



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Comparación de la sensibilidad de detección entre un  
interferómetro de Michelson y un dispositivo que utiliza el  
método de la reflexión del haz óptico**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

**PRESENTA:**

**ERICK GONZÁLEZ ESPINOSA**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**DR. GABRIEL EDUARDO SANDOVAL ROMERO**

**2014**



**CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y  
DESARROLLO TECNOLÓGICO**

<b>INDICE</b>	<b>Página</b>
<b>Introducción</b>	5
<b>Objetivos</b>	7
<b>Hipótesis</b>	8
<b>Capítulo 1. Antecedentes</b>	
1.1 La naturaleza de la luz	9
1.2. Onda	9
1.3 Propagación de la luz	10
1.4 Dispersión de la luz	13
1.5 Reflexión y refracción	13
1.6 Ecuaciones de Maxwell	16
1.7 Ley de Gauss	16
1.8 Ley de Faraday	17
1.9 Ley de Gauss para el campo magnético	18
1.10 Ley de Ampere	18
1.11 Atenuación	19
1.12 Superposición de ondas	21
Conclusiones del capítulo	24

## **Capítulo 2. Interferometría y métodos de reflexión del haz láser; teoría, conceptos básicos y dispositivos**

2.1 Dispositivos	25
2.1.1 Piezoeléctrico	25
2.1.2 Láser	27
2.1.3 Prisma divisor de haz	29
2.1.4 Fotodetector	30
2.2 Interferencia	31
2.3 Reflexión especular y reflexión difusa	33
2.4 Interferómetros	34
2.4.1 Interferómetro de Mach-Zehnder	34
2.4.2 Interferómetro de Fabry-Perot	35
2.4.3 Interferómetro de Sagnac	37
2.4.4 Interferómetro de Michelson	38
Conclusiones del capítulo	40

## **Capítulo 3. Implementación de un interferómetro de Michelson y de un dispositivo que utiliza el método de reflexión del haz láser**

3.1 Implementación de un dispositivo que utiliza el método de reflexión del haz láser (RHL)	41
3.2 Piezoeléctrico (PZT)	42
3.3 Implementaciones para la caracterización del PZT	43
3.3.1 Implementación A	43
3.3.2 Implementación B	46

3.4 Implementaciones para la caracterización del dispositivo de RHL	49
3.4.1 Implementación #1	49
3.4.2 Implementación #2	54
3.5 Implementaciones del Interferómetro de Michelson (IM)	59
3.5.1 Implementación #3.	61
3.5.2. Implementación #4.	66
Conclusiones del capítulo	70

## **Capítulo 4. Comparación de resultados y conclusiones**

4.1 Comparación de resultados. Implementaciones #1 y #3	72
4.1.1 Relación señal/ruido	78
4.2 Comparación de resultados. Implementaciones #2 y #4	80
<b>Conclusiones generales</b>	86

<b>Bibliografía</b>	88
---------------------	----



## INTRODUCCIÓN

En el área de la instrumentación científica y tecnológica, existe la necesidad de medir desplazamientos de longitud muy pequeños, producidos por la presencia de algún fenómeno externo que se convierte en una magnitud física que nos permita cuantificar o llevar un registro de mediciones. Para realizar esta medición, es necesario tener los dispositivos adecuados, que permitan realizar una cuantificación veraz de la magnitud física que indirectamente está presente.

En este trabajo se proponen dos dispositivos implementados en el laboratorio, que nos permitan realizar esas mediciones con una gran precisión, los cuales entre ellos difieren, básicamente en la complejidad de su construcción; el primer dispositivo implementado es un interferómetro de Michelson en óptica de volumen y el segundo es un dispositivo que utiliza la técnica de la reflexión del haz láser.

Por otro lado, se utiliza como actuador un piezoeléctrico el cual reacciona con el estímulo de una corriente eléctrica que se propaga en este dispositivo, su forma de manifestarse externamente, es notoria ya que emite una vibración regular y constante que depende de la frecuencia y voltaje de alimentación.



El objetivo principal de este trabajo, está enfocado en la comparación de los resultados de medición entre los dos dispositivos implementados (interferómetro de Michelson y el dispositivo que utiliza el método de la reflexión del haz laser), el cual consiste en medir el desplazamiento provocado en un piezoeléctrico, cuando se le hace circular una corriente en la superficie de éste, existe un cambio en la posición del PZT provocada por el cambio del voltaje y de la frecuencia, dependiendo de las condiciones que vaya requiriendo el experimento.

Se compara la máxima sensibilidad que se puede alcanzar en las mediciones realizadas; en este caso la sensibilidad está relacionada, con el mínimo desplazamiento que puede realizar el piezoeléctrico, cuando la frecuencia y el voltaje que se emiten sean mínimos.



## OBJETIVOS

- 1) Estudiar algunos de los conceptos básicos de física general (electromagnetismo, ondas y óptica).
- 2) Investigar y aplicar conceptos de interferometría al implementar un Interferómetro de Michelson (IM) y un dispositivo que utiliza la reflexión del haz laser (RHL)
- 3) Comparar la sensibilidad de detección entre un Interferómetro de Michelson (IM) y un dispositivo que utiliza la reflexión del haz laser (RHL)
- 4) De la comparación, determinar cuál de los dos dispositivos es el más adecuado para realizar este tipo de mediciones



---

## ***HIPOTESIS***

---

Según la teoría y práctica un sistema interferométrico (en nuestro caso un IM) es altamente sensible y permite detectar, cambios muy pequeños en la amplitud de la señal que registra. Por otro lado un dispositivo que utiliza la reflexión del haz laser, también es muy sensible a pequeños cambio en la amplitud, cuando existe un cambio en el camino óptico. En este trabajo se presentara una comparación para determinar cuál de estos dos dispositivos (IM y RHL) es más sensible, bajo las mismas condiciones de operación, suponiendo que efectivamente el IM sea el más sensible, determinando si se cumple esto.



## CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

### 1.1 La naturaleza de la luz

Hasta la época de Isaac Newton (1642-1727), la mayoría de científicos pensaban que la luz consistía en corrientes de partículas (llamadas corpúsculos) emitidas por las fuentes luminosas. Galileo y otros intentaron (sin éxito) medir la rapidez de la luz.

Alrededor de 1665, comenzaron a descubrirse evidencias de las propiedades ondulatorias de la luz. A principios del siglo XIX, las evidencias de que la luz es una onda se habían vuelto muy convincentes. En 1873 James Clerk Maxwell predijo la existencia de ondas electromagnéticas y calculó su rapidez de propagación. Este avance, así como el trabajo experimental que inició en 1887 Heinrich Hertz, demostró en forma concluyente que la luz en verdad es una onda electromagnética [1]

### 1.2 Onda

Es la variación de una magnitud eléctrica, la cual es capaz de desplazarse en el espacio u oscilar dentro de una región limitada del espacio.

La onda más simple es la onda plana homogénea, cuya magnitud  $E$  depende de la coordenada espacial  $x$  y del tiempo  $t$ ,

$$E(t) = E\left(t - \frac{x}{v}\right) \quad , \quad (1)$$

De la misma manera que cualquier oscilación puede ser descompuesta en armónicos, cualquier onda plana puede ser representada en forma de una suma de ondas armónicas planas [2], es decir, de ondas del tipo:

$$E(t) = E_0 \text{sen}\left(\omega\left(t - \frac{x}{v}\right) + \varphi_0\right) , \quad (2)$$

### 1.3 Propagación de la luz

La propagación de la luz viene obedeciendo lo que es a la ecuación de onda, sin embargo, mucho antes de que Maxwell desarrollara su teoría de las ondas electromagnéticas, la propagación de la luz y otras fue descrita empíricamente por dos principios muy interesantes y muy distintos atribuidos al físico holandés Christian Huygens.

El principio de Huygens se describe básicamente en la siguiente figura

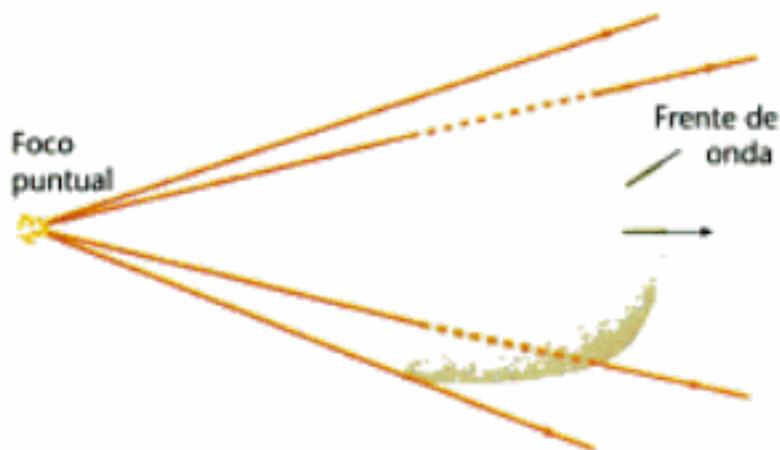


Figura 1.1. Frente de onda esférico procedente de un foco puntual.

En la figura 1.1, puede verse una porción de un frente de ondas esférico que procede de un foco puntual. El frente de ondas es el lugar geométrico de los puntos con fase constante. Si en el instante  $t$  el radio del frente de onda es  $r$ , su radio en el instante  $t + \Delta t$  es  $r + c \Delta t$ , siendo  $c$  la velocidad de la onda. Sin embargo, si una parte de la onda se ve bloqueada por un cierto obstáculo, o si la onda pasa a través de distintos medios como lo muestra la figura 1.2, se puede observar que es mucho más difícil de determinar el nuevo frente de onda en el instante  $t + \Delta t$ . La propagación de una onda cualquiera a través del espacio puede describirse utilizando un método geométrico descubierto por Christian Huygens en 1678 y que ahora se conoce como principio de Huygens o construcción de Huygens.

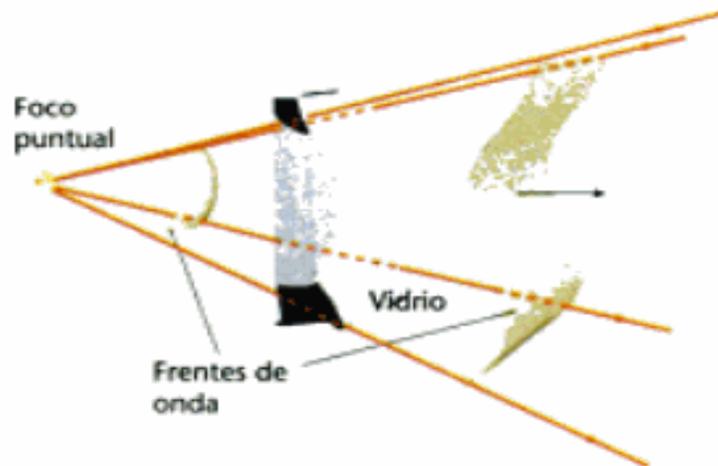


Figura 1.2. Frentes de onda provenientes de un punto focal antes y después de pasar un vidrio.

En la figura 1.3, se muestra la aplicación del principio de Huygens a la propagación de una onda plana y una onda esférica,



Figura 1.3. Principio de Huygens, para la propagación derecha de una (a) onda plana y una (b) onda esférica.

Como es natural, si todos los puntos de un frente de onda fuesen realmente un foco puntual, habría también ondas moviéndose hacia atrás. Huygens no tuvo en cuenta esas ondas en retroceso.

El principio de Huygens fue posteriormente modificado por Augustin Fresnel, de modo que se calculaba el nuevo frente de onda a partir del frente de onda primario mediante la superposición de ondas elementales considerando sus amplitudes y fases relativas. Aun más tarde Kirchhoff demostró que el principio de Huygens-Fresnel, era una consecuencia de la ecuación de onda, situándolo así sobre una



base matemática firme. Kirchhoff demostró que la intensidad de las ondas elementales depende del ángulo y que es nula para  $180^\circ$  (en retroceso) [3].

#### 1.4 Dispersión de la luz

La dispersión de la luz se produce cuando un haz de luz encuentra en su camino materia, los núcleos y los electrones experimentan vibraciones inducidas en fase a la onda de luz incidente, y actúan como fuentes de luz que se propagan en todas las direcciones, para dar un efecto de polarización, con la misma longitud de onda que el rayo incidente. La dispersión de luz se produce en muchos fenómenos naturales, que incluyen los colores del cielo y del arco iris y de la mayor parte de los materiales blancos [4].

#### 1.5 Reflexión y refracción

La velocidad de la luz en un medio transparente como el aire, el agua o el vidrio, es menor que la velocidad  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$  en el vacío. Un medio transparente se caracteriza por el índice de refracción  $n$ , que se define por el cociente entre la velocidad del vacío  $c$ , y la velocidad en el medio,  $v$ .

$$n = \frac{c}{v}, \quad (3)$$

Cuando un haz de luz incide sobre una superficie límite de separación entre dos medios, como una superficie aire-vidrio, parte de la energía se refleja y parte entra en el segundo medio. Si la luz incidente no es perpendicular a la superficie, entonces, la luz transmitida no es paralela a la incidente. El cambio en la dirección del rayo transmitido se denomina refracción.

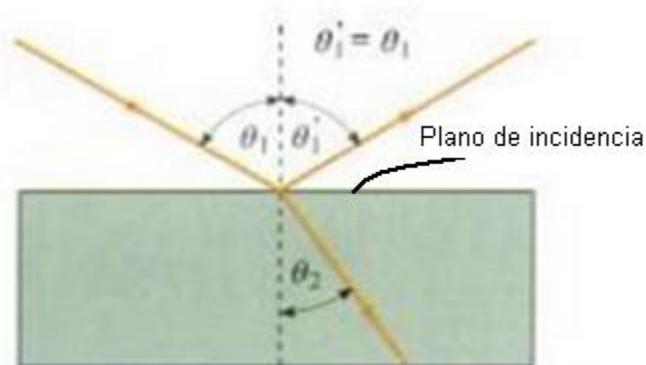


Figura 1.4. El ángulo de reflexión  $\theta'_1$ , es igual al ángulo de incidencia  $\theta_1$ .

La figura 1.4 muestra un rayo de luz que incide sobre una superficie lisa aire-vidrio. El ángulo  $\theta_1$  entre el rayo incidente y la normal se denomina ángulo de incidencia y el plano definido por ambas líneas recibe el nombre de plano de incidencia. El rayo reflejado pasa por el plano de incidencia y forma un ángulo  $\theta'_1$  con la normal que es igual al ángulo de incidencia

$$\theta'_1 = \theta_1, \quad (4)$$



Este resultado (4) se conoce como ley de la reflexión y es válida para cualquier tipo de onda. El rayo que entra en el vidrio de la figura 1.4, se denomina rayo refractado y el ángulo  $\theta_2$ , es el ángulo de refracción. Cuando una onda cruza un límite en el cual se reduce su velocidad, como en el caso de la luz que penetra el vidrio desde el aire, el ángulo de refracción es menor que el ángulo de incidencia  $\theta_1$ , es decir, el rayo refractado se aproxima a la normal. En cambio si el haz de luz se origina en el vidrio y se refracta en el aire, entonces el rayo refractado se aleja a la normal.

El ángulo de refracción, depende de ángulo de incidencia y de la velocidad relativa de las ondas de luz en los medios. Si  $v_1$  es la velocidad de la onda en el medio incidente y  $v_2$  la velocidad de la onda en el medio transmisor, los ángulos de incidencia y refracción vienen relacionado por:

$$\frac{1}{v_1} \text{sen } \theta_1 = \frac{1}{v_2} \text{sen } \theta_2, \quad (5)$$

La ecuación (5) es válida para la refracción de cualquier tipo de onda incidente en una interfaz límite que separe dos medios distintos. En función de los índices de refracción de los dos medios  $n_1$  y  $n_2$  la ecuación (5) toma la forma de la ley de Snell [5]

$$n_1 \text{sen } \theta_1 = n_2 \text{sen } \theta_2, \quad (6)$$



## 1.6 Ecuaciones de Maxwell

En 1864, Maxwell postuló un grupo de ecuaciones que permitían describir todos los fenómenos electromagnéticos hasta entonces conocidos, al mismo tiempo que predecían la interdependencia de los campos eléctricos y magnéticos y la propagación de la energía electromagnética con la velocidad de la luz.

Las ecuaciones de Maxwell son solo aplicables a los fenómenos macroscópicos, pues admiten la materia continua y no tienen en cuenta su naturaleza discreta, siendo esta la única restricción de que impone limitaciones a las ecuaciones de Maxwell.

## 1.7 Ley de Gauss

Esta ecuación se escribe

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad , \quad (7)$$

Fue obtenida, en el marco de la electrostática, como una consecuencia directa de la ley de Coulomb y del principio de superposición y fue deducida al aplicarle el teorema de Gauss al punto interior de un dieléctrico. Sin embargo, la ley de Gauss sigue siendo cierta incluso cuando hay presentes campos variables con el tiempo, para los que deja de ser válida la ley de Coulomb; es una ecuación universal.



La interpretación física de dicha ecuación nos dice que las cargas reales son las fuentes o sumideros de las líneas de campo del vector  $D$  y, por tanto, admitir tal ecuación es admitir la existencia de cargas libres y su probabilidad de aislamiento.

### 1.8 Ley de Faraday

Resume todas las leyes de inducción eléctrica y traduce, junto con la ley de Ampere modificada, la relación existente entre los campos eléctricos y magnéticos.

Fue simbolizada por Maxwell de la siguiente forma,

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} , \quad (8)$$

Todo campo magnético variable engendra un campo eléctrico tal que, en cada punto, el vector rotacional del campo eléctrico es igual a la derivada local del vector  $B$ .

El campo eléctrico de los dieléctricos, produce los mismos efectos que el campo eléctrico ordinario y en los conductores genera la corriente eléctrica. Es de observar que la ecuación se cumple, aunque existan cargas, pues el campo



debido a ellas es irrotacional  $\vec{\nabla} \times \vec{E} = 0$ . Con esto, el campo eléctrico puede ser engendrado por campos magnéticos variables o cargas eléctricas en reposo.

### 1.9 Ley de Gauss para el campo magnético

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (9)$$

Esta ecuación es independiente de la naturaleza del medio material, siendo, por tanto, una ecuación universal y es la traducción matemática de que las líneas del campo del vector  $B$  son siempre cerrados o llenan densamente una superficie. Es decir, que el vector del campo  $B$  carece de fuentes y que, por consiguiente, no tiene sentido físico hablar de cargas magnéticas libres.

### 1.10 Ley de Ampere

Ampere formuló una relación para un campo magnético inmóvil y una corriente eléctrica que no varía en el tiempo. La ley de Ampere nos dice que la circulación en un campo magnético ( $\vec{B}$ ) a lo largo de una curva cerrada  $C$  es igual a la densidad de corriente ( $\vec{J}$ ) sobre la superficie encerrada en la curva, matemáticamente así se expresa:

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S}, \quad (10)$$



donde  $\mu_0$  es la permeabilidad magnética en el vacío.

En el caso específico estacionario esta relación corresponde a la ley de Ampere, además confirma que un campo eléctrico que varía con el tiempo produce un campo magnético y además es consecuente con el principio de conservación de la carga.

En forma diferencial, esta ecuación toma la siguiente forma [6].

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad (11)$$

### 1.11 Atenuación

Es la absorción parcial de energía. Cuando un haz de radiaciones atraviesa un medio material se producen diferentes interacciones que suponen el depósito de parte de la energía del haz de radiación en el medio atravesado. Como consecuencia de ellas observamos que:

- Parte del haz atraviesa la materia sin interaccionar (Haz primario).
- Hay fotones que salen en direcciones diferentes de la del haz incidente (radiación difusa).
- Parte es absorbida por el medio material.



Si sumamos la energía total de la radiación detectada después de atravesar el medio material, tanto en el haz primario como en la radiación difusa, observaremos que es menor la energía transportada por el haz incidente. A este fenómeno se le conoce como atenuación de la radiación al atravesar un medio. El paso de la radiación electromagnética a través de la materia se caracteriza por una ley de atenuación exponencial, que establece la relación existente entre la intensidad (número de fotones) del haz incidente, del haz primario y la radiación difusa.

Esto es así porque la radiación es una interacción con la materia, debe ser considerada como un conjunto de fotones del que los diferentes procesos de interacción van arrancando fotones individuales de manera proporcional a los que existan en el haz incidente.

La relación exponencial existente entre la intensidad del haz incidente y la radiación detectada tras atravesar un medio material viene determinado por la siguiente [7] expresión:

$$I = I_0 \cdot e^{-ix}, \quad (12)$$

*En el que I= A la intensidad del haz primario*

*I<sub>0</sub>=Intensidad del haz incidente*

*i= coeficiente de atenuación lineal del medio atravesado*

*x= espesor del medio material*



## 1.12 Superposición de ondas

El principio de superposición establece que cuando dos o más ondas atraviesan el mismo espacio, ocurre una perturbación que es la suma de las perturbaciones causada por las ondas individuales. Este principio se aplica a las ondas electromagnéticas en las que dichas perturbaciones involucran un campo eléctrico así como otros tipos de ondas, en las que se desplazan átomos o moléculas.

Cuando  $n$  ondas electromagnéticas que difieren en frecuencia, amplitud y ángulo de fase pasan por algún punto en el espacio de forma simultánea, el principio de superposición nos permite escribir de acuerdo a la ecuación (13),

$$y = A_1 \text{sen}(2\pi f_1 t + \phi_1) + A_2 \text{sen}(2\pi f_2 t + \phi_2) + \dots + A_n \text{sen}(2\pi f_n t + \phi_n), \quad (13)$$

donde  $y$  es el campo resultante.

La curva más oscura de la figura 1.5 a) muestra la aplicación de la ecuación (13) a dos ondas de idéntica frecuencia, pero amplitud y fase un poco diferentes. Lo que resulta es una función periódica con la misma frecuencia pero con la amplitud más grande que cualquiera de las otras dos ondas componentes (resultante **A**).

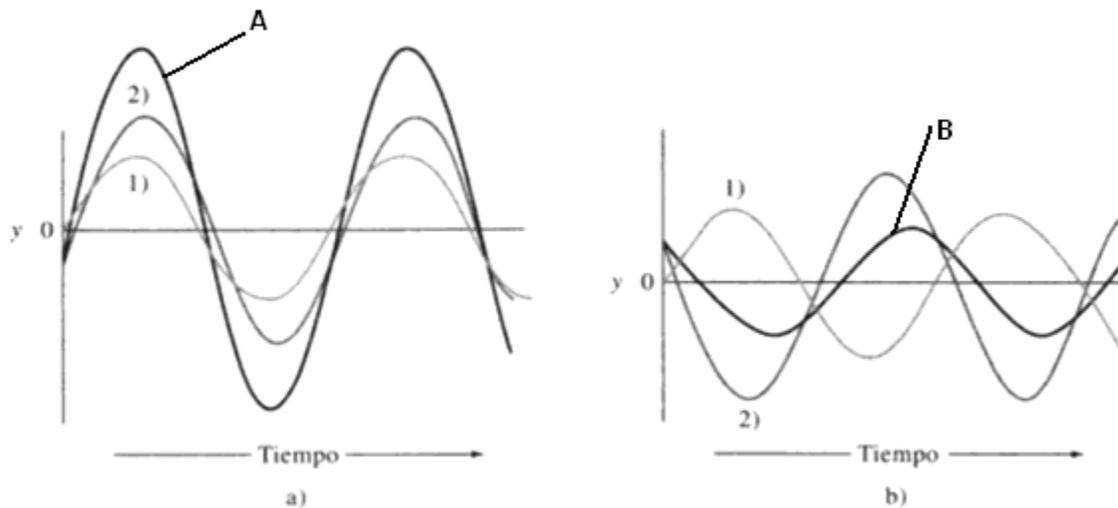


Figura 1.5. En cada uno de los casos la curva más negra resulta de las combinaciones de las otras dos curvas.

La figura 1.5 b) es distinta a la 1.5 a), ya que la diferencia de fase es mayor aquí, la amplitud resultante es más pequeña que las amplitudes componentes (resultante **B**). Una amplitud máxima ocurre cuando las ondas están completamente en fase, una situación que ocurre siempre que la diferencia de fase entre ondas ( $\phi_1 - \phi_2$ ) sea  $0^\circ$ ,  $360^\circ$ , o un múltiplo entero de  $360^\circ$ . En estas circunstancias se dice que ocurre una interferencia constructiva máxima. Una interferencia destructiva máxima ocurre cuando ( $\phi_1 - \phi_2$ ) es igual a  $180^\circ$  o  $180^\circ$  más un múltiplo entero de  $360^\circ$ .

A continuación en la figura 1.6 se observa la superposición de dos ondas con amplitudes idénticas pero frecuencias distintas.

