

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**DETECCIÓN Y UBICACIÓN DE VIBRACIONES EN OBJETOS
3D, MEDIANTE EL USO DE INTERFEROMETRÍA SPECKLE,
CON APOYO HOLOGRÁFICO DIGITAL**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs. González P., Daniela A.
Martínez O., José S.
Para optar al Título
de Ingeniero Mecánico

Caracas, 2009

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DETECCIÓN Y UBICACIÓN DE VIBRACIONES EN OBJETOS 3D, MEDIANTE EL USO DE INTERFEROMETRÍA SPECKLE, CON APOYO HOLOGRÁFICO DIGITAL

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Christian Murati

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs. González P., Daniela A.
Martínez O., José S.
Para optar al Título
de Ingeniero Mecánico

Caracas, 2009



Caracas, 05 de noviembre de 2.009

ACTA

Los abajo firmantes, Miembros del Jurado Examinador designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los bachilleres:

DANIELA GONZÁLEZ y JOSÉ MARTÍNEZ


Titulado:

**“DETECCIÓN Y UBICACIÓN DE VIBRACIONES EN OBJETOS 3D,
MEDIANTE EL USO DE INTERFEROMETRÍA SPECKLE,
CON APOYO HOLOGRÁFICO DIGITAL”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el Plan de Estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico.


Prof. Jorge Barillas
Jurado




Prof. Juan León
Jurado


Prof. Christian Murati
Tutor



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
DEPARTAMENTO DE DISEÑO

Caracas, 05 de noviembre de 2.009

Prof. GERARDO RAMÍREZ
Jefe de la División de Control de Estudios
Facultad de Ingeniería

Presente.-

Quienes suscriben, Miembros del Jurado Examinador designado por el Consejo de la Escuela de Ingeniería Mecánica, nos dirigimos a usted con la finalidad de informarle que hemos decidido otorgarle a los Bachilleres:

DANIELA GONZÁLEZ (C.I.V.- 12.070.421) y JOSÉ MARTINEZ (C.I.V.- 17.003.777)

“MENCIÓN HONORÍFICA”


Por la excelencia demostrada en la realización del Trabajo Especial de Grado, intitulado:

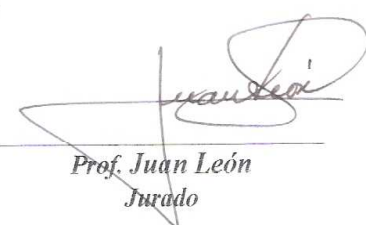
“DETECCIÓN Y UBICACIÓN DE VIBRACIONES EN OBJETOS 3D, MEDIANTE EL USO DE INTERFEROMETRÍA SPECKLE, CON APOYO HOLOGRÁFICO DIGITAL”

Sin otro particular a que hacer referencia, quedamos de usted,


Prof. Jorge Barillas
Jurado




Prof. Christian Murati
Tutor


Prof. Juan León
Jurado

DEDICATORIA

Dedico este trabajo al esfuerzo de mis padres que han venido haciendo desde el día que nací, aquí yacen sus frutos.

José Silvano Martínez Orúa (Chespy)

Dedico esta investigación a mi familia, Inés, Romny, Eliezer, Laura, Alejandro y Valeria. A mi tutor, el profesor Christian Murati y a mi mejor amigo Chespy.

Daniela Andreína González Pérez.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Central de Venezuela, por ser la institución que nos brindó la formación académica necesaria para lograr realizar este trabajo de grado. Agradecemos a nuestro tutor el profesor Christian Murati, por toda la dedicación, empeño, paciencia y orientación que nos llevó a culminar este trabajo.

Agradecimientos de José Silvano Martínez Oráa (Chespy)

Primero antes que todo doy gracias a Dios por haberme dado la vida y ayudarme durante todo el trayecto de la vida que he hecho hasta hoy, gracias. Agradezco a mis padres los cuales me han guiado por un buen camino, a pesar que en un principio pensaba que no lo hicieron de la mejor manera pero ahora que he crecido un poco más, me he dado cuenta que lo han hecho muy bien, gracias. Agradezco a mi hermana aunque ella no lo crea, por todos los favores que me ha hecho, gracias. Agradezco a Daniela mi compañera de lucha que me ha apoyado en los momentos más difíciles e incluso ayudado a explotar aun más mis talentos, gracias. Agradezco a todos los profesores que contribuyeron en mi formación pero más allá quiero agradecer al Profesor Ferrer, Profesor Julio Rodríguez (conversión de energía), Profesor Limongi, Profesor Borges, Profesor Hans García, Profesor Juan León (vibraciones Mecánicas), Profesor García y Profesor Behrens. Del ciclo Básico quiero agradecer al profesor Gerardo Ramírez, profesor Acosta, profesor Cárdenas y a la profesora Marianela Blanco. Todos los mencionados anteriormente me sacaron canas pero bien valió la pena a ver aprendido de ustedes, gracias. Agradezco al tutor profesor Murati por enseñarme el campo de la física óptica y su aplicaciones a la mecánica, al profesor Kalustian por toda la ayuda y el interés que mostro durante el desarrollo de la tesis, gracias. Agradezco a los muchachos Oscar, Janiel, Paty, Juan Manuel, Carla, Johana, Miguel Ángel, Ariana, Joshua, Machado y Maru por hacer que la vida en la universidad no fuera tan miserable jajajaja, gracias.

Agradecimientos de Daniela Andreína González Pérez

Primero que nada gracias a Dios por brindarme la vida y como diría Mercedes Sosa en su canción “gracias a la vida que me ha dado tanto....”.

Agradezco a mi mamá, que con paciencia, amor y mucho trabajo logró levantarme y hacer de mi un ser humano digno y de provecho, a mis hermanos Romny, Eliezer y Laura los cuales han tenido mucha paciencia conmigo y han hecho de mi existencia una enriquecedora travesía de encuentros y desencuentros. A mi mejor amigo José Martínez alias “Chespy” quien ha sido y es una de las personas más importantes, él me ha hecho crecer como ser humano, me ha enseñado a autovalorarme y me ha extendido su mano cada vez que la he necesitado apoyándome durante toda la carrera y no dejándome tirar la toalla.

Quiero agradecer también a todos y cada uno de los profesores que tuve durante mis estudios, todos me enseñaron muchas cosas que van más allá de lo académico, pues aprendí a tener paciencia, a ser tolerante, a comunicarme mejor con los demás, a ver otros puntos de vista y a entender que somos humanos, con todo lo que esa palabra involucra.

Por sobre todas las personas, quiero agradecer a un ángel maravilloso, quiero agradecer a la prueba viviente de que Dios existe y que me ama. Gracias Valeria por tenerme tanta paciencia y motivarme a crecer y ser mejor, gracias por compartir tu tiempo conmigo, gracias por tu amor sin el cual no habría llegado a donde estoy.

A todos los demás que no he mencionado directamente, desde lo más profundo de mi corazón... Gracias.

González P. Daniela A. y Martínez O. José S.

“DETECCIÓN Y UBICACIÓN DE VIBRACIONES EN OBJETOS 3D, MEDIANTE EL USO DE INTERFEROMETRÍA SPECKLE, CON APOYO HOLOGRÁFICO DIGITAL”, Tutor Académico: Prof. Christian Murati, Caracas, UCV Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2009. 200 Pág.

Palabras claves: vibraciones, piezoeléctrico, interferometría, holografía, speckle, análisis, posición.

RESUMEN

En el presente trabajo se mostró el uso de una herramienta no invasiva para la detección y ubicación de vibraciones mecánicas sobre un objeto 3D, mediante el análisis de sus caras, utilizando interferometría holográfica *speckle* y tomas de tiempo promedio. El estudio comienza con la toma de hologramas de las superficies del objeto, el cual posee en su interior un piezoeléctrico adherido a una de sus caras y que a su vez está conectado a un generador de funciones. Las perturbaciones que se originaron al ir variando la frecuencia fueron capturadas en hologramas, los cuales son digitalizados más tarde utilizando una cámara digital, para así poder ser analizados en un computador con el software MATLAB. Basados en los fundamentos del concepto de, recta de máxima pendiente, se elaboró un programa con el que se obtuvo la información referente a las rectas de cada superficie holografiada. Luego de determinadas se tomó el grupo correspondiente a cada frecuencia estudiada y se interceptaron entre sí, generando unos puntos cuya ubicación fue comparada con la posición física del piezoeléctrico. Dicha metodología se aplicó para dos posiciones distintas del piezoeléctrico en el prototipo, mostrando como resultado una buena aproximación de la ubicación del epicentro vibratorio del objeto.

González P. Daniela A. and Martínez O. José S.

“DETECTION AND LOCATION OF VIBRATIONS ON A 3D OBJECT, BY USING INTERFEROMETRY SPECKLE, WITH DIGITAL HOLOGRAPHIC SUPPORT”, Academic Tutor: Prof. Christian Murati, Caracas, UCV Engineering Branch. Mechanical Engineering School. 2009. 200 Pag.

Keywords: vibrations, piezoelectric, interferometry, holographic, speckle, analysis, position.

ABSTRACT

This research demonstrate the use of a noninvasive tool for the detection and location of mechanical vibrations on a 3D object by using holographic speckle interferometry with average time shots method. The measurement starts by taking holographic images of the object surfaces. This object contains a speaker piezoelectric inside that produces mechanical vibrations, this speaker is connected to a frequency generator to create a wide range of frequencies. The frequency generator produced the vibrations and these were taken into holograms. The images are then digitalized using a camera for further analysis in a computer program using MATLAB software for a study of maximum slope. The program uses the data information to calculate the intersection of the slopes in order to determine the origin of the vibrations. This method was repeated for two different positions of the piezoelectric. The results obtained are compared with the physical position of the piezoelectric speaker on the object, giving as a result a good approximation of the physical epicenter.

NOMENCLATURA

$F(t)$	=	Excitación armónica
F_0	=	Amplitud de la excitación armónica
ω	=	Frecuencia
t	=	Tiempo
m	=	Masa perturbada
C	=	Constante de amortiguación
k	=	Constante de elasticidad
$C \cdot \dot{x}$	=	Fuerza de amortiguación
$k \cdot x$	=	Fuerza elástica
x	=	Posición, dirección
\ddot{x}	=	Aceleración
x_h	=	Solución a la homogénea
x_p	=	Solución permanente
X	=	Amplitud del movimiento armónico
γ	=	Ángulo de fase
z	=	Eje de dirección de propagación
U	=	Amplitud de la luz como onda electromagnética
λ	=	Longitud de onda
ψ	=	Eje
k	=	Número de onda
δ	=	Constante de fase
\mathbf{n}	=	Vector unitario en la dirección de propagación del plano de onda
r	=	Coordenadas de un punto arbitrario en el espacio
z_1	=	Punto en la dirección de propagación de la luz
z_2	=	Punto en la dirección de propagación de la luz
φ_1	=	Fase de z_1
φ_2	=	Fase de z_2
$\Delta \varphi$	=	Diferencia de fase

r_o	=	Longitud recorrida óptica
r_g	=	Longitud recorrida geométrica
n	=	Índice de refracción del medio
Re	=	Parte real de un número complejo
e^i	=	notación compleja
u	=	onda electromagnética
I	=	Intensidad de la onda electromagnética
nm	=	nanómetros
mW	=	miliwatios
τ_c	=	Coherencia temporal
l_c	=	Longitud de coherencia
c	=	Velocidad de la luz
M	=	Medio de registro
mm	=	milímetro
f_o	=	Haz de objeto
f_r	=	Haz de referencia o de reconstrucción
A_t	=	Amplitud total
A_r	=	Amplitud del haz de referencia
A_o	=	Amplitud del haz de objeto
T_a	=	Transmitancia de amplitudes
E	=	Exposición
α_1, α_2	=	Constantes de la serie de Taylor
A_m	=	Amplitud del medio de registro
mA	=	mili amperios
Hz	=	Hertz

ÍNDICE

<i>Introducción</i>	1
<i>Capítulo I: El problema de Investigación</i>	
• Planteamiento del Problema	3
• Formulación del Problema	4
• Objetivos	4
• Justificación de la Investigación	5
• Alcances y Limitaciones	8
• Recursos Disponibles	9
<i>Capítulo II: Marco teórico</i>	
• Vibraciones	11
• Física Óptica	16
• Interferencia	20
• Interferometría	22
• El Interferómetro	24
• El Laser	26
• La Coherencia	28
• La Holografía	29
• Cómo se Produce el Registro Holográfico	33
• Medios de Registro	35
• Interferometría Holográfica	38
○ Interferometría de doble exposición	39
○ Interferometría tiempo real	40
○ Interferometría tiempo promedio	41
• Efecto Speckle	42

• Interferometría Speckle	44
• Elementos de un Montaje Holográfico	45
• Mesa Antivibratoria	49
• Pixel	51
• Piezoeléctrico	53

Capítulo III: Marco metodológico

• Nivel de Investigación	54
• Diseño de Investigación	54
• Población y Muestra	55
○ Manejo de la técnica holográfica	55
○ Pruebas holográficas en objetos 3D	55
○ Pruebas holográficas sobre una membrana	56
○ Pruebas holográficas sobre el prototipo	56
○ Hologramas finales	57
• Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	57
○ Reacondicionamiento de la mesa antivibratoria	57
○ Evaluación del aislamiento vibratorio de la mesa	61
○ Oscurecimiento de la zona de trabajo	64
○ Obtención de un Holograma	65
○ Prueba de coherencia	65
○ Montaje para toma holográfica	66
○ Descripción de los elementos holografiados	68
○ Mantenimiento de las condiciones de borde durante los ensayos.	71
○ Toma holográfica	73
○ Montaje holográfico – interferométrico	75
○ Toma Holográfica-interferométrica	76
○ Tiempo Promedio	76
○ Doble Exposición	77

○ Tiempo Real	78
○ Montaje Final	80
• Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos	87
○ Recta de Máxima Pendiente	95
<i>Capítulo IV</i>	
• Resultados Obtenidos	99
• Análisis de Resultados	
○ Inspección visual	158
○ Inspección Numérica	162
○ Reconocimiento de patrones vibratorios	164
<i>Conclusiones</i>	166
<i>Recomendaciones</i>	168
<i>Aspectos de Seguridad</i>	169
<i>Bibliografía</i>	172
<i>Anexos</i>	
• Curvas de nivel generadas en MATLAB	178

ÍNDICE DE IMÁGENES

# de imagen	Título	Pág.
1	Esquema genérico de un sistema masa – resorte – amortiguador.	13
2	Diagrama de cuerpo libre de una masa sometida a fuerzas.	14
3	Espectro de radiación electromagnético.	17
4	La luz como una onda armónica.	18
5	Interferencia entre dos ondas.	20
6	Interferencia constructiva e interferencia destructiva.	22
7	Esquema de un interferómetro de Michelson.	25
8	Patrón de interferencia entre dos haces.	26
9	Haz de Laser	27
10	Esquema básico del funcionamiento de un laser de He - Ne	27
11a, 11b, 11c	Ejemplos de hologramas	30
12	Esquema simplificado de un holograma de Gabor	32
13	Esquema simplificado de un holograma de Leith y Upatnieks	32
14	Diagrama simplificado de un holograma de Denisiuk	33
15	Reflexión del haz de laser sobre una superficie rugosa	43
16	Efecto de speckle en un holograma	43
17	Imagen captadas mediante ESPI con procesamiento digital	44
18	Espejo de primera superficie	45
19	Haz de laser depurado de haces parásitos al pasar por un filtro espacial	46

20	Punto focal y distancia focal de una lente cóncava y una convexa	46
21	Soporte para las películas holográficas	47
22	Generador de funciones	48
23	Filtro pasa banda	48
24	Divisor de haz	49
25	Esquema de una mesa antivibratoria	50
26	Tamaños de pixel	52
27	Influencia de la resolución en el tamaño de pixel	52
28	Piezoeléctrico	53
29	Muñeco holografiado	55
30	Moneda holografiada	55
31	Hologramas de la membrana	56
32	Hologramas del prototipo con patrones vibratorios	56
33	Esquema del montaje del interferómetro de Michelson.	62
34	Patrón de franjas interferométricas	63
35	Colimador óptico	65
36	Partes desensambladas del prototipo	69
37	Prototipo	70
38	Piezoeléctrico utilizado en la experimentación	71
39	Soporte colocado para holografías de las caras L2 y L5	72
40	Soporte colocado para holografías de la cara L1	72
41	Montaje final sobre la mesa antivibratoria	81
42	Marco de vidrio	82
43	Soporte de vidrio donde se ajusta el marco	82
44	Fotografía del holograma en tiempo real	83
45	Holograma de las tres caras perpendiculares entre sí.	85
46	Lado 2, Posición 2, 650Hz.	93
47	Curvas de nivel pertenecientes a la imagen 46.	93

48	Representación de la recta de máxima pendiente, perteneciente a la imagen 46.	94
49	Vista de la región de corte de las rectas.	97
50	Curvas de nivel generadas en MATLAB	178- 199

ÍNDICE DE TABLAS

# de tabla	Título	Pág.
1	Principales características y propiedades de los medios de registros holográficos	36
2	Medidas del prototipo para la experimentación	70
3	Código fuente.	88 - 92
4	Imágenes sin Perturbación	101
5	Rectas de máximas pendiente pertenecientes a la posición 1 como a la posición 2 en las frecuencias analizadas.	102 - 143
6	Distribución de puntos de la posición 1 y posición 2	144
7	Coordenadas del epicentro vibratorio en posición 1 y posición 2	145
8	Ecuación de la Recta Para la Posición # 1	146
9	Ecuación de la Recta Para la Posición # 2	147
10	Puntos de Intercepción para la Posición # 1	148
11	Puntos de Intercepción para la Posición # 2	149
12	Distribución de los Puntos de Intercepción de la Posición # 1	150
13	Distribución de los Puntos de Intersección de la Posición # 2	150

14	Coordenadas Únicas Del Epicentro de la Vibración	150
15	Secuencia de los Patrones de Vibración Para la Posición 1	151- 154
16	Secuencia de los Patrones de Vibración Para la Posición 2	155- 158
17	Distancia de los puntos fuera del área del piezoeléctrico al mismo. Posición # 1	163
18	Distancia de los puntos fuera del área del piezoeléctrico al mismo. Posición # 2	163

INTRODUCCIÓN

El campo de estudio correspondiente a las vibraciones se ha convertido en algo esencial para garantizar el buen funcionamiento y la duración de los equipos mecánicos, pues estas pueden favorecer o impedir que los sistemas, equipos y maquinarias operen correctamente.

Existe una gran variedad de situaciones prácticas en las que se requiere medir la respuesta de un material o de una estructura ante un estímulo. La medida se efectúa mediante un sensor y el resultado se compara con ciertos valores de referencia. Las fases de la operación son: excitación del objeto, medida, registro e interpretación de los datos.

Desde hace algunos años, científicos, especializados en la rama de la física óptica, han venido desarrollando un conjunto de técnicas para el estudio de patrones como por ejemplo la temperatura, la calidad de superficie y las vibraciones, entre otras, de forma no invasiva, lo que permite un análisis con un alto nivel de precisión y exactitud aun cuando los cambios en los patrones que se desean registrar son imperceptibles para nuestros sentidos.

La metrología óptica comprende un amplio abanico de técnicas que se aplican, por lo general, sobre objetos sólidos para caracterizar el estado de su superficie comparándola con una superficie de referencia. Con frecuencia, se trata de medir la deformación que ha sufrido la superficie de un objeto luego de la aplicación de una fuerza o carga. Como resultado de la deformación, los puntos de la superficie de un objeto ocupan posiciones diferentes a las que

ocupaban en el estado original. La deformación se caracteriza mediante los desplazamientos que experimentan los puntos de la superficie. Los desplazamientos pueden ser de dos tipos: desplazamientos contenidos en el plano de la superficie o perpendiculares a él. Visto que en una situación donde una superficie esté vibrando sus partículas realizan desplazamientos desde una posición de equilibrio, estas técnicas son perfectamente aplicables al campo del estudio del comportamiento de los materiales ante las vibraciones.

Actualmente, debido a lo económico que son, se usan acelerómetros para las mediciones en máquinas, sin embargo estos dispositivos requieren de un montaje riguroso, y no permiten localizar el epicentro de la vibración, lo cual es fundamental para la corrección y calibración en la máquina. Todas estas limitaciones nos permiten apreciar las ventajas que los dispositivos de principios ópticos tienen. No solo pueden determinar los mismos parámetros, sino que además no tienen la necesidad de entrar en contacto directo con el objeto de estudio, pues son métodos no invasivos.

Dentro del campo de la metrología óptica existen diversas técnicas, una de ellas es denominada de campo extenso o completo, que a su vez contiene dentro de sí una cierta gama de métodos. La interferometría holográfica *speckle* es una de ellas. Esta técnica proporciona a menudo como resultado una distribución de franjas de intensidad, cuyo análisis permite extraer la información necesaria o requerida.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la agitada vida que llevamos hoy en día las máquinas han ocupado un papel preponderante, es por ello que nos vemos en la necesidad de someterlas a constantes revisiones cada vez más exhaustivas y precisas, lo cual suele ocasionar frecuentes paradas de máquinas y consecuentemente disminución en la productividad. En el caso de detectarse una falla, localizar el punto exacto de la misma suele ser una tarde larga y tediosa en la medida que aumenta la complejidad del equipo. Si bien las vibraciones no son el único factor que puede disminuir la vida útil de los elementos de una máquina, es uno de los más importantes y con el que tenemos que tener especial cuidado y control.

A pesar de que se han realizado numerosos estudios utilizando métodos ópticos para el análisis de las vibraciones mecánicas, estos estudios se han basado en el estudio de vibraciones sobre superficies o placas, pero vivimos en el espacio y no en un plano, lo cual trae como necesidad la aplicación de los métodos ópticos para el análisis de cuerpos en 3D, ya que esto nos proporcionaría mayores detalles con una simple inspección, tendríamos el comportamiento y localización de las vibraciones en la máquinas de forma espacial, dando así una mejor perspectiva sobre el problema y podríamos así brindar una solución más eficiente a la hora de corregir el defecto, traduciéndose en mayor tiempo de vida para la máquina, mejor rendimiento en

la producción, menor tiempo invertido en la localización de fallas en el sistema y mayor ganancia económica para la empresa.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Detección y ubicación de vibraciones en objetos 3D mediante el uso de un método óptico no invasivo.

OBJETIVOS

Objetivo General:

- Detección y localización de vibraciones en un sólido.

Objetivos específicos:

- Recopilación de los fundamentos teóricos de vibraciones mecánicas.
- Recopilación de los fundamentos teóricos de los métodos a usar para la determinación de vibraciones mecánicas.
- Diseñar y construir el prototipo que nos sirva de base para realizar el estudio de las vibraciones dentro un elemento mecánico.
- Diseñar y ensamblar el montaje basado en técnicas de interferometría *speckle* y holografía digital, que nos permita tomar los datos necesarios para el estudio.

- Con la información obtenida, elaborar un modelo mediante holografía digital, y valiéndonos de un computador permitir visualizar el fenómeno.
- Reconocer los patrones de vibraciones en un sólido producto de un elemento que genera vibraciones y que está localizado en el interior del mismo.
- Determinar las coordenadas del epicentro vibratorio en el sólido.
- Presentar los resultados obtenidos de esta investigación, a través de la presentación de la tesis.

JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

A medida que transcurren los años, hemos visto como la cantidad de equipos y máquinas no solo se han incrementado enormemente, sino que además nuestra dependencia de ellas también ha crecido, tanto en nuestra vida diaria como en los procesos industriales que llevamos a cabo. La eficiencia, el rendimiento, la vida útil, son conceptos que toman cada vez mayor importancia, por lo que entre otros aspectos y para afrontar las crecientes demandas y exigencias a las cuales se ven sometidas las máquinas, debemos realizar periódicamente inspecciones con el fin de verificar el buen funcionamiento de cada una de las partes que la componen.

Uno de los factores que más impacta de manera negativa la eficiencia y el funcionamiento de un equipo, son las vibraciones. Este fenómeno es apreciable en cualquier máquina, pero es en las de tipo rotativo donde es más

apreciable el daño que estas pueden ocasionar. Un mal ajuste, una mala calibración, defectos de fabricación, operaciones que no están dentro del rango permitido de funcionamiento, una manipulación inapropiada, pueden traer como consecuencia, que una máquina vibre fuera de los valores establecidos como normales y/o permisibles. Este hecho puede traer como consecuencia desde el simple daño de una de las piezas hasta la destrucción completa del equipo, añadiendo además que esto puede ocasionar no solo pérdidas económicas, sino también en algunos casos, la de vidas.

A fin de evitar o minimizar los efectos nocivos que pueden producir este tipo de vibraciones, se debe realizar el estudio de su comportamiento en los equipos. Esto ha permitido que se desarrollen ciertos instrumentos de medición con los cuales podemos cuantificarlas, para así poder tomar, de manera temprana, medidas correctivas y evitar llegar a males mayores. Todo esto con la finalidad de poder garantizar una vida más larga de las partes y por ende de la máquina en conjunto, a la vez que todo esto se traduce en mayor seguridad para las personas y una mayor producción.

Los dispositivos y métodos utilizados en la actualidad, invasivos o no, están basados en estudios de dos dimensiones, y como ejemplo de ellos podemos mencionar:

- Los acelerómetros que son dispositivos para medir aceleración y vibración. Estos dispositivos convierten la aceleración de gravedad o de movimiento, en una señal eléctrica analógica proporcional a la fuerza aplicada al sistema, o mecanismo sometido a vibración o aceleración.

Esta señal analógica indica en tiempo real, la aceleración instantánea del objeto sobre el cual el acelerómetro está montado.

- Los instrumentos de Corriente Inducida 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.

Estos métodos o procedimientos, y otros más, buscan satisfacer las necesidades referentes al estudio de las vibraciones en equipos mecánicos. Con la finalidad de establecer y definir métodos más efectivos, es que se busca avanzar en el aprovechamiento de los conocimientos técnicos y científicos para proporcionar instrumentos que no solo no se vean limitados por el contacto físico, sino que además sean capaces de brindar una caracterización temprana de daños y una predicción de la vida remanente de los componentes de las maquinarias. Entendiendo por daño todas aquellas imperfecciones inducidas por manufactura o servicio, detección como la técnica experimental que permite comprobar la existencia de un daño y la caracterización como la técnica analítica o numérica, que permite cuantificar la geometría y magnitud del daño. Añadiendo a todo esto el estudio en tres dimensiones y no solamente en el plano y adaptarnos mejor a las exigencias del mundo de hoy.

Por todo lo antes mencionado, se justifica realizar un estudio aplicando la interferometría en conjunto con el “*speckle*”, "*Digital Speckle Pattern Inteferometry*" por su nombre en inglés, que es una técnica experimental capaz de obtener mediciones de gran precisión de desplazamientos y deformaciones unitarias sobre objetos que reflejan la luz. Cuando se ilumina una superficie rugosa mediante un haz láser, se observa una imagen con puntitos brillantes. Si

se examina con más atención, puede apreciarse un patrón moteado o *speckle* superpuesto sobre la imagen. Este tipo de patrón aparece aunque no se enfoque sobre la superficie. Este efecto facilita enormemente la posibilidad de fotografiar objetos rugosos con luz coherente; por lo que constituye una apreciada fuente de información de las características mecánicas de la superficie observada.

Basados en estas técnicas y estudios es que se propone diseñar un sistema capaz de reconocer las vibraciones en una máquina, su epicentro, cuantificación y monitoreo mediante un computador, con ayuda de las técnicas holográficas digitales, de manera tal que podamos definir cuáles son los patrones normales de vibración y cuando se está fuera de estos. Ofreciendo así una valiosa información sobre el funcionamiento y posible mantenimiento que necesite nuestro equipo mecánico.

ALCANCES Y LIMITACIONES

El desarrollo del presente estudio se encuentra sujeto a las siguientes consideraciones:

- El prototipo a estudiar tendrá la forma de un paralelepípedo.
- El elemento que producirá las vibraciones, será un piezoeléctrico.
- La parte experimental del trabajo de investigación se realizara en los laboratorios del edificio de Física Aplicada.
- La captura de datos se hará a través de hologramas.

- La digitalización de los datos se hará a través de cámaras digitales.
- Se utilizará un software para la reconstrucción de imagen.
- El diseño de la mesa se hará con materiales de bajo costo y en lo posible se utilizaran materiales ya existentes en los laboratorios de física.

RECURSOS DISPONIBLES

Para la realización de este trabajo final de grado se dispone de:

- Dos equipos Laser He-Ne de 20 *mW* con $\lambda = 632,8 \text{ nm}$.
- Fuente de poder: UNIPHASE, modelo:1216 – 1, serial # 532668, INPUT 115 VAC, OUTPUT 3000 VDC @ 6.5 mA
- Generador de funciones: HP modelo: 33120A
- Lentes y Objetivos caracterizados
- Separador de ondas
- Espejos de primera superficie
- Filtros (espacial y pasa banda)
- Soportes
- Medios de registro holográficos
- Revelador fotográfico

Hardware

- PC portátil acer travelmate 2420 1.60 GHz, 256MB DDR 400 de RAM, DD 40 GB, graficas integradas.

- PC desktop INTEL CORE 2 DUO E4000 1.86 *GHz*, 1.5 *GB* DDR 2 533 de RAM, DD 80 *GB*, gráficas NVIDIA geforce 7300 GS de 512 turbo cache.
- PC desktop INTEL CORE 2 QUAD Q6600 2.40 *GHz* 4 *GB* DDR 2 800 de RAM, DD 250 *GB*, gráficas NVIDIA geforce 9600 GT Overclock de 512.
- Impresora, escáner, copiadora HP psc 1315 all in one
- Cámara DSC-W30 de SONY.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Vibraciones

El estudio de las vibraciones mecánicas, también llamado mecánica de las vibraciones, es una rama de la mecánica, o más generalmente de la ciencia, que estudia los movimientos oscilatorios de los cuerpos o sistemas y de las fuerzas asociadas con ella.

Las vibraciones mecánicas se han convertido en algo esencial para todo ingeniero mecánico, ya que el buen funcionamiento de la maquinas está relacionado en muchos casos con su comportamiento vibratorio.

Las vibraciones mecánicas son un fenómeno que se ve reflejado por oscilaciones presentes en un cuerpo o sistema, las cuales son producto de una perturbación en un momento anterior; a estas oscilaciones se les denomina respuesta del sistema.

Uno de los aspectos fascinantes de las vibraciones u oscilaciones es que estas no son únicas, y no existe una manera única de clasificarlas. Estas pueden ser clasificadas de acuerdo a los siguientes fundamentos:

- De acuerdo al modelado matemático del sistema a estudiar:

Sistemas lineales: Son aquellos cuya respuesta se puede modelar mediante ecuaciones diferenciales lineales.

Sistemas no lineales: Son aquellos que son modelados por ecuaciones diferenciales no lineales.

- De acuerdo a la excitación a la que se someten:

Respuesta libre: se refiere a la reacción del sistema a una perturbación inicial.

Respuesta forzada: se refiere a la reacción del sistema a una perturbación sostenida en el tiempo.

- De acuerdo a los grados de libertad del sistema:

Sistemas discretos: Son aquellos que poseen un número finito de grados de libertad.

Sistemas continuos: Son aquellos que poseen un número infinito de grados de libertad.

- De acuerdo al contenido o no, de dispositivos disipadores de energía mecánica:

Respuesta amortiguada: Se refiere aquellos sistemas que poseen uno o más dispositivos disipadores de energía mecánica.

Respuesta no amortiguada: Se refiere aquellos sistemas que no poseen un dispositivo disipador de energía mecánica.

Dada la complejidad de las vibraciones mecánicas, y tomando como base los objetivos de la investigación, se especificará a continuación la respuesta forzada para un sistema de un grado de libertad.

La respuesta forzada depende del tipo de excitación a la que se somete el sistema, y para efectos de estudio se considera que la oscilación es armónica. En este tipo de respuesta entran en juego varios términos que se deben considerar, como lo son:

$F(t)$: Que se refiere a la excitación armónica constituida por una amplitud F_0 , una frecuencia ω , un tiempo t y un movimiento armónico regido por una función seno, coseno o combinaciones de los mismos, dando como conclusión:

$$F(t) = F_0 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t)$$

Para la definición del comportamiento genérico del sistema se tiene el siguiente esquema (ver imagen #1):

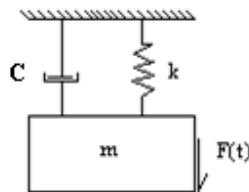


Imagen # 1; Esquema genérico de un sistema masa – resorte – amortiguador.

Donde la masa m es perturbada por una excitación armónica ($F(t) = F_0 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t)$). Realizando el análisis de fuerzas se obtiene el siguiente diagrama (ver imagen # 2):

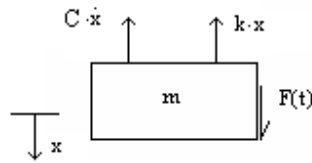


Imagen # 2; Diagrama de cuerpo libre de una masa sometida a fuerzas.

Realizando sumatorias de fuerzas en la dirección x se tiene:

$$F(t) - k \cdot x - C \cdot \dot{x} = m \cdot \ddot{x}$$

Reorganizando los términos obtenemos la siguiente expresión:

$$m \cdot \ddot{x} + C \cdot \dot{x} + k \cdot x = F_0 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t)$$

Aplicando teoría de ecuaciones diferenciales se puede comprobar que la solución general del sistema está compuesta por una componente homogénea y una permanente. Donde la componente homogénea representa la respuesta libre o componente transitoria del sistema, la cual tiende a cero a medida que el tiempo tiende a infinito, razón por lo cual este término puede despreciarse para el análisis del sistema.

Respuesta libre:

$$m \cdot \ddot{x} + C \cdot \dot{x} + k \cdot x = 0$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x_h = 0$$

La componente permanente se refiere a la componente sostenida en el tiempo producto de la excitación externa a la cual se ve sometida el sistema.

La solución por teoría de ecuaciones diferenciales para esta situación queda definida de la siguiente manera:

$$x_p = \frac{F_o \cdot (k - m \cdot \omega^2)}{(k - m \cdot \omega^2)^2 + (C \cdot \omega)^2} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) + \frac{(-) \cdot F_o \cdot (C \cdot \omega)}{(k - m \cdot \omega^2)^2 + (C \cdot \omega)^2} \cdot \text{cos}(\omega \cdot t)$$

Organizando términos:

$$x_p = \frac{F_o}{(k - m \cdot \omega^2)^2 + (C \cdot \omega)^2} \cdot [(k - m \cdot \omega^2) \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) - (C \cdot \omega) \cdot \text{cos}(\omega \cdot t)]$$

Donde:

$$X = \frac{F_o}{(k - m \cdot \omega^2)^2 + (C \cdot \omega)^2}$$

Siendo X la amplitud del movimiento armónico

Añadiéndose el concepto de ángulo de fase, tenemos:

$$\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{C \cdot \omega}{k - m \cdot \omega^2} \right)$$

Con lo cual el término que acompaña a la amplitud se puede escribir de la siguiente manera:

$$[(k - m \cdot \omega^2) \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) - (C \cdot \omega) \cdot \text{cos}(\omega \cdot t)] = \text{sen}(\omega \cdot t - \gamma)$$

Una vez organizado y simplificado cada uno de los términos, la respuesta del sistema queda representada por:

$$x = X \cdot \text{sen}(\omega \cdot t - \gamma)$$

Con este grupo de ecuaciones se establecen los principios y la nomenclatura que se utilizan para el estudio de las vibraciones, aclarando que estas son solo algunas de ellas y que el estudio completo de las vibraciones es mucho más amplio y complejo.

Dentro de esta investigación se utilizan muchos términos y conceptos que no son de uso normal o cotidiano para un ingeniero mecánico por lo que es importante tenerlos en claro para poder entender mejor el contenido y alcance de este trabajo de investigación.

Física Óptica

La óptica es solo una de las tantas ramas que posee la física, y la física óptica u ondulatoria es la que se encarga de los aspectos correspondientes al comportamiento de la luz tales como su emisión, composición o absorción, así

como de la polarización, la interferencia y la difracción. En esta rama la luz es considerada una onda electromagnética. Recordemos que la luz presenta un comportamiento dual, partícula y onda, donde el comportamiento como partícula es materia de estudio de la óptica geométrica y el comportamiento como onda es estudiado por la ondulatoria. Es así como la luz es definida como la zona del espectro de radiación electromagnética que se extiende desde los rayos X hasta las microondas, e incluye la energía radiante que produce la sensación de visión (ver imagen # 3).

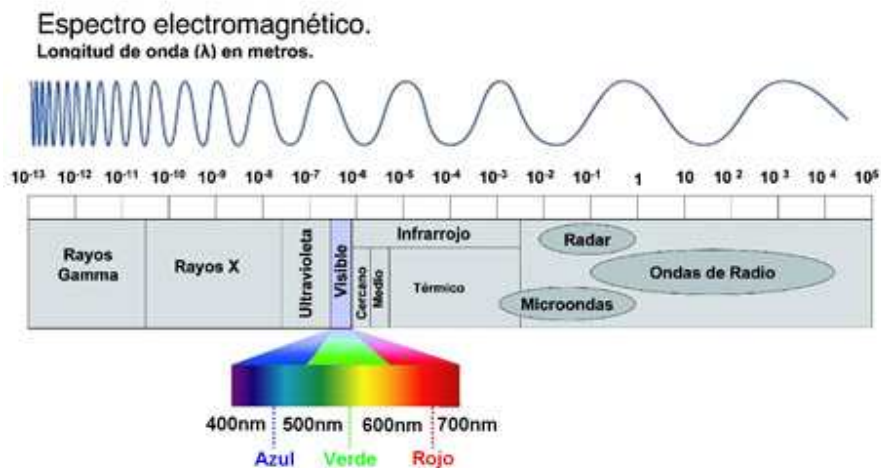


Imagen # 3; Espectro de radiación electromagnético.

La física óptica considera la luz como una onda electromagnética que se mueve como una onda armónica, que se propaga en dirección (z), esta depende de un tiempo (t), una amplitud (U), la longitud de onda (λ) y de una frecuencia (ω) (ver imagen # 4), quedando así la representación matemática.

El eje $\psi(z, t)$ representa la luz como onda electromagnética.

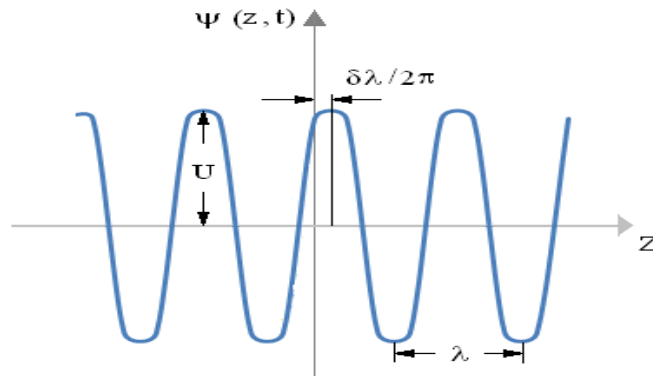


Imagen # 4; La luz como una onda armónica.

$$\psi(z, t) = U \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{z}{\lambda} - \omega \cdot t\right) + \delta\right)$$

También esta expresión puede ser escrita como:

$$\psi(z, t) = U \cdot \cos(k \cdot z - 2 \cdot \pi \cdot \omega \cdot t + \delta)$$

Donde k es el número de onda viene dado por $k = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$ y δ es la constante de fase.

Pero la onda electromagnética se propaga en el espacio por lo tanto para el caso genérico se define como:

$$\psi(x, y, z, t) = U \cdot \cos(k \cdot \mathbf{n} \cdot \mathbf{r} - 2 \cdot \pi \cdot \omega \cdot t + \delta)$$

Donde \mathbf{n} es el vector unitario en cuya dirección se propaga el plano de onda y \mathbf{r} es un punto arbitrario en el espacio $\mathbf{r} = (x, y, z)$. Los elementos en negritas se refieren a un producto escalar.

La diferencia de fase se describe de la siguiente manera: supóngase que se toman 2 puntos z_1 y z_2 , en la dirección de propagación de un haz de luz las fases serán $\varphi_1 = k \cdot z_1 - 2 \cdot \pi \cdot \omega \cdot t + \delta$ y $\varphi_2 = k \cdot z_2 - 2 \cdot \pi \cdot \omega \cdot t + \delta$ respectivamente, entonces la diferencia de fase será $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = k \cdot (z_1 - z_2)$ como se puede observar la diferencia de fase es igual a la diferencia de recorrido del haz multiplicado por el número de onda, esta relación de diferencia de fase se cumple perfectamente en el vacío pero si se está en un medio diferente, la longitud recorrida a usar será la longitud recorrida óptica (r_o) que no es mas que la longitud recorrida geoméricamente (r_g) por el coeficiente de refracción del medio n quedando determinada la diferencia de fase como $\Delta\varphi = k \cdot r_o$, $r_o = n \cdot r_g$

Dada la complejidad para manipular la expresión general de la onda electromagnética para poder explicar los conceptos que se serán definidos más adelante, es conveniente llevar la expresión a una notación compleja la cual permitirá una manipulación más sencilla y de fácil comprensión para futuras explicaciones.

$$\psi(x, y, z, t) = \text{Re}\{U \cdot e^{i \cdot (\varphi - 2 \cdot \pi \cdot \omega \cdot t)}\}$$

Donde $\varphi = k \cdot \mathbf{n} \cdot \mathbf{r} + \delta$ y Re indica que se está trabajando con la parte real del número complejo, y de ahora en adelante se omitirá el término Re y se utilizará solamente $U \cdot e^{i \cdot (\varphi - 2 \cdot \pi \cdot \omega \cdot t)}$ quedando sobreentendido que se está haciendo referencia a la parte real.

Desarrollando un poco:

$$\psi(x, y, z, t) = U \cdot e^{i \cdot \varphi} \cdot e^{-i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \omega \cdot t}$$

En la parte de física óptica que se va a desarrollar más adelante el término más importante es el término de espacial, ya que la parte temporal es conocida para cada frecuencia, por lo cual se omitirá el término temporal quedando como resultado:

$$u = U \cdot e^{i\varphi}$$

A continuación se definirá un concepto importante el cual será el principio de los métodos de física óptica que se van a utilizar.

Interferencia

La Interferencia es un fenómeno donde se superponen dos o más ondas (que para objeto de estudio nos limitaremos a considerar solo ondas electromagnéticas), dando como resultado un nuevo patrón de onda (ver imagen # 5). La acepción más usual para interferencia se refiere a la superposición de dos o más ondas de frecuencia idéntica o similar.

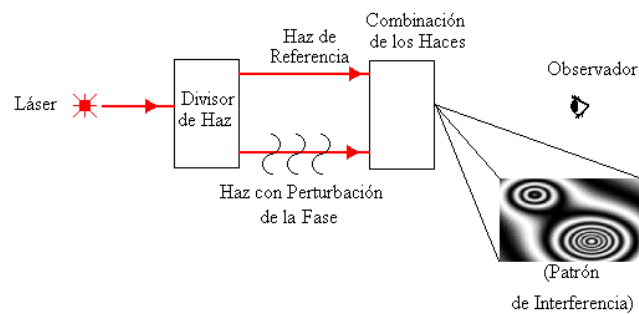


Imagen # 5; Interferencia entre dos ondas.

Para entender mejor este concepto veamos el siguiente desarrollo. Se tienen dos ondas llamadas u_1 y u_2 :

$$u_1 = U_1 \cdot e^{i \cdot \varphi_1}$$

$$u_2 = U_2 \cdot e^{i \cdot \varphi_2}$$

Donde U se refiere a la amplitud de la onda y φ la fase de la onda. La interferencia se define:

$$u = u_1 + u_2$$

La cuantificación observable de las ondas electromagnéticas se mide por la intensidad (I) que no es más que la cantidad de radiación por unidad de área que recibe un foto detector (el ojo, CCD en cámaras digitales, películas, entre otras). Esta viene representada por el cuadrado de la amplitud del frente de onda y se define como:

$$I = |u^2|$$

Entonces:

$$\begin{aligned} |u_1 + u_2|^2 &= U_1^2 + U_2^2 + 2 \cdot U_1 \cdot U_2 \cdot \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \\ &= I_1 + I_2 + 2 \cdot \sqrt{I_1 \cdot I_2} \cdot \cos(\Delta\varphi) \end{aligned}$$

Donde $2 \cdot \sqrt{I_1 \cdot I_2} \cdot \cos(\Delta\varphi)$ es denominado termino de interferencia ya que en él se encuentra contemplada la diferencia de fase de las ondas que interfieren (ver imagen # 6).

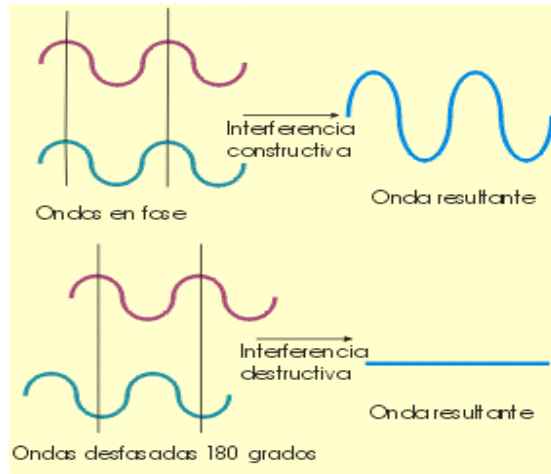


Imagen # 6; Interferencia constructiva e interferencia destructiva.

Expresados los principios básicos del fenómeno de la interferencia, pasamos a describir la aplicación de esta en estudios metrológicos por medio de la interferometría.

Interferometría

La interferometría se basa en el fenómeno de la interferencia entre dos ondas, pero necesita que se satisfagan las siguientes condiciones; que las dos ondas luminosas que se utilizan para experimentar posean exactamente la misma frecuencia y que sean sincrónicas, es decir que sus diferencias de fase, y por lo tanto las distancias entre las crestas de ambas ondas, deben permanecer constantes con el tiempo.

La interferometría es una herramienta indispensable en muchas actividades en las que es necesario realizar mediciones de alta precisión. Puede

ser aplicada para medir la forma y perfil de superficies, distancias, índice de refracción, desplazamientos mecánicos, velocidades y más. Es utilizada en campos muy diversos, como en mediciones ópticas de presión, metrología en procesos industriales, astronomía (interferometría estelar, óptica y de radiofrecuencia) y medidas en geofísica. Una de las más importantes es la medición de deformaciones en una superficie.

Frecuentemente, debido a causas muy variadas, una superficie puede tener deformaciones pequeñísimas que no son detectables a simple vista. Pero pesar de su reducida magnitud, estas deformaciones pueden ser el síntoma de problemas graves que pueden presentarse en el presente o en un futuro. La interferometría tiene en estas situaciones un papel muy importante, ya que con ella se pueden detectar e inclusive medir.

Esta aplicación de técnicas interferométricas es especialmente útil si se le combina con métodos holográficos, a esta unión de técnicas se le conoce como interferometría holográfica. Sin embargo la interferometría como tal posee ciertas limitaciones:

- No es aplicable en objetos rugosos.
- Los montajes no son versátiles.
- Es muy sensible al movimiento relativo entre los elementos ópticos del montaje.

Estas limitaciones no representan un gran problema para poder emplear esta herramienta la cual ha demostrado ser muy útil.

