



SISTEMA ÓPTICO PARA LA SUPERVISIÓN DE LA OPERACIÓN DE  
UN MOTOR DE INDUCCIÓN

Por

*Ing. Victor Manuel Villanueva Reyes*

COMO REQUISITO PARCIAL PARA  
OBTENER EL GRADO DE  
*MAESTRO EN OPTOMECASTRÓNICA*

DIVISIÓN DE FOTÓNICA,  
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ÓPTICA, A.C.  
LEÓN, GUANAJUATO, MÉXICO.

2012

**Supervisor:** Dr. Raúl Alfonso Vázquez Nava

**Sinodales:** Dr. Ascención Guerrero (CIO)  
Dr. David Moreno Hernández (CIO)



# Contenido

<b>Contenido</b>	<b>v</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>vii</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>xii</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes . . . . .	1
1.2. Panorama de la tesis . . . . .	10
<b>2. Teoría</b>	<b>13</b>
2.1. Motores de Inducción . . . . .	13
2.1.1. Clasificación . . . . .	13
2.1.2. Funcionamiento . . . . .	15
2.1.3. Fallas características . . . . .	17
2.2. Interferometría . . . . .	21
2.2.1. Interferómetro de Michelson . . . . .	24
2.2.2. Interferómetro de Mach-Zehnder . . . . .	26
2.2.3. Interferómetro Cíclico . . . . .	27
2.3. Fundamentos de medición de vibraciones . . . . .	28
2.3.1. Análisis de vibraciones . . . . .	32
2.4. Efecto Doppler . . . . .	37
2.5. Movimiento Armónico de un objeto . . . . .	40
2.6. Análisis Temporal y de Fourier de la Interferometría en el vibrómetro . . . . .	40
2.6.1. Análisis Temporal para el vibrómetro . . . . .	40
2.6.2. Análisis de Fourier para el vibrómetro . . . . .	42
<b>3. Desarrollo</b>	<b>45</b>
3.1. Arreglo experimental del vibrómetro láser . . . . .	46
3.1.1. Arreglo Óptico . . . . .	46
3.1.2. Adquisición y Procesamiento de señales . . . . .	50

3.1.3. Montaje del vibrómetro láser . . . . .	52
<b>4. Resultados</b>	<b>53</b>
4.1. Interferómetro Michelson . . . . .	53
4.2. Interferómetro Mach-Zehnder . . . . .	53
4.3. Interferómetro Cíclico . . . . .	57
<b>5. Conclusiones</b>	<b>77</b>
5.1. Trabajo a futuro . . . . .	78
<b>Referencias</b>	<b>79</b>
<b>A. PLAN DE NEGOCIOS</b>	<b>81</b>

# Índice de figuras

1.1. Mantenimiento predictivo vs Mantenimiento preventivo. . . . .	3
1.2. Diagrama de flujo de un "sistema experto", basado en normas. . . . .	4
1.3. Esquema elemental para un acelerómetro unidireccional. . . . .	5
1.4. Esquema elemental para un transductor de velocidad. . . . .	6
1.5. Configuración interna de un LVDT. . . . .	7
1.6. Inductancia (corrientes Eddy) sistema de detección sin contacto. . . . .	8
2.1. Rotor jaula de ardilla [3]. . . . .	14
2.2. Rotor devanado [3]. . . . .	14
2.3. Desarrollo de un par inducido en un motor de inducción. . . . .	15
2.4. Dimensiones de las bolas en un cojinete [12]. . . . .	20
2.5. Interferómetro de Michelson [6]. . . . .	25
2.6. Interferómetro de Michelson [6]. . . . .	26
2.7. Interferómetro de Mach-Zehnder [6]. . . . .	27
2.8. Interferómetro Cíclico. . . . .	28
2.9. Función armónica [8]. . . . .	30
2.10. Vibración en el dominio de la frecuencia [8]. . . . .	33
2.11. Diagrama de cascada típico del oil whirl [7]. . . . .	34
2.12. Diagrama de Bodé de una turbina de gas [7]. . . . .	35
2.13. Diagrama de Nyquist de una turbina de gas [7]. . . . .	36
2.14. Análisis de base en el tiempo. . . . .	36
2.15. Efecto Doppler. . . . .	38
2.16. Propagación de la luz láser sobre un punto en movimiento. . . . .	39

3.1. Motores monofásicos de 4 polos, 1800 rpm. . . . .	45
3.2. Arreglo y configuración del Interferómetro Michelson. . . . .	46
3.3. Arreglo y configuración del Interferómetro Mach-Zehnder. . . . .	47
3.4. Arreglo y configuración del Interferómetro Cíclico. . . . .	48
3.5. Fuentes de luz láser. . . . .	48
3.6. Espejo de medición montado en una bocina para pruebas. . . . .	49
3.7. Espejo de referencia. . . . .	49
3.8. Divisor de haz de cubo (2 pulgadas, no polarizado). . . . .	50
3.9. Fotodetector. . . . .	50
3.10. Adquisición y procesamiento de señales. . . . .	51
3.11. Bocina de prueba. . . . .	52
3.12. Mesa Óptica. . . . .	52
4.1. Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Mach-Zehnder para una frecuencia de 60.24 hz en la bocina utilizando un láser He-Ne. . . . .	54
4.2. Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Mach-Zehnder para una frecuencia de 170.48 Hz en la bocina utilizando un láser He-Ne. . . . .	55
4.3. Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Mach-Zehnder para una frecuencia de 314 Hz en la bocina utilizando un láser He-Ne. . . . .	55
4.4. Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Mach-Zehnder para una frecuencia de 950 Hz en la bocina utilizando un láser He-Ne. . . . .	56
4.5. Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Mach-Zehnder para una frecuencia de 1502 Hz en la bocina utilizando un láser He-Ne. . . . .	56
4.6. Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico sin alimentación a la bocina, con la luz encendida y utilizando un láser He-Ne. . . . .	57
4.7. Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico sin alimentación a la bocina, con la luz apagada y utilizando un láser He-Ne. . . . .	58
4.8. Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico sin alimentación a la bocina, con el medidor de potencia apagado y utilizando un láser He-Ne. . . . .	59
4.9. Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico para una frecuencia de 100 Hz en la bocina utilizando un láser He-Ne. . . . .	60

4.10. Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico para una frecuencia de 320 Hz en la bocina utilizando un láser He-Ne. . . . .	60
4.11. Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico para una frecuencia de 900 Hz en la bocina utilizando un láser He-Ne. . . . .	61
4.12. Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico para una frecuencia de 1665 Hz en la bocina utilizando un láser He-Ne. . . . .	61
4.13. Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico para una frecuencia de 2380 Hz en la bocina utilizando un láser He-Ne. . . . .	62
4.14. Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico para una frecuencia de 32 Hz en la bocina utilizando un apuntador láser. . . . .	62
4.15. Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico para una frecuencia de 100 Hz en la bocina utilizando un apuntador láser. . . . .	63
4.16. Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico para una frecuencia de 315 Hz en la bocina utilizando un apuntador láser. . . . .	63
4.17. Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico para una frecuencia de 1000 Hz en la bocina utilizando un apuntador láser. . . . .	64
4.18. Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico para una frecuencia de 1700 Hz en la bocina utilizando un apuntador láser. . . . .	64
4.19. Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico para una frecuencia de 2360 Hz en la bocina utilizando un apuntador láser. . . . .	65
4.20. Montaje del motor reductor. . . . .	66
4.21. FFT de la señal obtenida con el interferómetro Cíclico para el motor reductor a una velocidad de 18.3 rpm. . . . .	67
4.22. FFT de la señal obtenida con el interferómetro Cíclico para el motor reductor a una velocidad de 45.8 rpm. . . . .	67
4.23. FFT de la señal obtenida con el interferómetro Cíclico para el motor reductor a una velocidad de 87 rpm. . . . .	68
4.24. FFT de la señal obtenida con el interferómetro Cíclico para el motor reductor a una velocidad de 70 rpm. . . . .	68
4.25. Interferómetro Cíclico para analizar el motor de una máquina de coser ropa. . . . .	69



4.26. Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico para el motor de coser a una velocidad de 2640 rpm. . . . .	70
4.27. Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico para el motor de coser a una velocidad de 4140 rpm. . . . .	70
4.28. Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico para el motor de coser a una velocidad de 7080 rpm. . . . .	71
4.29. Espejo de medición colocado en uno de los motores de inducción. . . . .	72
4.30. Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico para el motor de inducción <b>verde</b> sin carga y con una velocidad de 1800 rpm, con el espejo colocado en la parte <b>lateral</b> del motor. . . . .	72
4.31. Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico para el motor de inducción <b>verde</b> sin carga y con una velocidad de 1800 rpm, con el espejo colocado en la parte <b>frontal</b> del motor. . . . .	73
4.32. Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico para el motor de inducción <b>naranja</b> sin carga y con una velocidad de 1400 rpm, con el espejo colocado en la parte <b>lateral</b> del motor. . . . .	74
4.33. Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico para el motor de inducción <b>naranja</b> sin carga y con una velocidad de 1400 rpm, con el espejo colocado en la parte <b>frontal</b> del motor. . . . .	74
4.34. Cople para desbalancear el motor. . . . .	75
4.35. Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico para el motor de inducción <b>verde</b> desbalanceado. . . . .	75
4.36. Dibujo en isométrico del Dispositivo Óptico. . . . .	76
4.37. Vista del interior del Dispositivo Óptico. . . . .	76
A.1. Organigrama. . . . .	85
A.2. Descripción del negocio. . . . .	91

## Resumen

En esta tesis se muestra el diseño y la construcción de un vibrómetro láser con una configuración básica, este sistema óptico se implementó para la supervisión de la operación de un motor de inducción, basado en el análisis del espectro de frecuencias de vibración de dicho motor; se hizo la prueba con tres interferómetros diferentes: el Michelson, el Mach-Zehnder y el Cíclico. Estos interferómetros se utilizaron para la medición de la frecuencia de las vibraciones de una bocina que caracterizaba al motor de inducción cuando se excita con una señal eléctrica senoidal y a diferentes frecuencias. El interferómetro que se utilizó para el análisis del espectro de frecuencias en los motores fue el Cíclico por ser el más estable a las vibraciones mecánicas externas.

Realizamos pruebas con diferentes láseres y pudimos armar un interferómetro Cíclico utilizando un apuntador, por lo cual podría implementarse un sistema muy económico.

El sistema está conformado por dos etapas principales: la óptica y la de procesamiento de señales.

La etapa óptica consiste en el armado del interferómetro el cual está conformado por una fuente de luz láser, espejos (referencia y medición), divisores de haz de cubo (50 - 50) y también por un fotodetector en el cual llega la interferencia de los dos haces y que llevan la información temporal de las oscilaciones del objeto en cuestión que en nuestro caso son la bocina y los motores; el fotodetector transforma la señal óptica a una señal eléctrica la cual está en función de la intensidad de la luz que incide sobre él.

La etapa de procesamiento de las señales ocurre cuando se manda la señal eléctrica con la información de las oscilaciones a una tarjeta de adquisición de datos, y de ahí a un software que en nuestro caso fue el Labview, y obtener mediante la transformada rápida de Fourier el espectro de las frecuencias de vibración. Cabe hacer mención que todo este procesamiento se hace en tiempo real y además el programa permite almacenar la información para un posterior análisis de los datos obtenidos.



# AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas aquellas personas e instituciones que directa e indirectamente hicieron posible este proyecto cada una contribuyó con un granito de arena, gracias por todo su apoyo.

Agradezco a mi familia y a mi novia por su apoyo y comprensión, especialmente a mis padres que con su esfuerzo al no tener estudios lucharon para que yo tuviera la oportunidad de concluir esta etapa de mi vida profesional.

Agradezco a mis amigos y amigas el apoyo, el cariño y la confianza que me han sabido obsequiar y que han contribuido en mi vida y que me han dejado muchas enseñanzas, y espero seguir contando con cada uno o una de ustedes.

Agradezco a mis amigos y compañeros de generación por haberme soportado y haber convivido por más de dos años, de trabajar en equipo para lograr nuestros objetivos, gracias por todo su apoyo. Agradezco a mis profesores que me brindaron una pequeña parte de sus conocimientos.

Agradezco a aquellas personas que me brindaron su apoyo en asesorías como el Ing. Julio César Sánchez Roldán. A aquellas personas que me apoyaron con el préstamo de equipo a los encargados de los laboratorios de Electrónica y de Posgrado, sin su apoyo no habría sido posible realizar este proyecto. Muchas gracias.

Agradezco especialmente a mi asesor el Dr. Raúl Vázquez Nava, por todo su apoyo, comprensión, paciencia, y que con su aportación fue posible la realización de este proyecto.

Agrezco al Centro de Investigaciones en óptica y a CONACYT, por darme la oportunidad de continuar con mis estudios y aportes a la ciencia.

Y por último gracias a Dios por darme tantas bendiciones, que se ven reflejadas en cada una de las personas que están a mi alrededor.

# **1** Introducción

## **1.1. Antecedentes**

### **Vibración**

Se denomina vibración a la propagación de ondas elásticas produciendo deformaciones y tensiones sobre un medio continuo (o posición de equilibrio). En las vibraciones hay intercambio entre energía cinética y energía potencial elástica.

En las máquinas o herramientas, este intercambio de energía puede ser producido por:

- Desequilibrio en máquinas rotatorias.
- Entrada de energía acústica.
- Circulación de fluidos o masas.
- Energía electromagnética.

Independientemente de cuál sea la causa que origine la vibración, la reducción de ésta es necesaria debido a diversas razones entre las cuales se tienen las siguientes:

- La excesiva vibración puede limitar la velocidad de procesamiento.
- La vibración es responsable de tener baja calidad de los productos elaborados por máquinas – herramientas.
- La vibración en máquinas puede generar mucho ruido, y ésta es una forma de contaminación.

- La vibración puede afectar a instrumentos de gran precisión, y generar datos pocos confiables.

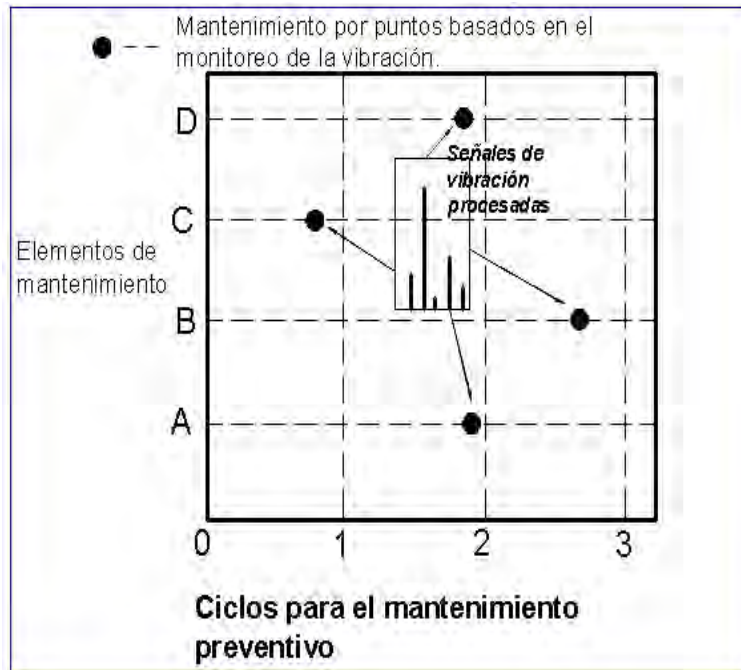
Es importante medir la vibración, ya que permite el desarrollo de técnicas para reducirla. Aproximadamente el 50 % de las averías en máquinas rotativas se deben a desalineaciones en los ejes. Las máquinas mal alineadas generan cargas y vibraciones adicionales, causando daños prematuros en rodamientos, obturaciones y acoplamientos, también aumenta el consumo de energía. Gracias a los avances de la electrónica, actualmente se tienen instrumentos de medición altamente sofisticados que permiten cuantificar la vibración de manera precisa, a través de diversos principios. Es por esto que es muy importante, un buen entendimiento de los transductores o sensores empleados para la medición de la vibración, y su interfaz con los sofisticados equipos de instrumentación y de adquisición de datos.

El monitoreo de la vibración tiene su origen a mediados de los años 50's con el desarrollo y la aplicación de sensores básicos para medir la vibración los cuáles son la base de los sistemas de monitoreo computarizado actuales. En años recientes ha habido un esfuerzo por monitorear la vibración de equipos o dispositivos con el fin de dar un mantenimiento predictivo, el cuál es una extensión y/o un reemplazo del mantenimiento preventivo.

Como se muestra en la figura 1.1 uno de los propósitos del mantenimiento predictivo, es que a cada equipo de un grupo de máquinas determinado se le ejecuten acciones específicas de mantenimiento basadas en el monitoreo de la vibración de la máquina en lugar de un ciclo de mantenimiento a un tiempo fijo.

La transformada rápida de Fourier (FFT de sus siglas en inglés), es un algoritmo que fue desarrollado a mediados de los 60's y ha llegado ser una herramienta importante para el análisis de señales. Se le considera el mayor avance moderno en el análisis de señales de vibración en máquinas rotativas como lo son los motores de inducción. La búsqueda de los ingenieros para la creación de nuevos procedimientos de mantenimiento se ha visto beneficiada por el éxito de la FFT, el cual a llevado a la reducción en el mantenimiento y en el personal de soporte.

La figura 1.2 muestra el diagrama de flujo de un *sistema experto* el cuál consiste en un software y una base de datos. La base de datos está integrada por dos bloques, el bloque de los parámetros



**Figura 1.1:** Mantenimiento predictivo vs Mantenimiento preventivo.

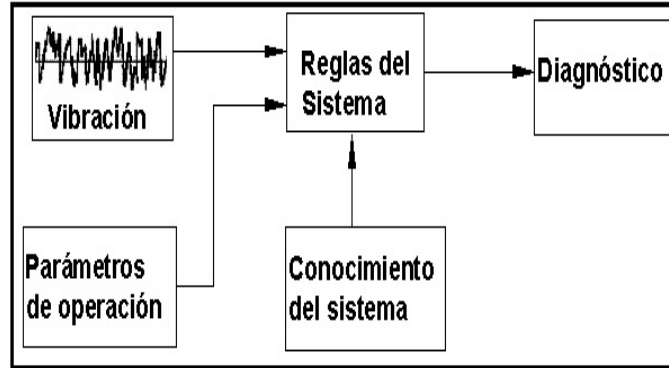
normales de operación del sistema y el bloque de conocimiento del sistema. Como puede verse en el diagrama la lectura de la vibración de la máquina se alimenta al sistema experto y en base a un conjunto de normas o reglas, entrega un diagnóstico del estado de funcionamiento de cada parte del sistema [2].

El campo moderno de control del estado de maquinaria rotativa tiene actualmente más de 40 años en su desarrollo y por lo tanto es realmente un tema técnico ya maduro. Sin embargo, se requiere más desarrollo y avance y dar respuesta a las nuevas exigencias para reducir aún más el tiempo de inactividad de maquinaria y reducir drásticamente los costos de mantenimiento. Es por ello que el mantenimiento predictivo basado en las vibraciones es actualmente un área de oportunidad y desarrollo.

#### *Transductores convencionales para la medición de vibración*

Los transductores empleados en el análisis de vibración, convierten la energía mecánica en energía eléctrica, lo que significa que producen una señal eléctrica la cual esta en función de la





**Figura 1.2:** Diagrama de flujo de un "sistema experto", basado en normas.

vibración. Las señales para medir la vibración comúnmente empleadas son el desplazamiento, la velocidad y la aceleración. A continuación damos una breve descripción de diferentes transductores.

### Acelerómetros

Los acelerómetros son dispositivos para medir aceleración y vibración. Estos dispositivos convierten la aceleración producida por la gravedad o de el movimiento, en una señal eléctrica analógica proporcional a la fuerza aplicada al sistema, o mecanismo sometido a vibración o aceleración. En la figura 1.3 se muestra un esquema elemental de un acelerómetro. La señal analógica indica en tiempo real, la aceleración instantánea del objeto sobre el cual el acelerómetro está montado.

Los acelerómetros miden la aceleración en unidades "g". Un g se define como la fuerza gravitacional de la tierra aplicada sobre un objeto o persona. Los acelerómetros son direccionales, esto quiere decir que sólo miden aceleración en un eje. Para monitorear aceleración en tres dimensiones, se emplea acelerómetros multi-ejes (ejes x,y,z), los cuales son ortogonales. Existen dos tipos de acelerómetros a saber: *pasivos* y *activos*.

Los acelerómetros *pasivos* envían la carga generada por el elemento sensor (puede ser un material piezoeléctrico), y debido a que esta señal es muy pequeña, estos acelerómetros requieren de un amplificador para incrementar la señal. Los acelerómetros *activos* incluyen circuitos internos para convertir la carga del acelerómetro a una señal de voltaje, pero requieren de una fuente constante de corriente para alimentar el circuito.

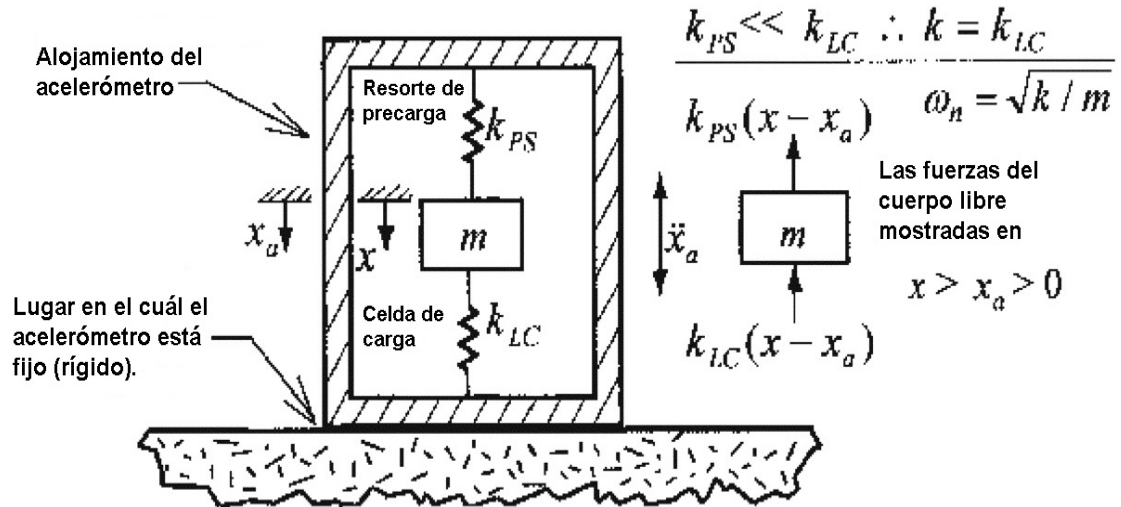


Figura 1.3: Esquema elemental para un acelerómetro unidireccional.

#### *Acelerómetros piezoeléctricos*

Este tipo de acelerómetros aprovechan los fenómenos piezoeléctricos en algunos materiales, para generar una señal eléctrica proporcional, a la aceleración de la vibración a la que son sometidos. El elemento activo del acelerómetro es un cristal piezoeléctrico pegado a una masa conocida. Un lado del cristal está conectado a un poste rígido en la base del sensor. En el otro lado se encuentra adjunto un material llamado masa sísmica. Cuando el acelerómetro se encuentra sometido a vibración, se genera una fuerza, la cual actúa sobre el elemento piezoeléctrico. Esta fuerza es igual al producto de la aceleración por la masa sísmica. Debido al efecto piezoeléctrico, se genera una salida de carga proporcional a la fuerza aplicada. Puesto que la masa sísmica es constante, la señal de salida de carga es proporcional a la aceleración de la masa. Sobre un amplio rango de frecuencia tanto la base del sensor como la masa sísmica tienen la misma magnitud de aceleración, allí el sensor mide la aceleración del objeto bajo prueba.

Existen diversos materiales de cristales piezoeléctricos, que son útiles en la construcción de acelerómetros. Entre los materiales más comunes se tiene Metaniobato cerámico, Zirconato, Titanato y cristales naturales de cuarzo. Existen también, diferentes configuraciones mecánicas de las masas y cristales dentro de la carcasa del acelerómetro.

Los acelerómetros piezoeléctricos son extremadamente versátiles y ampliamente usados para

la supervisión de maquinarias industriales. Los acelerómetros industriales típicos miden niveles de vibración en micro-g's desde 60 rpm hasta unos 900,000 rpm (1 a 15000 Hz).

### Transductores de Velocidad

El transductor de velocidad está constituido por una masa (imán permanente) y suspendido en resortes muy suaves y rodeado por un campo eléctrico generado por una bobina estacionaria como se muestra en la figura 1.4. Sus resortes son configurados para producir una muy baja frecuencia natural de modo que el imán permanente en esencia permanece inmóvil a frecuencias superiores a 10 Hz.

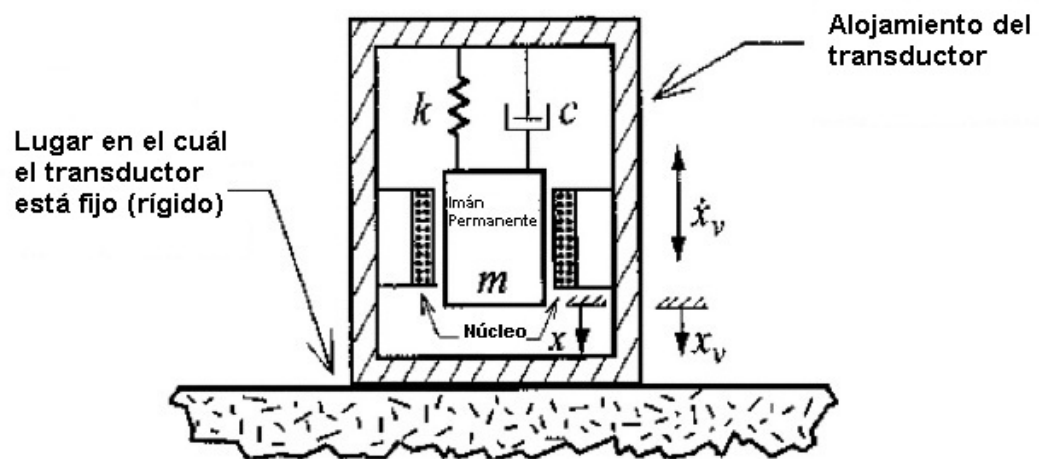


Figura 1.4: Esquema elemental para un transductor de velocidad.

