

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

INFLUENCIA DE MINI ORIFICIOS EN LAS FRECUENCIAS NATURALES DE VIBRACIÓN DE MEMBRANAS

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por la Bachiller:

Solórzano L., Johana A.

Para optar al Título de Ingeniero Mecánico

Caracas 2008

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

INFLUENCIA DE MINI ORIFICIOS EN LAS FRECUENCIAS NATURALES DE VIBRACIÓN DE MEMBRANAS

Tutor: Prof^a. Carmen Rosa Hernández

Presentado ante la Ilustre

Universidad Central de Venezuela

Por la Bachiller:

Solórzano L., Johana A.

Para optar al Título de Ingeniero Mecánico

Caracas 2008

Solórzano L., Johana A.

INFLUENCIA DE MINI ORIFICIOS EN LAS FRECUENCIAS NATURALES DE VIBRACIÓN DE MEMBRANAS

**Tutor Académico: Profa. Carmen Rosa Hernández, M. Sc. Tesis. Caracas,
U.C.V. Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, 2008. (91
Pág.)**

Frecuencia Natural, Membranas, Mini Orificios.

Debido al avance que ha tenido el uso de membranas en las aplicaciones de Ingeniería, el estudio del comportamiento dinámico de estos elementos ha sido de suma importancia para determinar su respuesta ante condiciones de vibración que comprometan su correcto funcionamiento. Además, casi ningún material que se use de manera continua se escapa al deterioro y desgaste, el estudio experimental de este trabajo incluyó la presencia de mini orificios como representación de los daños debidos al uso prolongado en algunos elementos de máquinas que son considerados membranas.

Para la investigación realizada se rediseñó un banco de pruebas para estudiar de manera experimental las vibraciones de 5 membranas cuadradas y tensadas con una carga de magnitud constante en toda su periferia.

Como resultado del trabajo realizado se determinó que desde 20 y hasta 100 orificios en la superficie de una membrana cuadrada de polietileno, distribuidos de forma radial a partir del centro de su geometría, se produce un ligero aumento en las frecuencias naturales de vibración con relación a la condición sin orificios, específicamente para las frecuencias de 58,17 Hz. y 116,34 Hz., las cuales corresponden a los valores de referencia teóricos.

DEDICATORIA

A mi Mamá y mi Beto quienes desde el cielo siguen mis pasos.

Mamá, lucho cada día por llegar a ser el ejemplo que me diste, la mejor mujer que he conocido en toda mi vida. Mi título y mi trabajo sin duda son para ti.

A mi hermano Beto, fuiste el primero que creyó en mí, cuando yo ni siquiera entendía bien el significado de esa palabra, espero desde arriba estés orgulloso de mi.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, porque gracias a su amor, su apoyo y su cariño soy quien soy el día de hoy.

A la Universidad Central de Venezuela por darme la oportunidad de estudiar y formarme como profesional.

A mi tutora, la Profesora Carmen Rosa Hernández, por su apoyo incondicional, la confianza, darme su guía, por siempre exigirme al máximo y no aceptar menos de eso, por responder a todas mis preguntas pacientemente.

A mis compañeros de tesis, mi Papá y mi hermano Ale, sin los cuales nada de esto sería realidad. Por los días de trabajo, las ideas, la búsqueda. Por nunca desistir, por estar siempre ahí, por comprenderme, por apoyarme.

A Joshua Espaillat, que a pesar de estar lejos siempre ha estado cerca de mí, por darme en el momento indicado las palabras de aliento que necesitaba para continuar. Por todo el amor y el cariño que me das cada día.

A Mimina (Margarita Luna), por tratar de llenar un poco el vacío que dejó mamá, porque eres una de las personas que cree más en mí día a día, por las palabras llenas de orgullo, por su amor de madre que tanto me hace falta.

A mis amigos, viejos y nuevos, grandes y pequeños, en especial a Adelina Crespo y Laura Guerra por tantos años de amistad y apoyo, por no faltar en el momento indicado. Amigas ¡Las Quiero!

