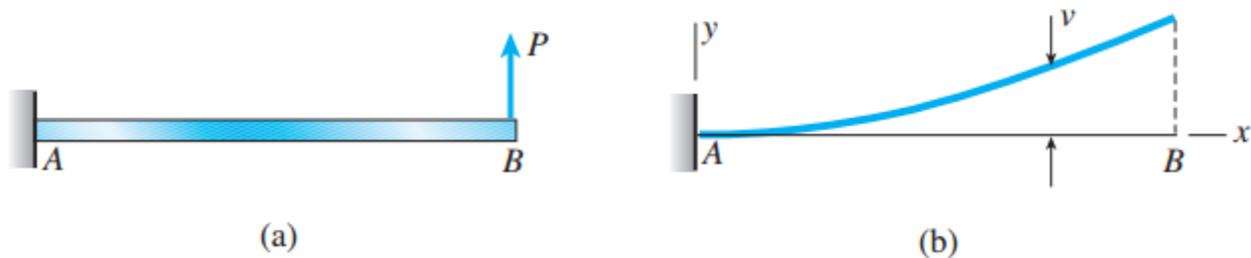


Ilustración 1.1. Curva elástica de una viga en voladizo (Gere, 2009).

Llamaremos deflexión  $v$  al desplazamiento de cualquier punto sobre el eje de la viga (ilustración 1.1b). Dado que el eje  $y$  es positivo hacia arriba, las deflexiones también son positivas hacia arriba.

Para obtener la ecuación de la curva elástica, se debe expresar la deflexión  $v$  como una función de la coordenada  $x$ . Por tanto, consideremos ahora la curva elástica con más detalle. La deflexión  $v$  en cualquier punto  $m_1$  sobre la curva elástica se muestra en la ilustración 1.2a. El punto  $m_1$  está ubicado a una distancia  $x$  desde el origen (medida a lo largo del eje  $x$ ), también se muestra un segundo punto  $m_2$ , ubicado a una distancia  $x + dx$  desde el origen. La deflexión en este segundo punto es  $v + dv$ , donde  $dv$  es el incremento en la deflexión conforme nos movemos a lo largo de la curva de  $m_1$  a  $m_2$ .

Cuando la viga se flexiona, no sólo hay una deflexión en cada punto a lo largo del eje, sino también una rotación. El ángulo de rotación  $\theta$  del eje de la viga es el ángulo entre el eje  $x$  y

<sup>[A]</sup> R.C. Hibbeler. Mecánica de materiales. PEARSON EDUCACIÓN, México, 2006.

<sup>[B]</sup> Gere, James y Barry J. Goodno. Mecánica de materiales. CENGAGE LEARNING, México, 2009.

la tangente a la curva elástica, como se muestra para el punto  $m_1$  en la vista ampliada de la ilustración 1.2b. El ángulo de rotación en el punto  $m_2$  es  $\theta + d\theta$ , donde  $d\theta$  es el incremento angular conforme nos movemos del punto  $m_1$  al punto  $m_2$ . Se deduce que si trazamos líneas normales a las tangentes (ilustración 1.2a y b), el ángulo entre estas normales es  $d\theta$  [B].