Para efectos de esta investigación nos enfocaremos en la parte del estudio de las vibraciones.

Para hacer el estudio se debe utilizar una herramienta llamada interferómetro que no es más que un arreglo óptico para la visualización del fenómeno de interferencia.

El Interferómetro

Existen muchos tipos de interferómetros, los cuales se pueden dividir en dos grandes grupos, interferómetros de doble haz e interferómetros de múltiples ondas. Dentro de los interferómetros de doble haz encontramos dos subgrupos, de división de amplitud y de división de frente de onda.

Los interferómetros más destacados en interferometría son los de división de amplitud entre los cuales podemos encontrar el interferómetro de Mach – Zehnder, el de Michelson, el de Fabry – Perot, el de Sagnac y el de Pohl.

El interferómetro de Michelson es utilizado en aplicaciones tales como; medida de la longitud de coherencia temporal, medidas de espesores e índices de refracción y para vibraciones y dilataciones, esto aunado al hecho de su sencillo montaje es la razón por la cual, fue escogido este tipo de interferómetro para realizar esta investigación.

El montaje del Michelson consiste en un divisor de haz el cual enviará los haces divididos (uno de referencia y otro de estudio) a sus respectivos medios (espejos de primera superficie), los cuales reflejarán de vuelta los haces al divisor de haz donde estos interferirán y a su vez se reflejarán hacia la pantalla de visualización, con ayuda de una lente positiva, el patrón de interferencia (ver imagen # 7).

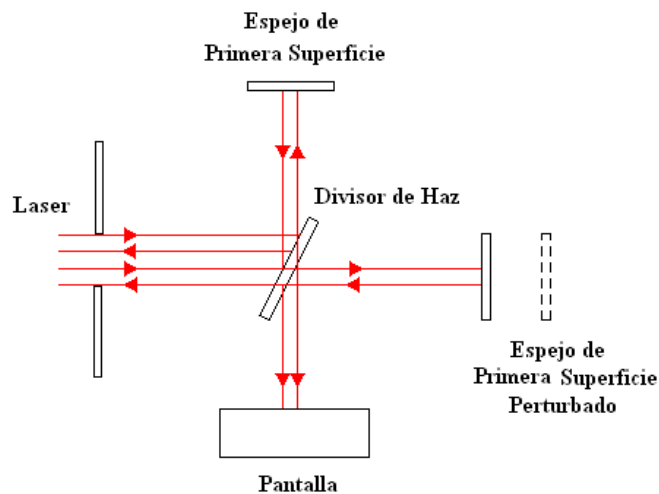


Imagen #7; Esquema de un interferómetro de Michelson.

El haz de referencia es aquel que no es perturbado en el trayecto, mientras que el haz de estudio, es el haz que es perturbado en su trayecto, como los dos haces que interfieren sobre la pantalla provienen de la misma fuente luminosa, esta depende sólo de la diferencia de camino óptico recorrido por cada uno, esto se muestra en la pantalla como unas franjas, unas constructivas y unas destructivas, las constructivas son aquellas franjas claras, en donde coinciden las fases de ambos haces, mientras que las destructivas son las franjas oscuras o negras donde las fases de ambos no coinciden (ver imagen # 8).

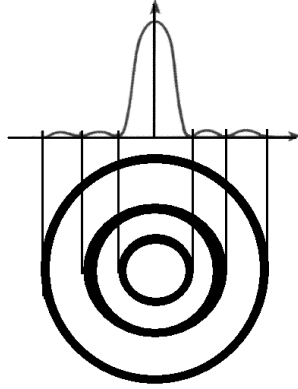


Imagen # 8; Patrón de interferencia entre dos haces.

Como se aprecia en imágenes anteriores (imágenes # 5 y #7) la fuente de luz usada es el laser, pero ¿por qué el laser y no otra fuente de luz?

El Laser

El láser es un dispositivo electrónico que amplifica un haz de luz. Se basa en la excitación de una onda estacionaria entre dos espejos, uno opaco y otro traslúcido, en un medio homogéneo. Como resultado de este proceso se origina una onda luminosa de múltiples idas y venidas entre los espejos, que sale por el traslúcido. Las tres características que diferencian el rayo láser de la luz del Sol o de la generada por una bombilla, es que aquél es un haz de luz colimado⁽¹⁾, mono direccional, monocromático y coherente (ver imagen # 9).

¹ Se denomina luz colimada a la luz cuyos rayos son paralelos entre sí.

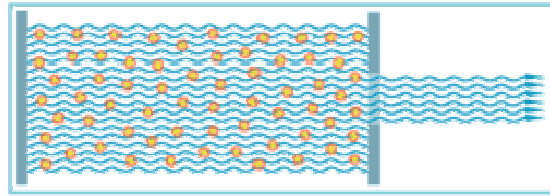


Imagen # 9. Haz de laser.

Existen muchos tipos de laser, los cuales varían desde su composición hasta el tipo de emisión que emanan. El láser de helio – Neón fue el primer láser de gas que se construyó y actualmente sigue siendo muy utilizado. Sus principales aplicaciones se presentan en el campo de la metrología, la holografía, y la interferometría holográfica. Tiene como características una longitud de onda de $632,8 \text{ nm}$ y un haz continuo con potencias en el intervalo de $0,5$ a 50 mW .

A continuación en la imagen # 10 se muestra el esquema básico de funcionamiento.

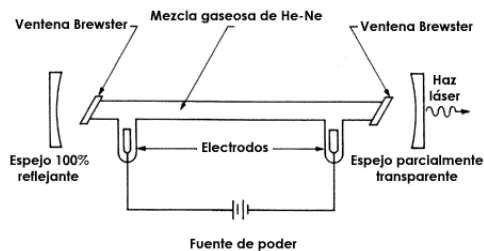


Imagen # 10; Esquema básico del funcionamiento de un laser de He – Ne.

La Coherencia

La coherencia define el grado de sincronización respecto a la fase, el espacio y el tiempo de los haces de una onda. Este concepto así como está no ofrece mayores luces sobre el fenómeno que trata de describir. Para hablar de coherencia hay que referirnos a la luz y a su comportamiento ondulatorio, a demás reconocer que este comportamiento es descrito a través del análisis del movimiento armónico (funciones seno o coseno), dicho esto el término de coherencia se interpreta como la medida de correlación de campos ópticos. En otras palabras, la coherencia supone que dos señales, con sus argumentos convenientemente desplazados uno respecto del otro, son con cierta certeza, estrictamente proporcionales entre sí.

Respecto a la coherencia debemos distinguir dos tipos, la coherencia espacial y la coherencia temporal.

La coherencia temporal (τ_c) es un parámetro de tiempo que indica el tiempo máximo en que pueden separarse los frentes de onda que provienen de una misma fuente sin embargo esta medida de tiempo se puede transformar en un parámetro longitudinal (l_c) tomándose en cuenta la velocidad de propagación de la luz (c) se obtiene que $l_c = c \cdot \tau_c$. Esta expresión quiere decir que l_c es la extensión en el espacio en la que la onda tiene una forma sinusoidal de tal manera que su fase puede predecirse con seguridad.

Este parámetro longitudinal se llama longitud de coherencia (l_c) el cual es muy importante a la hora de evaluar un montaje holográfico ya que si los

haces al interferir en el medio de registro (M) no son coherentes no se producirá holograma.

La coherencia espacial se refiere a la comparación de la ordenación de la oscilación de dos puntos en un mismo frente onda, este parámetro es muy importante tomarlo en cuenta cuando se trabaja con un láser de régimen multimodo, mientras que para los láseres de holografía la gran mayoría trabajan en modo de oscilación TEM00 el cual otorga una gran coherencia espacial.

Cuando se genera la radiación láser, el perfil de propagación puede producirse de diversas formas (una mancha de luz o varias). El perfil más comúnmente utilizado es el modo TEM00, cuya identificación proviene de las siglas en inglés *Transversal Electric Mode*, donde los números colocados en el lado derecho (00) están relacionados con las funciones matemáticas que describen estas distribuciones (polinomios de Hermite). En el modo TEM00 el haz es enfocado en un área muy pequeña (aproximadamente 0.5 mm de diámetro), y de todos los modos posibles, el modo TEM00 es el que tiene el menor tamaño, es solo un punto de luz intenso, mientras que los otros modos se extienden en un área mayor. Es por esto que el TEM00 ofrece una mayor coherencia espacial que los demás.

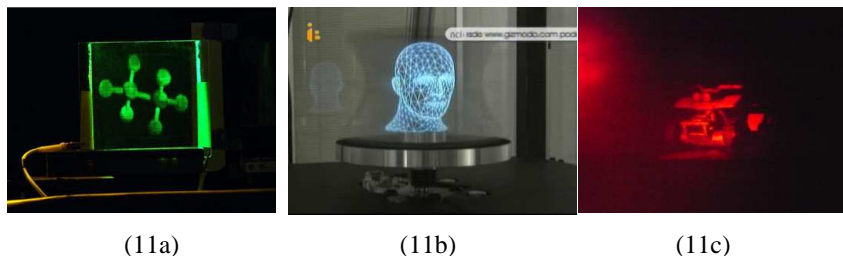
La Holografía

La Holografía es una técnica de física óptica que permite el registro y posterior reconstrucción del frente de onda de un objeto. A diferencia de la

fotografía que registra la distribución de intensidad de una imagen, la holografía registra la amplitud compleja de la onda que proviene directamente del objeto holografiado. El registro de la amplitud compleja (amplitud y fase) se realiza mediante la interferencia de la onda o haz objeto con una onda o haz de referencia. Las variaciones de intensidad del patrón de interferencia de ambos haces se registra en una emulsión fotográfica de elevada resolución (grano muy fino para registrar del orden de 5000 *líneas/mm*) situada sobre una placa. Esta placa recibe el nombre de holograma.

Tras el registro, si el holograma es iluminado por el haz de reconstrucción – casi siempre igual al haz de referencia – se obtiene la reconstrucción del frente de onda objeto por difracción a través de las franjas de la placa holográfica. La percepción visual del frente de onda objeto reconstruido permite ver una imagen del objeto con una fuerte sensación de presencia real, ya que la reconstrucción es tridimensional y la escena puede observarse desde diferentes perspectivas. El holograma actúa como el marco de una ventana a través del cual el objeto puede observarse con la variedad de perspectivas que permite su apertura.

En las siguientes imágenes se muestran ejemplos de hologramas (ver imágenes # 11a, 11b, 11c).



Imágenes # 11; Ejemplos de hologramas.

Dentro del campo de la holografía existen varios tipos de montajes, los cuales difieren entre sí por la geometría de registro que tienen. Las geometrías fundamentales las encontramos representadas en los siguientes montajes:

- De Gabor
- De Leith y Upatnieks
- Denisiuk

Para poder comprender mejor como funcionan estos montajes holográficos es conveniente definir previamente ciertos conceptos:

- *Haz objeto o de estudio:* se refiere al haz de luz que incide en el objeto y a su vez reflejado por este hacia el medio de registro (M), el cual es denotado por (f_o).
- *Haz de referencia o de reconstrucción:* se refiere al haz que se dirige al medio de registro sin pasar por el objeto, y es denotado por (f_r).
- *Medio de registro:* se refiere al elemento donde se va a registrar la información provenientes de los haces de luz, es denotado por (M).

Los hologramas de Gabor se caracterizan por que no existe una división del haz de luz. El haz del objeto proviene del mismo haz de referencia que incide en el objeto, al mismo tiempo que el haz de referencia incide en el medio de registro (M), esto quiere decir que f_r y f_o se encuentran en la misma línea (ver imagen # 12).

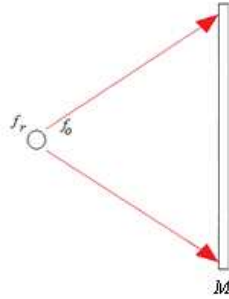


Imagen # 12; Esquema simplificado de un holograma de Gabor.

La desventaja que se presenta este montaje es que durante la reconstrucción de la imagen, la luz proveniente del haz de reconstrucción se propaga hacia el observador, por lo que no facilita las condiciones de observación (ver imagen # 12).

Los hologramas de Leith y Upatnieks son caracterizados por poseer división del haz por lo cual existe un haz de referencia y un haz de estudio que incide en el objeto, luego de esto ambos haces inciden sobre el medio de registro como se muestra en la imagen # 13, debemos recordar que ambos haces provienen de una misma fuente y la variación de colores en la imagen es solo para diferenciarla trayectoria ambos haces.

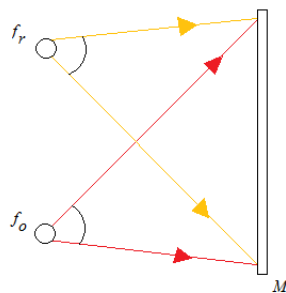


Imagen # 13; Esquema simplificado de un holograma de Leith y Upatnieks.

Los hologramas de Denisiuk se caracterizan por que el haz proveniente del objeto y el haz de referencia se encuentran frente a frente en el medio de registro (ver imagen # 14).

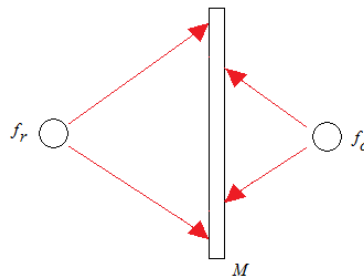


Imagen # 14; Diagrama simplificado de un holograma de Denisiuk.

Para efectos del proyecto de investigación se tratara más a fondo el holograma de tipo Leith y Upatnieks, ya que en esta geometría se basa en montaje final.

Cómo se Produce el Registro Holográfico

Sean f_r (haz de referencia) y f_o (haz del objeto) haces coherentes los cuales iluminan simultáneamente el medio de registro (M). Dada la condición de coherencia de ambos haces esto implica que la amplitud total en el medio de registro $A_t = A_r + A_o$ y la iluminación será:

$$I = |A_t|^2 = |A_r|^2 + |A_o|^2 + A_r \cdot A_o^* + A_r^* \cdot A_o \quad (2)$$

² Donde los términos que llevan un asterisco como superíndice se refieren a términos conjugados, ya que las operaciones son realizadas con números complejos.

Dada la naturaleza del holograma, de tipo de transmisión⁽³⁾ donde ambos haces inciden en la misma cara del medio de registro M , esta adquiere una transmitancia⁽⁴⁾ de amplitudes (T_a), que depende de la exposición a la que se somete dicho medio la cual viene representada por $E = I \cdot t$ donde I representa la intensidad y t el tiempo de exposición. Se supondrá también que T_a se puede descomponer en una serie de Taylor de la exposición E

$T_a = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot I \cdot t + \dots$ lo cual es aproximadamente igual

$$T_a = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot (|A_r|^2 + |A_o|^2 + A_r \cdot A_o^* + A_r^* \cdot A_o) \cdot t$$

Desde un punto de vista físico, la expresión anterior no es más que la descripción matemática de la transmitancia en el medio de registro M donde además se pueden apreciar información sobre la iluminación ($|A_r|^2 + |A_o|^2$), la amplitud con la fase ($A_r \cdot A_o^*$), ($A_r^* \cdot A_o$) tanto del haz de referencia como el del objeto.

Luego del proceso de registro, se procede a la reconstrucción de la imagen iluminando el medio de registro M con el haz de referencia f_r en la misma posición que se iluminó en el proceso de registro, como consecuencia de la amplitud A_m del medio de registro que emitirá será:

$$A_m = T_a \cdot A_r$$

$$A_m = (\alpha_1 + \alpha_2 \cdot t \cdot (|A_r|^2 + |A_o|^2)) \cdot A_r + \alpha_2 \cdot t \cdot A_r \cdot A_o^* \cdot A_r + \alpha_2 \cdot t \cdot A_r^* \cdot A_o \cdot A_r$$

³ Holograma por transmisión: Cuando los dos haces, objeto y referencia, llegan a la placa por el mismo lado, se denomina holograma por transmisión. El holograma de Leith y Upatnieks es un holograma de transmisión.

⁴ La transmitancia óptica se define como la fracción de luz incidente, a una longitud de onda especificada, que pasa a través de una muestra.

De donde se puede observar que el término $(\alpha_1 + \alpha_2 \cdot t \cdot (|A_r|^2 + |A_o|^2)) \cdot A_r$ no contiene mayor información útil sobre A_o solo tiene como significado una atenuación de A_r que entra al material de registro M .

También se observa que el término $\alpha_2 \cdot t \cdot A_r \cdot A_o^* \cdot A_r$ contiene información de A_o pero con la perspectiva invertida, lo cual permite reproducir la imagen del objeto pero con cambios en las propiedades de este.

Finalmente el término $\alpha_2 \cdot t \cdot A_r^* \cdot A_o \cdot A_r$ se puede observar que $A_r^* \cdot A_r = 1$ quedando en definitiva $\alpha_2 \cdot t \cdot A_o$ el cual es una copia perfecta de A_o , permitiendo reproducir el objeto real en la perspectiva correcta.

Luego de haberse definido los fundamentos teóricos de la manera en cómo se registra y se reproduce el holograma, a continuación se tratará los medios de registro.

Medios de Registro

El medio de registro es la superficie donde es almacenada la imagen holográfica. Para esto pueden utilizarse diferentes materiales los cuales están basados en fenómenos fotoquímicos y físicos para poder realizar su función.

La decisión de cuál medio de registro se va a utilizar depende del tipo de holograma, del tiempo que se desea almacenar la imagen e inclusive de la cantidad de dinero que se está dispuesto a invertir.

Dentro de las clases de medio que se pueden utilizar, los siguientes 6 son los más populares. Para poder hacer una mejor comparación se han dispuestos en una tabla sus principales características (ver tabla # 1).

Tabla # 1; Principales características y propiedades de los medios de registro holográficos

Grupo	Presentación	Proceso	Procesamiento	Propiedad usada para registrar	Borrable	Tiempo de conservación
Fotográficos con haluros de plata	Capa sobre película o sustrato de vidrio	Reducción de la plata y otras reacciones	Químico en solución acuosa	Ennegrecimiento, cambio de índice de refracción, formación en relieve	No	Decenas de años
Gelatina dicromatizada	Capa sobre sustrato de vidrio	Formación de enlaces transversales	Químico en solución acuosa	Índice de refracción	No	Meses años
Fotorresina	Capa depositada mediante centrifugación	Formación de ácidos orgánicos, fotopolimerización, formación de enlaces transversales	Químico en solución acuosa o mediante aire caliente	Relieve de la superficie	No	Meses años
Termoplásticos	Capa por recubrimiento o deposición	Fuerzas electrostáticas deforman el plástico recalentado	Calentamiento	Relieve de la superficie	Si	Meses años
Fotopolímeros	Capa sobre sustrato	Fotopolimerización	No tiene	Índice de refracción, formación de relieve	No	Meses años
Materiales fotocromáticos	Láminas cristalinas, dispersión en vidrios o en láminas poliméricas	Absorción fotoinducida	No tiene	Ennegrecimiento, cambio de índice de refracción	No	Minutos meses

Para efectos del trabajo de investigación nos centraremos en las gelatinas con haluros de plata, las cuales vienen en varias presentaciones las más populares son en sustratos de vidrio de alta calidad o en polímeros transparentes.

Los medios de registro de sustrato de vidrio presentan ventajas por su rigidez, por su menor sensibilidad a las vibraciones y desplazamientos (microfonismo⁽⁵⁾), que pudiese experimentar debido a los elementos fijadores de la película o medios de registro.

Las películas de polímeros transparentes poseen grandes ventajas. Las más utilizadas son las de acetato pues son fáciles de manejar, su tamaño puede ser ajustado al necesario ya que pueden ser recortadas fácilmente y además son económicas. Sin embargo poseen la gran desventaja de que son sensibles a las vibraciones y desplazamientos que pudiesen existir en los elementos fijadores, pero este efecto se puede minimizar sustancialmente colocando la película entre dos placas de vidrio las cuales absorberán los efectos del microfonismo que puedan existir.

Las placas o películas diseñadas para los hologramas de transmisión poseen una capa antihalo la cual se encarga de evitar que la luz que se refleja en el sustrato regrese a la emulsión de haluros de plata.

Las emulsiones se caracterizan principalmente por los siguientes parámetros:

⁵ Se llama "microfonismo" al efecto de modulación que se produce mecánicamente en un circuito electrónico (generalmente, un oscilador). Cuando un oscilador se somete a una acción mecánica (golpes o vibraciones) y esta acción hace variar su frecuencia de oscilación, el resultado es una señal a la frecuencia del oscilador y modulada en FM por la "señal" mecánica.

La sensibilidad espectral: se refiere a la transmitancia de la placa o película para una exposición fija en función de la longitud de onda λ del haz que incide. Esto permite conocer cuál es el valor de la longitud de onda con la cual es adecuado hacer el registro, al mismo tiempo que se puede determinar el valor de la longitud de onda a la que no es sensible, para así poder iluminar de la zona de revelado.

Transmitancia de amplitudes en función de la exposición: es un parámetro que indica como varia la transmitancia de acuerdo a la exposición, sin embargo hay que considerar que la transmitancia no solo depende de la exposición sino que también se ve afectada sustancialmente por el tiempo de exposición, haciendo que en la mayoría de los casos el comportamiento de la película se desvíe un poco del comportamiento que indica este parámetro.

Parámetro frecuencia – contraste: este indica como es la variación del contraste de las franjas de interferencias que se registran en la emulsión en función de la frecuencia en la que se encuentran estas. Este parámetro se mide en líneas por milímetro, e influye directamente en la resolución de la película, lo cual es muy importante pues determina cual es la frecuencia máxima en la que se puede registrar manteniendo un buen contraste.

Interferometría Holográfica

La interferometría holográfica es una aplicación de la holografía que permite la comparación interferométrica de dos frentes de onda no es más que

el registro del nuevo patrón de onda producto de la interferencia las ondas de referencia y de estudio en un holograma, esta variante otorga ventajas importantes entre las que se encuentran:

- La comparación de frente de ondas que no existen simultáneamente.
- La magnitud de las instalaciones necesarias se pueden reducir sustancialmente.
- Los frentes de ondas que se comparan se pueden reproducir sin la necesidad de repetir el experimento.

Otra de sus ventajas se encuentra en que existen diversos métodos los cuales se ajustan a diferentes necesidades, entre ellos encontramos los siguientes:

Interferometría de doble exposición

Esta técnica se basa en dos tomas o exposiciones que se realizan en una sesión donde en una primera exposición se toma el holograma del objeto sin ser perturbado o en su estado inicial y en la segunda toma se toma al objeto perturbado o en su estado final. La deformación del objeto produce una variación de camino óptico y consiguientemente un cambio de fase entre las dos ondas del objeto, inicial y final. Estos cambios de fase originan el patrón de franjas.

Con el conocimiento previo del tiempo de exposición al cual se puede someter el medio de registro, se divide este de la siguiente manera: $\frac{2}{3}$ se emplean para la primera toma, y el tiempo restante ($\frac{1}{3}$) en la segunda toma.

Como ventaja se tiene que el patrón allí obtenido es referido a la perturbación ocurrida en ese instante y que este método es aplicable a materiales muy diversos. La desventaja es que este método requiere un buen aislamiento vibratorio.

Interferometría tiempo real

Esta técnica es también conocida como interferometría holográfica de exposición única y permite comparar la imagen de un objeto, generalmente en un estado no deformado, con el propio objeto en el que se van introduciendo diversos grados de deformación. Con esto se puede caracterizar de forma dinámica y continua la respuesta de un material a una fuente deformante.

Para la visualización de los patrones de deformación o patrones vibratorios en tiempo real, el procedimiento consiste en hacer interferir la onda proveniente del objeto en el estado en que se desee estudiar, (con algún tipo de perturbación), con la onda proveniente de un holograma previamente tomado del objeto sin perturbación alguna o en un estado inicial. Para que la interferencia sea posible el holograma original se revela y es colocado nuevamente y de manera exacta en la misma posición donde se realizó la toma

original, si esta condición no se cumple no se podrá apreciar el fenómeno.

Para poder satisfacer esta condición se han desarrollado soportes especiales los cuales garantizan que al ser retirado el medio de impresión este pueda volver a ser colocado exactamente en la misma posición.

En el caso de que no disponga de este soporte existe otra variante, y es la de hacer el revelado *in situ*, garantizándose de esta manera que el holograma mantenga siempre la misma posición.

Como ventaja esta técnica proporciona la comodidad de visualizar el fenómeno en tiempo real, pero como desventaja esta la alta precisión que se necesita en los elementos del montaje ya que si el holograma o alguno de los elementos del montaje es movido de su posición original una distancia equivalente a media longitud de onda, no se observara ningún patrón de interferencia.

Interferometría tiempo promedio

Esta técnica es utilizada para el estudio de los cuerpos y superficies vibrantes como altavoces, instrumentos musicales, etc. Como su nombre lo indica, el registro del holograma se realiza durante un tiempo de exposición que es varias veces el promedio de vibración.

La toma que se realiza con esta técnica tiene un tiempo de exposición que es igual al del medio donde se ha de registrar, durante la toma el objeto debe permanecer con la perturbación con la cual se desea experimentar. El aislamiento vibratorio del objeto de estudio debe ser el adecuado ya que cualquier fluctuación de la perturbación puede traducirse en la obtención de un patrón erróneo.

Entre sus ventajas está que se realiza con un montaje sencillo ya que es el que posee menos elementos de montaje y su ejecución es simple, como desventaja se tiene, que la información obtenida es un promedio de los patrones presentes durante el tiempo de la exposición.

Efecto Speckle

Existe otra ventaja en la interferometría holográfica que es lograda gracias al fenómeno del *speckle*.

Cuando el haz de laser toca la superficie rugosa, se generan ondas producto de la reflexión sobre la superficie irregular, dichas ondas toman las distintas direcciones perpendiculares a la superficie de incidencia creando interferencia entre las distintas ondas, como resultado se tiene un distribución arbitraria de puntos blancos y negros en toda la superficie dando una apariencia granular a la superficie de estudio, este fenómeno es fácilmente visible con una fuente de luz que posean una coherencia tanto temporal como espacial (ver imágenes # 15 y # 16).

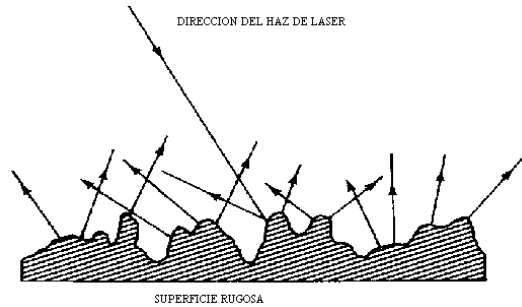


Imagen # 15; Reflexión del haz de laser sobre una superficie rugosa

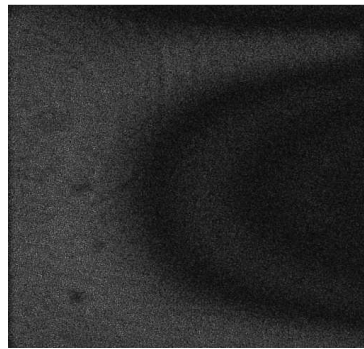


Imagen # 16; Efecto de *speckle* en un holograma.

En la imagen anterior se puede apreciar el efecto del *speckle*, en un principio los científicos pensaban que esto era simplemente ruido, sin embargo con el pasar del tiempo se ha determinado que el *speckle* es una herramienta de estudio para la metrología.

Ahora el *speckle* le otorga 3 ventajas a la interferometría, una es que ofrece mayor facilidad en la obtención de franjas de buena calidad, otra de las ventajas es que los requerimientos de aislamiento vibratorio del montaje y de longitud de coherencia se ven reducidos, la tercera ventaja permite que la interferometría holográfica sea aplicada a objetos rugosos.

Interferometría Speckle

La interferometría *speckle* consiste en el análisis de patrones de intensidad producidos por la interferencia mutua entre frentes de onda coherentes que son sujetos a diferencias de fase o fluctuaciones de intensidad. La interferencia de los frentes de onda dispersados produce una distribución de “motas” (*speckles*) de luz en el área iluminada. Estos patrones constituyen una valiosa fuente de información sobre la superficie iluminada.

Distintos ejemplos de patrones *speckle* se presentan cuando se ilumina una superficie rugosa con un haz láser. Además, con el uso de estos sistemas es posible analizar, en un sólo punto, deformaciones o desplazamientos en la superficie de una muestra tanto en la dirección axial como en la dirección tangencial. En la imagen # 17 se muestra un ejemplo de imágenes de patrones de vibración obtenidas bajo ESPI (del inglés, *electronic speckle pattern interferometry*)

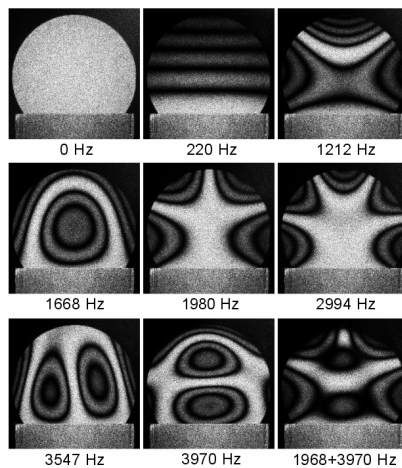


Imagen # 17; Imágenes captadas mediante ESPI con procesamiento digital

Elementos de un Montaje Holográfico

Aparte de todos estos conceptos teóricos los montajes interferométricos y holográficos poseen un cierto número de equipos o elementos con los cuales se debe estar familiarizado. Es por ello que a continuación serán descritos.

Los espejos de primera superficie son aquellos que poseen el material reflectante, el cual puede ser de aluminio o plata, delante del vidrio (ver imagen # 18). Esta configuración evita las reflexiones parásitas producto del vidrio.



Imagen # 18; Espejo de primera superficie.

En los espejos normales o también llamados espejos de segunda superficie la zona de reflexión se encuentra detrás del vidrio, estos pudieran ser utilizados en el montaje pero el problema radica en que como el haz pasa primero por el vidrio esto genera reflexiones parásitas, dando como resultado la devolución de varios haces parásitos que afectan los estudios. Esto puede resolverse con filtros espaciales, sin embargo eso recargaría más el montaje.

El filtro espacial consiste de una lámina con un pequeño orificio el cual se coloca en el punto focal de la lente permitiendo así eliminar los haces

provenientes de reflexiones indeseables, obteniéndose así un haz limpio y homogéneo (ver imagen # 19).

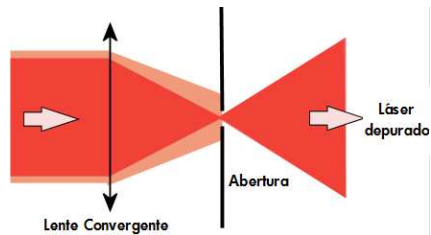
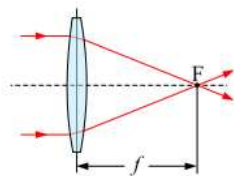
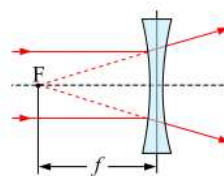


Imagen # 19; Haz de láser depurado de haces parásitos al pasar por un filtro espacial.

Los lentes usados para los montajes interferométricos pueden ser lentes positivas (convexas) o negativas (cóncavas), lo que es importante saber es su distancia focal ya que una vez que el haz pasa por la lente y por el punto focal es cuando el haz se comienza a expandirse. La expansión deseada se logra variando la distancia entre el foco y el punto donde se desea tener la expansión (ver imagen # 20).



Foco (F) y Distancia Focal (f) de una lente convexa (positiva)



Foco (F) y Distancia Focal (f) de una lente cóncava (negativa)

Imagen # 20; Punto focal y distancia focal de una lente cóncava y una convexa.

Los objetivos de microscopio están constituidos por el arreglo de un conjunto de lentes que poseen una distancia focal muy pequeña, en el orden de mm, permitiendo así una gran expansión del haz en una distancia muy corta.

La distancia focal es la longitud existente entre el centro óptico de la lente y el foco, y el foco es el punto donde converge el haz (ver imagen # 20).

El soporte o *holder* es elemento que mantiene firme al medio de registro durante la toma, entre sus características se destaca su gran peso y rigidez los cuales no permiten movimiento relativo del medio de registro y el resto del montaje durante la toma (ver imagen # 21).



Figura # 21; Soporte para las películas holográficas.

Fotómetro es un instrumento utilizado para la medir la intensidad que posee una fuente luminosa, está constituido por un sensor de iluminación conectado a un sistema de medida, ya sea analógico o digital.

Un generador de funciones es un instrumento versátil que genera diferentes formas de onda cuyas frecuencias son ajustables en un amplio rango. Las salidas más frecuentes son ondas sinusoidales, triangulares, cuadradas y diente de sierra. Las frecuencias de estas ondas pueden ser ajustadas desde una fracción de Hertz hasta varios cientos de kilohertz (ver imagen # 22).



Imagen # 22; Generador de funciones.

Filtros espacial pasa banda se encargan de regular la intensidad de un haz, consiste de una placa de vidrio que posee una escala de grises por donde se hace incidir el haz de acuerdo a la intensidad deseada (ver imagen #23).

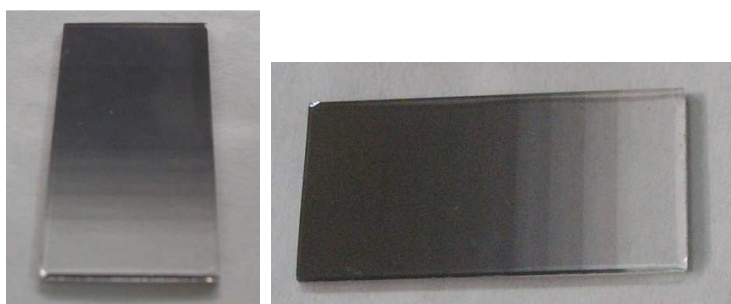


Imagen # 23: Filtro pasa banda.

El divisor de haz o *beam splitter* es un instrumento óptico que divide un rayo de luz en dos. En su forma más común es la de un cubo que está compuesto por dos prismas de vidrio triangulares que están pegados por la base usando bálsamo de Canadá⁶. El grosor de la capa de resina es ajustado para que (para una cierta longitud de onda) la mitad de la luz incidente en una

⁶ Es una oleorresina obtenida a partir de una secreción de la corteza del abeto es utilizada como pegamento para montar muestras para microscopios y en la fabricación de lentes y equipos ópticos. El bálsamo tiene dos importantes propiedades que justifican este uso como adhesivo en sistemas ópticos: es transparente y presenta un índice de refracción tan parecido al del cristal que apenas introduce distorsión.

"puerta" (es decir, una cara del cubo) sea reflejada y la otra mitad sea transmitida (ver imagen # 24).



Imagen # 24; Divisor de haz.

Mesa Antivibratoria

La mesa antivibratoria es una de los elementos más importante dentro de la experimentación, pues su función es la de garantizar un aislamiento de las vibraciones o perturbaciones externas, dejando así que sólo sean registrados los efectos producto de las perturbaciones que el investigador desea analizar.

Una mesa antivibratoria “ideal” debe poseer las siguientes características:

- Las vibraciones exteriores no se transmiten a la mesa.
- Las vibraciones que logran propagarse a la mesa o que se generan en ella se deben atenuar instantáneamente.
- El peso de la mesa debe ser lo menor posible.
- La rigidez de la mesa debe ser alta.

Claro está, un diseño mecánico que cumpla todas las condiciones anteriores es imposible. Sin embargo se pueden conseguir en el mercado, e inclusive se pueden construir mesas que proporcionen un aislamiento inclusive mayor al requerido, sin que se lleguen a cumplir todas las condiciones descritas anteriormente.

Un diseño sencillo de una mesa antivibratoria sería como el que se muestra en la siguiente imagen (ver imagen # 25):

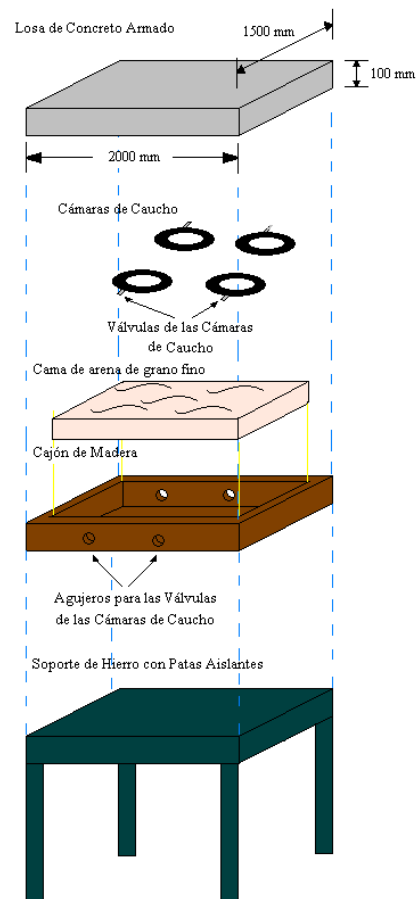


Imagen # 25; Esquema de una mesa antivibratoria.

Para contribuir con el sistema antivibratorio es aconsejable que las cámaras de caucho descansen sobre una superficie de arena, que también sería depositada en el cajón de arena. Es importante acotar que este es un diseño sugerido, y que existen variantes del mismo que también ofrecen buenas prestaciones.

Buena parte del presente trabajo de investigación requiere de un apropiado tratamiento digital. Las imágenes obtenidas son sometidas a un tratamiento digital computarizado por lo que es importante aclarar un concepto que nos será de gran utilidad más adelante.

Pixel

Píxel es la abreviatura de la expresión inglesa *Picture Element* (Elemento de Imagen), y es la unidad más pequeña que encontraremos en las imágenes compuestas por mapa de bits.

Un píxel tiene tres características distinguibles:

- Forma cuadrada
- Posición relativa al resto de píxeles de un mapa de bits.
- Profundidad de color (capacidad para almacenar color).

Un píxel es pues una unidad de información, pero no una unidad de medida, ya que no se corresponde con un tamaño concreto. Un píxel puede ser muy pequeño (0.1 milímetros) o muy grande (1 metro) (ver imagen # 26).

Dos rejillas de 5x5 píxeles

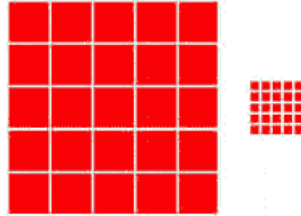


Imagen # 26; Tamaños de pixel.

A mayor resolución, más píxeles hay en una imagen, más grande es su mapa de bits, mayor información contiene y mayor capacidad de distinguir los detalles espaciales finos, por lo que tendrá más definición, permitiendo un mayor detalle, unas transiciones de color más sutiles y una mayor calidad de reproducción.

Las imágenes de mapas de bits dependen de la resolución a la que han sido creadas, por lo que al modificar su tamaño pierden calidad visual. Si se disminuyen, los trazos finos perderán definición, desapareciendo partes de los mismos, mientras que si lo aumentamos, la imagen se pixelizará (ver imagen # 27), al tener que cubrirse de forma aproximada píxeles que inicialmente no existían, produciéndose el conocido efecto de dientes de sierra.

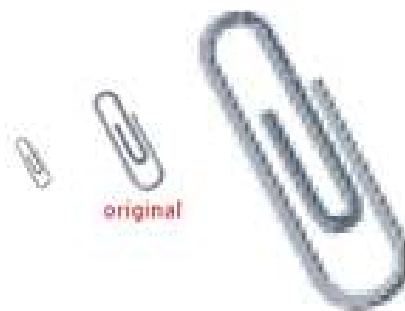


Imagen # 27; Influencia de la resolución en el tamaño de pixel

La resolución de una imagen está relacionada con su tamaño, de tal forma que cuando le asignemos una resolución estaremos asignando un tamaño a los píxeles que la forman, con lo que sabremos qué tamaño tiene la imagen. Por ejemplo, si una imagen tiene 100 píxeles por pulgada, querrá decir que cada 2,54 cm. habrá 100 píxeles, con lo que cada píxel equivaldrá a 2,54 mm. Si dijéramos que esa imagen tiene una resolución de 1 píxel por pulgada, lo que sabríamos es que ahora cada píxel tendrá un tamaño de 2,54 cm.

Piezoeléctrico

El piezoeléctrico es un tipo de mecanismo basado en las propiedades de los cristales piezoeléctricos (poliéster o cerámica), que se deforman cuando se les aplica una tensión eléctrica entre sus caras. Estos mecanismos son sencillos, baratos y capaces de radiar con muy poca potencia eléctrica (ver imagen # 28).



Imagen # 28; Piezoeléctrico

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

Nivel de Investigación

El nivel de investigación que posee este trabajo especial de grado presenta una visión tanto exploratoria como descriptiva de los fenómenos estudiados, pues no solo se trata de un tema poco estudiado, desde el punto de vista en que se ha planteado, sino que además se hace una caracterización del mismo.

Diseño de Investigación

Este trabajo especial de grado es de tipo experimental, ya que para poder presentar los resultados y las conclusiones del mismo, se han tenido que realizar previamente una cantidad considerable de pruebas y experimentos. Los cuales reflejan la esencia de la investigación.

Población y Muestra

Para poder realizar las tomas interferométricas holográficas se realizaron alrededor de 400 hologramas, de los cuales 129 son presentadas en este trabajo como resultado final. El resto de las tomas corresponden a varias fases dentro de la experimentación, como lo son:

Manejo de la técnica holográfica: los primeros hologramas se realizaron con la finalidad de adquirir las destrezas necesarias para poder realizar las tomas, aprender a reconocer el tiempo de revelado, experimentar con la relación de intensidades entre los haces, el tiempo de exposición e inclusive para verificar el montaje y las condiciones del laboratorio.

Pruebas holográficas en objetos 3D: en esta fase, se realizaron pruebas con distintos objetos en 3D, monedas, dados e imágenes de juguete (ver imágenes # 29 y # 30).

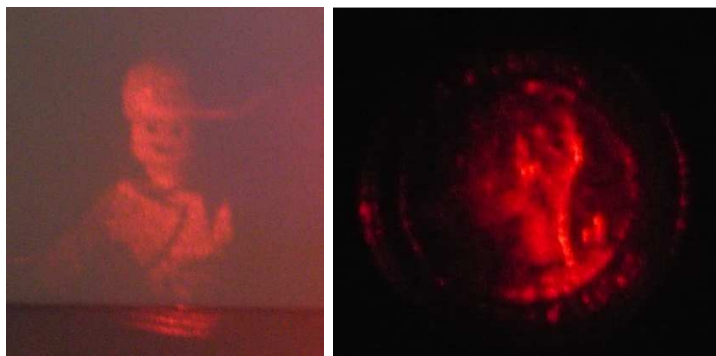


Imagen #29; Muñeco holografiado Imagen #30; Moneda holografiada

Pruebas holográficas sobre una membrana: en estas pruebas se buscaba reconocer en un modelo simple, los patrones de vibraciones. Para esto se realizaron dos tipos de tomas, de tiempo promedio y doble exposición. Los resultados obtenidos no fueron los mejores, pero permitieron experimentar con dos métodos distintos (ver imagen # 31).



Imagen # 31; Hologramas de la membrana.

Pruebas holográficas sobre el prototipo: en las primeras fases de experimentación, se realizaron varias pruebas para determinar la calidad de las imágenes, el modo de fotografiarlas, el patrón que en el prototipo se formaba y otros parámetros. Se realizaron pruebas utilizando la técnica de tiempo promedio y de tiempo real, además se observó como varían los estos parámetros con el material que se utilizó como medio de registro (ver imagen # 32).



Imagen # 32; Hologramas del prototipo con patrones vibratorios.

Hologramas finales: Después de afinar todos y cada uno de los detalles del montaje, se procede a realizar la toma de los hologramas finales, que aunque se usaron 129 de ellos, se realizaron más tomas, no solo por los errores en algunos hologramas, sino también para realizar la secuencia en video de la variación de los patrones de vibración al variar la frecuencia.

La selección del rango de frecuencia de estudio se realizó haciendo un barrido por aquellas frecuencias donde de manera audible se pudiese percibir la diferencia o el cambio al pasar de una frecuencia a otra, esto fue de los 100 *Hz* hasta los 8.000 *Hz*. Luego de repasar 5 veces el mismo rango, se toma el que proporciona mayor facilidad para percibir los cambios de frecuencias. Posteriormente se toma la decisión de hacer los ensayos en el rango comprendido entre 600 *Hz* y 1600 *Hz* ya que en este los cambios de frecuencia son bien definidos y a su vez están contenidos 3 frecuencias de resonancia.

Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Reacondicionamiento de la mesa antivibratoria.

El primer paso para poder realizar la experimentación, fue conseguir un sitio adecuado. El Departamento de Física Aplicada de la Facultad de Ingeniería de la UCV, asignó para tal fin el Laboratorio de Demostraciones, ubicado en el segundo piso del edificio de Física. Una vez que se obtuvo el lugar, y dado que este no se encontraba acondicionado de manera adecuada para trabajar en

óptica cuántica, la primera tarea a la cual hubo que avocarse fue la del reacondo de materiales y equipos allí existentes, preparando un espacio adecuado para colocar todos los elementos necesarios para el trabajo de investigación. Luego de esto se procede a ingresar la mesa antivibratoria al laboratorio. Una vez colocada en la posición de trabajo y niveladas sus patas, es retirado el planchón de concreto que posee en su parte superior, para que así queden expuestas las cámaras de caucho, y la caja de arena.

Teniéndose acceso a estos componentes se comienza con el reacondicionamiento de la mesa, se evalúa la rigidez de la mesa con movimientos bruscos sobre la estructura de los apoyos y de la caja que contiene la arena, mostrando que no existe movimiento relativo entre las partes evaluadas.

Seguidamente se evaluaron las cámaras de caucho una por una en búsqueda de fugas de aire. Todas las cámaras de caucho estaban vencidas y presentaban fugas por lo cual fue necesario reemplazarlas. Una vez adquiridas las nuevas cámaras se comprueban que estén en perfecto estado, se cortan los extremos de las válvulas, dejando solo parte del conducto, para poder extenderlos con una manguera hasta que cumplieran con la longitud necesaria para sobresalir por los laterales de la mesa y así poder proceder a su llenado.

Las mangueras se ajustaron con silicón rojo como sellador y alambre de floristería el cual actuaba como abrazadera, en un extremo al conducto de la cámara y en el otro a la válvula, dejando reposar por 24 horas el conjunto así formado para garantizar el un buen secado del silicón y consecuentemente un aislamiento adecuado.

Pasadas las 24 horas se comprueba nuevamente la existencia de fugas en los respectivos conjuntos cámara – manguera – válvula. Ninguno de los sistemas presentó fuga alguna estando listos para ser utilizados en el montaje de la mesa.

En un principio se tenían seis conjuntos, pero después de realizar las pruebas de amortiguamiento, donde se verificaba el tiempo de estabilización y la capacidad de absorber vibraciones producto de perturbaciones externas, se notó que un sistema con seis conjuntos era fácilmente perturbable aun cuando el tiempo que tardaba en estabilizarse (tiempo para después del cual las franjas del interferómetro de Michelson permanecían quietas) era muy corto (alrededor de cinco segundos). Durante estas pruebas se observó que debido al tamaño del cajón de arena, las cámaras entraban en contacto con los laterales de madera de la caja, hecho que es indeseable ya que se produce una transmisión directa de las vibraciones a las cámaras, las cuales no las podían absorber de manera satisfactoria. Es por esto que se redujo el número a cuatro conjuntos, dándoles así mayor separación, tanto entre ellos como con los laterales de la caja, como resultado se elevó el tiempo que tarda en estabilizarse a diez segundos, pero se aumentó el aislamiento vibratorio.