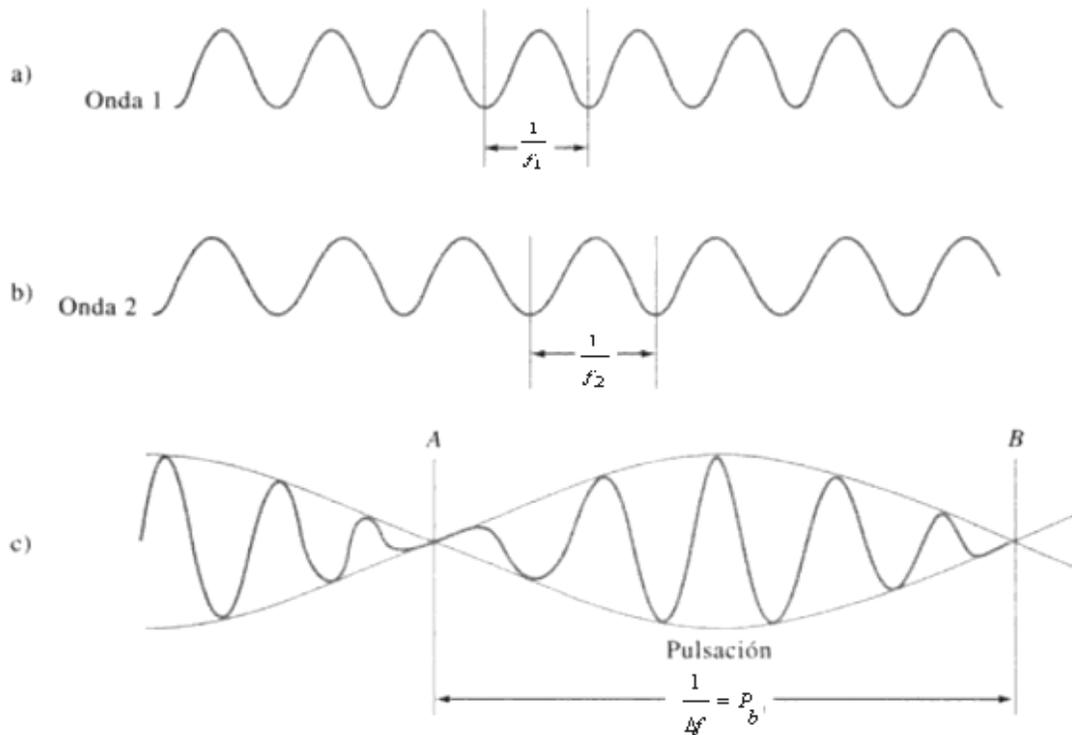


Figura 1.6. Superposición de dos ondas de frecuencia distintas pero amplitudes idénticas.

Como se puede observar el comportamiento de la onda ya no es sinusoidal, si no que manifiesta periodicidad o pulsación. Se distingue que el periodo de la pulsación  $P_b$  es el recíproco de la diferencia de frecuencias  $\Delta f$  entre las dos ondas, matemáticamente se expresa de la siguiente [8] manera,

$$P_b = \frac{1}{\Delta f} = \frac{1}{(f_2 - f_1)}, \quad (14)$$



## Conclusiones del capítulo.

En este capítulo se explicaron algunos conceptos básicos que nos ayudan a comprender la naturaleza de la luz, su comportamiento y algunas circunstancias que pueden ocurrir cotidianamente o en su entorno, por lo cual es necesario saber de qué manera nos pueden llegar afectar o ayudar las distintas circunstancias, para saber cómo pueda cambiar el comportamiento de la luz y sus distintas características. También se explica el comportamiento de las ondas cuando ocurre una superposición, de qué forma afecta el comportamiento de cada una de las ondas y cuál es el resultado de este efecto, ya que no ocurre siempre de la misma manera, por una parte se puede tener que al ocurrir la superposición la resultante sea mayor que las amplitudes originales o el caso contrario, en donde puede ser menor la amplitud de la resultante



---

## ***CAPÍTULO 2. INTERFEROMETRÍA Y METODOS DE REFLEXIÓN DEL HAZ LÁSER, TEORÍA Y CONCEPTOS BASICOS***

---

En esta parte del trabajo se explicarán algunos conceptos básicos sobre teoría y algunos dispositivos necesarios para poder realizar algunas implementaciones de reflexión de haz laser y de interferometría.

### **2.1 Dispositivos**

#### **2.1.1 Piezoeléctrico**

Una propiedad inusual que presentan algunos materiales cerámicos es la piezoelectricidad, que es precisamente presión-electricidad: se induce la polarización y se establece un campo eléctrico a través de la muestra mediante la aplicación de fuerzas externas. Invertiendo el signo de fuerza externa (o sea, de tensión a compresión) se invierte la dirección del campo. Se puede observar el efecto piezoeléctrico en la figura 2.1

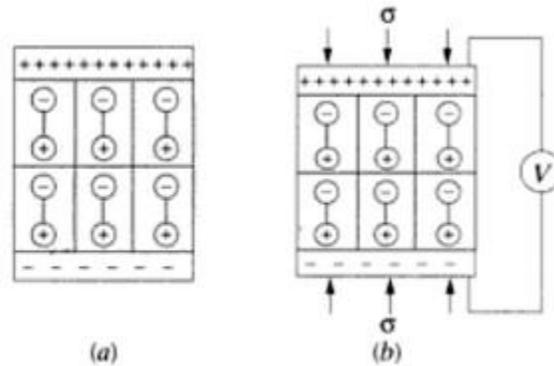


Figura 2.1. (a) Dipolos dentro de un material piezoeléctrico, (b) Se origina un voltaje cuando el material es sometido a un esfuerzo de compresión

Los materiales piezoeléctricos se utilizan normalmente en los transductores, que en este caso será un dispositivo que convierte energía eléctrica en deformaciones mecánicas o viceversa.

Una aplicación común de estos dispositivos, es en el cabezal de los tocadiscos, a medida de que la aguja pasa por los surcos del disco, transmite una variación de presión, de este modo la variación de presión se transmite en una señal eléctrica que es amplificada antes de ir al altavoz.

Los materiales piezoeléctricos incluyen los titanatos de bario y plomo, el circonato de plomo ( $\text{PbZrO}_3$ ), el fosfato monoamónico ( $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ) y el cuarzo. Esta propiedad es característica de los materiales que tiene estructuras cristalinas complicadas con un grado bajo de simetría. El comportamiento de una material policristalino se puede mejorar, al hacerle un calentamiento por encima de su temperatura de Curie y después dejándolo enfriar a temperatura ambiente en un campo eléctrico fuerte [9].



### 2.1.2 Láser

La palabra laser, que significa por sus siglas en inglés, *light amplification by stimulated emission of radiation*, se trata de un dispositivo que produce luz amplificada por emisión estimulada, lo que genera un haz de gran intensidad, direccionalidad y coherencia. El término láser abarca la gran variedad de sistemas capaces de producir este tipo de radiación, independientemente de los mecanismos que se empleen para conseguirlos.

La coherencia espacial tiene que ver con el comportamiento en el tiempo que presentan las diferencias de fase para las ondas que conforman el haz de luz. Por ejemplo, si se toma dos puntos de la sección transversal y se determina que la diferencia de fase entre estos puntos se mantiene constante en el tiempo, se habla de una *coherencia espacial*. Por otra parte, si en un punto del espacio por donde transita el haz de luz se determina la diferencia de fase para los instantes inicial y final de un intervalo de tiempo fijo, y esta diferencia se conserva constante en el tiempo, se define la *coherencia temporal*.

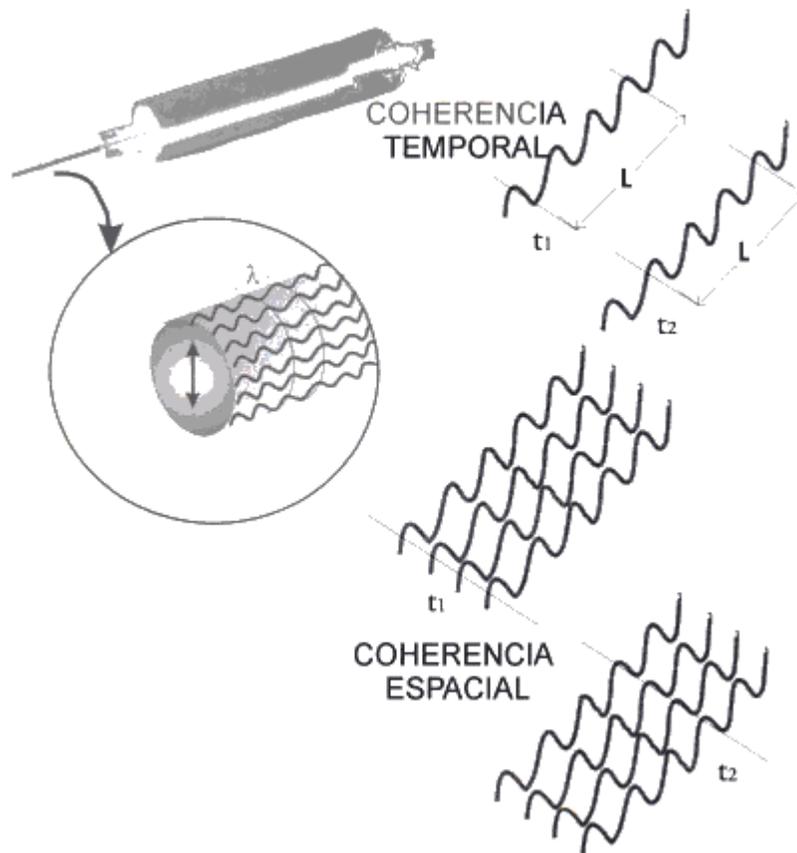


Figura 2.2. Imagen representativa de la coherencia espacial y coherencia temporal.

Las principales propiedades de una emisión laser son:

1. *Monocromática*. El haz emitido por el sistema presenta una longitud de onda con una dispersión o ancho de banda muy reducido.
2. *Gran coherencia en el tiempo y espacio*. Para algunos sistemas las longitudes de coherencia son del orden de los kilómetros.
3. *Intensidad*. La emisión laser presenta una intensidad mayor que la de cualquier otra fuente de luz.
4. *Estrechez*. Además de tener un ancho angular del haz muy pequeño, este presenta una reducción de divergencia (muy pequeños incrementos en la sección transversal del haz); esto determina su alto grado de direccionalidad [10].

### 2.1.3 Prisma divisor de haz

Estos prismas dividen un haz luminoso en dos del mismo diámetro del original, pero con menor intensidad, propagándose en diferentes direcciones. Estos instrumentos son muy útiles en los interferómetros que funcionan con el sistema de división de amplitud y en los telescopios o microscopios binoculares. Básicamente este prisma está formado por dos prismas triangulares unidos que forman un cubo.

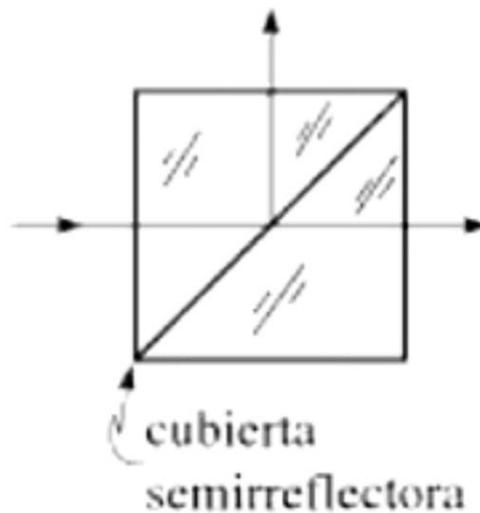


Figura 2.3. Prisma divisor de haz tipo cubico.

Uno de los dos prismas tiene cubierta su cara hipotenusa con una película reflectora muy delgada, escogida de tal manera que, al unirse un prisma con otro, el haz reflejado y el haz transmitido tengan la misma intensidad. Los dos prismas están unidos a fin de evitar una reflexión total interna, este prisma [11] se muestra en la figura 2.3.



### 2.1.4 Fotodetector

Un fotodetector o detector de fotones, es un dispositivo capaz de convertir el flujo de fotones en una magnitud medible. De acuerdo con esta definición las películas fotográficas o las células de la retina son ejemplos de fotodetectores. En el ámbito de los sistemas eléctricos, dicha magnitud medible consiste en una corriente o tensión eléctrica.

En los detectores fotoeléctricos, la absorción de fotones resulta en una transición de los electrones presentes en el material hacia niveles de energía superior, donde son susceptibles de ser transportados por un campo eléctrico, generando una corriente.

Las cualidades básicas que un fotodetector debe reunir con el fin de ser apto para su aplicación en un sistema [12] óptico son:

- Elevada sensibilidad
- Capacidad de absorción de radiación a las longitudes de onda de interés
- Alta velocidad de respuesta
- Comportamiento lineal
- Tensión de alimentación moderada
- Tamaño reducido, adaptado a los elementos del sistema



## 2.2 Interferencia

Son los efectos físicos que resultan al superponerse dos o más ondas en el mismo punto.

Los fenómenos de interferencia se caracterizan porque en la región del espacio en que se superponen las ondas se producen variaciones de amplitud y por tanto una distribución de la intensidad de la onda resultante, obteniéndose las llamadas figuras de interferencia.

Las consideraciones que deben cumplirse para que existan figuras de interferencia estables entre las ondas que producen el fenómeno son:

- 1) Que las ondas tengan el mismo periodo
- 2) Que procedan de focos coherentes, es decir que las fuentes de onda que las producen tengan una diferencia de fase en la emisión y que sea constante con el tiempo.

Ahora bien observemos la figura 2.4, donde podemos identificar dos focos emisores de ondas idénticas  $F_1$  y  $F_2$ .

Representando por circunferencias de línea continua, las superficies de onda con una máxima amplitud positiva y por circunferencia de línea puntuada, una máxima amplitud negativa, se verifica que en los lugares en que se encuentra dos líneas de la misma naturaleza, las dos magnitudes se suman dando paso a los máximos de interferencia, y donde se encuentran dos circunferencias de distinto trazo se restan las amplitudes, dando lugar a los mínimos de interferencia.

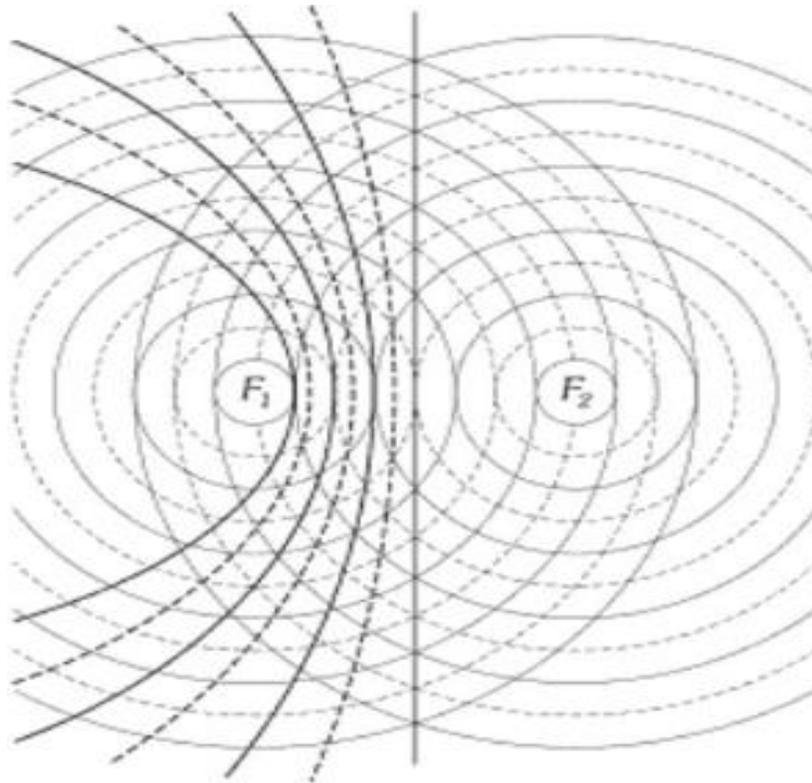


Figura 2.4. Interferencia de dos ondas procedentes de  $F_1$  y  $F_2$ .

Las máximas y mínimas amplitudes están localizadas en el plano, se observan líneas que son parábolas. Los máximos están dibujados con líneas continuas y los mínimos con líneas puntuadas [13].

### 2.3 Reflexión especular y reflexión difusa

Cuando existe una superficie perfectamente lisa, los rayos de luz provenientes de una emisión láser son reflejados y quedan paralelos como se indica en la figura 2.5 (a). La reflexión de la luz en tal superficie lisa se llama reflexión especular. Si la superficie de reflexión es rugosa, como la figura 2.5 (b), los rayos se reflejan en varias direcciones. La reflexión en una superficie rugosa se conoce como reflexión difusa.

Una superficie se comporta como lisa mientras las irregularidades de la misma sean más pequeñas comparadas con la longitud de onda de la luz incidente.

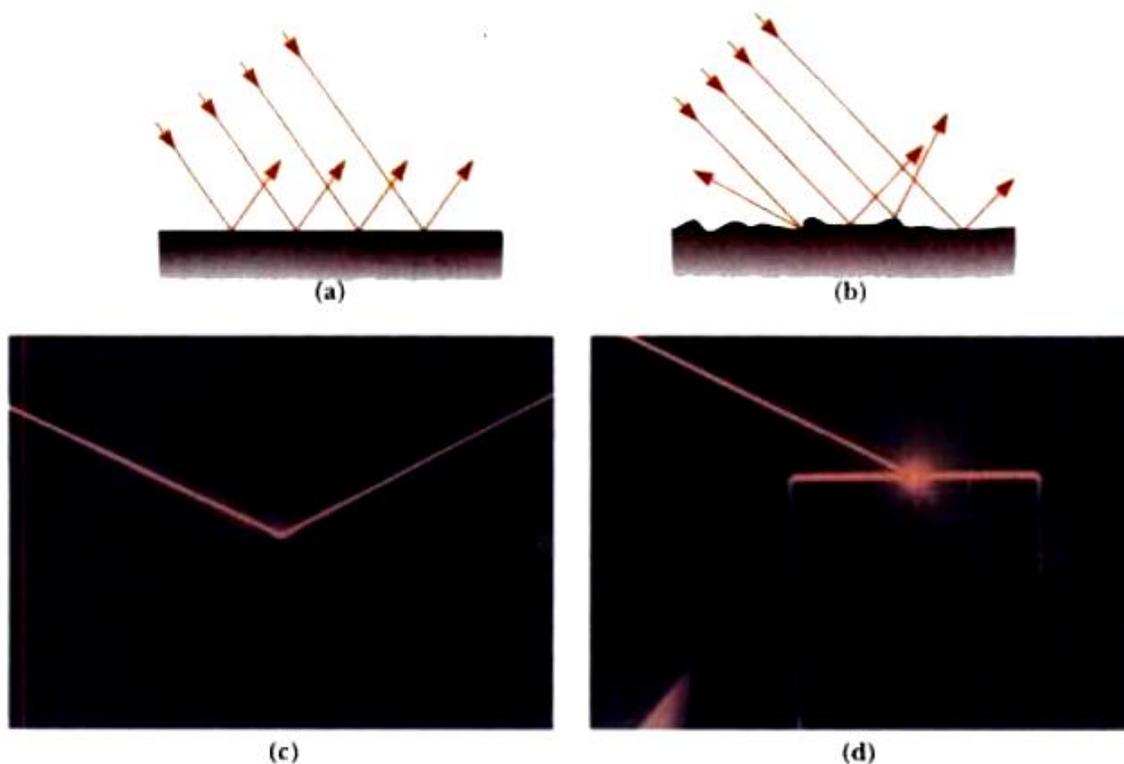


Figura 2.5. Representación de la reflexión especular y de la reflexión difusa

La figura 2.5 (c) y 2.5 (d), son representaciones de la reflexión especular y de la reflexión difusa respectivamente, utilizando un láser dentro del espectro visible. El haz laser se observa claramente en la figura 2.5 (c), en cambio en la figura 2.5 (d), la reflexión difusa ocasiona que el haz incidente sea reflejado en muchas direcciones, por lo tanto, no hay ningún haz laser saliente, como se pueda observar claramente [14].

## 2.4 Interferómetros

### 2.4.1 Interferómetro de Mach-Zehnder

Es un dispositivo que utiliza la división de amplitud. Tal y como se muestra a continuación en la figura 2.6

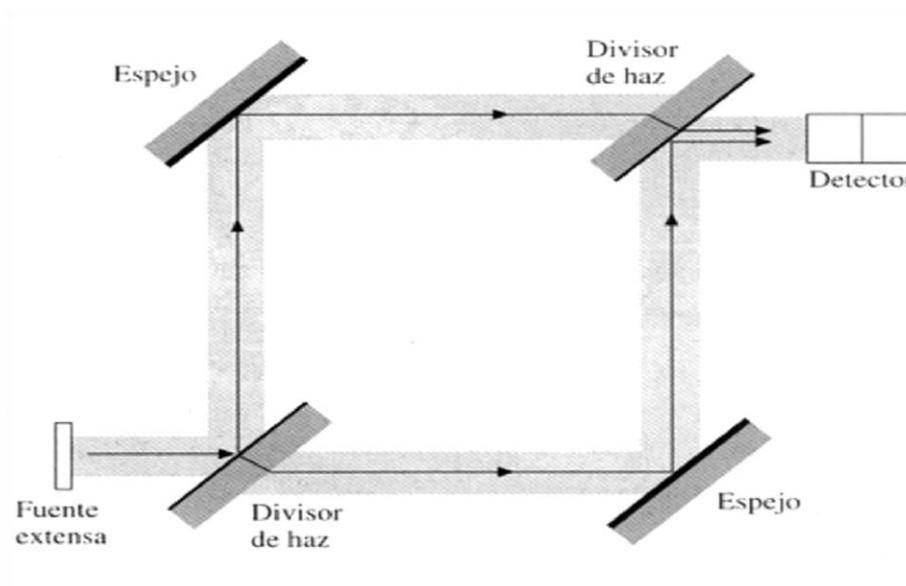


Figura 2.6. Esquema del interferómetro de Mach Zehnder



Consiste en dos divisores de haz y de dos espejos totalmente reflectores. Las dos ondas dentro del instrumento viajan a lo largo de caminos separados. Puede introducirse una pequeña diferencia entre los caminos por una ligera inclinación de uno de los divisores de haz. Dado que los dos caminos están separados, el interferómetro es un poco complejo de alinear.

Interponiendo un objeto en uno de los haces se altera la diferencia de longitud de camino óptico cambiando, por lo tanto, la distribución de las franjas de interferencia, que son el resultado de la interferencia de las señales ópticas, en los brazos del interferómetro. Una aplicación común de este instrumento consiste en observar la variación de densidad de distribuciones de flujo de gases en el interior de cámaras para la investigación. Las distorsiones resultantes en el frente de onda generarán el contorno de las franjas de interferencia [15].

#### 2.4.2 Interferómetro de Fabry-Perot

La importancia de éste interferómetro es grande por sus aplicaciones, por ejemplo, en un espectroscopio de alto poder resolutivo espectral, en particular este interferómetro tiene su fundamento en las interferencias de láminas. Las reflexiones múltiples se producen en un espacio de aire de espesor  $d$  entre dos láminas de vidrio, como se muestra en la figura 2.7. Un sistema convergente,  $L$ , llevara a superposición de los puntos  $P$ , de su plano focal las familias de rayos paralelos apareciendo así anillos de interferencia.

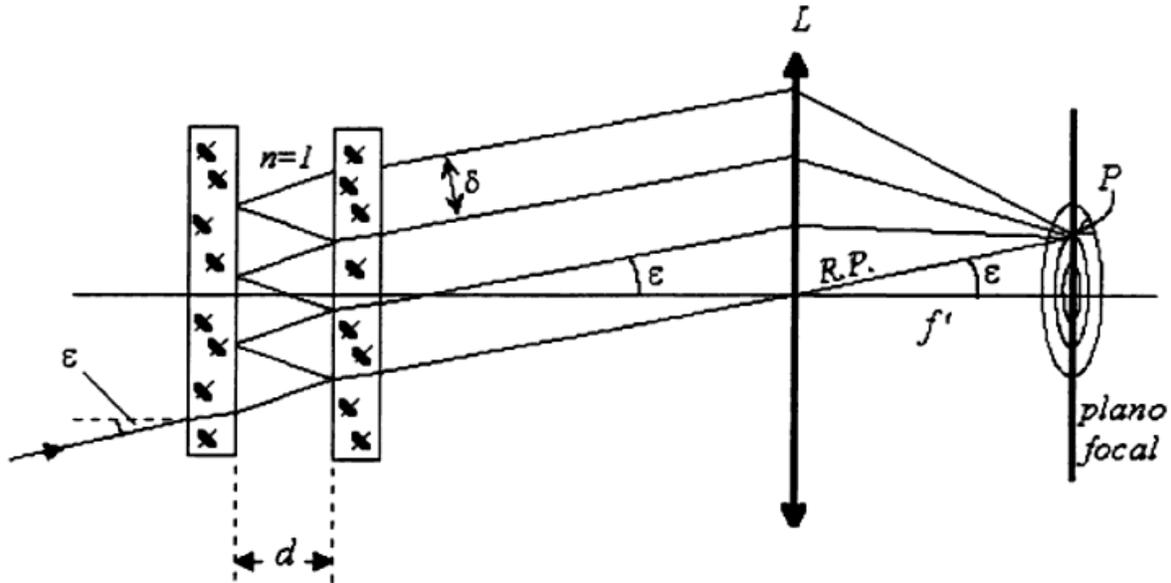


Figura 2.7. Esquema del interferómetro de Fabry-Perot.