Al Profesor Jorge David Cruz, por siempre estar disponible para guiarme en mis dudas.

Al Profesor Francisco García, por responder a todas mis preguntas.

A Mario Gorrin e Iris Toro de Proyectos Marril y Ávila, C.A., por la colaboración en materiales y el apoyo brindado.

Un reconocimiento especial al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico CDCH de la U.C.V, por el apoyo financiero otorgado a la presente investigación bajo la modalidad de proyecto individual con el No.08.15.5430.2004., y a la Ley Orgánica de Ciencia y Tecnología (LOCTI) por los recursos obtenidos a través del "Proyecto de Modernización del Laboratorio de Dinámica de Máquinas" y del proyecto "Caracterización del nivel de vibración en Plantas Estacionarias de Generación Eléctrica".

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
ÍNDICE GENERAL	vii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA TABLAS	xi
LISTA DE GRÁFICOS	xiii
NOMENCLATURA, SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS	xv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	5
EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	5
1.1. Motivación	5
1.2. Planteamiento del Problema.....	6
1.3. Objetivos	7
1.3.1. Objetivo General	7
1.3.2. Objetivos Específicos.....	7
1.4. Justificación de la Investigación	8
1.5. Alcances y Limitaciones	8
RECURSOS DISPONIBLES	9
CAPÍTULO II	10
MARCO TEÓRICO.....	10
2.1. Antecedentes de la Investigación	10
2.2. Vibración en medios continuos.....	12
2.2.1. Definición de Membrana	12
2.2.2. Definición desde el punto de vista de la dinámica.....	15
2.2.3. Ecuaciones Fundamentales de la Teoría de membranas.....	16
2.2.4. Desgaste de membranas	24
CAPÍTULO III.....	25
MARCO METODOLÓGICO	25
3.1. Tipo de Investigación.....	25
3.1.1. Nivel de la Investigación.....	25
3.1.2. Tipo de muestreo.....	25
CAPÍTULO IV.....	27
MARCO EXPERIMENTAL	27
4.1. Banco de Pruebas	27
4.1.1. Equipos e Instrumentos.....	27
4.1.2. Rediseño y construcción del Banco de Pruebas.....	32

4.2. Representación Física de la condición de Tensión	40
4.3. Características de los especímenes de prueba	43
4.3.1. Material	43
4.3.2. Características geométricas	46
4.4. Variables	47
4.4.1. Número de Mediciones	48
4.4.2. Número y Geometría de Orificios	49
4.5. Esquema de Equipos e Instrumentos	54
4.6. Aspectos de Seguridad	55
4.7. Identificación de la Condición de Resonancia	55
4.7.1. Gráficas Obtenidas con el Osciloscopio	56
4.7.2. Niveles de sonido registrados por el sonómetro	58
4.8. Procedimiento Experimental	60
CAPÍTULO V	62
RESULTADOS	62
5.1 Resultados teóricos.	62
5.2. Resultados experimentales	63
5.2.1. Tensión 1 (560377,143 N)	63
5.2.2. Tensión 2 (700471,429 N)	65
5.2.3. Análisis de Resultados	67
5.3. Influencia de mini orificios en las frecuencias naturales de vibración en membranas	68
5.3.1. Membrana 1	68
5.3.2. Membrana 2	70
5.3.3. Membrana 3	72
5.3.4. Membrana 4	74
5.3.5. Membrana 5	76
5.4. Reporte General de Resultados Experimentales	78
5.5. Análisis de Resultados Experimentales	79
CONCLUSIONES	80
RECOMENDACIONES	81
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	82
Publicaciones Periódicas	84
Fuentes Electrónicas	84
Fuentes del Tipo Legal	85
[ANEXOS]	86