Pasadas las pruebas de fugas y de amortiguamiento de las vibraciones por parte de las cámaras de caucho, se procedió al chequeo de la arena. Se verificó que esta no presentara impurezas y/o aglutinamientos, en cuyo caso se procedió a retirarlos. Luego de esto se observó el nivel de arena y ya que este era bajo, se comienza la búsqueda de nueva arena fina.

Dado que en los sitios cercanos a la universidad solo se vende arena de construcción, una arena húmeda con variaciones grandes de tamaño de grano, fue necesario realizar un proceso de depuración. Este comienza con el secado de la arena, para lo cual esta es colocada sobre bandejas e introducida en un horno durante aproximadamente 45 minutos a una temperatura de 170 °C.

Una vez retirada del horno se procede a pasarla por un tamiz a otra bandeja para que durante el tamizado el vapor emanado de la arena escape fácilmente y no se condense en sitios adyacentes a la misma. Finalizado este proceso, se vuelven a verificar las condiciones de la arena, una vez pasada la prueba es empacada para su traslado al laboratorio.

La arena procesada es colocada en la caja de arena hasta que alcanza el nivel necesario, y se esparce con ayuda de una espátula uniformemente, quedando así una superficie totalmente horizontal, paralela al planchón.

Las cámaras de caucho son colocadas sobre la superficie de arena, tomando en consideración su distribución uniforme y a la vez evitando que entren en contacto con los laterales de la caja. Se dejó un margen de 6 *cm* entre las cámaras y los bordes de madera, con lo que garantizamos que una vez infladas y con el planchón haciéndoles presión, estas aun conservasen su separación.

Antes de colocar el planchón en su posición definitiva, se vuelve a verificar que la arena siga conservando una superficie lisa y horizontal, se coloca el planchón sobre la caja de arena y se procede a inflar las cámaras hasta

que el planchón deje de tocar los bordes de la caja de madera, dejando una separación entre el planchón y la caja de unos 4 cm.

Evaluación del aislamiento vibratorio de la mesa.

Culminado el reacondicionamiento de la mesa antivibratoria se procede a evaluar nuevamente el nivel de aislamiento vibratorio del conjunto, para ello se realiza el montaje de un interferómetro de Michelson sobre el planchón. Este montaje necesita:

- Un láser.
- Un divisor de haz.
- Dos espejos de primera superficie.
- Una lente divergente.

Sobre el planchón de concreto se sitúan los implementos mencionados anteriormente, cada elemento se sitúa en una esquina del planchón a excepción del divisor de haz. En la esquina diametralmente opuesta al láser se coloca uno de los espejos y su superficie es orientada de modo tal que el haz de laser incida perpendicular a dicha superficie, hecho esto se coloca el divisor de haz en el centro geométrico de la superficie de la mesa y el segundo espejo es colocado en una de las esquinas adyacentes al laser, se ajusta sus posiciones de tal modo que las trayectorias de los haces incidan sobre sus superficies, finalmente se coloca la lente divergente en la esquina restante. Fuera de la mesa y detrás de la lente divergente es colocada una pantalla a una distancia definida por los

investigadores, la cual solo tiene como requisito que el patrón allí formado se vea de un tamaño adecuado para poder distinguir las franjas de interferencia. Ver esquema del montaje en la imagen # 33.

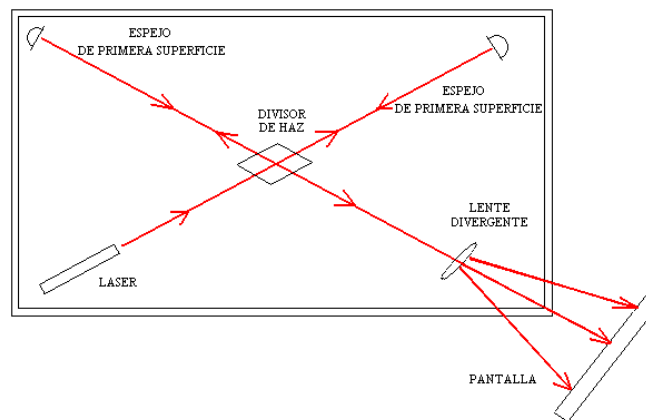


Imagen # 33; Esquema del montaje del interferómetro de Michelson.

Una vez concluido el montaje se procede a evaluar el nivel de aislamiento de la mesa. Como este es un montaje muy sensible a cualquier vibración, se deben esperar unos segundos a que el sistema se estabilice, esto significa que las franjas observadas deben permanecer quietas, sin que haya movimiento entre ellas, para lo cual se debe guardar silencio y permanecer quietos.

Cuando se obtiene la estabilización de las franjas, se empiezan a hacer las pruebas, se camina alrededor de la mesa, se aplaude, se habla, se salta cerca de ella y hasta se le perturba directamente; todo esto con la finalidad de producir vibraciones.

Observando como estas vibraciones son capaces o no de perturbar el patrón de franjas es cómo es posible determinar si la mesa cumple con los requerimientos necesarios para realizar la experimentación. Si las franjas están quietas o solo oscilan levemente sin que haya una superposición de ellas, esto nos da a entender que el aislamiento es el adecuado, ya que las perturbaciones no son capaces de producir vibraciones mayores a media longitud de onda del láser, lo que quiere decir que de existir, estas serían imperceptibles para nuestro instrumento de medición y no afectarían los experimentos realizados (ver imagen # 34).

Además de todo esto, se mide el tiempo en el cual las franjas se vuelven a estabilizar, para así poder saber cuánto tiempo se debe esperar para realizar cada toma holográfica.



Imagen # 34; Patrón de franjas interferométricas.

Oscurecimiento de la zona de trabajo

Para poder realizar las tomas holográficas y su posterior revelado, es vital que la zona de trabajo se encuentre en oscuridad, siendo la única luz admitida la verde, ya que la película utilizada es insensible a su longitud de onda. Por esto se oscurece el laboratorio, cubriendo las ventanas y rendijas por donde pueda pasar la luz.

En la zona de la mesa donde se va a manipular el material holográfico se construyó un cuarto oscuro, este se hace colocando cortinas negras por el área como si se tratase de una carpa, (cubriendo un área mayor a la de la mesa y a una altura aproximada de dos metros medidos desde el suelo, para poder tener espacio para movilizarse alrededor de la misma). Las cortinas se colocan a los laterales y como techo, esta va unida a las cuatro paredes y es ligeramente suspendida, ya que este pende hacia abajo.

Para poder trabajar adecuadamente se utilizan sendas linternas de luz verde, ya que esta no afecta el proceso de captura holográfica.

OBTENCIÓN DE UN HOLOGRAMA:

Prueba de coherencia

Para poder obtener los hologramas, es importante cumplir con ciertos requisitos, uno de ellos es la coherencia. Aunque se sabe de ante mano que la emisión del láser debe satisfacer la coherencia temporal, se construye un colimador óptico sobre un mesón, se coloca el láser y frente a él se colocan dos lentes divergentes, siguiendo la línea recta de estos elementos, es colocada una pantalla que posee un diagrama polar en su centro, el cual sirve de referencia en la medición (ver imagen # 35). La idea es que el haz reflejado en la pantalla debe conservar un diámetro constante, aun cuando la pantalla se acerque o aleje de la fuente emisora. Realizada esta experiencia se comprobó que el láser cumple con este requisito.

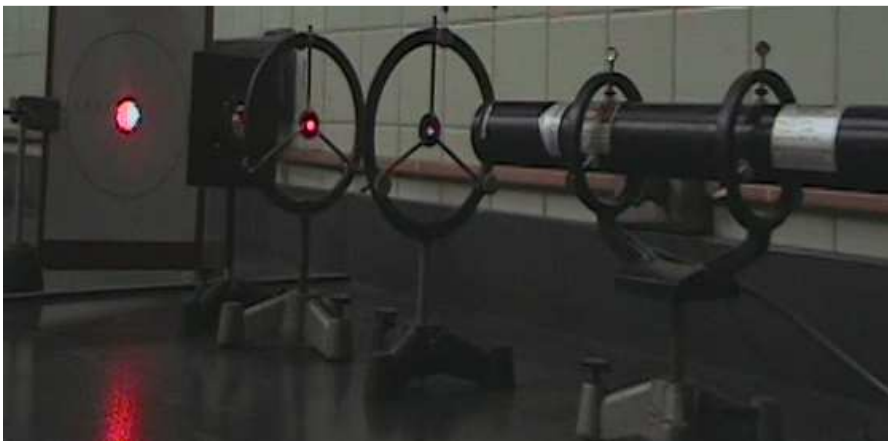


Imagen # 35; Colimador óptico.

Montaje para toma holográfica

El primer instrumento que se coloca es el láser, la base donde se colocan los objetos que han ser holografiados, y seguidamente los espejos de primera superficie con los cuales se construye el camino más conveniente que los haces del láser seguirán para realizar las tomas necesarias. Todos estos elementos van sobre el planchón de la mesa antivibratoria.

Luego de haberse planteado una posible trayectoria entre el láser y el objeto, se coloca el divisor de haz a dos centímetros de la salida del láser y se ajusta su posición, esto es se rota para que los haces que son divididos salgan en las direcciones deseadas. A continuación se empieza a describir la ruta que ha de seguir el haz de referencia, para lo cual es indispensable fijar antes el lugar donde se ha de colocar la base que sostendrá la película holográfica, pues es entre esta y el divisor de haz que se establece la trayectoria. Siguiendo una trayectoria más o menos paralela a esta, se establece la ruta del haz de objeto.

Definidas las trayectorias de los haces se colocan las lentes divergentes, la distancia que hay entre cada uno de ellos y los espejos viene dada por la necesidad de abrir el haz lo suficiente como para que cubra en su totalidad la superficie que se va a holografar. Culminada esta parte se reajustan los espejos de primera superficie para mantener el recorrido inicial, ya que las lentes divergentes suelen variar levemente la inclinación en la dirección del haz.

Luego de esto se miden las longitudes de las trayectorias de cada uno de los haces (el de referencia y el del objeto), se comparan, se hacen los ajustes

necesarios para que esta diferencia no sea mayor a la longitud de coherencia del láser (que en nuestro caso era recomendable que fuese menor a 4 *cm*). Si la diferencia entre las longitudes supera la longitud de coherencia entonces se procederá a reajustar la trayectoria más sencilla de modificar.

Visto que la diferencia de caminos de las trayectorias no superen la longitud de coherencia, se procedió a medir la intensidad de luz que recibirá la película holográfica, para ello se usa un fotómetro y se mide la intensidad de luz que llega desde el objeto y la intensidad de luz que llega desde la referencia ambos valores se comparan y deberán estar en una relación 1:1.

Generalmente y debido a las características que posee el divisor de haz y al tipo de reflexión de la superficie del objeto, los dos haces que se toman para la experimentación no suelen tener la misma intensidad al momento de incidir sobre la película. El haz de referencia suele ser mayor que el haz que proviene del objeto (ya que este posee una reflexión de tipo difusa). Para solucionar esto se pueden aplicar dos técnicas en conjunto o de manera separada, según sea el caso, la primera es disminuir la intensidad del haz de referencia mediante el uso de un filtro especial llamado filtro pasa banda, con lo cual se logra disminuir la intensidad. Este filtro es colocado preferiblemente a la salida del divisor de haz. La segunda técnica es la de expandir más el haz de referencia hasta lograr la intensidad deseada. Una vez que ambos haces poseen una relación 1:1, se chequea cada elemento del montaje asegurándose que tengan una buena fijación, que se encuentren bien ajustados y estables.

Cuando los elementos que van sobre la mesa están en sus respectivas posiciones, se preparan todos los demás objetos e instrumentos que se

necesitaran durante la experimentación, se coloca un recipiente con revelador y otro con agua, los cuales se colocan en las adyacencias de la mesa donde se realizaran las tomas, se conecta al tomacorriente el secador de cabello, el generador de funciones y la fuente de poder del laser.

Debido a que la película debe estar expuesta un tiempo determinado a la luz del laser por cada toma, y para comodidad durante la experimentación, se adiciona un interruptor que va entre la fuente de poder del laser y el tomacorriente ya que este carece de uno. Para esto se utilizó un interruptor acoplado a un tomacorriente trifásico donde se conecta la fuente de poder, y es alimentado por otro conductor que va directo a un tomacorriente conectado a la línea eléctrica del laboratorio.

Descripción de los elementos holografiados

En las primeras fases de la investigación se holografiaron algunos objetos de prueba:

Las primeras pruebas fueron realizadas sobre una moneda de 24,10 mm de diámetro (ver imagen # 30). El siguiente paso fue holografar figuras de juguete con las cuales poder apreciar mejor las cualidades de un holograma.

Se tomaron dos juguetes distintos, uno de ellos fue una cuatrimoto cuyas medidas aproximadas son: 26,50 mm de alto, 34,40 mm de ancho y 40,70 mm de largo (ver imagen # 11 c), y un muñeco el cual fue colocado en varias

posiciones durante las pruebas, sus medidas aproximadas son: 40,62 *mm* de alto, 25,19 *mm* de ancho y 10,31 *mm* de grosor (ver imagen # 31).

Luego de esto se realizaron pruebas sobre una membrana, para lo cual se retiro la bocina de un teléfono y se le adaptó una membrana de látex esta fue sujeta fuertemente a los bordes para así mantener una condición de borde estable. El diámetro de este modelo era de 45,06 *mm* (ver imagen # 31).

Finalmente se tomó el prototipo para realizar las pruebas. Este consiste en una caja en forma de paralelepípedo de aluminio, que puede desarmarse en dos partes para tener acceso a su interior. Ambas partes se sujetan entre sí a través de cuatro tornillos colocados en sus lados más anchos, dos de cada lado.

Sus caras fueron identificadas con las siguientes siglas L1, L2, L3, L4, L5 y L6, donde la “L” significa lado. Los lados correspondientes a L1, L2 y L3 forman una sola pieza como se puede apreciar en la imagen # 36; L4, L5 y L6 conforman la otra pieza que es ajustada mediante los tornillos.

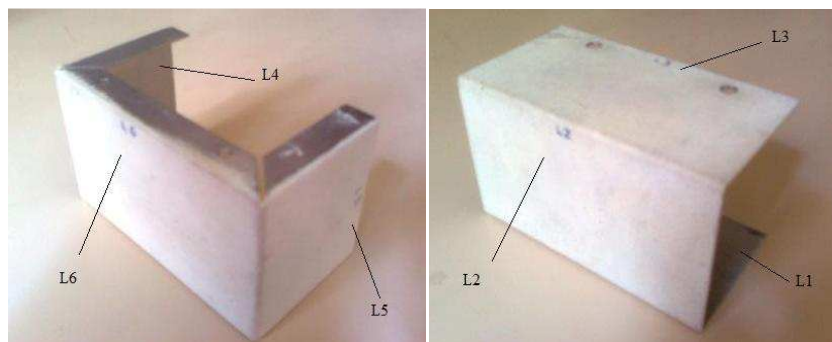


Imagen # 36; Partes desensambladas del prototipo.

Las medidas del prototipo pueden verse en la tabla # 2 mostrada a continuación.

Tabla # 2: Medidas del prototipo para la experimentación.

Lado del prototipo	Largo (<i>mm</i>)	Ancho (<i>mm</i>)	Espesor (<i>mm</i>)
L1	81,92	44,58	1,00
L2	81,86	50,90	1,00
L3	81,95	44,68	1,00
L4	43,30	48,45	0,80
L5	43,38	48,35	0,80
L6	80,01	48,46	0,80

Para obtener una mejor calidad de imágenes el paralelepípedo fue pintado con pintura mate blanca, ya que sobre superficies mates se obtienen hologramas de mayor calidad. Como ya se ha mencionado en la cara interna de L2 se adhirió un piezoeléctrico que tenía conectados sendos cables para hacerlo funcionar, el piezoeléctrico tiene un diámetro de 29,05 *mm* y un espesor de 6,08 *mm* y el peso del conjunto es de 75 g. (ver imágenes # 37 y 38)



Imagen # 37; Prototipo.



Imagen # 38; Piezoeléctrico utilizado en la experimentación.

Mantenimiento de las condiciones de borde durante los ensayos.

Una parte muy importante dentro de la experimentación es la que se refiere al mantenimiento de las condiciones de borde, pues si estas no se mantienen los resultados obtenidos no serían válidos.

Para garantizar las condiciones de borde, el punto de sujeción o de agarre de la caja al soporte debe mantenerse estable y ser único durante todo el proceso de experimentación, para ello se utilizó un sistema de pinzas unido a una estructura adaptable como se muestra en las imágenes # 39 y 40.

Se seleccionó un punto de sujeción, el cual fue el mismo para toda la experimentación, se ajustó el tornillo para darle la presión adecuada al agarre y se contó el número de vueltas que se le aplicó al tornillo para lograr esto.

Las tomas para L2 y L5 se hicieron sin modificar nada en el montaje, lo único fue rotar el soporte para hacer incidir el haz de laser en su cara. Para L1 se desmontó el mecanismo de sujeción al soporte, más no se cambió o retiró la

sujeción a la caja, solo se tomó al mecanismo y se ajustó de manera vertical al soporte (ver imagen # 40)



Figura # 39; Soporte colocado para holografías de las caras L2 y L5.



Figura # 40; Soporte colocado para holografías de la cara L1.

Toma holográfica

En esta parte se necesita que todo este oscuro siendo la única fuente de luz permitida la de las linternas con luz verde, el láser debe estar apagado. Luego se retira de la caja de película holográfica una lámina para su exposición, de ser necesario se recorta la lámina al tamaño necesario, se guarda el resto y se cierra muy bien la caja, para así proteger el resto del material. A continuación se humedece levemente el dedo índice con agua y se toca reiteradamente una de las esquinas de la película, si se observa una mancha blanquecina sobre la zona que se tocó significa que ese es el lado donde se encuentra la emulsión de haluros de plata y por lo tanto ese es el lado que tiene que estar expuesto hacia los haces.

Identificado el lado de la emulsión se procede a colocar la película entre dos láminas de vidrio, luego se coloca el conjunto vidrio-película en el soporte para las tomas asegurando una buena sujeción y que no exista movimiento relativo entre las partes sin olvidar que el lado que posee la emulsión quede expuesto a los haces.

Luego de haber colocado la película, se verifica a través de una inspección ocular que todo esté en orden y se procede a contar el tiempo de estabilización de la mesa (10 segundos), a partir de este momento no se deben realizar ruidos y se debe permanecer quieto.

Finalizado el conteo del tiempo de estabilización se enciende el láser aquí se inicia un nuevo conteo, el del tiempo de exposición (5 segundos). Vale

la pena hacer un alto en este punto para acotar que el tiempo de exposición depende de ciertos factores, el tipo de película y la luz del láser utilizada, algunos fabricantes incluyen estos datos en sus tablas de características, sin embargo para el momento de la experimentación se carecía de esta información, así que se realizaron varias tomas de prueba para poder determinar este tiempo de manera experimental. Finalizado el conteo se apaga el láser, se extrae la película del soporte y de entre las láminas de vidrio tomándola de tal modo que el lado que posee la emulsión quede hacia arriba.

Extraída la película se pasa por la bandeja donde está el líquido revelador y se pasea suavemente y totalmente sumergida. En cuanto empieza a oscurecer se retira del revelador e inmediatamente se pasa por la bandeja con el agua, para retirar el revelador y así detener el proceso, luego de esto se puede utilizar fijador, pero este paso no es imprescindible. Luego de que está bien enjuagada se inicia el proceso de secado utilizando para ello el secador de cabello con aire frío.

Después de que la película se ha secado se le coloca nuevamente en el soporte que se utilizó para hacer la toma, colocándola entre las mismas láminas de vidrio y en la misma posición en la que se realizó la toma. Se interrumpe el camino del haz de objeto, colocando una lámina de foami negro en su camino, se activa nuevamente el láser, con la única diferencia que solo el haz de referencia incide sobre la película, de este modo al mirar a través de la película podemos observar el resultado y determinar si la toma que bien o no.

Todo el proceso antes mencionado se repitió en varias oportunidades, variando cada uno de los parámetros, tiempo de exposición, intensidad del haz,

tiempo de revelado y demás, en busca de afinar el método y obtener los valores de los mismo que mejores resultados arrojaran, brindando así hologramas de alta calidad.

Montaje holográfico – interferométrico

El montaje se realiza casi exactamente igual que para una toma holográfica, la diferencia radica en que el haz de laser que va hacia el objeto es un haz colimado.

Colocados los elementos en sus respectivas posiciones, siguiendo los pasos descritos anteriormente para una toma holográfica normal, se procede a colimar el haz de objeto. Primero se expande el tamaño del haz al necesario, esto quiere decir que cubra por completo el objeto a ser holografiado, para lo cual fueron colocados en el camino del haz tres lentes divergentes. Utilizando un diagrama polar colocado a la salida del haz después de recorrer las tres lentes, se comprobó la colimación, demostrando así que los rayos provenientes del haz eran paralelos entre sí, ya que al variar la distancia del diagrama polar a la fuente, la circunferencia allí formada conservaba un diámetro constante. Si esto no ocurría, significaba que la distancia entre las lentes no era la adecuada, así que simplemente se procede a corregirla hasta obtener este resultado.

Una vez colimado el haz de objeto y utilizando un espejo de primera superficie, proyectamos la luz sobre el objeto. Se comparan las intensidades de

ambos haces para corroborar que mantengan una relación de intensidad de 1:1. En este tipo de montaje la intensidad del haz de objeto suele ser más fuerte que en el montaje holográfico, por lo que la necesidad del uso de un filtro pasa banda puede o no ser necesaria.

Seguidamente se miden las distancias que recorren ambos haces, y se calcula la diferencia de caminos entre ellos, para verificar que esta diferencia no sea mayor a la longitud de coherencia del laser.

Toma Holográfica-interferométrica

No existe una única técnica para tomas holográficas – interferométricas, aquí serán descritas tres técnicas que se utilizaron para la experimentación.

Tiempo Promedio

Se extrae en condiciones de oscuridad la película de la caja, se verifica cual es el lado que posee la emulsión de haluros de plata, se inserta entre dos laminas de vidrio y se coloca sobre el soporte de tal modo que el lado de la emulsión esté expuesto directamente a los haces. Se coloca el elemento a ser holografiado, se enciende el generador de funciones y se le ajusta a la frecuencia deseada, se espera el tiempo de estabilización, se activa el laser y

una vez culminado el tiempo de exposición, se apaga el laser y el generador de funciones y finalmente se retira la película para ser revelada.

Para el revelado se extrae la película del soporte y los vidrios manteniendo el lado de la emulsión hacia arriba, sumergiéndose en el revelador y agitándose hasta lograr el oscurecimiento adecuado, habilidad que se obtiene con la práctica, una vez obtenido el oscurecimiento ideal la película se sumerge en agua agitándose con el lado de la emulsión hacia arriba, luego la película se seca con aire frío del secador.

Una vez seca la película se coloca nuevamente en el soporte y entre las láminas de vidrio manteniendo la misma dirección y orientación con la que se tomó para poder visualizar el holograma, se tapa el haz de objeto y solo se deja pasar el de referencia. Luego de visualizar el holograma se hace la identificación del mismo y se anotan las observaciones de ser necesario.

Doble Exposición

Para este método, el proceso de montaje de la película sobre el soporte es el mismo que para el caso de *tiempo promedio*, la diferencia entre uno y otro está en la manera de cómo se hace la exposición. Una vez culminado el tiempo de estabilización de la mesa, se enciende el laser, pero no así el generador de funciones, se realiza una primera exposición con un tiempo igual a $\frac{2}{3}$ del tiempo total de exposición determinado para el tipo de película utilizado. Seguidamente se apaga el laser, se enciende el generador de

funciones y se le ajusta a la frecuencia deseada, nuevamente se hace el conteo del tiempo de estabilización, luego se enciende el laser por el tiempo de exposición restante ($\frac{1}{3}$).

Culminado este proceso, se apagan el laser y el generador de funciones y se inicia la fase de revelado, visualización e identificación de igual modo que en el método anterior.

Tiempo Real

Esta es la técnica que más cuidado requiere para su aplicación, aun cuando es la más simple y la que muestra resultados más completos en una sola toma, pues permite observar en tiempo real las variaciones de los patrones de vibración como si se tratase de una película. El cuidado que se debe tener radica en que cualquier leve variación o movimiento entre las partes durante la toma ocasiona que el fenómeno no sea observable.

Aquí el montaje holográfico es ligeramente diferente, se debe utilizar un soporte especialmente diseñado para colocar las láminas de vidrio sobre las cuales se realizan las tomas, pues no utiliza película, sino láminas de vidrio que también poseen en una de sus caras la emulsión de haluros de plata.

Las cuales al igual que en los dos métodos anteriores, son retiradas de su caja, se les verifica cual es el lado que posee la emulsión de haluros de plata humedeciendo una de sus esquinas y montadas sobre su soporte, todo esto

estando en completa oscuridad (solo bajo la luz verde). El soporte utilizado no tiene solo como finalidad sostener las láminas de vidrio, sino que además garantiza que después de retirada la lámina para su revelado, al volverla a colocar esta conservará la misma posición. Cabe acotar que las láminas de vidrio son de un tamaño estándar especial para adaptarse al soporte.

La relación entre las intensidades de los haces, así como el mantenimiento de la longitud de coherencia son las mismas que en los métodos anteriores. Se debe verificar que la lámina esté bien colocada en su soporte, que calce correctamente y que el lado que posee la emulsión este expuesta directamente a los haces del laser.

Culminado el montaje de la película en su soporte, se procede a realizar el conteo del tiempo de estabilización de la mesa. Terminado el tiempo de estabilización se enciende el láser e inicia el conteo del tiempo de exposición, luego de lo cual se apaga el laser, se retira la lámina para proceder a su revelado, sumergiéndola en la bandeja con el revelador y agitándola suavemente hasta que empieza a oscurecer, momento en el cual es retirada y sumergida en la bandeja con agua, donde se retira el exceso de revelador y se detiene el proceso, posteriormente es secada con la ayuda del secador y usando aire frío.

Una vez seca la película se coloca nuevamente en el soporte con la misma dirección y orientación con la que se tomó para visualizar el holograma, recordando colocarla bien, que encaje de manera adecuada para garantizar el posicionamiento original.

A continuación se enciende el láser y el generador de funciones y se varía la frecuencia hasta que el observador pueda visualizar los patrones de vibración y ver como estos cambian al ir aumentando o disminuyendo la frecuencia y se anotan las observaciones de ser necesario.

Para este método, los haces de objeto y de referencia inciden por igual, durante el proceso de visualización de los patrones de vibración.

Montaje Final

El montaje final se refiere al que otorgó las imágenes que se utilizaron en el análisis. Se utilizó la técnica de holografía en tiempo promedio y se revisó cuidadosamente que todos los parámetros involucrados en la experimentación estuviesen bien, se chequea el montaje, se revisan las relaciones de intensidad, la longitud de coherencia, la estabilidad de cada uno de los elementos utilizados en la mesa, el buen funcionamiento de los equipos externos (secador, generador de funciones, linterna), que la zona de experimentación se encontrase bien aislada de cualquier fuente de luz que no fuese de las linternas de luz verde y que las bandejas contuviesen suficiente revelador y agua respectivamente (ver imágenes # 41).



Imagen # 41; Montaje final sobre la mesa antivibratoria

Visto que el generador de funciones proporciona una amplia gama de frecuencias, y no todas ellas nos brindan la información requerida, fue necesario restringir el rango sobre el cual se iba a trabajar. Para ello se utilizaron dos métodos, el primero fue utilizando simplemente el sentido del oído para identificar las frecuencias de resonancia y así realizar las pruebas alrededor de estas frecuencias.

Al poner a vibrar el piezoeléctrico alimentándolo con el generador de frecuencia, este emite una gama de sonidos los cuales varían según la frecuencia que le es aplicada, así que simplemente se tuvo que escuchar estos sonidos e identificar la frecuencia a la cual entraba en resonancia. La frecuencia de resonancia es identificada cuando al pasar por las distintas frecuencias, nos

encontramos con un punto de alta intensidad que disminuye de manera notoria cuando se pasa a la frecuencia que le sigue. Los sonidos que emite el piezoeléctrico son similares a una escala musical (DO – RE – MI...) los cuales se encuentran en un tono, cuando se pasa la frecuencia de resonancia el tono cae y por eso es que se puede identificar. Aplicando este método se pudieron determinar varios valores de frecuencia sobre los cuales experimentar.

Con los datos obtenidos utilizando el método auditivo, se realizó una prueba holográfica en tiempo real. Se realiza el montaje tal y como se describió anteriormente, con una ligera modificación, en vez de usar láminas de vidrio (las cuales no estaban disponibles para hacer la prueba), se usaron películas de acetato. Se diseñó un marco doble en vidrio de tal manera que la película de acetato quedara entre ambas láminas, las cuales se ajustaban entre sí con ayuda de unos tornillos, con sus respectivas arandelas y tuercas que pasaban a través de unos orificios creados para tal fin. Ver imágenes # 42 y 43.



Imagen # 42; Marco de vidrio



Imagen # 43; Soporte de vidrio donde se ajusta el marco

Una vez revelado el holograma, siguiendo los mismos pasos descritos en el procedimiento de las tomas holográficas en tiempo real, se procede a hacer un barrido alrededor de aquellas frecuencias que fueron determinadas con el método anterior. De este modo se pudo establecer el rango de frecuencias sobre las cuales realizar la experimentación. Es importante aclarar que la toma en tiempo real utilizando película de acetato en vez de vidrio, muestra los patrones de vibración un tanto deformados, ya que este tipo de película no conserva exactamente su forma original después del proceso de revelado (ver imagen # 44), pero aun así es una excelente guía para determinar cuando aparecen y desaparecen los patrones de vibración debido al cambio en el *speckle* al variar la frecuencia con el generador de frecuencia.



Imagen # 44; Fotografía del holograma en tiempo real.

Determinado el rango de frecuencia sobre el cual trabajar, se reacomodan todos los elementos sobre la mesa para realizar una prueba utilizando el método de tiempo promedio. Se coloca el prototipo en su posición y se ajusta la frecuencia en generador de funciones (600 Hz), se realiza la toma y al revelar se verifica la presencia del patrón de vibraciones, sin embargo se hacen un par de tomas más cambiando el valor de la frecuencia para observar con detenimiento los patrones allí formados (a 700 y 800 Hz).

Como se utilizó el método de tiempo promedio, se debió además determinar el espaciamiento entre frecuencias sobre la cual se realizarían las tomas. Para ello se tomó una de las caras, la que tenía el piezoeléctrico adherido a ella, y se realizó un barrido de frecuencia desde 600 *Hz* hasta 1700 *Hz*, variando de 25 en 25 *Hz* de 600 a 1300, de 50 en 50 *Hz* desde 1300 hasta 1600 y de allí se hace la última toma en 1700 *Hz*. Esta variación se justifica en el hecho de que una vez que se toma un holograma este es examinado inmediatamente, se observa cuidadosamente el patrón formado y se le compara con las tomas anteriores para poder determinar la si variación que existe entre ellas es significativa y poder definir el intervalo sobre el cual trabajar. Después de este ensayo se determinó que con un intervalo de 50 en 50 *Hz* era suficiente para poder observar con claridad el fenómeno.

Debido a que para llegar a esta parte de la investigación se tuvo que utilizar una buena cantidad de material, fue necesario hacer un alto y preparar los nuevos insumos. Se preparó nuevo revelador, se recortaron las láminas de la película de haluros de plata del tamaño adecuado al soporte y a las tomas (este material viene en un rollo continuo), y se guardaron cuidadosamente dentro de una caja provista para tal fin. Este proceso se realizó a oscuras con la iluminación de luz verde.

Con el rango e intervalo de frecuencias determinado, con todos los insumos e implementos listos se dio inicio al proceso de experimentación sobre la caja de aluminio, no sin verificar antes que todos y cada uno de los parámetros estuviesen bien (longitud de coherencia, intensidad de los haces, etc.). Se examinaron tres de las seis caras de la caja de aluminio, se tomaron tres que fuesen perpendiculares entre sí, las cuales fueron denominadas como

L1, L2 y L5, siendo L2 la cara que tenía adherida a ella el piezoeléctrico (ver imagen # 45)

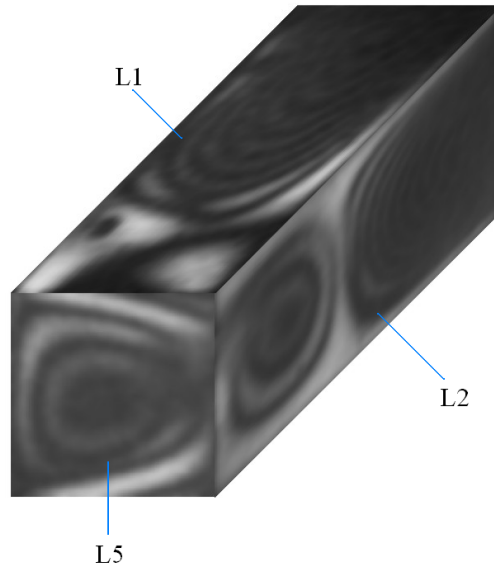


Imagen # 45; Holograma de las tres caras perpendiculares entre sí.

En las tomas de tiempo promedio se usó una exposición de 5 segundos y un tiempo de revelado de 10 segundos. Se realizan 22 tomas por cada cara, cubriendo con esto un rango que va desde los 600 Hz hasta los 1600 Hz , con una variación de 50 Hz entre cada toma y una toma adicional sin perturbación alguna (0 Hz). Todo esto da un total de 66 tomas para la primera posición del piezoeléctrico. Esto se repite nuevamente para la segunda posición donde es fijado el piezoeléctrico, tomándose un total de 132 en el estudio de la caja de aluminio.

El procedimiento a seguir se realizó para obtener las imágenes que serían analizadas se realizó de manera automática, se montaba la película, se procedía a su toma y posterior revelado, se volvía a montar la película para

observar el resultado y verificar que todo haya salido bien, de ser así se procedía a la identificación y almacenaje del holograma, si la toma no salía bien se repetía el procedimiento hasta obtener la imagen. Se hacen las primeras 22 tomas, correspondientes a una cara (L2). Se gira la base que sostiene la caja para hacer que el haz de láser incida sobre otra de las caras (L5), se tiene especial cuidado de no mover ni cambiar la sujeción de la caja al soporte, luego de lo cual se inicia nuevamente el proceso de holografado en las mismas frecuencias que L2. Igualmente se hace con la última cara L1. Obtenidos los 66 hologramas correspondientes a la primera posición, se repite todo el proceso para la segunda posición, verificando todos y cada uno de los pasos del proceso como si se tratara de la primera vez.

Una vez que se han obtenido todas las imágenes, se procede a fotografiar con ayuda de una cámara digital, cada uno de los hologramas, para ello se vuelve a montar los hologramas en el soporte y se deja incidir solamente el haz de referencia. Las fotos son tomadas en modo blanco y negro ya que de este modo no se satura la foto con el rojo del láser y se obtienen imágenes de buena calidad para su posterior análisis. Además la calidad de imagen se configuró en fina, con un modo de grabación normal, flash desactivado, alto contraste, nitidez normal, un ISO de 80, un balance de blancos automático, un modo de medición multi, un enfoque AF multi y zoom digital de precisión con un valor de 1.5, estas configuraciones aplican para la cámara DSC-W30 de SONY.

Las condiciones antes mencionadas se obtuvieron de un proceso de ensayo y error comparando entre imágenes y seleccionando aquella con mejor definición. La lente de la cámara se colocó lo más pegada posible a la película

que se encontraba sujeta en su soporte y se reguló la intensidad del haz de referencia hasta que esta no saturara de brillo la imagen.

Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos

Una vez digitalizadas todas las imágenes son almacenadas en la computadora con la misma codificación que tenían sus respectivos hologramas donde se especifica, posición, cara y frecuencia. Por ejemplo: P2L1600Hz, esto significa que es una toma de la segunda posición (P2), lado 1 (L1) y a la frecuencia de 600 Hz.

Como en el proceso de fotografiado, se fotografía más del holograma en sí, se procede a realizar un proceso de edición de imágenes con ayuda del editor de Windows. Las imágenes son recortadas para eliminar la información que no pertenezca al holograma, dejando únicamente una imagen del tamaño del holograma. Y este tamaño es el mismo para cada lado, además de coincidir con las medidas de las caras adyacentes. Finalizado este proceso de edición se procede a analizar las imágenes utilizando un programa adecuado para esta tarea, el MATLAB7.

El siguiente paso fue desarrollar un programa en MATLAB necesario para poder extraer de las imágenes la información necesaria.

Dentro de los hologramas, las partes oscuras representan movimiento (existe interferencia destructiva) y las partes claras aquellas donde no existe

movimiento (interferencia constructiva). Es así como el primer programa busca identificar y almacenar la información referente a cuantos puntos de máxima oscuridad, y aquellos que le siguen en rango, existen y donde se encuentran estos ubicados (sus coordenadas en la imagen). Esto con la finalidad de poder trazar la recta de máxima pendiente de cada imagen.

Debido a que pueden existir más de un punto en cada rango de intensidad (el más oscuro y el que le sigue en magnitud), se calcula a partir de las coordenadas de cada punto, el promedio en distancia, en pocas palabras una posición promedio, obteniéndose de este modo dos coordenadas, las del punto de máxima oscuridad y su siguiente en rango.

Utilizando las coordenadas de estos dos puntos, el programa calcula la pendiente de la recta que los une y sus respectivos puntos de corte con los bordes del holograma. Es con esta información que se arman los vectores que se utilizaran para el trazado de las rectas en sus respectivas imágenes.

A continuación se muestra en el código fuente del programa realizado:

Tabla # 3 Código fuente.
<pre>maximo1 = 255; cantidad1 = 0; cantidad2 = 0; inicioX = 1; finX = 1608; inicioY = 1; finY = 872; startX = 600; startY = 1; endX = 1200;</pre>

```

endY = 872;
% búsqueda de los máximos
for i=startY:endY
    for j=startX:endX
        dato=I1(i,j);
        if dato < maximo1
            maximo1=dato;
        end
    end
end
maximo2 = 255;
for i = startY:endY
    for j = startX:endX
        dato=I1(i,j);
        if dato < maximo2
            if dato > maximo1
                maximo2 = dato;
            end
        end
    end
end
cx1 = [];
cy1 = [];
cx2 = [];
cy2 = [];
for i=startY:endY
    for j=startX:endX
        dato=I1(i,j);
        if dato == maximo1
            cantidad1 = cantidad1 + 1;
            coord=j;
            cx1=[cx1 coord];
            coord=i;
            cy1=[cy1 coord];
        end
        if dato == maximo2

```

```

    cantidad2 = cantidad2 + 1;
    coord=j;
    cx2=[cx2 coord];
    coord=i;
    cy2=[cy2 coord];
end
end
end
maximo1
cantidad1
maximo2
cantidad2
% cálculo de los puntos promedios
if cantidad1 > 1
    x1 = 0;
    y1 = 0;
    for i=1:cantidad1
        x1 = cx1(i) + x1;
        y1 = cy1(i) + y1;
    end
    x1 = x1/cantidad1;
    y1 = y1/cantidad1;
else
    x1 = cx1;
    y1 = cy1;
end
end
if cantidad2 > 1
    x2 = 0;
    y2 = 0;
    for i=1:cantidad2
        x2 = cx2(i) + x2;
        y2 = cy2(i) + y2;
    end
    x2 = x2/cantidad2;
    y2 = y2/cantidad2;
else

```

```

x2 = cx2;
y2 = cy2;
end
x1
y1
x2
y2
%pendiente infinita
if (x2-x1)== 0
    coordY1 = 0;
    coordY2 = finY;
    coordX1 = x1;
    coordX2 = x2;
else
    pendiente = ((y2 - y1)/(x2 - x1))
% pendiente = 0
    if pendiente == 0
        coordX1 = 0;
        coordX2 = finX;
        coordY1 = y1;
        coordY2 = y2;
    else
% pendiente distinta de cero
        corteY = (y1 - pendiente*x1)
        corteX = -1*corteY/pendiente
        if pendiente < 0
            if corteY > finY
                coordY1 = finY;
                coordX1 = (finY - corteY)/pendiente;
            else
                coordX1 = 0;
                coordY1 = corteY;
            end
        aux = -corteY/pendiente;
        if aux > finX
            coordX2 = finX;

```

```

    coordY2 = pendiente*finX + corteY;
else
    coordY2 = 0;
    coordX2 = aux;
end
end
if pendiente > 0
if corteY < 0
    coordY1 = 0;
    coordX1 = -corteY/pendiente;
else
    coordY1 = corteY;
    coordX1 = 0;
end
aux2 = (finY - corteY)/pendiente;
if aux2 > finX
    coordX2 = finX;
    coordY2 = pendiente*finX + corteY;
else
    coordY2 = finY;
    coordX2 = aux2;
end
end
end
end
coordX = [coordX1 coordX2];
coordY = [coordY1 coordY2];

```

Debido a la presencia de ruido en las imágenes no siempre se hizo un barrido de toda la superficie, entonces se tuvieron que seleccionar regiones en particular para ser analizadas (es importante acotar que esto se produjo en muy pocos casos).

El criterio que se usó para seleccionar la región, fue el de abarcar la mayor zona posible que cubriera el patrón de vibración que se podía apreciar en la imagen, y donde las curvas de nivel de la imagen estuviesen más cerca unas de otras. Para ello se realizó un procedimiento especial en las imágenes, con ayuda del MATLAB pudimos convertir las imágenes en curvas de nivel (las cuales se basan en el mapa de intensidad de la imagen), y así poder apreciar claramente donde estaban los picos o valles de estas curvas, y donde estas se acercaban más unas a otras, apreciando entonces de mejor manera el lugar donde debía estar la recta de máxima pendiente.

Imagen con desenfoque gaussiano⁽⁷⁾ de 20

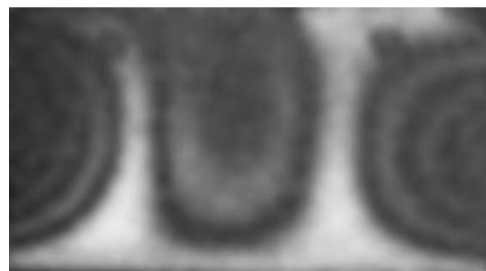


Imagen # 46; Lado 1, Posición 2, 650Hz.

Zona de mayor concentración de las curvas de nivel, que nos indica la presencia de la recta de máxima pendiente

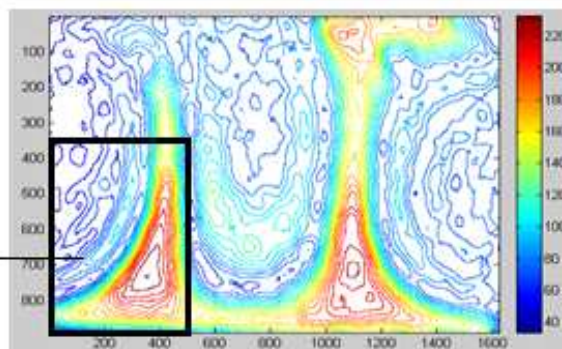


Imagen # 47; Curvas de nivel pertenecientes a la imagen 46.

⁷ El desenfoque gaussiano es un efecto de suavizado para mapas de bits generado por software de edición gráfica.

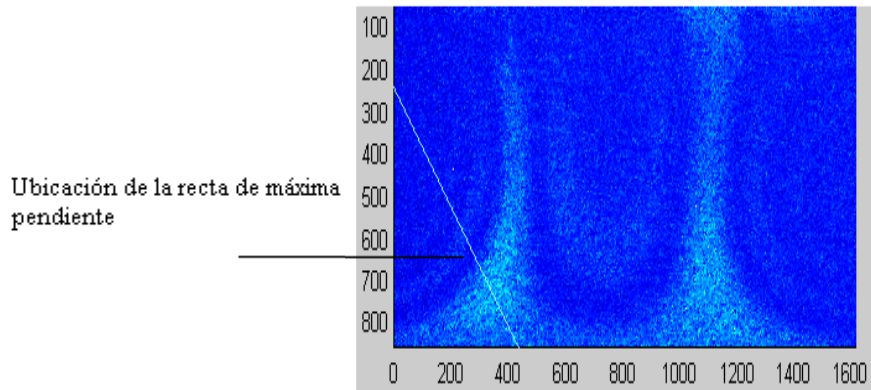


Imagen # 48; Representación de la recta de máxima pendiente, perteneciente a la imagen 46.

Con la información sobre el área de barrido, se corre el programa para cada una de las imágenes recopilando cuidadosamente todos los datos sobre cada una de las rectas de máxima pendiente.

Teniendo toda la información de cada uno de los hologramas, se produce a calcular la intersección de las rectas, por frecuencia y posición. Para describir mejor esto, tomaremos como ejemplo el caso de posición 1 a 600 Hz , siendo el procedimiento aplicado para este caso el mismo para todos los demás.

Sobre la imagen de L2 a 600 Hz se trazó la recta de máxima pendiente correspondiente a su patrón de vibración, luego con la información de los puntos de corte de las otras dos caras sobre L2 (corte de L1 con L2 y corte de L5 con L2), se procedió a graficar sobre L2 las trazas correspondientes a las rectas de máxima pendiente, con esto se observaron los puntos de intersección entre cada una de las rectas, describiendo estos un área triangular.

Los cálculos referentes a los puntos de intersección, pendientes y puntos de corte de cada grupo de imágenes fueron realizados en EXCEL, creando para ello una base de datos con la información recopilada en MATLAB.

El prototipo y el área donde fue colocado el piezoeléctrico en sus dos posiciones de experimentación, fueron cuidadosamente medidos con la ayuda de un vernier digital. Con esta información se hace la conversión entre unidades físicas y los píxeles, para así poder representar en las imágenes el área donde el piezoeléctrico se encuentra ubicado. Se utilizó un pequeño programa en MATLAB para representar una circunferencia en la misma posición donde se encontraba el piezoeléctrico y del mismo tamaño que este tiene. Este trazado se hace sobre la imagen de L2 a 0 Hz, también sobre esta imagen y de manera simultánea se plasman todos los puntos de intersección entre las rectas de máxima pendiente, y de esta manera se puede apreciar claramente si estos puntos se encuentran o no dentro de la circunferencia.

Como el sentido de la vista puede ser engañoso bajo ciertas circunstancias, se realiza una verificación en EXCEL para comprobar realmente cuantos puntos pertenecen al área de la circunferencia y cuantos están por fuera para cada una de las dos posiciones del piezoeléctrico.

Recta de Máxima Pendiente

La recta de máxima pendiente está localizada en el punto donde las curvas de nivel se encuentran más próximas entre sí, y a continuación se

explicará cómo este hecho nos permite obtener los resultados de la experimentación.

Dentro de nuestro análisis las imágenes holográficas son tratadas con el MATLAB para generar a partir de ellas curvas de nivel, estas curvas de nivel están basadas en la intensidad de los píxeles. Recordemos que una vez digitalizados los hologramas, podemos apreciar en ellos píxeles de diferentes intensidades que van desde el blanco hasta negro, pasando por una amplia escala de grises (0 para el negro, 1 – 254 para los grises y 255 para el blanco). Los puntos donde existe movimiento son representados por los píxeles más oscuros, mientras que aquellos puntos donde no se registra movimiento son representados por los píxeles más claros.