Para direcciones de incidencia de ángulo  $\varepsilon$  se tendrá máximo en el punto  $P$  si ocurre que

$$2d \cos \varepsilon = k\lambda, \quad (15)$$

Esto sucede cuando se hace variar o si introducimos en el interferómetro luz compuesta de dos longitudes de onda  $\lambda_1 = \lambda$  y  $\lambda_2 = \lambda + \Delta\lambda$ . Consideremos los anillos de orden  $k$  de las dos. Estos anillos aparecen más o menos separados entre sí en el campo interferencial dependiendo entre otros factores de  $\Delta\lambda$ , puede comprenderse que si  $\Delta\lambda$  es muy pequeño, los anillos aparecerán tan juntos que no se podrá distinguir si hay dos o uno solo [16].

### 2.4.3 Interferómetro de Sagnac

La implementación de este dispositivo es muy sencilla, fácil de alinear y es bastante estable. Una forma esquemática del interferómetro de Sagnac se puede apreciar en la figura 2.8, obsérvese que la característica principal de este dispositivo es que los haces toman dos caminos idénticos pero opuestos en dirección y que ambos forman caminos cerrados antes de que se unan para producir una interferencia.

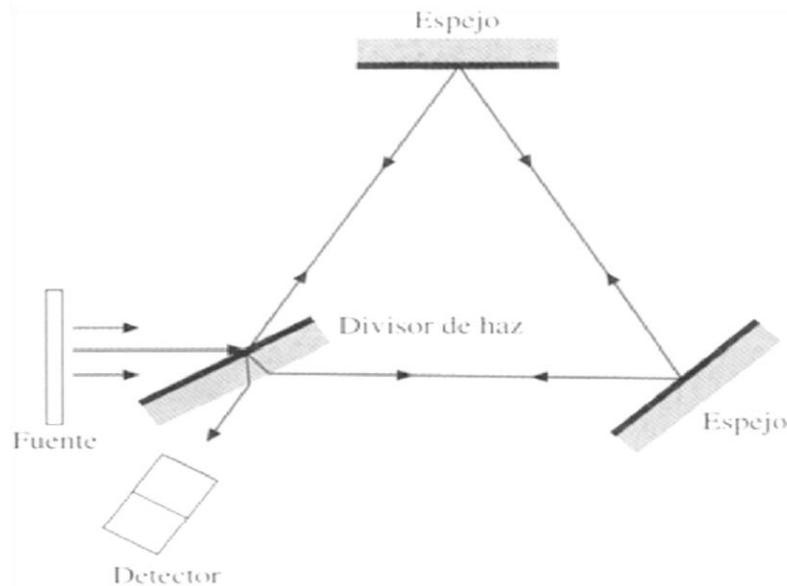


Figura 2.8 Esquema del interferómetro de Sagnac

Un pequeño desplazamiento deliberado en la orientación de uno de los espejos producirá una diferencia en el camino óptico obteniéndose una distribución de franjas. Puesto que los haces están superpuestos y por lo tanto son inesperables, el interferómetro no puede emplearse en las aplicaciones convencionales que, por lo general, dependen de la posibilidad de imponer variaciones sobre únicamente uno de los haces constitutivos [17].

## 2.4. Interferómetro de Michelson

Una fuente extensa emite una onda, parte de la cual viaja hacia la derecha de acuerdo al esquema de la figura 2.9. El divisor de haz en  $O$  divide la onda en dos: una parte se direccionara de  $OM_1$  y la otra de  $OM_2$ .

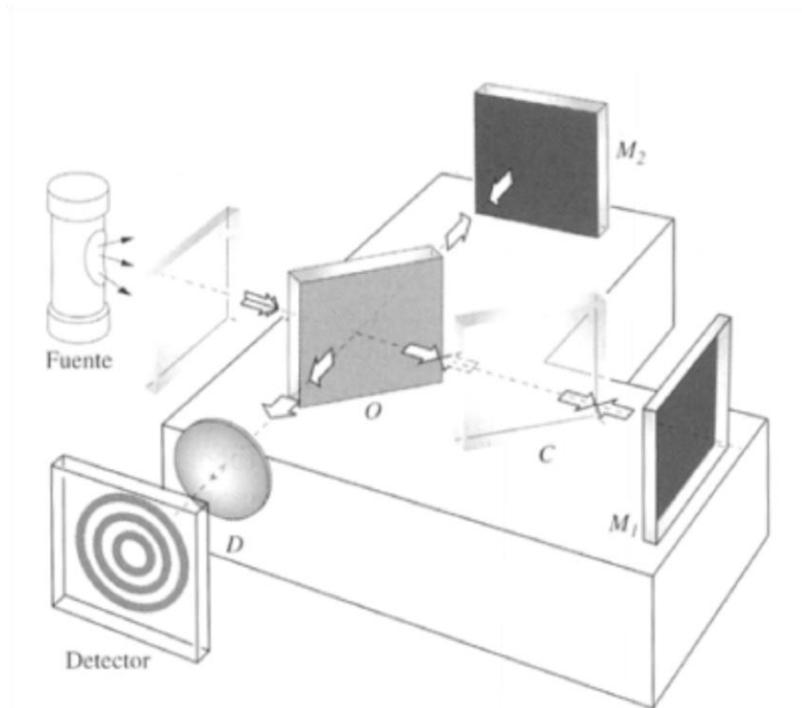


Figura 2.9. Esquema de un Interferómetro de Michelson.

Las dos ondas se reflejarán en los espejos  $M_1$  y  $M_2$  y regresan al divisor de haz. Parte de la onda procedente de  $M_2$  pasará a través del divisor de haz hacia el detector.

Las dos ondas se unen produciendo una interferencia. Se puede observar que un haz pasa a través de  $O$  tres veces mientras que el otro pasa solo una vez, por lo tanto, cada haz cruzara igual espesor de vidrio únicamente cuando una placa compensadora  $C$  se introduzca en el brazo  $OM_1$ . El compensador es un duplicado exacto del divisor de haz con la excepción de un posible plateado o una delgada película de recubrimiento en el divisor de haz. Se coloca a un ángulo de  $45^\circ$  tal que  $O$  y  $C$  sean mutuamente paralelas. A causa de la dispersión del divisor de haz, el camino óptico es una función de  $\lambda$ , por lo cual, el interferómetro sin la placa compensadora puede utilizarse con una fuente cuasi monocromática.

Para entender cómo se forman las franjas, se hace referencia al esquema mostrado en la figura 2.10, donde los componentes físicos se representan mas como superficies matemáticas. Un observador en la posición del detector vera simultáneamente ambos espejos  $M_1$  y  $M_2$  juntos con la superficie  $\Sigma$  en el divisor de haz. Las superficies  $\Sigma_1$  y  $\Sigma_2$  son las imágenes de  $\Sigma$  en los espejos  $M_1$  y  $M_2$  respectivamente.

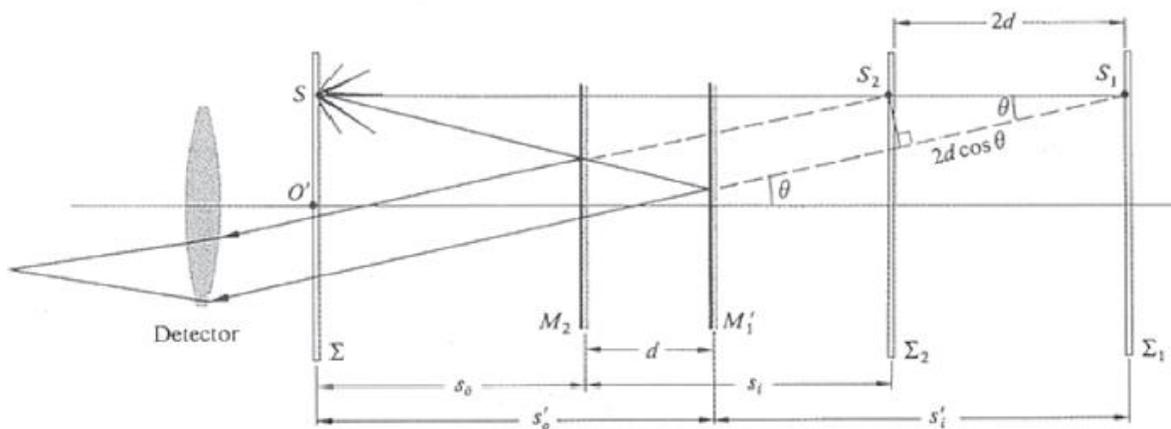


Figura 2.10. Esquema conceptual del Interferómetro de Michelson.



Como puede verse en la figura 2.10, la diferencia del camino óptico es de casi  $2d\cos\theta$  que representa un desfase de  $k_0 2d\cos\theta$ . Existe un término adicional de fase debido a que la onda que atraviesa el brazo  $OM_2$  es reflejada internamente en el divisor de haz, mientras que la onda  $OM_1$  es reflejada externamente en  $O$ . [18].

### Conclusiones del capítulo.

En este capítulo se explica la teoría básica de los interferómetros; la manera que ocurre la interferencia óptica, algunos métodos de reflexión, las distintas funciones sobre dispositivos indispensables para poder realizar algunas implementaciones de reflexión de un haz óptico y también, se describieron algunas características esenciales sobre estos dispositivos. Todo lo anterior nos será de gran ayuda para el siguiente capítulo, ya que es la parte en donde se describen las implementaciones realizadas dentro del laboratorio.

Se hace énfasis en el interferómetro de Michelson ya que es la implementación que se utiliza en el desarrollo de este trabajo.



---

## ***CAPÍTULO 3. IMPLEMENTACIÓN DE UN INTERFERÓMETRO DE MICHELSON Y DE UN DISPOSITIVO QUE UTILIZA EL METODO DE REFLEXIÓN DEL HAZ LÁSER.***

---

En esta parte del trabajo de tesis se explica, como se ejecuto el proceso de implementación del Interferómetro de Michelson (IM) y de un dispositivo que utiliza el método de la reflexión del haz laser (RHL), para poder hacer los experimentos realizados dentro del laboratorio.

### **3.1 Implementación de un dispositivo que utiliza el método de reflexión del haz laser (RHL)**

Este dispositivo está configurado mediante una fuente de emisión, la cual hace que se propague un haz de luz, que viaja a través de un divisor de haz, dividiendo la intensidad 50/50, (el cual en esta parte no es de gran relevancia únicamente se puso para mantener las mismas condiciones que el Interferómetro de Michelson, en el cual si aparece), una parte del haz se dirige hacia un espejo que esta añadido mediante unos soportes a un piezoeléctrico (PZT), este espejo refleja un haz de luz hacia un fotodetector y el sistema queda básicamente como se muestra en la figura 3.1.

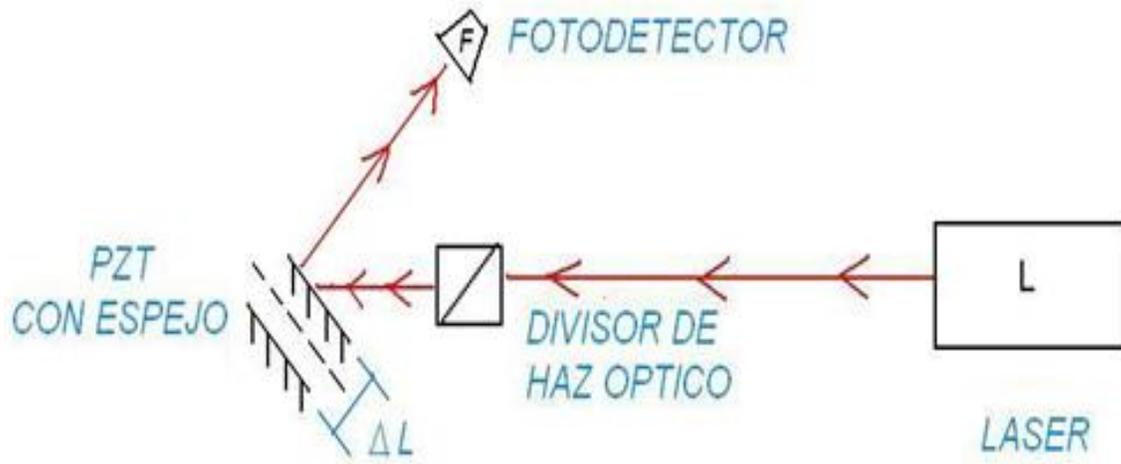


Figura 3.1. Esquema del dispositivo de reflexión del haz láser (RHL).

Un componente fundamental para esta implementación, es el piezoeléctrico (PZT), por lo cual fue necesario hacer una serie de experimentos para caracterizarlo. A continuación se explica cómo se realizaron los experimentos y el funcionamiento de este componente.

### 3.2 Piezoeléctrico (PZT)

Para poder implementar con ayuda de este componente, el sistema planteado al inicio de este capítulo, se utiliza una montura de las siguientes características:

Tiene un espejo que está añadido por tres de soportes al PZT, en la parte posterior hay dos tornillos, para poder realizar el ajuste del espejo que está añadido, esto se puede observar en la figura 3.2.

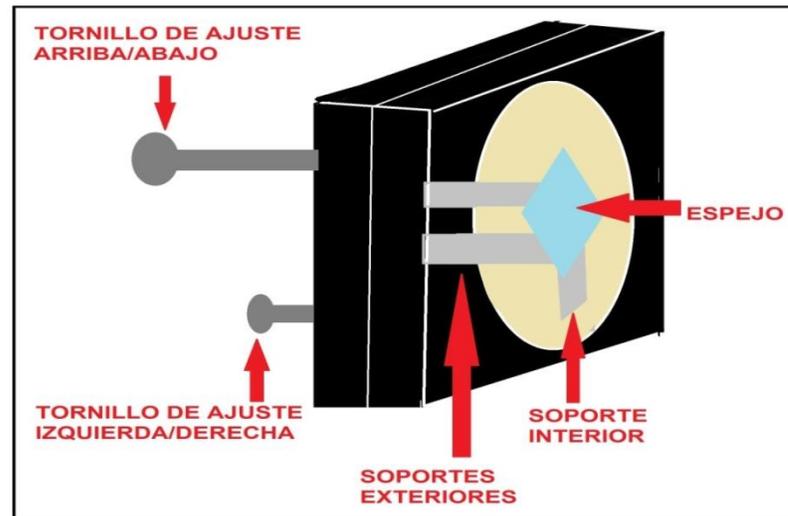


Figura 3.2. Esquema del piezoeléctrico utilizado.

Este instrumento sufre un pequeño desplazamiento haciéndole circular una corriente eléctrica, la cual es suministrada mediante un generador de funciones

Con ayuda de la configuración mencionada al inicio de este capítulo, se pudo realizar una serie de experimentos que ayudaron para obtener la caracterización del PZT, ya que es una de las piezas fundamentales, tanto para el interferómetro como para el dispositivo de reflexión de haz laser.

### 3.3 Implementación para la caracterización del PZT

#### 3.3.1 Implementación A

El primer experimento realizado con el PZT, fue variar la frecuencia de alimentación que proviene del generador de funciones, para poder observar el ancho del láser sobre una superficie plana y así identificar los cambios obtenidos.

Una vez realizado el barrido de frecuencias, se obtuvo que la cintura del láser variaba su longitud, por lo que se optó en conectar el generador de funciones con una señal senoidal y amplitud fija de 3 [Vpp]. Se inició el barrido desde una frecuencia de 1300 [Hz] con pasos de 10 [Hz]; la variación de longitud se logró medir, gracias a un calibrador vernier con dial milimétrico marca TRUPER de 0 a 150 mm con graduación de 0.02 mm.

En esta parte del experimento se realizaron mediciones para dos distancias diferentes, la distancia es desde el punto donde se refleja el láser en el espejo añadido al PZT, hasta donde se proyecta la cintura del láser en una superficie plana. La distancia número uno fue  $d_1=224.5$  [cm] y la gráfica resultante quedó como se muestra en la figura 3.3.

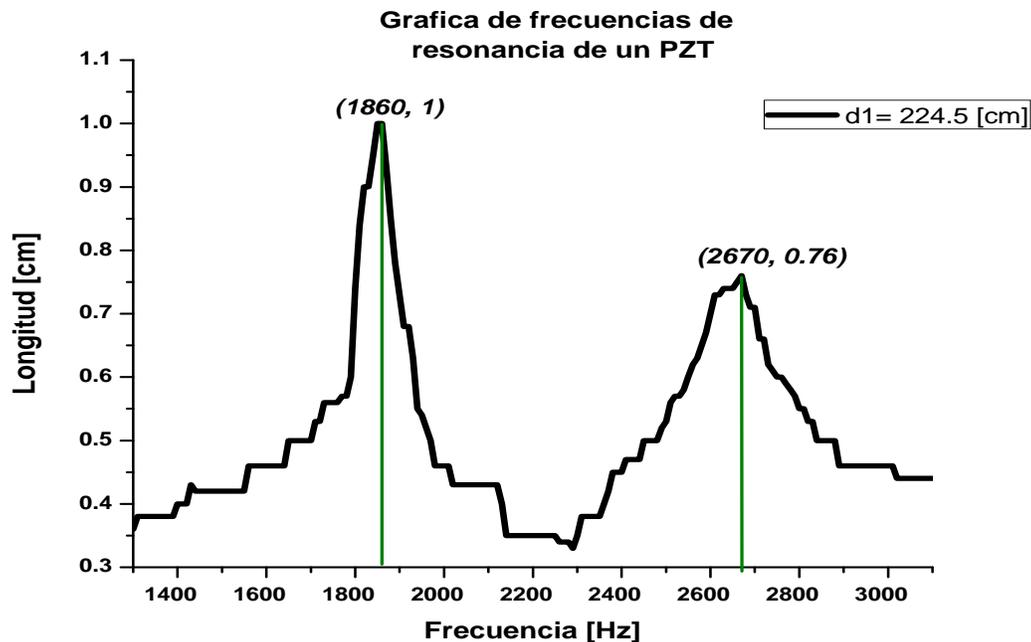


Figura 3.3. Gráfica de frecuencia vs longitud de un PZT con distancia  $d_1$ .

En la gráfica anterior se hizo un barrido de frecuencias hasta los 3100 Hz, la cual nos permite distinguir las frecuencias de resonancia del PZT, se encontraron dos, la primera a 1860 Hz con una longitud máxima de la proyección del láser que fue de 1 cm y la segunda, que fue de 2670 Hz con una longitud de proyección 0.76 cm, esto se pudo determinar, ya que son las únicas frecuencias en las cuales el láser proyectado es lo más largo posible.

Para poder verificar estas frecuencias, se realizó un segundo experimento aumentando la distancia entre el espejo del PZT y la superficie plana donde se proyectó el haz del láser, esta segunda distancia fue de  $d_2=651.5$  cm y la gráfica resultante quedó como se muestra en la figura 3.4.

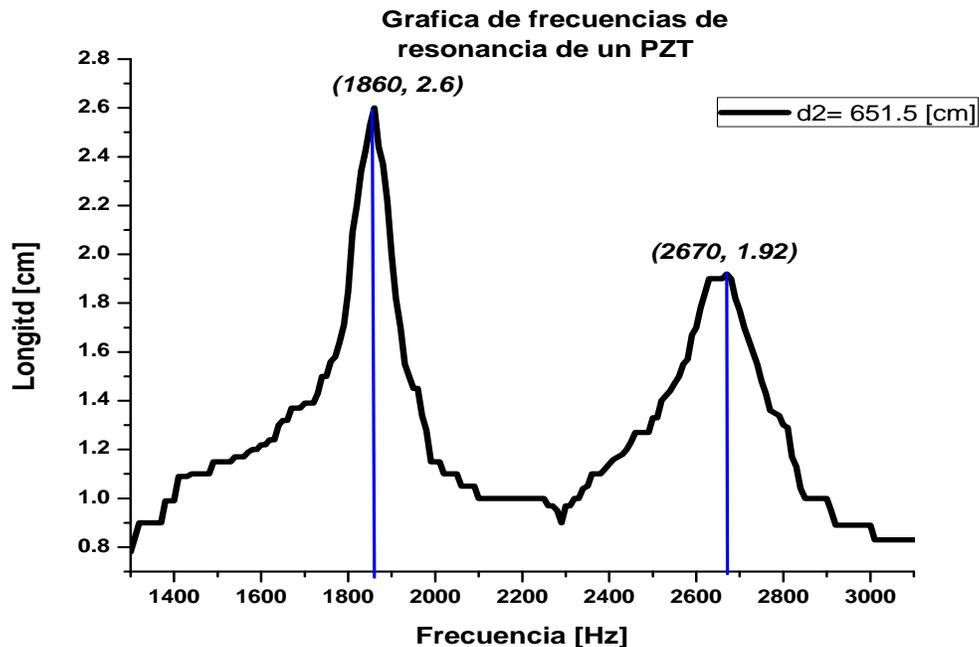


Figura 3.4. Gráfica de frecuencia vs longitud de un PZT con distancia  $d_2$ .



En esta segunda gráfica se obtuvo como resultado, que las frecuencias de resonancia son las mismas, la única diferencia es que al aumentar la distancia de proyección aumenta la longitud del láser proyectado en comparación a la anterior, la primera longitud de la proyección del láser para este segundo experimento fue de 2.6 cm, coincidiendo con la primera frecuencia de resonancia encontrada en el experimento anterior que fue de 1860 Hz y la segunda longitud proyectada del láser fue de 1.92 cm, coincidiendo también con la segunda frecuencia de resonancia encontrada anteriormente de 2670 Hz.

### 3.3.2 Implementación B

Con las gráficas anteriores se pudieron determinar las frecuencias de resonancia del PZT, lo cual permitió continuar con el siguiente experimento a realizar, el cual consiste, en dejar la frecuencia fija del generador de funciones de igual manera con una señal senoidal, pero utilizando las frecuencias de resonancia como referencia y haciendo variar el voltaje de alimentación del PZT, para este caso empezamos haciendo el barrido desde los 2 Vpp con pasos de 0.1 Vpp, de igual manera que el experimento anterior se hizo en las mismas distancias de proyección del láser, la primera fue de  $d_1=224.5$  cm. La gráfica resultó como se muestra en la figura 3.5.

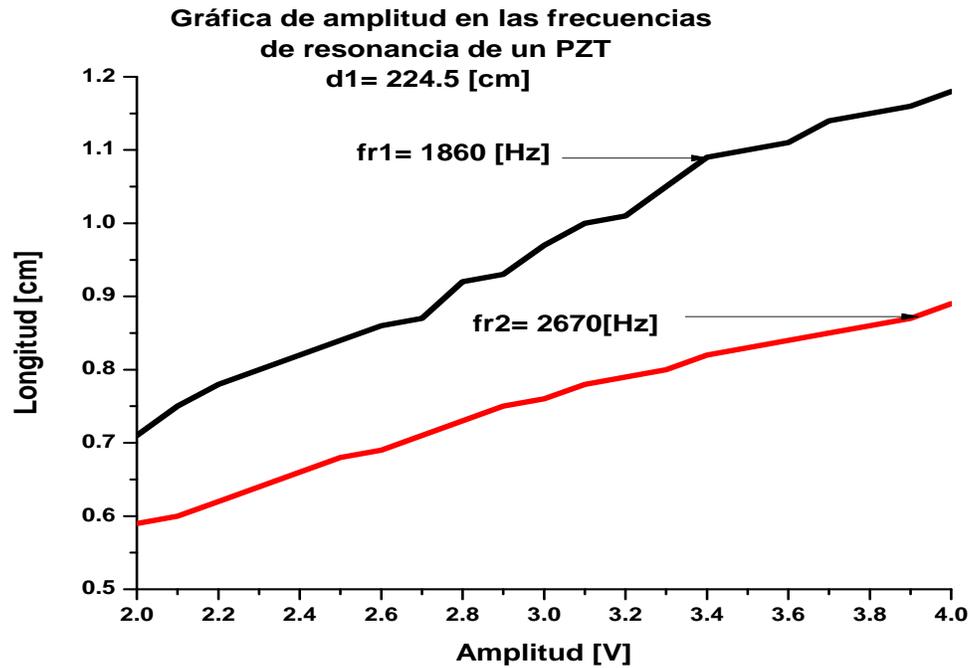


Figura 3.5. Gráfica de amplitud vs longitud de un PZT con distancia  $d_1$ .

En la gráfica anterior se puede observar que mientras va aumentando la amplitud de alimentación de la señal senoidal, la longitud del láser proyectado también aumenta para ambas frecuencias de resonancia.

De igual manera se realizó el mismo experimento para la segunda distancia que fue  $d_2 = 651.5$  cm, por lo que la gráfica resultante se muestra en la figura 3.6.