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura I.1: Diálisis.....	2
Figura I.2: Techo de membrana.....	3
Figura 1.1: Estructura de una bomba de membrana.....	6
Figura 2.1: Membrana para Bombas de Riego, Parte I.....	13
Figura 2.2.: Daños en mantos asfálticos.....	14
Figura 2.3: Radio base repetidora en azotea, sitio impermeabilizado con membrana asfáltica y pinturas especiales.....	14
Figura 2.4. Elemento Diferencial de masa.....	16
Figura 2.5. Análisis de Fuerzas en un elemento diferencial de membrana.....	17
Figura 2.6. Membrana Rectangular.....	20
Figura 4.1. Generador de Señal.....	29
Figura 4.2. Amplificador de audio.	29
Figura 4.3. Osciloscopio.....	30
Figura 4.4. Sonómetro.....	30
Figura 4.5. Altavoz.....	30
Figura 4.6. Transductor.....	30
Figura 4.7. Brazo Mecánico.....	31
Figura 4.8. Cable N° 18 Negro- Rojo, terminales: RCA – caimán.....	31
Figura 4.9. Cable N° 18 Negro- Rojo, terminales: plano – banana.....	31
Figura 4.10. Trozos de madera para la base.	33
Figura 4.11. Láminas de acero inoxidable.....	33
Figura 4.12. Poliestireno expandido.	34
Figura 4.13. Aros para ensayos de geometrías circulares y elípticas....	34
Figura 4.14. Banco de prueba en su condición final.....	40
Figura 4.15. Vista general de posición de los cilindros.....	40
Figura 4.16. Cilindros de Acero.....	41
Figura 4.17. Esquema de fuerzas.....	41

Figura 4.18. Esquema de tensión y reacción de contacto.....	42
Figura 4.19. Diagrama de cuerpo libre de la sección transversal de un cilindro.....	42
Figura 4.20. Membranas para bombas de riego parte II.....	44
Figura 4.21. Membranas para radiadores.....	44
Figura 4.22. Ondas en la superficie del material visualizadas con luz estroboscópica.....	45
Figura 4.23. Bobinas de Termoplásticos.....	46
Figura 4.24. Disposición de orificios, membrana 1. Medidas dadas en cm.....	52
Figura 4.25. Malla dibujada en la Membrana 1.....	52
Figura 4.26. Disposición de orificios, membrana 2 (izquierda) y membrana 3 (derecha).....	53
Figura 4.27. Malla dibujada en la Membrana 2 (izquierda) y Membrana 3 (derecha).....	53
Figura 4.28. Disposición de orificios, membrana 4 (izquierda) y membrana 5 (derecha).....	53
Figura 4.29. Malla dibujada en la Membrana 4 (izquierda) y Membrana 5 (derecha).....	54
Figura 4.30. Conexiones del generador de señales y el amplificador.....	54
Figura 4.31. Posición del osciloscopio y el transductor.....	54
Figura 4.32. Vista General de los Equipos.....	55
Figura 4.33. Protectores Auditivos.....	55

LISTA TABLAS

	Pág.
Tabla 4.1 Ficha técnica de los equipos e instrumentos utilizados en los ensayos.....	28
Tabla 4.2 Incertidumbre del generador de señal.....	29
Tabla 4.3. Propiedades del material.....	46
Tabla 4.4. Variables controladas.....	47
Tabla 4.5. Valores de Frecuencias en ensayos preliminares.....	49
Tabla 4.6. Niveles de sonido promedio para antes, durante y después de la frecuencia de resonancia teórica (58,17 Hz).....	58
Tabla 4.7. Niveles de Sonido promedio para antes, durante y después del estado de resonancia para la frecuencia teórica (116,34 Hz).....	59
Tabla 5.1. Valores Teóricos de Frecuencia natural para dos tensiones.....	63
Tabla 5.2. Valores experimentales obtenidos para la Tensión 1 (560377,143 N).....	63
Tabla 5.3. Resultados, Tensión 1 (560377,143 N) Frecuencia 1 (58,17 Hz.).....	65
Tabla 5.4. Resultados, Tensión 1 (560377,143 N) Frecuencia 2 (116,34 Hz.).....	65
Tabla 5.5. Valores obtenidos para la tensión 2 (700471,429 N).....	65
Tabla 5.6. Resultados, Tensión 2 (700471,429 N) Frecuencia 1 (58,17 Hz.).....	67
Tabla5.7. Resultados, Tensión 2 (700471,429 N) Frecuencia 2 (116,34 Hz.).....	67
Tabla 5.8. Valores obtenidos para la Membrana 1.....	68
Tabla 5.9. Resultados obtenidos para la Frecuencia 1.....	69
Tabla 5.10. Resultados obtenidos para la Frecuencia 2.....	70
Tabla 5.11. Valores obtenidos para la Membrana 3.....	70