Las curvas que se forman a partir de los píxeles más oscuros son aquellas donde existe perturbación, existe movimiento. Donde más se junten estas curvas es donde es más fuerte la perturbación y cerca de allí se encuentra la fuente que produce las vibraciones.

Como el análisis es en 3D, se utilizan tres caras perpendiculares entre sí, cada una de estas caras es analizada de manera individual y de la misma forma. Las respectivas rectas de máxima pendiente, las cuales se ubican allí donde se unen más las curvas de nivel, apuntan hacia el centro de la perturbación, y el cruce o intercepción de estas tres rectas proporcionan la ubicación del epicentro de la perturbación.

Debido a que la ubicación física a evaluar se refiere a una región, los valores a obtener del análisis tenderían a ser regiones más que puntos, es por

ello que para poder definir esta región se toman las intercepciones de las 3 rectas en diferentes frecuencias.

En las superficies del objeto se producen los picos máximos con sus respectivos máximos consecutivos producto de las vibraciones, al establecerse una recta de máxima pendiente entre el máximo y el máximo consecutivo, la dirección de esta recta en la superficie guarda relación con la dirección de propagación de la onda (vibraciones) la cual pasa por el ente emisor de la perturbación.

Si se visualiza la recta de máxima pendiente como una traza de un plano y aplicamos este razonamiento en las 3 superficies L1, L2 y L5 del objeto se obtendrían 3 planos, los cuales se interceptarían en un punto en el espacio donde estaría situado el hipocentro, sin embargo la idea es localizar la representación superficial del punto (epicentro), dichas intercepciones formaran un área la cual debería formar parte de la región del piezoeléctrico (ver imagen # 49). Para el caso particular de este trabajo, está área fue observada desde la perspectiva del plano de L2.

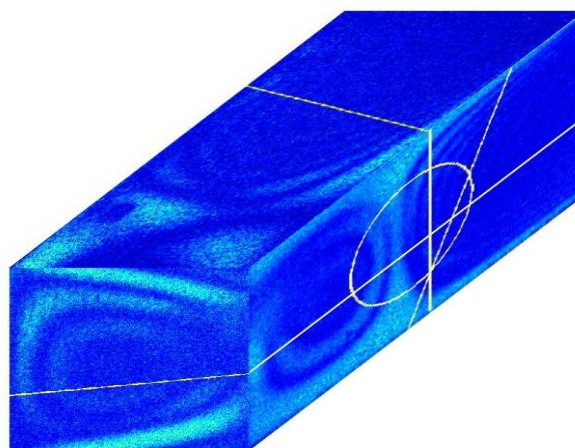


Imagen # 49; Vista de la región de corte de las rectas.

Las vibraciones se van atenuando a medida que van recorriendo el volumen del objeto debido a las pérdidas de energía existentes en el fenómeno, es por ello que donde estas perturbaciones se muestran con mayor intensidad es donde está la superficie del piezoeléctrico y la recta de máxima pendiente nos indica su posición.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS OBTENIDOS

En la primera parte de los resultados obtenidos se ven reflejados los tres hologramas correspondientes a las tres caras L1, L2 y L5, cuando se encontraban en su estado inicial, sin perturbación alguna (ver tabla # 4).

En la segunda parte se observa el trazado de las rectas de máxima pendiente de cada uno de los hologramas hechos en las distintas caras, estas imágenes se encuentran procesadas en MATLAB (ver tabla # 5). Para el caso de la imagen correspondiente a L2 se muestra no solo su recta de máxima pendiente, sino además las trazas provenientes de las otras dos caras y la circunferencia que demarca la posición que tiene el piezoeléctrico dentro de la caja.

En la tercera parte se muestran sendas imágenes, correspondientes a la concentración de los puntos de intercepción de todas las rectas de máxima pendiente de cada una de las posiciones analizadas. Además se incluye el trazado de la circunferencia que representa la posición que ocupa el piezoeléctrico (ver tabla # 6).

A continuación se muestran las tablas que muestran las ecuaciones de las rectas de máxima pendiente (ver tabla # 8 y tabla # 9), luego de lo cual se muestran las tablas correspondientes a las coordenadas de los puntos de

intercepción de cada una de las trazas de L1 y L5 con la recta de máxima pendiente de L2 (ver tablas # 10 y # 11).

Luego de esto se muestran dos tablas resumen que muestran la relación entre la cantidad de puntos de intercepción y la cantidad de ellos que se encuentran dentro del área del piezoeléctrico, se indica también el resultado en forma porcentual.

En la tabla # 14 se muestra el valor de las coordenadas del epicentro de vibración para cada una de las dos posiciones evaluadas, esta vez considerando el resultado como un punto único producto de sacar el promedio entre todos los puntos de intercepción. Adicionalmente se muestra en la tabla # 7 la ubicación de estas coordenadas en el prototipo

Finalmente en las tablas # 15 y 16 representan una secuencia de las tres caras pasando por el barrido de frecuencia analizado, mostrando cómo se comporta el patrón de vibraciones al ir variando los valores de frecuencia con el generador de funciones.

Tabla # 4; Imágenes sin Perturbación

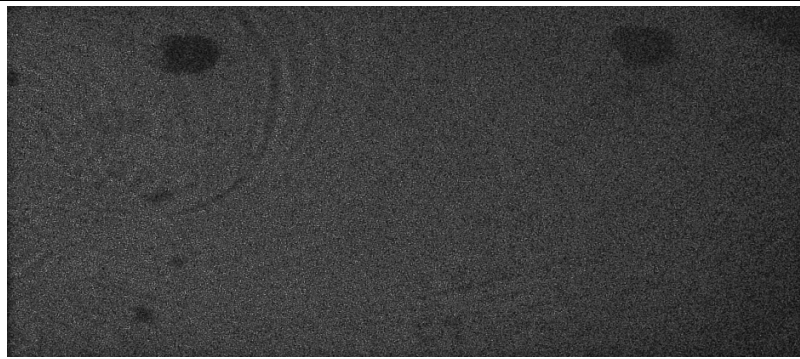

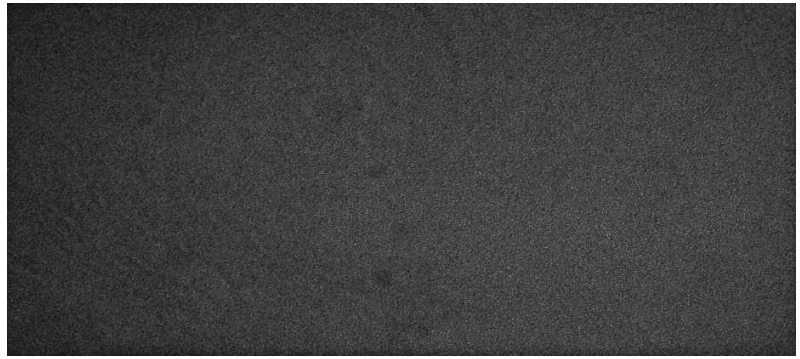
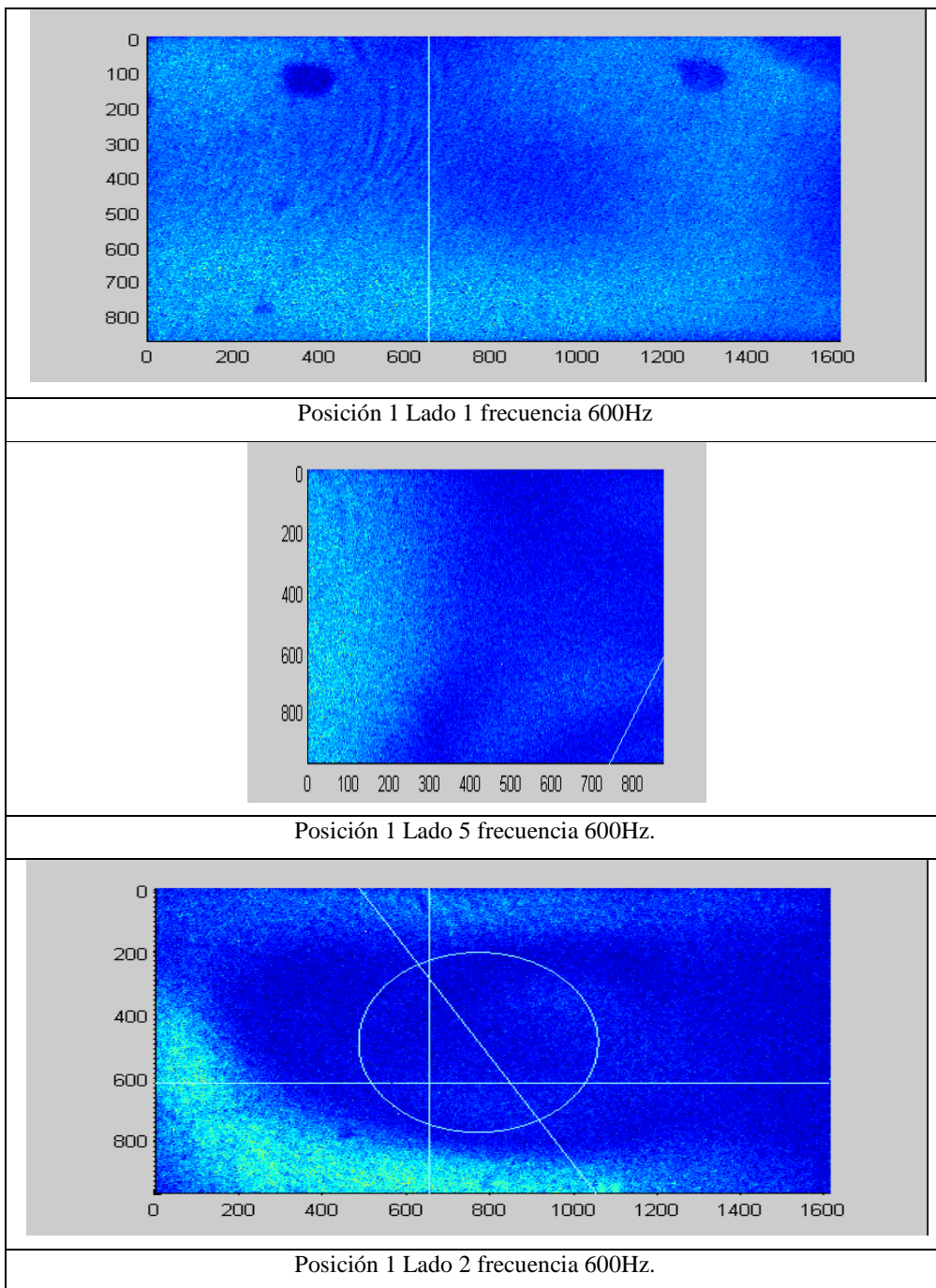
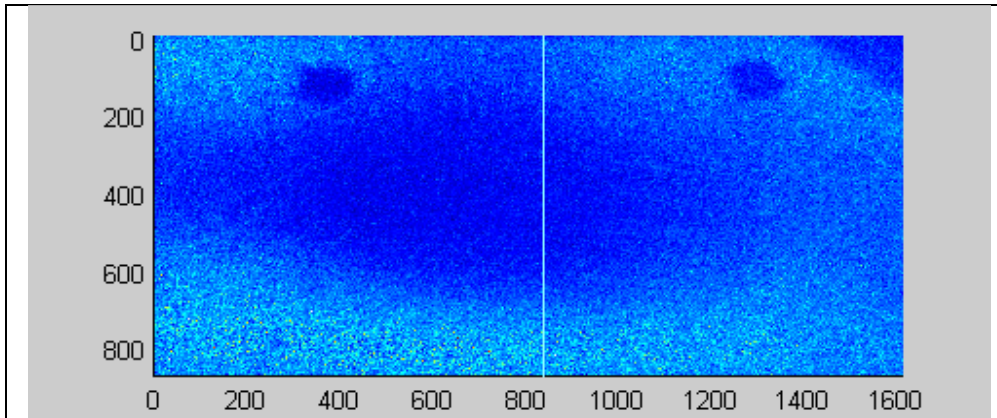
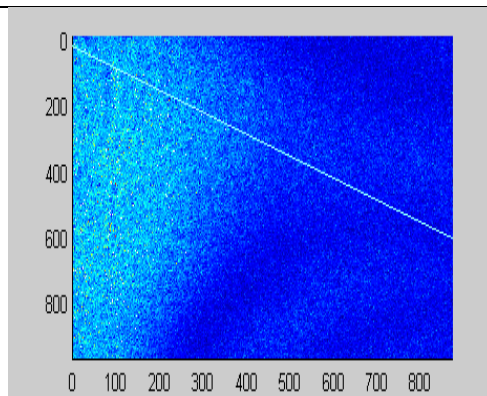

Lado 1 frecuencia 0Hz.

Lado 5 frecuencia 0Hz.

Lado 2 frecuencia 0Hz.

Tabla # 5; rectas de máximas pendiente pertenecientes a la posición 1 como a la posición 2 en las frecuencias analizadas.

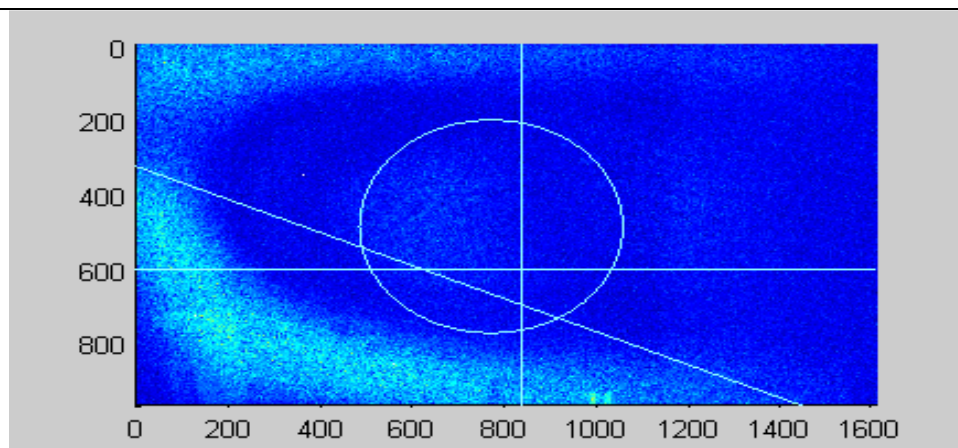




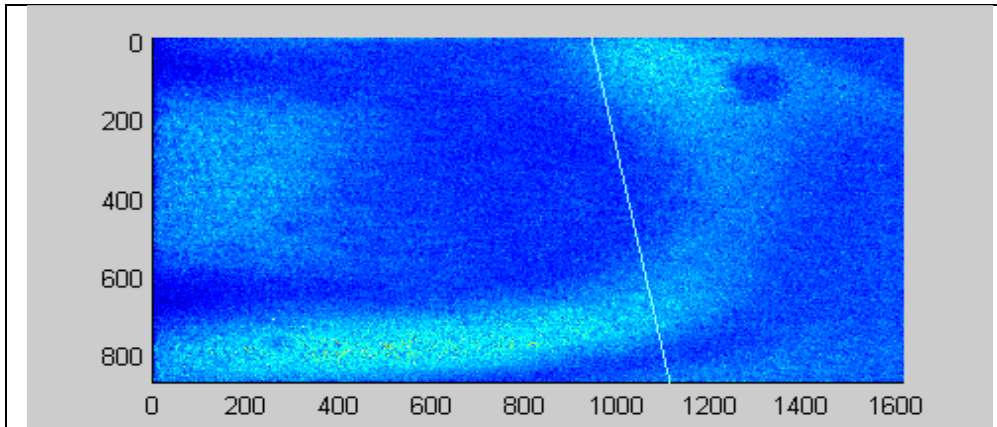
Posición 1 Lado 1 frecuencia 650Hz.



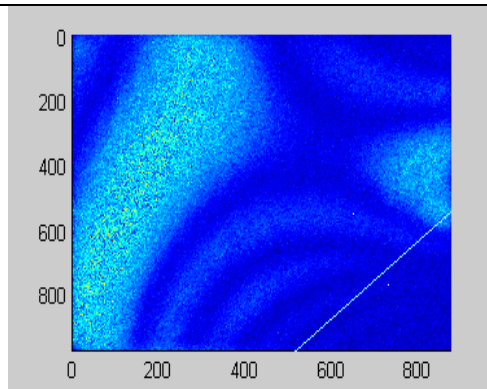
Posición 1 Lado 5 frecuencia 650Hz.



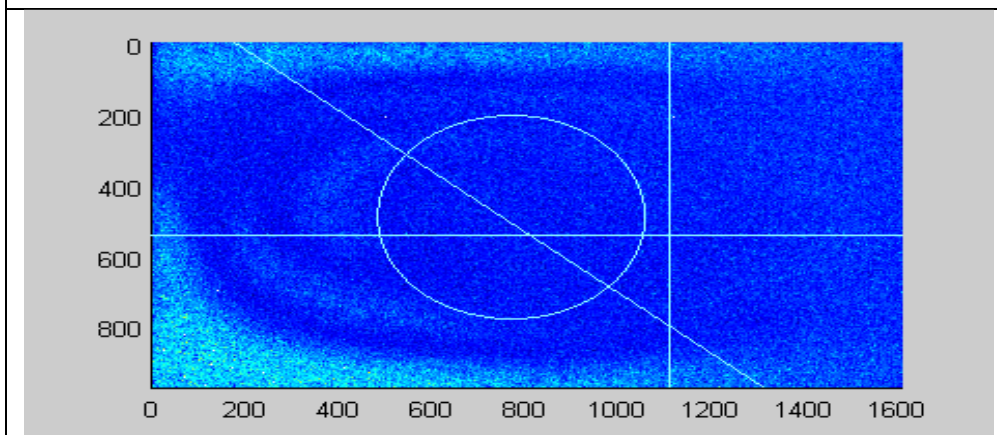
Posición 1 Lado 2 frecuencia 650Hz.



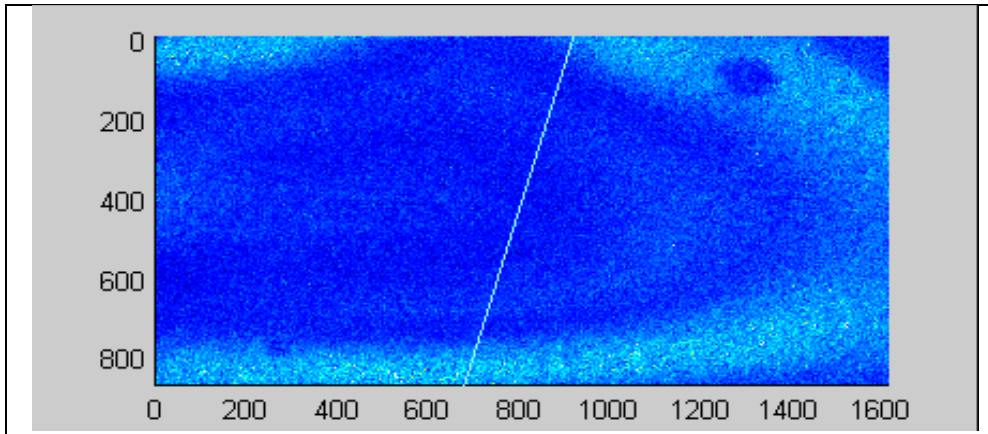
Posición 1 Lado 1 frecuencia 700Hz.



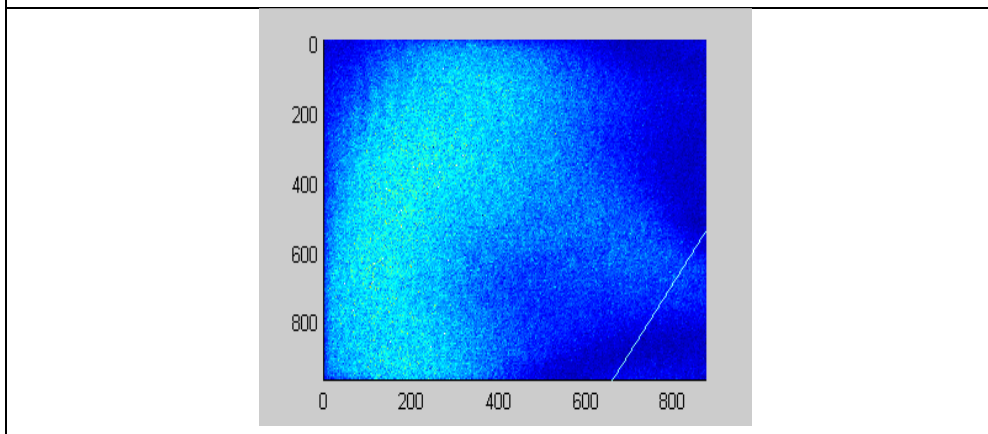
Posición 1 Lado 5 frecuencia 700Hz.



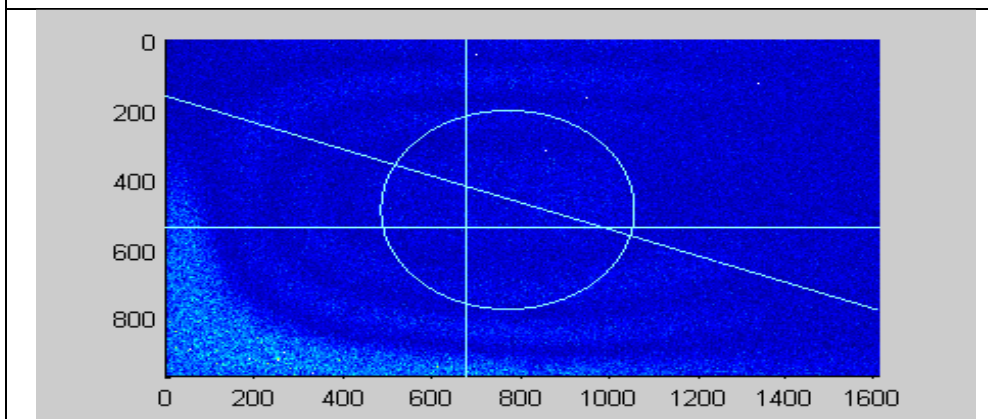
Posición 1 Lado 2 frecuencia 700Hz.



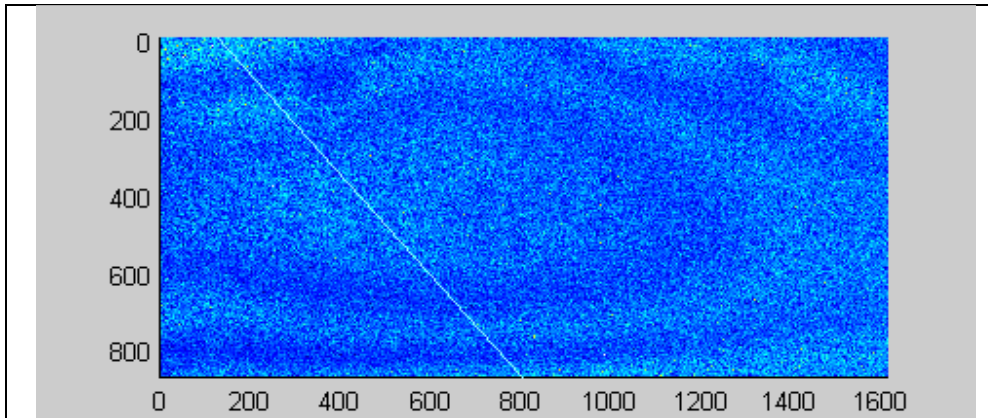
Posición 1 Lado 1 frecuencia 750Hz.



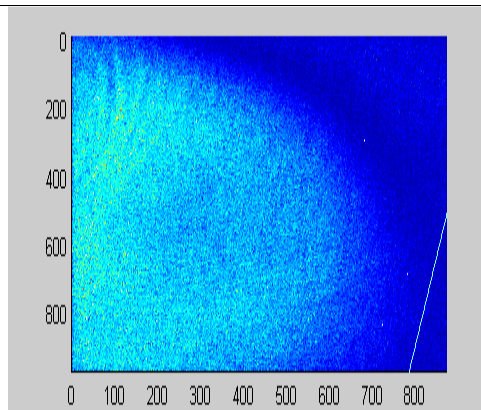
Posición 1 Lado 5 frecuencia 750Hz.



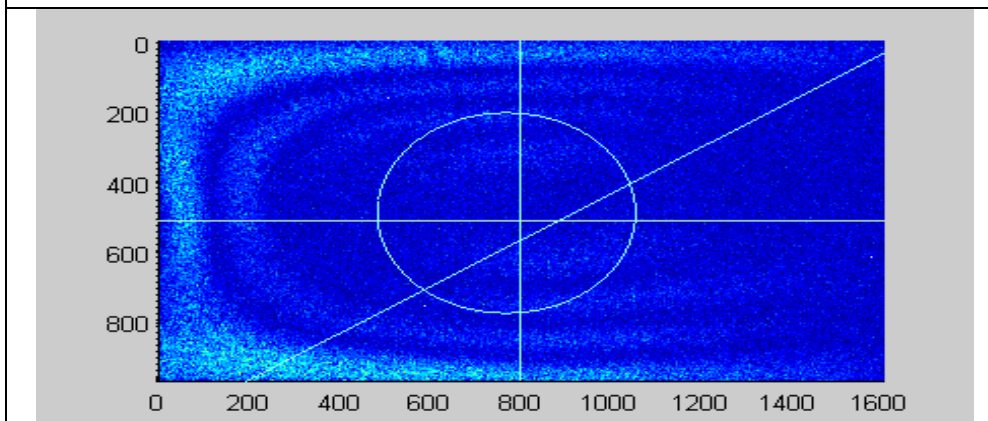
Posición 1 Lado 2 frecuencia 750Hz.



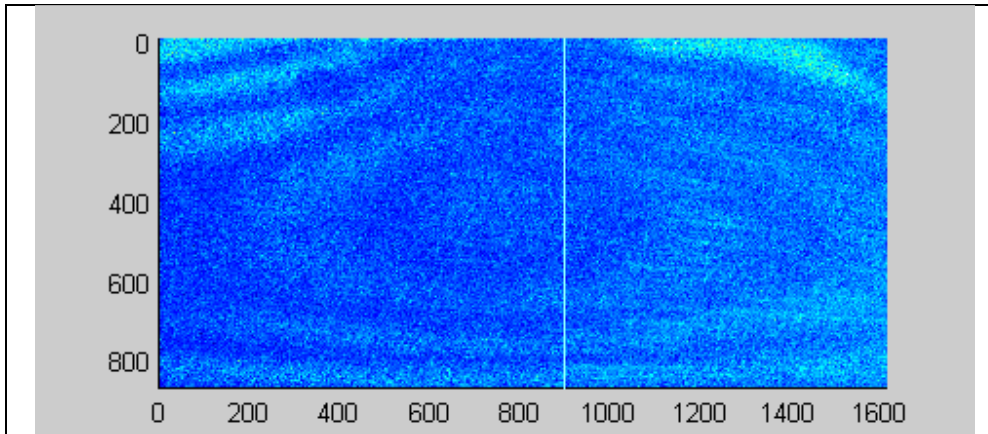
Posición 1 Lado 1 frecuencia 800Hz.



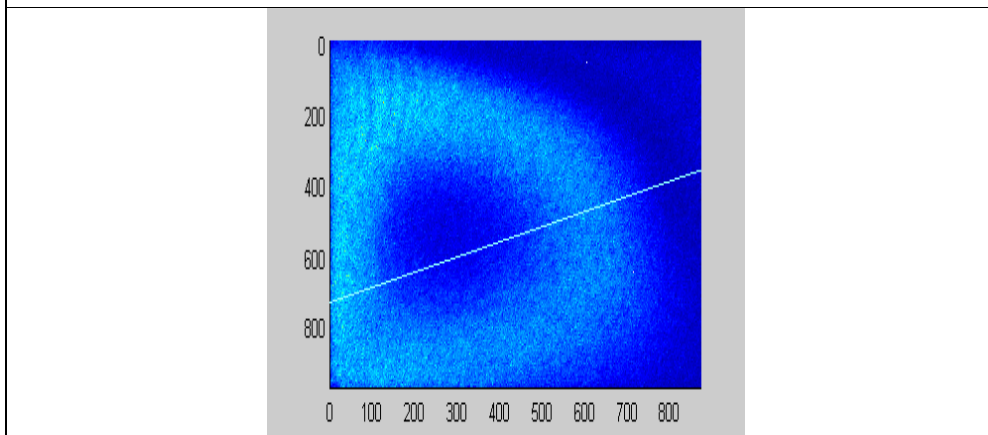
Posición 1 Lado 5 frecuencia 800Hz.



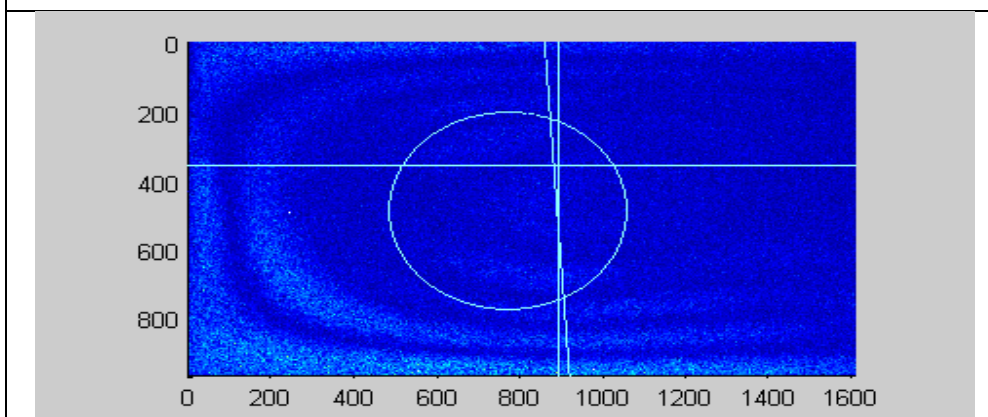
Posición 1 Lado 2 frecuencia 800Hz.



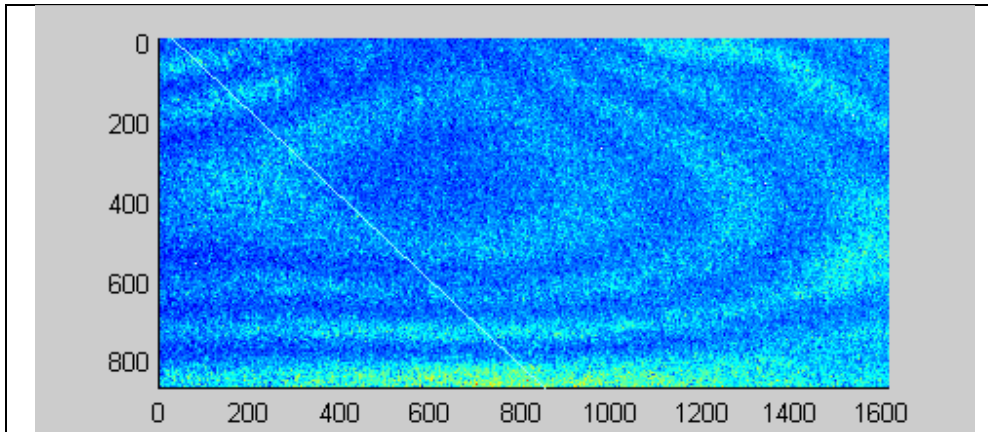
Posición 1 Lado 1 frecuencia 850Hz.



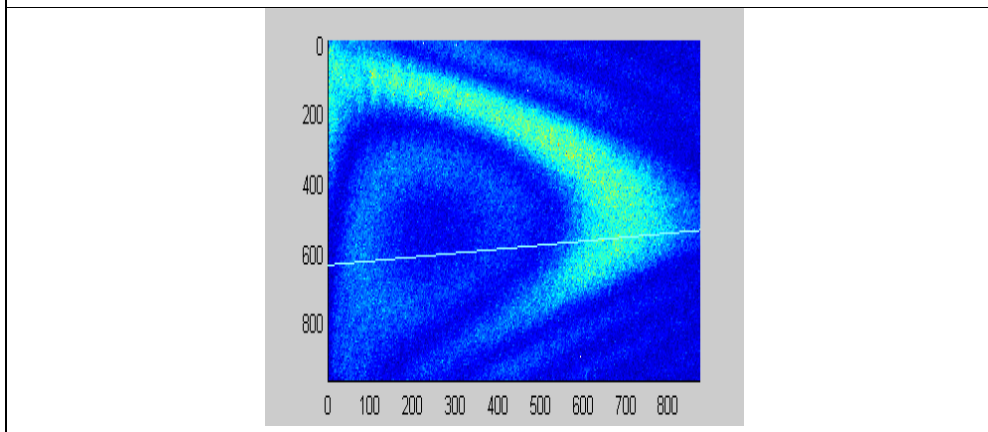
Posición 1 Lado 5 frecuencia 850Hz.



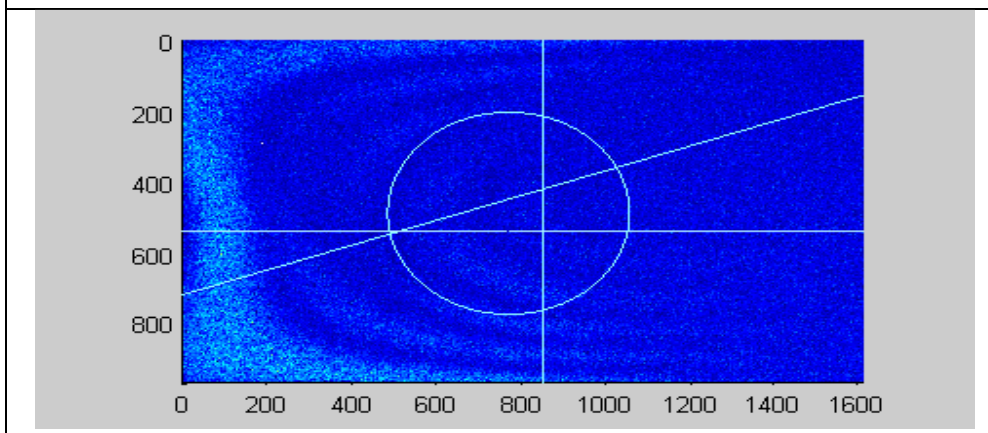
Posición 1 Lado 2 frecuencia 850Hz.



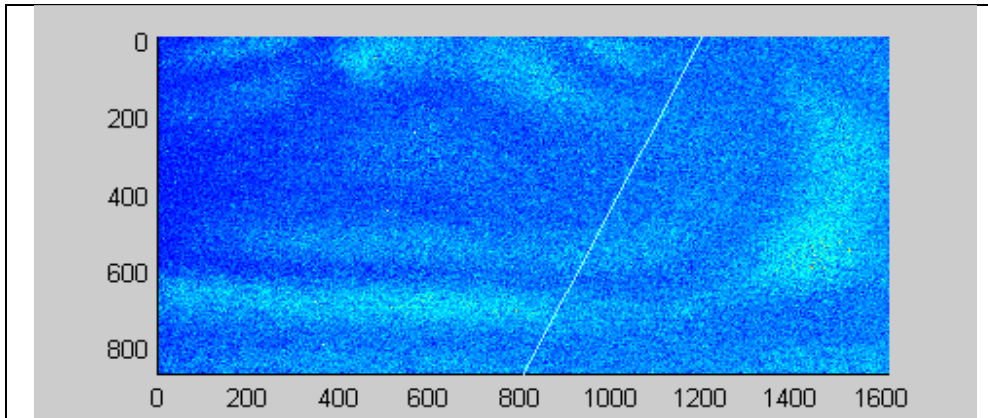
Posición 1 Lado 1 frecuencia 900Hz.



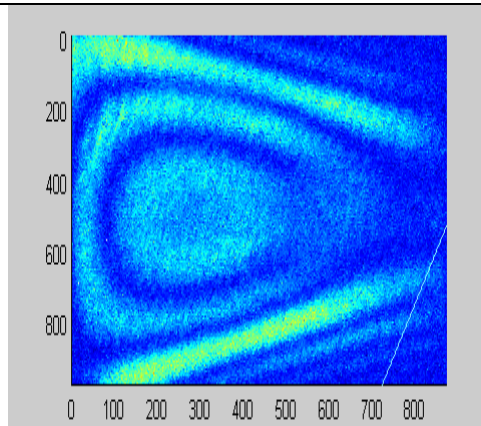
Posición 1 Lado 5 frecuencia 900Hz.



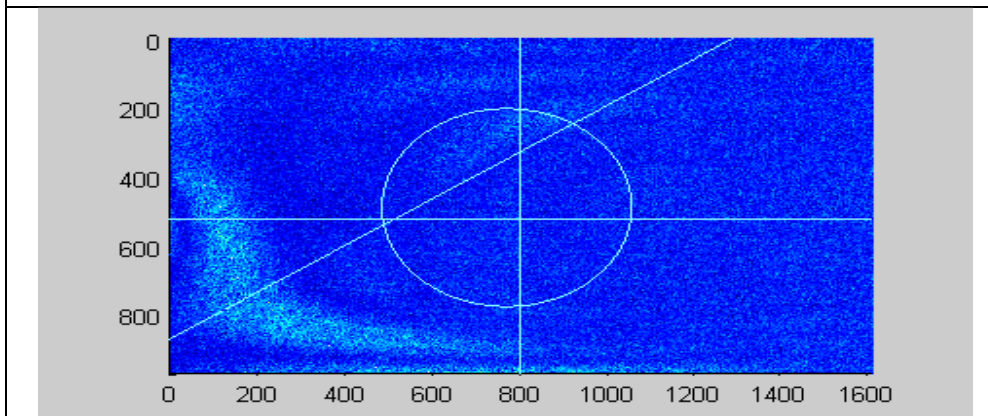
Posición 1 Lado 2 frecuencia 900Hz.



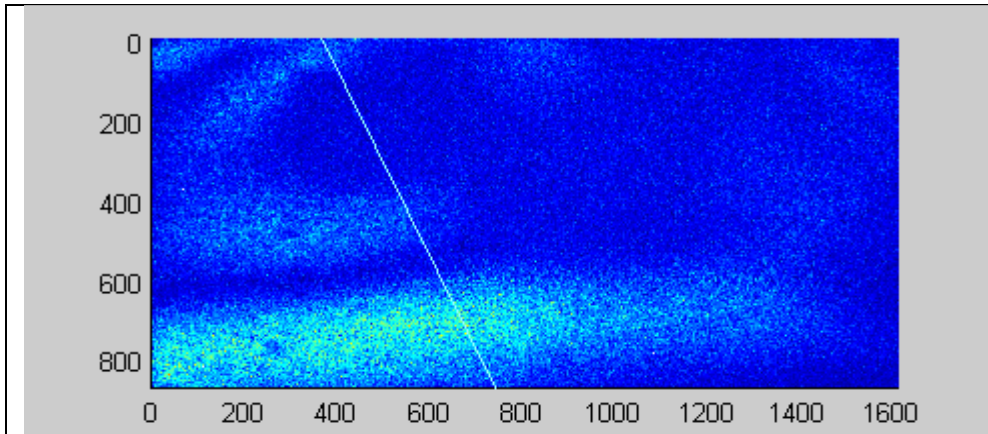
Posición 1 Lado 1 frecuencia 950Hz.



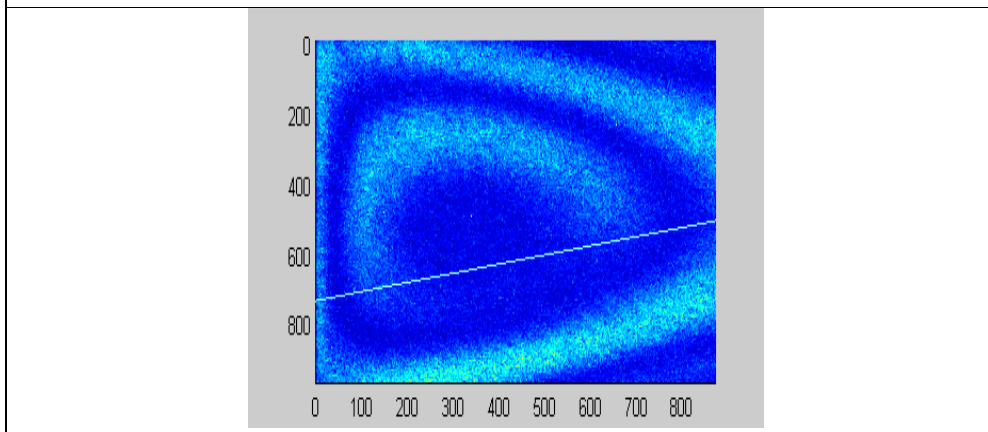
Posición 1 Lado 5 frecuencia 950Hz.



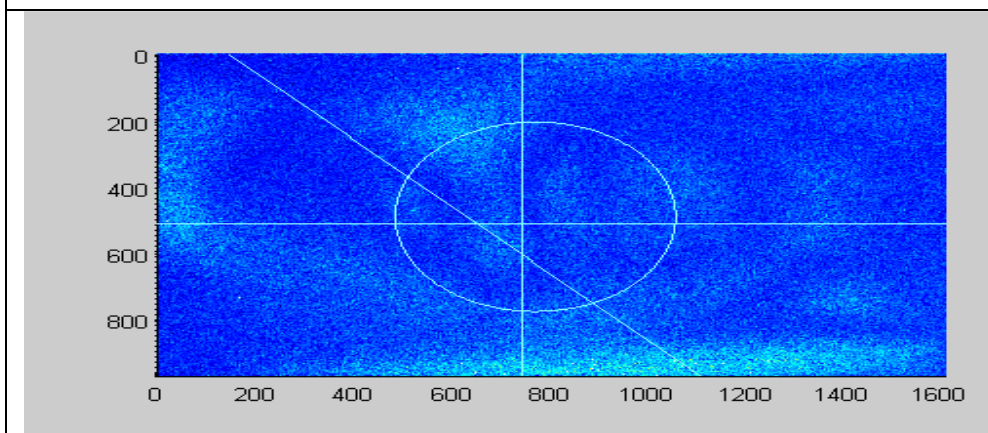
Posición 1 Lado 2 frecuencia 950Hz.



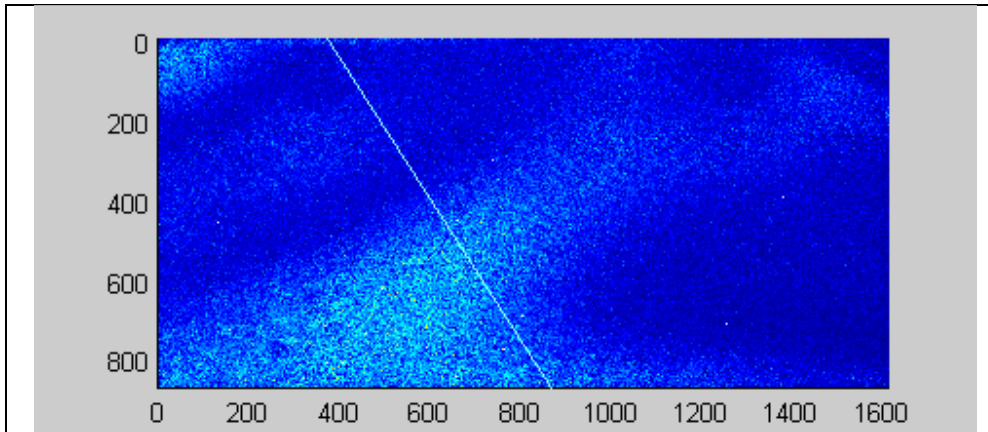
Posición 1 Lado 1 frecuencia 1000Hz.



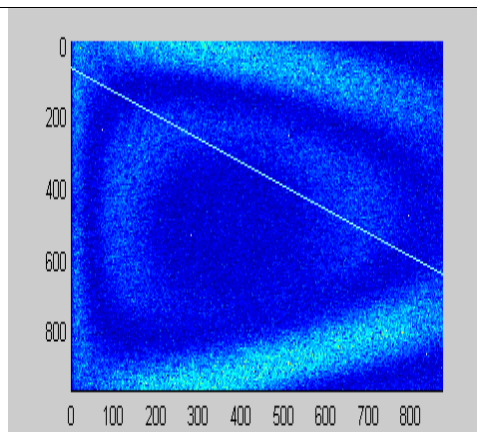
Posición 1 Lado 5 frecuencia 1000Hz.



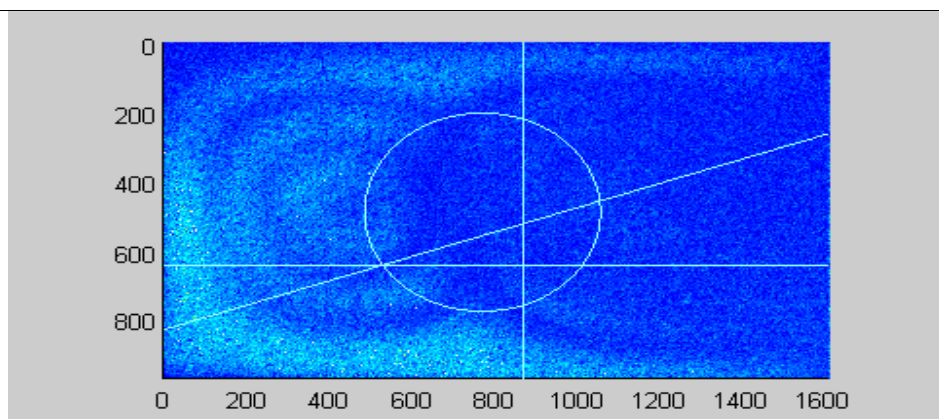
Posición 1 Lado 2 frecuencia 1000Hz.



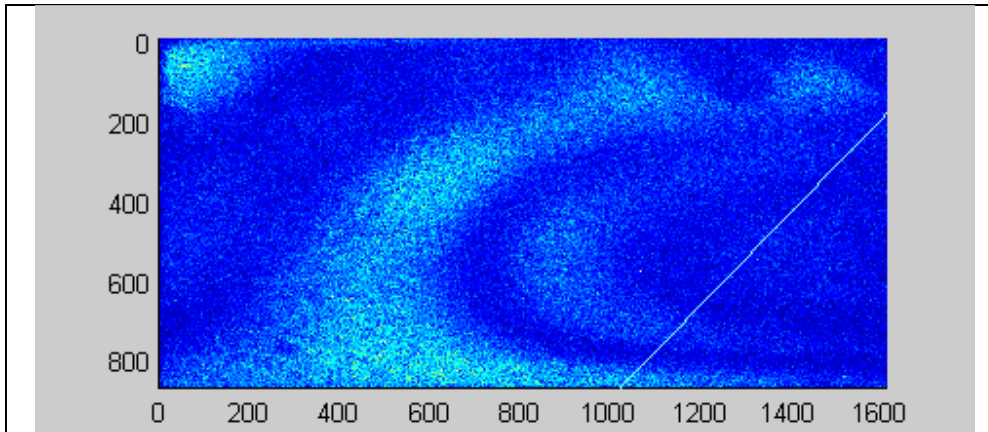
Posición 1 Lado 1 frecuencia 1050Hz.