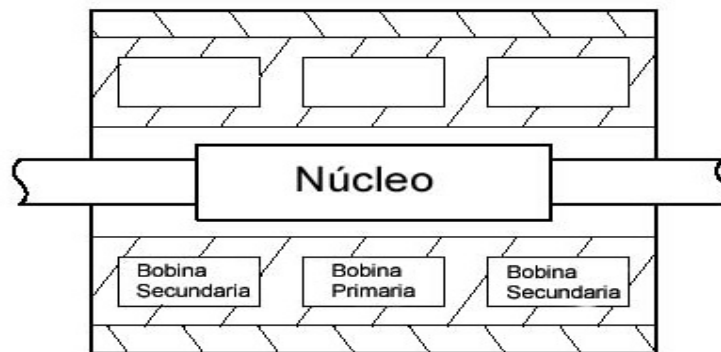
Con el imán esencialmente estacionario el transductor trabaja en un rango de frecuencias (típicamente de 10 a 1500 Hz), las vibraciones de la bobina eléctrica rígidamente fija en la carcasa provoca que las líneas de flujo magnético induzcan un voltaje en la bobina proporcional a la velocidad de la vibración de la carcasa.

Los transductores de Piezo-Velocidad (PVT) funcionan de manera similar a los acelerómetros piezoeléctricos, pero están diseñados para trabajar en sistemas de baja velocidad, en el rango aproximado de 90 a 3600 rpm. El PVT incluye un convertidor de velocidad y emplea un elemento sensor piezocerámico y una masa sísmica densa para producir una carga de salida proporcional a

la aceleración.

### Transformador Diferencial de Desplazamiento Lineal Variable

Los transformadores diferenciales de desplazamiento lineal variable, (*LVDT*, por sus siglas en inglés, *linear variable differential transformer*) son dispositivos electromecánicos que producen una salida eléctrica proporcional al desplazamiento de un núcleo movible separado. Éste consiste de una serie de inductores o bobinas incubadas dentro de un eje cilíndrico hueco y un núcleo cilíndrico. Los inductores internos se denominan bobina primaria y bobinas secundarias y se encuentran espaciadas simétricamente. Un núcleo magnético movible en forma de cilindro dentro del ensamble provee un camino para el flujo magnético dentro de los bobinados tal y como se muestra en la figura 1.5.



**Figura 1.5:** Configuración interna de un LVDT.

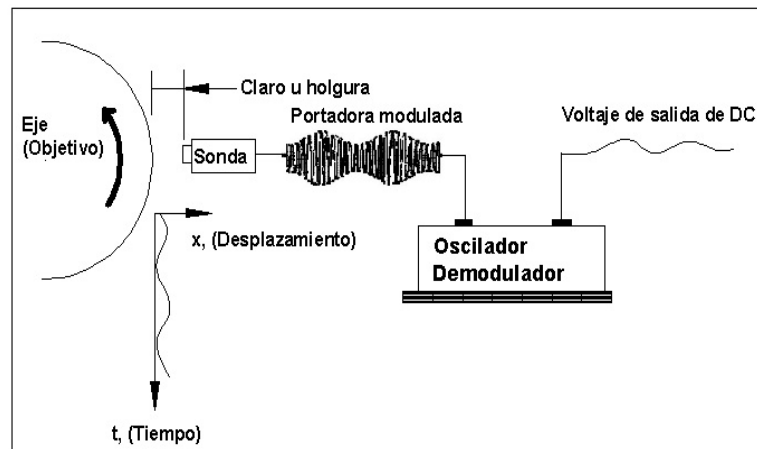
Cuando se energiza la bobina primaria, mediante una fuente externa AC, se inducen tensiones en las dos bobinas secundarias. Estas se encuentran conectadas inversamente, de manera que ambas tensiones tienen polaridad opuesta. Por consiguiente, la salida neta del transductor es la diferencia entre estas tensiones, la cual es cero cuando el núcleo está en el centro o en posición nula. Cuando se mueve el núcleo de su posición nula, la tensión inducida en la bobina hacia la cual se mueve el núcleo, se incrementa, mientras la tensión inducida en la bobina opuesta decrece. Esta acción produce una tensión de salida diferencial que varía linealmente con los cambios en la posición del núcleo. La fase de esta tensión de salida cambia abruptamente  $180^\circ$  a medida

que el núcleo se mueve de lado, de la posición nula a un extremo. (El núcleo debe estar siempre completamente dentro del ensamblado de las bobinas durante la operación del LVDT, de otra manera habrán problemas de no-linealidad.)

### Transductor de desplazamiento

*(Corriente Eddy)*

Los instrumentos de Corriente Eddy son dispositivos de desplazamiento sin contacto, que miden directamente la posición de un eje giratorio con respecto a un punto "fijo". El cambio en la posición de un eje provee una indicación directa de la vibración. La punta de la sonda contiene una bobina encapsulada, la cual cuando es excitada con una señal de alta frecuencia genera un campo electromagnético. A medida que el eje rota bajo condiciones de vibración, se alejará o acercará a la punta de la sonda interactuando por consiguiente, con el campo electromagnético. Se inducirá una corriente Eddy, cuya energía es proporcional a la interferencia del campo magnético tal y como se muestra en la figura 1.6. Por lo tanto, midiendo el valor de la corriente Eddy, se puede determinar la posición del eje y por consiguiente la vibración .



**Figura 1.6:** Inductancia (corrientes Eddy) sistema de detección sin contacto.

La clave para la gran aceptación de este tipo de transductor es que ha probado ser funcional en campos accidentados, por su simplicidad y confiabilidad de operación. La construcción de la sonda de prueba lo capacita para resistir altas temperaturas y ambientes hostiles, los cuales son muy típicos en instalaciones de maquinarias industriales.

Los componentes electrónicos asociados con la sonda de corriente Eddy, proveen la señal de excitación de alta frecuencia y una salida proporcional a la señal de corriente Eddy.

### **Transductor de desplazamiento tipo capacitivo**

Los transductores de posición o desplazamiento capacitivos son dispositivos analógicos sin contacto. Un sensor capacitivo de dos electrodos consiste de dos placas que forman parte de un puente capacitivo. Una placa (sonda) está fija, la otra placa (objetivo) está conectada al objeto a ser posicionado. Puesto que el tamaño de la placa y el medio dieléctrico (aire) no cambian, las capacitancia está directamente relacionada a la distancia entre las placas. En la práctica, se emplean sistemas electrónicos ultraprecisos para convertir la información de capacitancia en una señal proporcional a la distancia.

### **Vibrómetros Doppler Láser (LDV)**

El vibrómetro Láser Doppler es un dispositivo de medición que emplea la tecnología láser y la interferometría óptica para medir de forma remota, velocidades de superficie o vibraciones de puntos específicos en una estructura en vibración, con una alta resolución espacial, y un amplio rango de amplitud y frecuencias.

El principio de la Vibrometría Láser (LDV) se apoya en la detección de un cambio Doppler en la frecuencia de la luz coherente dispersada por un objetivo en movimiento, del cual se obtiene una medición resuelta en el tiempo de la velocidad del objetivo. Para ello, se proyecta un rayo láser sobre la superficie en vibración. El cambio en frecuencia de la luz recogida de vuelta desde la superficie, es una cantidad proporcional a la velocidad de la superficie (efecto Doppler). El instrumento mide este desplazamiento de frecuencia para producir una señal de velocidad instantánea la cual puede ser analizada subsecuentemente.

Un vibrómetro típico está formado por un sensor óptico interferométrico y una unidad electrónica de control. El controlador procesa la señal del sensor óptico y entrega un voltaje analógico proporcional a la velocidad o desplazamiento de un punto de la superficie.

## 1.2. Panorama de la tesis

El objetivo de esta tesis consiste en desarrollar un dispositivo óptico basado en un interferómetro que supervise el funcionamiento en motores de inducción, dicho interferómetro deberá ser estable a las vibraciones mecánicas además de ser lo más sencillo que sea posible.

La finalidad de construir el dispositivo óptico es para analizar y monitorear equipo y maquinaria que tengan motores de inducción mediante el análisis de sus frecuencias de vibración. Con esta técnica se pueden identificar fallas típicas tales como desbalanceo de rotores, soldaduras mecánicas, desalineamiento y defectos en los rodamientos; por lo que se pretende hacer una contribución útil en el mantenimiento predictivo de los equipos.

Una ventaja de dicho mantenimiento predictivo es el cambiar los componentes que estén fallando dentro de los motores de inducción de manera anticipada y así reducir los tiempos de mantenimiento correctivo, además de ahorrar dinero por los costos que producirían un daño mayor en los equipos.

La detección de vibraciones con láser tiene la ventaja en comparación con los acelerómetros convencionales que no requiere estar en contacto directo con el objeto a estudiar, además de que la medición se puede hacer desde distancias que no comprometan la seguridad del usuario en el caso de zonas de alto riesgo, por lo que es una forma de medición más versátil, exacta y no invasiva.

El vibrómetro láser es un instrumento que existe desde la década de los 80's , y en la actualidad la adquisición de datos por medio de éstos tipos de instrumentos, está restringido a un grupo de compañías privadas y centros de investigación. Uno de los principales beneficios de la construcción del vibrómetro será la de reducir los costos y que de ésta manera más compañías o empresas puedan utilizar este dispositivo para dar mantenimiento predictivo a sus equipos.

En el siguiente capítulo de esta tesis presentamos las características de los motores de inducción, desarrollamos la teoría de interferometría y los fundamentos en la medición de vibraciones. En el Capítulo 3 hacemos el desarrollo de nuestro prototipo y en el capítulo 4 presentamos resultados obtenidos para diferentes motores de inducción. Finalmente en el capítulo 5 presentamos

nuestras conclusiones y trabajo a futuro.





## 2 Teoría

En este capítulo comenzaremos hablando de las características y parámetros que describen el estado de funcionamiento de un motor de inducción, puesto que de este tipo de motores estudiaremos su espectro de vibración. Posteriormente veremos diferentes tipos de interferómetros que utilizamos para obtener el espectro de vibración de los diferentes motores estudiados. Finalmente, presentaremos la teoría en la cual se basa nuestro análisis de la vibración.

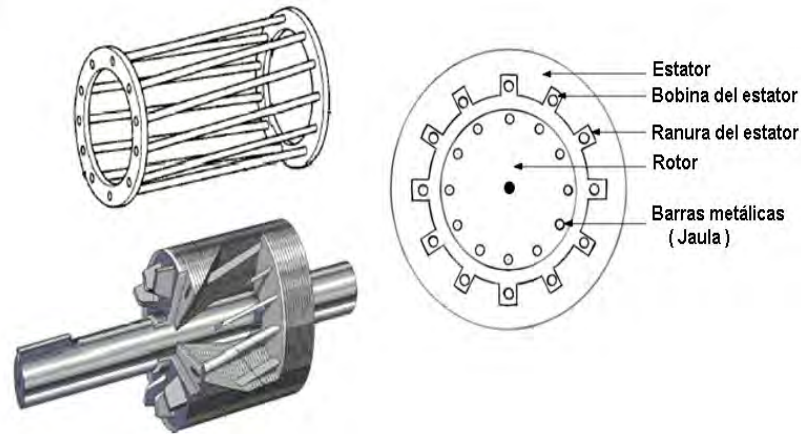
### 2.1. Motores de Inducción

Un motor de inducción es aquél que sólo tiene devanados de amortiguamiento (puede desarrollar un par de arranque como un motor síncrono, pero sin la necesidad de suministrarles una corriente de campo externa). Se llama motor de *inducción* porque el voltaje en el rotor se *induce* en los devanados del rotor en lugar de que estén conectados por cables. La característica distintiva de un motor de inducción es que este no requiere de corriente de campo para funcionar [3].

#### 2.1.1. Clasificación

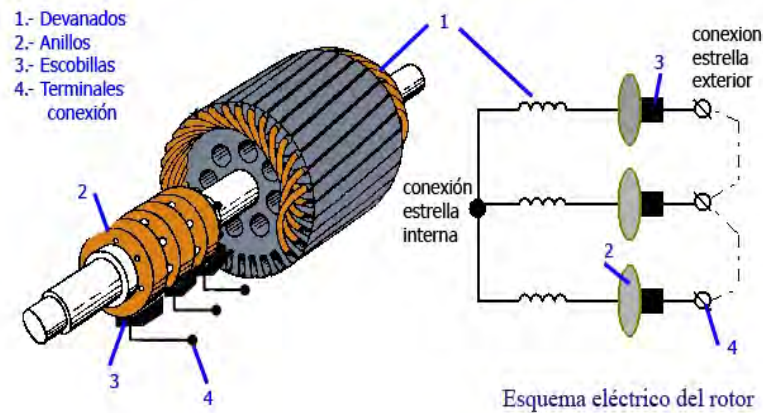
Los motores de inducción se pueden calificar en dos tipos, dependiendo de la forma de construcción del rotor. Uno es el *rotor de jaula de ardilla* o *rotor de jaula* y el otro se le conoce como *rotor devanado*.

Los *rotores tipo jaula de ardilla* constan de una serie de barras conductoras dispuestas dentro de unas ranuras labradas en la cara del rotor y en cortocircuito en ambos extremos mediante unos anillos de cortocircuito, como se muestra en la figura 2.1. Los *rotores de devanado* tienen un conjunto completo de devanados trifásicos que son muy parecidos a los devanados del



**Figura 2.1:** Rotor jaula de ardilla [3].

estator. Las tres fases de los devanados del rotor normalmente están conectados en estrella (Y), y los extremos de los tres devanados del rotor están conectados en cortocircuito por medio de escobillas montadas en los anillos rozantes como se muestra en la figura 2.2. Los rotores devanados



**Figura 2.2:** Rotor devanado [3].

de los motores de inducción son más grandes que los rotores de jaula de ardilla y requieren mucho más mantenimiento debido al desgaste asociado con las escobillas y con los anillos rozantes.

## 2.1.2. Funcionamiento

## Desarrollo del par inducido en un motor de inducción

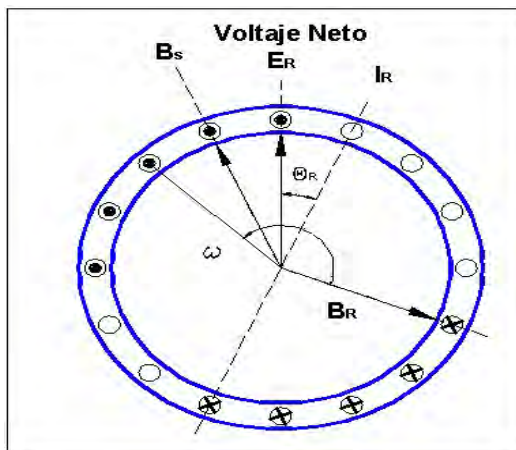
En la figura 2.3 se muestra un motor de inducción tipo jaula de ardilla. Se aplica un conjunto trifásico de voltajes al estator y fluye en él un conjunto trifásico de corrientes. Estas corrientes producen un campo magnético  $B_s$  que gira en sentido contrario a las manecillas del reloj. La velocidad de rotación del campo magnético está dada por

$$n_{sinc} = \frac{120f_e}{P} \quad (2.1)$$

donde  $f_e$  es la frecuencia en Hertz del sistema de alimentación y P es el número de polos en el motor. Este campo magnético giratorio  $B_s$  cruza las barras del rotor e induce un voltaje en ellas. El voltaje inducido en cierta barra de rotor está dado por la ecuación

$$e_{ind} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l} \quad (2.2)$$

donde  $\mathbf{v}$  es la velocidad de la barra en relación con el campo magnético,  $\mathbf{B}$  es el vector de densidad de flujo magnético y  $\mathbf{l}$  es la longitud del conductor en el campo magnético. El voltaje inducido en



**Figura 2.3:** Desarrollo de un par inducido en un motor de inducción.

la barra del rotor es producido por el movimiento relativo del rotor en comparación con el campo magnético del estator. El flujo de corriente en el rotor produce, a su vez, un campo magnético en

el rotor  $B_R$ ; puesto que el par inducido en el motor está dado por

$$\tau_{ind} = kB_R \times B_s \quad (2.3)$$

en la cual  $k$  es una constante de par para el número de polos, devanados, unidades empleadas, etc,  $B_R$  campo magnético en el rotor y  $B_s$  es el campo magnético en el estator.

El par resultante va en sentido contrario al de las manecillas del reloj. Debido a esto, el rotor se acelera en esa dirección.

Hay un límite superior para la velocidad del motor. Si el rotor del motor de inducción girara a velocidad síncrona, entonces las barras del rotor estarán estacionarias en relación con el campo magnético y no habrá ningún voltaje inducido. Si  $e_{ind}$  fuera igual a cero, entonces no habría corriente en el rotor y no habría campo magnético en él. Sin campo magnético en el rotor, el par inducido sería cero y el rotor reduciría su velocidad como resultado de las pérdidas por fricción. Por consiguiente, un motor de inducción puede acelerar hasta llegar cerca de la velocidad síncrona, pero nunca puede llegar a ella.

### Concepto de deslizamiento del rotor

Hay dos términos que se usan regularmente para definir el movimiento relativo del rotor y los campos magnéticos. Uno es la velocidad de deslizamiento, que se define como la diferencia entre la velocidad síncrona y la velocidad del rotor,

$$n_{des} = n_{sinc} - n_m, \quad (2.4)$$

donde  $n_{des}$  es la velocidad de deslizamiento del motor,  $n_{sinc}$  es la velocidad de los campos magnéticos y  $n_m$  es la velocidad mecánica del eje del motor.

Otro término que es utilizado para describir el movimiento relativo es el deslizamiento, que es igual a la velocidad relativa expresada como una fracción de la unidad o un porcentaje. Esto quiere decir que el deslizamiento se define como,

$$s = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} 100\% \quad (2.5)$$

**2.1.3. Fallas características**

Todas las máquinas con partes móviles generan fuerzas mecánicas durante su operación normal. A medida que el estado mecánico de la máquina cambia debido al desgaste, a los cambios en el entorno operativo, variaciones de carga, etc; se generan cierto tipos de fuerzas que son indeseables para el correcto funcionamiento de la máquina.

El perfil de la vibración que resulta del movimiento es el resultado de un desequilibrio de fuerzas. El equilibrio se produce en los sistemas en movimiento cuando todas las fuerzas generadas por o sobre la máquina se encuentran en un estado de equilibrio, es decir, la resultante es igual a cero. En aplicaciones del mundo real, sin embargo, siempre hay un cierto nivel de desequilibrio y todas las máquinas vibran en cierta medida.

Una máquina rotatoria tiene uno o más elementos que giran con respecto a un eje, como los baleros o cojinetes, impulsores o álabes, rotores u otros. En una máquina perfectamente equilibrada, todos los rotores giran en su eje verdadero y todas las fuerzas están equilibradas. Sin embargo, en la maquinaria industrial, es común que un desequilibrio de éstas fuerzas se produzca. Además del desequilibrio generado por un elemento giratorio, la vibración puede ser causada por la inestabilidad en los medios de transmisión de la máquina rotativa.

Los motores de inducción son elementos de bajo mantenimiento, pero como cualquier máquina no está exenta de sufrir fallos o anomalías del tipo mecánico, eléctrico o de ambos. El origen de las fallas pueden ser ocasionados por factores térmicos, químicos o de alguna otra índole y gran parte de esos problemas están relacionados con el ambiente dónde se ubique la máquina eléctrica o el ciclo de trabajo que se esté realizando.

Las fallas o anomalías eléctricas se pueden originar por estar sometidas a transitorios indeseados en su fuente de alimentación. Además existen problemas térmicos y de contaminación ambiental. Los fallos o anomalías mecánicas se pueden originar porque están sometidas a arranques muy frecuentes, ciclos de trabajo muy pesados (vacío - plena carga), a marchas intermitentes, cargas pulsantes, etc.

Entre las fallas más importantes pueden distinguirse los fallos en rodamientos o en el eje

del rotor, en los devanados de estator y en las barras o anillos de cortocircuito del rotor. Existen distintas técnicas de análisis de señales vibratorias entre las cuales destaca el análisis de frecuencias o frecuencial. Con esta técnica se pueden identificar fallas típicas tales como desbalanceo de rotores, soldaduras mecánicas, desalineamiento y defectos en los rodamientos.

En líneas generales, puede afirmarse que aproximadamente un 40 % de los fallos en este tipo de máquinas corresponde a anomalías en los rodamientos, entre un 30 y un 40 % a fallos en el estator y un 10 % aproximadamente corresponden a fallos en el rotor (el resto de los casos se distribuyen en una gran variedad de fallos) [4]. Estos datos fueron tomados a partir del análisis de máquinas de una gran variedad de potencias; puede afirmarse, así mismo, que en máquinas de potencia elevada los fallos en el rotor son los que se repiten con más frecuencia y por consiguiente se tornan los más importantes.

### Excentricidad del entrehierro

Para medir la excentricidad del entrehierro de un motor de inducción a partir del análisis del espectro de frecuencias de la corriente del estator, existen dos métodos. El primer método monitorea el comportamiento de las bandas laterales a las frecuencias de ranura en el espectro de la corriente del estator [9]. La frecuencia  $f_{ranura+exec}$ , asociada a dichas bandas laterales producto de una excentricidad está dado por,

$$f_{ranura+exec} = f_s \left[ (kR \pm n_d) \left( \frac{1-s}{p} \right) \pm n_\omega \right] \quad (2.6)$$

donde  $f_s$  es la frecuencia de la fuente de alimentación,  $k = 1, 2, 3, \dots$ ,  $R$  es el número de ranuras del rotor,  $n_d$  orden de excentricidad del rotor,  $s$  deslizamiento,  $p$  número de pares de polos,  $n_\omega$  número de armónicos en el estator. Este esquema tiene la ventaja de separar del espectro componentes producidos por una excentricidad del entrehierro de los causados por barras rotas del rotor, tiene el inconveniente de que requiere un conocimiento íntimo de la construcción de la máquina, es decir, el número de las ranuras del rotor.

El segundo método monitorea el comportamiento del espectro de la corriente de estator en las bandas laterales de la frecuencia fundamental de la corriente de alimentación [10]. En este caso la frecuencia  $f_{ecc}$  está dada por,

$$f_{ecc} = f_s \left[ 1 \pm m \left( \frac{1-s}{p} \right) \right] \quad (2.7)$$

donde  $m = 1, 2, 3, \dots$ . Este último método tiene la ventaja de que no se requiere tener ningún conocimiento de la construcción de la máquina.

### Barras rotas en el rotor

Con el monitoreo del espectro de la corriente de estator también se puede hacer la detección de las barras rotas del rotor. Dichas barras son detectadas monitoreando las componentes espectrales de la corriente producidas por el campo magnético anormal debido a las barras rotas [11]. La frecuencia  $f_{brb}$ , de las componentes espectrales de las barras rotas está dada por,

$$f_{brb} = f_s \left[ k \left( \frac{1-s}{p} \right) \pm s \right] \quad (2.8)$$

donde debido a la configuración normal, se tiene que  $k/p = 1, 5, 7, 11, 13, \dots$

### Daños en los rodamientos

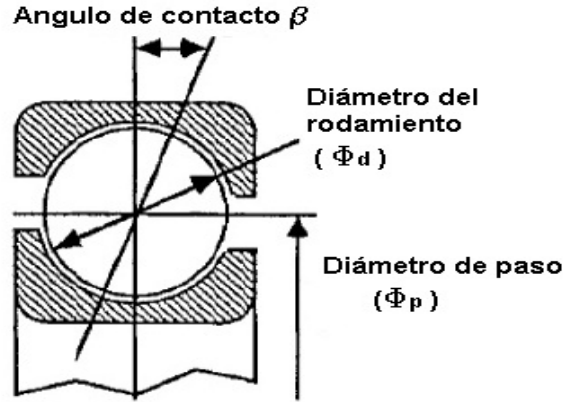
Los problemas de instalación son a menudo causados por forzar indebidamente al rodamiento en el eje o en donde asienta dentro de la cavidad de alojamiento del cojinete. Esto produce daños físicos como el endurecimiento de los canales que conduce a un fallo prematuro. La desalineación de los rodamientos, es también un resultado común de la defectuosa instalación del rodamiento.

La relación de la vibración de rodamientos con el espectro de la corriente del estator, se puede establecer en base a que cualquier excentricidad del entrehierro produce anomalías en la densidad de flujo en el entrehierro. Puesto que los rodamientos de bolas son el soporte del rotor, cualquier defecto del cojinete radial producirá un movimiento entre el rotor y el estator de la máquina. El desplazamiento mecánico resultante generado por un daño en el rodamiento genera una variación en la separación del entrehierro entre el rotor y el estator; de tal manera que puede ser descrito por una combinación de excentricidades de rotación moviéndose en ambas direcciones. Al igual que con la excentricidad del entrehierro, estas variaciones generan corrientes del estator a frecuencias dadas por

$$f_{bnf} = |f_s \pm m f_i| \quad (2.9)$$

donde  $m = 1, 2, 3, \dots$  y  $f_i$  de las frecuencias características de vibración que se basa en las dimensiones de los rodamientos como se muestra en la figura 2.4





**Figura 2.4:** Dimensiones de las bolas en un cojinete [12].

$$f_i = \frac{n}{2} f_r \left[ 1 \pm \frac{bd}{pd} \cos \beta \right] \quad (2.10)$$

donde  $n$  es el número de bolas,  $f_r$  velocidad mecánica del rotor en Hertz,  $bd$  diámetro de la bola,  $pd$  diámetro de paso del cojinete,  $\beta$  ángulo de contacto de las bolas en el riel.

### Efectos de carga

Si el par de carga varía con la posición del rotor, la corriente del estator, contendrá componentes espectrales que coinciden con las componentes espectrales producidas por una condición de falla. En una máquina ideal en donde la corriente del estator es puramente senoidal, cualquier oscilación en el torque de carga a múltiplos de la velocidad de giro  $m f_r$  producirá corrientes en el estator a frecuencias [13]

$$f_{load} = f_s \pm m f_r = f_s \left[ 1 \pm m \left( \frac{1-s}{p} \right) \right], \quad (2.11)$$

donde  $m = 1, 2, 3, \dots$ . Puesto que las mismas frecuencias están dadas por las ecs. 2.7 y 2.8, es claro que cuando la máquina de inducción funciona con una variación típica de la carga la oscilación del torque resulta en un espectro la corriente de estator que puede confundirse con el correspondiente a diferentes tipos de falla. Por lo tanto, cualquier esquema de detección de fallas basado en el espectro de la corriente del estator debe enfocarse al monitoreo de aquellas componentes espectrales las cuales no son afectadas por las oscilaciones del torque de carga. Sin

embargo, la detección de barras rotas es posible ya que la corriente suele contener un gran número de armónicos de orden superior a los inducidos por las variaciones de carga [14].