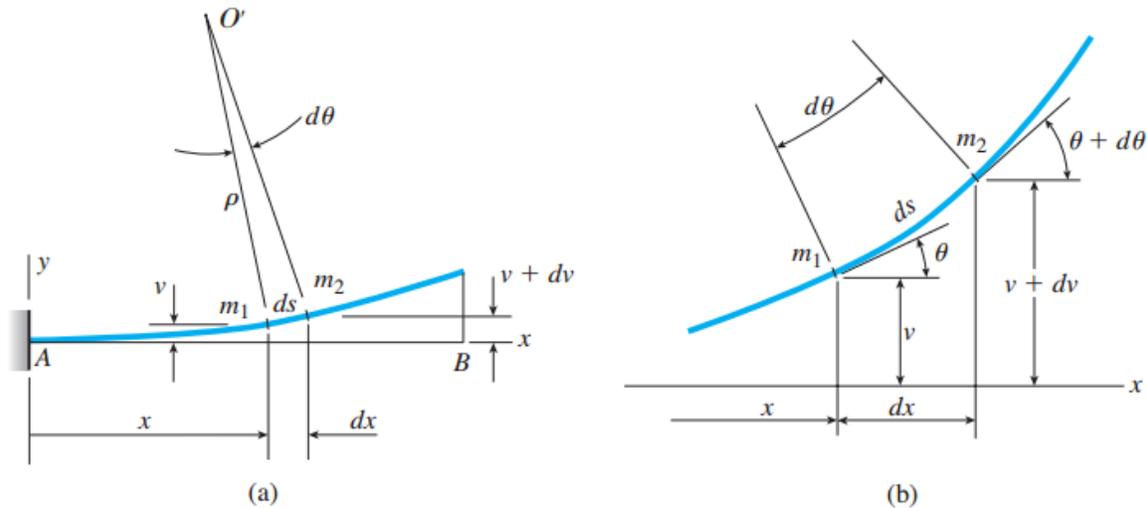


Ilustración 1.2. Curva elástica de una viga (Gere, 2009).

El punto de intersección de estas normales es el centro de curvatura  $O'$  (ilustración 1.2a) y la distancia desde  $O'$  hasta la curva es el radio de curvatura  $\rho$ . De la ilustración 1.2a, podemos escribir:

$$\rho d\theta = ds \quad (A.1)$$

en donde  $d\theta$  está en radianes y  $ds$  es la distancia a lo largo de la curva elástica entre los puntos  $m_1$  y  $m_2$ . Por tanto, la curvatura  $k$  (igual al recíproco del radio de curvatura) está dada por la ecuación:

$$k = \frac{1}{\rho} = \frac{d\theta}{ds} \quad (A.2)$$

La convención de signos para la curvatura se observa en la ilustración 1.3. Observe que la curvatura es positiva cuando el ángulo de rotación aumenta cuando nos movemos a lo largo de la viga en la dirección  $x$  positiva.

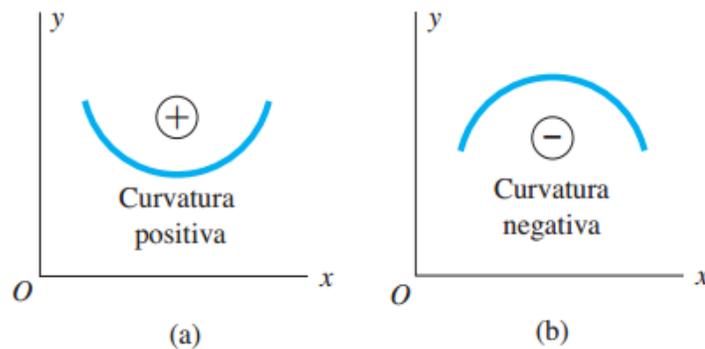


Ilustración 1.3. Convención de signos para la curvatura (Gere, 2009).

Si el ángulo de rotación  $\theta$  es una cantidad muy pequeña (y de aquí que la curva de deflexión sea casi horizontal), de inmediato observamos que la distancia  $ds$  a lo largo de la curva de deflexión es prácticamente la misma que el incremento  $dx$  a lo largo del eje  $x$ .

$$ds \approx dx \quad (A.3)$$

Con esta aproximación, la curvatura resulta

$$k = \frac{1}{\rho} = \frac{d\theta}{dx} \quad (A.4)$$

Además cuando  $\theta$  es pequeño, se puede hacer la siguiente aproximación:

$$\theta \approx \tan \theta = \frac{dv}{dx} \quad (A.5)$$

Entonces, si las rotaciones de una viga son pequeñas, podemos suponer que el ángulo de rotación  $\theta$  y la pendiente  $dv/dx$  son iguales. Al derivar  $\theta$  con respecto a  $x$  en la ecuación (A.5), obtenemos

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{d^2v}{dx^2} \quad (A.6)$$

Combinamos esta ecuación con la ecuación (A.4) para obtener una relación entre la curvatura de una viga y su deflexión:

$$k = \frac{1}{\rho} = \frac{d^2v}{dx^2} \quad (A.7)$$

Esta ecuación es válida para una viga de cualquier material, siempre que las rotaciones sean pequeñas. Si el material de una viga es linealmente elástico y sigue la ley de Hooke, la curvatura es

$$k = \frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} \quad (A.8)$$

en donde  $M$  es el momento flexionante y  $EI$  es la rigidez a la flexión de la viga.