Tabla 5.12. Resultados para la Membrana 2, Frecuencia 1.....	71
Tabla 5.13. Resultados para la Membrana 2, Frecuencia 2.....	72
Tabla 5.14. Valores obtenidos para la Membrana 3.....	72
Tabla 5.15. Resultados para la Membrana 3, Frecuencia 1.....	73
Tabla 5.16. Resultados para la Membrana 3, Frecuencia 2.....	74
Tabla 5.17. Valores obtenidos para la Membrana 4.....	75
Tabla 5.18. Resultados para la Membrana 4, Frecuencia 1.....	76
Tabla 5.19. Resultados para la Membrana 4, Frecuencia 2.....	76
Tabla 5.20. Valores obtenidos para la Membrana 5.....	77
Tabla 5.21. Resultados para la Membrana 6, Frecuencia 1.....	77
Tabla 5.22. Resultados para la Membrana 6, Frecuencia 2.....	78
Tabla 5.23. Resultados Generales.....	78

LISTA DE GRÁFICOS

	Pág.
Gráfico 2.1.: Estado de la investigación de algunas aplicaciones de membrana.....	15
Gráfica 4.1. Valores preliminares para la Frecuencia 1.....	50
Gráfica 4.2. Valores preliminares para la Frecuencia 2.....	50
Gráfica 4.3. Obtenida en el osciloscopio para 50 Hz emitidos por el generador de señales.....	56
Gráfica 4.4. Obtenida en el osciloscopio para 78 Hz emitidos por el generador de señales.....	57
Gráfica 4.5. Obtenida en el osciloscopio para 64 Hz. emitidos por el osciloscopio.....	57
Gráfica 4.6. Niveles de sonido antes, durante y después de la frecuencia de resonancia teórica 58,17 Hz.....	58
Gráfica 4.7. Niveles de sonido antes, durante y después de la resonancia, Frecuencia teórica 116,34 Hz.....	59
Gráfica 5.1. Valores obtenidos para la frecuencia 1 (58,17 Hz.).....	64
Gráfica 5.2. Valores obtenidos para la frecuencia 2 (116,34 Hz.).....	64
Gráfica 5.3. Valores obtenidos para la frecuencia 1 (65,04 Hz.).....	66
Gráfica 5.4. Valores obtenidos para la frecuencia (91,98 Hz.).....	66
Gráfica 5.5. Valores obtenidos para la frecuencia 1 (58,17 Hz.), Membrana 1.....	68
Gráfica 5.6. Valores obtenidos para la frecuencia 2 (116,34 Hz.), Membrana 1.....	68
Gráfica 5.7. Valores obtenidos para la frecuencia 1 (58,17 Hz.), Membrana 2.....	69
Gráfica 5.8. Valores obtenidos para la frecuencia 2, Membrana 2 (116,34 Hz.).....	71

Gráfica 5.9. Valores obtenidos para la frecuencia 1 (58,17 Hz.), Membrana 3.....	73
Gráfica 5.10. Valores obtenidos para la frecuencia 2 (116,34 Hz.), Membrana 3.....	73
Gráfica 5.11. Valores obtenidos para la frecuencia 1 (58,17 Hz.), Membrana 4.....	75
Gráfica 5.12. Valores obtenidos para la frecuencia 2 (116,34 Hz.), Membrana 4.....	75
Gráfica 5.13. Valores obtenidos para la frecuencia 1 (58,17 Hz.), Membrana 5.....	77
Gráfica 5.14. Valores obtenidos para la frecuencia 2 (116,34 Hz.), Membrana 5.....	77
Gráfica 5.15. Valores Generales obtenidos para la frecuencia 1 (58,17 Hz.).....	78
Gráfica 5.16. Valores Generales obtenidos para la frecuencia 2 (116,34 Hz.).....	78