## 2.2. Interferometría

La interferencia óptica se puede decir que es una interacción de dos o más ondas de luz que producen una irradiancia resultante, la cual se desvía de la suma de las irradiancias componentes [5].

Los sistemas interferométricos se dividen en dos grupos: *división de frente de onda* y *división de amplitud*.

En el *división de frente de onda*, se usan porciones del frente de onda primario como fuentes para emitir ondas secundarias, las cuales se volverán a encontrar para que se llevé a cabo la interferencia. En la *división de amplitud* la onda primaria es dividida en dos segmentos los cuales viajan por diferentes caminos antes de recombinarse e interferir.

### Interferencia entre dos ondas

Considérese la interferencia entre dos ondas representadas por  $E_1$  y  $E_2$ , que son los vectores de campos eléctricos. En los casos de interferencia ambas ondas suelen proceder de una misma fuente (como anteriormente se ha mencionado) y reunirse después de viajar por diferentes caminos ópticos [6]. La dirección del desplazamiento de las ondas no tiene porque ser el mismo cuando se reúnen, es decir, deben mantener la misma frecuencia, pero generalmente no tienen el mismo vector de propagación  $\mathbf{k}$ . Por lo tanto, podemos expresar las ecuaciones de onda como

$$E_1 = E_{01} \cos(k_1 \cdot r - \omega t + \epsilon_1) \quad (2.12)$$

$$E_2 = E_{02} \cos(k_2 \cdot r - \omega t + \epsilon_2) \quad (2.13)$$

en las cuales ( $E_1, E_2$ ) representan los vectores de los campos eléctricos para los dos haces de luz, ( $E_{01}, E_{02}$ ) son las amplitudes de dichos haces, ( $k_1 \cdot r, k_2 \cdot r$ ) son sus respectivos vectores de propagación y corresponden al período espacial, ( $\omega t$ ) es la frecuencia angular y corresponde al período temporal y por último ( $\epsilon_1, \epsilon_2$ ) son sus respectivas fases.

En un punto P en general, que se define por la posición del vector  $\mathbf{r}$ , la irradiancia está dada por 2.14, la cual es proporcional al cuadrado de la amplitud del campo eléctrico

$$I = \epsilon_0 c \langle E^2 \rangle \quad (2.14)$$

donde  $\epsilon_0$  es la permitividad eléctrica del medio,  $c$  es la velocidad de la luz,  $\langle \quad \rangle$  representa un promedio temporal. Lo que expresa  $\langle E^2 \rangle$  es por supuesto, el promedio temporal de la magnitud de la intensidad de campo eléctrico al cuadrado o  $\langle E \cdot E \rangle$ .

Así la irradiancia resultante en P está dada por  $I = \epsilon_0 c \langle E^2 \rangle = \epsilon_0 c \langle (E_1 + E_2) \cdot (E_1 + E_2) \rangle$  o

$$I = \epsilon_0 c \langle E_1^2 + E_2^2 + 2E_1 \cdot E_2 \rangle \quad (2.15)$$

De la ecuación 2.15, los dos primeros términos corresponden a las irradiancias de las ondas individuales  $I_1$  e  $I_2$ . El último término depende de la interacción de las dos ondas, y a este término se le conoce como **término de interferencia**,  $I_{12}$ . Por lo tanto podemos reescribir la ecuación 2.15 como

$$I = I_1 + I_2 + I_{12} \quad (2.16)$$

Considerando el término de interferencia,

$$I_{12} = 2\epsilon_0 c \langle E_1 \cdot E_2 \rangle \quad (2.17)$$

El producto punto estará dada por,

$$E_1 \cdot E_2 = E_{01} \cdot E_{02} \cos(k_1 \cdot r - \omega t + \epsilon_1) \cos(k_2 \cdot r - \omega t + \epsilon_2)$$

se puede simplificar de la siguiente manera

$$\alpha \equiv k_1 \cdot r + \epsilon_1, \beta \equiv k_2 \cdot r + \epsilon_2$$

Entonces

$$E_1 \cdot E_2 = E_{01} \cdot E_{02} \cos(\alpha - \omega t) \cos(\beta - \omega t)$$

Ampliando y multiplicando los factores de coseno, se llega a

$$E_1 \cdot E_2 = E_{01} \cdot E_{02} [\cos(\alpha) \cos(\beta) \langle \cos^2 \omega t \rangle + \sin(\alpha) \sin(\beta) \langle \sin^2 \omega t \rangle + (\cos(\alpha) \sin(\beta) + \sin(\alpha) \cos(\beta)) \langle \sin(\omega t) \cos(\omega t) \rangle]$$

Donde los tiempos promedios son indicados para cada factor dependiente del tiempo. Para un número completo de ciclos, se puede mostrar que

$$\langle \cos^2 \omega t \rangle = \frac{1}{2}$$

$$\langle \sin^2 \omega t \rangle = \frac{1}{2}$$

además

$$\langle \sin(\omega t) \cos(\omega t) \rangle = 0$$

Así

$$E_1 \cdot E_2 = \frac{1}{2} E_{01} \cdot E_{01} \cos(\alpha - \beta) = \frac{1}{2} E_{01} \cdot E_{01} \cos[(k_1 - k_2) + (\epsilon_1 - \epsilon_2)] \quad (2.18)$$

Donde la expresión anterior es la diferencia de fase entre  $E_1$  y  $E_2$ ,

$$\delta = (k_1 - k_2) + (\epsilon_1 - \epsilon_2) \quad (2.19)$$

Combinando las ecuaciones 2.11, 2.12 y 2.13 se tiene que

$$I_{12} = \epsilon_0 c E_{01} \cdot E_{02} \cos \delta \quad (2.20)$$

En el caso de que  $E_{01}$  y  $E_{02}$  sean paralelos el producto punto de la ecuación 2.20 es el producto de sus magnitudes las cuales son idénticas y el término de interferencia se puede expresar como

$$I_{12} = 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (2.21)$$

y ya para finalizar se obtiene la siguiente expresión

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (2.22)$$

### 2.2.1. Interferómetro de Michelson

El interferómetro de Michelson, se introdujo por primera vez por Albert Michelson en 1881, ha desempeñado un papel vital en el desarrollo de la física moderna. Este sencillo y versátil instrumento se utilizó, por ejemplo, para establecer la evidencia experimental para la validez de la teoría de la relatividad especial, para detectar y medir la estructura hiperfina en línea espectros, para medir el efecto de las mareas de la luna sobre la tierra, y para proporcionar un sustituto estándar para el metro en términos de longitudes de onda de la luz.

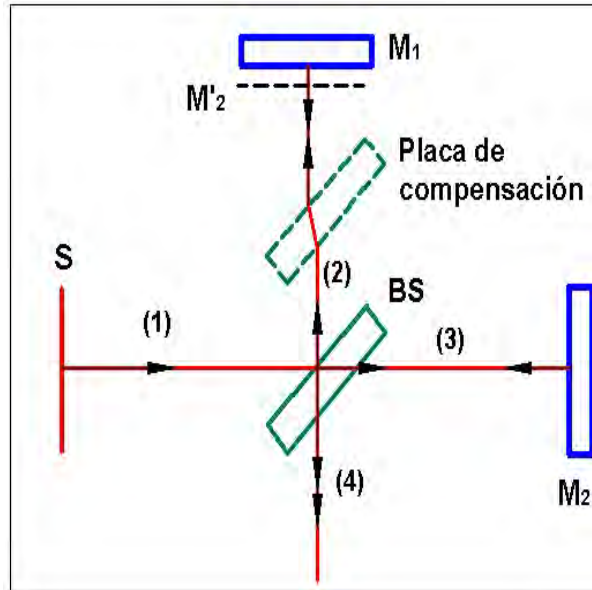
En el interferómetro de Michelson, el haz de la fuente es dividida, como se muestra en la figura 2.5 por medio de un revestimiento semirreflejante sobre una superficie de una placa de vidrio plana paralela. El mismo divisor de haz es usado para recombinar los haces reflejados por los dos espejos [17].

Para obtener las franjas de interferencia con una fuente de luz blanca, los dos caminos ópticos deberán ser iguales para todas las longitudes de onda. Ambos brazos deberán contener el mismo espesor del vidrio para tener la misma dispersión. Sin embargo, uno de los haces atraviesa el divisor de haz tres veces, mientras que el otro haz lo atraviesa una sola vez. Acorde a esto, se utiliza una placa de compensación (idéntica al divisor de haz, pero sin el revestimiento semirreflejante) es introducido en el segundo haz.

Como se muestra en la figura 2.6 la reflexión en el divisor de haz produce una imagen virtual  $M'_2$  del espejo  $M_2$ . Se puede visualizar la interferencia de los haces como se vinieran de las fuentes virtuales  $S_1$  y  $S_2$ , las cuales son imágenes de la fuente original  $S$  en  $M_1$  y  $M'_2$ . El patrón de interferencia observado es similar al producido en una capa de aire delimitado por  $M_1$  y  $M'_2$  y sus características dependen de la naturaleza de la fuente de luz y de la separación de  $M_1$  y  $M'_2$ .

#### Franjas formadas por una fuente puntual

Cuando  $M_1$  y  $M'_2$  son paralelos como se muestra en la 2.6(a), pero separados por una distancia finita, las franjas de interferencias obtenidas son círculos centrados sobre la normal para los espejos (franjas de igual inclinación). Cuando  $M_1$  y  $M'_2$  forman un ángulo muy pequeño entre los dos, las franjas de interferencia obtenidas son, en general, un conjunto de hipérbolas. Sin embargo, cuando  $M_1$  y  $M'_2$  se superponen como se muestra en la 2.6(b), las franjas parecen estar cerca del



**Figura 2.5:** Interferómetro de Michelson [6].

eje y están igualmente espaciadas, paralelas, líneas rectas ( franjas de igual espesor).

#### **Franjas formadas con una fuente extendida**

Con una fuente extendida, las franjas de interferencia son localizadas con un buen contraste sólo en regiones particulares y depende de la coherencia de la fuente de luz. Cuando  $M_1$  y  $M'_2$  son paralelos, pero separados por una distancia finita, las franjas son de igual inclinación, localizadas en el infinito, y cuando  $M_1$  y  $M'_2$  están sobrepuestas con un pequeño ángulo, las franjas son de igual espesor, y las cuáles se localizan sobre los espejos.

#### **Franjas formadas con luz colimada**

Con luz colimada, se obtienen siempre franjas de igual espesor independientemente de la separación de  $M_1$  y  $M'_2$ . El interferómetro de Michelson modificado al usar luz colimada es conocido como interferómetro de Twyman - Green.

El interferómetro de Michelson es fácilmente adaptable a la medición de películas delgadas. También es fácilmente adaptable a la determinación del índice de refracción de un gas. Otra aplicación de este interferómetro es la determinación de la diferencia de longitudes de onda entre dos componentes muy próximas entre sí de una línea espectral  $\lambda$  y  $\lambda'$ .

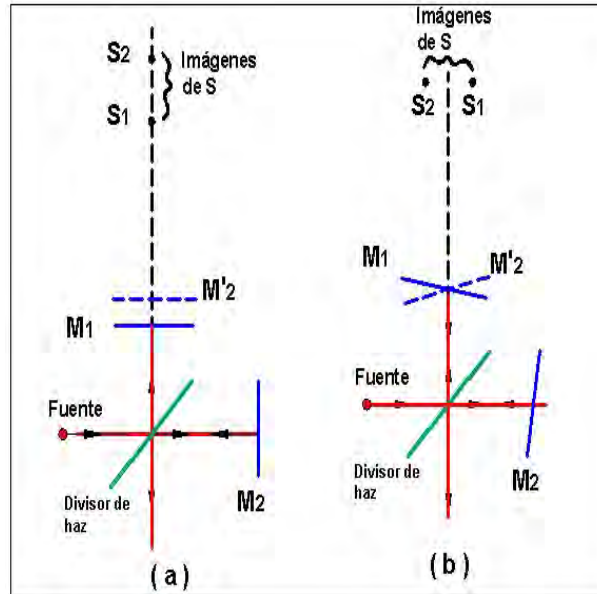


Figura 2.6: Interferómetro de Michelson [6].

### 2.2.2. Interferómetro de Mach-Zehnder

Como se muestra en la 2.7 el interferómetro de Mach-Zehnder emplea dos divisores de haz y dos espejos para dividir y recombinar los haces. El espaciamiento de las franjas es controlado por la variación del ángulo entre los haces que emergen del interferómetro. En complemento, para algún ángulo dado entre los haces, la posición del punto de intersección de un par de rayos originados desde el mismo punto de la fuente pueden ser controlados por la variación de la separación lateral de los haces. Con una fuente extendida, es posible obtener franjas de interferencia localizadas en algún plano deseado.

El interferómetro de Mach-Zehnder tiene dos características atractivas. Una de ellas es que los dos caminos son ampliamente separados y son atravesados sólo una vez; la otra es que la región de la localización de las franjas puede hacerse coincidir con el objeto a prueba, por lo que una fuente extendida de alta intensidad puede ser usada. Sin embargo, el ajuste del interferómetro no es fácil.

El interferómetro Mach-Zehnder es aquél en que el haz de luz incidente o menos paralela se divide en dos haces en el divisor de haz BS. Cada rayo es de nuevo totalmente reflejado por los espejos  $M_1$  y  $M_2$ , y los haces son coincidentes de nuevo por el otro divisor de haz BS. Los caminos ópticos de los haces 1 y 2 del todo sistema rectangular y a través del cristal de los divisores de haces son idénticos. Este interferómetro se ha utilizado, por ejemplo, en investigación aerodinámica, donde la geometría del flujo de aire alrededor de un objeto en un viento túnel se revela a través de las variaciones locales de presión y de índice de refracción. Una ventaja del interferómetro Mach-Zehnder del Michelson es que, por pequeñas rotaciones adecuadas de los espejos, las franjas se pueden hacer para aparecer en el objeto poniendo a prueba, por lo que ambos pueden ser vistos o fotografiados juntos.

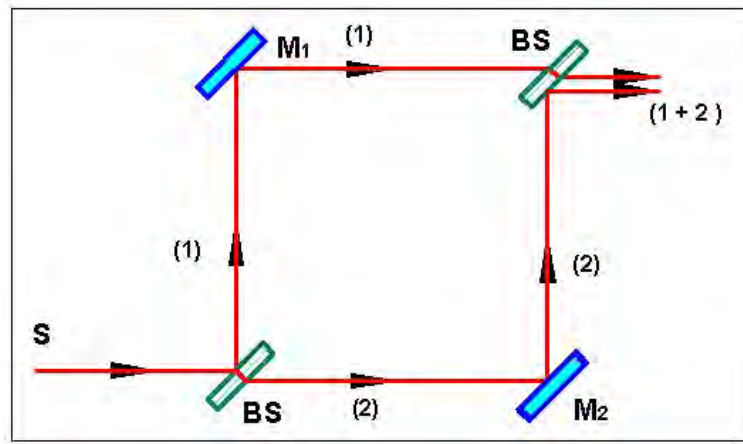


Figura 2.7: Interferómetro de Mach-Zehnder [6].

### 2.2.3. Interferómetro Cíclico

El interferómetro Cíclico que se muestra en la figura 2.8, es un interferómetro Cíclico de un sólo paso, en el que un sólo haz de luz incidente se divide en dos haces que siguen casi el mismo camino en el interferómetro, pero en direcciones diferentes.

Los dos haces al salir interfieren y producen un patrón de franjas sobre una pantalla. El hecho de que los haces sigan casi el mismo camino óptico ofrece dos principales ventajas. La primera ventaja es que el interferómetro Cíclico es mucho más estable a las vibraciones mecánicas en



comparación con otros interferómetros, por ejemplo como el interferómetro de Mach-Zehnder [16]. La segunda ventaja es que la trayectoria de los dos haces opuestos será casi la misma.

La diferencia de la longitud del recorrido de los dos haces es muy cercana a cero, lo que significa que el interferómetro Cíclico podría ser utilizado con fuentes que tienen longitudes cortas de coherencia (cortos tiempos de coherencia), tales como láseres de banda ancha o de corta longitud como los láseres pulsados.

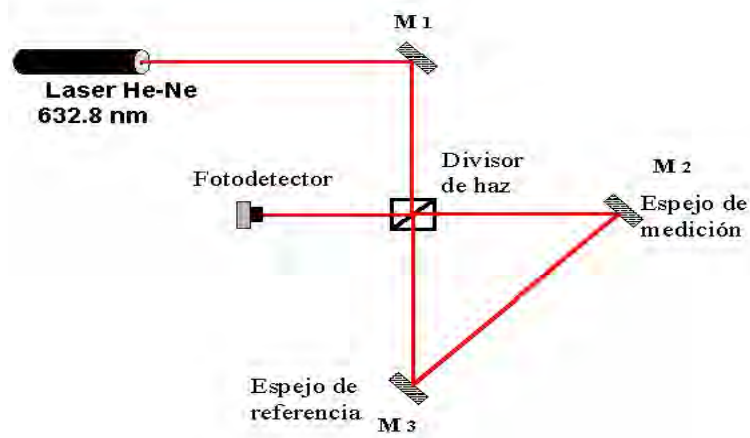


Figura 2.8: Interferómetro Cíclico.

### 2.3. Fundamentos de medición de vibraciones

La vibración puede considerarse como la oscilación o el movimiento repetitivo de un objeto alrededor de una posición de equilibrio. La posición de equilibrio es la posición que logra el objeto cuando las fuerzas actuando sobre él son igual a cero [7].

El movimiento de vibración puede describirse como una combinación de movimientos individuales de seis tipos diferentes: traslación entre ejes  $x$ ,  $y$  y  $z$  y la rotación en cada uno de los tres ejes, por lo tanto se dice que un cuerpo rígido tiene seis grados de libertad.

La vibración de un objeto es siempre causada por una fuerza de excitación. Esta fuerza puede ser aplicada externamente al objeto o puede ser originada dentro del mismo. El cambio de la

frecuencia y magnitud de la vibración de un objeto está completamente determinada por la dirección y la frecuencia de la fuerza de excitación.

### Movimiento armónico simple

El movimiento de vibración más simple que puede existir es el movimiento en una dirección de una masa controlada por un resorte simple, a ese sistema se le llama masa-resorte de un sólo grado de libertad. Si la masa es desplazada a una cierta distancia de su punto de equilibrio y luego se suelta, el resorte retornará al punto de equilibrio, pero la energía cinética de la masa hará que se sobrepase la posición de equilibrio y deflexionará el resorte en la dirección opuesta. La masa se desacelerará y parará en el otro extremo de su desplazamiento, donde el resorte nuevamente empezará a retornar a la posición de equilibrio. El mismo proceso se repite una y otra vez estableciendo un intercambio de energía entre la masa y el resorte.

Esta forma idealizada de movimiento armónico simple nunca se encuentra en los sistemas mecánicos reales. Cualquier sistema mecánico real tiene fricción y , esto causa que la amplitud de la vibración gradualmente decrezca tanto como la energía es convertida en calor.

**Periodo (T).** El periodo es el tiempo requerido para completar un ciclo (un movimiento alternativo completo).

**Frecuencia (f).** Es el número de ciclos que tienen lugar en un segundo, y es el recíproco del periodo. La frecuencia es medida en rpm, y es igual a la frecuencia en Hz multiplicada por 60.

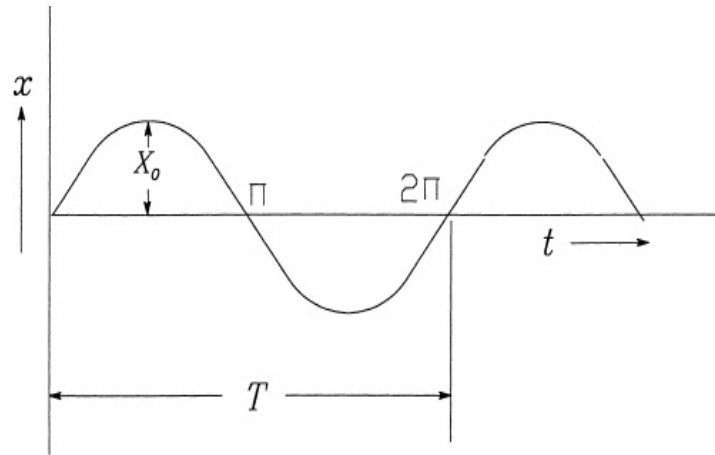
**Desplazamiento.** El desplazamiento de un objeto en movimiento armónico simple se dibuja respecto al tiempo y el resultado es una curva de una onda senoidal, y se describe como

$$X = X_0 \sin(\omega t) \quad (2.23)$$

donde  $\mathbf{X}$  es el desplazamiento instantáneo,  $X_0$  es el máximo desplazamiento y  $\omega$  es la frecuencia angular ( $2\pi f$ ).

**Velocidad.** La velocidad de movimiento es igual a la razón de cambio del desplazamiento, es decir, cuan rápido cambia su posición.

$$v = \frac{dX}{dt} = \omega X_0 \cos(\omega t) \quad (2.24)$$



**Figura 2.9:** Función armónica [8].

donde  $v$  es la velocidad instantánea, y la función de velocidad también es senoidal, aunque se describe como una función cosenoidal, esto es, desplazada 90 grados respecto al desplazamiento.

**Aceleración.** La aceleración está definida como la razón de cambio de la velocidad, es decir, que rápido cambia la velocidad en un instante de tiempo dado.

$$a = \frac{dv}{dt} = -\omega^2 X_0 \sin(\omega t) \quad (2.25)$$

donde  $a$  es la aceleración instantánea.

### *Medición de la Amplitud de la vibración*

La Amplitud Pico (Pk) es el máximo recorrido de la onda desde cero o un punto de equilibrio.

La amplitud pico a pico (Pk -Pk) es la distancia entre un pico positivo y un pico negativo, en el caso de las ondas senoidales el valor pico a pico es exactamente dos veces el valor pico debido a la forma de onda simétrica.

La amplitud media cuadrática (rms), es la raíz cuadrada del promedio de las amplitudes al cuadrado de la forma de onda. En el caso de una onda tipo senoidal, el valor rms es de 0.707 veces el valor pico. El valor rms de una señal de vibración es una medida importante de su amplitud, y se obtiene de los valores instantáneos de la amplitud en un intervalo de tiempo que como mínimo debe ser un periodo completo de la onda.

Una señal de vibración representada como desplazamiento vs frecuencia puede convertirse en una gráfica de velocidad vs frecuencia mediante un proceso de diferenciación. La diferenciación involucra una multiplicación por la frecuencia y significa que la velocidad de vibración a cualquier frecuencia es proporcional al desplazamiento multiplicada por la frecuencia.

Para obtener la aceleración a partir de la velocidad, se requiere otra diferenciación, por lo que se puede concluir que para un desplazamiento dado, la aceleración es proporcional al cuadrado de la frecuencia.

De las consideraciones anteriores se puede ver que los mismos datos de vibración graficados en desplazamiento, velocidad o aceleración tendrán muy diferentes apariencias. La curva de desplazamiento enfatizará las frecuencias más bajas y la curva de aceleración lo hará con las frecuencias más altas a expensas de las más bajas.

El proceso de convertir una señal de aceleración a velocidad o de velocidad a desplazamiento es una integración matemática. Es posible desarrollar estas operaciones en los instrumentos de medición de vibración y convertir de cualquier sistema de unidades a otro. La diferenciación es un proceso inherentemente generador de ruido, a diferencia de la integración que puede hacerse muy precisamente con un circuito electrónico sencillo.

Esta es una razón por la cual los medidores de vibración estándar son los acelerómetros. Su señal de salida es integrada fácilmente una o dos veces para mostrar la velocidad o el desplazamiento. Sin embargo se tienen dificultades en la integración para señales de muy baja frecuencia (abajo de 1 Hz).

### ***Escalas de medición***

Para analizar un espectro de vibración se podría utilizar la escala de amplitud lineal como mejor opción aunque depende de algunos factores. La escala de amplitud lineal permite que los componentes mayores en un espectro sean fácilmente leídas y evaluadas, pero las componentes menores podrían verse completamente sobrepuestas.

La escala lineal puede ser la ideal en caso donde las componentes son todas de medidas similares, pero en el caso donde la vibración de la máquina comienza a manifestarse en partes

como chumaceras, las amplitudes generadas son muy pequeñas; para poder realizar un buen trabajo de diagnóstico es mejor graficar el logaritmo de la amplitud más que la amplitud.

### 2.3.1. Análisis de vibraciones

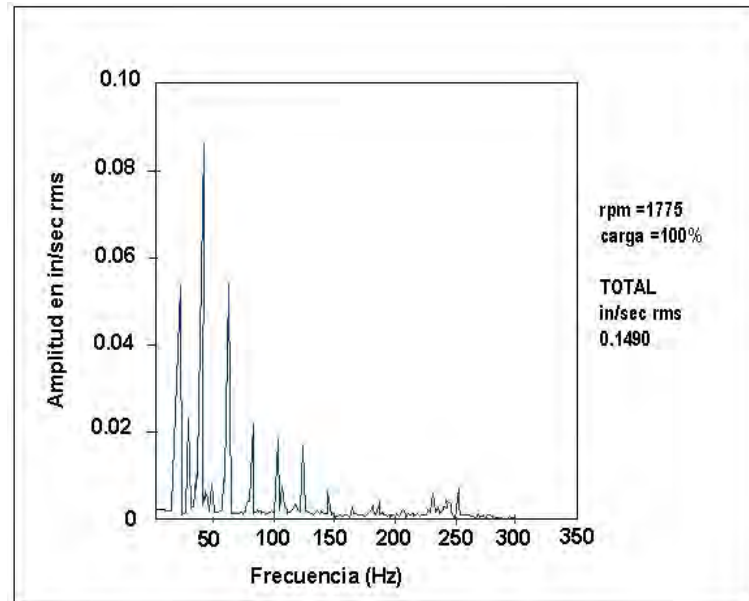
Existen muchos métodos para obtener y analizar los datos de vibración, con el fin de detectar e identificar problemas específicos en maquinaria. Algunas de las técnicas más comunes son:

- Amplitud vs frecuencia (espectro).
- Amplitud vs frecuencia vs tiempo (diagrama de cascada).
- Amplitud y fase vs rpm (diagrama de Bodé.)
- Amplitud vs fase (diagramas polares o de Nyquist).
- Análisis de base en el tiempo.
- Patrones de Lissajous(órbitas).