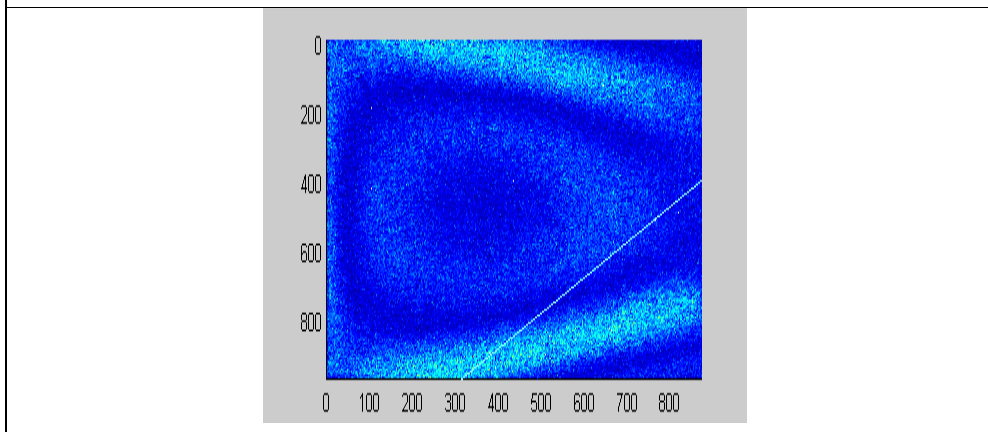
Posición 1 Lado 5 frecuencia 1050Hz.



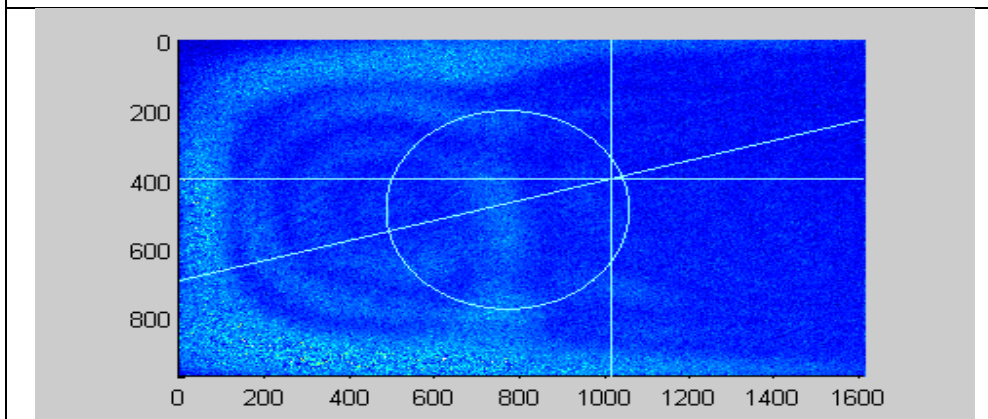
Posición 1 Lado 2 frecuencia 1050Hz.



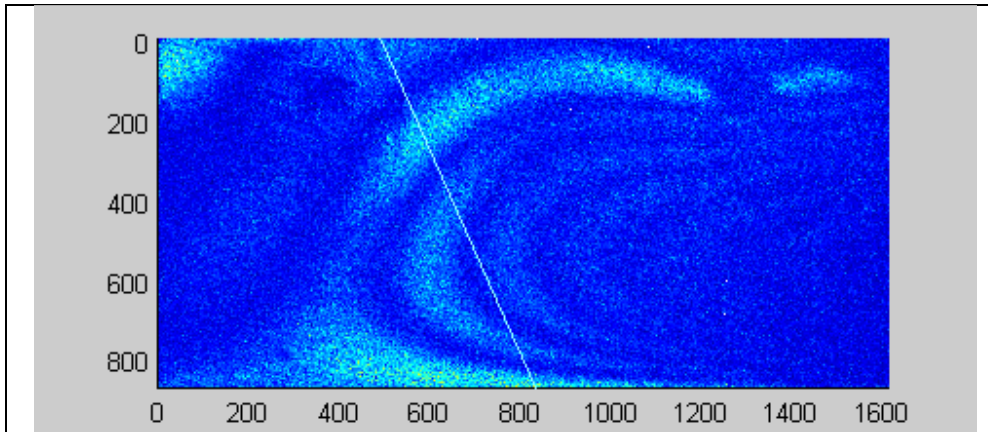
Posición 1 Lado 1 frecuencia 1100Hz.



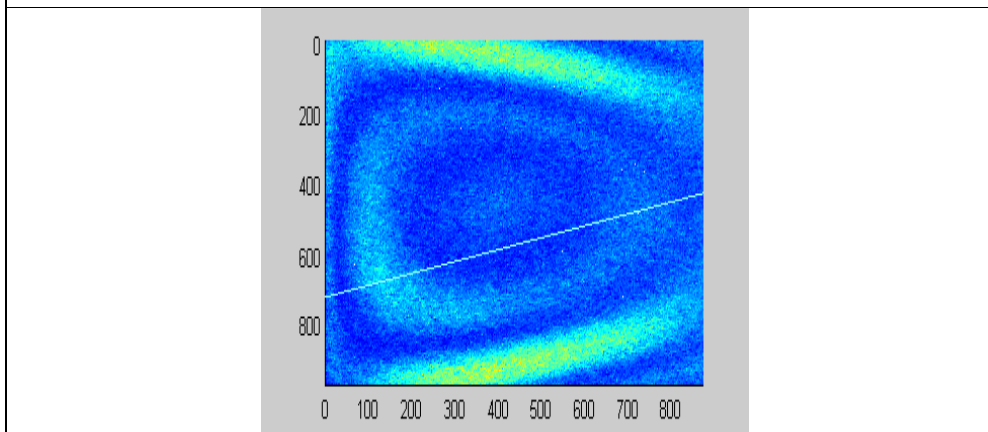
Posición 1 Lado 5 frecuencia 1100Hz.



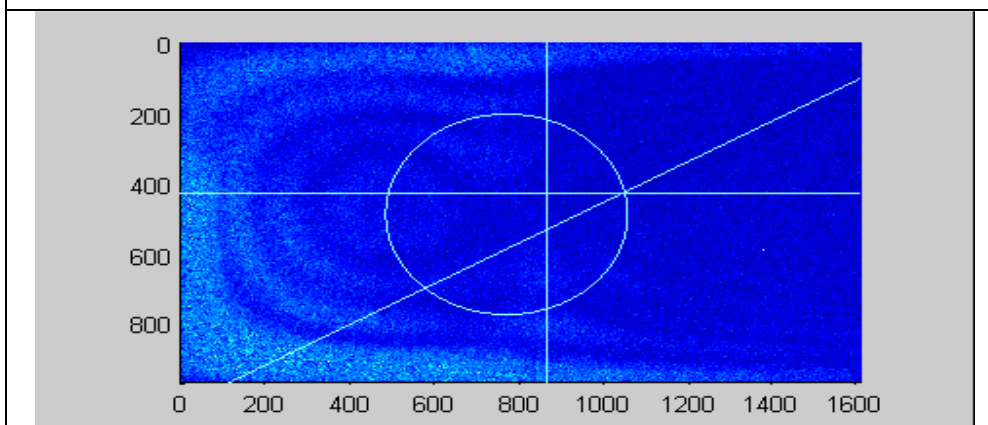
Posición 1 Lado 2 frecuencia 1100Hz.



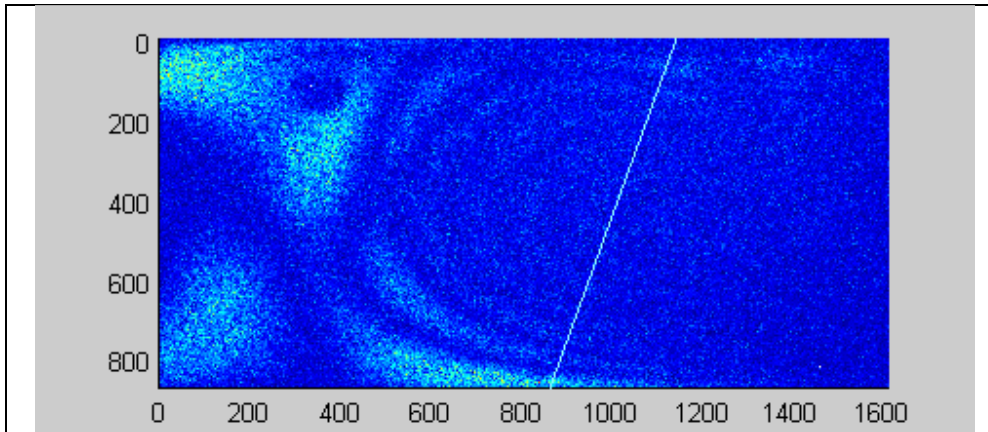
Posición 1 Lado 1 frecuencia 1150Hz.



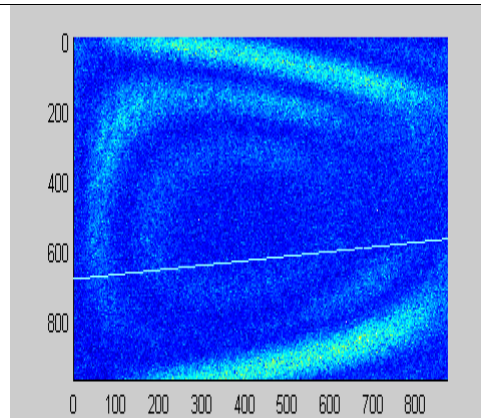
Posición 1 Lado 5 frecuencia 1150Hz.



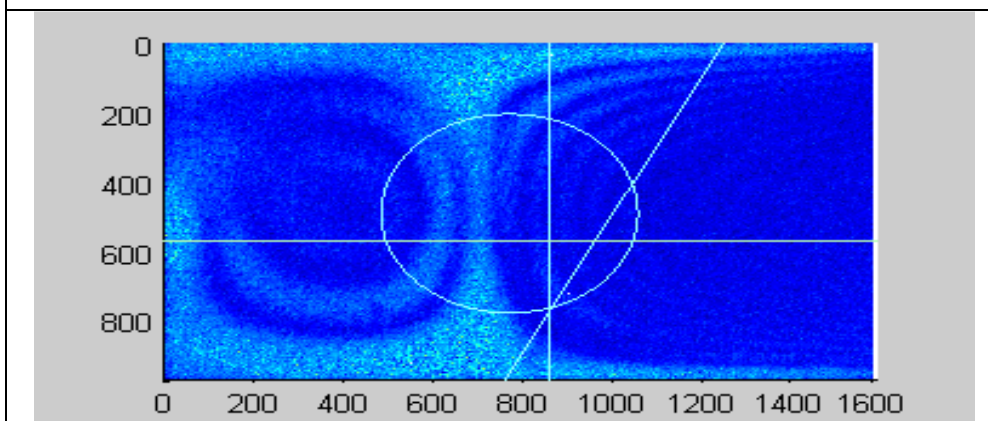
Posición 1 Lado 2 frecuencia 1150Hz.



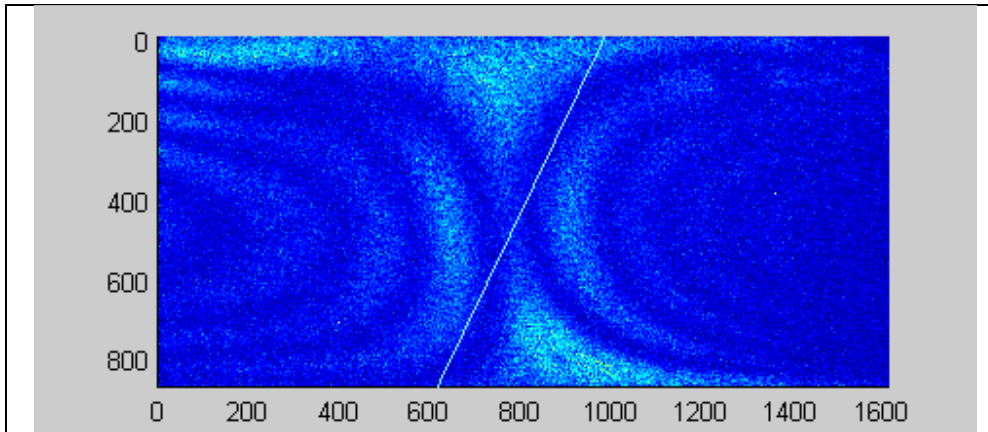
Posición 1 Lado 1 frecuencia 1200Hz.



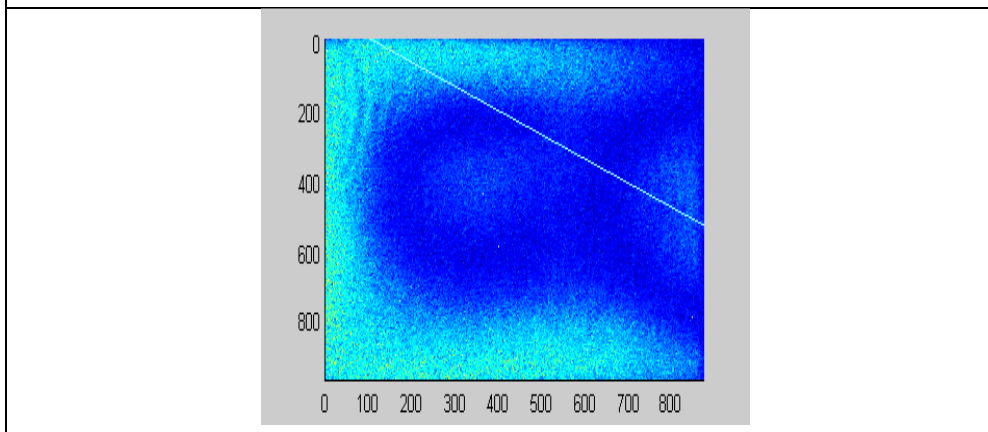
Posición 1 Lado 5 frecuencia 1200Hz.



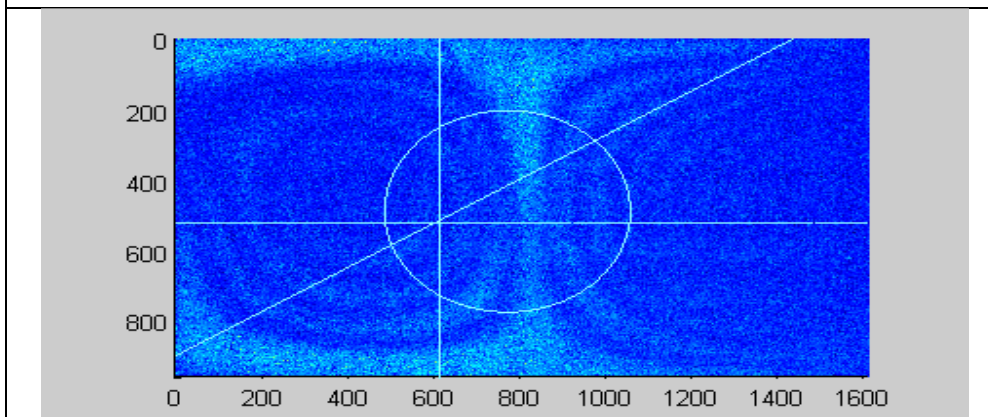
Posición 1 Lado 2 frecuencia 1200Hz.



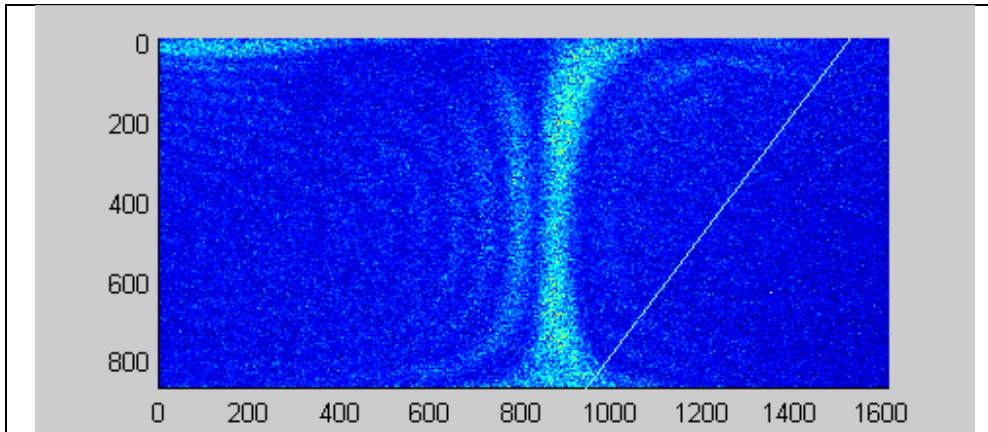
Posición 1 Lado 1 frecuencia 1250Hz.



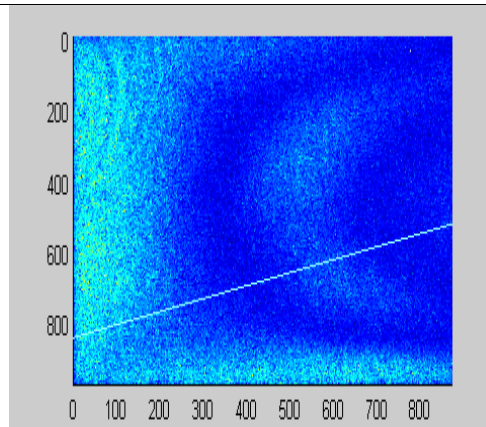
Posición 1 Lado 5 frecuencia 1250Hz.



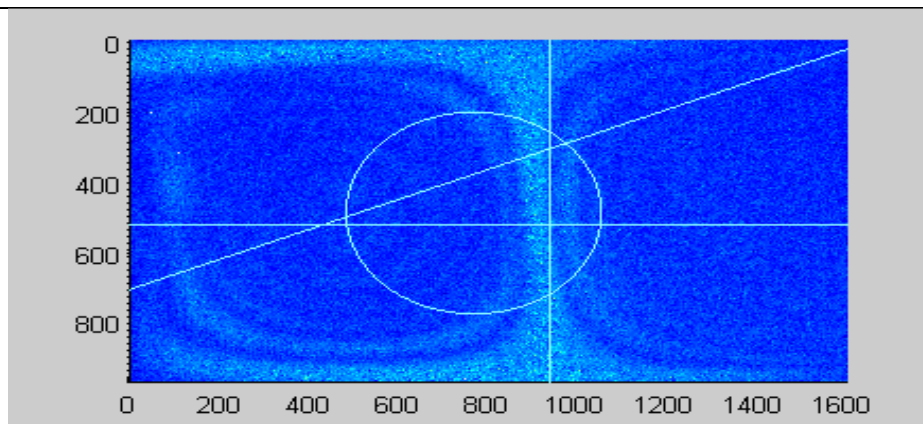
Posición 1 Lado 2 frecuencia 1250Hz.



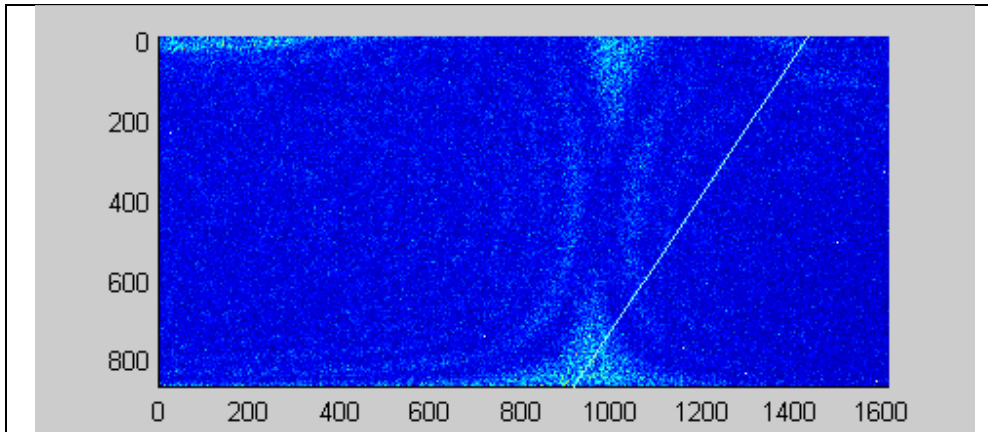
Posición 1 Lado 1 frecuencia 1300Hz.



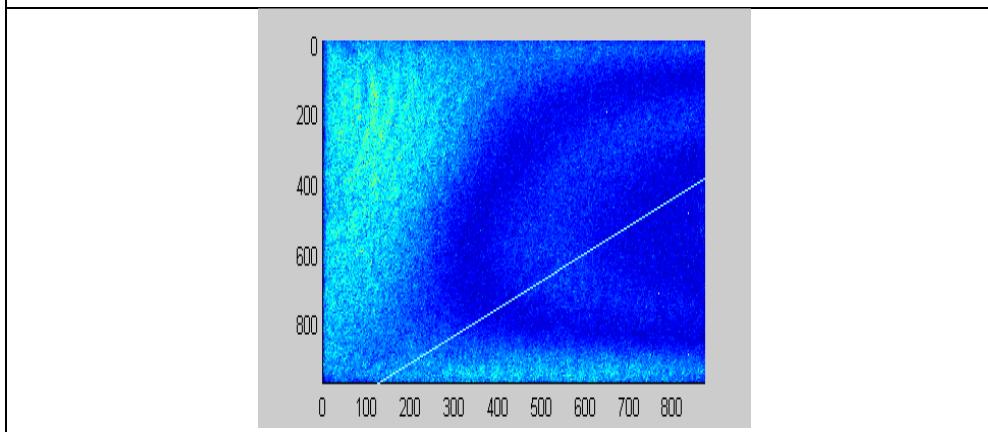
Posición 1 Lado 5 frecuencia 1300Hz.



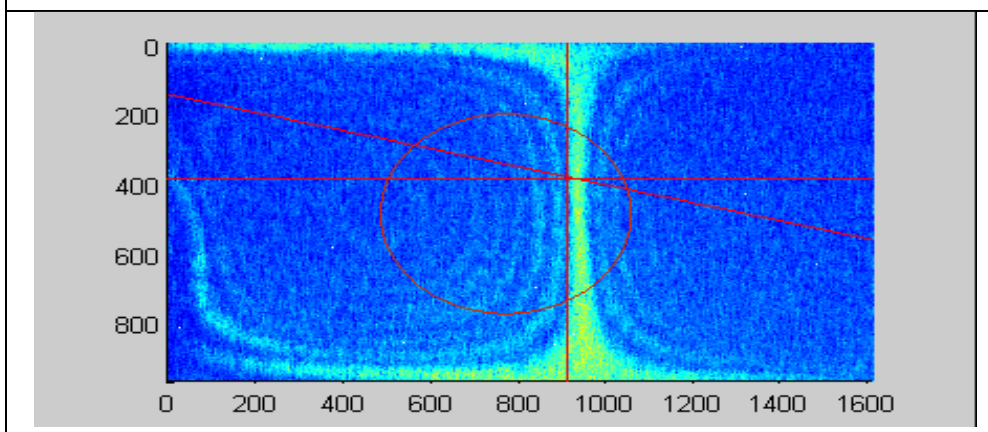
Posición 1 Lado 2 frecuencia 1300Hz.



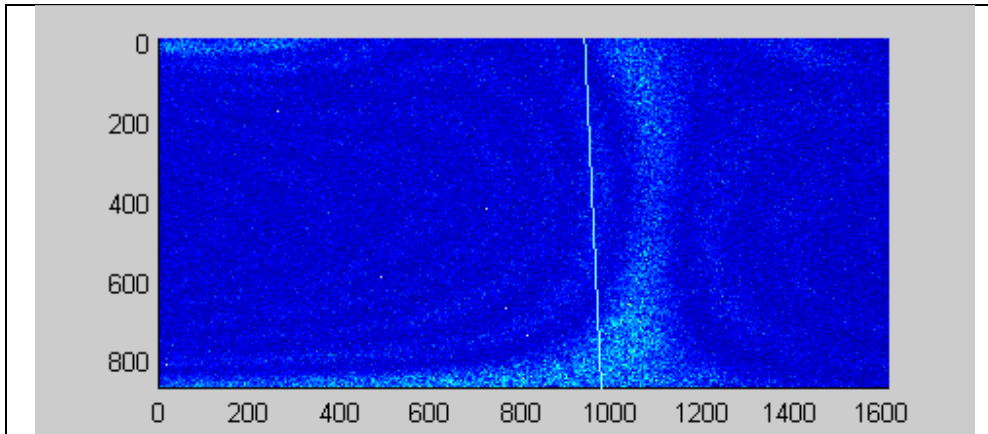
Posición 1 Lado 1 frecuencia 1350Hz.



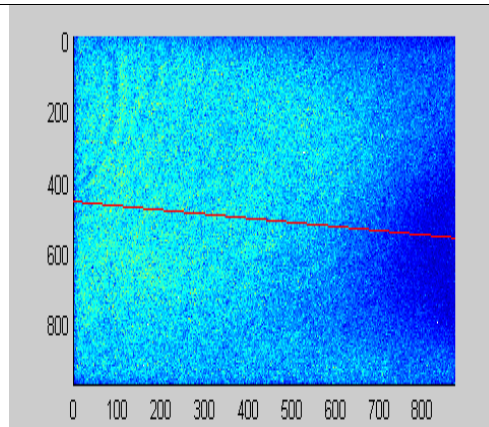
Posición 1 Lado 5 frecuencia 1350Hz.



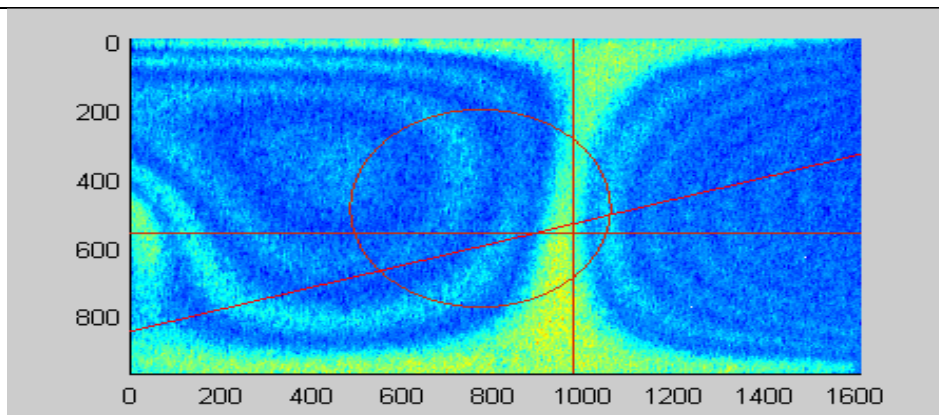
Posición 1 Lado 2 frecuencia 1350Hz.



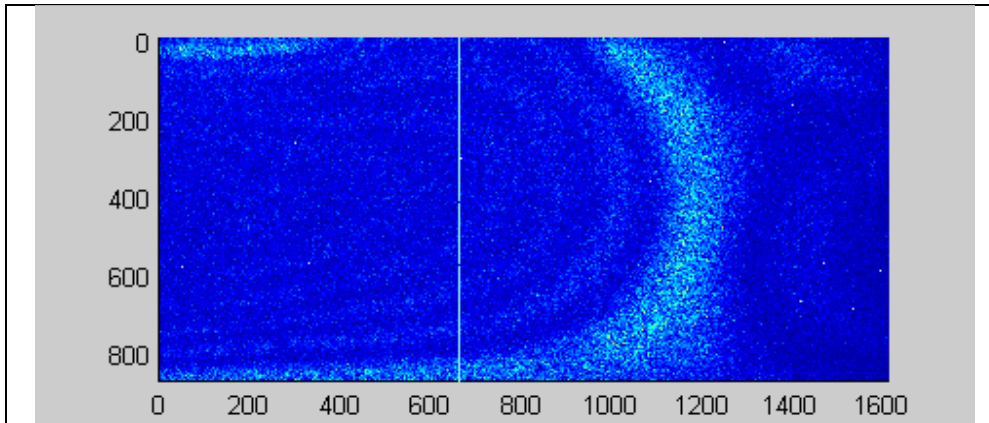
Posición 1 Lado 1 frecuencia 1400Hz.



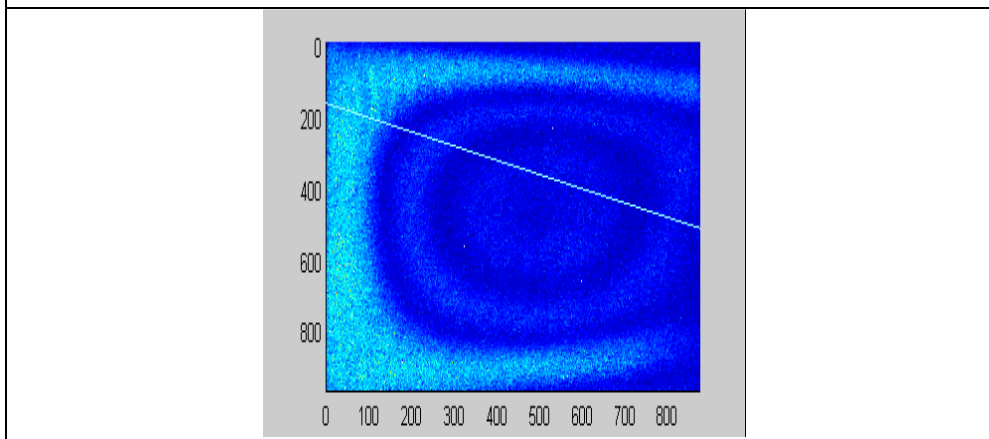
Posición 1 Lado 5 frecuencia 1400Hz.



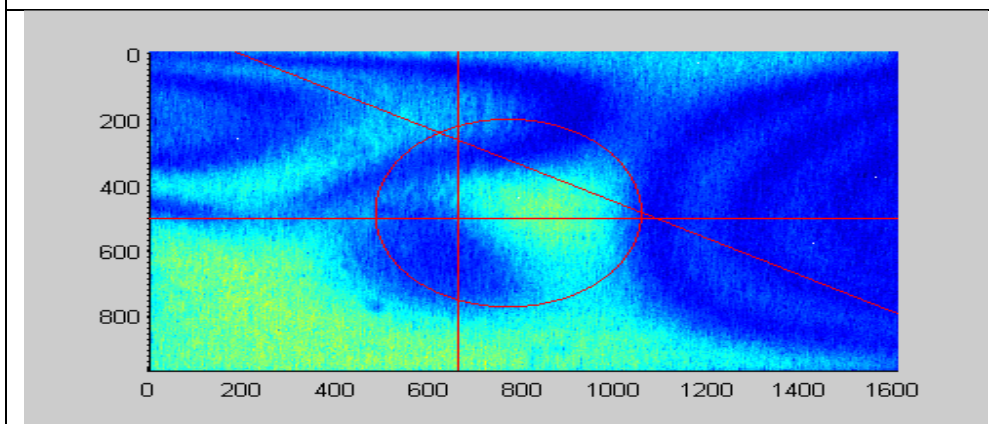
Posición 1 Lado 2 frecuencia 1400Hz.



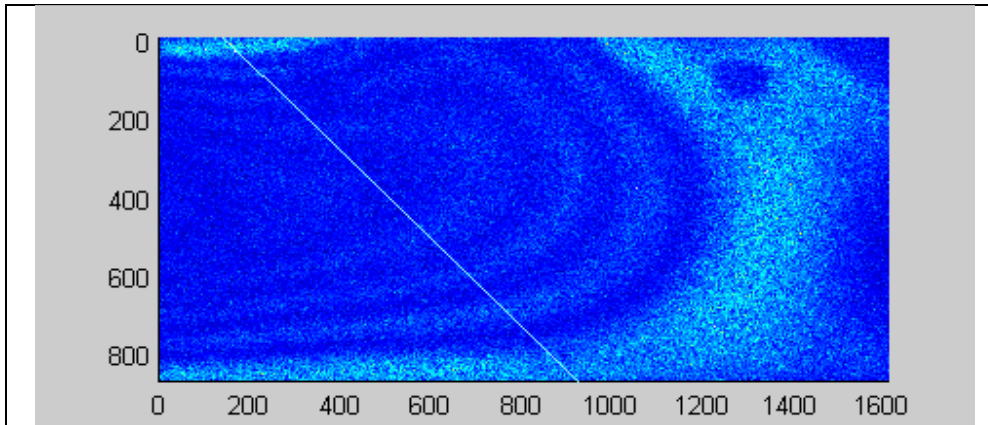
Posición 1 Lado 1 frecuencia 1450Hz.



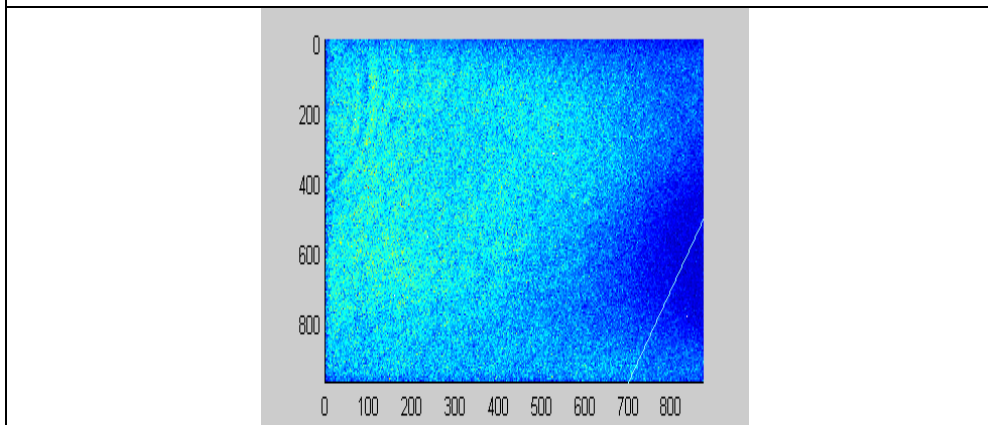
Posición 1 Lado 5 frecuencia 1450Hz.



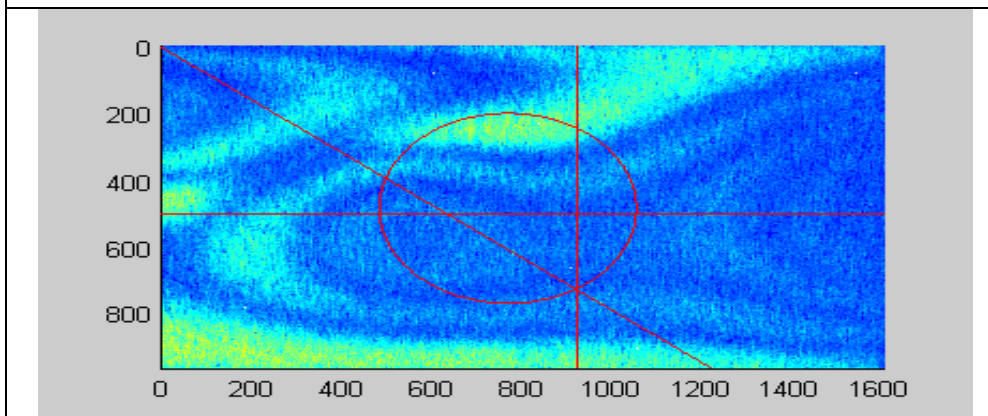
Posición 1 Lado 2 frecuencia 1450Hz.



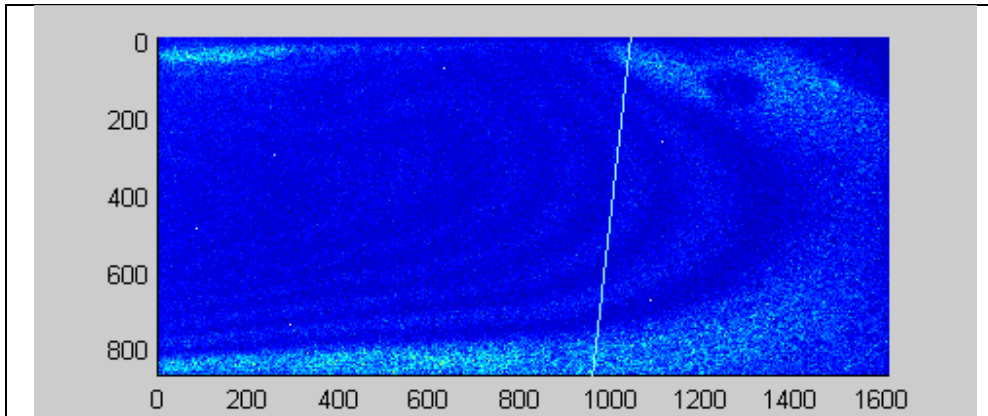
Posición 1 Lado 1 frecuencia 1500Hz.



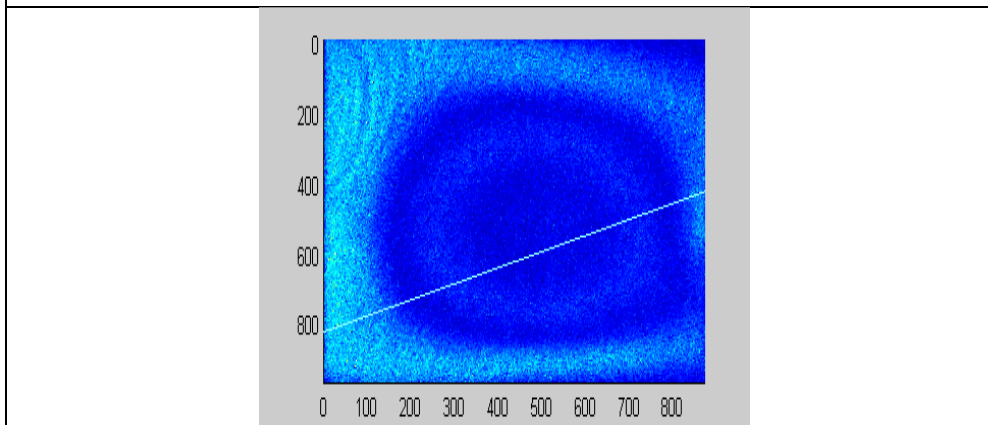
Posición 1 Lado 5 frecuencia 1500Hz.



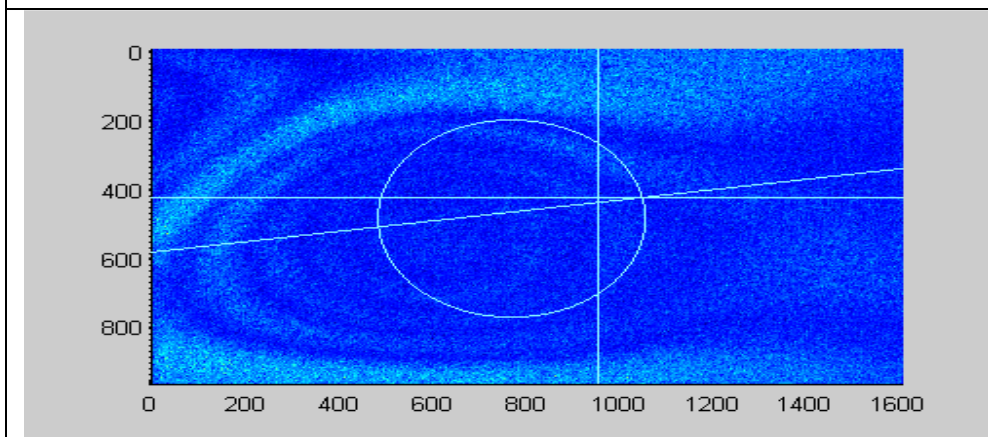
Posición 1 Lado 2 frecuencia 1500Hz.



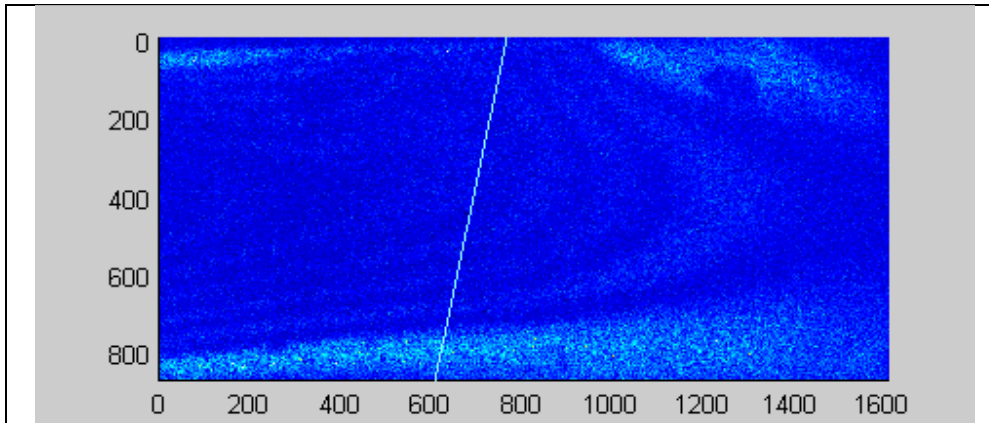
Posición 1 Lado 1 frecuencia 1550Hz.



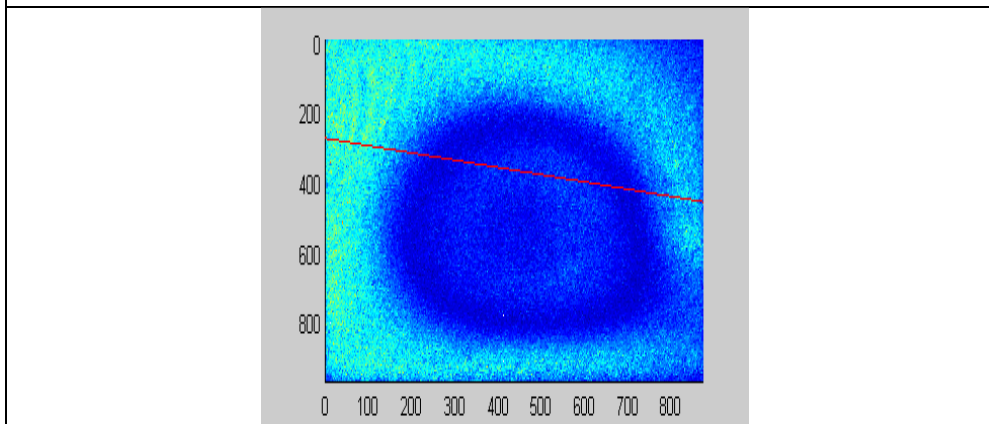
Posición 1 Lado 5 frecuencia 1550Hz.



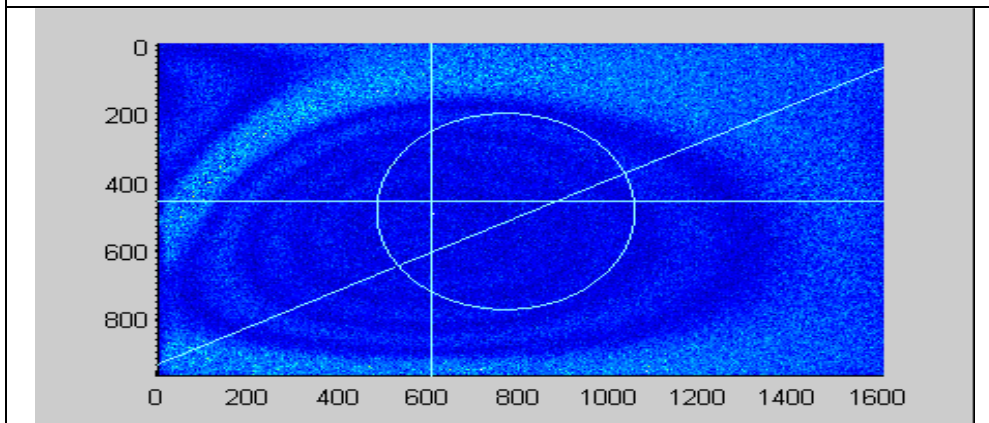
Posición 1 Lado 2 frecuencia 1550Hz.



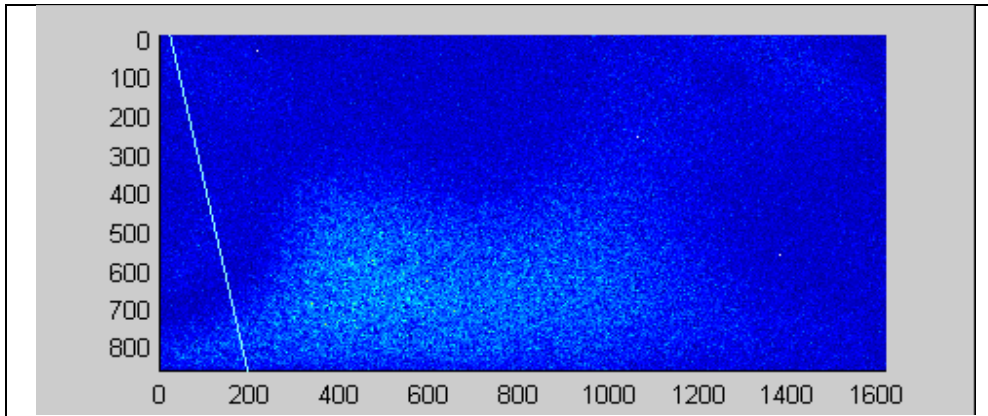
Posición 1 Lado 1 frecuencia 1600Hz.



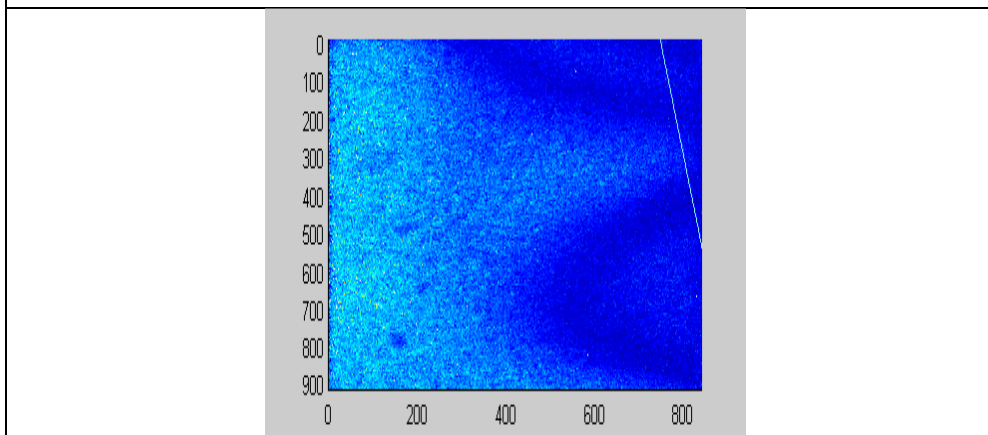
Posición 1 Lado 5 frecuencia 1600Hz.