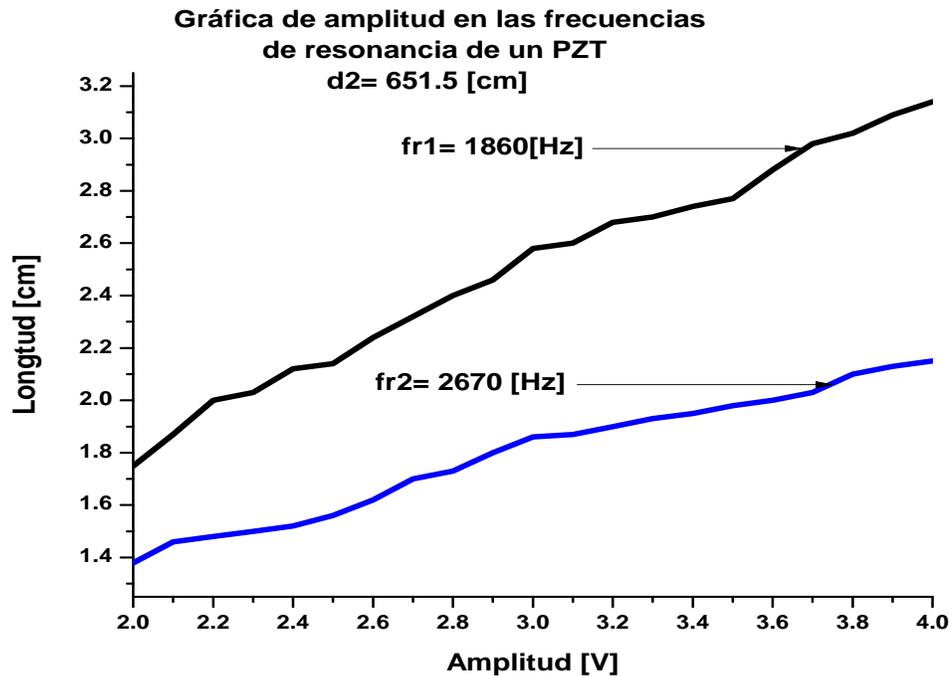


Figura 3.6. Gráfica amplitud vs longitud de un PZT con distancia  $d_2$ .

Para este experimento la distancia de proyección fue mayor, al igual que la figura 3.6 también se observa que aumenta la longitud del láser proyectado, en las frecuencias de resonancia.

Basándose en el esquema del dispositivo de RHL mostrado en la figura 3.1 se realizó la caracterización del PZT; quedando la implementación como se muestra en la figura 3.7.

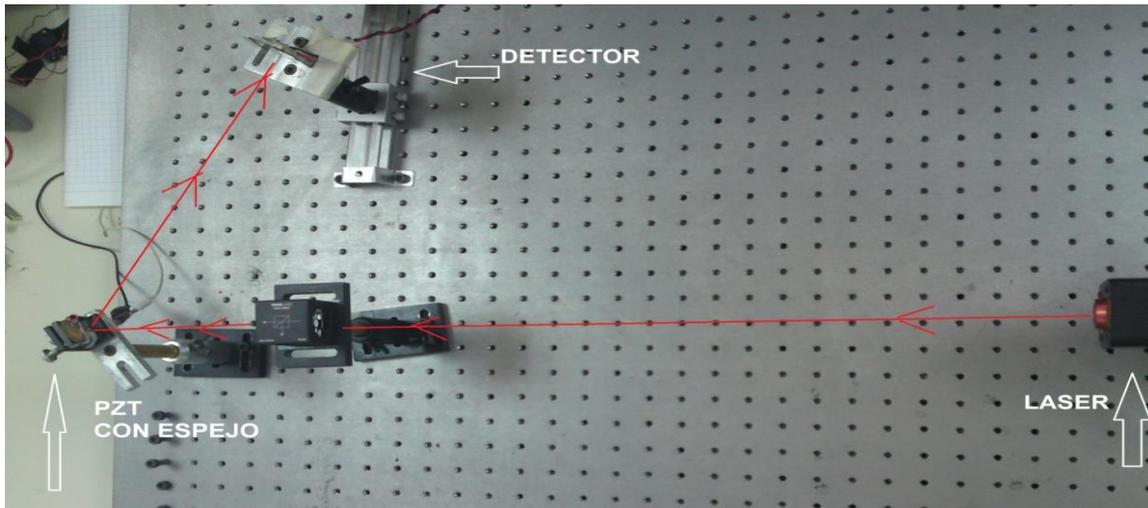


Figura 3.7. Imagen del dispositivo de reflexión del haz laser implementado.

Ahora bien, ya implementado el dispositivo de RHL como se muestra en la figura 3.7. y después de hacer una breve caracterización del PZT que utilizamos, empezamos a trabajar en hacer experimentos para poder registrar la sensibilidad que tiene este dispositivo en detectar mínimos desplazamientos, para poder lograrlo fue necesario trabajar con frecuencias bajas, por lo cual se realizaron dos tipos de experimentos.

### 3.4 Implementaciones para la caracterización del dispositivo de RHL

#### 3.4.1 Implementación #1

Para el primer experimento realizado, lo que se hizo fue dejar fija la frecuencia de una señal senoidal que no fuera muy grande, la cual fue de 10 Hz, esta señal proviene de un generador de funciones y se dirige hacia el PZT. Ya que se tiene lo anterior, posteriormente se hizo variar la amplitud de la señal, en pasos de 0.1 Vpp, desde 0.5 Vpp hasta 4 Vpp, por lo cual fueron varias los resultados obtenidos.



Estos resultados los registramos ya que la señal que nos arrojaba el fotodetector se pasaba por un preamplificador, el cual además de amplificar la señal, también nos permita filtrar la señal y posteriormente se mandaba a un osciloscopio en el cual, se guardaban los datos en una memoria USB, para después procesarlos mediante el programa **OriginPro 8** y poder realizar una serie de gráficas, pero solamente se muestran los más significativos, los cuales se presentan a continuación.

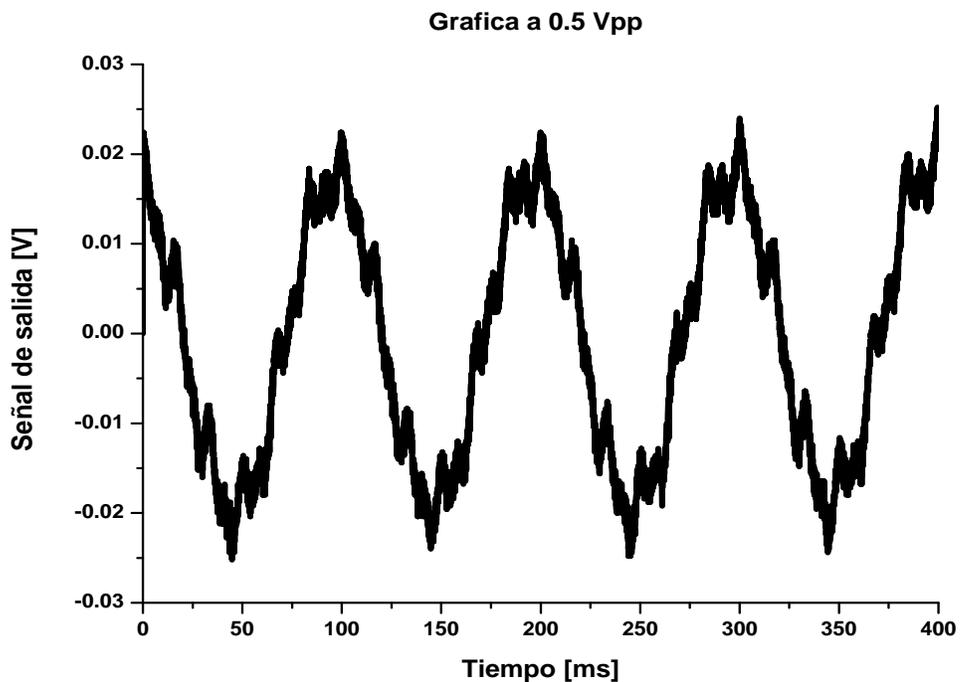


Figura 3.8. Gráfica del dispositivo de RHL a 0.5 Vpp en el PZT.

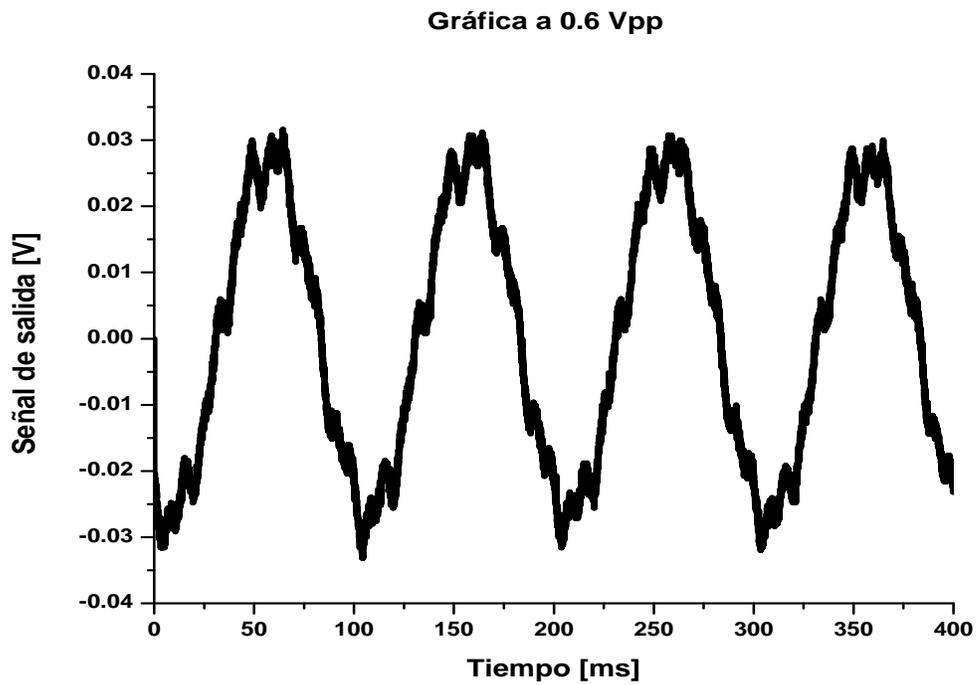


Figura 3.9. Gráfica del dispositivo de RHL a 0.6 Vpp en el PZT

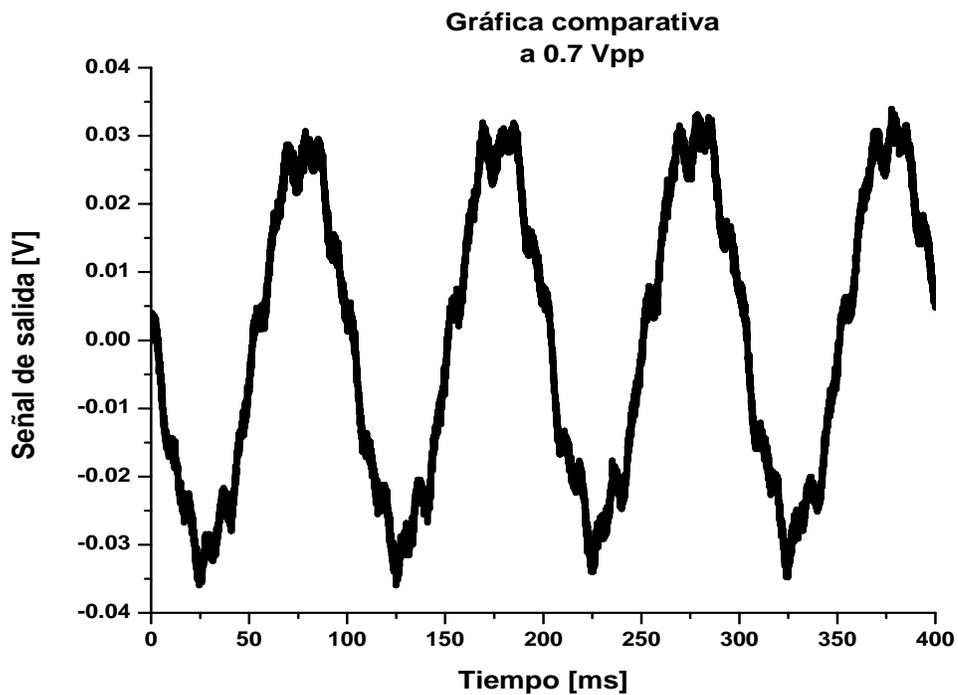


Figura 3.10. Gráfica del dispositivo de RHL a 0.7 Vpp en el PZT

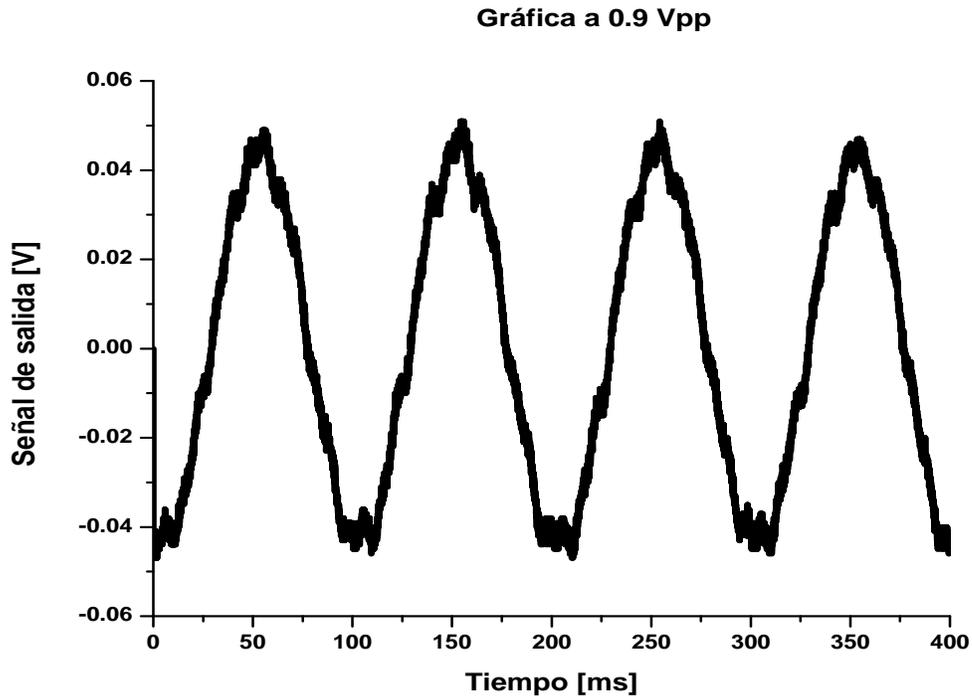


Figura 3.11. Gráfica del dispositivo de RHL a 0.9 Vpp en el PZT

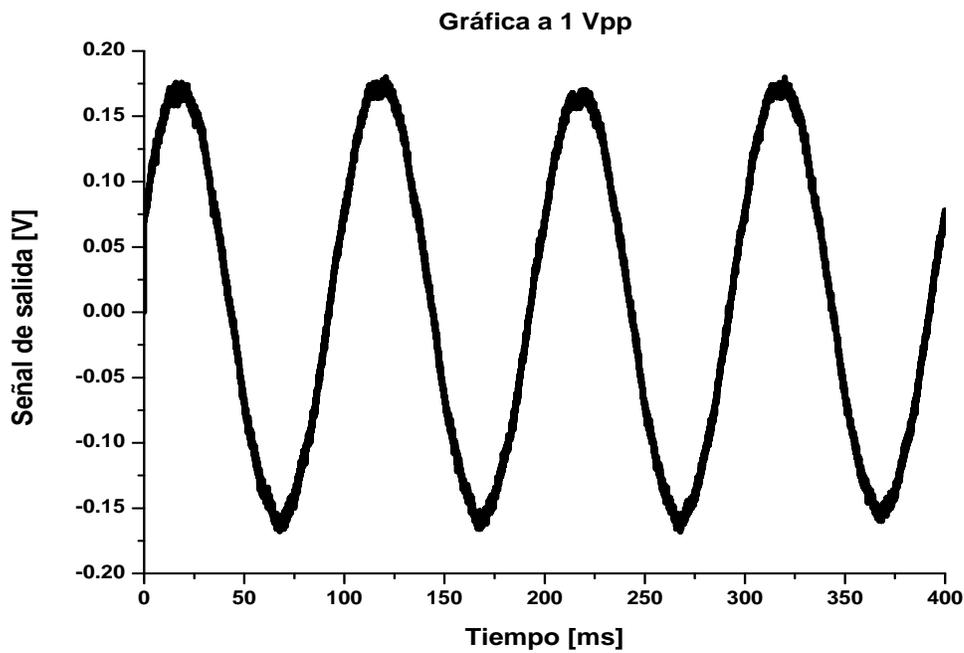


Figura 3.12. Gráfica del dispositivo de RHL a 1 Vpp en el PZT.

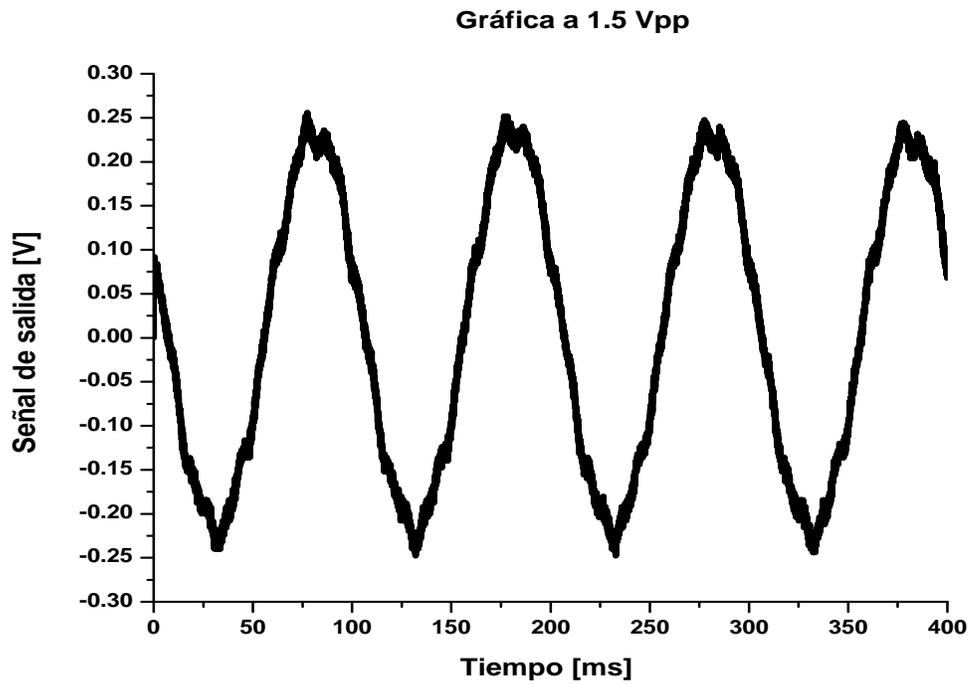


Figura 3.13. Gráfica del dispositivo de RHL a 1.5 Vpp en el PZT

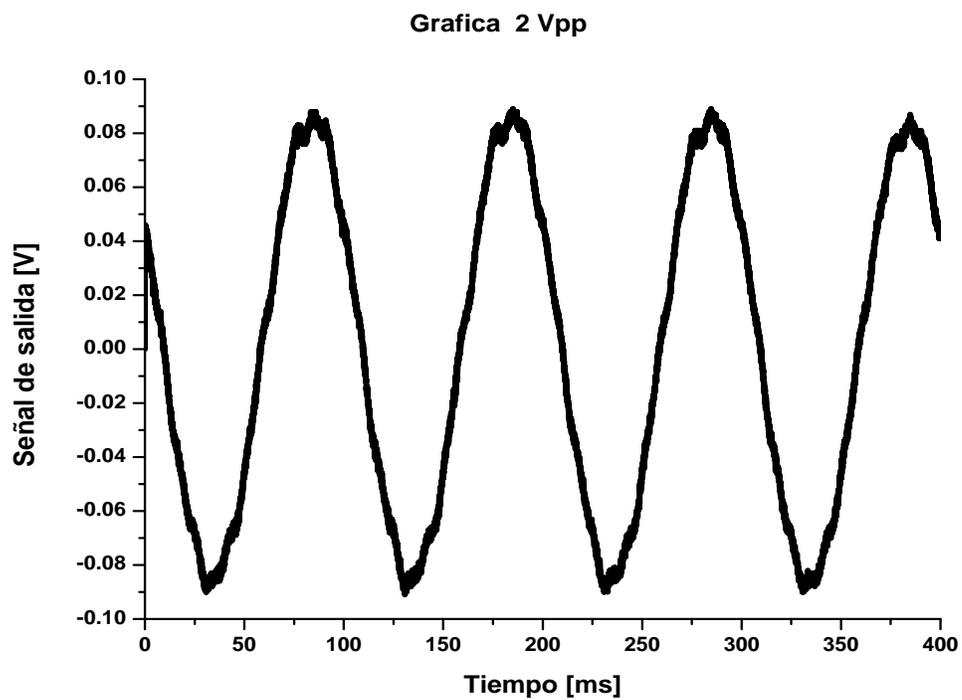


Figura 3.14. Gráfica del dispositivo de RHL a 2 Vpp en el PZT.



En la gráfica de la figura 3.8, se observa el comportamiento de la onda al alimentar con 0.5 Vpp el PZT, se ve que su forma se mantiene pero con un poco de ruido, por lo que los resultados menores a 0.5 Vpp de la onda senoidal ya no son tan claros, por lo que, a partir de esta amplitud que se le suministra al PZT, se puede decir que es nuestra referencia de partida para que la señal senoidal pueda ser visible, pero tomando en cuenta que existe la presencia de ruido, como se aprecia desde la gráfica de la figura 3.8, hasta la gráfica de la figura 3.11; es a partir del valor de 1 Vpp suministrado en el PZT, en donde ya se pueden observar cambios en la cantidad de ruido que se tiene en cada una de las formas de onda, esto se puede observar claramente en las gráficas de las figuras 3.12, 3.13 y 3.14.

De acuerdo a lo arriba mencionado, se puede decir que, para esta implementación #1, al ir aumentando la señal de amplitud, suministrada al PZT, las condiciones para las formas de onda en cada uno de los experimentos fueron mejorando al ir aumentando el voltaje, ya que como podemos observar en las gráficas anteriores, para los últimos resultados se tiene una cantidad de ruido menor en comparación con los primeros resultados.

### 3.4.2 Implementación #2

Ya que se obtuvieron los resultados del experimento anterior, posteriormente se realizó el segundo experimento, con la misma configuración del dispositivo de RHL, para este experimento las condiciones fueron las siguientes, el voltaje de alimentación de la señal senoidal que se le hace circular al PZT deberá ser fija al mínimo censado que es 0.5 Vpp y hacer un barrido de frecuencias desde los 10 Hz hasta lo mínimo detectable, es decir, que la onda se pueda ver claramente, haciendo el mismo proceso de obtención de datos mediante el osciloscopio y una memoria USB para procesarlos. De igual manera los datos resultantes fueron varios pero mostraré a continuación los más representativos.

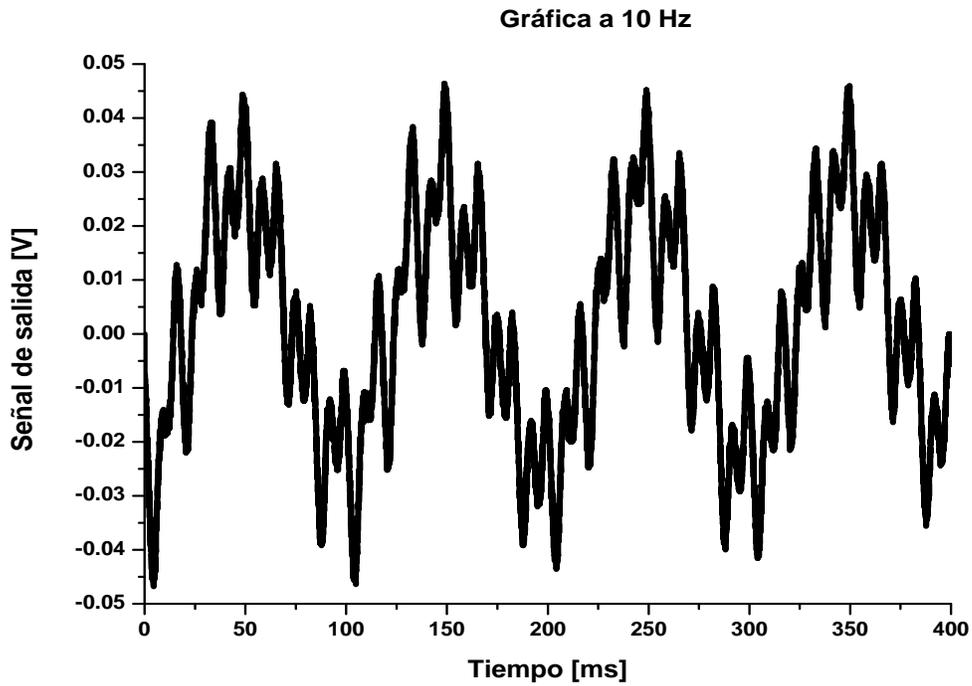


Figura 3.15. Gráfica del dispositivo de RHL a 10 HZ en el PZT.