#### Análisis de amplitud vs frecuencia (espectro)

El procedimiento de obtener y desplegar las amplitudes de vibración en el dominio de la frecuencia es quizás el más útil de todas las técnicas de análisis. Se estima que esta técnica permite identificar el 85 % de los problemas de vibración que tengan lugar en un equipo rotativo. Desde un punto de vista práctico, las funciones simples de vibraciones armónicas están relacionadas con las frecuencias de rotación o de componentes móviles. Por lo tanto, estas frecuencias son un múltiplo de la velocidad básica de funcionamiento de la máquina, y es expresada en revoluciones por minuto (rpm).

Los datos en el dominio de la frecuencia son obtenidos mediante la conversión de los datos en el dominio del tiempo utilizando una técnica matemática conocida como la transformada rápida de Fourier (FFT). La FFT permite a cada componente de vibración del espectro se muestre como un pico discreto de frecuencia. La amplitud en el dominio de la frecuencia puede ser desplazamiento por unidad tiempo en relación con una determinada frecuencia, la cual es representada



**Figura 2.10:** Vibración en el dominio de la frecuencia [8].

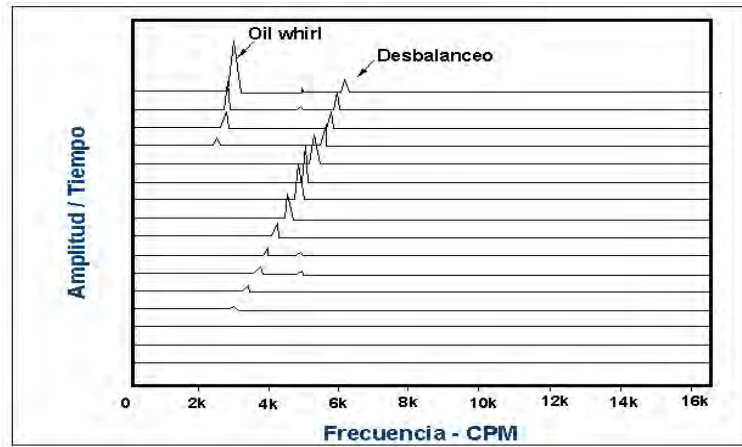
en el eje Y, tal y como se muestra en la figura 2.10.

### **Análisis de amplitud vs frecuencia vs tiempo (Diagrama de cascada)**

El análisis de amplitud vs frecuencia vs tiempo resulta extremadamente útil para identificar la mayoría de los problemas en maquinaria. Sin embargo, una gráfica de este tipo puede mostrar únicamente las características de la vibración para sólo un instante de tiempo con la máquina operando a una velocidad específica y bajo las condiciones de cargas específicas.

Un ejemplo de aplicación de esta técnica puede ser durante el arranque de un motor, puede ser muy importante conocer cuando se presentan las condiciones de resonancia o cuando se excitan las velocidades críticas debido a las frecuencias generadas por los componentes de la máquina.

La capacidad de alta velocidad de un analizador de espectro en un tiempo real es idealmente adecuada para estos requerimientos. La figura 2.11 ilustra el diagrama de cascada típico de la inestabilidad de oil whirl (vibración autoexcitada) en una turbina de gas y también se muestra la condición de resonancia (velocidad crítica) excitada por el desbalanceo inherente del rotor.



**Figura 2.11:** Diagrama de cascada típico del oil whirl [7].

### Amplitud y fase vs rpm (Diagramas de Bodé)

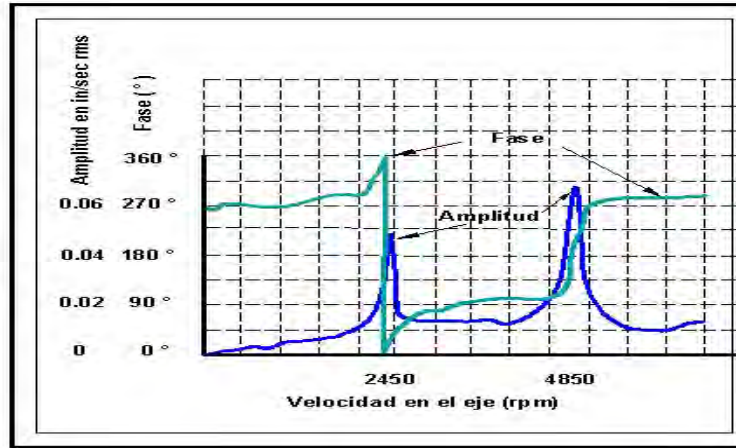
Debido a que cada elemento mecánico incluyendo las máquinas y sus soportes, tienen frecuencias de resonancia particulares, la resonancia es un problema común. Muchos de los problemas acerca de la respuesta de las máquinas debidas a las fuerzas que causan las vibraciones se pueden entender a partir de un diagrama de amplitud y la fase como una función de las rpm. La figura 2.12 ilustra un diagrama de la amplitud/fase vs rpm obtenido para el arranque o paro de un motor eléctrico, donde se logra identificar la frecuencia de resonancia por su amplitud pico característica y su correspondiente inversión de fase ( $180^\circ$ ), y también se observa que la máquina en cuestión tiene dos frecuencias significativas, una aproximadamente 2450 rpm y otra a 4850 rpm.

### Amplitud vs fase (diagramas de Nyquist)

Una técnica de uso frecuente para presentar los datos obtenidos del monitoreo de vibraciones es el diagrama de Nyquist, en la cual se emplean coordenadas polares para su construcción, en la figura 2.13 muestra un diagrama de Nyquist para el ejemplo mostrado en el diagrama de Bodé.

La gráfica de amplitud vs fase ofrece muchas ventajas comparado con los diagramas de Bodé tales como:

- Provee una indicación inmediata del vector de desbalanceo sin la necesidad de comparar por separado las gráficas de amplitud y fase.



**Figura 2.12:** Diagrama de Bodé de una turbina de gas [7].

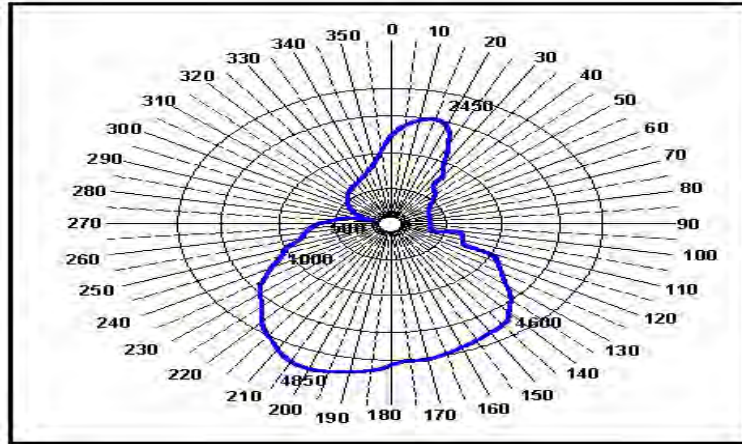
- Elimina las confusiones que aparecen en los diagramas de Bodé, debido a las discontinuidades de fase cuando ésta cambia de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ .
- Elimina las discontinuidades de fase que aparecen en los diagramas de Bodé cuando la amplitud de vibración se reduce a un nivel muy bajo, es decir, cuando no se presenta una señal de vibración suficiente para mantener una indicación de fase.
- Los diagramas de Nyquist permiten que tanto la amplitud como la fase sea representada en una sólo gráfica durante un arranque o paro de máquina.

### Análisis de base en el tiempo

En algunos casos se requiere información adicional para el diagnóstico de algún problema en particular o para el estudio del comportamiento dinámico de una máquina bajo condiciones específicas de operación. Una técnica adicional es la observación de la amplitud de vibración proyectada en el tiempo ( también conocida como gráfica de forma de onda) [8].

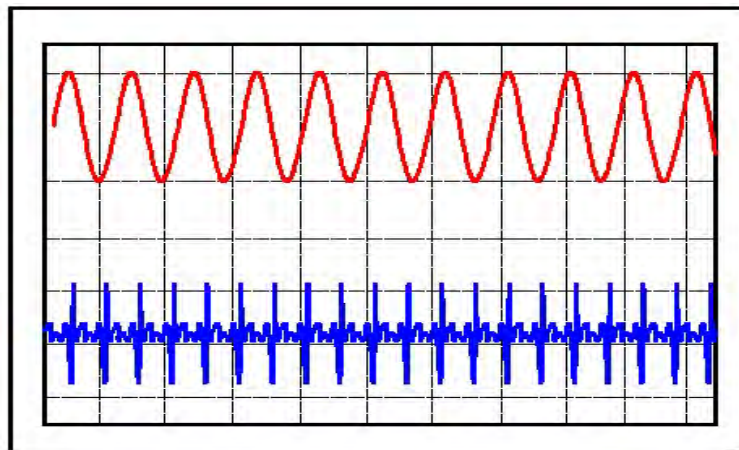
Un análisis de amplitud vs frecuencia no siempre proporciona una información completa de las características de vibración , algunos problemas mecánicos podrían presentarse a frecuencias idénticas, y tener considerables diferencias en su comportamiento dinámico. Por ejemplo considérese la vibración generada por un engrane que tiene un diente despostillado, roto o deformado. El engrane defectuoso tendrá contacto con el otro engrane una vez por revolución, y por lo





**Figura 2.13:** Diagrama de Nyquist de una turbina de gas [7].

tanto se presentará una frecuencia de vibración igual a  $1X$ , la anterior es la misma frecuencia que presenta el desbalanceo. Por lo tanto, si sólo se empleará un análisis de amplitud vs frecuencia es muy posible que el engrane defectuoso pudiera ser confundido con una condición de desbalanceo. Sin embargo, la forma de onda generada por el diente de engrane se diferenciará mucho de la causada por un desbalanceo como se ilustra en la figura 2.14. El desbalanceo producirá una



**Figura 2.14:** Análisis de base en el tiempo.

forma de onda senoidal, mientras que el diente defectuoso al estar únicamente un breve instante de tiempo por cada ciclo producirá un pico distintivo.

Otro beneficio del empleo del análisis de proyección en el tiempo consiste en la observación de vibraciones instantáneas y de la respuesta no amortiguada. Esto hace que la pantalla del osciloscopio sea una herramienta ideal para la evaluación de las vibraciones transitorias y de corta duración.

Otra técnica es la montadura radial de sensores de proximidad en chumaceras, los ejes de medición se separan  $90^\circ$ , la señal de un sensor es desplegada en el eje horizontal del osciloscopio mientras que la señal del otro sensor es desplegada en el eje vertical. La gráfica mostrada en el osciloscopio representará el movimiento total de la flecha dentro de la chumacera, a estas gráficas se les conoce como patrones de Lissajous.

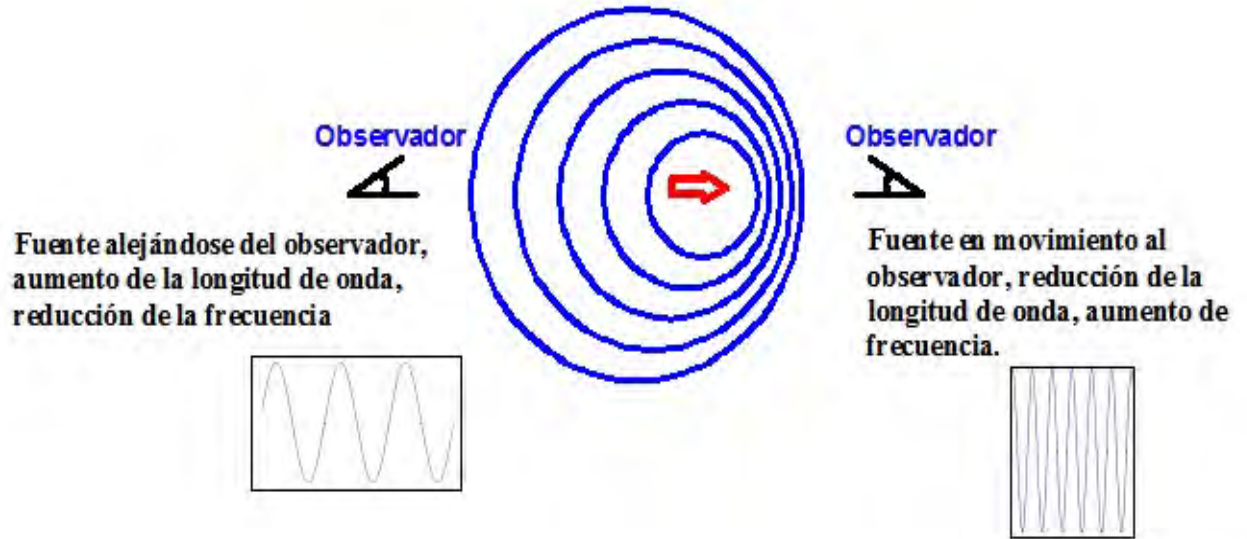
## 2.4. Efecto Doppler

El principio de la vibrometría láser se apoya en la detección de un cambio Doppler en la frecuencia de la luz coherente dispersada por un objetivo en movimiento, del cual se obtiene una medición resuelta en el tiempo de la velocidad del objetivo. Para ello, se proyecta un rayo láser sobre la superficie en vibración. El cambio en frecuencia de la luz recogida de vuelta desde la superficie, es una cantidad proporcional a la velocidad de la superficie (El efecto Doppler). El instrumento mide este desplazamiento de frecuencia para producir una señal de velocidad instantánea la cual puede ser analizada subsecuentemente.

El efecto Doppler, nombrado así en honor a Christian Doppler quien primero lo aplicó al sonido en 1842, establece que si un observador en reposo observa una fuente de ondas en movimiento en dirección hacia él, las ondas que llegan a dicho observador sufren un acortamiento en su longitud de onda incrementando su frecuencia. Y si la fuente se aleja del observador, la longitud de onda de las ondas que llegan al observador aumenta, por lo tanto la frecuencia disminuye [15], tal y como se muestra en la figura 2.15. La expresión matemática dada para el efecto Doppler es [15]

$$\lambda' = \lambda \pm \Delta\lambda \quad (2.26)$$

donde  $\lambda'$  es la variación de longitud de onda total que percibirá el observador,  $\lambda$  es la longitud de onda que emite la fuente,  $\Delta\lambda$  es la variación que sufre la longitud de onda original al desplazarse la fuente.



**Figura 2.15:** Efecto Doppler.

Para calcular  $\Delta\lambda$  se emplea la siguiente ecuación

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda v_f}{c} \quad (2.27)$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda que emite la fuente,  $v_f$  es la velocidad con que se mueve la fuente,  $c$  es la velocidad de la luz.

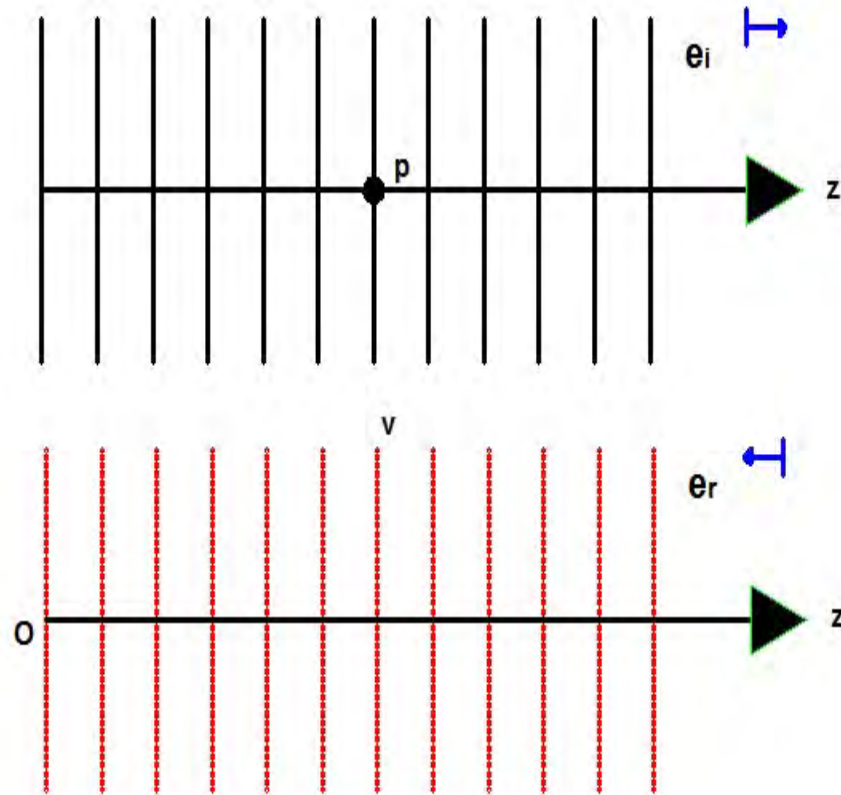
La frecuencia Doppler se obtiene de la siguiente manera

$$f_D = \Delta f = \frac{f v_f}{c} \rightarrow \Delta f = \frac{v_f}{\lambda} \quad (2.28)$$

En la figura 2.16 en la parte superior se representa un haz láser como una onda electromagnética que viaja en la dirección  $z$  (vector unitario  $e_i$ ) hacia el punto P, el punto P además a una velocidad  $v$ . Para un observador en el punto P la frecuencia de la onda recibida se expresa de la siguiente manera

$$f' = f + \frac{v}{\lambda} \quad (2.29)$$

donde  $v$  es la velocidad del objeto vibrante,  $\lambda$  es la longitud de onda láser,  $f'$  es la frecuencia que mide un observador en el punto P.



**Figura 2.16:** Propagación de la luz láser sobre un punto en movimiento.

Por lo general la ecuación 2.29 se expresa en función de la frecuencia angular  $\omega = 2\pi f$  y el vector de propagación  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  en la forma

$$\omega' = \omega + 2kv \quad (2.30)$$

La ecuación 2.30 considera que los haces son totalmente paralelos entre sí, y el punto P se sigue moviendo a la velocidad  $v$ . Teniendo en cuenta que  $\omega' = k'c$  y suponiendo que la velocidad de P es menor que la velocidad de la luz la ecuación 2.30 toma la forma

$$\omega'' = \omega + 2\omega_D \quad (2.31)$$

## 2.5. Movimiento Armónico de un objeto

El movimiento del objeto sometido a estudio, el cual es vibratorio, es decir, se mueve acercándose y alejándose del divisor del haz, dicho movimiento se puede expresar como una onda senoidal, tal y como se muestra

$$X(t) = X_o \sin(\omega t) \quad (2.32)$$

donde  $X_o$  es el desplazamiento máximo del objeto,  $\omega$  es la frecuencia angular del movimiento del objeto.

Derivando la ecuación 2.26, se obtiene la velocidad con que vibra el objeto, la cual se expresa de la siguiente manera

$$v = X_o \omega \cos(\omega t) \quad (2.33)$$

y la frecuencia angular del vibrómetro estará dada por

$$\omega_D = k X_o \omega \cos(\omega t) \quad (2.34)$$

## 2.6. Análisis Temporal y de Fourier de la Interferometría en el vibrómetro

### 2.6.1. Análisis Temporal para el vibrómetro

En la figura 2.15 los campos eléctricos de los haces de referencia y medición en el sistema se pueden expresar como

$$E_{ref} = E_{r0} \cos(\omega t + \phi_{ref}) \quad (2.35)$$

$$E_{med} = E_{m0} \cos(\omega'' t + \phi_{med}) \quad (2.36)$$

donde

$E_{ref}$ ,  $E_{med}$  son los campos eléctricos de referencia y medición respectivamente.

$E_{r0}$ ,  $E_{m0}$  son las magnitudes de los campos eléctricos de referencia y medición respectivamente.

$\omega$  es la frecuencia angular de la luz láser.

$\omega''$  es la frecuencia angular reflejada por el objeto que se está analizando.

$\phi_{ref}$ ,  $\phi_{med}$  son las fases de campo del sistema de referencia y de medición respectivamente.

De las ecuaciones 2.35 y 2.36 para el haz de referencia y para el haz de medición se tiene que

$$E_{ref}^2 = E_{r0}^2 \cos^2(\omega t + \phi_{ref}) \quad (2.37)$$

$$E_{med}^2 = E_{m0}^2 \cos^2(\omega t + \phi_{med}) \quad (2.38)$$

Obteniendo los valores promedio de  $E_{ref}^2$  y  $E_{med}^2$  y usando la ecuación 2.14 se tiene lo siguiente

$$I_{ref} = c\epsilon_0 \frac{E_{ref}^2}{2} \quad (2.39)$$

$$I_{med} = c\epsilon_0 \frac{E_{med}^2}{2} \quad (2.40)$$

La irradiancia total en el fotodetector está dada por

$$I = c\epsilon_0 \langle (E_{ref} + E_{med}) \cdot (E_{ref} + E_{med})^* \rangle \quad (2.41)$$

El promedio en el tiempo de la ecuación 2.41 se puede expresar de la siguiente manera

$$I = I_{ref} + I_{med} + 2\sqrt{I_{ref}I_{med}} \cos \delta \quad (2.42)$$

En donde  $\delta$  es

$$\delta = [(\omega'' - \omega)t + \Delta\phi] = [(\omega - \omega + 2\omega_D)t + \Delta\phi] = [(2\omega_D)t + \Delta\phi] \quad (2.43)$$

y la irradiancia total en el fotodetector es

$$I = I_{ref} + I_{med} + 2\sqrt{I_{ref}I_{med}} \cos(2\omega_D t + \Delta\phi) \quad (2.44)$$

La ecuación 2.44, se puede reescribir utilizando la ecuación 2.34 como

$$I = I_{ref} + I_{med} + 2\sqrt{I_{ref}I_{med}} \cos[2kX_o\omega \cos(\omega t)t + \Delta\phi] \quad (2.45)$$

La señal de intensidad detectada por el fotodetector, es una señal que varía en frecuencia a la razón  $2kX_o\omega \cos(\omega t)$ . Esta ecuación (siguiendo un análisis que se realiza en el estudio de señales de frecuencia modulada en donde el argumento representa en forma general una modulación de fase [18]) se puede escribir como [19]

$$I = I_{ref} + I_{med} + 2\sqrt{I_{ref}I_{med}} \cos[2kX_o\omega \sin(\omega t) + \Delta\phi] \quad (2.46)$$

Es decir, la variación de la frecuencia dada en la ecuación 2.45 produce una variación de la fase dada en la ecuación 2.46.

### 2.6.2. Análisis de Fourier para el vibrómetro

Para el cálculo de la transformada de Fourier de la irradiancia en el fotodetector se emplea la ecuación 2.46, de tal forma que se tiene lo siguiente

$$\mathfrak{F}[I] = \mathfrak{F}[I_{ref}] + \mathfrak{F}[I_{med}] + 2\sqrt{I_{ref}I_{med}}\mathfrak{F}\{\cos[2kX_o\omega \sin(\omega t) + \Delta\phi]\} \quad (2.47)$$

La transformada de Fourier para una constante está dada por la siguiente expresión  $\mathfrak{F}[A] = A2\pi\delta(\omega)$ , y obteniendo la transformada de Fourier tanto para los haces de referencia y de medición se tiene que

$$\mathfrak{F}[I_{ref}] = c\epsilon_0 E_{r0}^2 \pi \delta(\omega) \quad (2.48)$$

$$\mathfrak{F}[I_{med}] = c\epsilon_0 E_{m0}^2 \pi \delta(\omega) \quad (2.49)$$

Las expresiones anteriores nos muestran que la transformada de Fourier de las irradiancias ( $I_{ref}, I_{med}$ ), son dos pulsos en el origen, cuyas magnitudes son  $c\epsilon_0 E_{r0}^2 \pi$  y  $c\epsilon_0 E_{m0}^2 \pi$  respectivamente. Para el tercer término de la ecuación 2.47 se tiene lo siguiente

$$\mathfrak{F}\{\cos[2kX_o\omega \sin(\omega t) + \Delta\phi]\} = \mathfrak{F}\{\cos[2kX_o \sin(\omega t)]\cos\Delta\phi\} - \mathfrak{F}\{\sin[2kX_o \sin(\omega t)]\sin\Delta\phi\} \quad (2.50)$$

De la teoría de las funciones de Bessel [18],

$$\cos[2kX_o \sin(\omega t)] = J_0(2kX_o) + 2J_2(2kX_o)\cos(2\omega t) + 2J_4(2kX_o)\cos(4\omega t) + \dots \quad (2.51)$$

$$\sin[2kX_o \sin(\omega t)] = 2J_1(2kX_o)\sin(\omega t) + 2J_3(2kX_o)\sin(3\omega t) + 2J_5(2kX_o)\sin(5\omega t) + \dots \quad (2.52)$$

La función de Bessel de primer grado de n-ésimo orden ( $n = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$ ), está dada por  $J_n(2kX_o)$ , cuyo argumento es  $2kX_o$ . Por tanto el espectro de una vibración senoidal está compuesta por un número infinito de frecuencias laterales distribuidas simétricamente alrededor de la frecuencia  $\omega = 0$  y separadas en  $\omega$ . Por lo tanto la ecuación 2.47 se puede reescribir como

$$\begin{aligned}
\mathfrak{F}[I] &= c\epsilon_0\pi\delta(\omega)(E_{r0}^2 + E_{m0}^2) \\
&+ 2\sqrt{I_{ref}I_{med}}\mathfrak{F}\{J_0(2kX_o) + 2J_2(2kX_o)\cos(2\omega t) + 2J_4(2kX_o)\cos(4\omega t) + \dots\}\cos\Delta\phi \\
&- 2\sqrt{I_{ref}I_{med}}\mathfrak{F}\{2J_1(2kX_o)\sin(\omega t) + 2J_3(2kX_o)\sin(3\omega t) + 2J_5(2kX_o)\sin(5\omega t) + \dots\}\sin\Delta\phi
\end{aligned}
\tag{2.53}$$

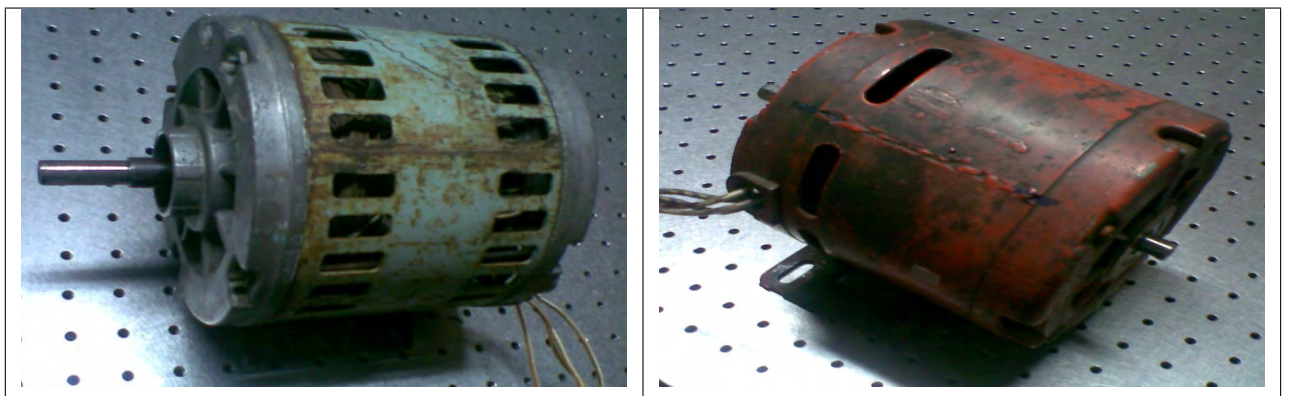




### 3 Desarrollo

En este capítulo se describe el desarrollo experimental del análisis de vibración del espectro de frecuencias de dos motores de inducción, para ello se utilizaron tres arreglos interferométricos experimentales distintos, con el fin de escoger a áquel que sea más estable a las vibraciones mecánicas.