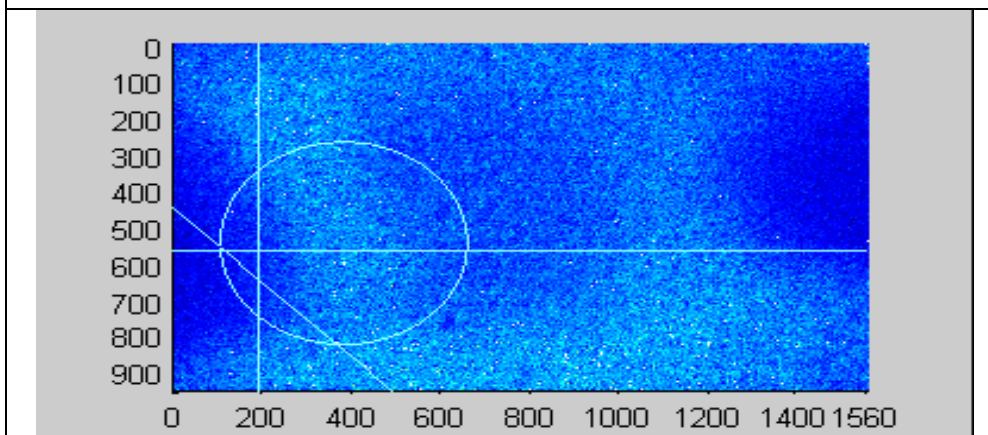
Posición 1 Lado 2 frecuencia 1600Hz.



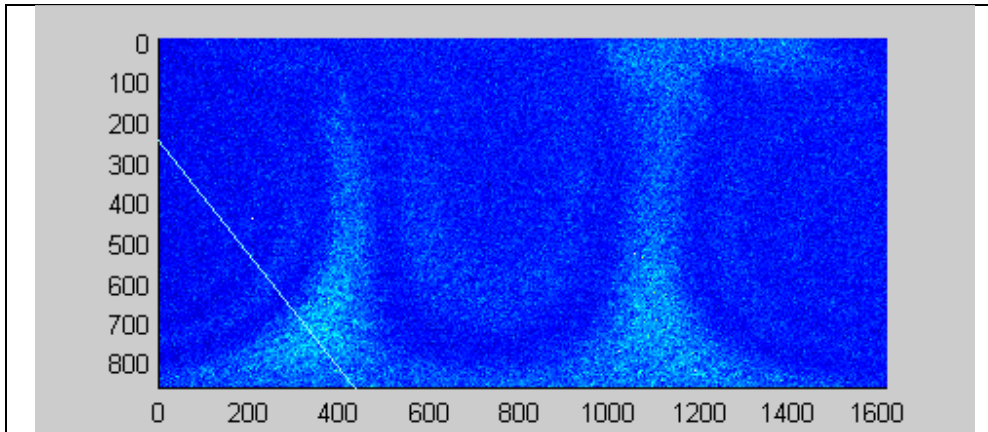
Posición 2 Lado 1 frecuencia 600Hz.



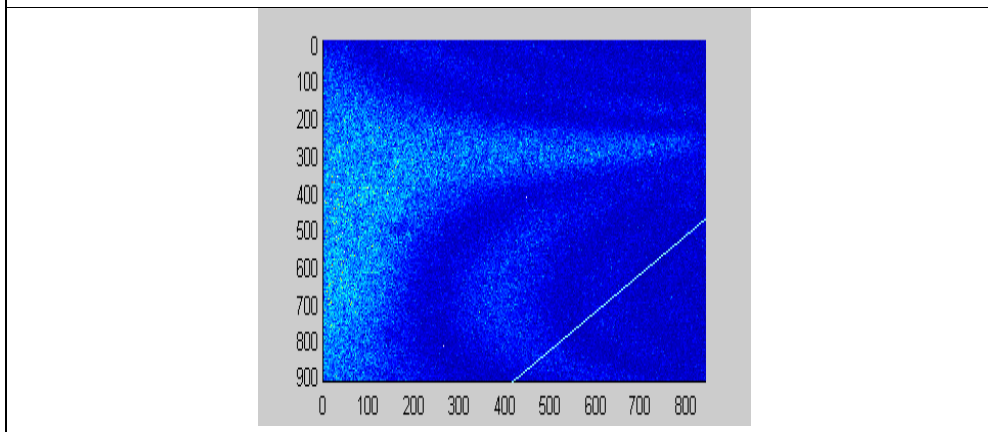
Posición 2 Lado 5 frecuencia 600Hz.



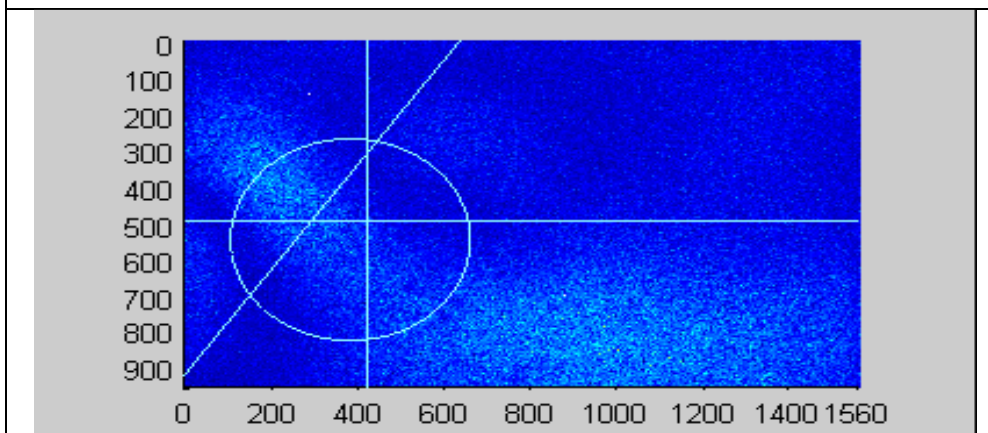
Posición 2 Lado 2 frecuencia 600Hz.



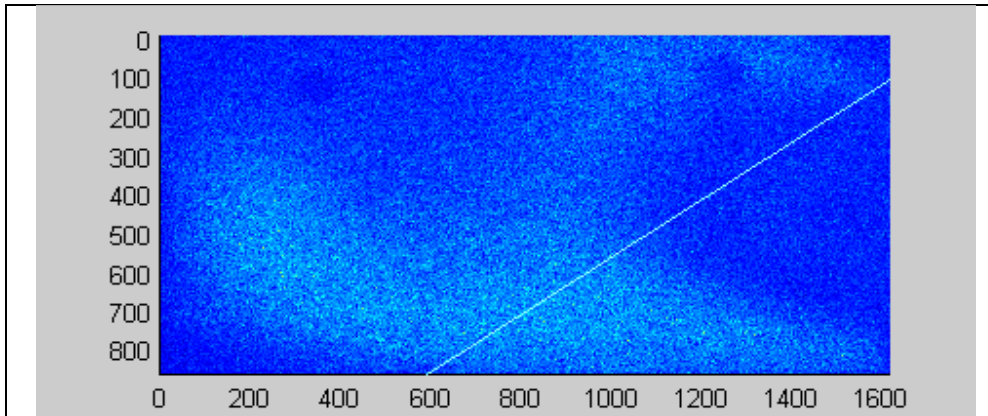
Posición 2 Lado 1 frecuencia 650Hz.



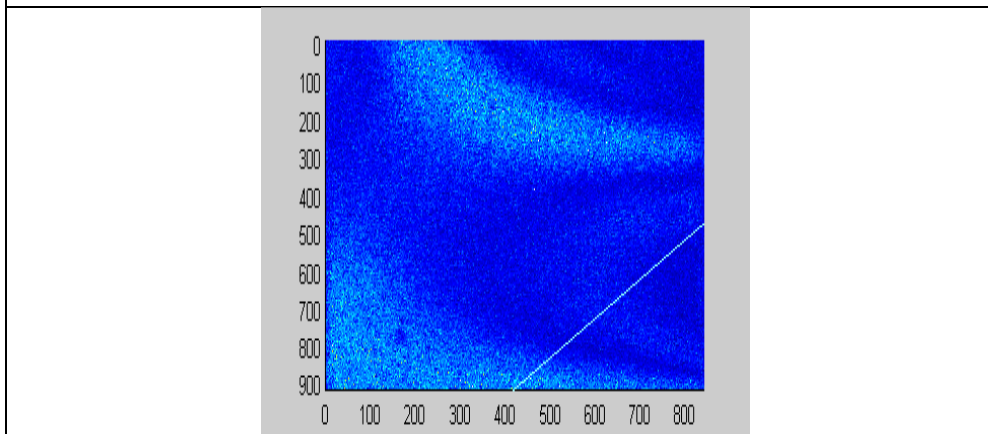
Posición 2 Lado 5 frecuencia 650Hz.



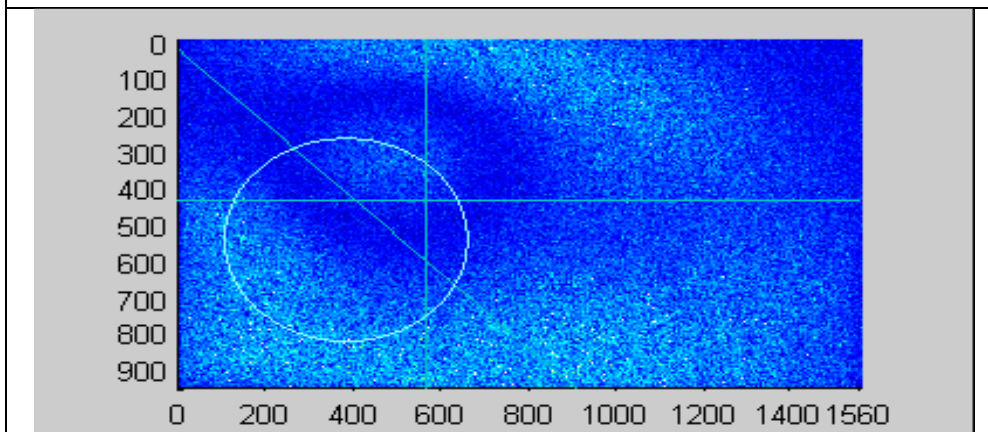
Posición 2 Lado 2 frecuencia 650Hz.



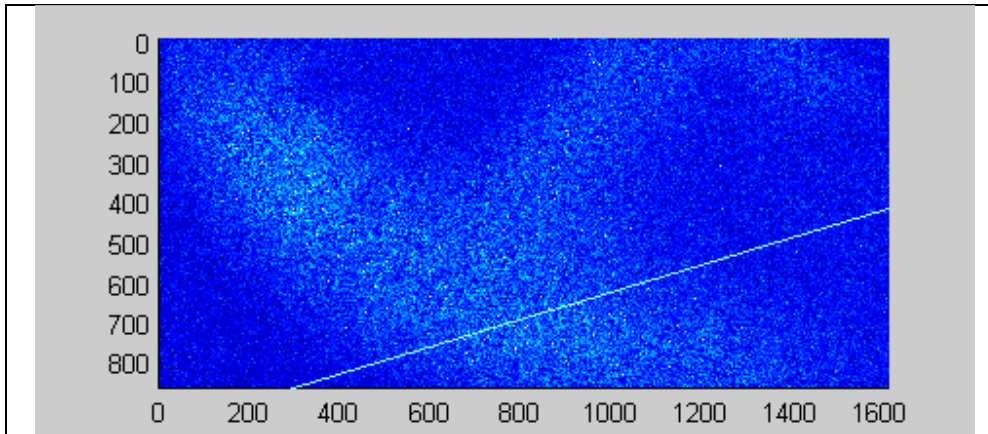
Posición 2 Lado 1 frecuencia 700Hz.



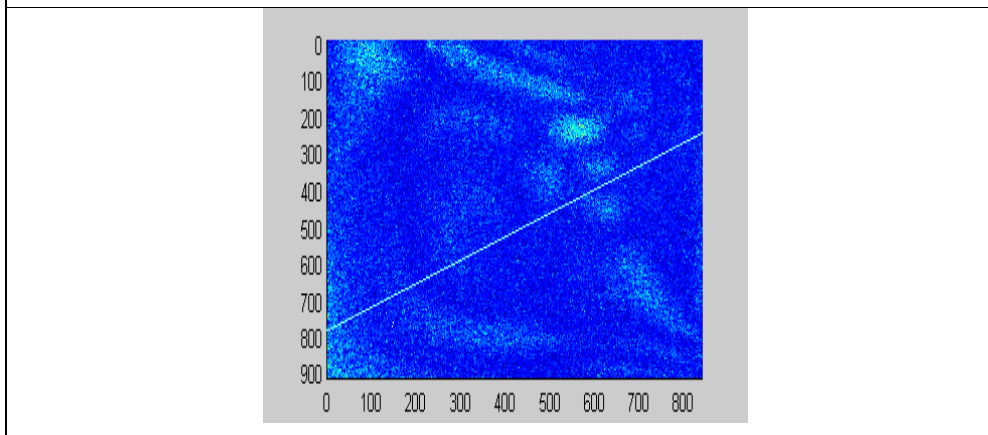
Posición 2 Lado 5 frecuencia 700Hz.



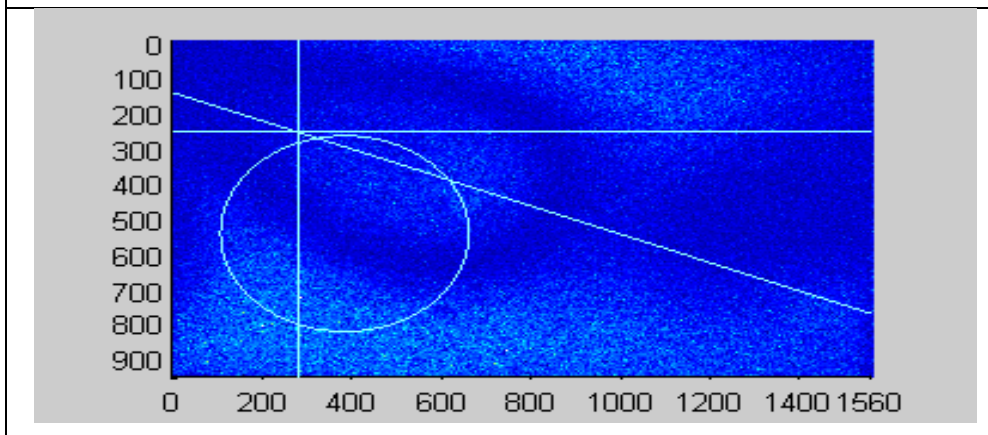
Posición 2 Lado 2 frecuencia 700Hz.



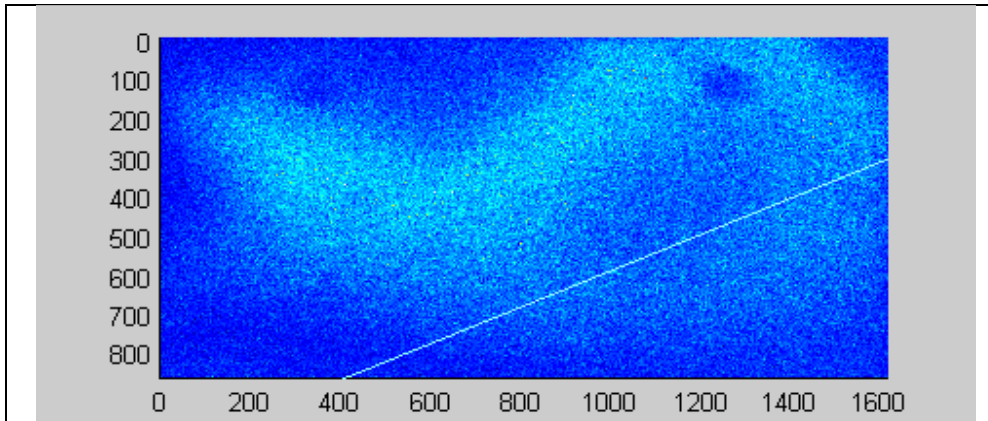
Posición 2 Lado 1 frecuencia 750Hz.



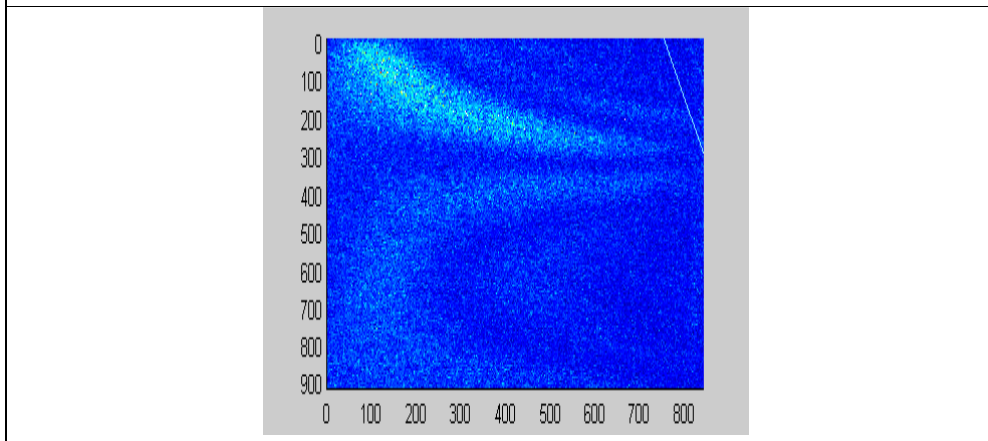
Posición 2 Lado 5 frecuencia 750Hz.



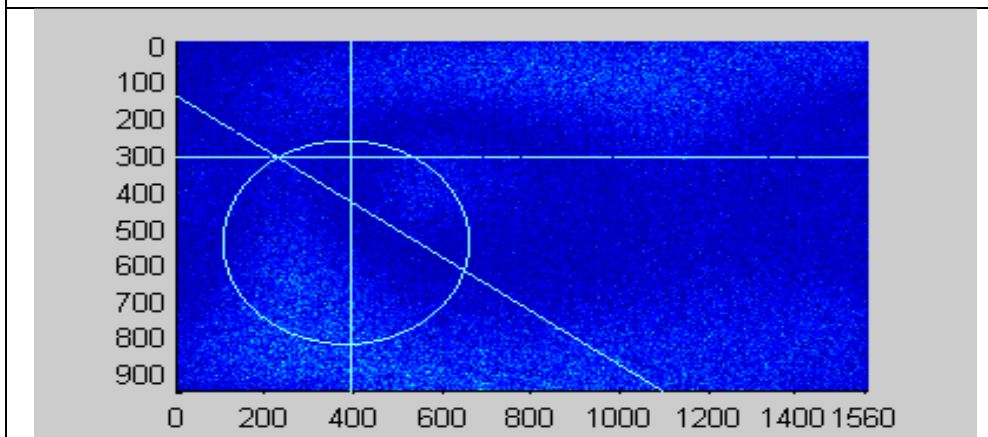
Posición 2 Lado 2 frecuencia 750Hz.



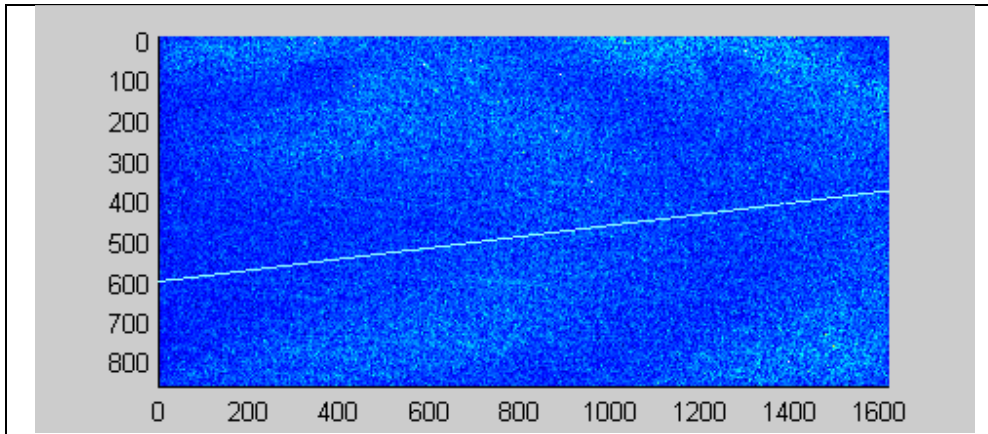
Posición 2 Lado 1 frecuencia 800Hz.



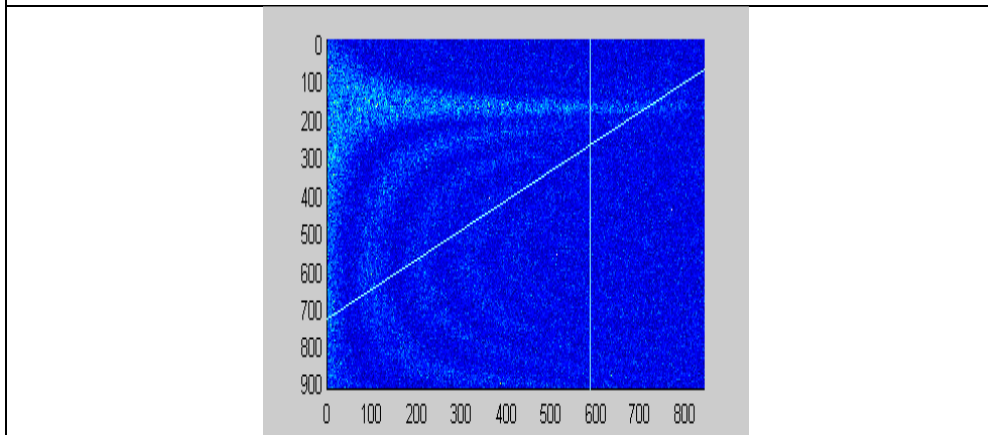
Posición 2 Lado 5 frecuencia 800Hz.



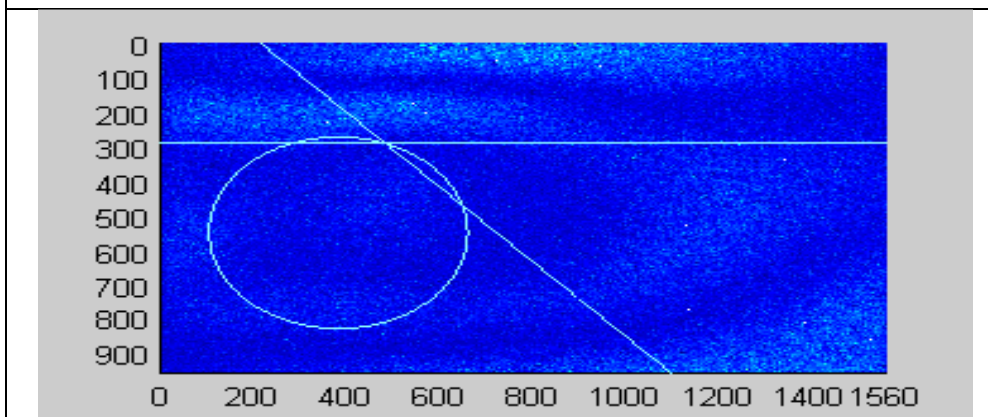
Posición 2 Lado 2 frecuencia 800Hz.



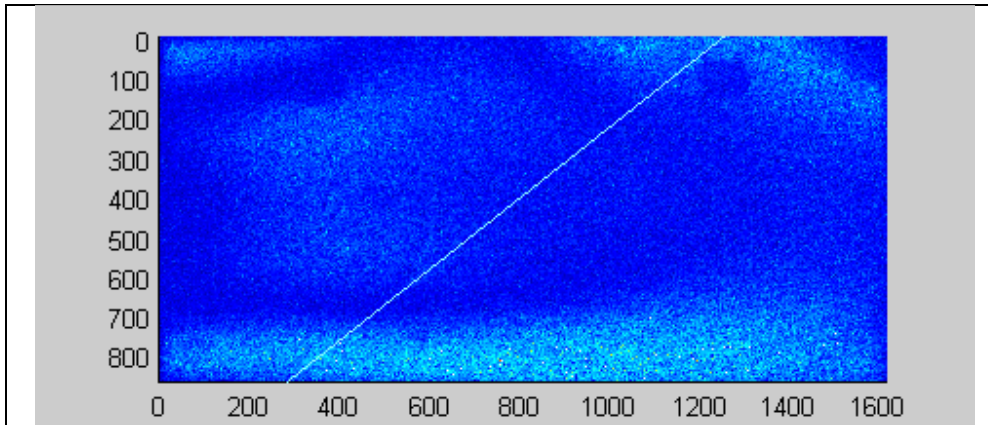
Posición 2 Lado 1 frecuencia 850Hz.



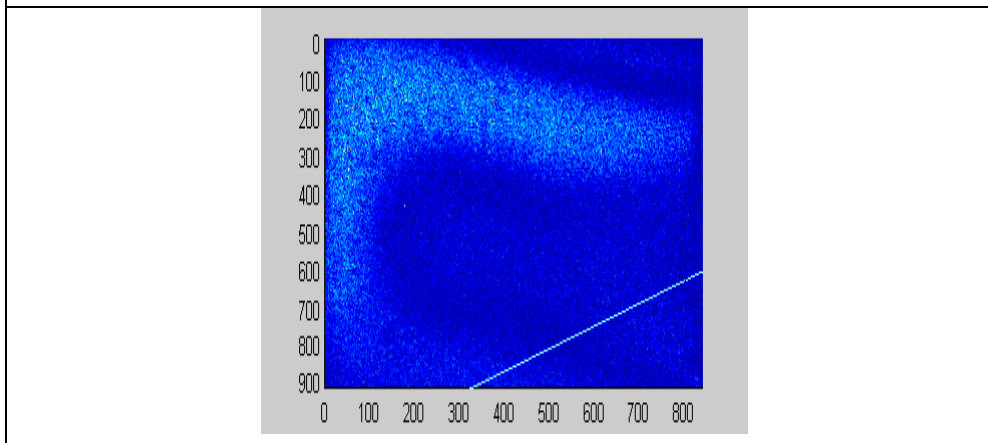
Posición 2 Lado 5 frecuencia 850Hz.



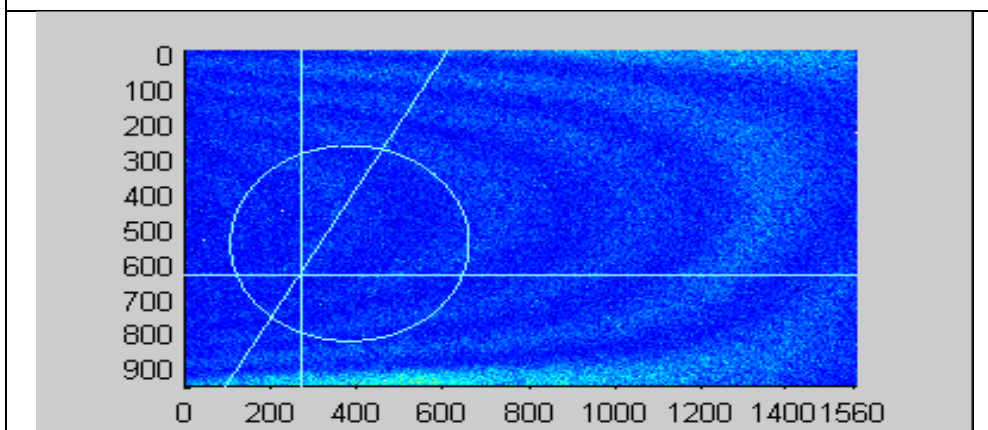
Posición 2 Lado 2 frecuencia 850Hz.



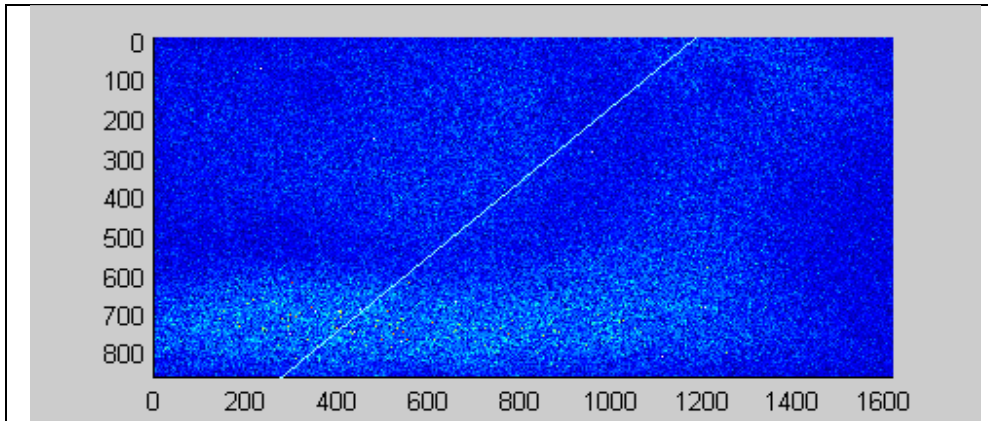
Posición 2 Lado 1 frecuencia 900Hz.



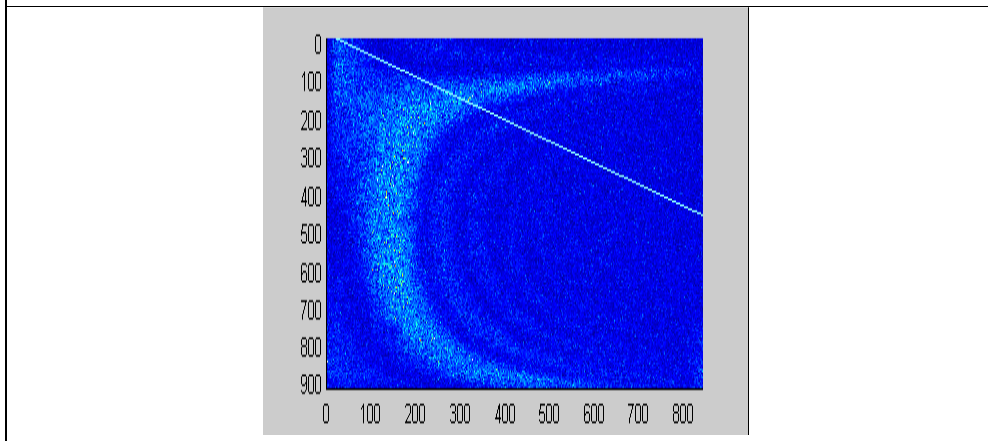
Posición 2 Lado 5 frecuencia 900Hz.



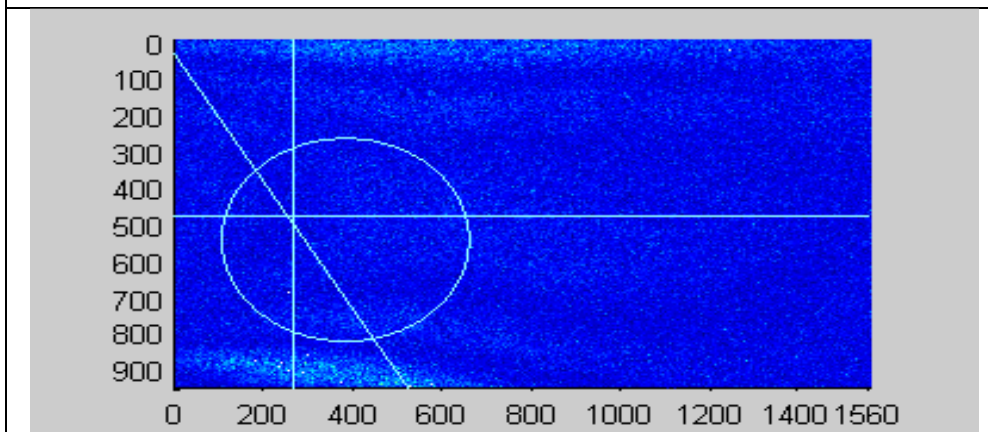
Posición 2 Lado 2 frecuencia 900Hz.



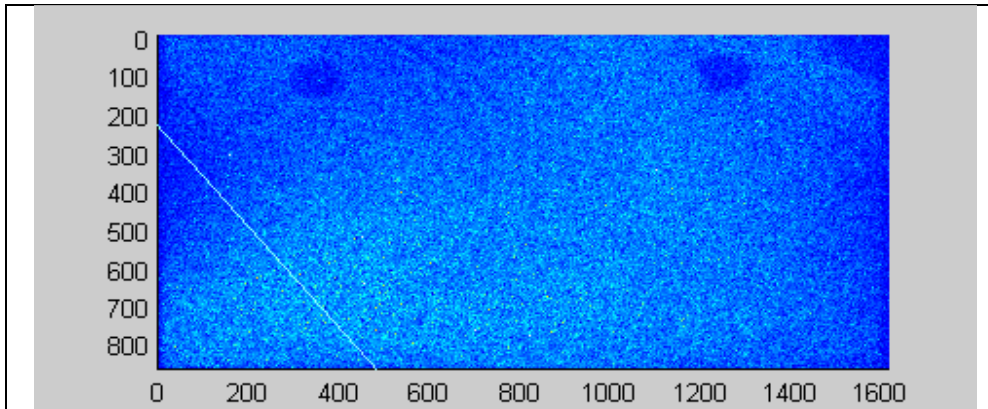
Posición 2 Lado 1 frecuencia 950Hz.



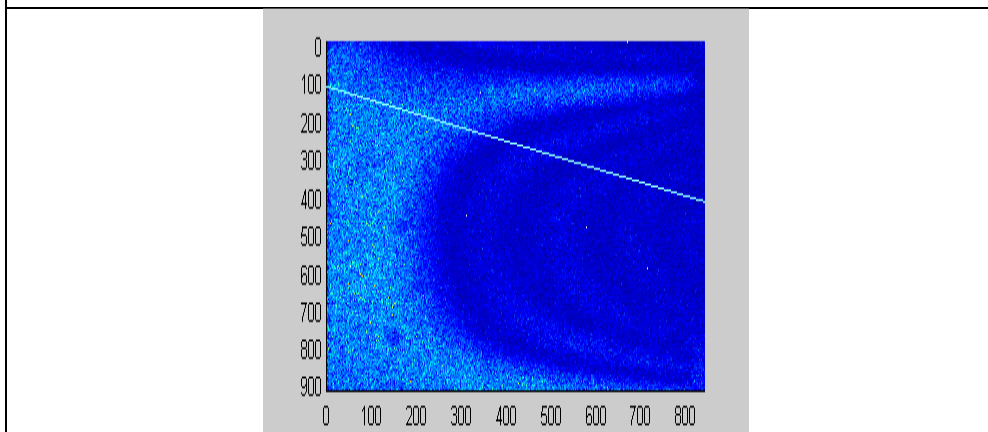
Posición 2 Lado 5 frecuencia 950Hz.



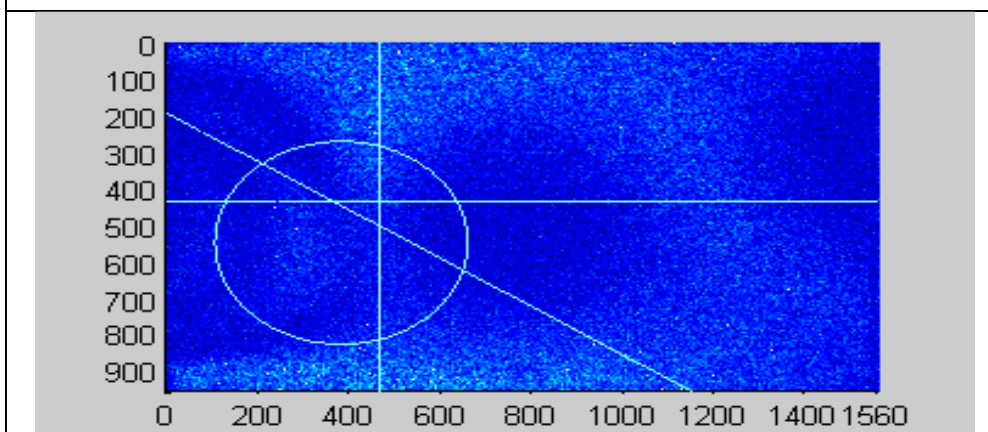
Posición 2 Lado 2 frecuencia 950Hz.



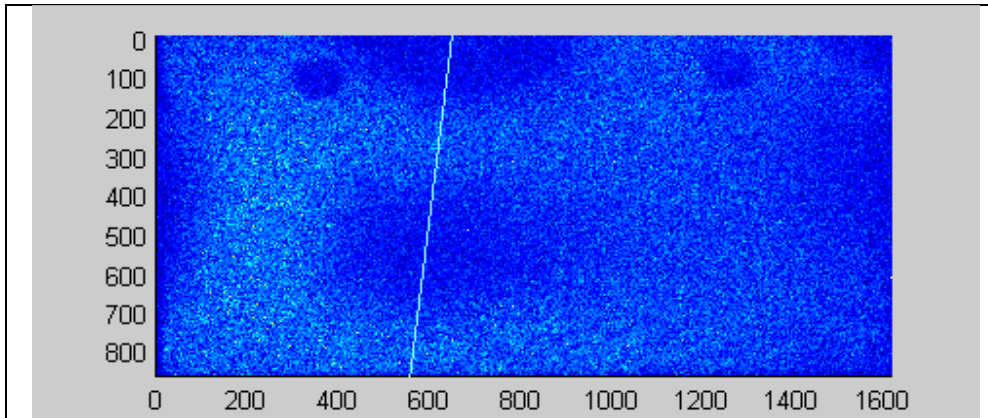
Posición 2 Lado 1 frecuencia 1000Hz.



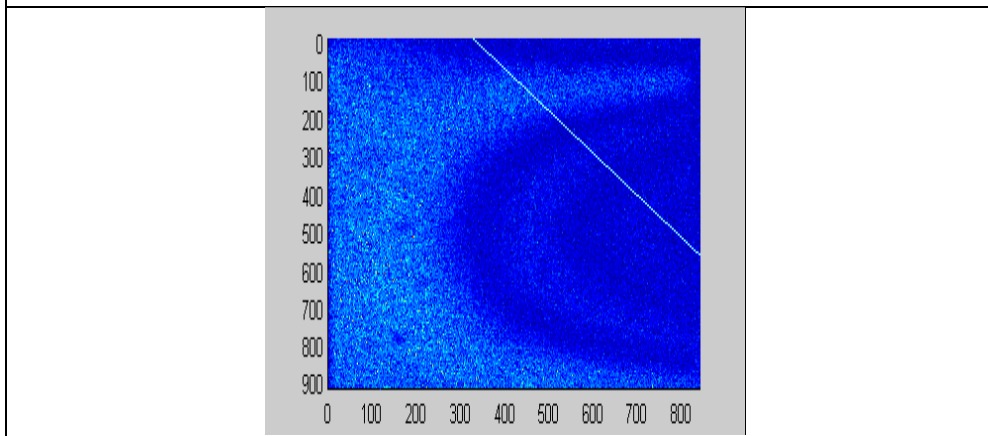
Posición 2 Lado 5 frecuencia 1000Hz.



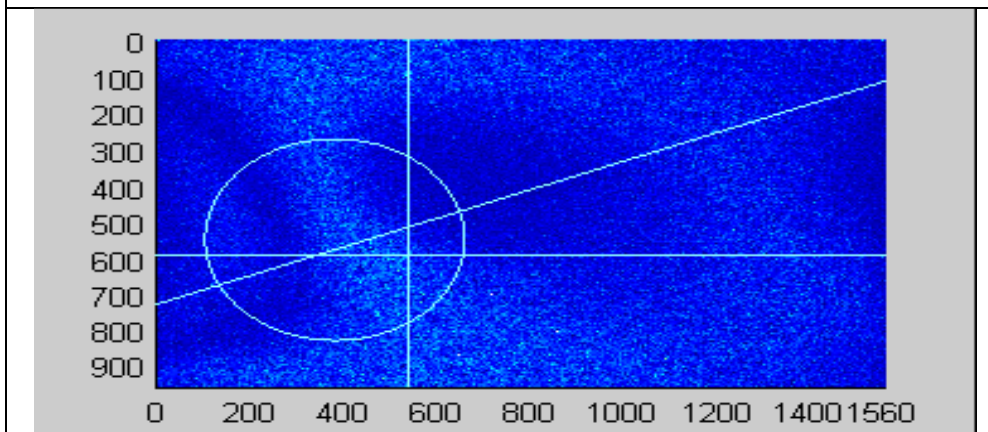
Posición 2 Lado 2 frecuencia 1000Hz.



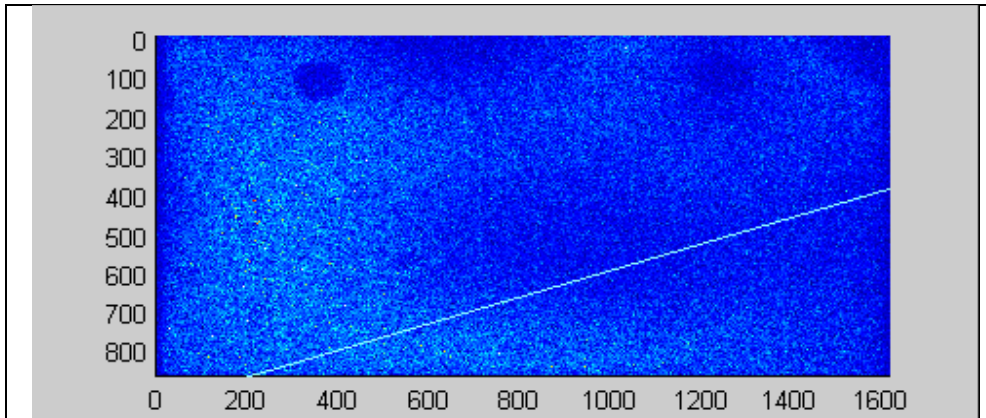
Posición 2 Lado 1 frecuencia 1050Hz.



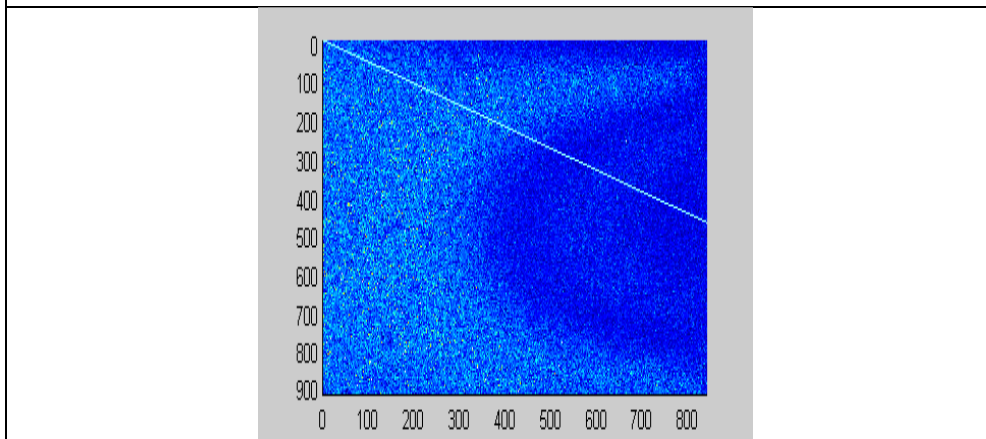
Posición 2 Lado 5 frecuencia 1050Hz.



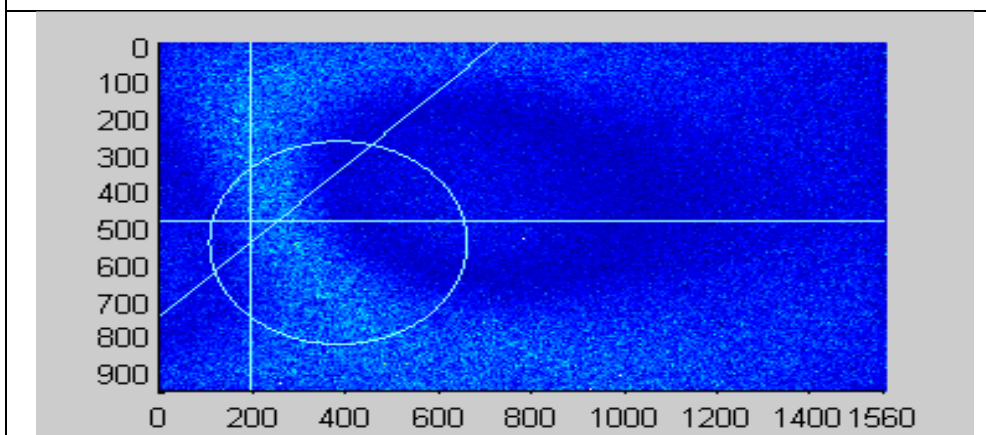
Posición 2 Lado 2 frecuencia 1050Hz.



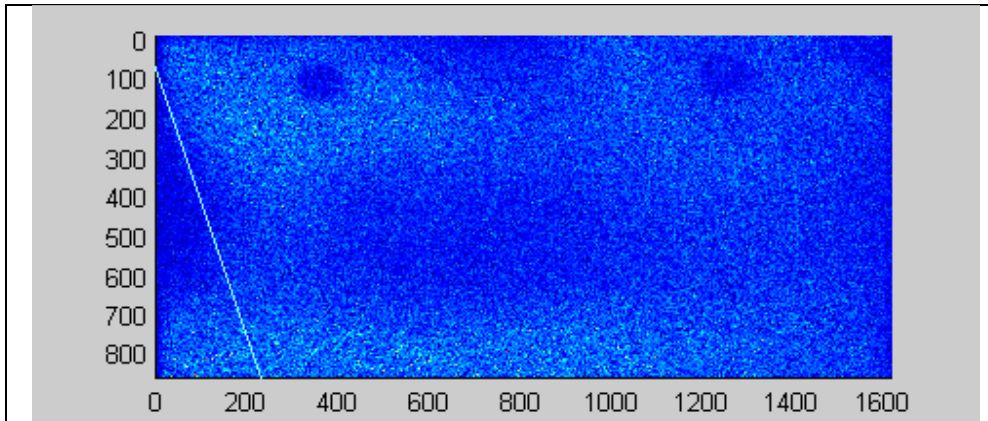
Posición 2 Lado 1 frecuencia 1100Hz.



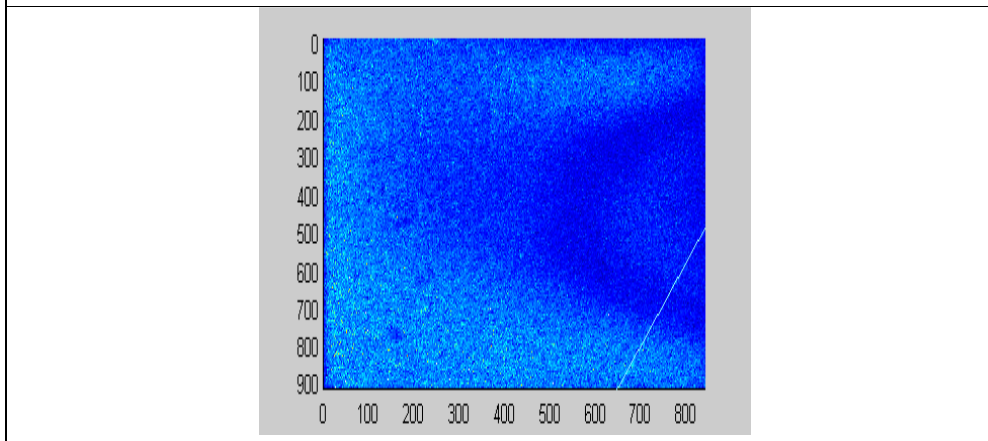
Posición 2 Lado 5 frecuencia 1100Hz.