Al combinar la ecuación (A.7) con la ecuación (A.8) se obtiene la **ecuación diferencial básica de la curva elástica** de una viga <sup>[B]</sup>:

$$\frac{d^2v}{dx^2} = \frac{M}{EI} \quad (A.9)$$

Esta ecuación se puede integrar en cada caso particular para encontrar la deflexión  $v$ , siempre que el momento flexionante  $M$  y la rigidez a la flexión  $EI$  se conozcan como funciones de  $x$ .

## Anexo 2. Código de programación en MATHEMATICA del modelo de la válvula tipo lengüeta.

### Modelo del desplazamiento de la Lengüeta

---

#### Datos de válvula

```
In[1]:= DL = 0.007; (*m*) (*Diámetro de la Lengüeta*)
a = 0.0246; (*largo de la Lengüeta*)
Aldl = (π * (0.003)^2) / 0.007;
(*superficie donde esta la presión /Diámetro de la Lengüeta *)
(*para el circulo de la manguera =
π*(0.003)^2 y para una superficie rectangular= a*d1=(0.0246*0.007) *)
e = 210000000; (*Modulo de elasticidad*)
b = 0.0114; (*Distacia donde ésta empotrada la lengüeta, antes 0.0114*)
h = 0.0003; (*Espesor de la Lengüeta antes .0003*)
Fin

Out[7]= Fin

In[8]:=
MI = (b / 12) * (h^3); (*Momento de inercia respecto de x*)
fin

Out[9]= fin
```

---

#### Ecuaciones

```
In[10]:=
Y[dp_] := - ((- (dp * Aldl * DL * (a^3)) / 3) + ((dp * Aldl * DL^2 * (a^2)) / 4) -
((dp * Aldl * (DL^4)) / 24)) / (e * MI); (*Desplazamiento de la válvula*)

P[y_] :=
(y * e * MI) / ((Aldl * DL * (a^3) / 3) - ((Aldl * DL^2 * (a^2)) / 4) + ((Aldl * (DL^4)) / 24));
(*Diferencia de presión*)

Grafica[Tabla_, RGB_, X_, Y_] :=
ListPlot[Tabla, ImageSize → 600, BaseStyle → {14, FontFamily → "CenturyGothic"},
Joined → True, PlotStyle → {Thickness[0.008], RGB}, Frame → True,
FrameLabel → {X, Y}, GridLines → Automatic, PlotRange → All];
fin

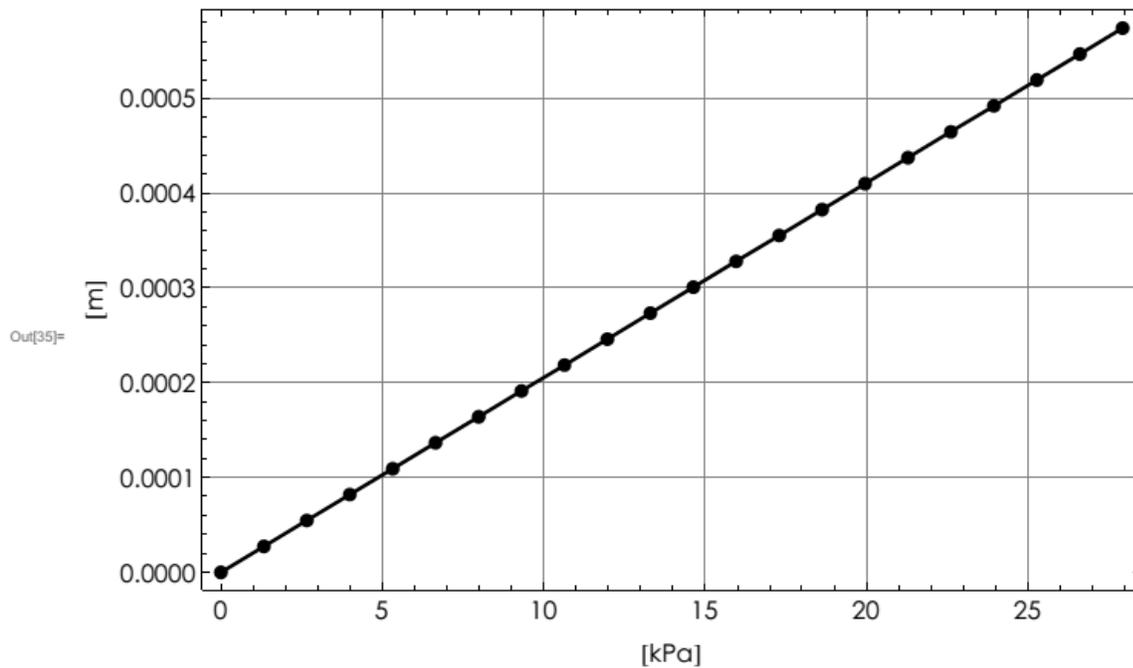
Out[13]= fin
```