Antes de continuar en la figura 3.1 se muestran los motores que se utilizaron para el análisis de frecuencias, son motores de inducción tipo jaula de ardilla monofásicos, los cuáles son motores que se reembobinaron, es decir, no son nuevos a excepción del embobinado.

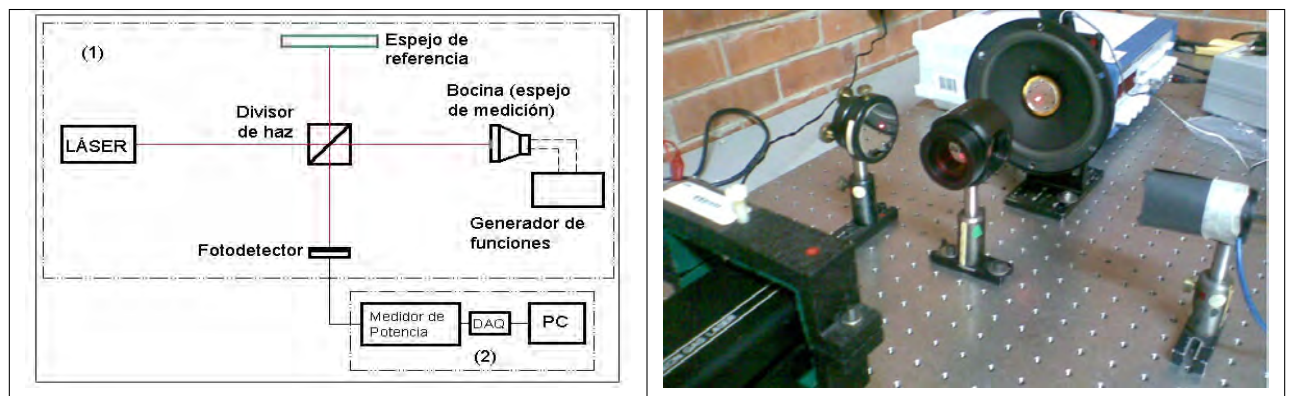


**Figura 3.1:** Motores monofásicos de 4 polos, 1800 rpm.

### 3.1. Arreglo experimental del vibrómetro láser

#### 3.1.1. Arreglo Óptico

Para armar el vibrómetro básico se utilizaron tres arreglos interferométricos diferentes: Michelson, Mach-Zehnder y el Cíclico; dichos vibrómetros constan de dos partes principales: Óptica (1) y el procesamiento de las señales (2), los interferómetros se muestran en las figuras 3.2 a 3.4. Ahí se muestran un esquema y una foto del arreglo óptico para cada uno de ellos.

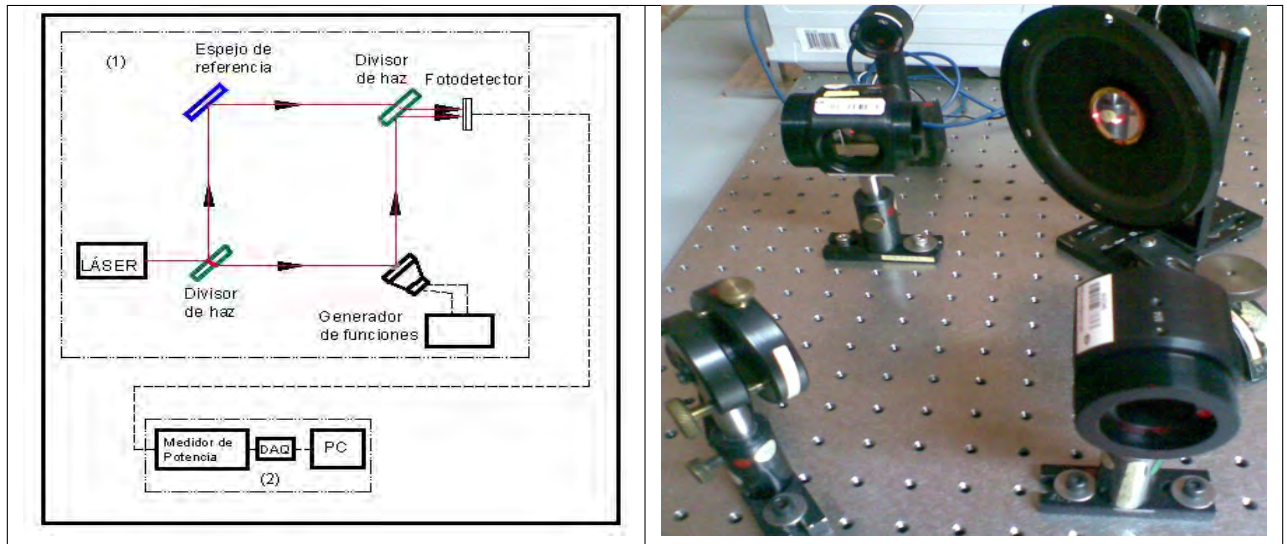


**Figura 3.2:** Arreglo y configuración del Interferómetro Michelson.

El arreglo óptico es el que se encarga de generar y recombinar la luz láser para obtener los patrones de interferencia que muestran o que dan cuenta de la vibración del espejo vibrante. La parte óptica la conforman los siguientes componentes:

1. Fuente de luz láser.
2. Espejos (referencia, medición, etc).
3. Divisores de haz de cubo.
4. Fotodetector.

#### **Fuente de luz láser**



**Figura 3.3:** Arreglo y configuración del Interferómetro Mach-Zehnder.

Se utilizaron como fuentes de luz láser para el sistema, un láser de Helio-Neón (He-Ne), con una longitud de onda de 632.8 nm, y una potencia de 4 mW, y se utilizó además un apuntador láser con longitud de onda de 650 nm y 4mW de potencia, como se muestran en la figura 3.5.

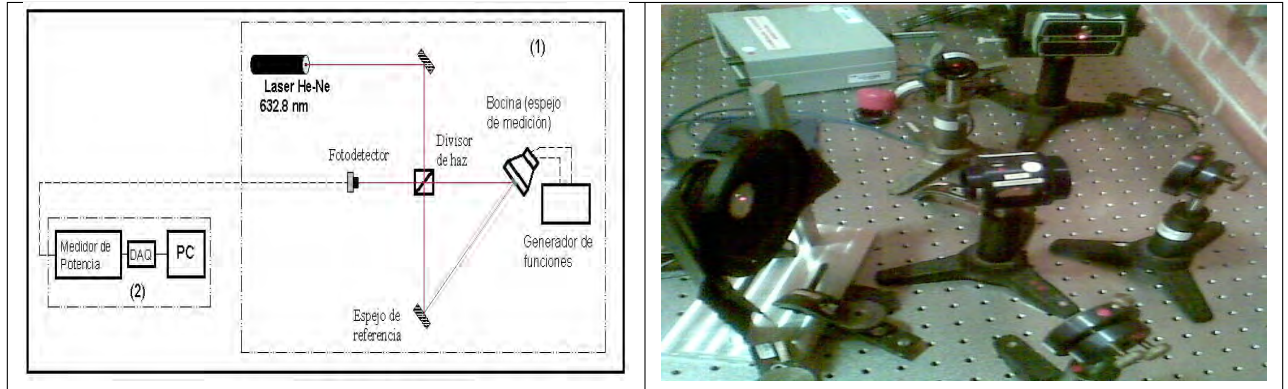
### Espejos (De referencia y de medición)

El espejo de *medición* es un espejo circular de 1.5 cm de diámetro aprox. y que tiene un espesor de 3 mm, y es un espejo de los convencionales. Dicho espejo se montó en el cono de una bocina para pruebas, tal y como se muestra en la figura 3.6. Para hacer oscilar la bocina se utilizó un generador de funciones Tektronix, en este dispositivo se generaron ondas senoidales a varias frecuencias de 10 a 3 kHz.

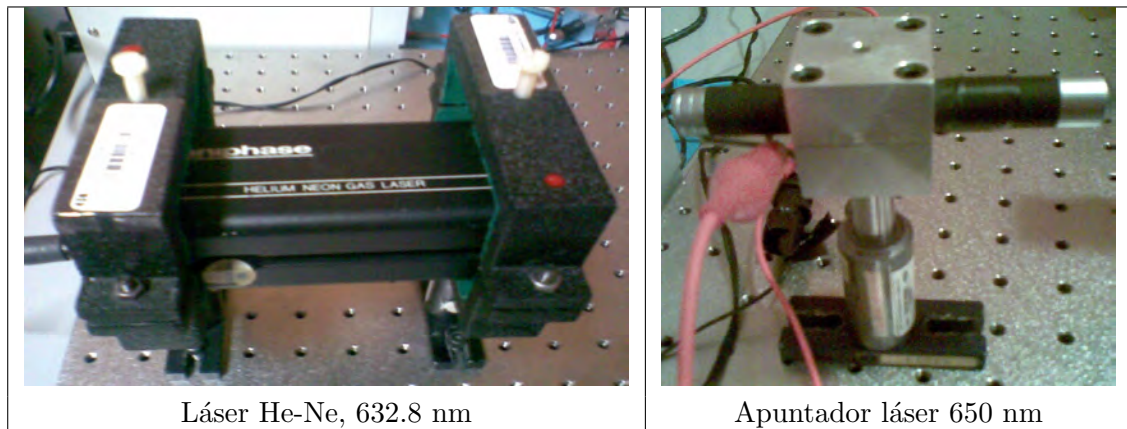
El espejo de *referencia*, es un espejo circular cuyo diámetro es de 2 pulgadas y tiene un espesor de 12 mm, la capa reflejante es de aluminio, el espejo se montó en un portaespejo tal y como se muestra en la figura 3.7.

### Divisor de haz

El divisor de haz que se utilizó, es un divisor de haz de cubo de 2 pulgadas no polarizado que divide el haz de luz en 50/50 tal y como se muestra en la figura 3.8, es decir, que los haces



**Figura 3.4:** Arreglo y configuración del Interferómetro Cíclico.



**Figura 3.5:** Fuentes de luz láser.

tienen la misma intensidad, y con la misma distribución espacial, en diferentes direcciones. Este dispositivo consiste en dos prismas de vidrio triangulares que están pegados por la base usando bálsamo de Canadá. El grosor de la capa de resina se ajusta para que a una cierta longitud de onda la mitad de la luz incidente sea reflejada y la otra mitad sea transmitida. El divisor de haz se montó en un portadivisor de haz de cubo de la marca Newport.

### Fotodetector

El fotodetector que se empleó es el 818-SL Low-Power de silicio (Si) de la marca Newport su rango con y sin atenuador está en el intervalo de 400 a 1100 nm de longitud de onda. El conector estándar BNC permite la interconexión flexible con osciloscopios, amplificadores, etc.



**Figura 3.6:** Espejo de medición montado en una bocina para pruebas.



**Figura 3.7:** Espejo de referencia.

El fotodetector es un transductor de luz que proporciona una señal eléctrica como respuesta a la radiación óptica que incide sobre la superficie sensora el cual se muestra en la figura 3.9, la señal eléctrica es recibida por un medidor de potencia el cual amplifica dicha señal.

A continuación se muestran algunas especificaciones del fotodetector 818 -SL:

- Rango espectral (400 a 1100 nm).
- Material: Silicon
- Tipo de conector : BNC.
- Incertidumbre en la calibración: 1% a 400 - 940 nm.



**Figura 3.8:** Divisor de haz de cubo (2 pulgadas, no polarizado).



**Figura 3.9:** Fotodetector.

- Incertidumbre en la calibración con atenuador 1% a 400 - 940 nm.
- Linealidad:  $\pm 0.5\%$

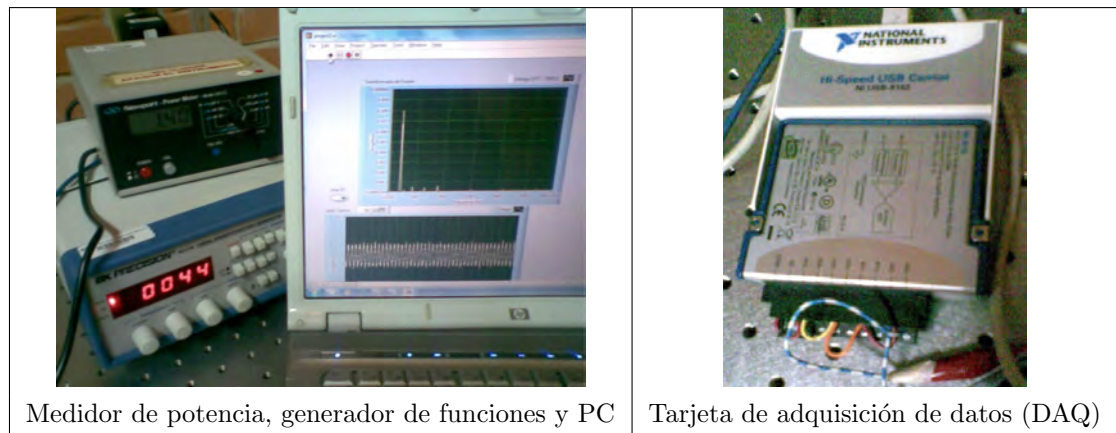
### 3.1.2. Adquisición y Procesamiento de señales

En esta parte de la señal eléctrica (voltaje) obtenida del medidor de potencia es analizada y posteriormente procesada, esta etapa se integra con los siguientes componentes:

1. Medidor de potencia Newport 1815-C.
2. Cable blindado BNC-Caimán.
3. Una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) NI-USB 9481.

4. Una PC con software desarrollado en LabView.

El voltaje que se obtiene del medidor de potencia es enviada mediante el cable BNC-Caimán a la DAQ, ésta interpreta la señal recibida como una señal variante en el tiempo y para un mayor análisis de esta señal se utiliza un programa desarrollado en LabView. Para enviar la señal que sale del medidor de potencia óptico hacia la PC se emplea una DAQ NI-USB 9481, el programa de usuario utiliza la transformada rápida de Fourier (FFT), para procesar la señal recibida en el dominio del tiempo. El programa permite al usuario la facilidad de almacenar los datos obtenidos de la medición en el dominio del tiempo para su posterior análisis. En la figura 3.10 se muestran los componentes físicos que conforman la etapa de adquisición y procesamiento.



**Figura 3.10:** Adquisición y procesamiento de señales.

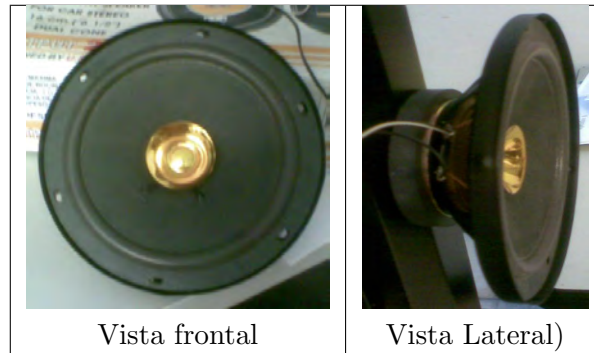
### Características de la bocina usada

La bocina utilizada para pruebas es como se muestra en la figura 3.11, la cuál tiene las siguientes características:

- Impedancia de  $4 \Omega$ .
- Frecuencia de respuesta: 40 Hz - 20000 Hz.
- Cono de polipropileno.
- Diámetro de 12.7 cm (5 in).



- Sensibilidad de 92 dB/W (1 m).
- Potencia máxima : 250 W.
- Peso 1.78 Kg.



**Figura 3.11:** Bocina de prueba.

### 3.1.3. Montaje del vibrómetro láser

El montaje para el vibrómetro básico utilizando los tres interferómetros se hizo en una Optical Breadboards (mesa óptica) de  $2 \times 4 \text{ ft} \times 2.4 \text{ in.}$ , 1/4 - 20 agujeros tal y como se muestra en la figura 3.12.



**Figura 3.12:** Mesa Óptica.

## **4** Resultados

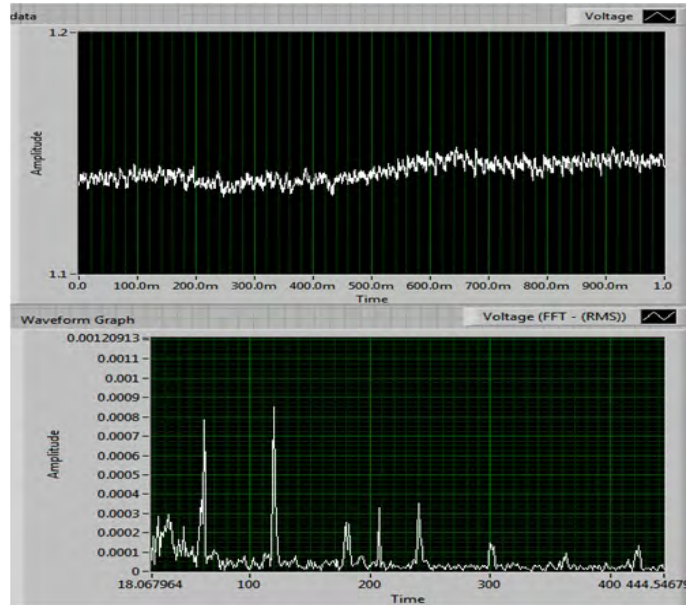
### **4.1. Interferómetro Michelson**

El primer interferómetro que se armó para construir un vibrómetro láser fue el interferómetro de Michelson tal y como se muestra en la figura 3.2, al analizar la señal obtenida del medidor de potencia óptico se observó un gran nivel de ruido, para cada una de las frecuencias con las que se hacía vibrar la bocina, la frecuencia generada era muy tenue en comparación al nivel de ruido generado, además es muy sensible a las vibraciones mecánicas, ya que con el simple hecho de apoyarse a la mesa donde fue montado el arreglo óptico, variaban las señales obtenidas, por lo que introducía mucho ruido, y por lo tanto se decidió descartar este interferómetro y probar con otro que fuera más estable.

### **4.2. Interferómetro Mach-Zehnder**

Al armar el interferómetro de Mach-Zehnder figura 3.3, y al utilizar una fuente de luz láser de He- Ne, y al hacer vibrar la bocina a diferentes frecuencias de 40 a 1500 Hz, se obtuvieron varias respuestas, las cuales al ser procesadas y aplicar la FFT, mostraba los espectros de frecuencia obtenidos de la señal extraída del fotodetector. La figura 4.1 muestra la señal eléctrica y su transformada de Fourier medida por el vibrómetro básico, cuando la bocina es alimentada a una frecuencia de 60.24 Hz.

En la gráfica de FFT se observa la frecuencia de alimentación a la bocina pero además se observan otros picos de frecuencia, los cuales algunos son debidos a los armónicos de la frecuencia fundamental, otros son debido a que las pruebas se hicieron con lámparas encendidas y parte de la iluminación llegaba al fotodetector por lo que aparece una frecuencia fundamental de 120 Hz y



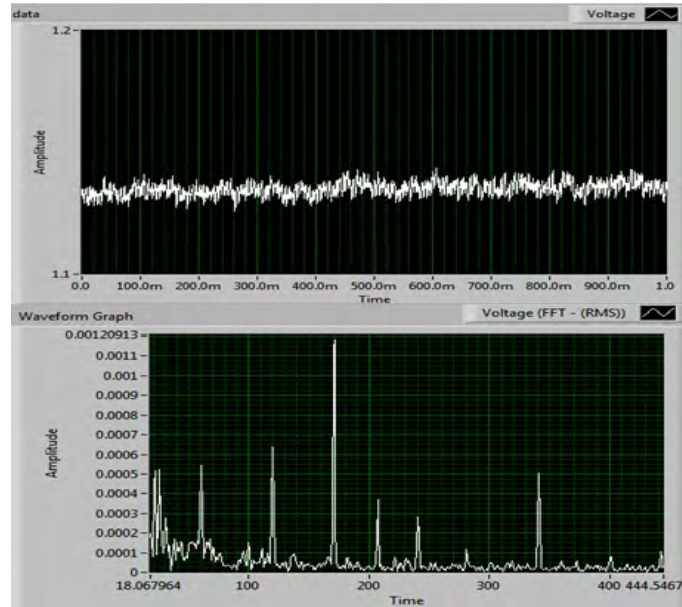
**Figura 4.1:** Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Mach-Zehnder para una frecuencia de 60.24 hz en la bocina utilizando un láser He-Ne.

sus armónicos. Dicha frecuencia representa la periodicidad con que varía la potencia que se aplica energía a las lámparas, la cual es el doble de la frecuencia de 60 Hz de línea.

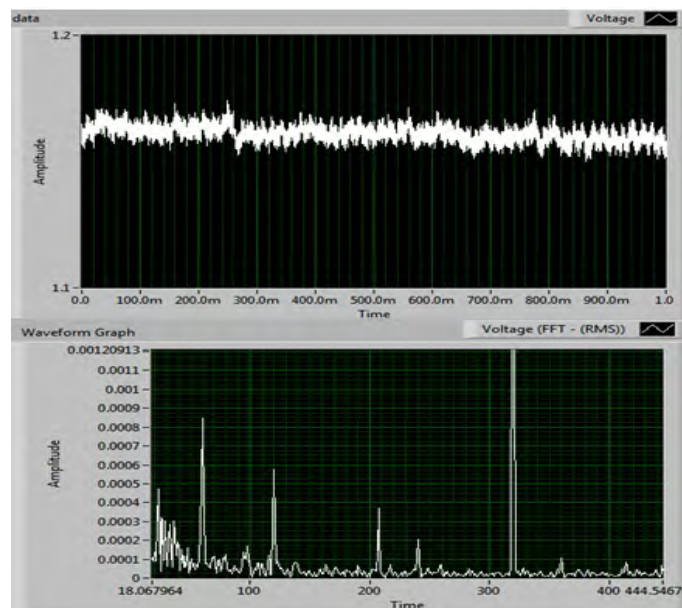
Además se observa también en las gráficas una frecuencia de 60 Hz que a parte de la amplitud de la frecuencia de vibración de la bocina, está presente en cada medición de las otras frecuencias de vibración, y esa frecuencia se genera en el medidor de potencia, ya que se observó que aún con la luz apagada esa frecuencia no desaparece.

De lo anterior se puede concluir que el ruido detectado por el medidor es debido a la radiación de las lámparas principalmente que incide en el fotodetector y también a la fuente de luz láser He-Ne, pero además también se observan otros picos de frecuencia más pequeños que son obtenidas al ruido generado por vibraciones externas y porque el montaje de la bocina no es 100 % rígido.

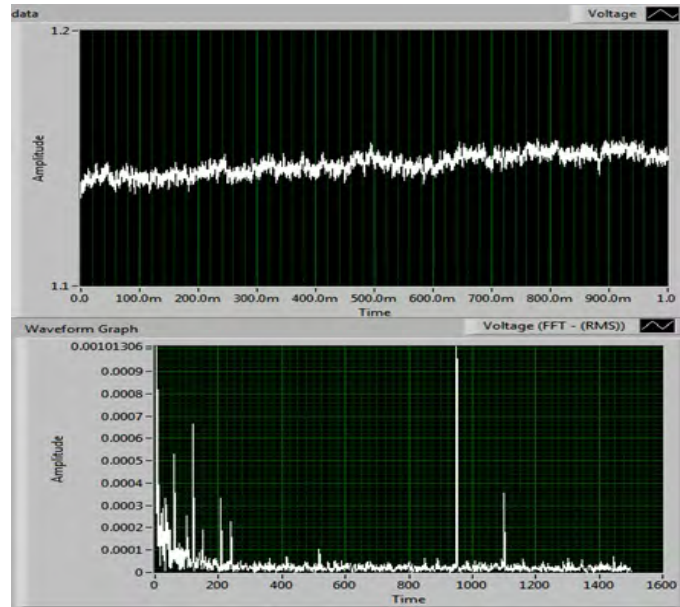
Las mediciones realizadas con el vibrómetro son adecuadas si generan su espectro de Fourier con poco ruido y aparece claramente la frecuencia de la señal de excitación de la bocina. Como se muestra en las figuras 4.2 a 4.5 se observa que conforme se aumenta la frecuencia de oscilación en la bocina se incrementa el ruido.



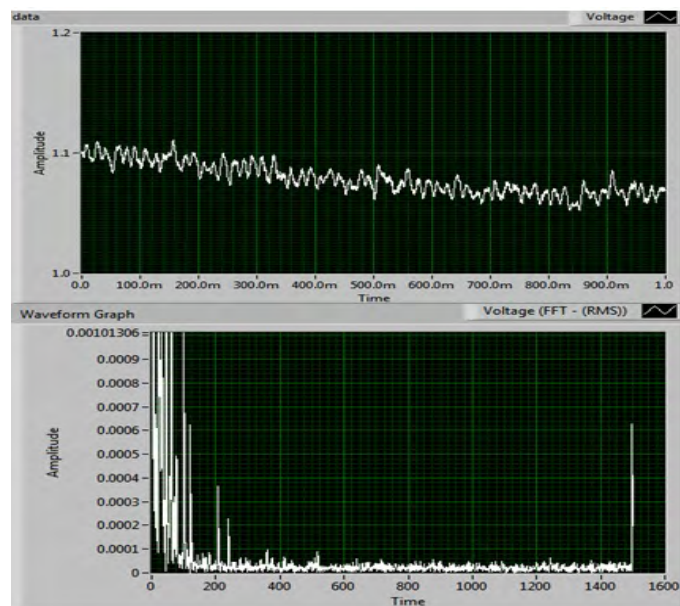
**Figura 4.2:** Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Mach-Zehnder para una frecuencia de 170.48 Hz en la bocina utilizando un láser He-Ne.