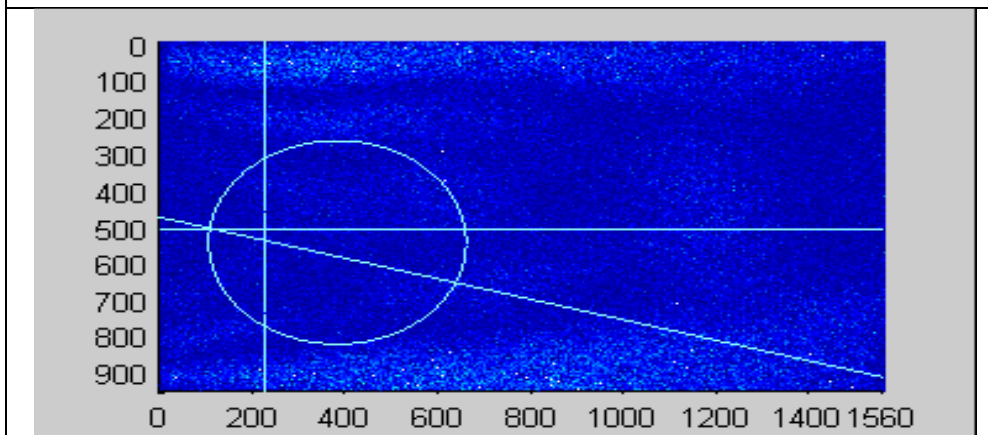
Posición 2 Lado 2 frecuencia 1100Hz.



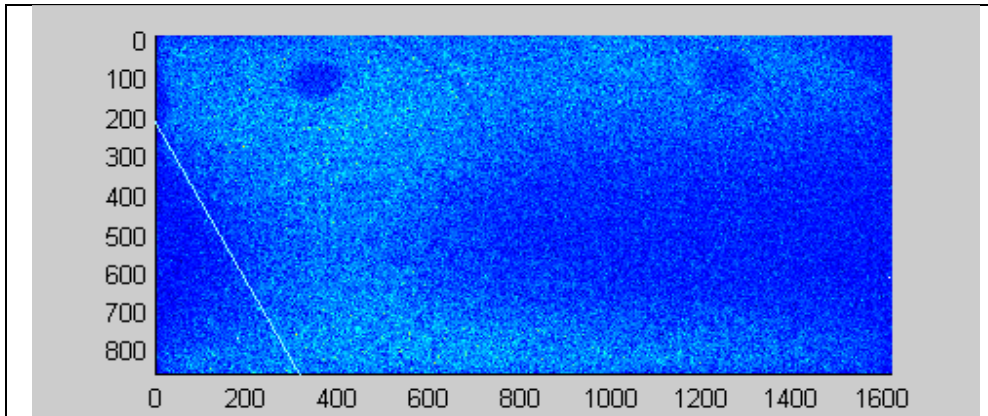
Posición 2 Lado 1 frecuencia 1150Hz.



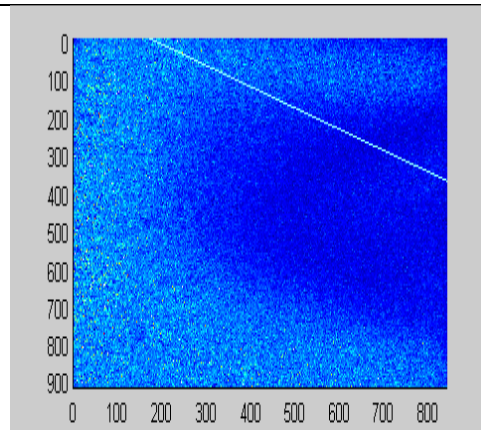
Posición 2 Lado 5 frecuencia 1150Hz.



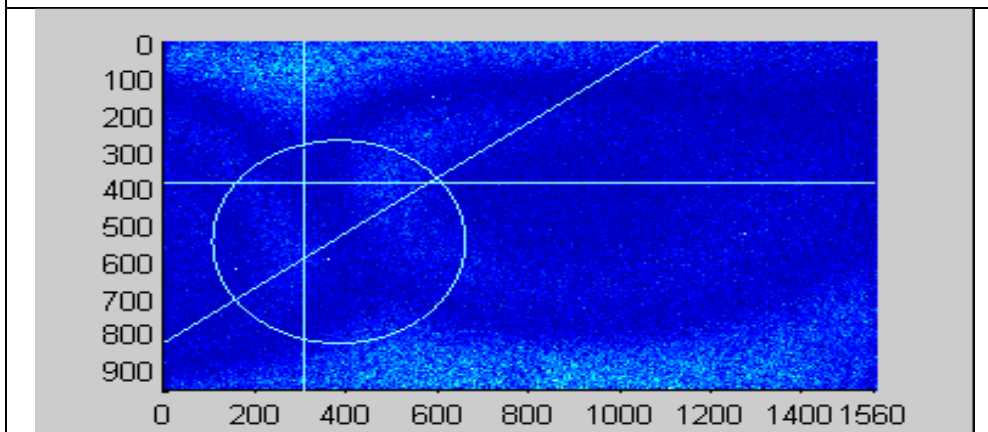
Posición 2 Lado 2 frecuencia 1150Hz.



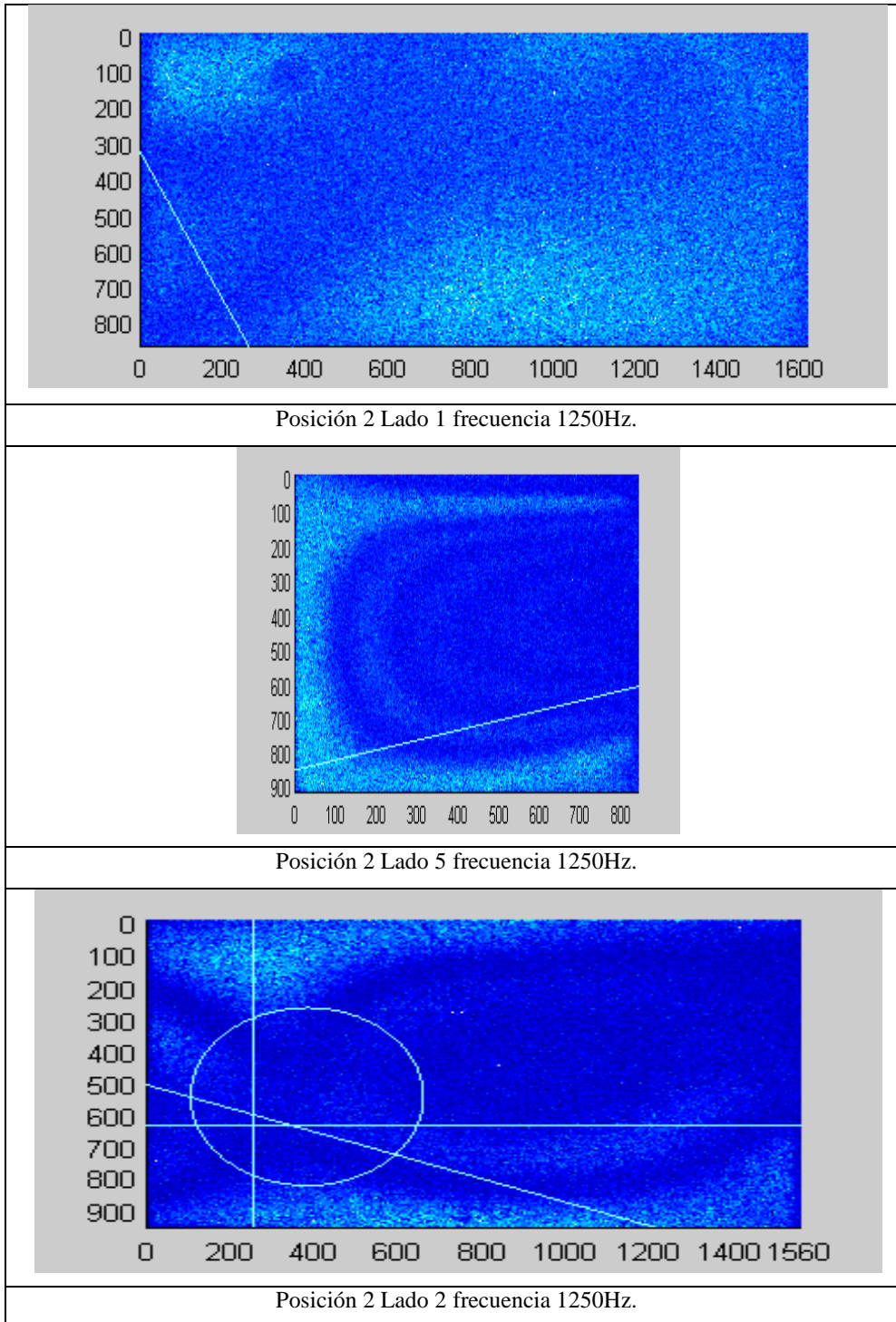
Posición 2 Lado 1 frecuencia 1200Hz.

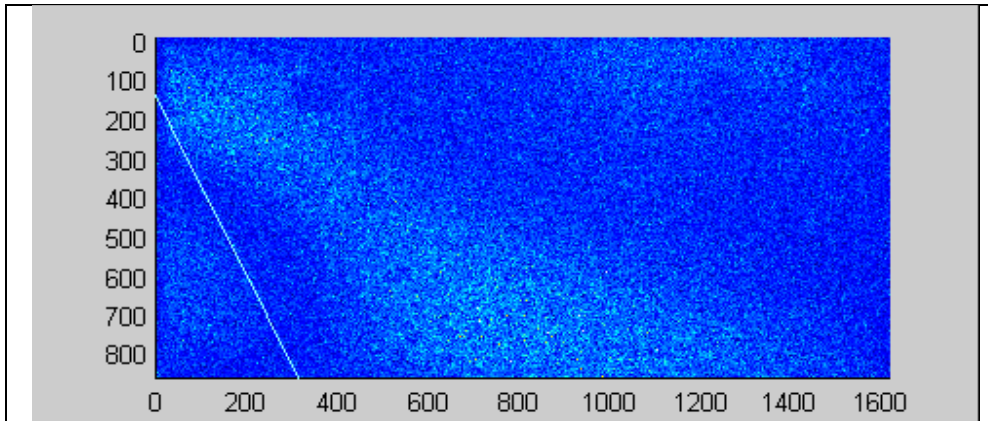


Posición 2 Lado 5 frecuencia 1200Hz.

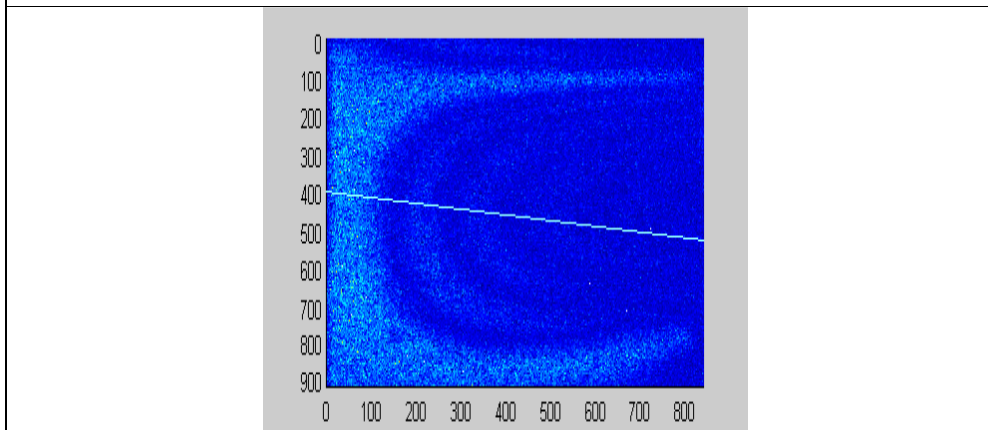


Posición 2 Lado 2 frecuencia 1200Hz.

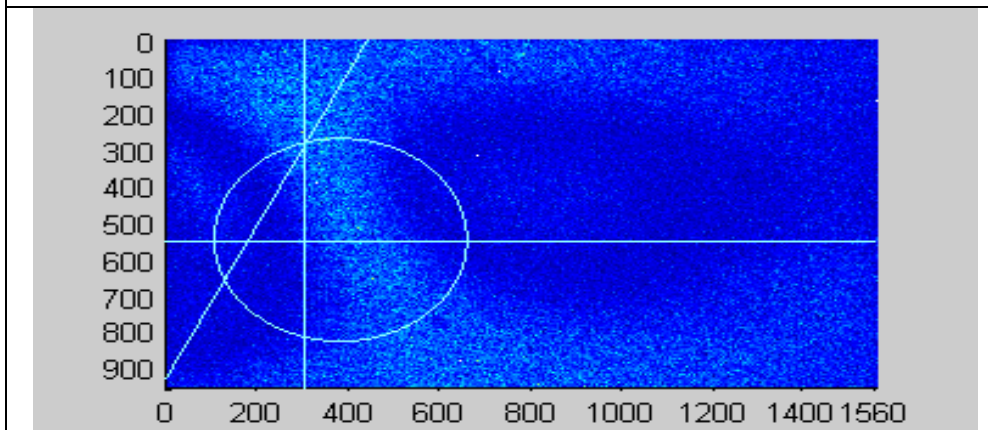




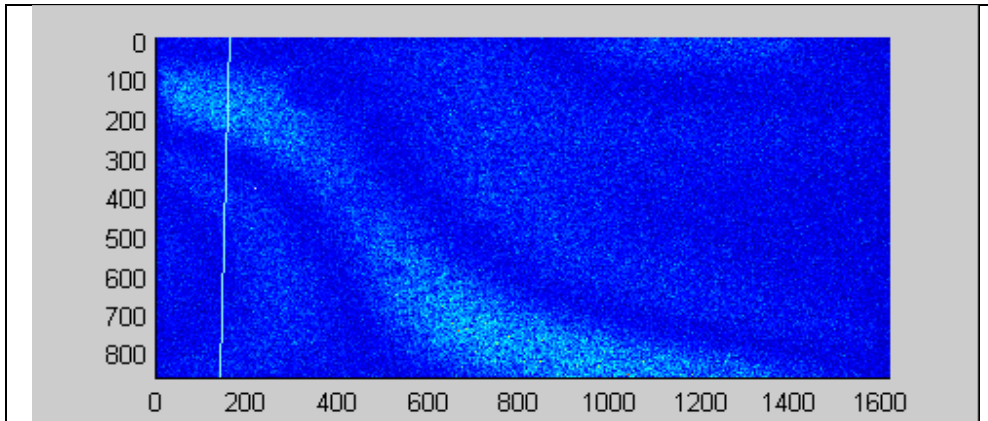
Posición 2 Lado 1 frecuencia 1300Hz.



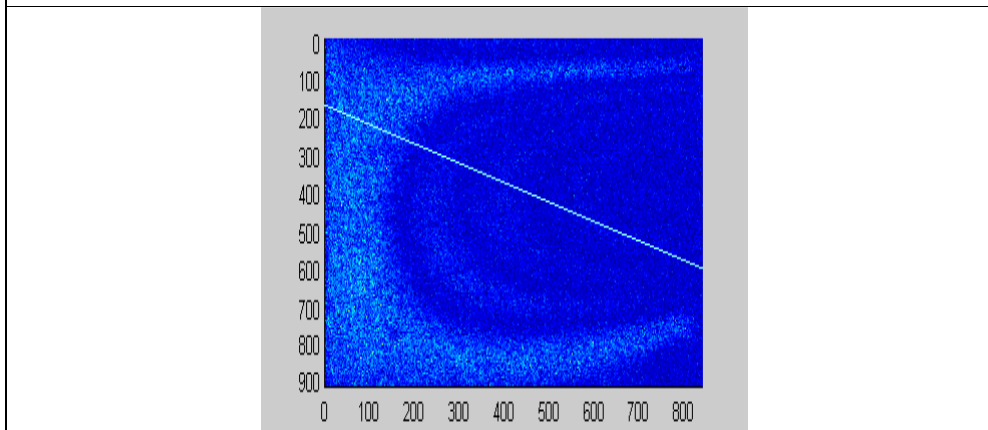
Posición 2 Lado 5 frecuencia 1300Hz.



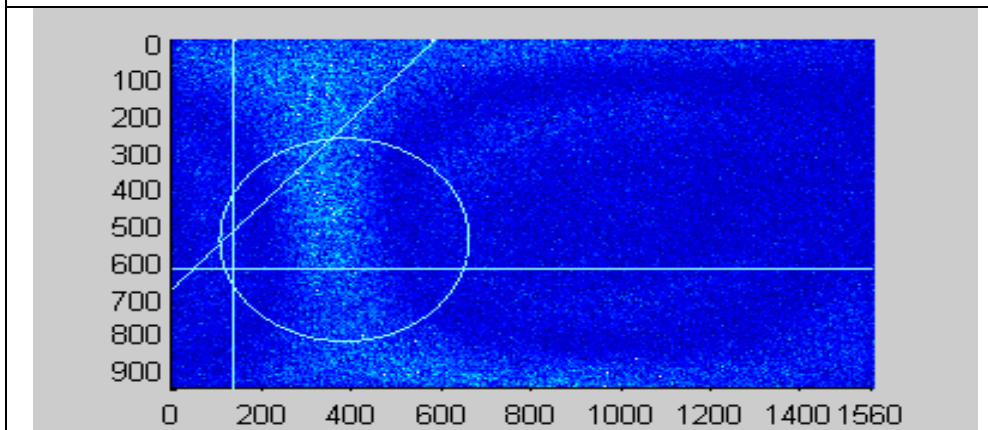
Posición 2 Lado 2 frecuencia 1300Hz.



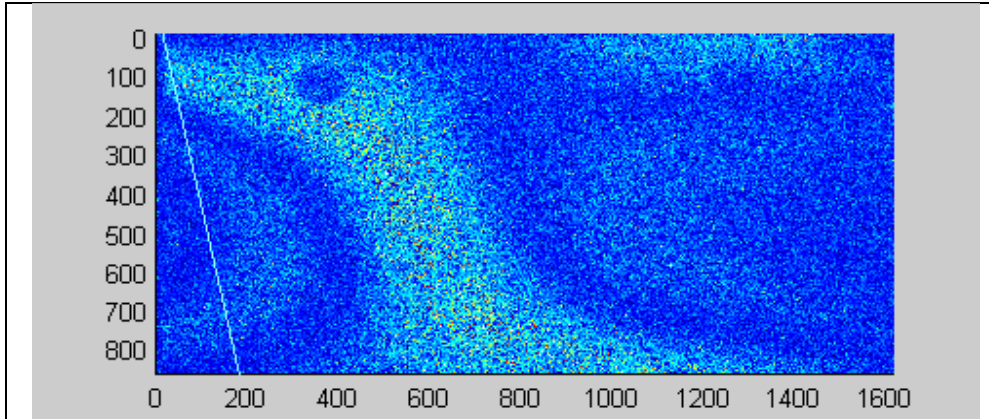
Posición 2 Lado 1 frecuencia 1350Hz.



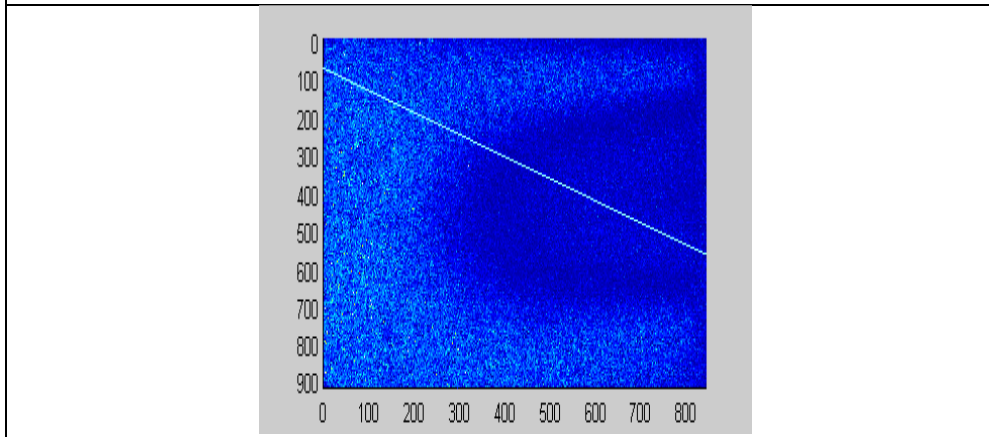
Posición 2 Lado 5 frecuencia 1350Hz.



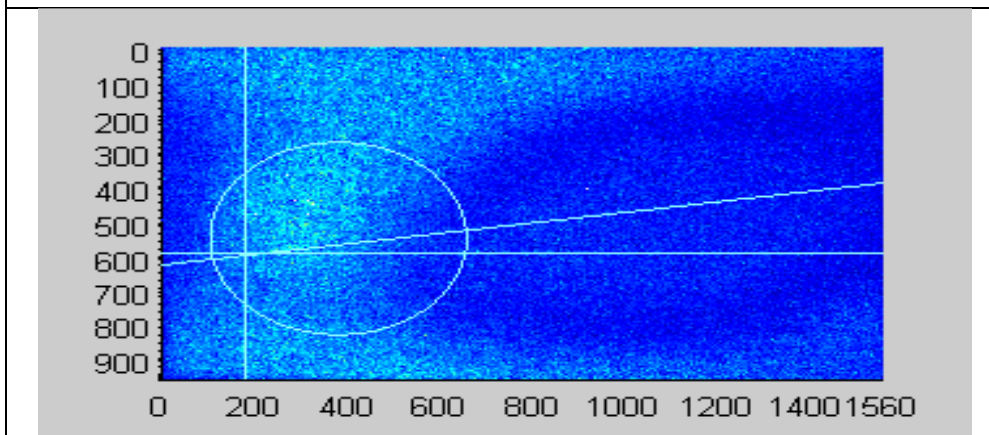
Posición 2 Lado 2 frecuencia 1350Hz.



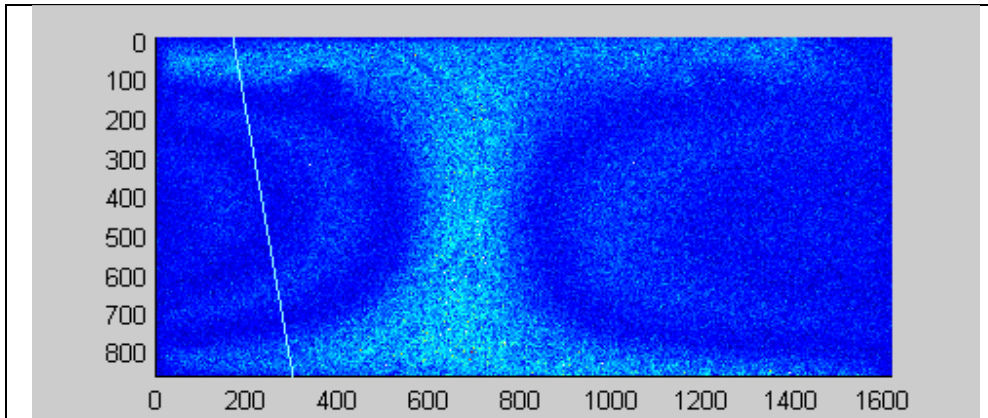
Posición 2 Lado 1 frecuencia 1400Hz.



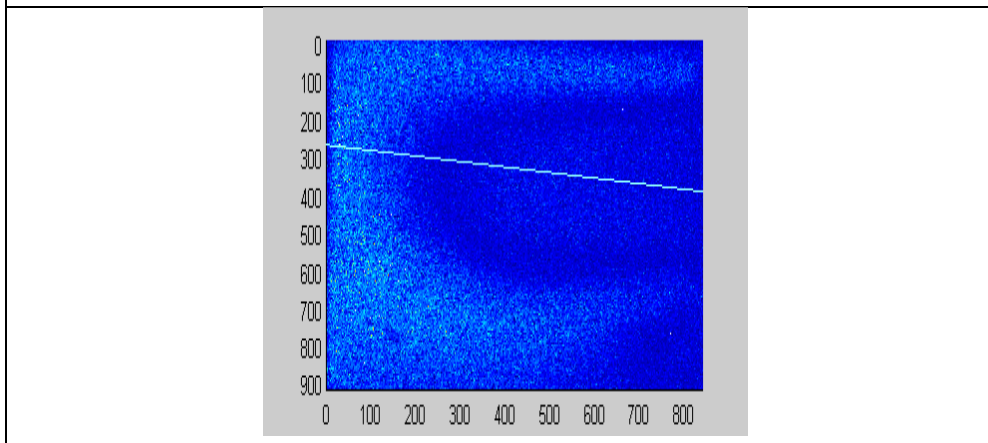
Posición 2 Lado 5 frecuencia 1400Hz.



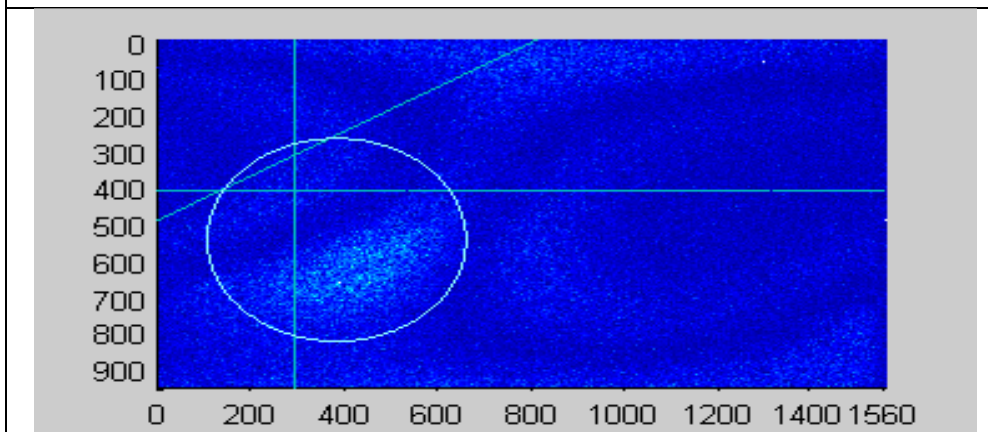
Posición 2 Lado 2 frecuencia 1400Hz.



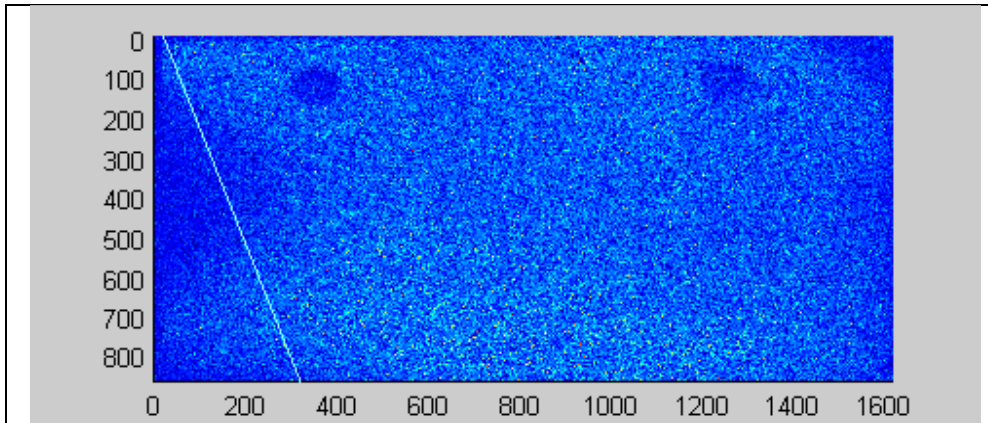
Posición 2 Lado 1 frecuencia 1450Hz.



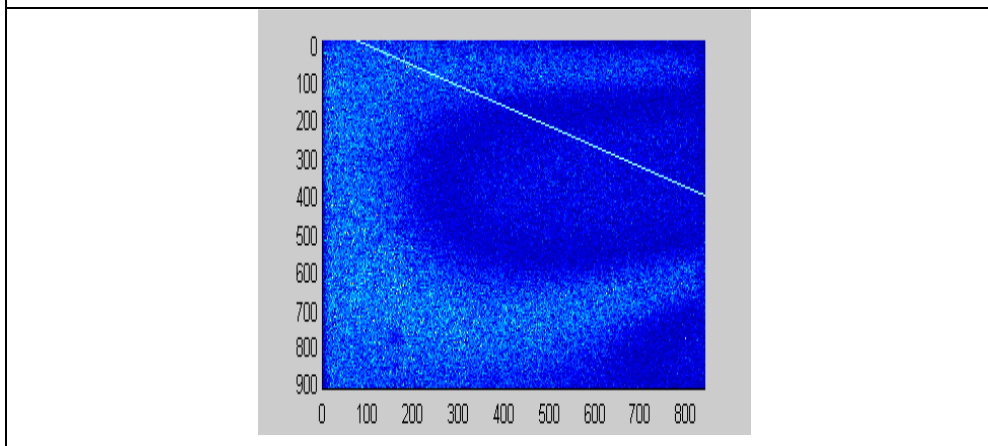
Posición 2 Lado 5 frecuencia 1450Hz.



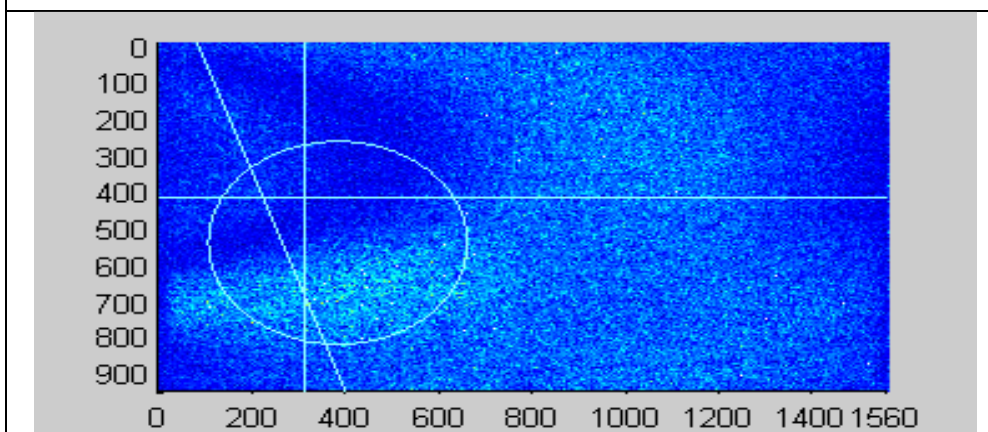
Posición 2 Lado 2 frecuencia 1450Hz.



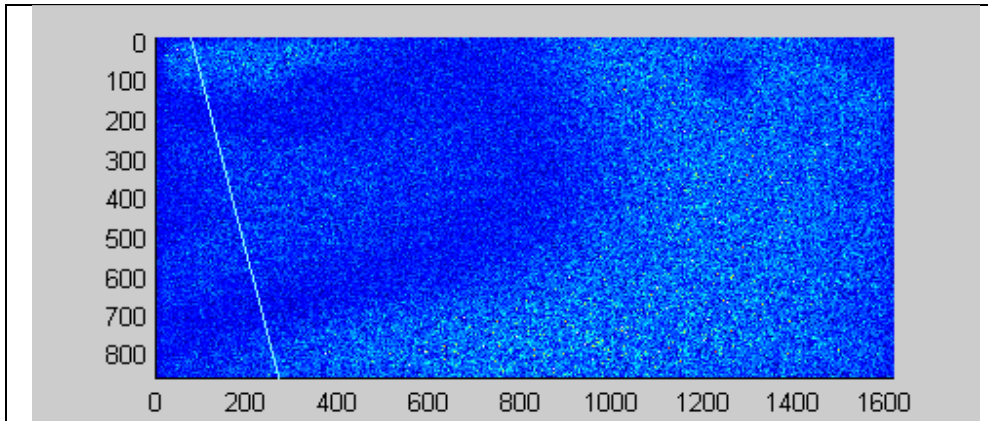
Posición 2 Lado 1 frecuencia 1500Hz.



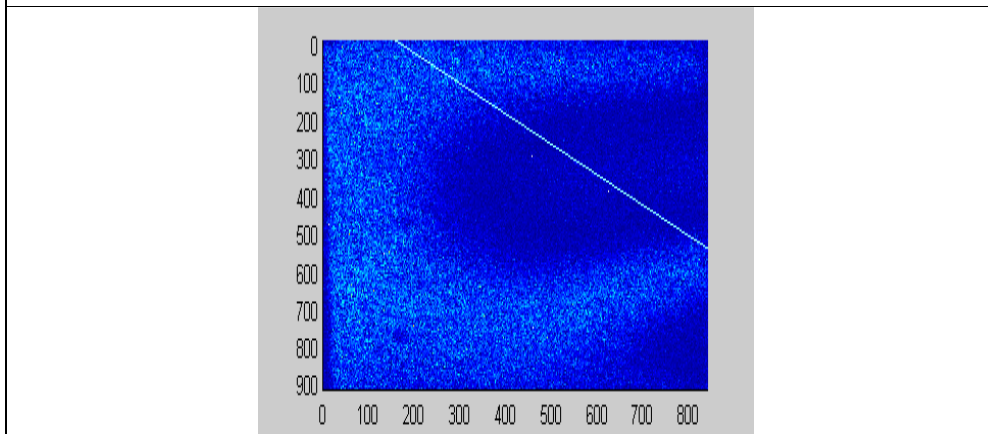
Posición 2 Lado 5 frecuencia 1500Hz.



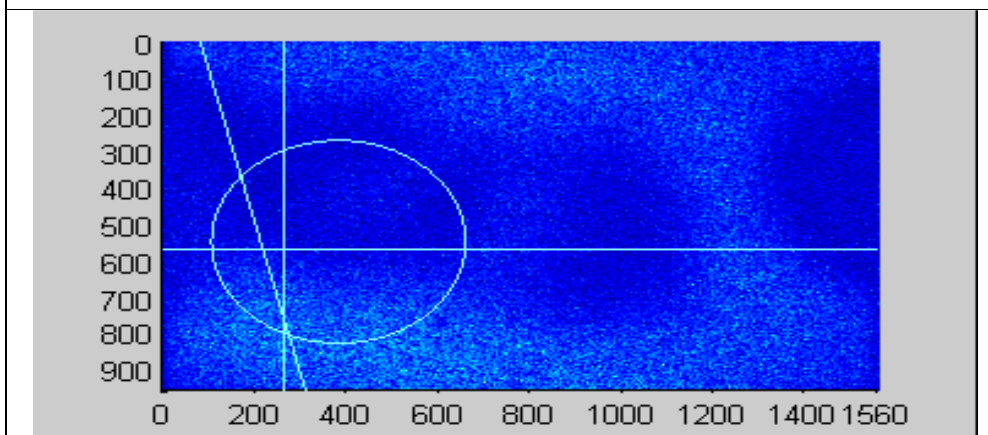
Posición 2 Lado 2 frecuencia 1500Hz.



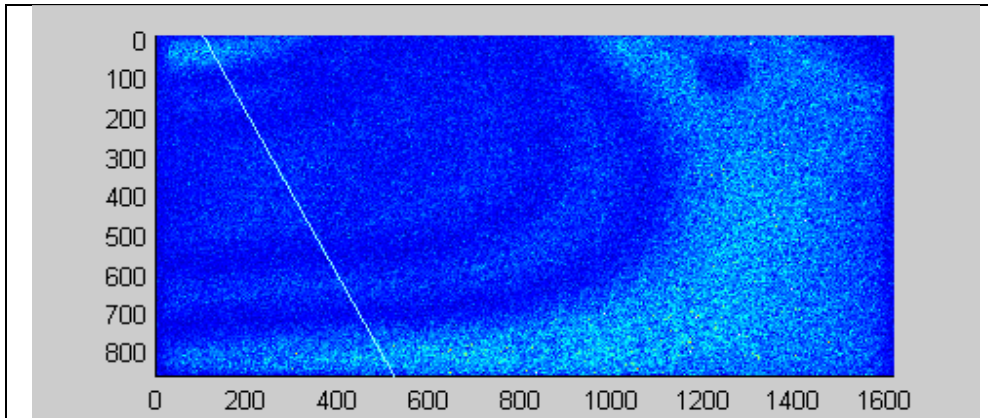
Posición 2 Lado 1 frecuencia 1550Hz.



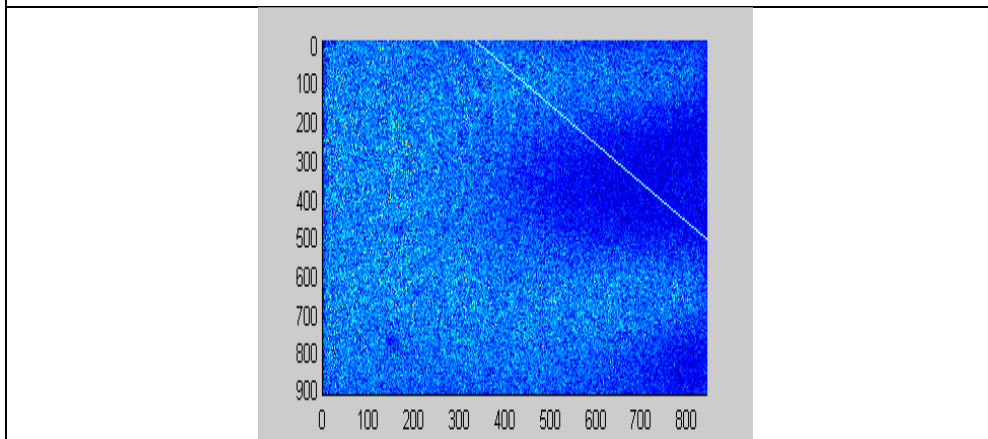
Posición 2 Lado 5 frecuencia 1550Hz.



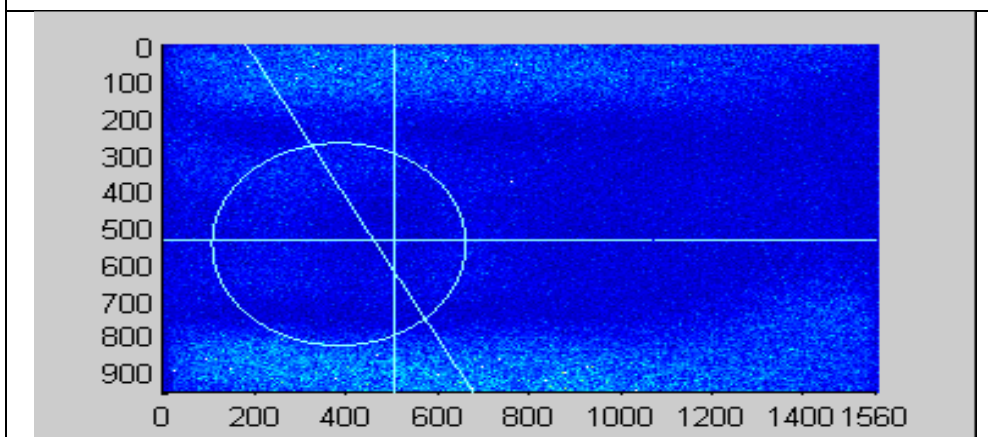
Posición 2 Lado 2 frecuencia 1550Hz.



Posición 2 Lado 1 frecuencia 1600Hz.

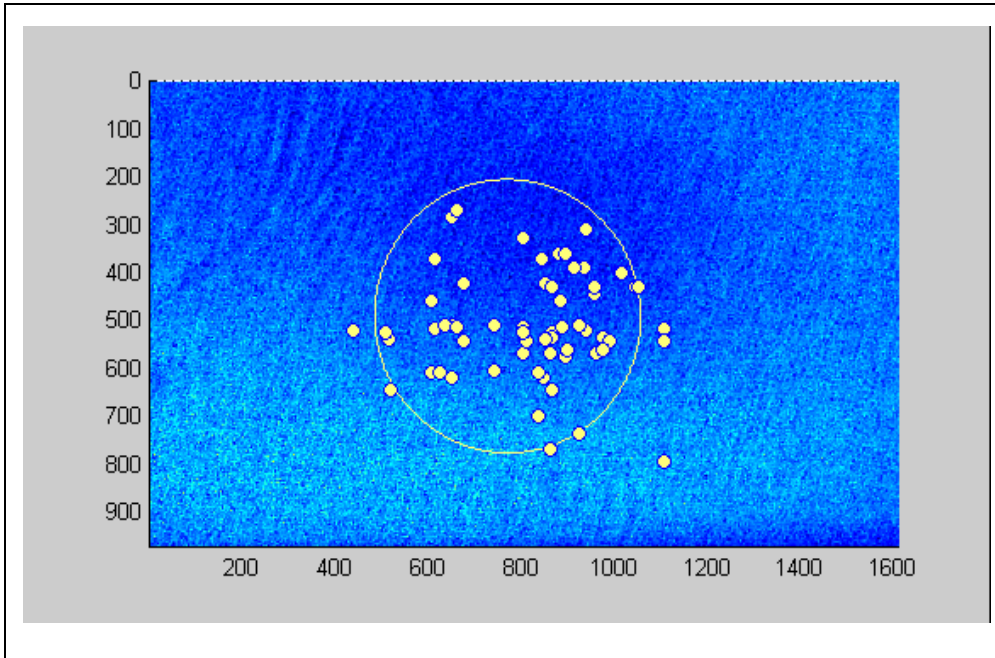


Posición 2 Lado 5 frecuencia 1600Hz.

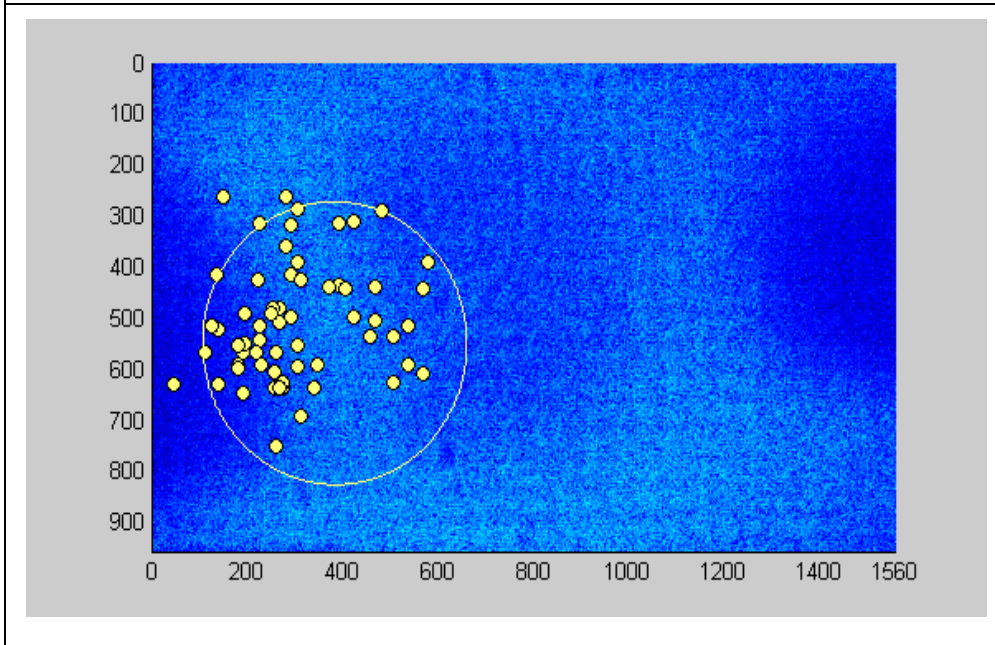


Posición 2 Lado 2 frecuencia 1600Hz.

Tabla # 6 Distribución de puntos de la posición 1 y posición 2

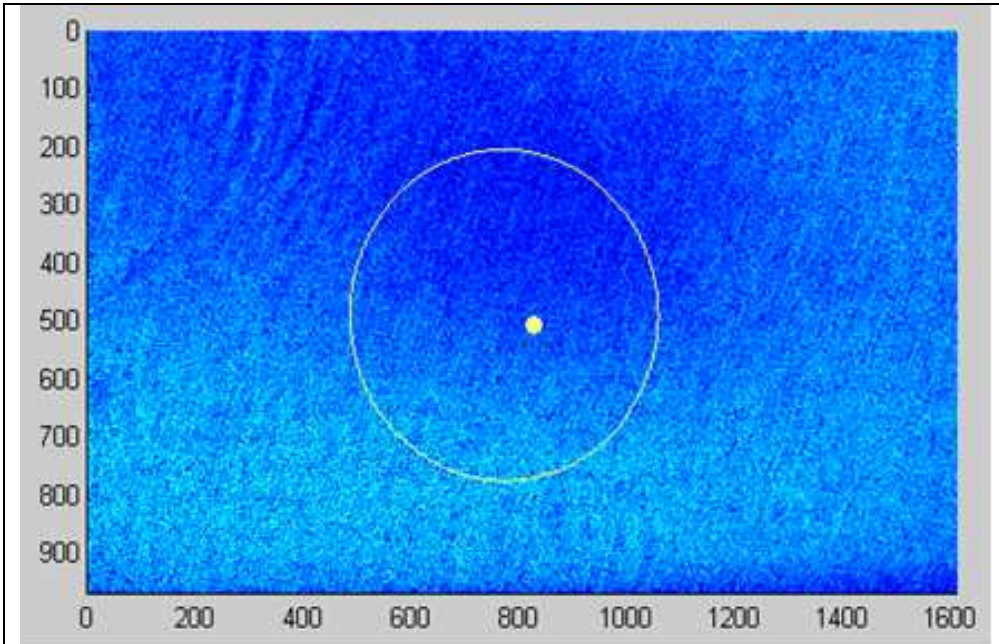


Posición 1 Distribución de Puntos.

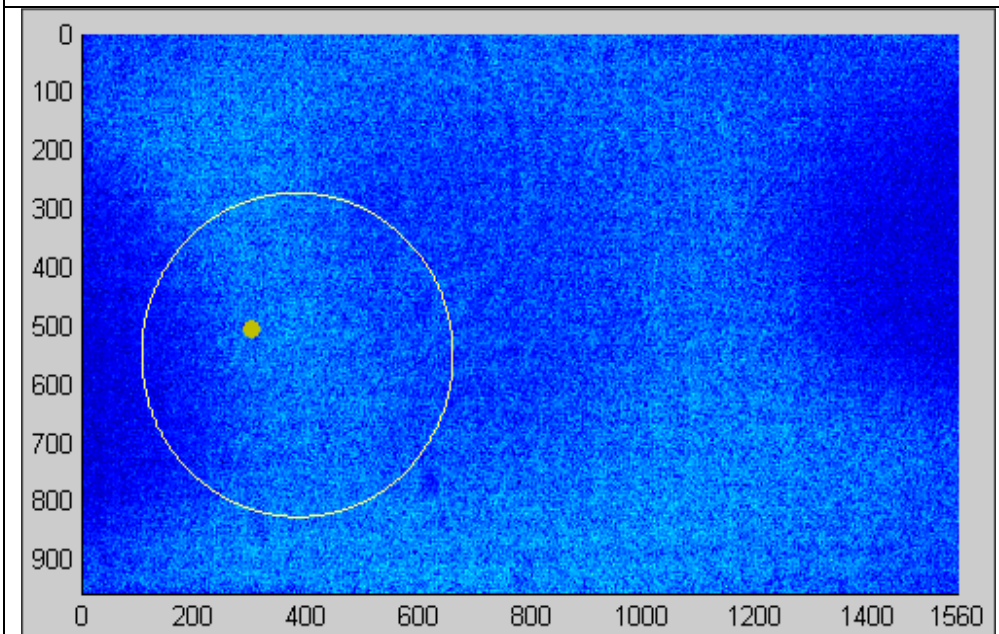


Posición 2 Distribución de Puntos.