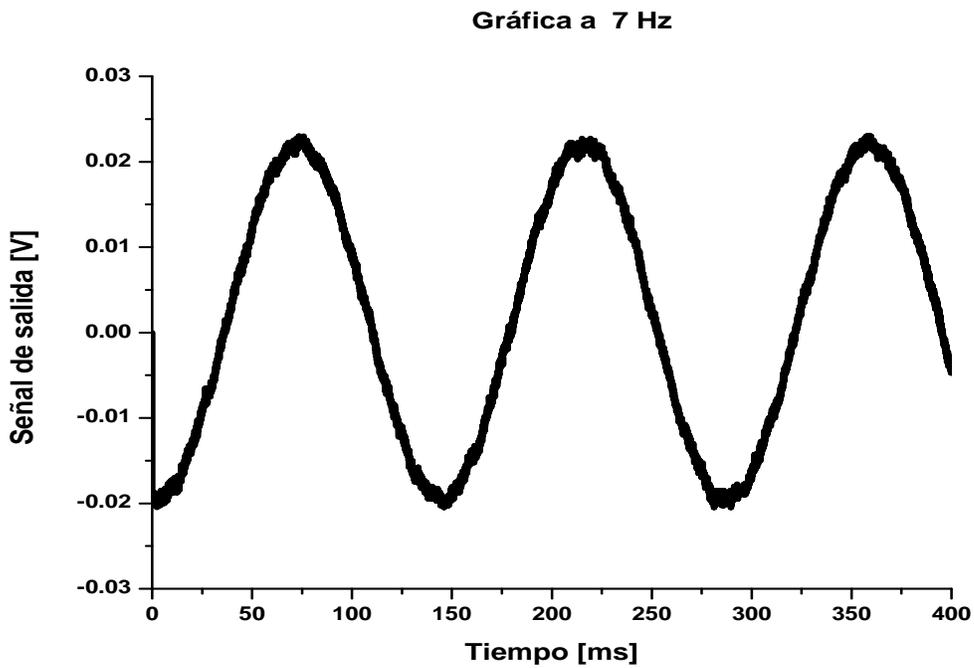


Figura 3.16. Gráfica del dispositivo de RHL a 7 HZ en el PZT.

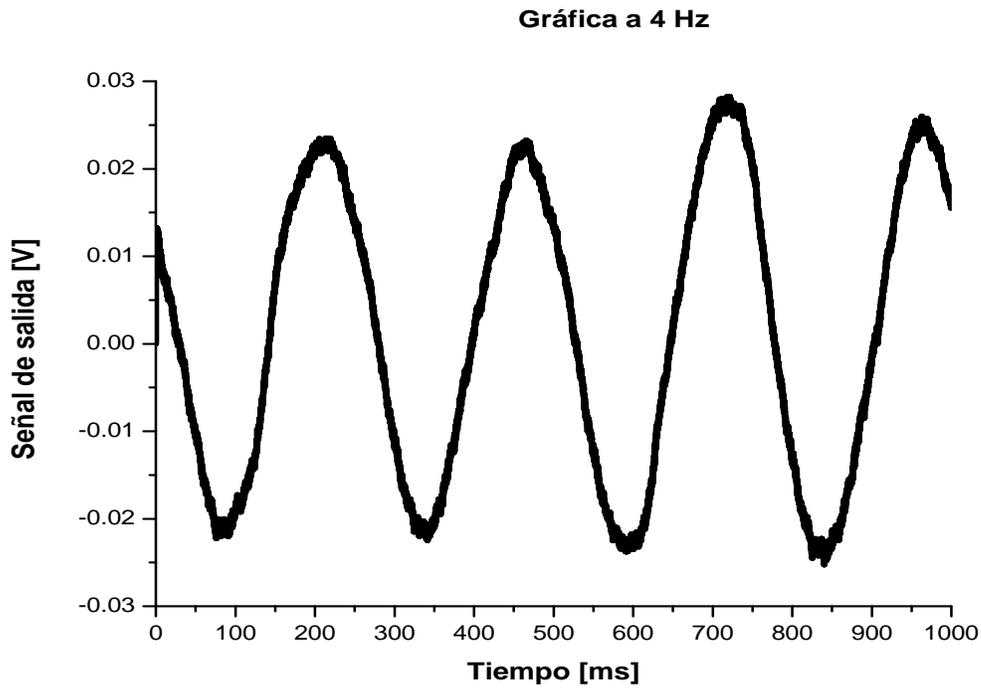


Figura 3.17. Gráfica del dispositivo de RHL a 4 Hz en el PZT.

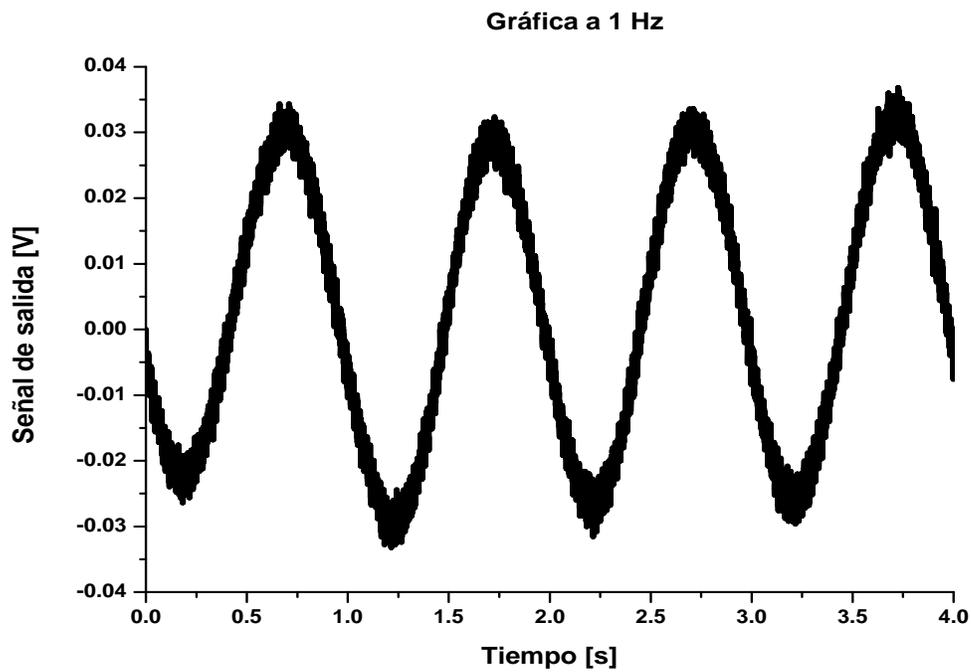


Figura 3.18. Gráfica del dispositivo de RHL a 1 Hz en el PZT.

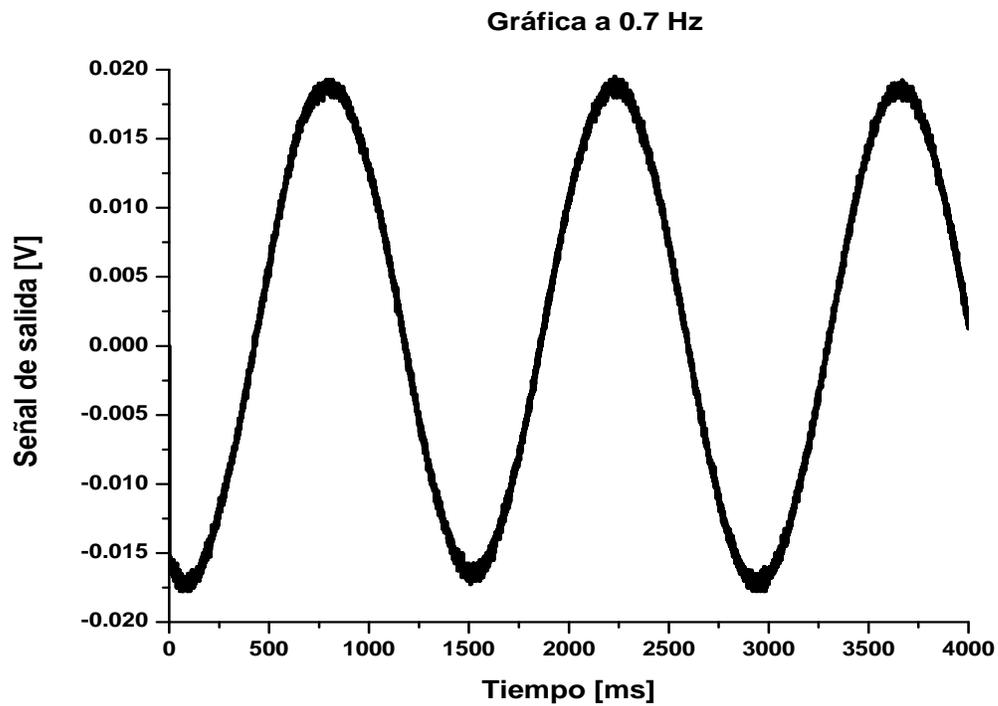


Figura 3.19. Gráfica del dispositivo de RHL a 0.7 HZ en el PZT.

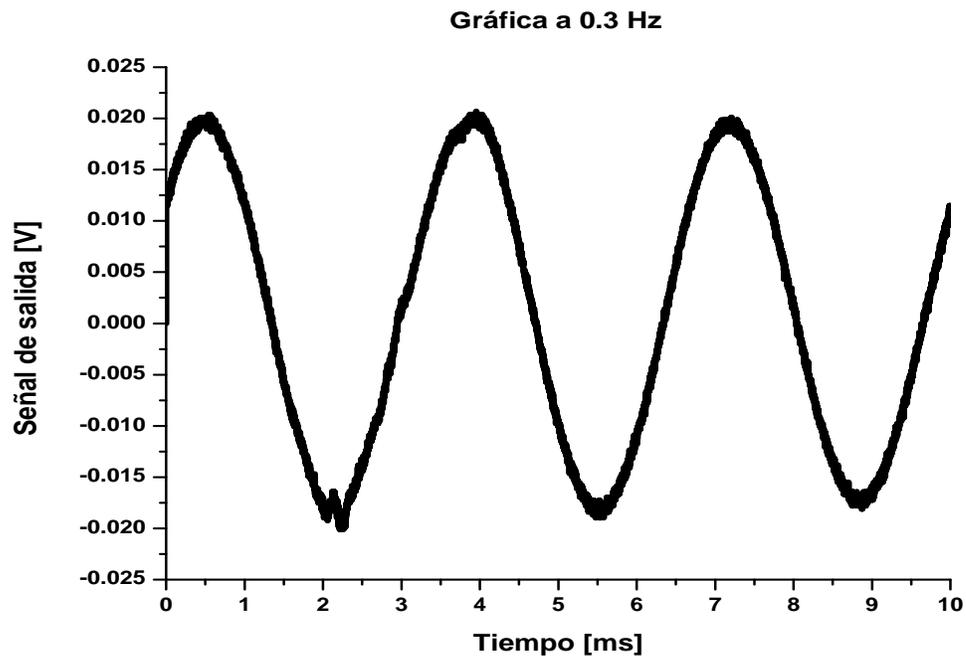


Figura 3.20. Gráfica del dispositivo de RHL a 0.3 HZ en el PZT.

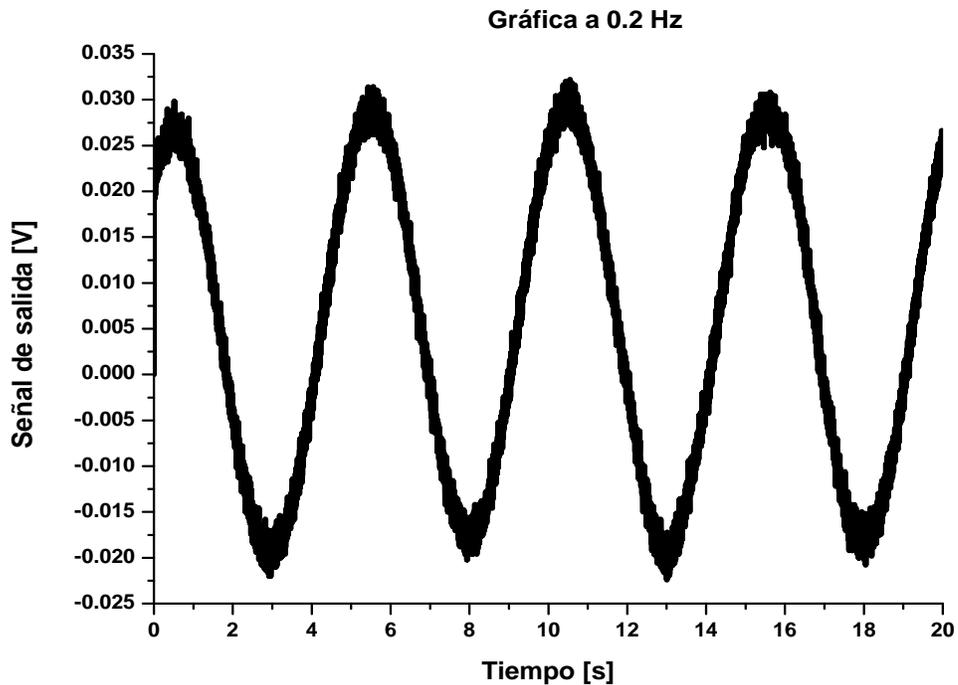


Figura 3.21. Gráfica del dispositivo de RHL a 0.2 Hz en el PZT.

En la gráfica de la figura 3.18, se puede observar el comportamiento al alimentar el PZT con 1 Hz, en donde la forma de onda senoidal, se mantiene en mejores condiciones en comparación con las gráficas de las figuras 3.15, 3.16 y 3.17, en las cuales se puede observar la presencia de ruido, por lo que a partir de la gráfica de la figura 3.18 que corresponde a una frecuencia de 1 Hz en el PZT, es donde la forma de la onda se mantiene y se observa con más claridad, esto después de un barrido de frecuencias de 10 Hz a 1 Hz, con pasos de 1 Hz.



En la gráfica de la figura 3.21, se observa el comportamiento al alimentar el PZT con 0.2 Hz, en donde la forma de la onda se mantiene muy bien, con muy poco ruido a lo largo de toda la propagación. Esta es la medición mínima que se pudo obtener, tomando en cuenta que de 1Hz a 0.2 Hz se hizo un barrido de frecuencias con pasos de 0.1 Hz; ya que por debajo de los 0.2 Hz la forma de la onda ya no se mantiene y se ve deformada.

Estos fueron los dos experimentos y sus resultados correspondientes para el dispositivo de RHL, a continuación se mostrara la implementación del Interferómetro de Michelson, de igual manera se realizó el mismo procedimiento para ambos experimentos de este dispositivo IM.

### 3.5 Implementaciones del Interferómetro de Michelson (IM)

La configuración de interferómetro de Michelson, se muestra en el esquema de la figura 3.22, para esta implementación el divisor de haz es de utilidad ya que una parte del rayo de luz se propaga hacia un espejo que esta fijo, el cual hace que se refleje nuevamente para que se interfiera después con el otro haz de luz que proviene del espejo que esta añadido al PZT.

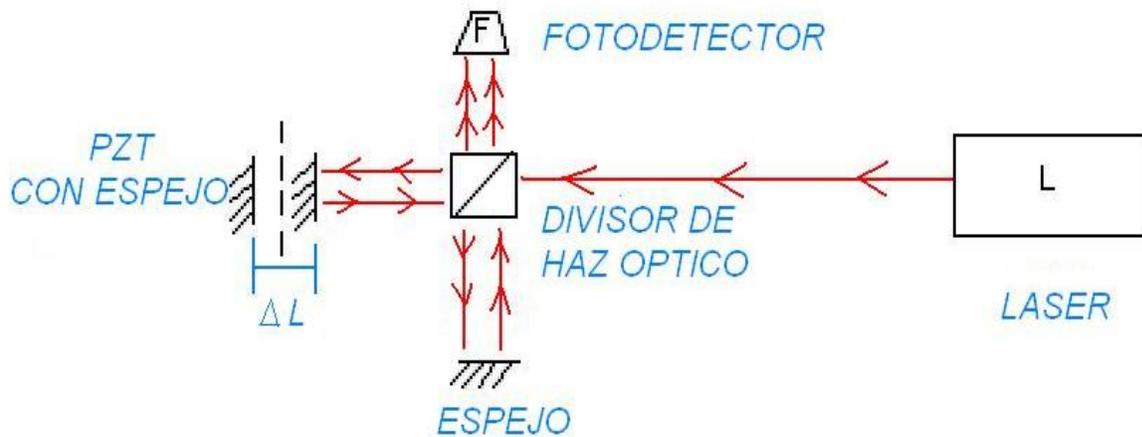


Figura 3.22. Esquema del Interferómetro de Michelson (IM).

De acuerdo al esquema de la figura anterior, fue como pudo realizarse la implementación dentro del laboratorio y se muestra a continuación en la siguiente figura.

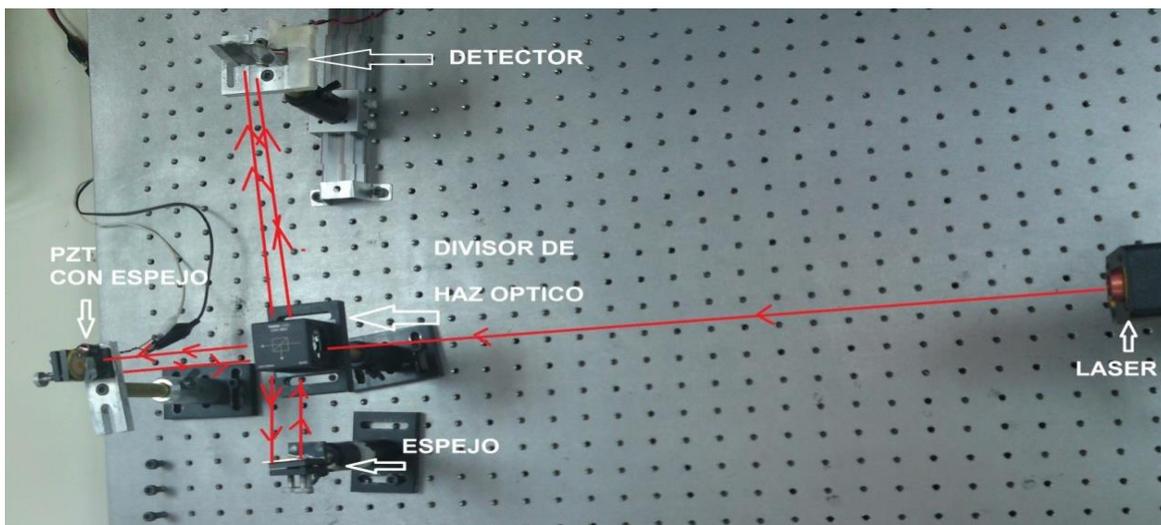


Figura 3.23. Imagen del dispositivo Interferómetro de Michelson (IM).



Para verificar que efectivamente estaba ocurriendo una interferencia, fue necesario quitar el fotodetector y proyectar el haz en la pared, para poder observar las franjas de interferencia, en la siguiente imagen se muestra la forma de las franjas.



Figura 3.24. Imagen de las franjas de interferencia proyectadas en una superficie plana.

### 3.5.1 Implementación #3

Una vez que se verificó que existen las franjas de interferencia, se prosiguió en realizar los mismos experimentos que se hicieron para el dispositivo de RHL, en primer lugar, se hizo el experimento en donde se dejó la frecuencia fija a los 10 Hz, haciendo variar el voltaje desde los 0.3 Vpp hasta los 4 Vpp, en pasos de 0.1 Vpp, por lo cual también hay varios resultados pero se pondrán los más representativos y/o los mismos que los del dispositivo de RHL, a fin de comprender el comportamiento. Uno de los primeros se muestra en la figura siguiente.

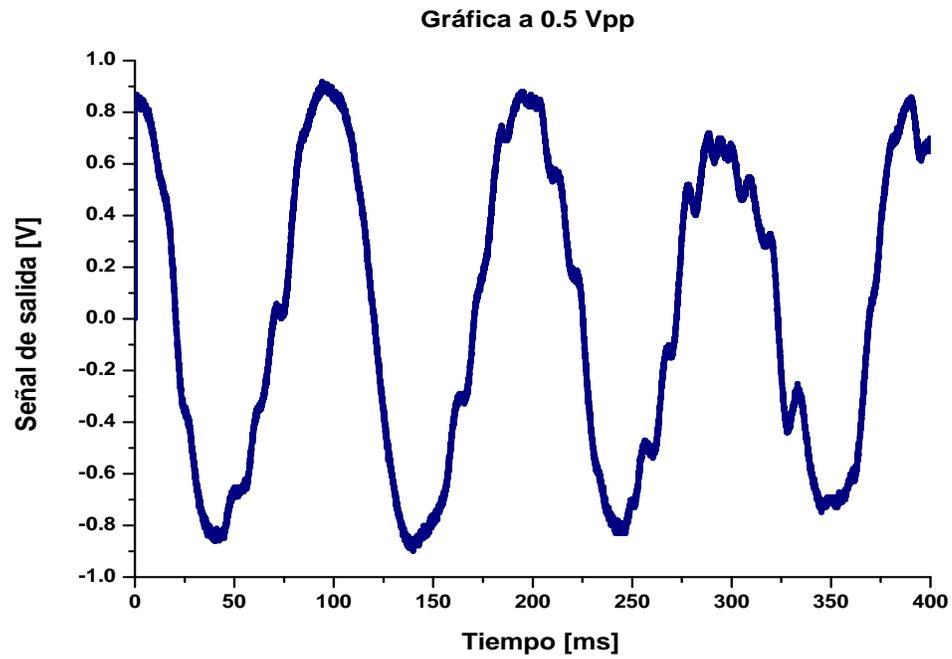


Figura 3.25. Gráfica del Interferómetro de Michelson a 0.5 Vpp en el PZT

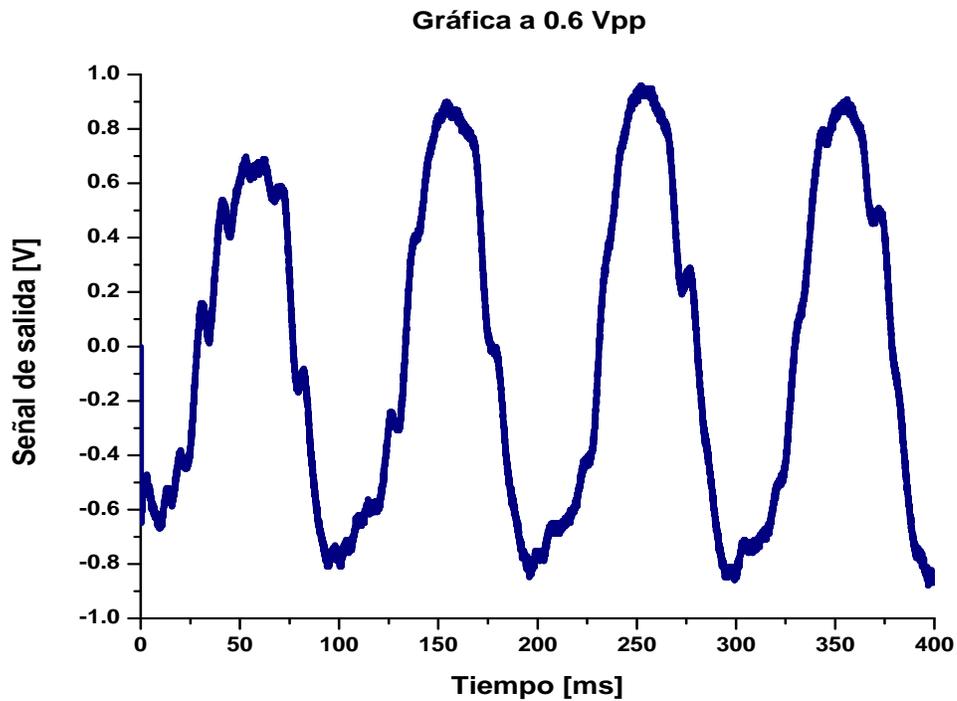


Figura 3.26. Gráfica del Interferómetro de Michelson a 0.6 Vpp en el PZT.

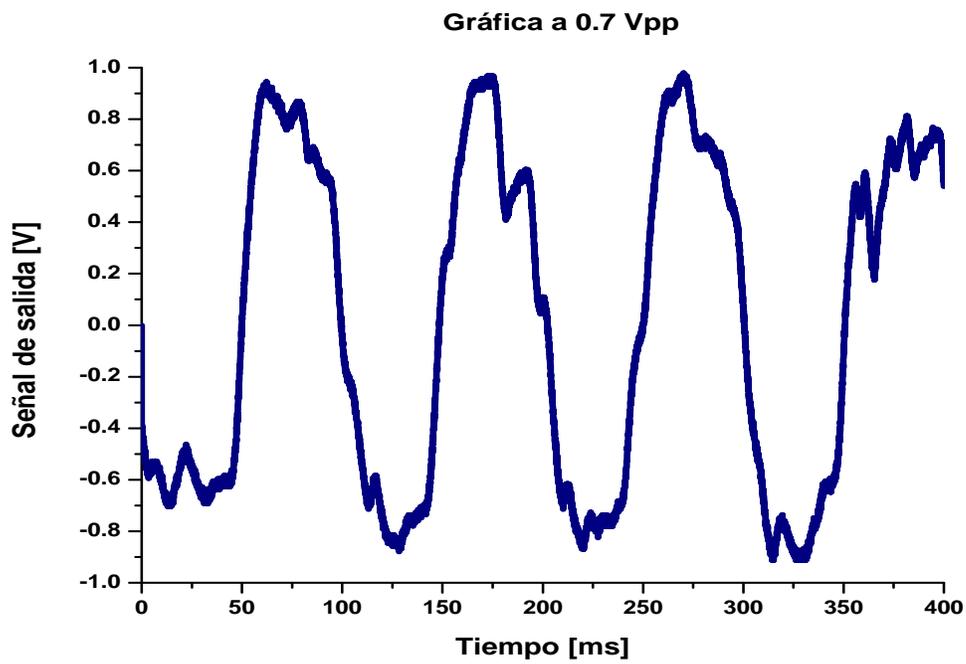


Figura 3.27. Gráfica del Interferómetro de Michelson a 0.7 Vpp en el PZT.