NOMENCLATURA, SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

a	Aceleración
β	Ángulo que forma la tensión con el eje Y
P_x	Componente en el eje X de la tensión
P_y	Componente en el eje Y de la tensión
ρ	Densidad, masa por unidad de volumen
$u(x,y,t)$	Desplazamiento
z	Desplazamiento vertical
D	Diferencia entre el menor valor de las medidas y la mayor de éstas
	Diferencia porcentual entre el valor experimental de frecuencias naturales y el valor teórico de referencia, sólo para membranas con discontinuidades en su superficie
Dif	
dm	Elemento diferencial de masa
dv	Elemento diferencial de volumen
E	Error Relativo
h	Espesor
F	Fuerza
F_z	Fuerza en dirección del eje coordenado “z”
W_{mn}	Frecuencia Natural de una membrana Rectangular
$\omega_{teórico}$	Frecuencia Natural Teórica
g	Gravedad
L_x	Longitud medida en el eje x
L_y	Longitud medida en el eje y
m	Masa
\bar{X}	Media Aritmética
NA	No Aplica

n	Número de mediciones realizadas
P	Tensión por unidad de superficie
t	Tiempo
%Dis	Porcentaje de Dispersión
Rc	Reacción de Contacto
$\overline{\omega}_{exp}$	Valor medio de las frecuencias obtenidas experimentalmente
c	Velocidad de Propagación

INTRODUCCIÓN

Los elementos constructivos en forma de membranas tienen un amplio rango de aplicaciones, y pueden ser elaborados de diversos materiales, con diferentes composiciones y propiedades físicas, por lo cual es un elemento altamente competitivo en diferentes áreas tales como la medicina, industria química y farmacéutica, la construcción, entre otras. Hasta hace pocos años el estudio dinámico de membranas era escaso, pero el veloz desarrollo de sus aplicaciones ha incrementado la necesidad de conocer su desempeño dinámico de manera más extensa. Son de uso cotidiano y por lo general las aplicaciones son diversas, por ejemplo se pueden mencionar: instrumentos musicales de percusión, en los procesos de filtración industrial tales como de agua potable, tratamientos de aguas residuales, separación de sólidos en la industria de alimentos, química y farmacéutica. Se emplean como aislamientos térmicos y acústicos, en la separación de gases y vapores, como parte de estructuras espaciales (radares, filtros solares), en el campo de la medicina se utilizan en prótesis médicas de arterias y órganos, en los procesos de diálisis, electrodiálisis, en la arquitectura se incluyen en diseños de edificios como algo nuevo, con estilo y de mucha utilidad.

En la figura I.1., se muestra un bosquejo del proceso de diálisis, para esto se emplea una bolsa o tubo de membrana semipermeable, la cual permite el intercambio de sales entre el interior y el exterior de la bolsa.

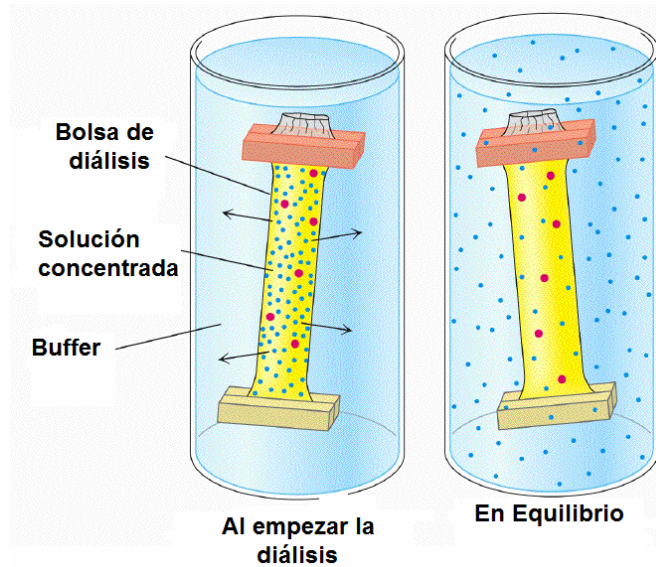


Figura I.1: Diálisis. Fuente: Universidad de Zaragoza. [On-line]. Disponible en:
<http://www.unizar.es>.