**Figura 4.3:** Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Mach-Zehnder para una frecuencia de 314 Hz en la bocina utilizando un láser He-Ne.



**Figura 4.4:** Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Mach-Zehnder para una frecuencia de 950 Hz en la bocina utilizando un láser He-Ne.



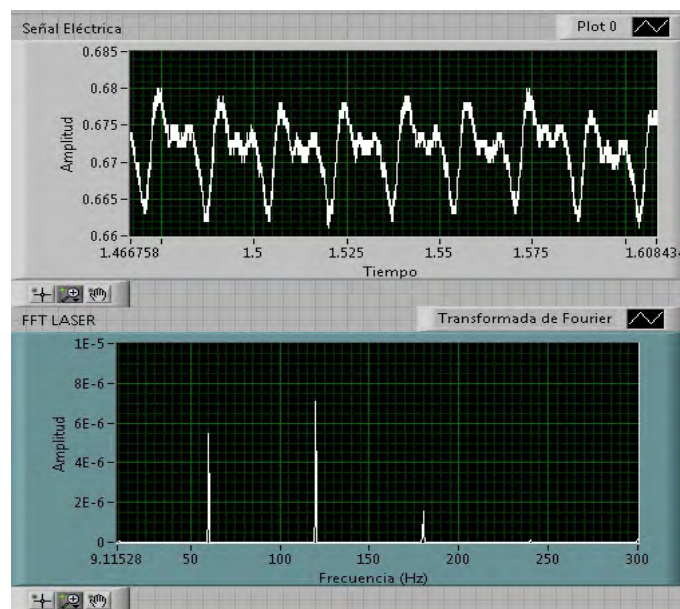
**Figura 4.5:** Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Mach-Zehnder para una frecuencia de 1502 Hz en la bocina utilizando un láser He-Ne.

Se puede ver que conforme aumenta la frecuencia de oscilación en la bocina se ven más picos en la FFT de la señal eléctrica.

El interferómetro Mach-Zehnder es más estable si se compara con el Michelson, pero al igual que éste también tiene ruido, y se procedió a buscar un interferómetro que fuera más estable y que las mediciones arrojadas en una gráfica de FFT aparezca claramente la frecuencia de oscilación de la bocina y con poco o casi nada de ruido.

### 4.3. Interferómetro Cíclico

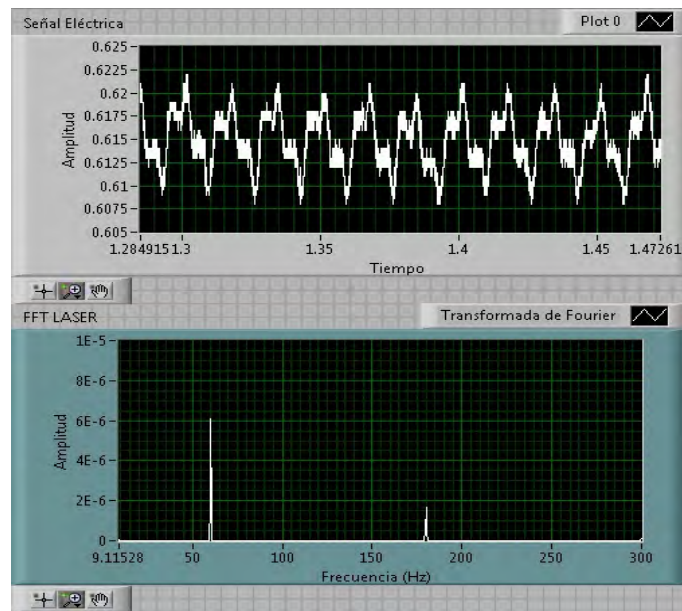
En la búsqueda de información de algún interferómetro que fuera estable a las vibraciones mecánicas, se encontró el interferómetro Cíclico el cual se muestra en la figura 3.4. Se hizo la prueba inicialmente sin aplicar ninguna frecuencia a la bocina, con la luz del laboratorio encendida y los resultados se muestran en la figura 4.6.



**Figura 4.6:** Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico sin alimentación a la bocina, con la luz encendida y utilizando un láser He-Ne.

Se observa claramente en la FFT los picos de frecuencia que son generados por el ruido

mencionado en el interferómetro de Mach-Zehnder, la frecuencia de mayor amplitud es la de 120 Hz, que es generada por la luz del laboratorio, se observa que las amplitudes de éstas frecuencias son muy pequeñas. Se observa en la figura 4.7 la señal obtenida al no aplicar ninguna frecuencia a la bocina y con la luz apagada, se pueden ver las diferencias con la figura 4.6.

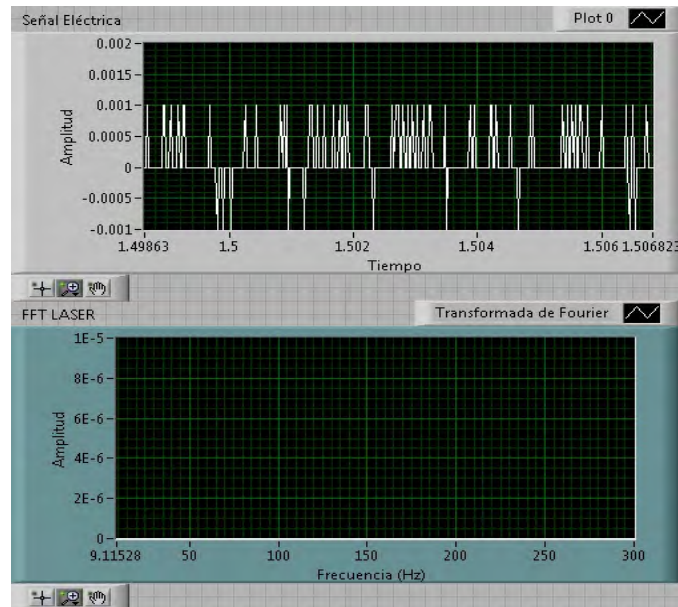


**Figura 4.7:** Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico sin alimentación a la bocina, con la luz apagada y utilizando un láser He-Ne.

Y se observa que la frecuencia de 60 Hz, y sus armónicos se debe en parte a la fuente de luz láser He-Ne y a la luz del laboratorio.

Se hizo una prueba con el medidor apagado, tal y como se muestra en la figura 4.8, ahí se puede observar como la amplitud de la gráfica temporal es muy pequeña y en su FTT no se observan picos, aunque si los hay si decrementamos el valor de la amplitud. La señal obtenida de la luz láser no es completamente de DC, por lo que si se pueden observar picos de frecuencia a menor amplitud.

Al utilizar este interferómetro para construir un vibrómetro básico se observó con pruebas experimentales que las mediciones obtenidas tenían poco ruido. Inicialmente se utilizó un láser He-Ne de 4mW como fuente de luz. A continuación se muestra en las figuras 4.9 a 4.13, los datos



**Figura 4.8:** Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico sin alimentación a la bocina, con el medidor de potencia apagado y utilizando un láser He-Ne.

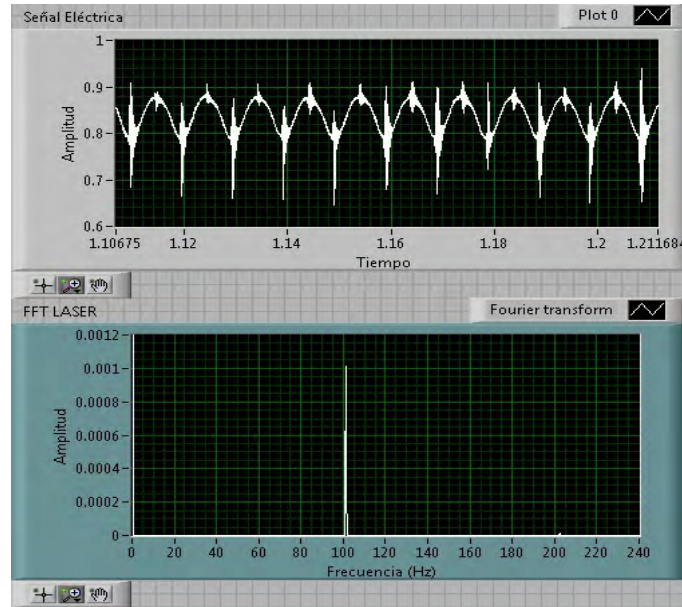
obtenidos para algunas frecuencias aplicadas a la bocina.

Después de que se probó que el interferómetro Cíclico era más estable, esto debido a que la amplitud de la frecuencia que se introducía a la bocina era muy notoria, y había muy poco ruido en el espectro de frecuencias, se decidió probar un apuntador láser como el que se utiliza en cualquier presentación que en nuestro caso tenía una longitud de onda de 650 nm y 4mW de potencia, se decidió probarlo con el fin de abaratar el costo de construcción del vibrómetro. Enseguida se muestra en las figuras 4.14 a 4.19 , los datos obtenidos para algunas frecuencias aplicadas a la bocina utilizando un apuntador láser.

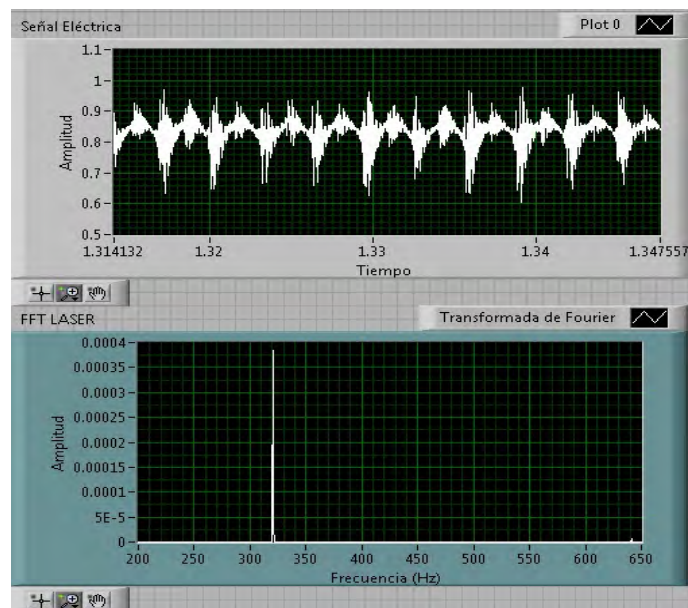
Los datos obtenidos con el apuntador láser son muy satisfactorios, no hay mucha diferencia entre usar un láser He-Ne y el apuntador, a pesar de que haya mucha diferencia en la coherencia de la luz, ésta en el proyecto no influye para nada por lo que se decidió hacer el análisis de frecuencias para los motores de la figura 3.1, que son motores monofásicos tipo jaula de ardilla, que son los más convencionales que se emplean en las empresas.

Antes de realizar las pruebas con los motores de la figura 3.1, se hicieron algunas pruebas con

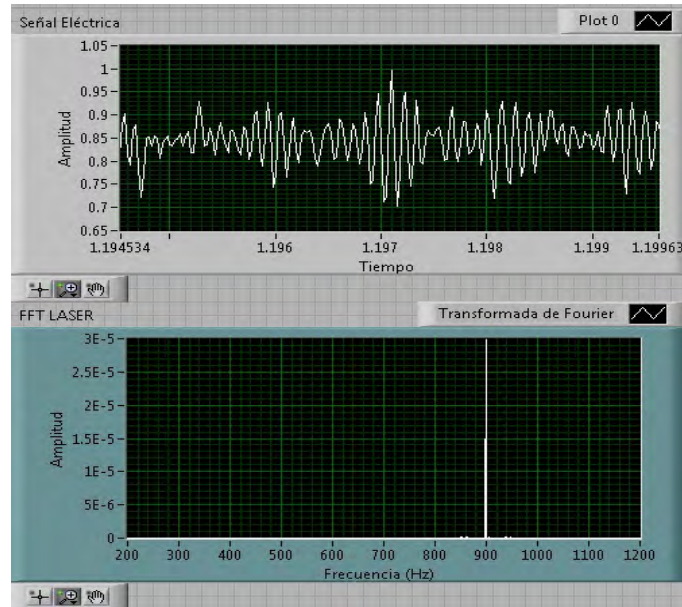




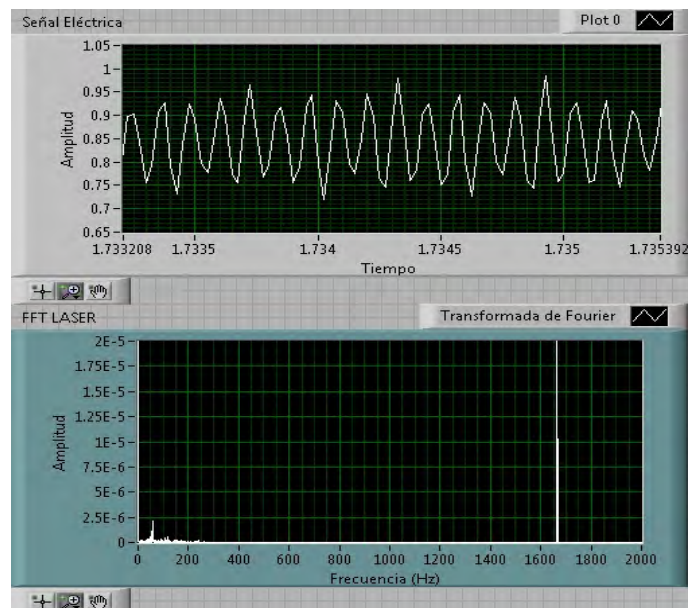
**Figura 4.9:** Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico para una frecuencia de 100 Hz en la bocina utilizando un láser He-Ne.



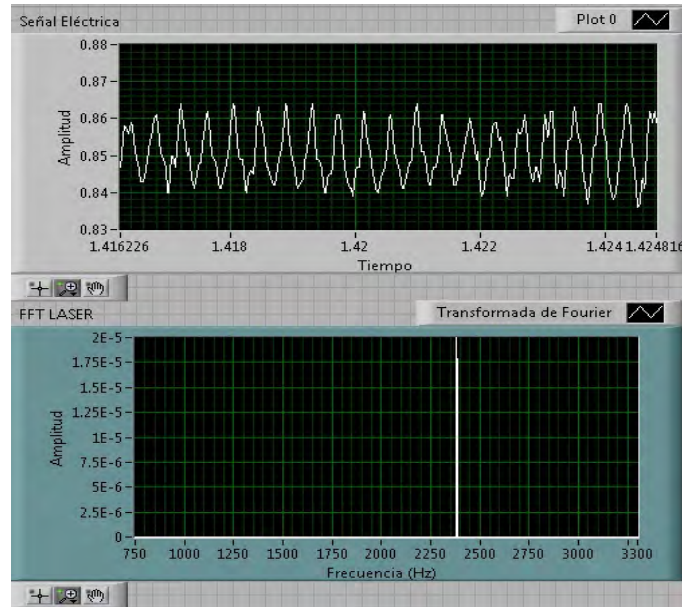
**Figura 4.10:** Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico para una frecuencia de 320 Hz en la bocina utilizando un láser He-Ne.



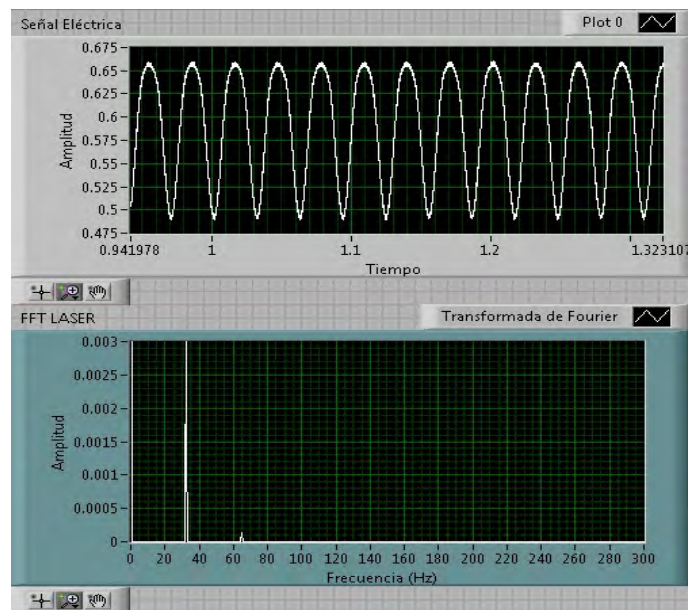
**Figura 4.11:** Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico para una frecuencia de 900 Hz en la bocina utilizando un láser He-Ne.



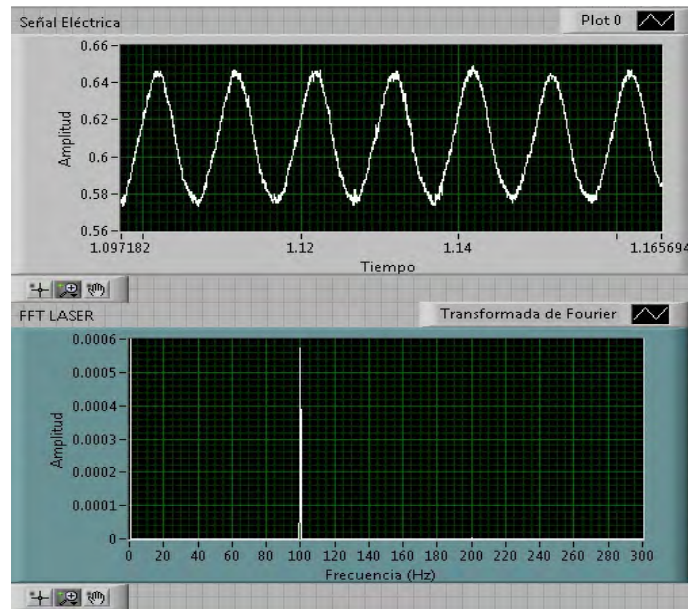
**Figura 4.12:** Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico para una frecuencia de 1665 Hz en la bocina utilizando un láser He-Ne.



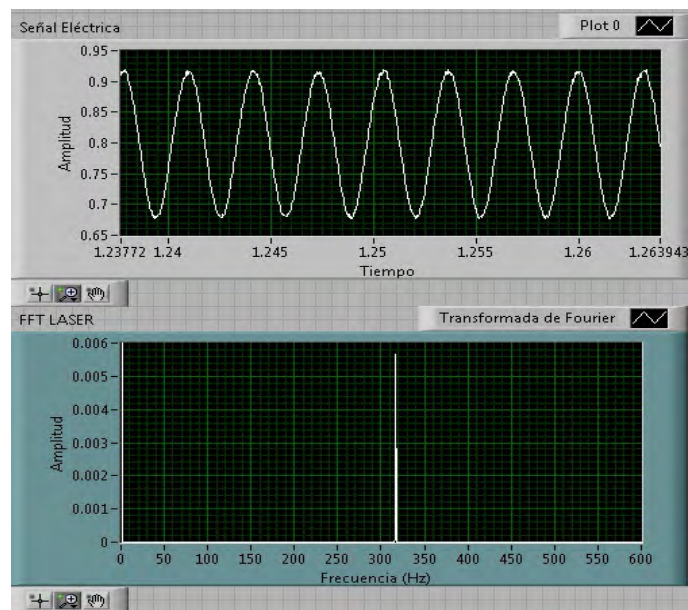
**Figura 4.13:** Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico para una frecuencia de 2380 Hz en la bocina utilizando un láser He-Ne.



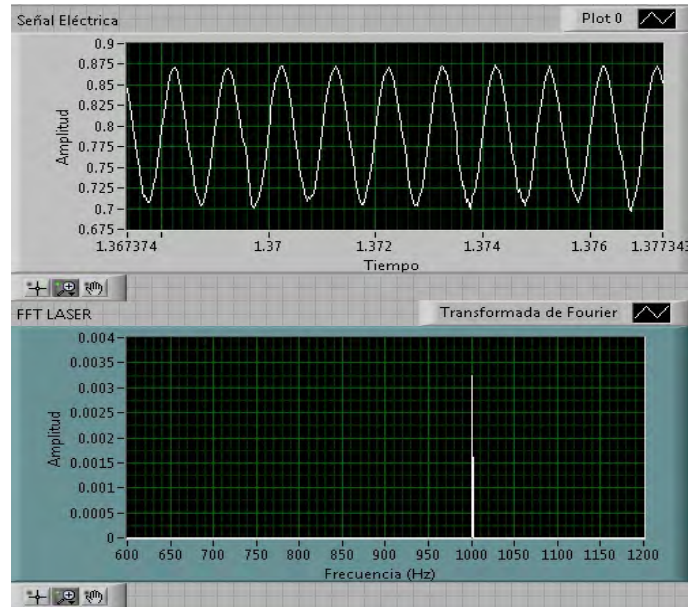
**Figura 4.14:** Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico para una frecuencia de 32 Hz en la bocina utilizando un apuntador láser.



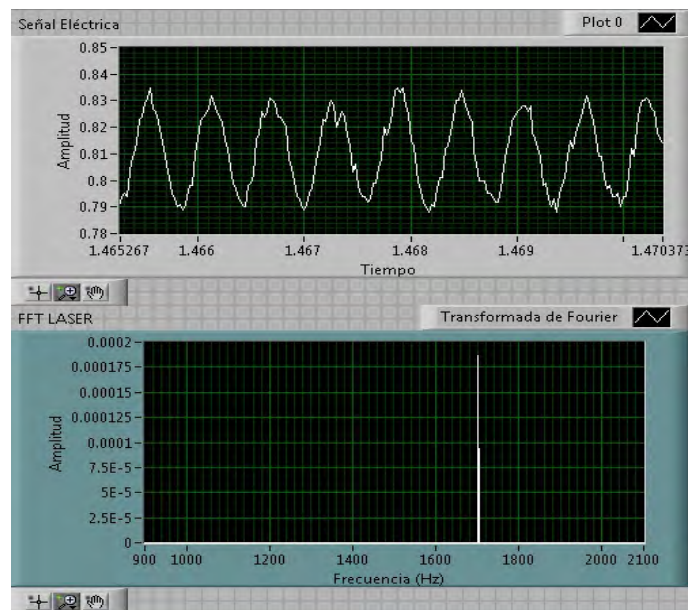
**Figura 4.15:** Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico para una frecuencia de 100 Hz en la bocina utilizando un apuntador láser.



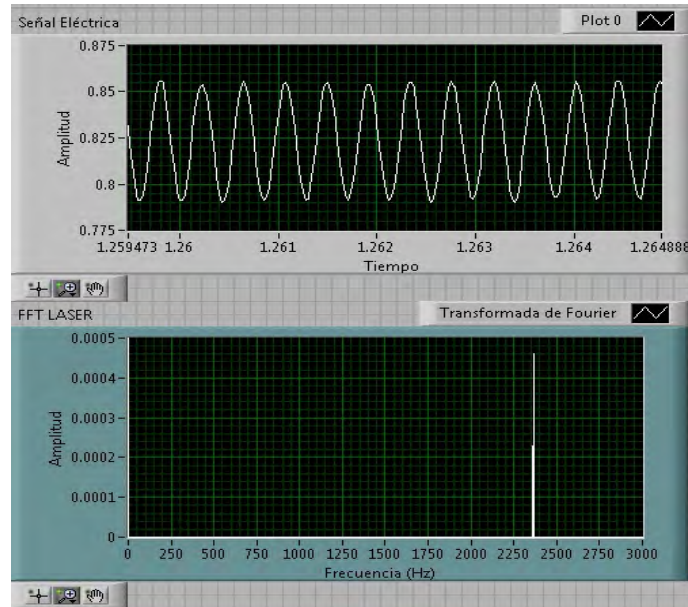
**Figura 4.16:** Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico para una frecuencia de 315 Hz en la bocina utilizando un apuntador láser.



**Figura 4.17:** Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico para una frecuencia de 1000 Hz en la bocina utilizando un apuntador láser.



**Figura 4.18:** Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico para una frecuencia de 1700 Hz en la bocina utilizando un apuntador láser.



**Figura 4.19:** Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico para una frecuencia de 2360 Hz en la bocina utilizando un apuntador láser.

un motor reductor que cuenta con las características que se presentan en el cuadro 4.1.

**Cuadro 4.1:** Características del motor reductor

Modelo	CM24D25NZ10A
Voltaje	130 V
Corriente	0.35A
Potencia	25.724W
Torque	14 lb· in
Velocidad	139 rpm
Reducción	18

Se tuvo una gran dificultad para poder alinear el interferómetro, debido a la carcasa irregular del motor reductor, además de que por su tamaño se tuvo que montar en una mesa de desplazamiento vertical, para que pudiera reflejar el haz y producir la interferencia, el montaje del motor se muestra en la figura 4.20.

A el motor se le estuvo variando la velocidad de giro, por medio de un variador, y se obtuvo el espectro de frecuencias (FFT) para algunas de las velocidades de giro las cuáles se muestran en



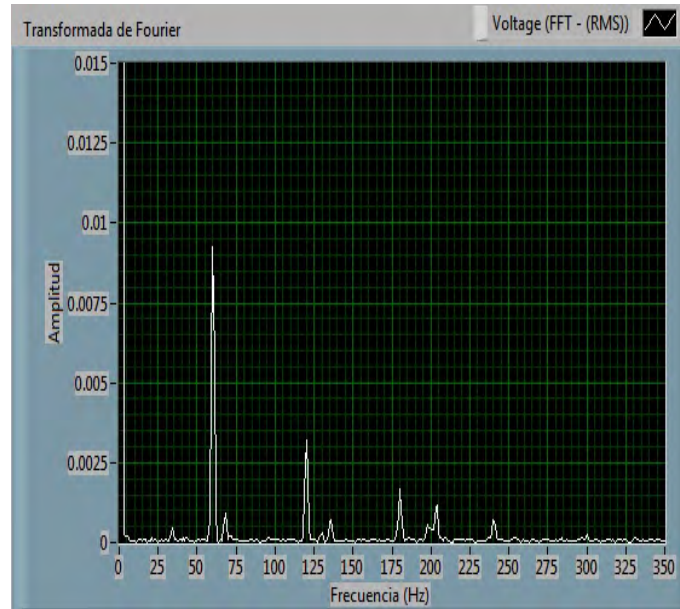
**Figura 4.20:** Montaje del motor reductor.

las figuras 4.21 a 4.23.