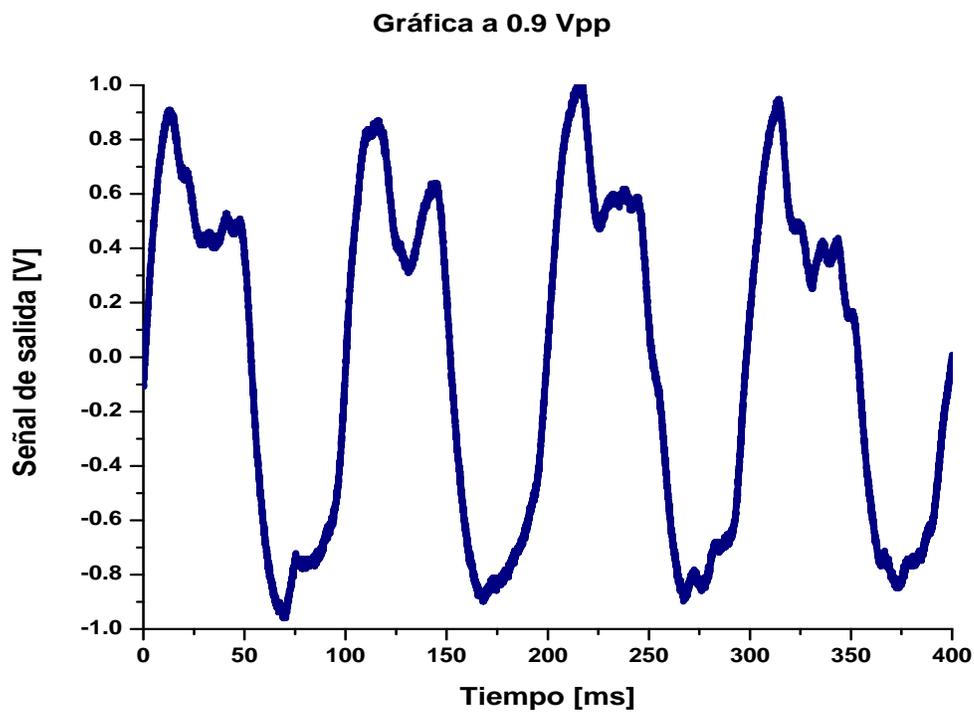


Figura 3.28. Gráfica del Interferómetro de Michelson a 0.9 Vpp en el PZT.

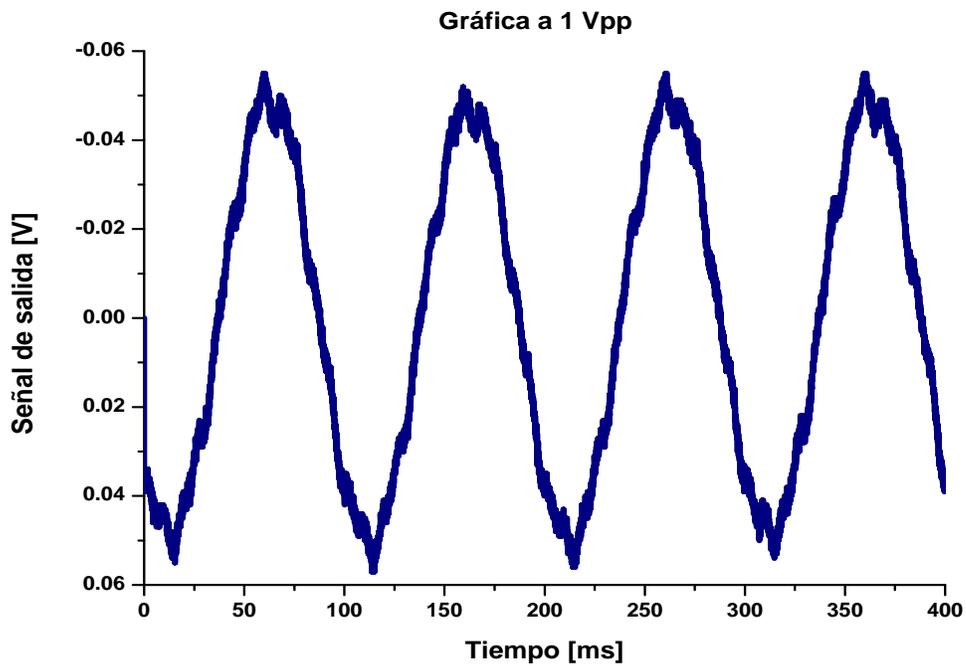


Figura 3.29. Gráfica del Interferómetro de Michelson a 1 Vpp en el PZT.

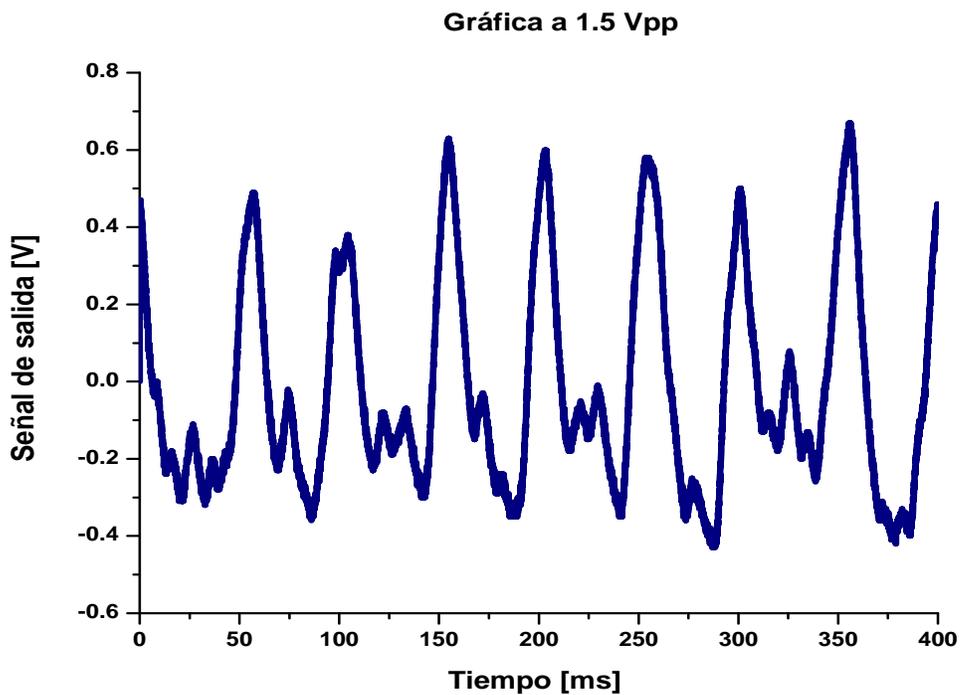


Figura 3.30. Gráfica del Interferómetro de Michelson a 1.5 Vpp en el PZT.

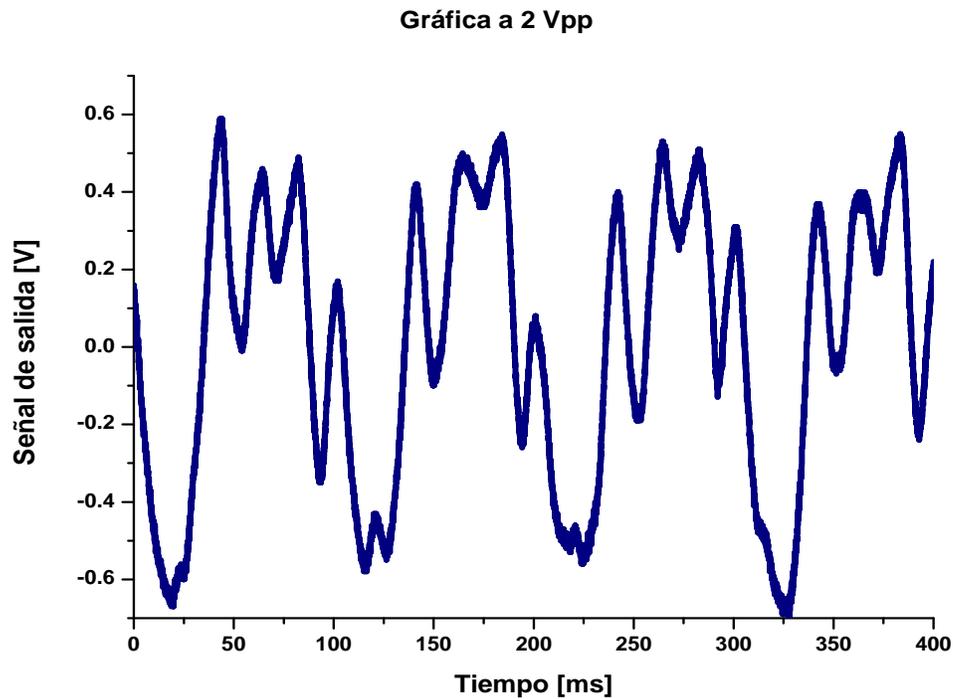


Figura 3.31. Gráfica del Interferómetro de Michelson a 2 Vpp en el PZT.

Para las gráficas de las figuras 3.25, 3.26 y 3.29 se puede observar que las señales son muy cercanas a una señal senoidal, pero se puede ver que cada una de estas señales tienen ruido a lo largo de toda la propagación, podemos decir que la condición para poder realizar este tipo de mediciones en este experimento, son adecuados los valores de voltaje menores a 1 Vpp suministradas en el PZT, ya que como se puede observar para las gráficas de las figuras 3.30 y 3.31 son señales que contienen demasiado ruido, por lo cual para voltajes de alimentación en el PZT mayores a 1 Vpp, la forma de onda senoidal se pierde.

### 3.5.2 Implementación #4

Ahora bien, por otra parte, de la misma manera que en el dispositivo de RHL, se hizo el segundo experimento, en donde se dejó una amplitud fija de alimentación de 0.5 Vpp de la señal senoidal, que se le hace circular al PZT, por lo cual ahora se hizo variar la frecuencia de la señal desde los 10 Hz hasta lo mínimo que fuera detectable. Uno de los primeros resultados obtenidos se muestra a continuación en la siguiente figura.

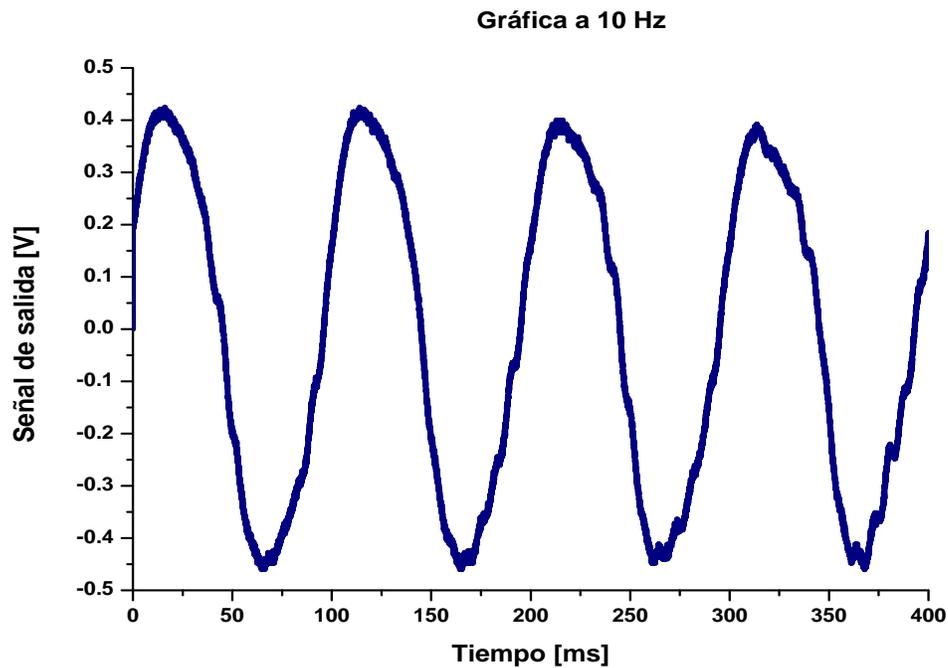


Figura 3.32. Gráfica del Interferómetro de Michelson a 10 Hz en el PZT.

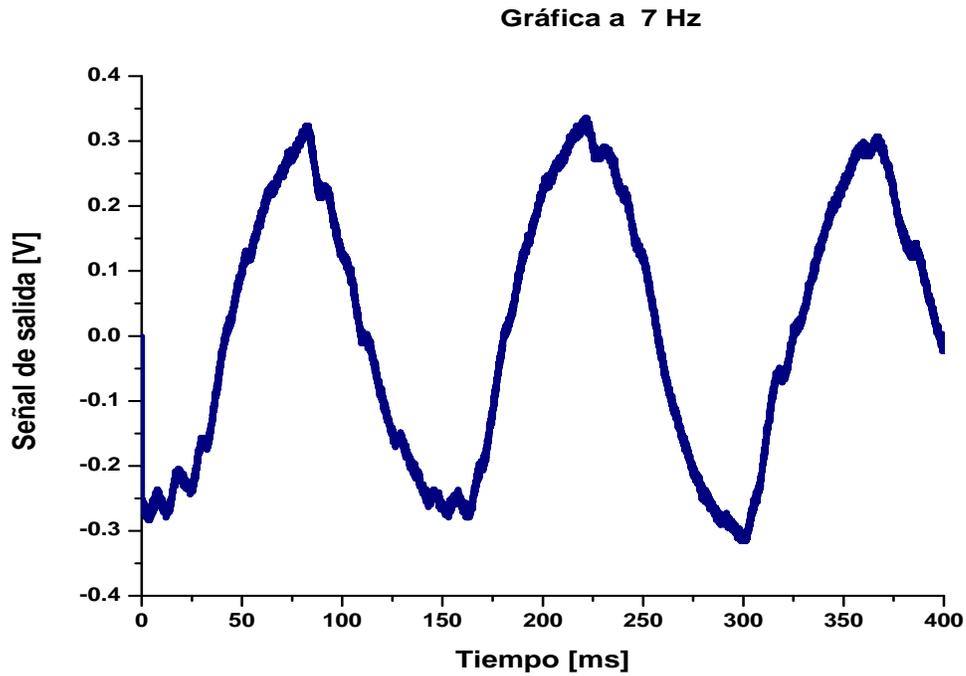


Figura 3.33. Gráfica del Interferómetro de Michelson a 7 Hz en el PZT.

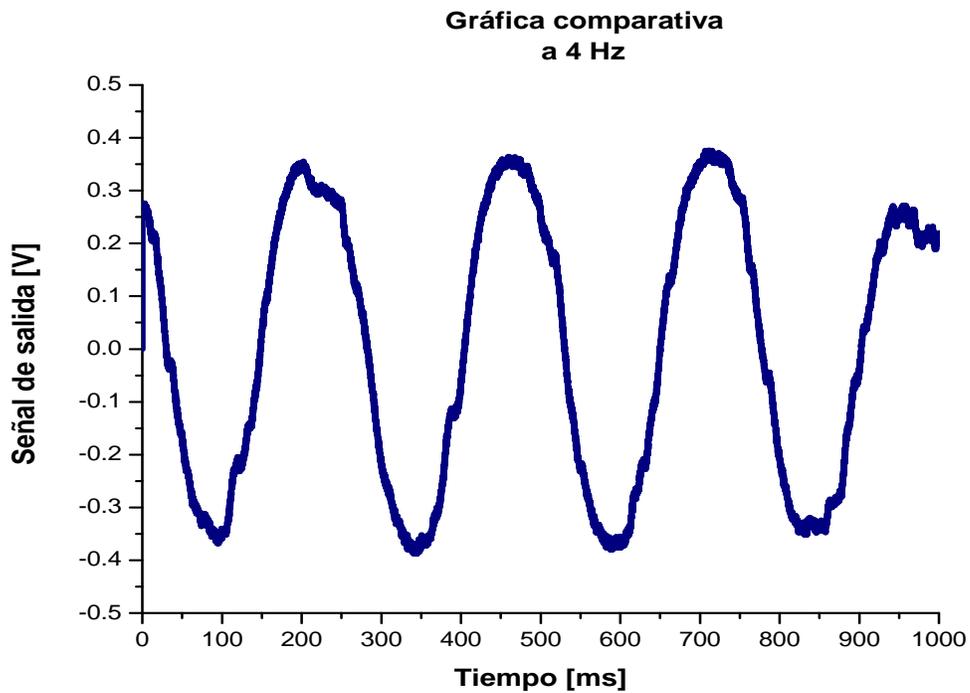


Figura 3.34. Gráfica del Interferómetro de Michelson a 4 Hz en el PZT.

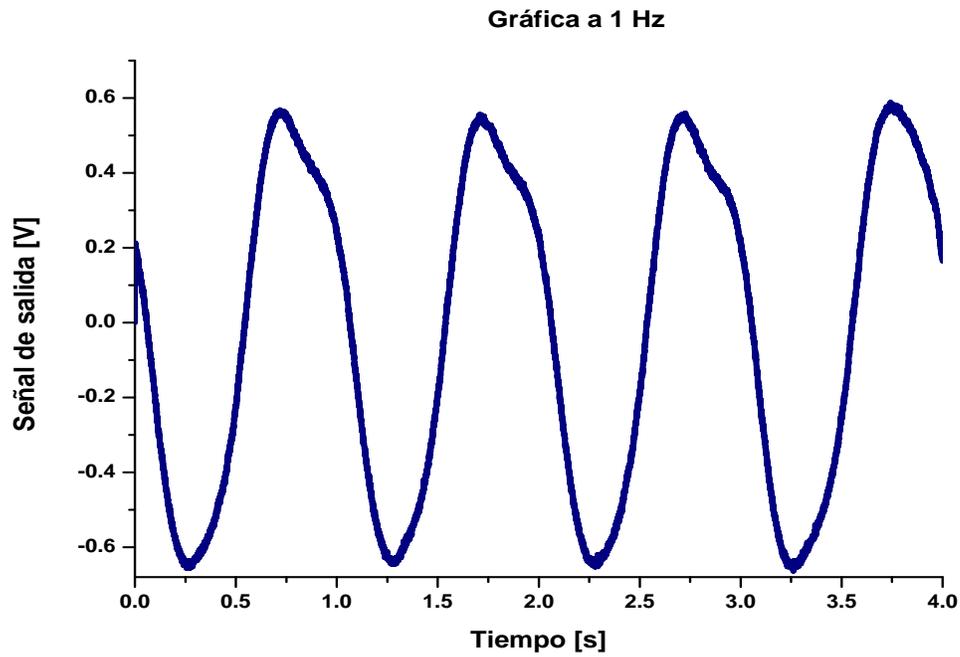


Figura 3.35. Gráfica del Interferómetro de Michelson a 1 Hz en el PZT.

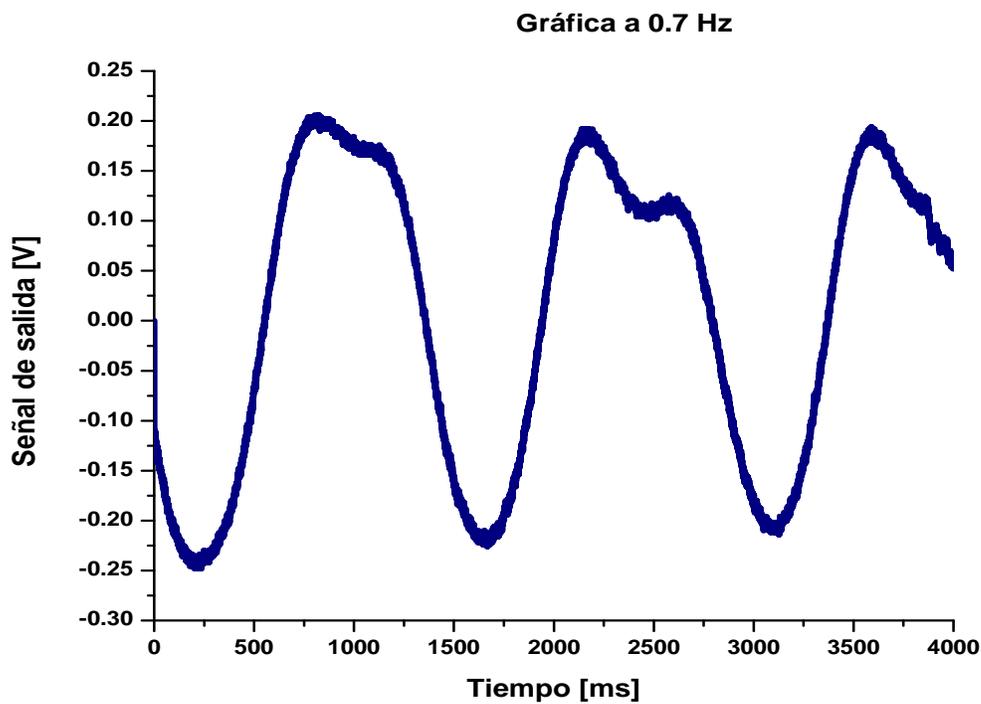


Figura 3.36. Gráfica del Interferómetro de Michelson a 0.7 Hz en el PZT.

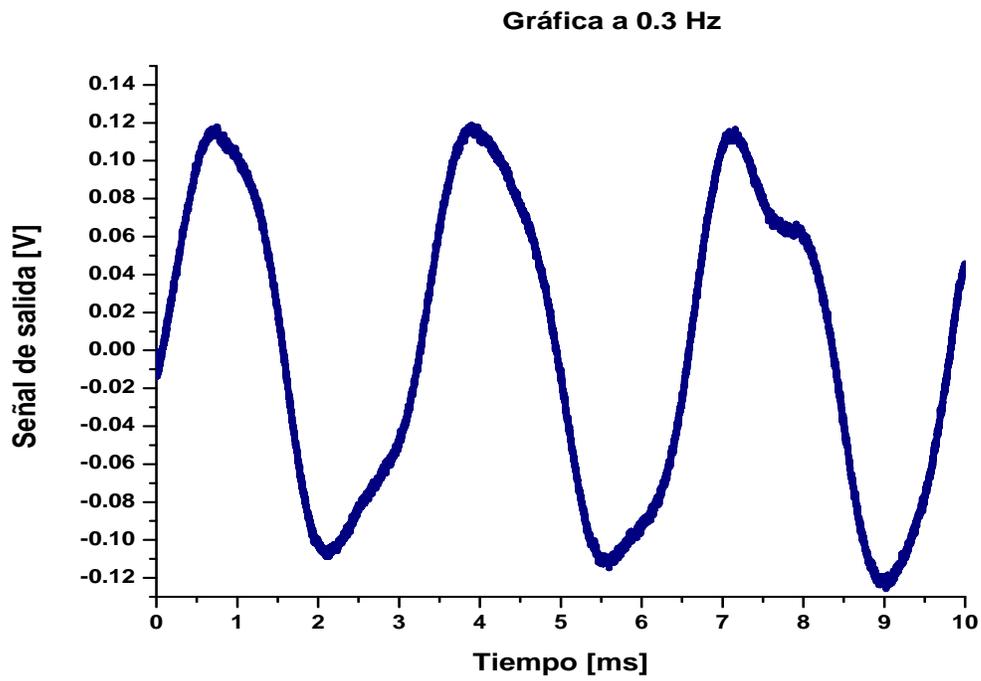


Figura 3.37. Gráfica del Interferómetro de Michelson a 0.3 Hz en el PZT.

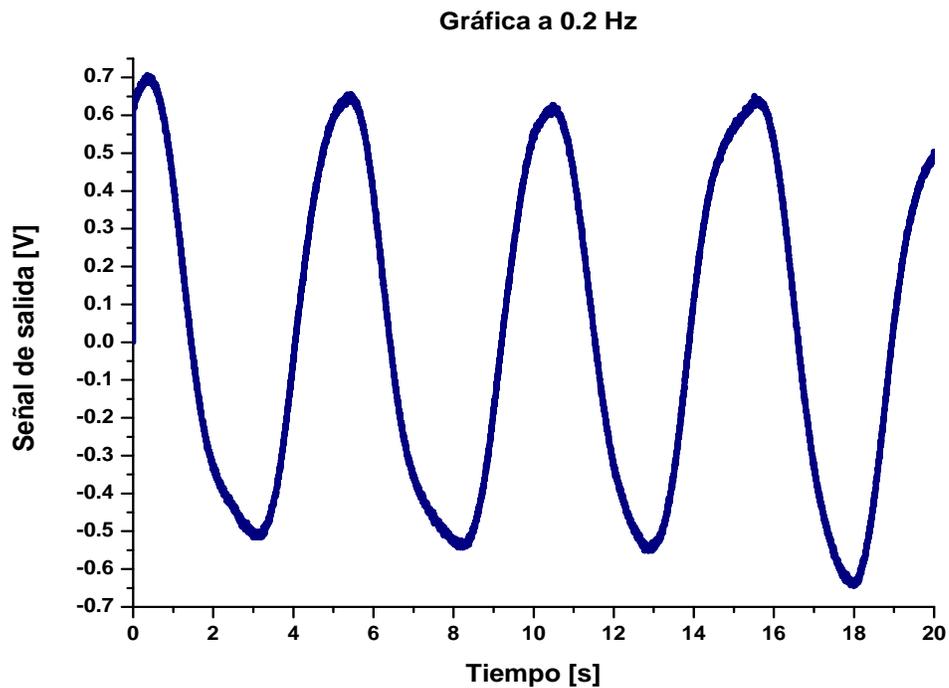


Figura 3.38. Gráfica del Interferómetro de Michelson a 0.2 Hz en el PZT.