## Solución de desplazamiento y Gráfica

```
In[32]:= (*Desplazamiento de la válvula con incrementos de presión de 1.33[KPa] *)
Tabla0 = Table[{i, Y[i]}, {i, 0, 28, 1.33}]
puntos = ListPlot [Tabla0, PlotStyle -> {PointSize [0.015], RGBColor[0, 0, 0]};
Fig0 = Grafica[Tabla0, RGBColor[0, 0, 0], "[kPa]", "[m]";

Show[Fig0, puntos]
```

```
Out[32]:= {{0., 0.}, {1.33, 0.0000273498}, {2.66, 0.0000546996}, {3.99, 0.0000820495},
{5.32, 0.000109399}, {6.65, 0.000136749}, {7.98, 0.000164099}, {9.31, 0.000191449},
{10.64, 0.000218799}, {11.97, 0.000246148}, {13.3, 0.000273498}, {14.63, 0.000300848},
{15.96, 0.000328198}, {17.29, 0.000355548}, {18.62, 0.000382898},
{19.95, 0.000410247}, {21.28, 0.000437597}, {22.61, 0.000464947},
{23.94, 0.000492297}, {25.27, 0.000519647}, {26.6, 0.000546996}, {27.93, 0.000574346}}
```



### Anexo 3. Procedimiento para desensamblar un compresor.

Enseguida se describe los pasos necesarios para desensamblar un compresor y obtener el sistema de válvulas. El compresor se encuentra inicialmente como se muestra en la ilustración 3.1.



Ilustración 3.1 Compresor

Se realiza el siguiente procedimiento.

**Paso 1.** Se enciende el compresor para verificar su funcionamiento, de no cumplir esto no se siguen los pasos siguientes.

**Paso 2.** Extraemos la mayor cantidad de aceite, el cual se filtra y se guarda en un recipiente de plástico.

**Paso 3.** Para cortar la carcasa del compresor se utiliza un esmeril angular [Black & Decker G720-B3] con un disco de corte para metal [EN 12413].



**Paso 4.** Al separarse la tapa se toma una de ellas para verter el aceite restante. Este aceite es almacenado para su posible uso.

**Paso 5.** Cortar con segueta el tubo de descarga y lijar el tubo.

**Paso 6.** Desconectar conector de alimentación con un desarmador.

**Paso 7.** Sacar motor-compresor con las manos que se encuentra montado sobre los resortes de suspensión.

**Paso 8.** Con un dado o llave de 8mm, se retiran los tornillos de la válvula de aspiración (pieza de polímero). Enseguida se retiran los tornillos que sujetan el mecanismo cilindro-pistón. Y de este último ensamble se obtienen las válvulas de descarga y succión tipo lengüeta.



Ilustración 3.2. Corte de carcasa

## Anexo 4. Código de programación en LabVIEW para adquisición de datos

Con el siguiente código y la tarjeta de adquisición NI-USB9162 se realizó la adquisición de datos de presión e intensidad.