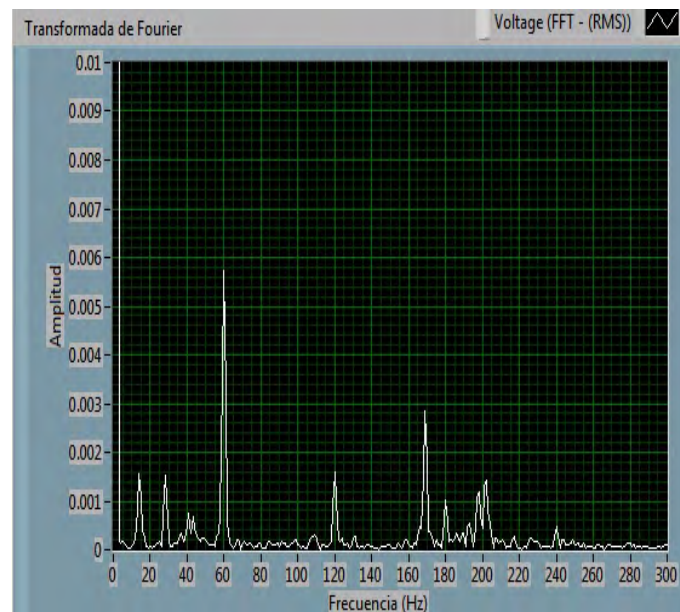
En los espectros se siguen observando las frecuencias indeseadas generadas por la fuente de luz láser y por la luz del laboratorio, además de otras frecuencias generadas por la mesa elevadora, debido a que no es rígida que corresponden a frecuencias bajas. En la figura 4.21 no se puede observar la frecuencia natural debido a que su pico tendría que estar a la frecuencia de 5.4 Hz. En la figura 4.22 si se alcanza a ver la frecuencia natural que es de 13.74 Hz y para la figura 4.23 también se observa la frecuencia natural la cual corresponde al pico de 26.1 Hz. Cabe mencionar que dichas frecuencias son para la velocidad del rotor, ya que por el lugar de donde se colocó el espejo la frecuencia de vibración correspondería al rotor. En la figura 4.24 se muestra el espectro e frecuencia de 0 a 4500 Hz para una velocidad de giro de 70.2 rpm, en la cuál aparecen picos de alta frecuencia, que son generados por el sistema reductor (engranes).

Por otra parte se analizó con un osciloscopio la señal de alimentación eléctrica al motor reductor, y se observó que no era senoidal, sino era una señal pulsada, esto debido a la configuración electrónica del variador de velocidad.

Se empleó también un motor para una máquina de coser ropa tal y como se muestra en la figura 4.25, y al igual que en el motor reductor se tuvo problemas para poder montarlo y alinear los haces de luz; y como se observa en la figura también se utilizó la mesa elevadora para sostenerlo.

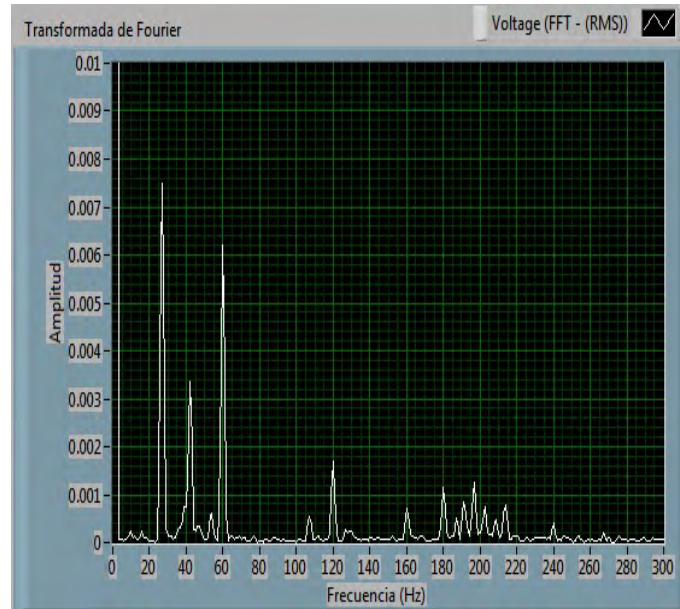


**Figura 4.21:** FFT de la señal obtenida con el interferómetro Cíclico para el motor reductor a una velocidad de 18.3 rpm.

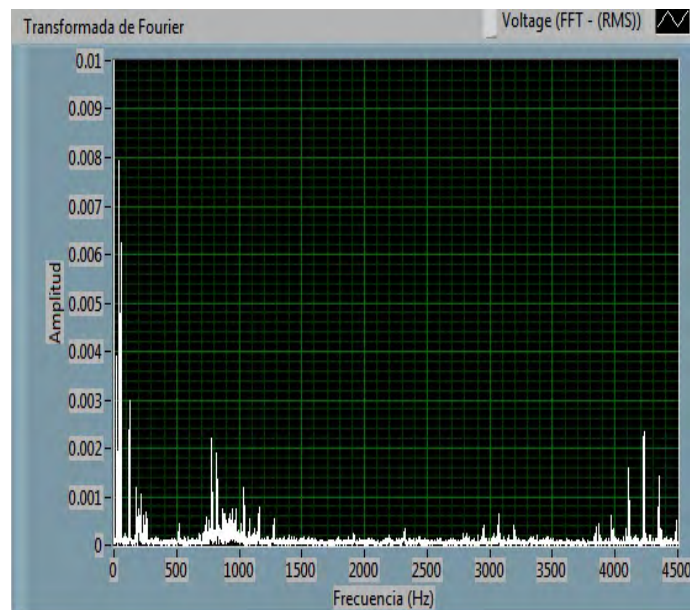


**Figura 4.22:** FFT de la señal obtenida con el interferómetro Cíclico para el motor reductor a una velocidad de 45.8 rpm.





**Figura 4.23:** FFT de la señal obtenida con el interferómetro Cíclico para el motor reductor a una velocidad de 87 rpm.



**Figura 4.24:** FFT de la señal obtenida con el interferómetro Cíclico para el motor reductor a una velocidad de 70 rpm.

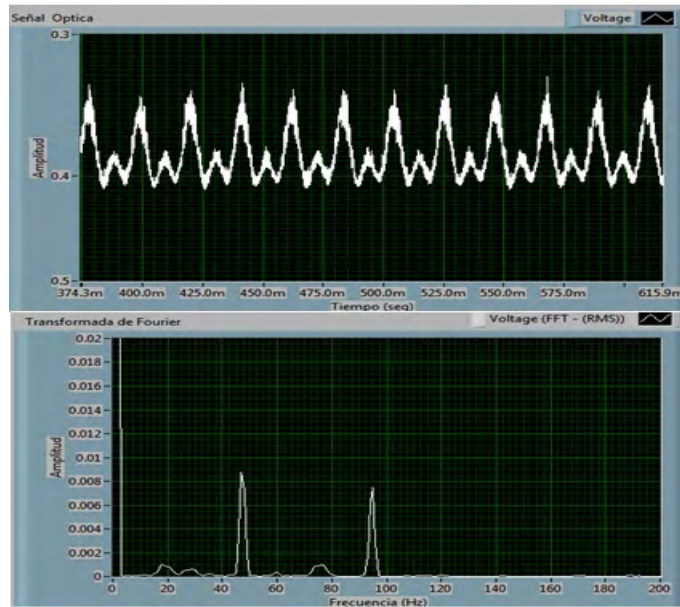
El rotor para una máquina de coser gira a altas velocidades, a continuación se muestran algunas de sus características:

- Voltaje: 110 V.
- Corriente: 1.0 A
- Potencia: 100W.
- Velocidad: 7000 rpm.
- Frecuencia: 50-60 Hz.

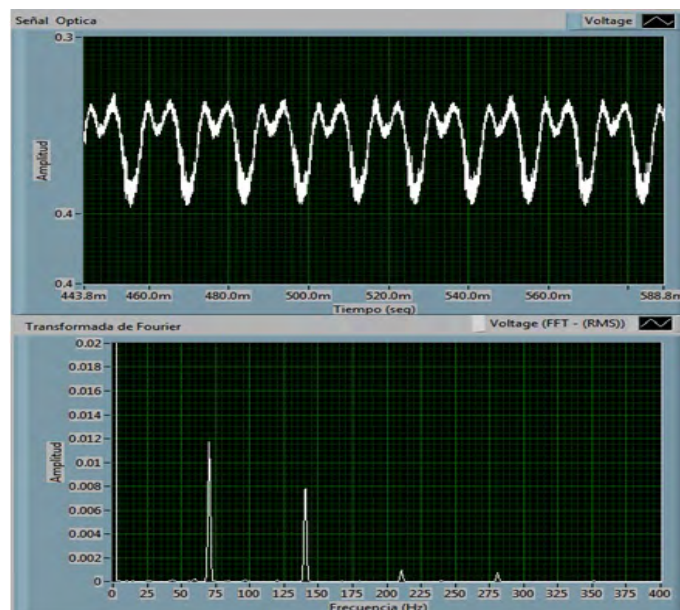


**Figura 4.25:** Interferómetro Cíclico para analizar el motor de una máquina de coser ropa.

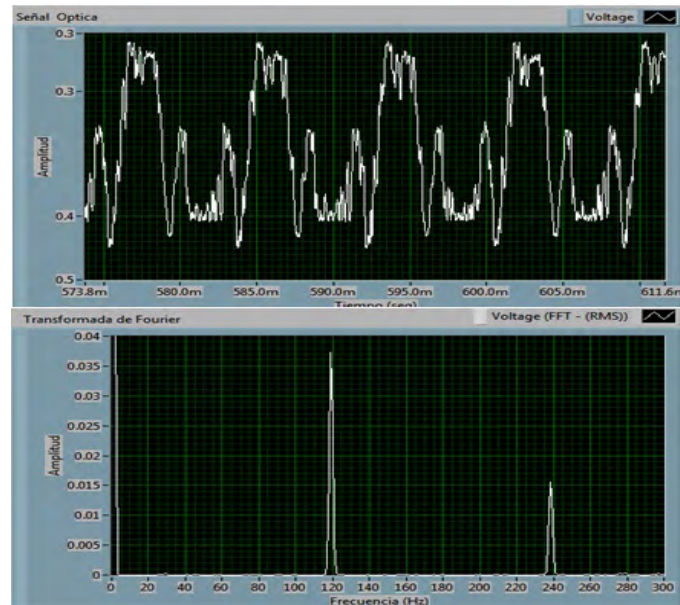
A continuación se muestran en las figuras 4.26 a 4.28 algunos resultados para diferentes velocidades, las cuales se hicieron variar por medio de un pedal que es un potenciómetro. En cada una de las señales obtenidas se observa la frecuencia natural del giro del rotor, por ejemplo para la velocidad de giro de 2640 rpm, le corresponde una frecuencia de 44 Hz, y de la misma para la velocidad de giro de 7080 rpm le corresponde una frecuencia de 118 Hz, y en los espectros de frecuencia también se logran ver los armónicos para dichas frecuencias.



**Figura 4.26:** Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico para el motor de coser a una velocidad de 2640 rpm.



**Figura 4.27:** Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico para el motor de coser a una velocidad de 4140 rpm.



**Figura 4.28:** Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico para el motor de coser a una velocidad de 7080 rpm.

Una vez de haber hecho las pruebas al motor reductor, se procedió a armar el arreglo óptico con los motores de inducción mostrados en la figura 3.1, y al igual que con el motor reductor se tuvieron muchos problemas para poder alinear los haces y que hicieran interferencia, para que el haz que llega al motor se reflejará, se le colocó un espejo tal y como se muestra en la figura 4.29, el cual se adhirió al motor por medio de un pequeño imán de cadmio, y debido a que la carcasa del motor no es uniforme resultó un poco complicado poder alinearlo. Las ventajas respecto al motor reductor son de que se pudieron asentar rígidamente a la mesa holográfica y que la señal eléctrica de alimentación era senoidal que es con la que generalmente trabajan los motores de inducción.

Una vez que se logró alinear y producir la interferencia de los haces, se obtuvieron los resultados mostrados en las figuras 4.30 y 4.31, donde cada uno de los resultados es debido a que el espejo se colocó en varias lugares de la carcasa del motor.

Se observa la frecuencia natural de vibración del motor verde, el cual gira a una velocidad de 1800 rpm por lo que le corresponde una frecuencia natural de 30 Hz, . Además de observar la frecuencia natural se muestran los armónicos para esta frecuencia.

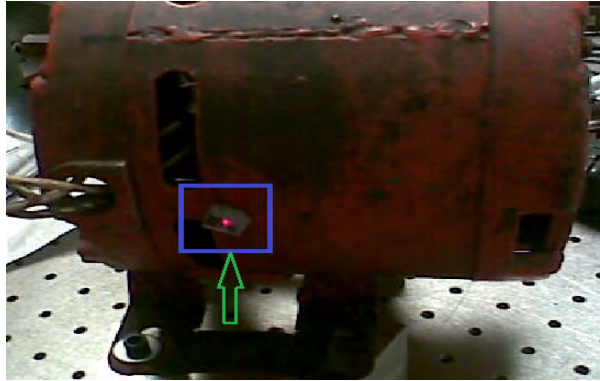


Figura 4.29: Espejo de medición colocado en uno de los motores de inducción.

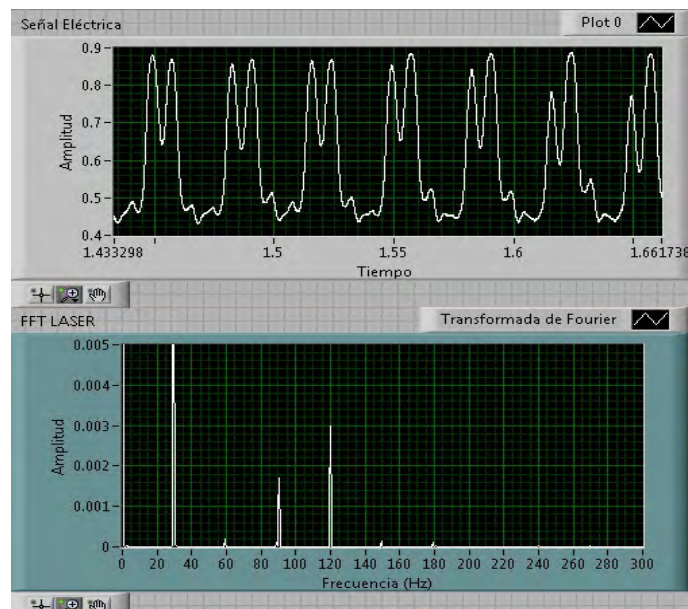
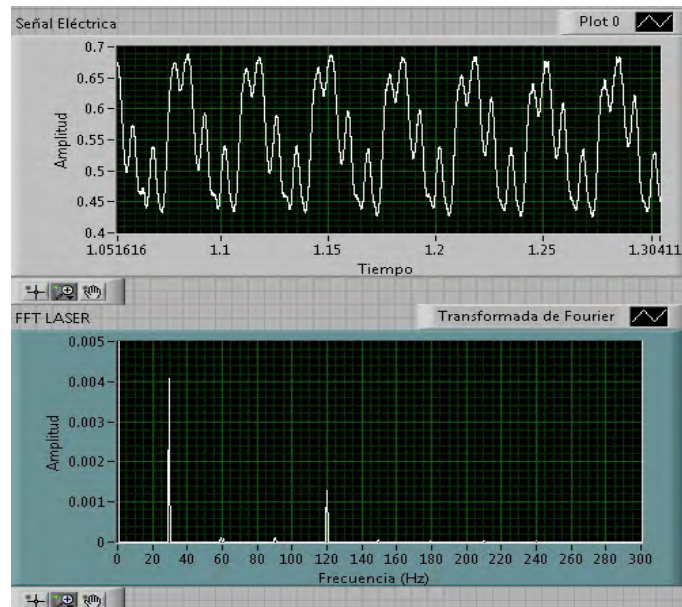


Figura 4.30: Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico para el motor de inducción verde sin carga y con una velocidad de 1800 rpm, con el espejo colocado en la parte lateral del motor.



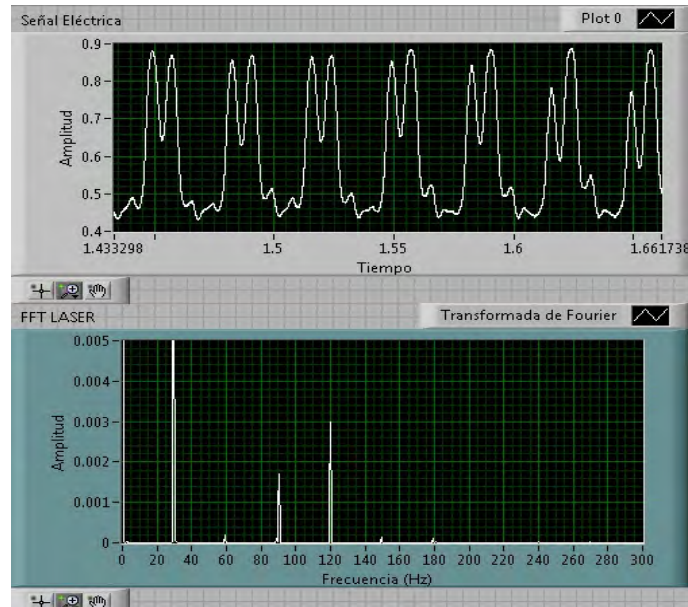
**Figura 4.31:** Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico para el motor de inducción **verde** sin carga y con una velocidad de 1800 rpm, con el espejo colocado en la parte **frontal** del motor.

Este mismo procedimiento se hizo para el motor naranja, se obtuvieron algunos resultados cambiando el espejo en diferentes lugares de la carcasa como se muestran en las figuras 4.32 y 4.33.

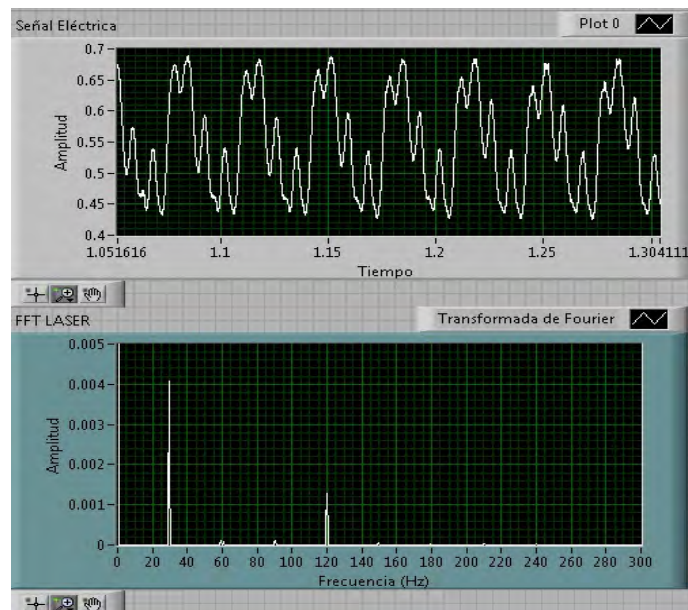
Se observa la frecuencia natural de vibración del motor naranja, que gira a una velocidad de 1400 rpm cuya frecuencia corresponde a 23.3 Hz. Además de observar la frecuencia natural se observan los armónicos para esta frecuencia.

Al motor verde se le colocó un cople con el fin de desbalancear el motor y ver como se comportaba la señal, tal y como se muestra en la figura 4.34, y en la figura 4.35 se muestra la señal con el motor desbalanceado intencionalmente.

Una vez realizado las pruebas con los motores se procedió a hacer un diseño por computadora del prototipo del vibrómetro con interferómetro Cíclico, el programa que se utilizó fue el Autocad, en las figuras 4.36 y 4.37, se muestran el isométrico tanto externo como interno respectivamente.



**Figura 4.32:** Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico para el motor de inducción **naranja** sin carga y con una velocidad de 1400 rpm, con el espejo colocado en la parte **lateral** del motor.



**Figura 4.33:** Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico para el motor de inducción **naranja** sin carga y con una velocidad de 1400 rpm, con el espejo colocado en la parte **frontal** del motor.



Figura 4.34: Cople para desbalancear el motor.

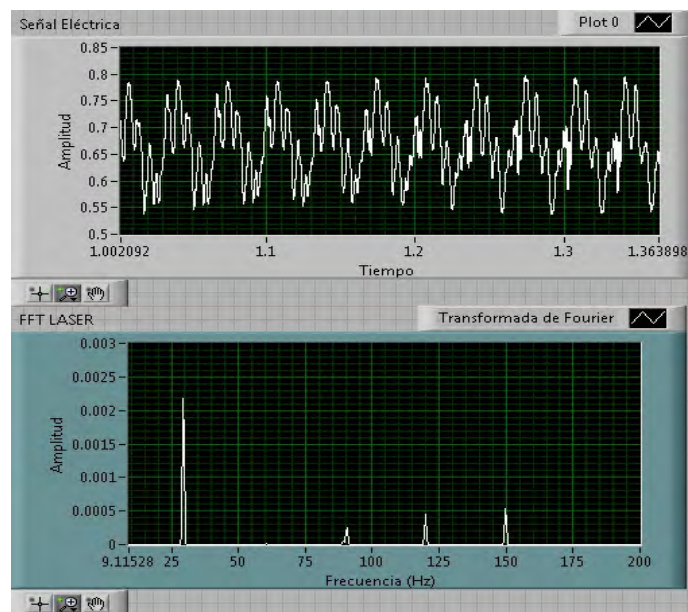


Figura 4.35: Gráficas temporal y FFT obtenidas con el interferómetro Cíclico para el motor de inducción verde desbalanceado.



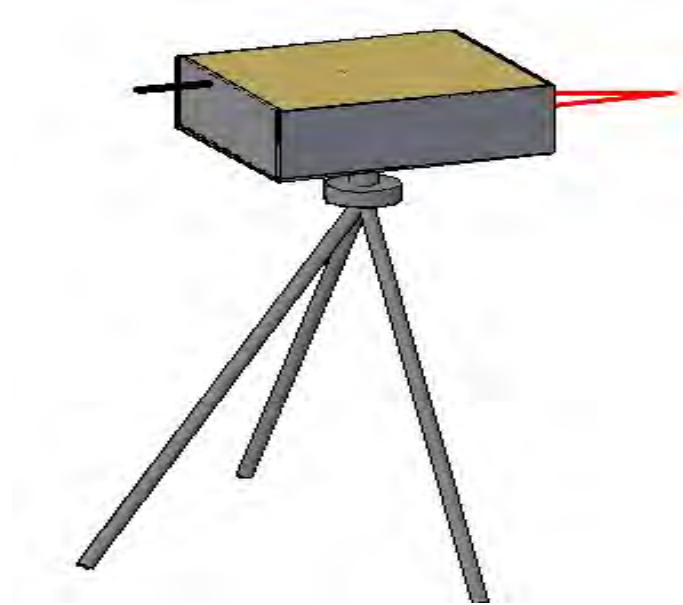


Figura 4.36: Dibujo en isométrico del Dispositivo Óptico.

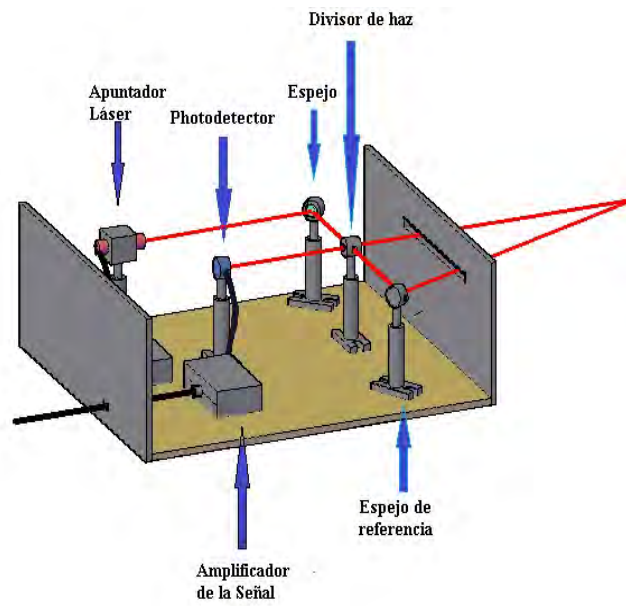


Figura 4.37: Vista del interior del Dispositivo Óptico.

## 5 Conclusiones

Se consiguió construir un sistema óptico para la supervisión de un motor de inducción, el cuál es un vibrómetro láser básico y de bajo costo. De los resultados obtenidos se escogió el interferómetro Cíclico debido a su estabilidad a las vibraciones mecánicas externas que pudieran interferir en el análisis del espectro de frecuencias, lo cuál no sucedió con los interferómetros de Michelson y Mach-Zehnder, que sus mediciones eran afectadas no sólo por vibraciones mecánicas sino hasta por cambios de temperatura en el ambiente debido a que son muy sensibles a pequeños cambios físicos. El interferómetro Cíclico tiene la ventaja de que se puede considerar como si tuviera un sólo brazo interferométrico, y por esa causa se decidió probar con un apuntador láser, el cuál arrojó muy buenos resultados en el análisis del espectro de frecuencias.

En los diferentes resultados que se obtuvieron con la bocina se observó que hay picos de frecuencias indeseadas, como la de 60 Hz y sus armónicos, que son generadas por la luz del laboratorio, por la fuente de luz láser, habrá que utilizar filtros para poder eliminar dichas frecuencias y así medir las frecuencias reales ocasionadas por las vibraciones mecánicas o hacer substraciones de las señales obtenidas al medir las vibraciones en los equipos y la señal de referencia que tiene información indeseada.

Para evitar el ruido óptico de las mediciones hechas con el vibrómetro láser, se deben realizar dichas mediciones en completa oscuridad o en su caso el dispositivo debe tener un chasis, es decir, que el fotodetector reciba solamente la luz proveniente de la fuente de luz láser.

El vibrómetro láser que se construyó se trabajó en un intervalo de frecuencias de 15 Hz a 2500 Hz, que fue el rango que se utilizó en la alimentación de la bocina; aunque pudiera detectar una mayor frecuencia va a depender de la velocidad de la DAQ principalmente y de la frecuencia de respuesta que tenga la bocina.