En las gráficas de las figuras 3.32, 3.33 y 3.34 se observa que las formas de las señales, tienen una forma senoidal, pero adquieren un poco de ruido a lo largo de la propagación, por lo que podemos decir que para valores de frecuencia de alimentación mayores a 1 Hz en el PZT, son ruidosas, menos claras en comparación con los resultados obtenidos para valores de frecuencia menores a 1 Hz, esto se puede ver claramente en las gráficas de las figuras 3.35, 3.36, 3.37 y 3.38, en donde, las señales siguen teniendo una forma de onda senoidal pero con una cantidad menor de ruido, este únicamente se encuentra en los máximos y mínimos de las ondas. Gracias a todo lo anterior observado y descrito, podemos decir que para este experimento, el cual se varió la frecuencia, los mejores resultados se obtuvieron para frecuencias menores a 1 Hz.

### **Conclusiones del capítulo.**

En este capítulo se hizo distintas implementaciones, una fue con el PZT, para permitirnos realizar su caracterización y saber su funcionamiento, los otros dos fueron las más importantes, ya que es la base de este trabajo, la primera fue el dispositivo de RHL, la cual es muy sencilla y nos permitió realizar las distintas mediciones de una manera práctica, por último se realizó la implementación del IM, la cual es un poco más compleja que las dos anteriores, ya que hay que alinear el laser junto con los dos espejos para que se lleve a cabo la interferencia óptica y así, permitirnos realizar las mediciones de una manera más adecuada.



Es de considerar que para las implementaciones #2 y #4, en donde se fijó el voltaje de alimentación en el PZT en 0.5 Vpp, se varió la frecuencia, los mejores resultados obtenidos estuvieron dados para valores menores a 1 Hz en ambos dispositivos (IM y RHL), ya que para las gráficas de las figuras 3.35, 3.36, 3.37 y 3.38 que corresponden al IM y las gráficas de las figuras 3.18, 3.19, 3.20 y 3.21 que corresponden al dispositivo de RHL, se observa en estos resultados, que la forma de la señal de salida tiene menor ruido y un forma de onda más parecida a una senoidal.

Para la implementación #3 en donde se dejó fija la frecuencia de alimentación en el PZT a 10 Hz, se fue variando el voltaje, obteniendo los mejores resultados a el IM, dados para valores menores a 1 Vpp, tal y como se observa en las gráficas de las figuras 3.29, 3.28, 3.27, 3.26 y 3.25, en donde se ve que las señales tienen una forma senoidal y con poco ruido.

Por otro lado, para la implementación #1 los mejores resultados obtenidos para el dispositivo de RHL se muestran en las gráficas de las figuras 3.12, 3.13 y 3.14, que corresponden a valores de alimentación mayores a 1 Vpp en el PZT, en donde se observa que la forma de las señales son muy parecidas a una senoidal pero con poco ruido.



## CAPÍTULO 4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES.

A continuación se hará una breve comparación de ambos sistemas, Interferómetro de Michelson (IM) y del dispositivo de reflexión del haz laser (RHL), con base en los resultados mostrados en el capítulo 3.

### 4.1 Comparación de resultados. Implementaciones #1 y #3

Recordemos lo que se hizo brevemente para este experimento, en primera instancia se dejó fija la frecuencia en 10 Hz y se fue variando la amplitud de alimentación del PZT, se muestra la primera comparación de este experimento en la figura 4.1

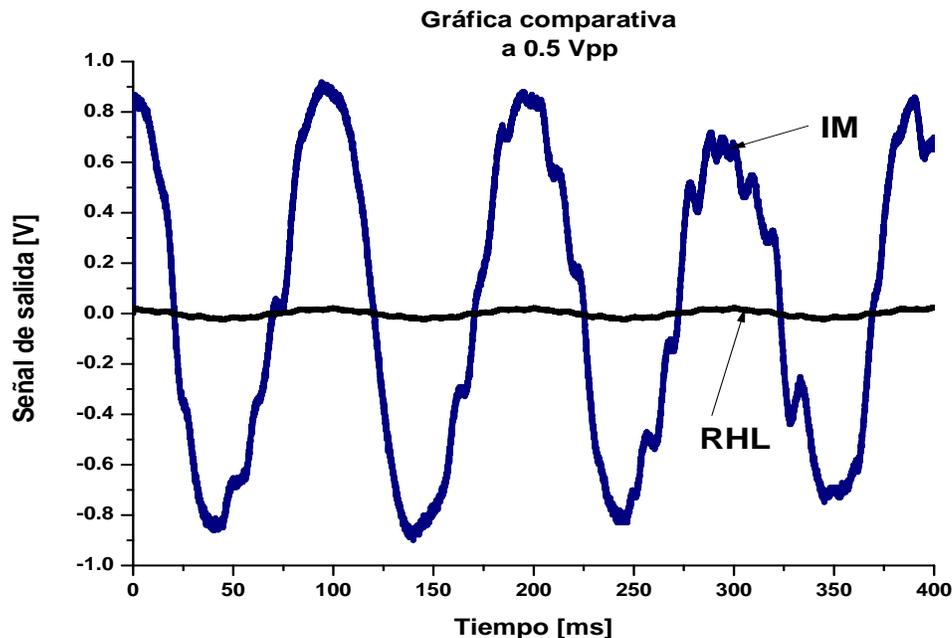


Figura 4.1. Gráfica comparativa de ambos sistemas a 0.5 Vpp en el PZT.

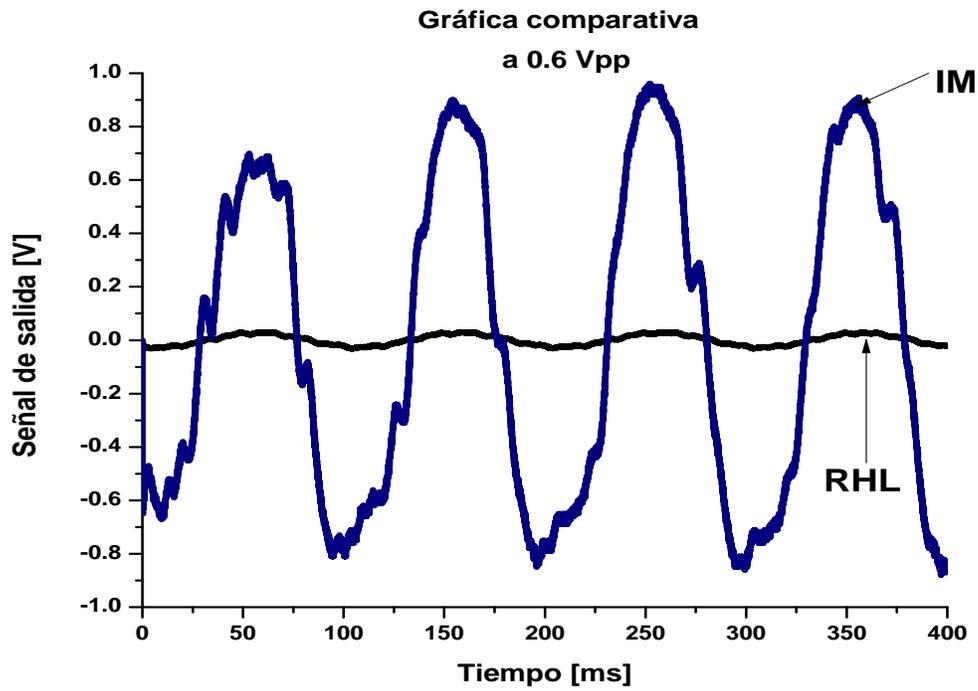


Figura 4.2. Gráfica comparativa de ambos sistemas a 0.6 Vpp en el PZT.

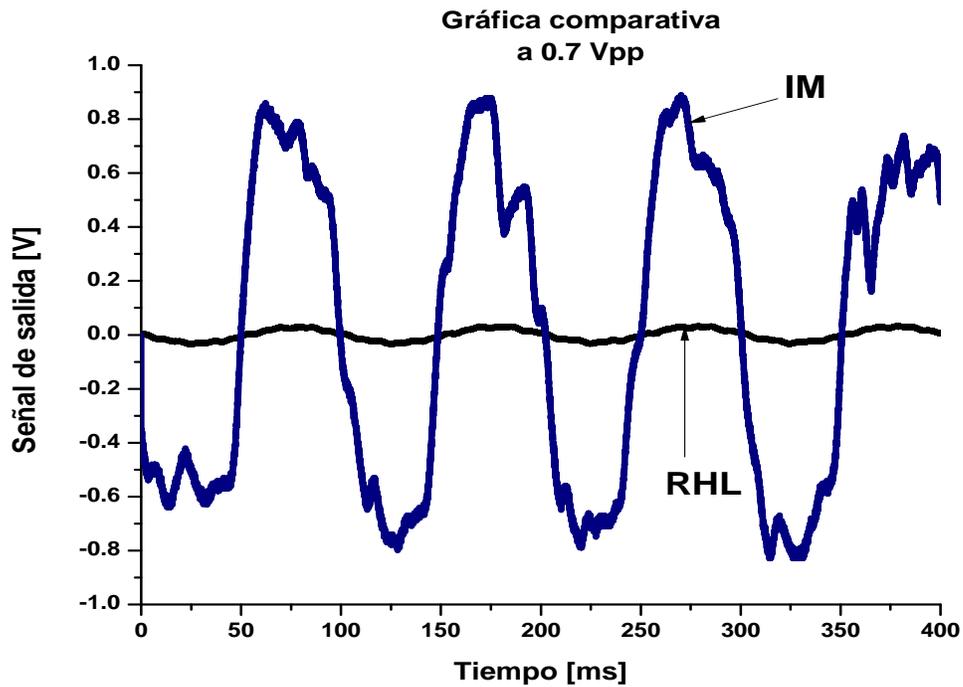


Figura 4.3. Gráfica comparativa de ambos sistemas a 0.7 Vpp en el PZT.

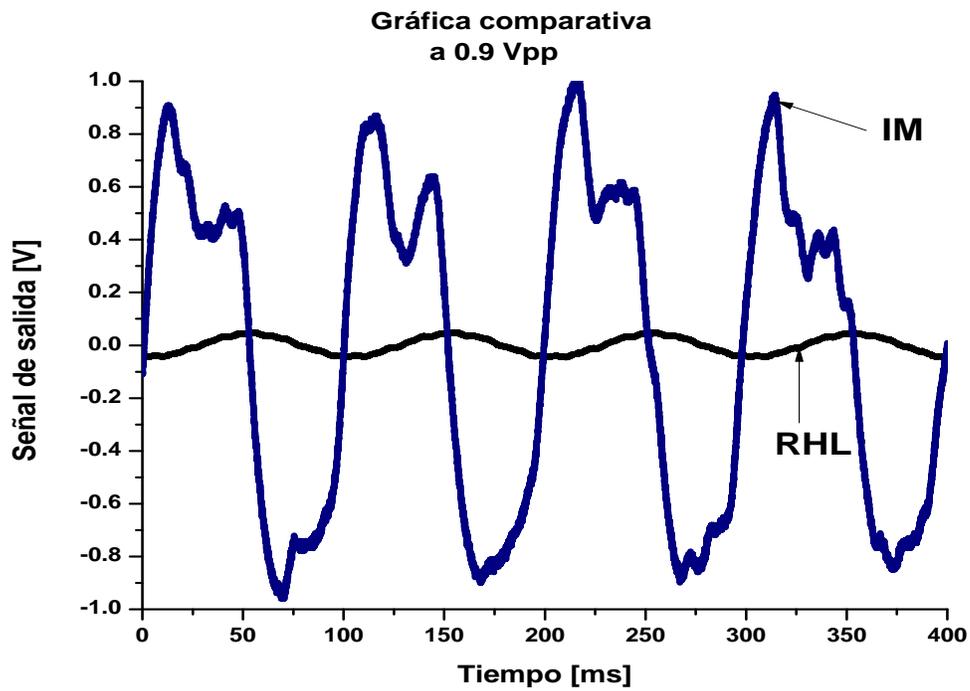


Figura 4.4. Gráfica comparativa de ambos sistemas a 0.9 Vpp en el PZT.

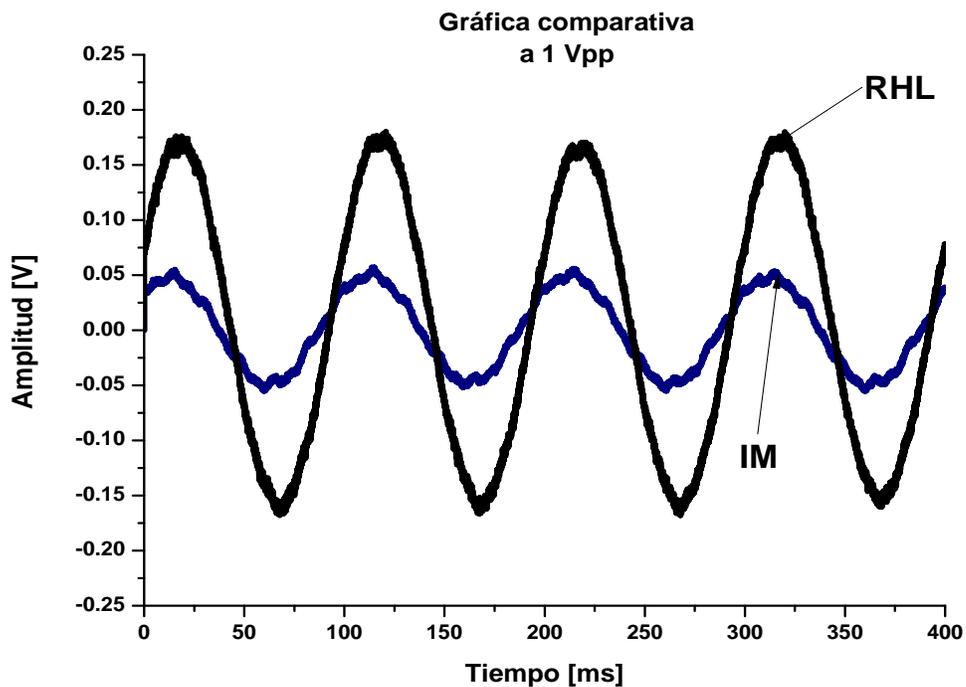


Figura 4.5. Gráfica comparativa de ambos sistemas a 1 Vpp en el PZT.

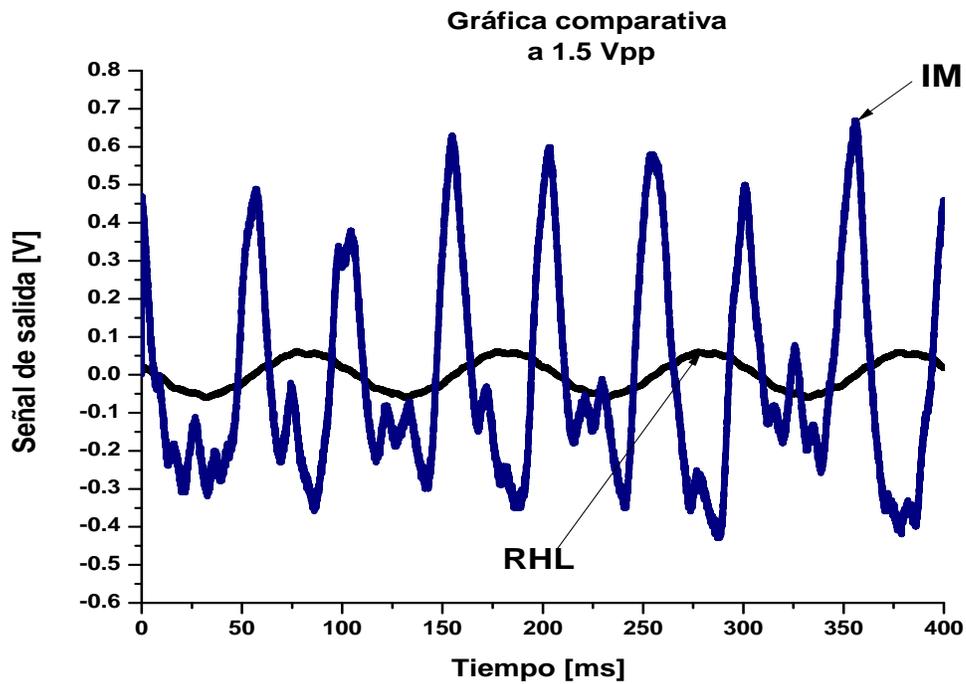


Figura 4.6. Gráfica comparativa de ambos sistemas a 1.5 Vpp en el PZT.

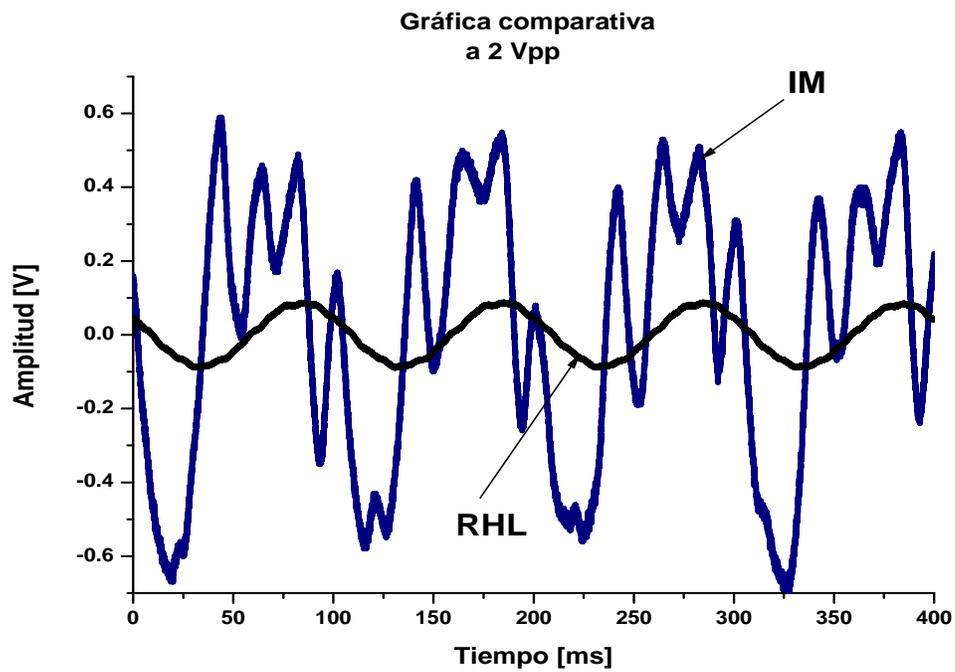


Figura 4.7. Gráfica comparativa de ambos sistemas a 2 Vpp en el PZT.



Para esta parte del experimento, podemos observar las gráficas de las figuras 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4, en donde podemos apreciar el comportamiento de ambos sistemas (IM y RHL), en los cuales la mayoría de las señales de salida representadas para el IM, la amplitud es mayor en comparación con las señales del dispositivo de RHL, pero con una cantidad de ruido muy parecida entre ellos. En la gráfica de la figura 4.5 es el único resultado en donde el IM tiene una amplitud menor que la del dispositivo de RHL, pero también se puede ver la señal del IM con una cantidad de ruido un poco mayor. Para las gráficas correspondientes a las figuras 4.6 y 4.7 se puede ver que las señales de salida para el IM son prácticamente ruido a lo largo de toda la medición, esto pudo ser causado por las características mecánicas del PZT al ir aumentando el voltaje, pero en cambio las señales del dispositivo de RHL su forma de la onda es muy parecida a una señal senoidal pero con una amplitud menor.

Ya que obtuvimos los resultados anteriores, ahora los compararemos para cada caso realizando un nuevo análisis de resultados con ayuda de la relación señal a ruido. Para esto fue necesario realizar una gráfica para poder representar el ruido que nos proporcionaba el fotodetector, este lo podemos observar en la figura 4.8.

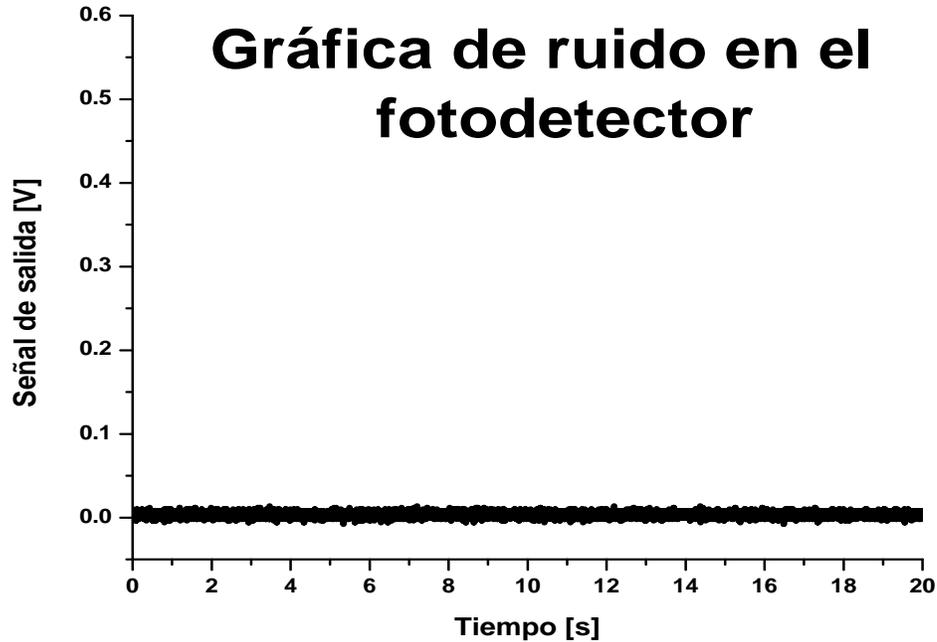


Figura 4.8. Gráfica de ruido en el fotodetector.

En la gráfica de la figura 4.8, se puede observar el comportamiento del ruido que proporciona el fotodetector a todas las señales implementadas, ya que se realizaron varias veces estas mediciones para determinar los cambios en el ruido, pero estos eran prácticamente iguales para cada experimento, por lo cual se decidió a utilizar el mismo ruido en cada experimento, dándonos un promedio de  $S_N = 22 \text{ mV}$ . Para todas las gráficas se procedió a realizar un promedio, ya que con ayuda de estas cifras resultantes es más fácil realizar nuestro análisis de la relación señal a ruido.



#### 4.1.1 Relación señal/ruido

En la mayor parte de las mediciones, la intensidad promedio del Ruido  $N$  es constante e independiente de la magnitud de la señal  $S$ . Así el efecto del ruido en el error relativo de una medición se vuelve cada vez mayor a medida que la cantidad se disminuye en magnitud. Por esta razón, la relación señal/ruido ( $S/N$ ) es una cifra de merito mucho más útil que el ruido solo para describir la calidad de un método analítico o el desempeño de un instrumento.

Para poder realizar el análisis, partimos de la siguiente [19] relación:

$$\text{Relación } S / N = \frac{P_{\text{señal}}}{P_{\text{ruido}}}, \quad (16)$$

Como la potencia es  $V^2/R$ , entonces si  $V_s$  es la señal en tensión eléctrica, la señal de potencia es  $V_s^2/R$ , y si  $V_N$  es la tensión eléctrica del ruido en los terminales de la misma resistencia, entonces la potencia del ruido es  $V_N^2/R$ , por lo tanto,

$$S/N = \left( \frac{V_s}{V_N} \right)^2, \quad (17)$$

En la tabla 4.9 se muestran los resultados obtenidos para cada una de las comparaciones de los experimentos #1 y #3, con ayuda de la relación señal a ruido.



Frecuencia cte= 10 Hz	Promedio de señales		Promedio de ruido= 22 [mV]	
	Señal de salida [mV]	Señal de salida [mV]	Relación señal a ruido $S/N = (V_s/V_N)^2$	
	IM	RHL	IM	RHL
0.5 Vpp en PZT	1820	49.6	276615.56	5.082
0.6 Vpp en PZT	1840	60.4	282728.43	7.537
0.7 Vpp en PZT	1892	67.6	298934.54	9.441
0.9 Vpp en PZT	1980	97	327389.10	19.44008264
1 Vpp en PZT	112	348	35.917	250.214
1.5 Vpp en PZT	1100	500	101046.01	516.528
2 Vpp en PZT	1290	179	138967.50	66.200

Tabla 4.9. Resultados experimentos #1 y #3.

En la tabla 4.9, podemos observar que, para los primeros cuatro casos que son, 0.5, 0.6, 0.7, 0.9 Vpp suministrados en el PZT, la relación S/N para el IM es mucho mayor en comparación con la del dispositivo de RHL, esto debido a que la señal de salida para cada uno de los cuatro casos tiene una amplitud mayor en el IM, pero no nada más es eso, sino que la forma de la onda también es clara y con muy poco ruido en el sistema, haciendo que para estos casos la relación S/N sea muy favorable.