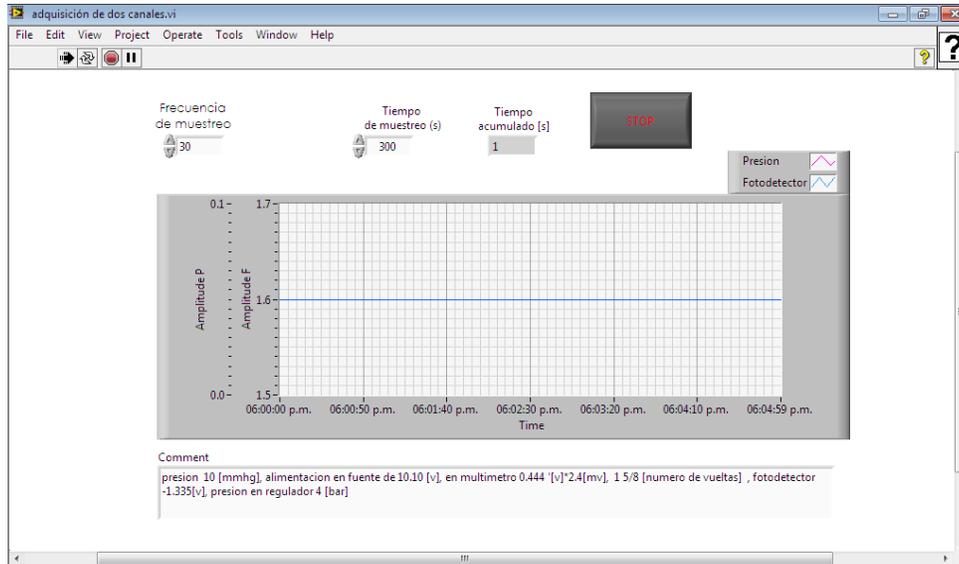


Ilustración 4.1. Panel frontal para ajustar el tiempo de adquisición

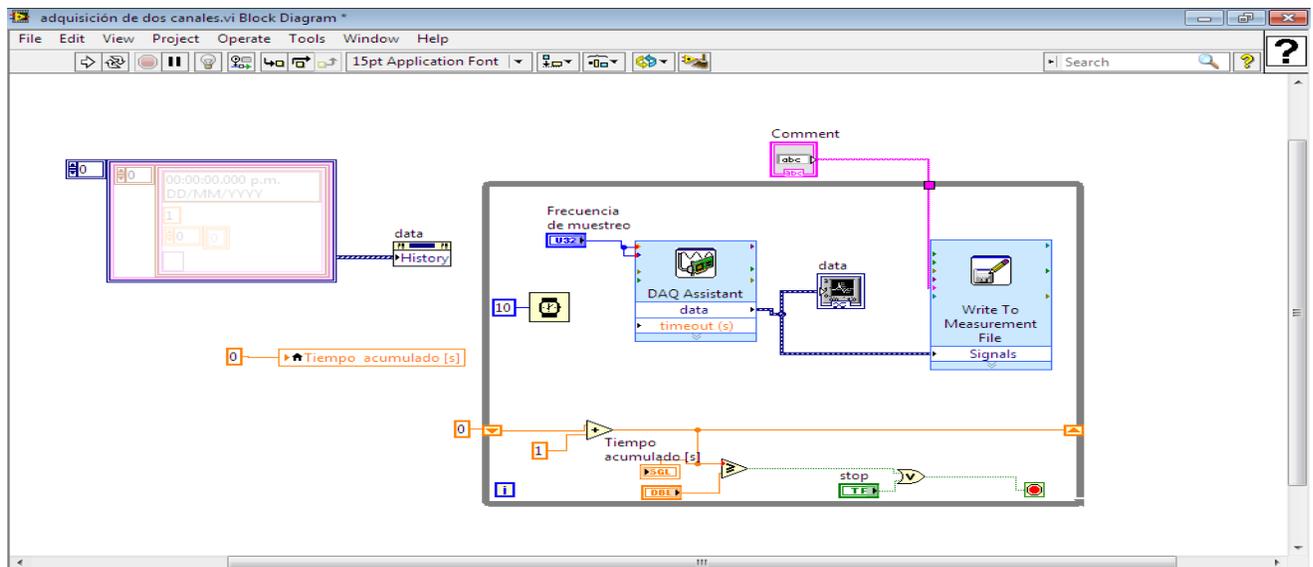


Ilustración 4.2. Diagrama de bloque para disponer de E/S de DAQ NI USB-9162