Tabla # 7 Coordenadas del epicentro vibratorio en posición 1 y posición 2



Posición del epicentro de la posición 1



Posición del epicentro de la posición 2

Tabla # 8 Ecuación de la Recta Para la Posición # 1

Frecuencia (Hz)	Lado 1 Ecuación de la Recta	Lado 2 Ecuación de la Recta	Lado 5 Ecuación de la Recta
600	$X = 653$	$Y = 1,7164X - 836,08$	$Y = - 2,6587X + 2936,1$
650	$X = 837$	$Y = 0,4444X + 328,11$	$Y = 0,66004X + 30,39$
700	$Y = 5,1667X - 4855$	$Y = 0,85642X - 154,19$	$Y = -1.1955X + 1584,2$
750	$Y = - 3,625X + 3329,5$	$Y = 0,3835X + 162,39$	$Y = - 1,9965X + 2283,$
800	$Y = 1,2923X - 166,04$	$Y = - 0,66302X + 1100,2$	$Y = - 5,2073X + 5052,4$
850	$X = 895$	$Y = 16,202X - 13927$	$Y = - 0,4233X + 729,88$
900	$Y = 1,0606X - 32,51$	$Y = - 0,3515X + 721,43$	$Y = -0,11364X + 638,39$
950	$Y = - 2,2121X + 2650,2$	$Y = - 0,6738X + 869,74$	$Y = - 2,9459X + 3094,3$
1000	$Y = 2,3265X - 856,46$	$Y = 1,0109X - 148,13$	$Y = - 0,2592X + 735,4$
1050	$Y = 1,7651X - 659,98$	$Y = - 0,3508X + 828,27$	$Y = 0,6559X + 73,553$
1100	$Y = - 1,1602X + 2051,8$	$Y = - 0,2892X + 694,09$	$Y = - 1,0172X + 1266,7$
1150	$Y = 2,5447X - 1247,9$	$Y = -0,5813X + 1037,1$	$Y = - 0,3345X + 720,78$
1200	$Y = - 3,1198X + 3558,9$	$Y = - 1,983X + 2476$	$Y = - 0,1302X + 682,74$
1250	$Y = - 2,3617X + 2324,8$	$Y = - 0,6259X + 899,67$	$Y = 0,3375X + 75,554$
1300	$Y = - 1,4964X + 2279,7$	$Y = - 0,424X + 707,31$	$Y = -0,3618X + 836,87$
1350	$Y = - 1,6852X + 2409,8$	$Y = 0,259X + 147,61$	$Y = - 0,7789X + 1069,1$
1400	$Y = 23,658X - 22202$	$Y = - 0,3192X + 846,4$	$Y = 0,1159X + 458,8$
1450	$Y = 916,67X - 606770$	$Y = 0,56019X - 104,09$	$Y = 0,3973X + 169,58$
1500	$Y = 1,1138X - 159,68$	$Y = 0,7903X + 4.0017$	$Y = - 2,6653X + 2831,9$
1550	$Y = - 1,9372X + 10836$	$Y = - 0,1511X + 587,58$	$Y = - 0,4539X + 824,45$
1600	$Y = - 5,4924X + 4216,9$	$Y = - 0,5383X + 935,97$	$Y = 0,2057X - 1358,3$

Tabla # 9 Ecuación de la Recta Para la Posición # 2

Frecuencia (Hz)	Lado 1 Ecuación de la Recta	Lado 2 Ecuación de la Recta	Lado 5 Ecuación de la Recta
600	$Y=5,0074X-123,6279$	$Y = 1,018X + 451,073$	$Y=5,7727X -4306,4076$
650	$Y=1,4054X +250,1351$	$Y = -1,4417X+920,0484$	$Y=-1,0302X+1343,1717$
700	$Y=-0,7337X+1294,7935$	$Y=1,0224X+26,1536$	$Y=-1,6397X+1800,5347$
750	$Y=-0,3370X +961,9114$	$Y=0,7462X+148,3992$	$Y=-0,6357X +784,4070$
800	$Y=-0,4619X+1051,0339$	$Y=0,734X+147,8384$	$Y=3,3929X -2547,9892$
850	$Y=-0,1386X +602,6733$	$Y=1,0833X-234,9842$	$Y=-0,7764X +731,1070$
900	$Y=-0,8913X+1115,5116$	$Y=-1,8444X+1129,7244$	$Y=-0,5935X+1107,6709$
950	$Y=-0,9539X+1128,3604$	$Y=1,7438X+39,2688$	$Y=0,5632X -12,0534$
1000	$Y=1,3043X +231,4348$	$Y=0,6606X+193,0602$	$Y=0,3586X +118,0624$
1050	$Y=-9,3702X+6082,5629$	$Y=-0,395X+727,2737$	$Y=1,1038X -361,3853$
1100	$Y=-0,3382X +932,1164$	$Y=-1,0293X+748,8372$	$Y=0,5603X -1,1815$
1150	$Y=3,3816X +75,7164$	$Y=0,2799X+479,1614$	$Y=-2,1739X+2319,0436$
1200	$Y=2,0357X +218,6071$	$Y=-0,7508X+823,6250$	$Y=0,5570X -95,5235$
1250	$Y=2,0343X +324,8305$	$Y=0,3672X+510,5171$	$Y=-0,2857X +849,0000$
1300	$Y=2,2708X +145,6042$	$Y=-2,0921X+928,6405$	$Y=0,1510X +402,2151$
1350	$Y=-41,750X+6837,2549$	$Y=-1,1624X+683,2875$	$Y=0,5105X +174,2424$
1400	$Y=5,0058X -84,6562$	$Y=-0,1516X+624,9226$	$Y=0,5803X +77,9336$
1450	$Y=6,5519X -1116,5899$	$Y=-0,6074X+495,2397$	$Y=0,1448X +273,3661$
1500	$Y=2,8859X -65,0521$	$Y=3,0000X-246,4000$	$Y=0,5324X -40,1648$
1550	$Y=4,4878X -350,9445$	$Y=4,1472X-339,4656$	$Y=0,7980X -126,3311$
1600	$Y=2,0667X -216,7334$	$Y=1,9167X-344,8550$	$Y=1,0121X -337,1287$

Tabla # 10 Puntos de Intercepción para la Posición # 1

Frecuencia (Hz)	L1 con L2		L1 con L5		L5 con L2	
	X	Y	X	Y	X	Y
600	653,0000	284,7360	653,0000	617,6900	846,9705	617,6900
650	837,0000	700,1106	837,0000	605,9400	625,1164	605,9400
700	1108,5000	795,1724	1108,5000	541,7100	812,5520	541,7100
750	677,9300	422,3812	677,9300	542,7000	991,6626	542,7000
800	803,2500	567,5990	803,2500	511,6000	887,7106	511,6000
850	895,0000	573,0731	895,0000	360,7700	881,8967	360,7700
900	852,8600	421,6296	852,8600	539,3000	518,1159	539,3000
950	803,8600	328,0998	803,8600	525,5100	510,8792	525,5100
1000	742,9500	602,9182	742,9500	509,3600	650,4044	509,3600
1050	867,9100	523,2640	867,9100	756,0000	203,4695	756,0000
1100	1016,9000	399,9732	1016,9000	401,5300	1011,5173	401,5300
1150	1122,9000	384,2765	1122,9000	429,0600	1045,8674	429,0600
1200	861,2500	768,1341	861,2500	569,1700	961,5824	569,1700
1250	1026,2000	257,3258	1026,2000	528,9700	592,2250	528,9700
1300	940,7300	308,3849	940,7300	521,3400	438,5474	521,3400
1350	383,3800	246,9192	383,3800	389,9400	935,5068	389,9400
1400	1132,3000	484,8949	1132,3000	683,1200	511,4228	683,1200
1450	662,8800	309,4900	662,8800	516,1000	1148,0019	516,1000
1500	926,2400	736,0593	926,2400	507,7800	637,4083	507,7800
1550	956,8000	443,0128	956,8000	540,9100	308,8795	540,9100
1600	609,0100	608,1253	609,0100	458,8200	886,3621	458,8200

Tabla # 11 Puntos de Intercepción para la Posición # 2

Frecuencia (Hz)	L1 con L2		L1 con L5		L5 con L2	
	X	Y	X	Y	X	Y
600	191,1096	645,6226	191,1096	566,3797	113,2679	566,3797
650	423,2236	309,8869	423,2236	498,6901	292,2649	498,6901
700	568,9210	607,8184	568,9210	441,6622	406,4051	441,6622
750	281,4768	358,4428	281,4768	261,3982	151,4286	261,3982
800	392,3779	435,8477	392,3779	315,2002	228,0103	315,2002
850					483,0128	288,2636
900	273,4313	625,4077	273,4313	635,7356	267,8317	635,7356
950	268,5315	507,5340	268,5315	481,1617	253,4080	481,1617
1000	469,9056	503,4892	469,9056	437,5735	370,1270	437,5735
1050	539,6364	514,1443	539,6364	590,4738	346,3726	590,4738
1100	195,1641	547,9548	195,1641	489,9903	251,4786	489,9903
1150	225,8703	542,3915	225,8703	514,4830	126,1756	514,4830
1200	307,1893	592,9965	307,1893	388,6578	579,3615	388,6578
1250	256,8101	604,8100	256,8101	635,5939	340,6510	635,5939
1300	306,5330	287,3428	306,5330	552,1991	179,9347	552,1991
1350	138,6287	522,1455	138,6287	629,3970	46,3614	629,3970
1400	183,6278	597,0773	183,6278	590,1093	229,5786	590,1093
1450	292,9033	317,3302	292,9033	412,2536	136,6251	412,2536
1500	311,9267	689,3801	311,9267	424,8552	223,7517	424,8552
1550	262,3135	748,4009	262,3135	567,7281	218,7485	567,7281
1600	506,6953	626,3279	506,6953	535,4573	459,2854	535,4573

Tabla # 12 Distribución de los Puntos de Intercepción de la Posición # 1

Total de Puntos de las Intercepciones	Total de Puntos Dentro del Área del Piezoeléctrico	Total de Puntos Fuera del Área del Piezoeléctrico	Porcentaje de Puntos Pertenecientes al Área del Piezoeléctrico
63	55	8	87,30 %

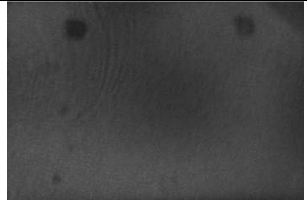

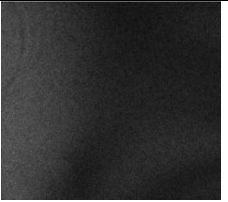
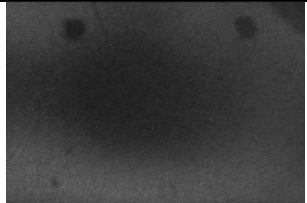
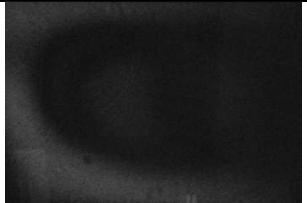

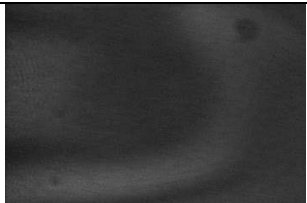


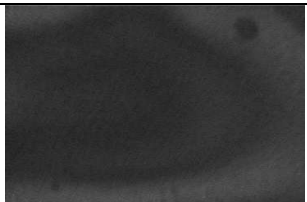
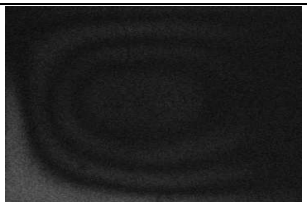



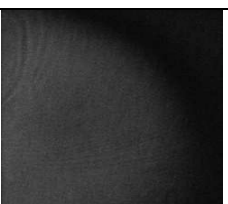

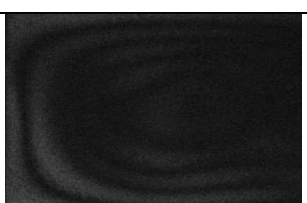
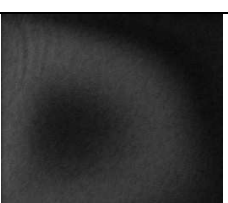
Tabla # 13 Distribución de los Puntos de Intersección de la Posición # 2


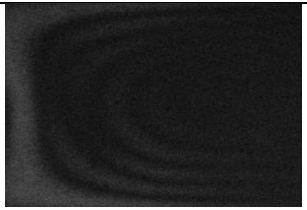
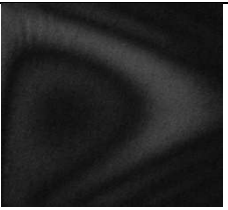






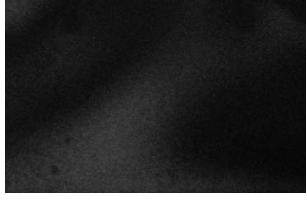
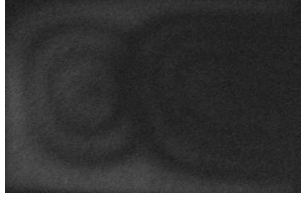

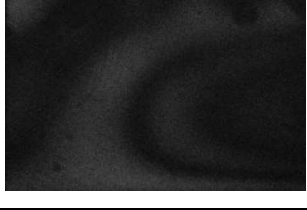
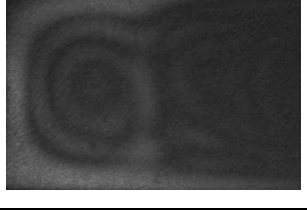


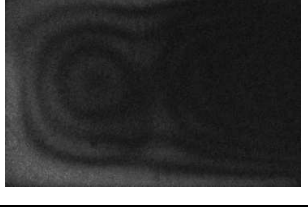

Total de Puntos de las Intercepciones	Total de Puntos Dentro del Área del Piezoeléctrico	Total de Puntos Fuera del Área del Piezoeléctrico	Porcentaje de Puntos Pertenecientes al Área del Piezoeléctrico
60	54	6	90,00%


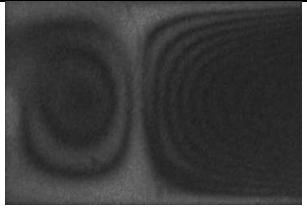

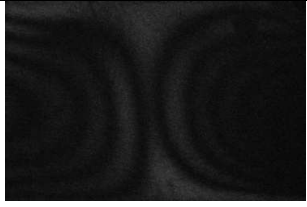
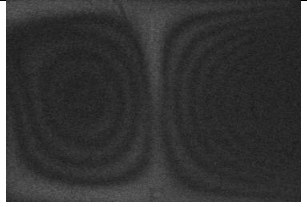
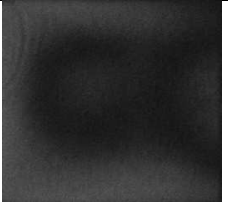
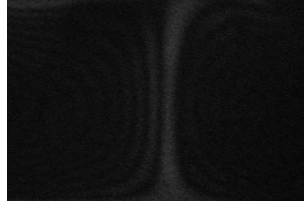
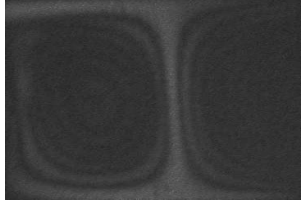


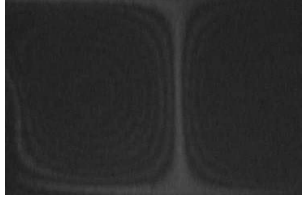


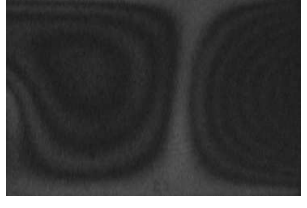



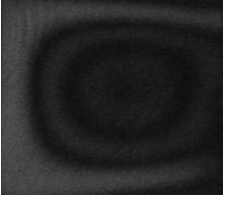
Tabla # 14 Coordenadas Únicas Del Epicentro de la Vibración

Posición # 1		Posición # 2	
X	Y	X	Y
825,1254	507,6526	303,1753	505,0957

Tabla # 15 Secuencia de los Patrones de Vibración Para la Posición 1

	LADO 1	LADO 2	LADO 5
600			
650			
700			
750			
800			
850			

900			
950			
1000			
1050			
1100			
1150			

1200			
1250			
1300			
1350			
1400			
1450			


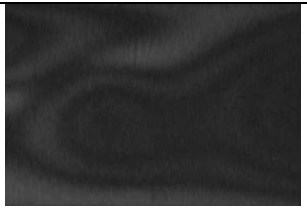
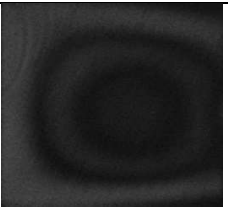

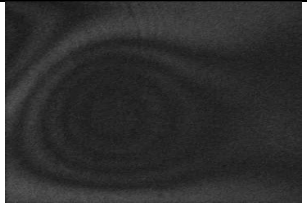
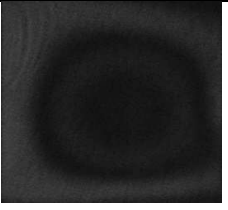

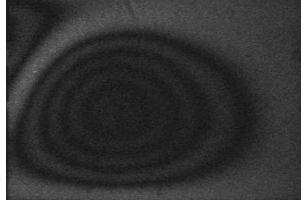
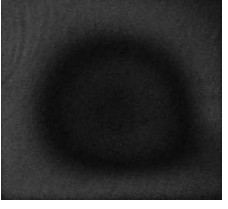

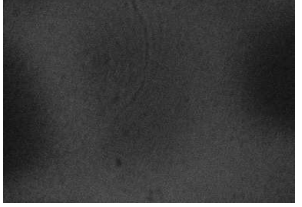

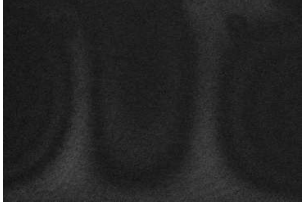






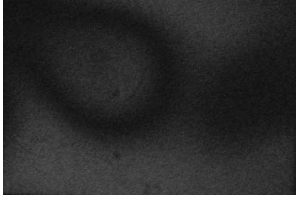


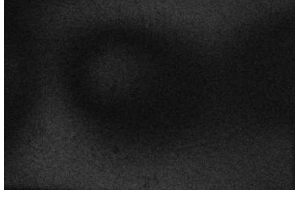



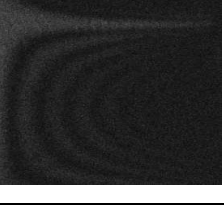





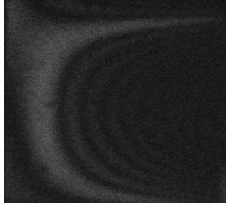
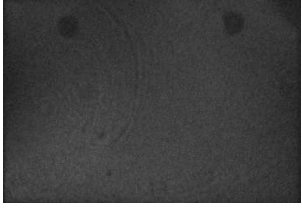


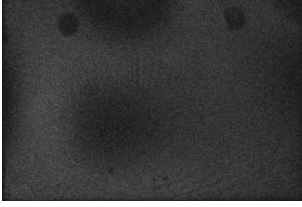
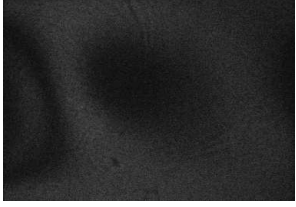
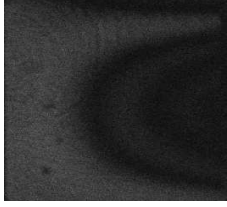
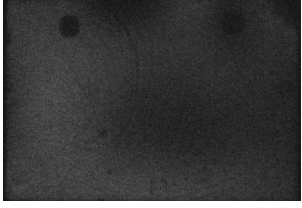
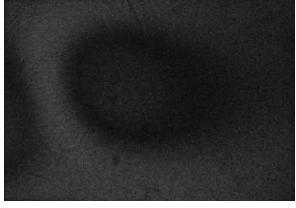

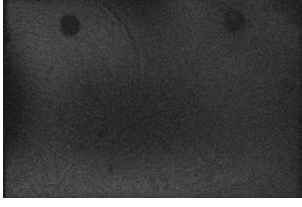


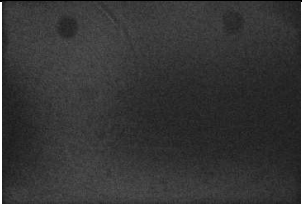




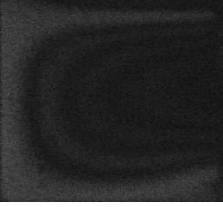

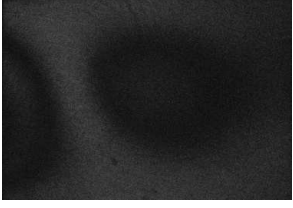
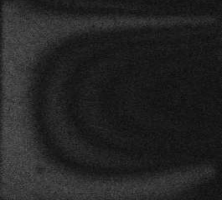



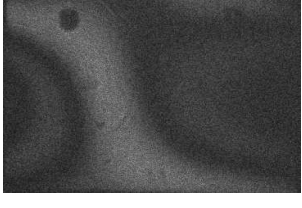

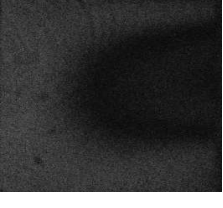
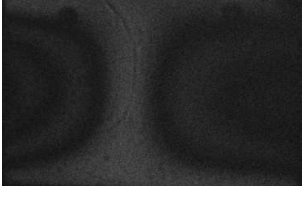

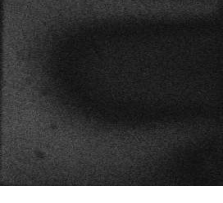
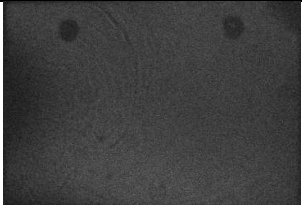
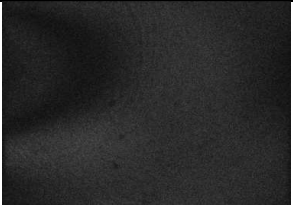
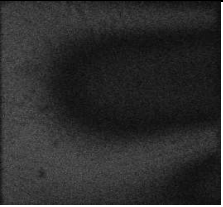
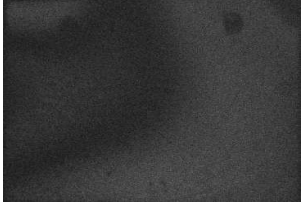
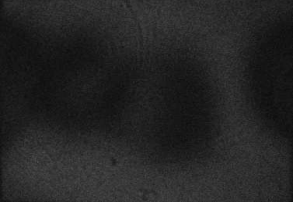
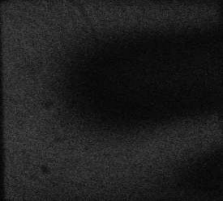


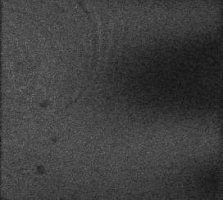
1500			
1550			
1600			

Tabla # 16 Secuencia de los Patrones de Vibración Para la Posición 2

	LADO 1	LADO 2	LADO 5
600			
650			
700			
750			
800			
850			

900			
950			
1000			
1050			
1100			
1150			

1200			
1250			
1300			
1350			
1400			
1450			

1500			
1550			
1600			

Análisis de Resultados

Inspección visual

La inspección visual se refiere a la apreciación de los resultados obtenidos a simple vista. Para la primera posición del piezoeléctrico se observó que la intersección de las rectas de máxima pendiente de L5 y L1 con L2, forman una región triangular la cual no es fija sino que varía de tamaño al variar el valor de la frecuencia. No se observa alguna correspondencia de proporcionalidad entre las regiones triangulares y las frecuencias estudiadas o al menos esto no fue determinado.

En algunas de las frecuencias se observó que la intersección de las tres rectas formaba una región muy pequeña que visualmente se puede confundir con un punto único.

En la tabla # 6 correspondiente a la representación final de todos los puntos de la posición 1, se observan 6 puntos que están fuera de la circunferencia que representa la ubicación real del piezoeléctrico en el objeto de estudio, 2 puntos que se encuentran sobre la circunferencia y los 55 puntos restantes se encuentran dentro de la región del piezoeléctrico.

Algunos de los puntos representados en mencionada imagen visualmente parecieran que se encuentran en las mismas coordenadas de otros puntos, da la impresión de que se solapan unos a otros, aun cuando realmente

esto no es así pues al aumentar el zoom desde el MATLAB a la imagen, los puntos comienzan a distanciarse unos de otros. Esto nos dio a entender que se debía hacer un análisis numérico de la posición que ocupaban realmente estos puntos (sus coordenadas en pixeles) y se verificara cuántos de ellos pertenecían o no al área donde se ubicaba el piezoeléctrico. Los resultados de este análisis numérico se pueden observar en la tabla # 12.

Dadas estas observaciones se puede afirmar que la intersecciones de cada una de las frecuencias ensayadas tienden a estar dentro de la región del piezoeléctrico o muy cercanas a ellas, información que es reflejada en la tabla # 12.

En la inspección visual de los resultados correspondientes a la posición 2, se pudo observar que la intersección de las rectas de máxima pendiente (L5, L2 y L1), formaban en la mayoría de los casos regiones triangulares, cuyo comportamiento es muy similar al descrito en la posición 1, no hay una relación de proporcionalidad entre las regiones y las frecuencias o por lo menos tampoco fue determinada. En algunos casos la región era muy pequeña que se percibía que la intersección se daba en un punto único al igual que sucedió con los resultados de la posición 1.

Se observo un caso único donde la recta L1 intercepta con la recta de L5 en la cara L5, quedando la recta de máxima pendiente de L2 sin intersección con las otras dos caras, sin embargo para lograr una aproximación la recta de L2 se intercepta con la traza proveniente de L5 producto de la intersección de L5 con L1, obteniéndose un único punto en la superficie L2 el cual se encuentra dentro de la región que representa al piezoeléctrico. La manera de

analizar este caso fue netamente exploratoria ya que para tener certeza que la metodología aplicada a este caso particular sea válida, se necesitaría ensayar con más casos similares para poder verificar su validez, sin embargo su resultado exploratorio es representado en los resultados en la frecuencia de 850 *Hz* que fue donde ocurrió.

Se planteó como posible causa del resultado obtenido para esta frecuencia de 850 *Hz*, que posiblemente se deba a la presencia de ruido en la imagen producto del proceso de digitalización, donde la captura de esta se realiza con una cámara comercial que no está diseñada para la alta saturación del laser, debido a la propiedad de luz coherente donde su intensidad se concentra en un mismo punto, además hay que tomar en consideración que también se filtra ruido por las condiciones del ambiente lo cual es normal, aun cuando el sistema antivibratorio funcione adecuadamente.

El problema radica en que estas imágenes no pueden ser filtradas para eliminar el ruido ya que el ruido suele ser confundido con el *speckle* en el mundo del procesamiento de imágenes, y perder *speckle* es pérdida de información, a pesar de éstas dificultades esta situación se presentó solo una vez, de las 42 frecuencias ensayadas.

En la representación final de todos los puntos de intersección en la posición 2 se muestran a simple vista 5 puntos fuera de la región que representa el piezoeléctrico (ver tabla # 6), encontrándose solo 1 punto sobre la circunferencia, el resto de los 54 puntos se encuentran en la región del piezoeléctrico, recordando que aquí no se toma en cuenta el caso de los 850 *Hz*, lo cual es equivalente a 3 puntos menos en el análisis.

En esta inspección visual se puede observar que la mayoría de los puntos de intersección obtenidos, tienden a concentrarse en la región del piezoeléctrico.

También dentro de la inspección visual se pudo observar que aquellos puntos que están por fuera del área del piezoeléctrico se encuentran en sus adyacencias.

Inspección Numérica

Para el análisis de posición 1 como para el de la posición 2, se realizaron el mismo tipo de cálculo. Ya que se tenía conocimiento de la pendiente y un punto perteneciente a cada una de las rectas (datos que arrojó el análisis en MATLAB), se pudieron obtener cada una de las 126 rectas de máxima pendiente, y con esta información determinamos los puntos de intersección de cada una de las rectas en su respectiva frecuencia y posición. Luego estos puntos se evalúan para saber realmente si están o no en la región del piezoeléctrico, teniéndose un porcentaje de 87.30% para la posición 1 y un porcentaje de 90 % para la posición 2. (Estos resultados pueden ser apreciados en las tablas # 12 y # 13).

Se observa que la mayoría de los puntos obtenidos están dentro de sus respectivas regiones del piezoeléctrico, y aquellos que se encuentran fuera de estas regiones se encuentran muy cerca de la región del piezoeléctrico ya que

sus distancias respecto a los límites de la región del piezoeléctrico se encuentran a muy pocos milímetros. Esta información es presentada en las tablas # 17 y # 18, donde se determinan de manera numérica las distancias al área del piezoeléctrico. Dicha información es presentada tanto en píxeles como en milímetros.

Tabla # 17 Distancia de los puntos fuera del área del piezoeléctrico al mismo

Posición # 1				
Coordenada en X (pixel)	Coordenada en Y (pixel)	Radio (pixel)	Diferencia de radios (pixel)	Diferencia de radios (mm)
1108,5	795,1516	454,7356	169,2456	8,6107
861,25	768,1413	292,3191	6,8291	0,3474
926,24	736,0092	290,7122	5,2222	0,2657
520,9521	645,52	294,7896	9,2996	0,4731
438,6085	521,34	334,2357	48,7457	2,4800
1107,1065	516,1	336,7508	51,2608	2,6080
1052,0847	428,61	287,3454	1,8554	0,0944
1108,5	541,71	341,0752	55,5852	2,8280

Tabla # 18 Distancia de los puntos fuera del área del piezoeléctrico al mismo

Posición # 2				
Coordenada en X (pixel)	Coordenada en Y (pixel)	Radio (pixel)	Diferencia de radios (pixel)	Diferencia de radios (mm)
46,3614	629,3970	396,4092	110,9192	5,8169
151,4286	261,3982	297,6976	12,2076	0,6402

113,2679	566,3797	308,0841	22,5941	1,1849
262,3135	748,4009	338,3156	52,8256	2,7703
191,1092	645,6226	290,5744	5,0844	0,2666
138,6287	629,3970	319,0397	33,5497	1,7594

Comparando la información obtenida tanto de manera visual como de manera numérica podemos corroborar que los resultados obtenidos al aplicar el método de interferometría holográfica *speckle*, ejecutándose en el modo de tiempo promedio, proporcionan la información necesaria para poder determinar la posición del epicentro vibratorio dentro de un objeto analizado en 3D.

Reconocimiento de patrones vibratorios

En las imágenes mostradas en las tablas # 15 y # 16, se puede observar como es y como varia el patrón vibratorio a medida que se cambian las frecuencias, mostrando desde el inicio del modo de vibración, su evolución hasta su desaparición para dar paso al nuevo modo de vibración. Se aprecia cómo se genera el primer modo de vibración, pasando de una simple mancha a un conjunto de anillos concéntricos, que va aumentando su número hasta llegar al siguiente fenómeno que es el paso al segundo modo volviéndose a formar estos anillos, solo que en este caso son dos los conjuntos que se forman y que al igual que en el caso anterior, parte de unos pocos anillos que van aumentando su número. Se observó además que el paso de un modo de vibración a otro no es fijo, y que se puede pasar del primer modo, al segundo y luego volver al primero.

Ejemplo de esto se puede observar en el desarrollo de los modos de vibración de L1 en la posición 2 (ver tabla # 16), donde del tercer modo, pasamos a un primer modo algo difuso y luego a un segundo modo de vibración.

Si se comparan los patrones de vibración de la posición 1 versus la posición 2, podemos observar que no son iguales, y que existe un corrimiento del patrón, tendiendo este a ubicarse hacia el lugar donde se ubica el piezoeléctrico.

CONCLUSIONES

El proceso de investigación pudo ser llevado a cabo ya que se recopiló la información necesaria, procedente de la teoría de vibraciones y de estudios realizados para su determinación y caracterización, como para poder sentar las bases tanto del estudio como del análisis de los resultados.

Se logró obtener la información necesaria referente a la holografía, las técnicas holográficas y sus aplicaciones dentro del campo de estudio, lo cual permitió poder realizar el proceso de experimentación.

El prototipo escogido presentó las dimensiones adecuadas para su fácil manejo, facilitando así el proceso de estudio. Cubrió las necesidades al presentar características como su capacidad para ser desarmado y armado las veces que fuera necesario, una superficie uniforme, un color mate, la dureza y firmeza como para ser sujetado adecuadamente por el soporte, facilidad para adaptársele el elemento perturbador (el piezoeléctrico), con lo cual se pudo realizar la experimentación y obtener los resultados expuestos en el capítulo anterior.

El método seleccionado y el montaje realizado para su aplicación, demostró ser adecuado para realizar el estudio. A través del proceso de experimentación se llega a la conclusión de que el método de interferometría holográfica *speckle* puede ser utilizado para detectar y localizar el epicentro de una perturbación vibratoria en un objeto 3D de manera no invasiva.

El modelo experimental, demostró que es de fácil empleo y ofrece los resultados esperados siempre y cuando se cumpla con que no exista movimiento relativo entre los elementos del montaje, las condiciones de coherencia y el aislamiento vibratorio. Estos además demostraron que pueden ser satisfechos fácilmente y con materiales sencillos en su mayoría.

A través del análisis de los resultados se llega a la conclusión de que el epicentro de la vibración, más que ser un punto como tal se refiere a una región, aun cuando este puede ser modelado o definido con una coordenada única, sin perder información al hacer esto.

También el método permite la visualización de los patrones de vibración que se forman en las superficies del objeto, mostrando como es su proceso de formación y desarrollo y además permitiendo identificar los modos de resonancia del mismo.

Con la ayuda de un computador para el procesamiento adecuado de la información aportada por el proceso de interferometría holográfica *speckle* es que es posible visualizar estos fenómenos, estudiarlos y analizarlos.

RECOMENDACIONES

Es importante resaltar la necesidad de una buena mesa de trabajo con el aislamiento vibratorio adecuado, ya que el montaje holográfico es sensible a vibraciones externas.

El equipamiento óptico (lentes, divisores de haz, espejos de primera superficie) debe ser el adecuado ya que usar equivalentes puede derivar en errores a la hora de obtener datos.

El interferómetro de Michelson es una buena herramienta, muy útil y sencilla en su montaje el cual sirve para verificar el aislamiento vibratorio de una superficie de manera rápida y sencilla, por lo cual es recomendado para ser utilizado en tareas o estudios como el anterior.

Se recomienda para futuros trabajos el uso de la técnica tiempo real de interferometría holográfica *speckle*, ya que esta proporciona de manera más cómoda la visualización completa del fenómeno, pudiéndose con un simple barrido cubrir una mayor área de estudio.

También se recomienda que el modo de captura se haga de modo digital llevándola directamente al computador, para evitar el ruido que pudiese ingresar cuando se digitaliza el holograma a través de una cámara digital.

Si el estudio holográfico no va a ser en el modo tiempo real se recomienda que se use un laser pulsante ya que con este tipo de laser no es

necesario tener un aislamiento vibratorio tan riguroso como en el caso de usar un laser de tipo continuo.

Aun cuando para este trabajo se realizaron los programas necesarios, es recomendable desarrollar una plataforma para el análisis de la información y así hacer más fluido el proceso de la investigación.

Aspectos de Seguridad

Es importante tener en cuenta los riesgos que se corren al realizar este tipo de investigación.

La superficie de trabajo, la losa de la mesa antivibratoria, es de concreto por lo que es muy pesada, es importante ubicar la losa en una posición adecuada y estable que no permita que esta resbale y caiga pudiendo lesionar a las personas que laboran cerca de la mesa, o inclusive caer sobre alguno de los otros equipos dañándolos. Además cuando es retirada de la mesa para el chequeo de la arena o de las cámaras de aire, hay que hacerlo de forma cuidadosa y con el equipo adecuado.

Es importante planificar bien la ubicación y orden de todo el sistema de cableado que necesitan los equipos para su funcionamiento, sobre todo de aquellos que van por el piso para evitar así tropiezos y caídas durante los ensayos ya que el sitio donde se ejecutan los ensayos es una habitación oscura. Dichas caídas o tropiezos pueden traer como consecuencia la lesión del

investigador o personas que se encuentren en el laboratorio, el daño parcial o completo a los equipos que estén unidos a esos cables. Es recomendable tratar de ubicar todos los cables en la medida de lo posible en un mismo sitio y ajustarlos con cinta de embalaje al piso por toda la longitud del cable que va a estar expuesto a la zona de tránsito del personal del laboratorio. Aun cuando el cableado no pase por el suelo, es importante que también se apliquen estas medidas de seguridad, pues igual se pueden producir accidentes.

Otro aspecto a tomar en consideración es que se trabajan con piezas de vidrio por lo tanto es recomendable manejarse con cuidado con dichos materiales para evitar no solo cortes en la piel, sino además que sus superficies se dañen por lo delicado del material.

Se recomienda tener cuidado con la sustancia reveladora pues esta puede manchar la piel e inclusive la ropa, es por ellos que el uso de guantes y ropa de seguridad o que no importe que se manche es aconsejable. Además la exposición prolongada puede corroer superficies.

Como último tópico a tratar se encuentran los aspectos de seguridad con respecto al uso del laser. Todos los laser causan daños en la retina cuando el haz incide sobre esta. La magnitud del daño dependerá de la clase de laser, este es proporcional a la potencia del mismo. No es necesario que el haz provenga directamente de la fuente, un haz proveniente de una reflexión es igualmente dañino.

Los laser están divididos en 4 clases, la clase I comprende aquellos que son muy débiles en potencia, estos no son usados en holografía, clase II son

aquellos cuya potencia no supera 1 mW , clase III aquellos laser que no superan los 25 mW , clase IV comprende aquellos laser cuya potencia es superior a los 25 mW y los laser pulsantes.

En holografía normalmente se usan laser de clase III y clase IV, este último también puede ocasionar daños a la cornea por lo tanto es necesario el uso de lentes protectores que se encargan de filtrar la longitud de onda y la bandas cercanas a esta, de modo tal que atenúe la emisión de energía al ojo de manera significativa. El único detalle es que con el uso de este tipo de lente no es posible apreciar la trayectoria del haz dentro de la configuración del montaje holográfico ya que estos no permiten ver el haz de laser.

Con respecto al uso de los laser pulsantes se debe tener un cuidado adicional, ya que por su naturaleza pulsante la emisión de energía es más intensa que la de los laser de emisión continua causando daños a diferentes tipos de superficies por quemaduras e incluso perforaciones, por lo cual se debe usar un traje de protección y además hacer que los haces tanto directos como reflexivos del laser que ya no son necesarios en el estudio, sean bloqueados con láminas metálicas para evitar daños en el laboratorio. Para mayor información sobre las normas de protección y seguridad de los laser se debe consultar la norma *ANSI Standard for Safe Use of Lasers* (ANSI Z 136.1).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CALVO, M. (2002). “*Óptica avanzada*”. España. Editorial Ariel, S.A. 697 p.
- [2] LEÓN, J. (2004) “*Dinámica de máquinas (Introducción a la teoría de máquinas)*”. Caracas, Venezuela. Universidad Simón Bolívar. 380 p.
- [3] UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA. Facultad de Ingeniería. Comisión de Bibliotecas. (2005). “*Instructivo para la presentación de trabajos especiales de grado*”. Caracas: Lic. María Padrón.
- [4] AGUANNO, M. (2007). “*Heterodyne speckle interferometer for full – field velocity prolife measurements of a vibrating membrane by electronic scanning*”. Optics and Laser in Engineering. [Revista en línea]. Disponible: <http://www.elsevier.com/locate/optlaseng> [Consulta: 2009, junio].
- [5] ALTAMIRANO, J. y MARTÍ, L. (2004). “*Holografía Básica*”. [Libro en línea]. D.R. © 2004 Instituto Politécnico Nacional de México. Disponible: <http://www.publicaciones.ipn.mx/PDF/1495.pdf> [Consulta: 2009, junio].
- [6] ARAI, Y. y otros. (2008). “*High-resolution dynamic measurement using electronic speckle interferometry based on multi- camera*”

- technology*". Optics and Laser in Engineering. [Revista en línea]. Disponible: <http://www.elsevier.com/locate/optlaseng> [Consulta: 2009, agosto].
- [7] ARIAS, F. (1999). "*El proyecto de Investigación (Guía para su Elaboración)*". [Libro en línea]. 3era. Edición. Editorial Episteme. Disponible: <http://www.monografias.com/trabajos-pdf/proyecto-investigacion/proyecto-investigacion.pdf>
- [8] ARISTIZABAL, V. y otros (2003). "Contorneado de Superficies Utilizando DSPI". Revista Colombiana de Física, Vol. 35, No.1. [Revista en línea]. Disponible: http://calima.univalle.edu.co/revista/vol35_1/articulos/pdf/3501133.pdf [Consulta: 2009, junio].
- [9] CHICHARRO, J. (2000). "*Estudio de la Magnetostricción por Interferometría de Speckle*". Trabajo de grado. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Madrid. Disponible: http://biblioteca.universia.net/html_bura/ficha/params/id/34395838.html [Consulta: 2009, febrero].
- [10] Committee on Optical Science and Engineering, National Research Council., y otros. (1998). "*Harnessing Light: Optical Science and Engineering for the 21st Century*". [Libro en línea]. National Academic Press. Disponible: http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=5954ç
- [11] DHANASEKAR, B y otros. (2007). "*Evaluation of surface roughness based on monochromatic speckle correlation using image processing*".

- Science Direct. [Revista en línea]. Disponible: <http://www.sciencedirect.com> [Consulta: 2009, agosto].
- [12] FARRANT, D, y otros (2002). “*Geometrically qualified ESPI vibration analysis of an engine*”. Optics and Laser in Engineering. [Revista en línea]. Disponible: <http://www.sciencedirect.com> [Consulta: 2009, abril].
- [13] FisicaNet. (2008). “*Introducción al holograma (2º parte)*”. PASSERA, G.
- [14] GRAHAM, S. (2004). “*Practical Holography*” [Libro en línea]. Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia. IOP publishing Ltd. Disponible: <http://holographer.org/practical-holography-3rd-edition-graham-saxby/> [Consulta: 2009, marzo].
- [15] HUNT, B. y otros. (2001). “*A Guide to MATLAB for Beginners and Experienced Users*”. [Libro en línea]. CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS. Disponible: <http://www.cambridge.org/us/catalogue/catalogue.asp?isbn=9780521615655> [Consulta: 2009, junio].
- [16] KJELL, G. y otros. (2002). “*Optical Metrology*”. [Libro en línea] 3era edición. John Wiley & Sons, Ltd. Disponible: <http://www.torrentsdownload.net/torrent/145395/Optical+Metrology+3rd+ed+-+Kjell+-+allfreebook.tk.html>
- [17] LI, X. y TAO, G. (2002). “*Low – Frequency harmonic vibration analysis with temporal speckle pattern interferometry*”. Optics and

- Laser in Engineering. [Revista en línea]. Disponible: <http://www.elsevier.com/locate/optlaseng> [Consulta: 2009, agosto].
- [18] MARTÍNEZ, A. y otros (2004, mayo 21). “*METROLOGÍA ÓPTICA EN DETECCIÓN DE GRIETAS EN ELEMENTOS MECÁNICOS*”. 1^{er} Encuentro Participación de la Mujer en la Ciencia. León Guanajuato. Departamento de Metrología Óptica, Centro de Investigaciones en Óptica e Instituto Tecnológico de León, Depto. De Ciencias Básicas.
- [19] MEI, C. (2008). “*Theoretical treatment of RF discharges in coaxial He-Ne laser*”. Optics and Laser in Engineering. [Revista en línea]. Disponible: <http://www.sciencedirect.com> [Consulta: 2009, abril].
- [20] MIRZA, S. y otros (2005). “*Measurement of transverse vibrations/ visualization of mode shape in square plate by using digital speckle pattern interferometry and wavelet transform*”. Optics and Laser in Engineering. [Revista en línea]. Disponible: <http://www.sciencedirect.com> [Consulta: 2009, junio].
- [21] PEDRINI, G. y otros. (2008). “*Calibration of optical systems for measurement of microcomponents*”. Optics and Laser in Engineering. [Revista en línea]. Disponible: <http://www.elsevier.com/locate/optlaseng> [Consulta: 2009, agosto].
- [22] PÉREZ, C. y otros (2002). “*Separation of vibration fringe data from rotating object fringes using pulsed ESPI*”. Optics and Laser in Engineering. [Revista en línea]. Disponible: <http://www.sciencedirect.com> [Consulta: 2009, abril].

- [23] RÁNDEZ, L. (2007). “*Introducción al MATLAB*” [Manual en línea]. Universidad de Zaragoza. Facultad de Ciencias. Departamento de Matemática Aplicada. Disponible: <http://pcmap.unizar.es/~randez/matlab.pdf> [Consulta: 2009, junio].
- [24] Romero, G. y otros. (2002). “*Study of a vibrating plate: comparison between experimental (ESPI) and analytical results*”. Optics and Laser in Engineering. [Revista en línea]. Disponible: <http://www.sciencedirect.com> [Consulta: 2009, abril].
- [25] Universidad Autónoma de Zacatecas. “*Holografía Digital en la Medición de Modos de Vibración*”. México. SALDIVAR, A. y SAUCEDO, T.
- [26] Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. (2004). “*Introducción a la medición de vibración*”. Mérida: PERNIA, D.
- [27] Universidad de Valencia. Departamento de Mecánica. “*VIBRACIONES EN DOS DIMENSIONES Vigas, hilo circular y platos de Chladni*”. España. STÖTTER, A. y otros.
- [28] Universidad EAFIT. Departamento de Ciencias Básicas. Universidad de Antioquia. Departamento de Física. “*Obtención de Mapas de Deformación Mediante Interferometría Digital de Patrones Speckle*”. Colombia. VELÁSQUEZ, D. y GARCÍA, J.
- [29] Universidad Pública de Navarra. Departamento de Física. “*Modos de Vibración de una Membrana Rectangular*”. España. ARAMENDÍA, E. y SANMARTÍN, R.

- [30] VINCITORIO, F. y otros (2007, Octubre). “*Ensayos por Interferometría Holográfica de Materiales Tratados con Laser de Potencia*”. IV Conferencia Paramericana de END. Buenos Aires. AAENDE Asociación Argentina de Ensayos No Destructivos y Estructurales.
- [31] YANG, L. y otros (2008). “*Stroboscopic digital speckle pattern interferometry for vibration analysis of microsystem*”. Optics and Laser in Engineering. [Revista en línea]. Disponible: <http://www.elsevier.com/locate/optlaseng> [Consulta: 2009, junio].
- [32] YANG, L. y otros. (2008). “*Stroboscopic digital speckle pattern interferometry for vibration analysis of microsystem*”. Optics and Laser in Engineering. [Revista en línea]. Disponible: <http://www.elsevier.com/locate/optlaseng> [Consulta: 2009, agosto].

[ANEXOS]

Imagen # 50; Curvas de nivel generadas en MATLAB