Un ejemplo de aplicación en el ámbito de la ingeniería son las bombas de membrana; su funcionamiento se basa en una membrana de tipo permeable unida a un pistón que separa aire y agua dentro de dos cámaras, se le adiciona aire comprimido a una de las cámaras donde el pistón se desplaza de un lado a otro impulsando el fluido que se encuentra ubicado en la otra cámara. Por lo general, los equipos de bombeo están expuestos a fuerzas externas de fuentes diversas, como por ejemplo las producidas por desbalance de elementos rotativos cercanos, condiciones inadecuadas de operación, entorno cercano a máquinas herramientas, etc. Al someter este tipo de máquina a excitaciones de tipo armónico cuya frecuencia natural coincida con la frecuencia natural del sistema dinámico de interés, es muy probable que ocurra la condición de resonancia, lo cual puede ser desfavorable. Frente a una condición de vibración no prevista, es posible que los niveles de presión u otra condición de trabajo comprometan su correcto funcionamiento.

Actualmente la aplicación de elementos en forma de membranas llega incluso hasta el campo de la arquitectura, aportando soluciones a necesidades de sombra y de tipo estético. Sin embargo si dichas estructuras son sometidas a

vientos que generen fuerzas de tipo armónico y de grandes amplitudes, pueden ocurrir condiciones desfavorables y poco seguras.



Figura I.2: Techo de membrana. Fuente: WAGG Soluciones Tensadas. [On-Line]. Disponible en: <http://www.wagg.com.ar>

Los elementos en forma de membranas pueden presentar desgaste progresivo provocado por agentes externos que dependen del tipo de aplicación, estos agentes pueden ocasionar daños físicos, tales como mini orificios, alterando su normal funcionamiento.

El uso de membranas en diversos dispositivos, máquinas, y estructuras hace absolutamente necesario el análisis dinámico de estos elementos y más aun aquellos con indicios o signos de desgaste, haciendo posible identificar la respuesta del sistema bajo diferentes condiciones, en algunos casos críticas o adversas; este análisis puede conducir a la optimización de funcionamiento y aplicabilidad.

La presente investigación se propone estudiar de forma experimental, la influencia de mini orificios en las frecuencias naturales de vibración de membranas. Cada perforación representa los daños físicos que se producen en estos elementos debido al uso continuo y al desgaste. Por medio de una excitación sonora originada por un altavoz y conectada a un generador de señales, se puede reconocer a través de los cambios en las amplitudes de movimiento de cada espécimen y de los niveles de sonido, el fenómeno de resonancia. A partir de

este estudio se puede identificar el comportamiento de estos elementos ante condiciones severas y deterioro. Para los Ingenieros esto es de suma importancia, ya que siempre se está en la búsqueda de mejorar las propiedades de los materiales, y así garantizar un buen funcionamiento de cada maquinaria durante un mayor tiempo de uso.

El trabajo se estructura en 5 capítulos donde se exponen entre otras cosas el problema planteado, los fundamentos teóricos de la investigación, la metodología empleada y los resultados obtenidos de los ensayos experimentales. A partir de ellos se plantean las conclusiones y recomendaciones producto de la investigación realizada.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El Problema de investigación es la parte fundamental de cada búsqueda y fomenta las ideas principales de cualquier trabajo, en este capítulo se desarrolla la motivación, el planteamiento del problema, los objetivos, la justificación y los alcances y limitaciones de la investigación realizada.