Para el siguiente caso es a un voltaje de 1 Vpp en el PZT, la relación S/N es mayor para el dispositivo de RHL, ya que las características de las señales de salida son muy parecidas en cuanto la cantidad de ruido que tiene cada una y en la forma, la diferencia es que la señal del dispositivo de RHL tiene una mayor amplitud y es por eso que la relación S/N es favorable para este sistema.

En los dos últimos dos casos de esta tabla, son muy particulares, debido a que la relación señal a ruido de acuerdo a los resultados obtenidos, favorecen al IM ya que su amplitud es mayor que la del dispositivo de RHL, pero si recordamos la forma de las señales de las gráficas de las figuras 4.6 y 4.7, la de dispositivo de RHL tiene una amplitud menor pero con una forma muy clara, en comparación a la del IM tiene una mayor amplitud pero con mayor ruido, pero este ruido es provocado por las características mecánicas del PZT, ya que al aumentar el voltaje que se le suministra su desplazamiento es mayor, por lo cual la forma de la onda ésta tan deformada.

#### 4.2 Comparación de resultados. Implementaciones #2 y #4

Recordando lo que se realizó en estos experimentos, se procedió de la forma siguiente, se dejó fijo el voltaje suministrado al PZT en 0.5 Vpp, y se varió su frecuencia de alimentación, a continuación se muestra la comparación de los resultados obtenidos en este experimento, para los cuales, en cada una de las comparaciones se mantuvieron las mismas condiciones de trabajo.

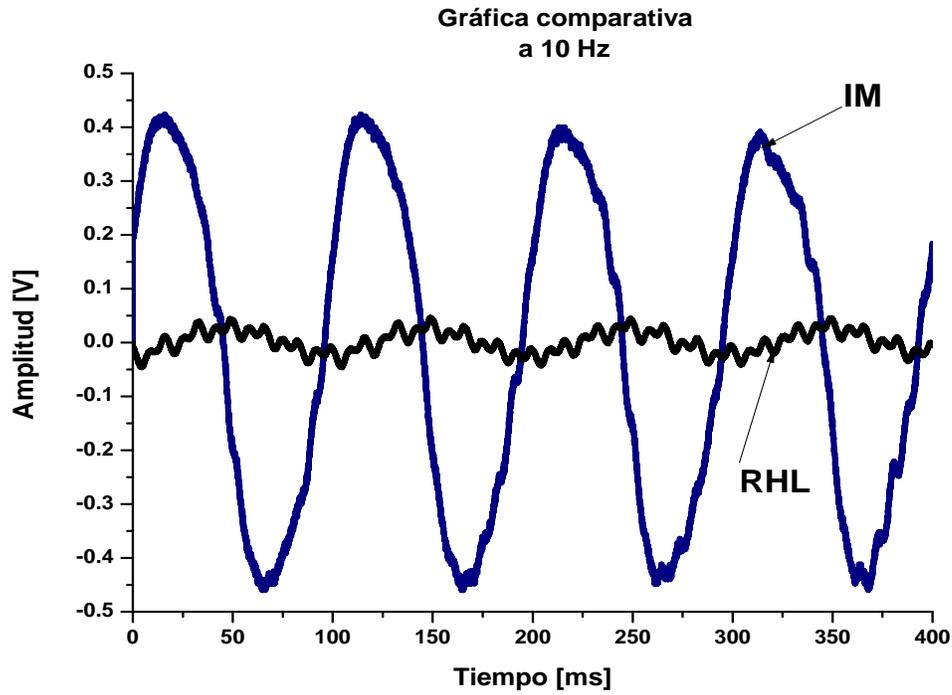


Figura 4.10. Gráfica comparativa de ambos sistemas a 10 Hz en el PZT.

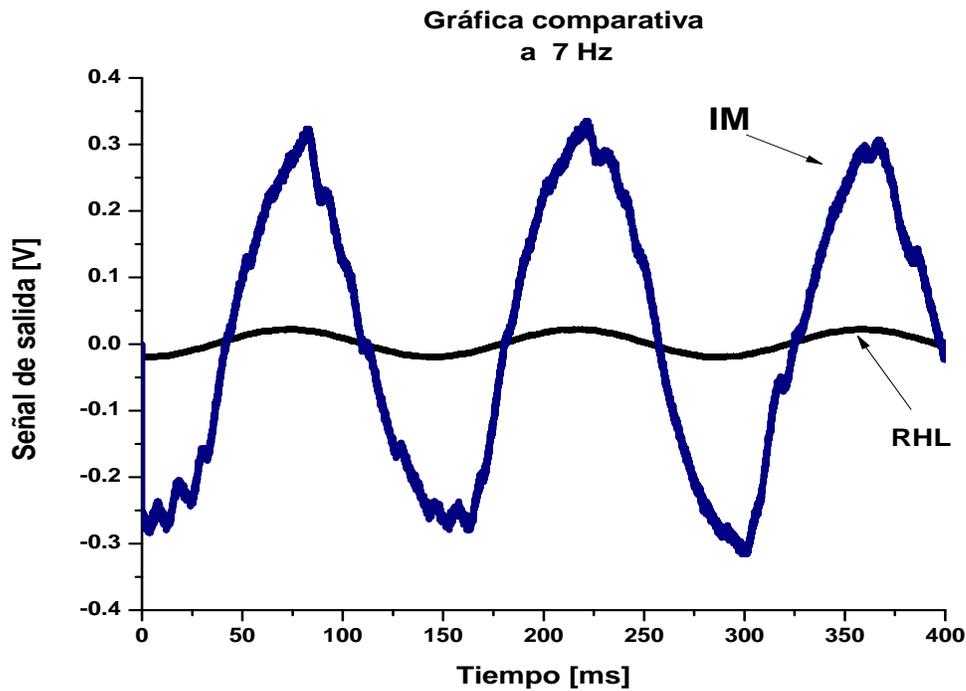


Figura 4.11. Gráfica comparativa de ambos sistemas a 7 Hz en el PZT.

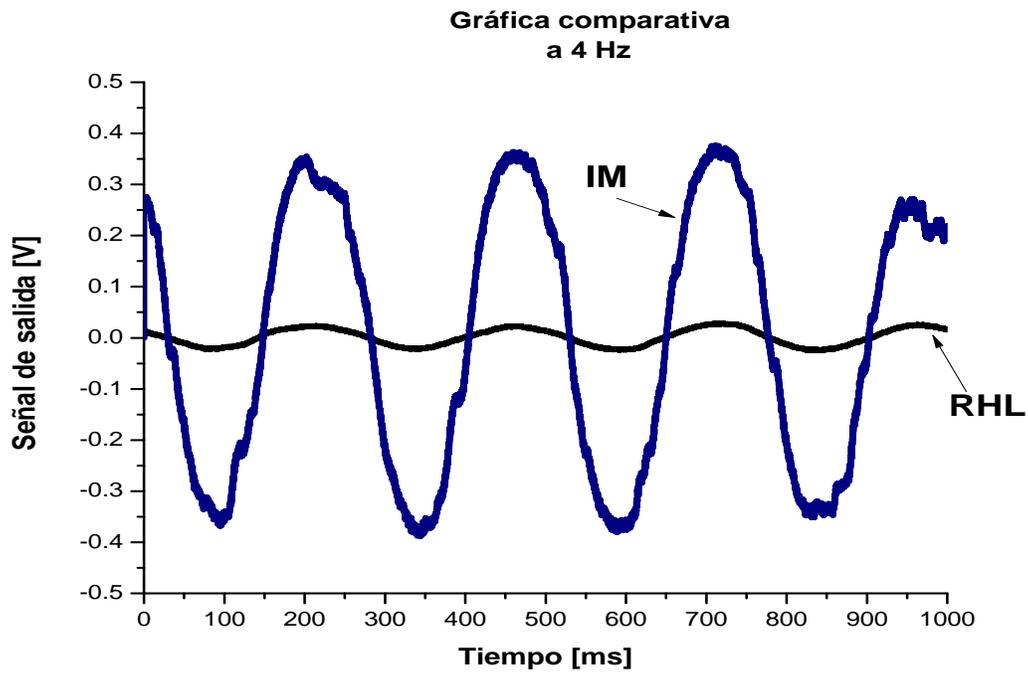


Figura 4.12. Gráfica comparativa de ambos sistemas a 4 Hz en el PZT.

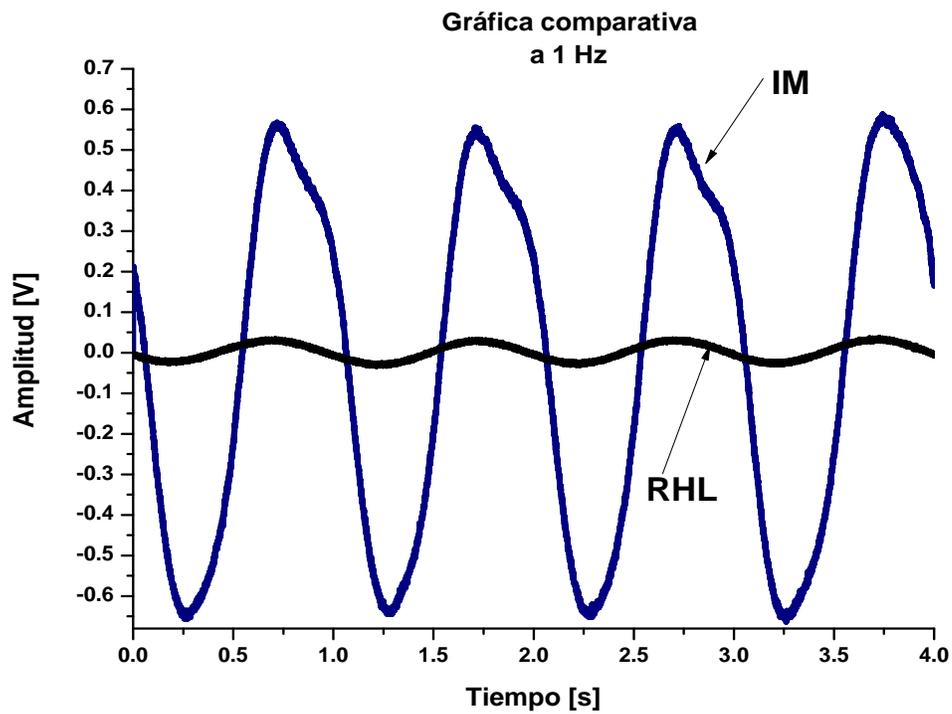


Figura 4.13. Gráfica comparativa de ambos sistemas a 1 Hz en el PZT.

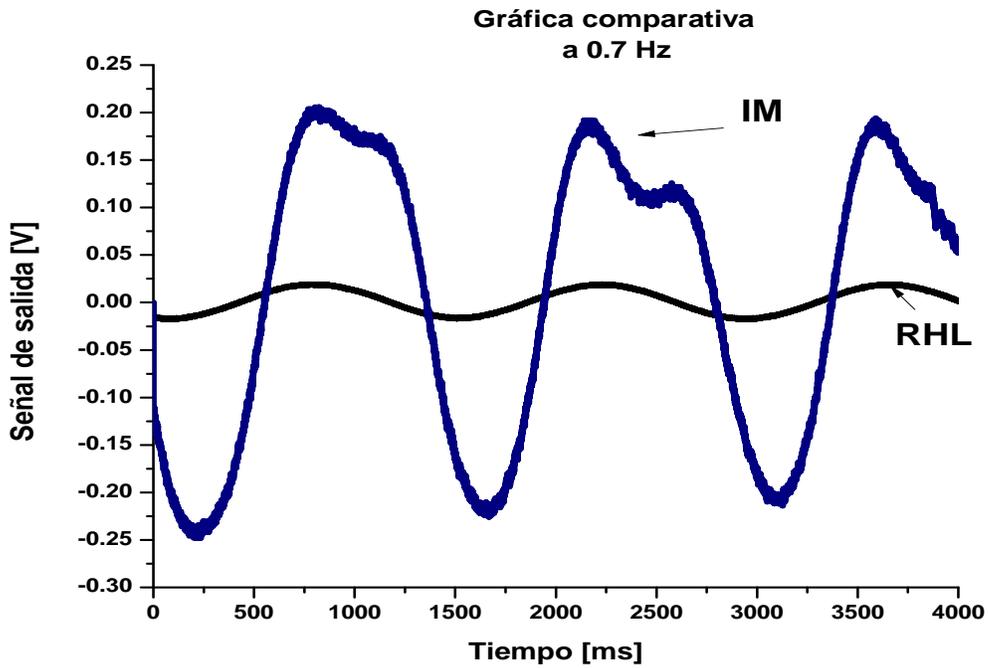


Figura 4.14. Gráfica comparativa de ambos sistemas a 0.7 Hz en el PZT.

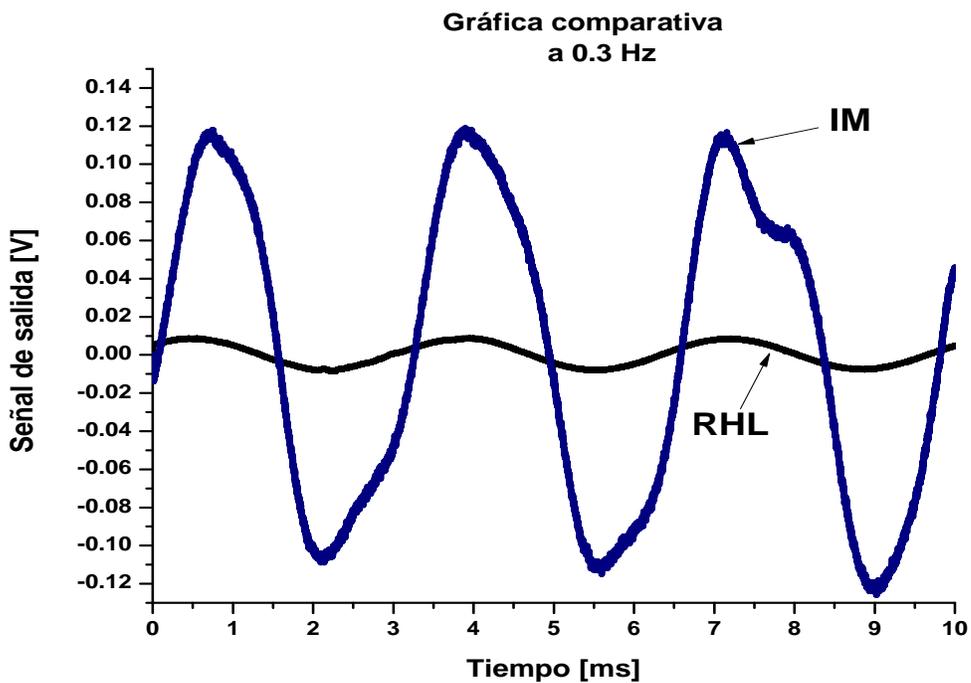


Figura 4.15. Gráfica comparativa de ambos sistemas a 0.3 Hz en el PZT.

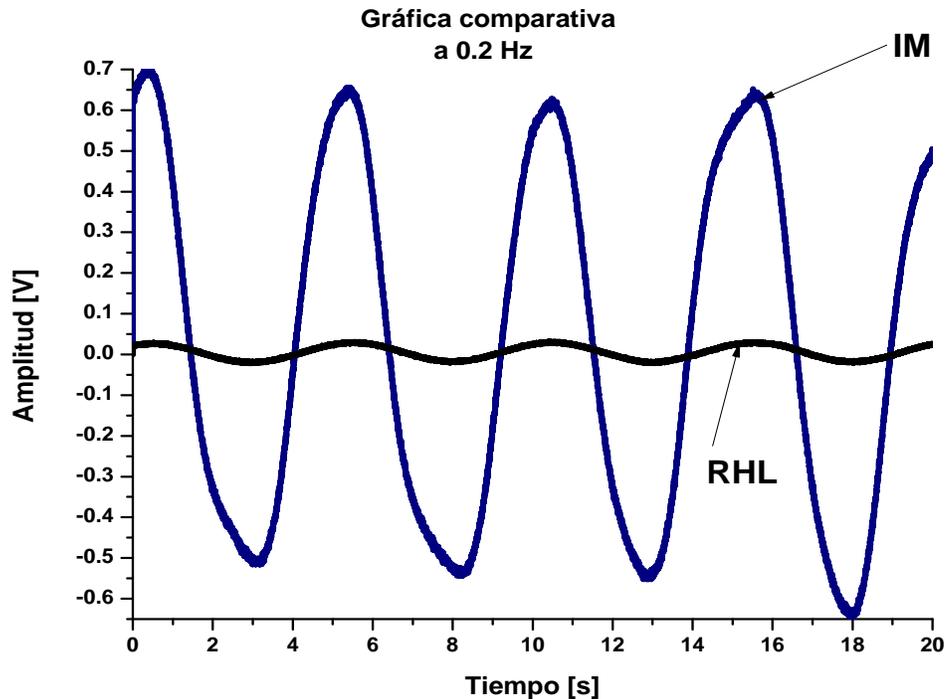


Figura 4.16. Gráfica comparativa de ambos sistemas a 0.2 Hz en el PZT.

Para las gráficas obtenidas en las figuras 4.10 a la 4.16 se puede observar claramente el comportamiento de ambos sistemas (IM y RHL), en donde podemos ver que para todas las señales de salida en todas las gráficas, los resultados más favorables son para el IM, ya que en todos los casos se tiene una forma de onda senoidal con una mayor amplitud y menor ruido en comparación con las señales del dispositivo de RHL, ya que en éstas la mayoría de las ondas tienen un forma de onda senoidal con una amplitud menor y en algunos casos con algo de ruido.



De la misma manera que se realizó el análisis para la comparación de los resultados anteriores en los experimentos #1 y #3, se procede para realizar el análisis de la relación señal a ruido con los resultados obtenidos en la comparación de los experimentos #2 y #4, estos se muestran en la siguiente tabla:

Voltaje cte= 0.5 Vpp	Promedio		Promedio de ruido= 22 [mV]	
	Señal de salida [mV] IM	Señal de salida [mV] RHL	Relación señal a ruido $S/N=(V_s/V_N)^2$	
			IM	RHL
10 Hz en PZT	884	93.2	1614.578512	17.94677686
7 Hz en PZT	652	42.75	878.3140496	3.775955579
4 Hz en PZT	760	53.5	1193.38843	5.913739669
1 Hz en PZT	1252	68.4	3238.644628	9.666446281
0.7 Hz en PZT	454	36.75	425.8595041	2.790418388
0.3 Hz en PZT	245	40.825	124.018595	3.44355501
0.2 Hz en PZT	1352	54.6	3776.661157	6.159421488

Tabla 4.17. Resultados experimentos #2 y #4.



En la tabla 4.17, podemos observar que, para los siete casos en donde la frecuencia fue cambiando en el PZT, la relación S/N para el IM es mayor en comparación con la del dispositivo de RHL, ya que para todos los casos en ambos experimentos, la señal de salida para cada implementación del IM y dispositivo de RHL se mantuvieron en condiciones muy similares, puesto que en todas, la forma de onda senoidal se mantiene de manera clara, pero la diferencia es que en el IM la amplitud de todas las señal es mayor en comparación al del dispositivo de RHL, por lo cual la relación S/N es favorecida claramente para el IM.

### **Conclusiones generales.**

Observando las gráficas comparativas de los resultados anteriores, se podría decir a simple vista que el dispositivo de RHL, es el que nos da unos resultados menos favorables, ya que en gran parte de las gráficas presentadas, la forma de la señal se mantiene senoidal, pero con una amplitud muy pequeña y con un poco más de ruido.

Por otra parte podemos decir que el Interferómetro de Michelson es el que mejor resultados obtuvo, ya que en la mayoría de las gráficas comparativas en todos los experimentos es el que tiene mejor forma en la señal, con una amplitud mayor y una relación señal a ruido muy favorable para todos los casos en la tabla 4.17 y también para la gran mayoría de los resultados mostrados en la tabla 4.9



Lo anterior nos indicaría que el mejor sistema para realizar estas mediciones es el del Interferómetro de Michelson, pero en realidad lo que pasa con este sistema es que es extremadamente sensible, por eso es que la forma de la señal y su amplitud es mayor, pero como lo había comentado en la gráfica de la figura 3.25, es muy susceptible al ruido que está en nuestro entorno, por lo que fue un tanto difícil hacer estas mediciones ya que tenía que esperar a que hubiera el menor ruido posible en mi entorno.

En cambio para el dispositivo de Reflexión del Haz Laser, se podría decir que es el menos adecuado para realizar estas mediciones, pero su implementación es muy sencilla de realizar, en la mayoría de los resultados obtenidos la forma de la onda siempre se mantuvo senoidal, pero con una amplitud menor al IM, con ruido también pero este ruido era causado por el mismo sistema, ya que este dispositivo requiere menores condiciones de aislamiento en comparación al IM, se pueden utilizar algunas técnicas de filtrado y amplificación distintas, ya que en los experimentos realizados tanto para el IM y el dispositivo de RHL, se mantuvieron las mismas condiciones de trabajo, amplificación y filtrado en especial, para poder tener una comparación más efectiva.

Por lo tanto para poder utilizar adecuadamente el IM y realizar este tipo de mediciones, es necesario tener muy buenas condiciones de aislamiento para no tener interferencias en nuestra señal, ya que es extremadamente sensible de acuerdo con los resultados obtenidos de las tablas 4.9 y 4.17.

Lo que corresponde para el dispositivo de RHL, según los resultados obtenidos de igual manera en las tablas 4.9 y 4.17, nos indica que se obtiene una menor sensibilidad, pero por lo mismo no necesita tantas condiciones de aislamiento, de tal manera que es más difícil que se pueda introducir ruido en nuestra señal.



## *Bibliografía.*

- [1] Young-Freedman-Sears-Zemansky, “*Física universitaria con física moderna volumen 2*”, 12ª Edición, Cap. 33 Naturaleza y propagación de la luz, 2009, Pp.112.
- [2] Andréi Vandímovich Shepeliov, “*Lo que no se puede olvidar ÓPTICA*”, Cap. 2 Ondas, 2003, Pp. 25,26.
- [3] Tipler Mosca, “*Física para la ciencia y la tecnología*”, 5ª Edición, Volumen 2B Luz, Cap. 31 Propiedades de la luz, 2005. Pp.939.
- [4] FRED W. BILLMEYER.JR., “*Ciencia de los polímeros*” Primera edición, Cap. 3 Medida del peso y tamaño molecular, 1975, Pp.76.
- [5] Tipler Mosca, “*Física para la ciencia y la tecnología*”, 5ª Edición, Volumen 2B Luz, Cap. 31 Propiedades de la luz, 2005, Pp.940.”
- [6] Marcelo Rodríguez Danta, Antonio González Fernández, Consuelo Bellver Cebreros, “*Campos Electromagnéticos*” 2ª Edición, Cap. 11 Ecuaciones de Maxwell, 1999, Pp. 483-485.
- [7] Fernando Finestres Zubeldia, “*Protección en radiología odontológica*”, Cap. 1 Naturaleza de los rayos X, 2005, Pp.2.
- [8] Douglas A. Skoog, F. James Holler, Stanley R. Crouch, “*Principios de análisis instrumental*” Sexta edición, Cap. 6, Introducción a los métodos espectrométricos, 2008, Pp.136, 137.
- [9] William D. Callister,Jr. “*Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*” Volumen 2, Cap. 19 Propiedades eléctricas, 1996, Pp.657.



- [10] Edgar González, *“El láser principios básicos”* Cap. 2, El láser, 2003 Pp. 35, 41, 42.
- [11] Daniel Malacara, *“Óptica básica”* Cap. 4, Prismas, espejos planos y dispersión cromática, 2004, Pp. 86.
- [12] María Carmen España Boquera, *“Comunicaciones ópticas. Conceptos esenciales y resolución de ejercicios”* Cap. 3, Fotodetectores y receptores para comunicaciones ópticas, 2005, Pp. 142, 143.
- [13] S. Burbano de Ercilla, E. Burbano García, C. García Muñoz, *“Física general”* 32ª Edición, Cap. 17 Ondas, 2003, Pp.374.
- [14] Serway Jewet, *“Física II”* Tercera edición, Cap.7, Reflexión y refracción de la luz, 2004, Pp. 274.
- [15] Eugen Hecht *“Óptica”*, Tercera edición, Cap. 9 Interferencia, 2000, Pp. 411.
- [16] José Rodríguez García, José M. Virgos Rovira *“Fundamentos de óptica ondulatoria”*, Cap. 9 Interferencia (II): con ondas múltiples, 1998, Pp. 198,199.
- [17] G. E. Sandoval – Romero V.A. Nikolaev, *“Límite de detección de un giroscopio de fibra óptica usando una fuente de radiación superluminiscente”* Revista Mexicana de Física, 49 (2), Pp.155-165; (2003).
- [18] Eugen Hecht *“Óptica”*, Tercera edición, Cap. 9 Interferencia, 2000, Pp. 408, 409.
- [19] William Bolton, *“Medición y pruebas eléctricas y electrónicas”*, Cap. 3 Fuentes de error, 1995, Pp. 50.