En comparación con otros vibrómetros láser comerciales, éste posee algunas ventajas con respecto a los demás sobre todo en cuánto a costos. En el apéndice se muestra el costo aproximado del equipo (\$ 3500 Dólares), que comparado con otros equipos similares es barato.

Se abre el campo de las patentes y el mercado un nuevo dispositivo en la industria para proporcionar a la maquinaria un mantenimiento predictivo con el fin de darle mayor vida útil a éstos equipos.

### 5.1. Trabajo a futuro

Los retos de este proyecto son:

Hacer el análisis de frecuencia de motores de inducción mediante el vibrómetro láser y validar los resultados con los acelerómetros que son los sensores que más se utilizan para el análisis de vibraciones.

Optimizar costos: mejorando el diseño mecánico para que tenga grados de libertad para poderse mover, realizando el programa en un paquete de software que no represente algún costo ya que una buena parte del costo del dispositivo se debe a la compra de la licencia del software, mejorando el arreglo óptico para que sea más pequeño, por ejemplo utilizando fibra óptica .

Patentar y distribuir el dispositivo en el mercado considerando el plan de negocio.

Buscar otras aplicaciones para expandir el mercado para comercializar el vibrómetro láser, ya que en nuestro proyecto sólo nos enfocamos a motores de inducción, y las vibraciones acontecen o son generadas por otros equipos o dispositivos.

# Referencias

- [1] M. L. Adams, *Rotating Machinery Vibration*. Marcel Dekker Inc, (2000).
- [2] M. L. Adams y T. H. McCloskey, *Large unbalance vibration insteam turbine generator sets* , Proceedings 3rd IMechE International Conference on Vibration in Rotating Machinery, York, England, (1934).
- [3] S. J. Chapman. *Máquinas Eléctricas* . McGraw-Hill Interamericana de México, (2005).
- [4] P. O'Donnell, *Motor Reliability Working Group, Repor of large motor reliability survey of industrial and comercial installations Part I, and II* . IEEE Trans. Ind. Appl., **21**, 853, (1985).
- [5] E. Hecht y A. Zajac, *Optica*. Addison & Wesley Iberoamericana, (1986).
- [6] F. L. Pedrotti y L. S. Petrotti *Introduction to Optics* . Prentice-Hall International, Inc., (1993).
- [7] M. P. Boyce y A. Carnero Parra. *Curso de Diseño, Operación y Mantenimiento de Turbinas de Gas* . Centro de Tecnología Avanzada, CIATEQ, (2010).
- [8] R. K. Mobley, *Root Cause Failure Analysis*. Addison & Wesley Iberoamericana, (1986).
- [9] J. R. Camero,. *Vibration and current monitoring for detecting airgap eccentricity in large induction motors* . Proc. Inst. Elect. Eng. B, **133** 155, (1986).
- [10] P. Vas, *Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines* . Oxford, U.K. Clarendon, (1993).

- [11] W. Deleroi, *Broken bars in squirrel cage rotor of an induction motor. Description by superimposed fault currents* . Arch. Elektrotech., **67** 91, (1984).
- [12] R. R. Schoen, *Motor bearing damage detection using stator current monitoring*. IEEE Trans. Ind. Applicat., **31**, 1274 (1995).
- [13] R. R. Schoen, *Effects of time-varying loads on rotor fault detection in induction machines*. IEEE Trans. Ind. Applicat., **31**, 900 (1995).
- [14] N. Arthur, *Induction machine condition monitoring with higher order spectra - Part II: Variable frequency operation and automated diagnosis*. in Proc. Int. Conf. Electrical Machines, **1** 13 (1990).
- [15] J. Wilson y A. Buffa, *Física*. Prentice Hall,(2002).
- [16] Y. Li, G. Eichmann, y R. R. Alfano, *Pulsed-mode laser Sagnac interferometry with applications in nonlinear optics and optical switching*,. Appl. Opt. **25**, 209 (1986).
- [17] P. Hariharan, *Basics of Interferometry*. Academic Press / Elsevier, (2007).
- [18] I. S. Gonorovsky, *Señales y Circuitos Radiotécnicos*. Ed. Mir, (1972).
- [19] P. Hariharan, *Handbook of Optics Vol. II, Chap. 21 Interferometers*, Mc. Graw Hill, (1995).
- [20] M. Fernández,M.García, G. Alonso, J. M. Cano y J. Solares, *Técnicas para el Mantenimiento Diagnóstico de Máquinas Eléctricas Rotativas*. Marcombo, (1998).
- [21] D. Malacara, *Optical Shop Testing*. Wiley, (2007).
- [22] B Dörband,H. Müller y H. Gross, *Handbook of Optical Systems, Metrology of Optical Components and Systems*. Wiley, (2012).

# **A** PLAN DE NEGOCIOS

## INTRODUCCIÓN

### Descripción general del negocio

Nombre de la empresa	VLSS, Vision Laser Sell-Services.
Nombre del dueño	Ing. Víctor Manuel Villanueva Reyes.
Número telefónico	(477) 7631197.
Dirección	Sánchez # 801 Col Nva Candelaria, León, Gto, C.P. 37260.
Giro de la empresa	Productos y Servicios.
Actividad de la empresa	Venta y servicio de vibrómetros láser.
Descripción del producto	VLSS se proyecta como una compañía de venta y servicio de sistemas ópticos para la supervisión de la operación de motores de inducción.

**Cuadro A.1:** Descripción del negocio.

## ANÁLISIS FODA

### *Fortalezas*

- Experiencia demostrable.
- Apoyo de un Centro de Investigaciones en Óptica como lo es el CIO.
- Estructura del negocio reducida, lo que conlleva a gastos fijos mínimos.
- Innovación tecnológica.
- Únicos fabricantes aquí en México del vibrómetro láser.
- Precio más bajo que la competencia.

### *Oportunidades*

- León y la zona del Bajío son importantes para el lanzamiento de nuestro producto por la diversidad de empresas que existen en diferentes ramas industriales.
- El crecimiento y auge que puede tener el mantenimiento predictivo en las empresas como mejora continua en sus procesos.
- Ausencia de competencia de calidad en el sector.
- Estar incubando en el Tec de Monterrey y recibir apoyos o recursos del gobierno.

### *Debilidades*

- Empresa de reciente creación.
- Costo del producto mayor con respecto a la competencia indirecta.
- La falta de concientización y de conocimientos de los empresarios, de vías alternas como son sensores de vibración como medidas de protección y seguridad de equipos y maquinaria.
- Tendencia a realizar mantenimientos correctivos en las empresas.

### *Amenazas*

- El que los empresarios no cambien de pensar de que el mantenimiento predictivo es una inversión y no un costo para sus empresas.
- Precios accesibles de los competidores.
- Incremento de los precios de los elementos ópticos, ya que están cotizados en dólares.

## **NATURALEZA DE LA EMPRESA**

Se cuenta con experiencia necesaria, ya que las personas involucradas tienen una gran experiencia en el área de la óptica y en el área de la investigación, para desarrollar dispositivos ópticos con aplicaciones industriales. Además de hacer las suficientes relaciones públicas y humanas, posibles

para poder conocer a la mayoría de los competidores y posibles clientes en el sector al que se dirige el producto y servicio.

### ***Promotores***

- Victor M. Villanueva Reyes: Ingeniero electromecánico egresado del Instituto Tecnológico de León, y actualmente estudiante de la maestría en Optomecatrónica en el Centro de Investigaciones en Óptica.
- Raúl A. Vázquez Nava: Dr. en Óptica e investigador en el Centro de Investigaciones en óptica en el área de fotónica.

### ***Diferencia con otros negocios similares***

- Se puede desarrollar sistemas según las necesidades del cliente y las mediciones son en tiempo real.
- Son dispositivos innovadores que utiliza tecnología de punta.
- No requiere estar en contacto directo con el objeto a estudiar, además de que la medición se puede hacer desde distancias que no comprometan la seguridad del usuario en el caso de zonas de alto riesgo, es exacto y versátil.

### ***Recursos Actuales***

Actualmente se cuenta con el apoyo del CIO (Centro de Investigaciones en Óptica), para la realización del prototipo del vibrómetro láser, se trabaja en un laboratorio de uno de los investigadores.

Se tiene acceso a elementos ópticos, a equipos de medición, a herramientas, etc. Todo lo indispensable para el desarrollo del producto y ofrecer el servicio.

### ***Relación con los clientes***

Actualmente se está terminando de armar el prototipo para poder ofrecer el producto y el servicio a los clientes, el mercado para introducir el producto es muy amplio por lo que se tendrá que dedicar mucho tiempo para ofrecer el producto.



### *Relación con los proveedores*

Se tiene una lista de proveedores algunos de ellos reconocidos por la calidad de los productos que ofrecen. Con todos los proveedores se mantendrá una relación cordial para el beneficio de la empresa.

## **ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL ENTORNO**

### *Económica*

El sector económico de León, se ve que está más enfocado hacia la industria del calzado y al sector de servicios, dando en menor relevancia a las demás industrias. Aunque en ciudades aledañas a León hay muchas empresas metalmecánicas, automotrices y de otro sector en las cuales es viable ofrecer el producto y servicio.

### *Innovación tecnológica*

La innovación tecnológica es una de las ventajas de nuestro producto, y es muy importante estar a la vanguardia en el mercado, el CIO cuenta con excelentes investigadores y excelentes instalaciones, y con su apoyo se puede estar a la vanguardia.

### *Culturales*

La renuencia al cambio por parte del empresario leonés con respecto a dar mantenimiento predictivo a sus equipos y la poca cultura de prevención, además de que no están familiarizados con equipos que midan vibraciones, en las empresas generalmente prevalece el mantenimiento correctivo.

## **LA ORGANIZACIÓN**

### *Misión*

Ser una empresa de consultoría, desarrollo y fabricación de sistemas de medición ópticos con el fin de brindar protección y seguridad a equipos y maquinaria mediante tecnología de punta.

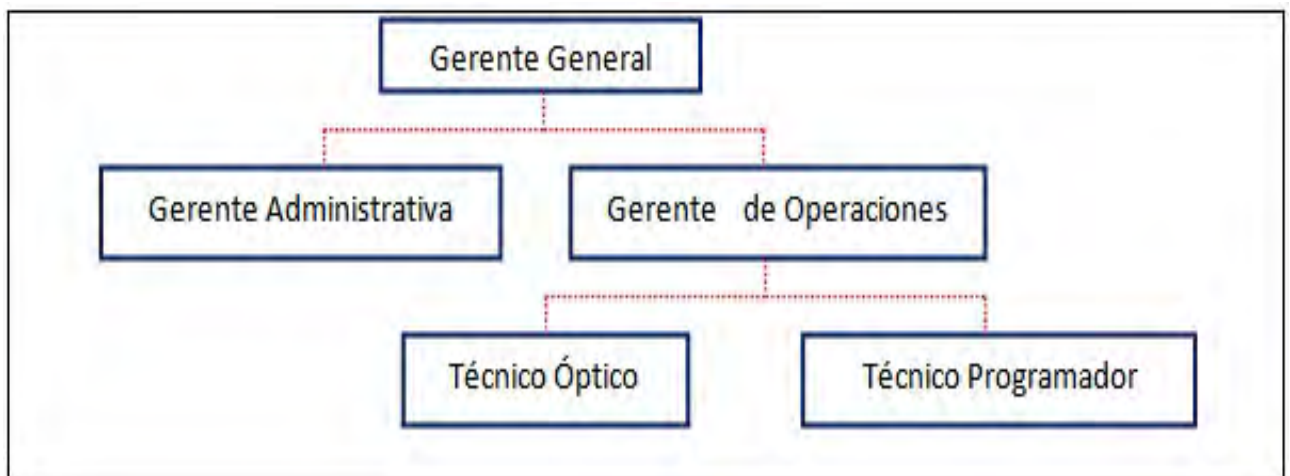
### *Visión*

Consolidarnos entre los tres principales distribuidores de nuestros dispositivos y servicios a las empresas que radican en la zona del Bajío y zona centro del país México para el 2014.

### *Objetivos*

1. Contactar a todas las medianas y grandes empresas de tipo industrial de cualquier ramo que tengan equipos y maquinarias que tengan motores de inducción.
2. Conseguir 20 clientes el primer año, y doblarlos consecutivamente en los años siguientes hasta lograr 200 clientes, que nuestro proyecto requiere para lograr un gran crecimiento.
3. Facturar un promedio anual de cinco millones de pesos el primer año y duplicarlos consecutivamente en los años subsecuentes.

### *Estructura del negocio*



**Figura A.1:** Organigrama.

### *Funciones y actividades del personal*

#### **a) Gerente general**

Dirige y coordina las actividades de ventas, cobranza, y asesorías a clientes. Tiene la responsabilidad de realizar los procedimientos para clientes y capacitaciones, así como el adiestramiento para los técnicos de la empresa.

#### **b) Gerente administrativo**

Responsable de los sistemas de control interno, administrativo, y contable mediante la implementación de políticas y procedimientos en el área administrativa.

**c) Gerente de Operaciones**

Responsable de los sistemas de control interno, administrativo, y contable mediante la implementación de políticas y procedimientos en el área administrativa.

**d) Técnico Óptico**

Responsable del armado óptico, de los diferentes elementos ópticos.

**e) Técnico programador**

Responsable de realizar el software del producto y la adquisición de datos a la computadora.

**EL PERSONAL**

*Descripción del Proceso de selección del personal*

*Políticas de Contratación*

*Políticas operativas*

*Tabla de sueldos*

<b>Sueldos</b>	<b>Mensual</b>
Gerente General	\$30,000
Gerente Administrativa	\$20,000
Gerente de Operaciones	\$20,000
Técnico Óptico	\$16,000
Técnico Programador	\$16,000

**Cuadro A.2:** Tabla de sueldos.

**NOTA:** Al iniciar la empresa se mandará a maquilar algunas piezas mecánicas, a un centro de maquinado con el fin de minimizar los activos fijos y que no sea tan grande la inversión inicial.

**MERCADOCTENIA**

*Objetivos del área de mercadotecnia*

- Dar a conocer el vibrómetro láser así como los de consultoría a los diferentes segmentos que nos enfocaremos del mercado del Bajío y Centro del país especialmente en las medianas y grandes empresas en el corto y mediano plazo.

- Dar a conocer las características y ventajas de nuestro producto, así como los beneficios que ofrece.
- Crear conciencia en los empresarios para que protejan y den seguridad a sus equipos y maquinaria realizando análisis predictivos.
- Visitar a la semana al menos 5 empresas para comenzar a dar a conocer el producto y los servicios que ofrece VLSS.
- Aumentar las ventas a un 30 % en comparación con el año anterior.

### *Competencia directa*

Se ha definido competencia directa a aquellas empresas que ofrecen el mismo producto y servicios a VLSS y ofrecen sus productos en el Bajío y centro del país, aunque estas empresas son de origen extranjero ofrecen sus productos a través del internet y algunas tienen distribuidores en México.

<b>Empresa</b>	<b>Ubicación</b>
Polytec Inc	16400 Bake Parkway Irvine, CA 92618 (Fabricante).
ARIES INGENIERÍA Y SISTEMAS, S.A.	Avenida Vía Láctea, 1. 28830 San Fernando de Henares I MADRID I SPAIN(Fabricante).
Brüel & Kjør Sound & Vibration	Skodsborgvej 307 DK-2850 Measurement Nærum Denmark
IADEPT MARKETING	310 Mass Cghs Plot 24 Sector 10 Dwarka New Delhi 110075 India.

**Cuadro A.3:** Competencia Directa.

### *Competencia Indirecta*

Estas empresas satisfacen las mismas necesidades que VLSS aunque los productos que ofrecen no son ópticos, miden vibraciones utilizando acelerómetros que funcionan de manera distinta a los ópticos.

### *Descripción de clientes*

Los clientes fueron divididos en mediana y grande empresa. Dentro de los sectores que a continuación se mencionan.

<b>Empresa</b>	<b>Ubicación</b>
TPM Equipos	Hule 12 A Col. Cd. Cuauthemoc 55067 Ecatepec, Edo de México (Distribuidor).
CIAAMSA División Acústica, S. de R.L. de C.V	Guillermo Massieu Helguera 282 Int. 2 La Escalera, Gustavo A. Madero, Distrito Federal (Distribuidor).
PCE Instruments Ibérica	C/ Mayor 53 - Bajo E-02500 Tobarra
CESVA instruments	Maracaibo6, Barcelona, España

**Cuadro A.4:** Competencia Indirecta.

**Empresas de Giro Industrial.** Son las que realizan actividades de transformación reciben insumos o materias primas y les agregan valor, al incorporarles procesos. Algunos ejemplos de empresas industriales en las cuales se puede ofrecer el vibrómetro láser para dar protección y seguridad a sus equipos y maquinaria son:

- Textil.
- Metal- mecánica.
- Hulera o plástico.
- Petroquímica.
- Cementera.
- Bombas sumergibles.
- Automotriz.
- De celulosa y papel.
- Productora de alimentos.
- Producción de bebidas.

### ***Segmentación de mercados***

Para VLSS(Vision Laser Sell- Service) el mercado meta inicial se encuentra en la ciudad de León Gto, y posteriormente la zona Bajío y centro del país.

El sector con el que se comenzará de los que se mencionaron en la parte de clientes será el de Metal –Mecánica, Automotriz, Textil, Productora de alimentos, Hulera, Plásticos y Bombas Sumergibles, serán elegidas de forma aleatoria.

Se concientizará a los empresarios de las medianas y grandes empresas sobre los beneficios que tiene el vibrómetro láser para la protección y seguridad de sus equipos y en algunos de ellos se les hará ver, que con un cambio oportuno de algunas piezas mecánicas debido a su desgaste se podrá garantizar la calidad de sus productos como en el caso de los centros de maquinado que requieren fabricar piezas con pequeñas tolerancias ya que estas piezas se ensamblan con otras.

Se capacitará al personal que está a cargo del mantenimiento sobre el uso adecuado del equipo además del análisis de resultados que se obtengan del equipo.

### ***Descripción del servicio o producto***

Vision Laser Sell-Services se proyecta como una compañía de venta y servicio de sistemas ópticos para la supervisión de la operación de motores de inducción.

Los clientes naturales de VLSS serán: Empresas que desean dar seguridad y protección a sus equipos que tengan motores de inducción, y quieran optimizar sus tiempos de paro de producción y ahorro de dinero por los costos que producirían un daño mayor en los equipos.

En la actualidad las máquinas eléctricas rotativas son consideradas como elementos de bajo mantenimiento, pero pueden sufrir fallas o anomalías tanto de tipo eléctrico, como mecánico, o ambas. Estas fallas o anomalías pueden estar causadas por factores térmicos, químicos o de otra. Las máquinas eléctricas de inducción tipo jaula de ardilla constituyen más del 90 % del total de las máquinas eléctricas rotativas, por tanto sin lugar a dudas son los que más se emplean a nivel industrial.

Es importante proteger y realizar mantenimiento predictivo a los equipos y maquinaria hoy en día, si no se quiere realizar un gasto innecesario en recursos tanto materiales, económicos,

humanos, etc.

Niveles del producto	Definición de niveles
Beneficio básico	<p>Analizar y monitorear equipo y maquinaria que tengan motores de inducción mediante el análisis de sus frecuencias de vibración.</p> <p>Con esta técnica se pueden identificar fallas típicas tales como desbalanceo de rotores, solturas mecánicas, desalineamiento y defectos en los rodamientos; por lo que contribuye al mantenimiento predictivo de los equipos.</p>
Aspectos Formales	<p>Cambiar los componentes que estén fallando dentro de los motores de inducción de manera anticipada y así reducir los tiempos por mantenimiento correctivo además de ahorrar dinero por los costos que producirían un daño mayor en los equipos.</p>
Aspectos Agregados	<p>La detección de vibraciones con láser tiene la ventaja en comparación con los acelerómetros convencionales que no requiere estar en contacto directo con el objeto a estudiar, además de que la medición se puede hacer desde distancias que no comprometan la seguridad del usuario en el caso de zonas de alto riesgo, es exacta y versátil.</p>

**Cuadro A.5:** Competencia Indirecta.

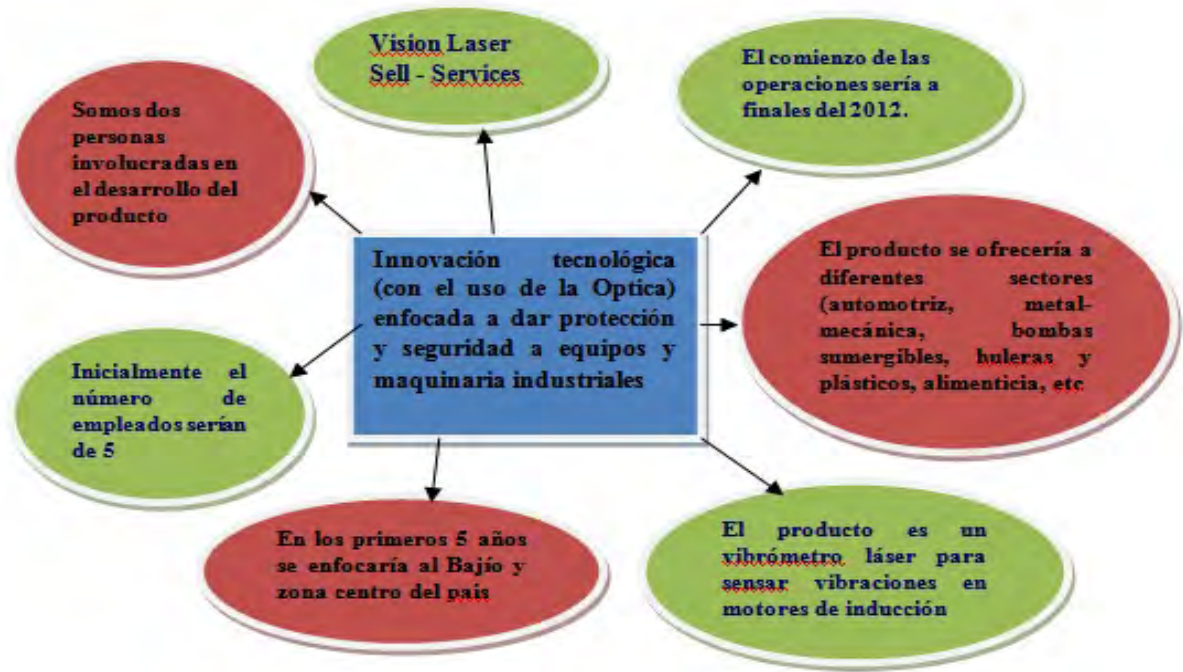
### *Análisis del mercado*

De acuerdo a las pláticas realizadas con algunas empresas de León, Gto, principalmente en las medianas no se realizan ningún tipo de mantenimiento predictivo en cuanto a realizar un análisis de vibraciones en los equipos y maquinaria.

Las necesidades de los mercados están cambiando continuamente y en lo particular en estos sectores mencionados, debido a esto es ineludible un proceso de mejora continua que garantice el buen funcionamiento de los equipos y maquinaria que tengan motores de inducción instalados y por ende garantizar la calidad del producto que es repercutida por vibraciones excesivas dentro de éstos equipos.

Hay normas para medir la vibración mecánica de máquinas con velocidades de operaciones entre 100 y 200 rev/s. Las características de la Norma ISO 2372 son:

- Es aplicable a los equipos rotativos cuyo rango de velocidades de giro está entre 600 y 12,000 rpm.



**Figura A.2:** Descripción del negocio.

- Los datos que se requieren para su aplicación son el nivel global de vibración en velocidad – valor eficaz RMS, en un rango de frecuencias entre 10 y 1,000 Hz.

#### *Objetivos de la fijación del precio*

- Obtener nuevos clientes utilizando precios atractivos para ellos y comenzar a tener participación en el mercado.
- Obtener un porcentaje de utilidad que permita sustentar la empresa.

#### *Método de fijación de precio*

El método para la fijación del precio está en función a los precios que ofrecen los de la competencia y a las utilidades que se quieren para VLSS.

### **PUNTO DE EQUILIBRIO**

#### *Cálculo de los costos fijos*

El costo del vibrómetro láser se muestra en la tabla A.7, ahí se muestran cada uno de los



Costos fijos	Mensuales (\$)
Renta	2,000.
Sueldos sin/impuestos	102,000
Mantenimiento	200
Celular	500
Gasolina	1,000
Aguilnaldos	4,250
Prima vacacional	570
Luz	400
Agua	300
Teléfono	400
Internet	300
Total de costos fijos	111,920
Costos fijos Anuales	1,343,040

Cuadro A.6: Costos Fijos.

componentes, con su precio en dólares; los costos de los componentes ópticos fueron sacados de Edmund Optics.

#### *Cálculo de los costos variables*

#### *Punto de equilibrio*

Es el punto en donde los ingresos totales recibidos se igualan a los costos asociados con la venta de un producto ( $IT = CT$ ). Un punto de equilibrio es usado comúnmente en las empresas u organizaciones para determinar la posible rentabilidad de vender determinado producto. **Para nuestro caso el punto de equilibrio debe ser de:**

$$PE = \frac{\text{costos}}{\text{ventas}}$$

<b>Dispositivos</b>	<b>Costo en Dólares</b>
1 Circular Beam Laser Diode Modules TECH SPEC,Modelo : M83 - 837	\$179.00
1 Power Supply 5 VDC, Mounting Clamp TECH SPEC,Model: M83 - 855, 856	\$100.00
2 Visible Laser Diode Mirrors TECH SPEC,( $\phi 12,5mm \times 3mm$ ) Model : M46 - 618	\$35.00
2 Econo Mirror Mount (Newport) 0.5 or 1.0 in. Diameter, Knob Adjustment, 8-32	\$120.00
1 Digital Laser Photometer Wavelength:632.8nm,100mW Model: M54 - 038	\$229.00
1 Plate Beamsplitter (50 / 50) Quik Mod ( $20 \times 27 \times 1mm$ ) Model: M32 - 269	\$39.00
1 Mount for any $35mmsq \times$ 1 mm Thick plate, TECH SPEC Model: M56 - 264	\$199.00
1 DAQ ( Tarjeta de Adquisición de Datos) National Instrument NI USB - 6008	\$200.00
1 Labview National Instrument Software	\$2000.00
Soporte y chasis para el vibrómetro	\$400.00
<b>COSTO TOTAL DEL VIBROMETRO LASER</b>	<b>\$3,500</b>

**Cuadro A.7:** Costo del Dispositivo Óptico

<b>Costos Variables</b>	<b>P/PIEZA</b>
Materia prima	50,000
Total de gastos variables	50,000

**Cuadro A.8:** Costos Variables.