1.1. Motivación

El diseño de partes de maquinarias o estructuras debe involucrar el impacto de factores externos, además de los factores particulares del diseño, lo cual permite afinar la selección de parámetros y características de interés. De esta manera, cuando se diseña y se realiza un estudio dinámico se puede encontrar una propuesta que optimice el sistema, para que soporte las condiciones críticas a las que se someta el elemento. El uso de componentes en forma de membrana no escapa a esta tendencia, siendo amplio y variado el rango de aplicación en la industria.

Según sus aplicaciones las membranas deben soportar diferentes situaciones, entre ellas podemos mencionar: dilataciones y retracción de estructuras (membranas para trabajos de impermeabilización), vibraciones causadas por equipos, impactos, aplastamientos, punzonamientos, desgarres, succión, desgastes causados por abrasión y rozamiento, agresiones químicas y de temperatura. Estas condiciones pueden ocasionar daños irreversibles en el material que deben ser tomados en cuenta para mejorar las características del mismo, como es el caso particular de los plásticos que según el uso que va a cubrir el material se emplean diferentes componentes que mejoran sus propiedades mecánicas.

Algunas empresas toman en cuenta el desarrollo de la tecnología en creación de membranas muy en serio, para bombas en las cuales la agresión química y la temperatura del fluido hacen elevados los costos de mantenimiento, el desarrollo de nuevos materiales que soporten condiciones críticas es de suma importancia. Estas bombas utilizan polipropileno como elemento principal en la composición de sus membranas, este polímero termoplástico es familia cercana del polietileno, componente principal de lo especímenes puestos a prueba en esta investigación.

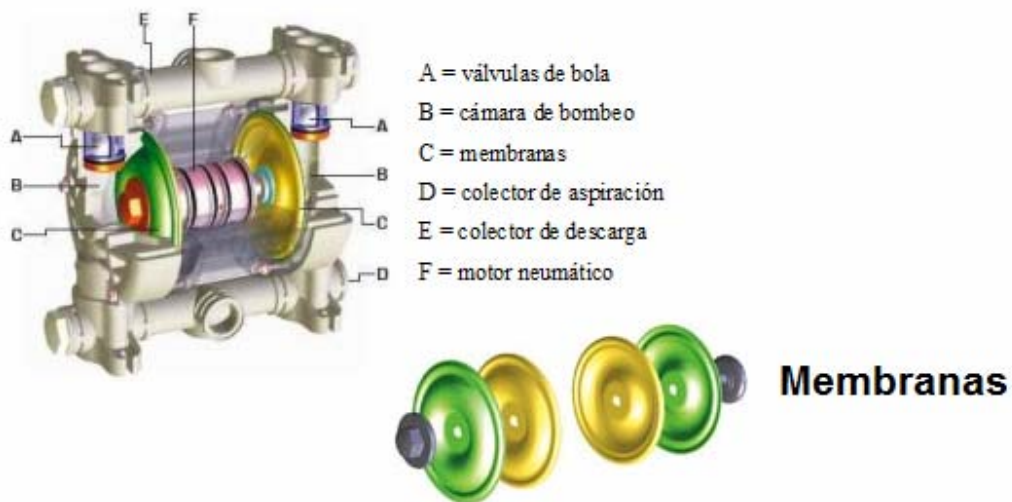


Figura 1.1: Estructura de una bomba de membrana. Fuente: DEBEM [On-Line]. Disponible en: www.debem.it/esp/boxer_es.html

El análisis dinámico de membranas puede realizarse a través de métodos matemáticos que generalizan su superficie como una sucesión infinita de cuerdas vibrantes, sin embargo el estudio de estos elementos también puede llevarse a cabo mediante técnicas experimentales, que con el debido soporte teórico aportan valiosa información y entregan de manera didáctica resultados más reales.

1.2. Planteamiento del Problema

Actualmente el uso de membranas como elementos constructivos es común en diversas aplicaciones industriales tales como: procesos de filtración, tratamientos de aguas residuales, aislamiento térmico, separación de gases y vapores, entre otros. El uso continuo puede conducir naturalmente al desgaste, lo cual se traduce en puntos de discontinuidad en el material de la membrana, o mini orificios; esto

puede modificar el desempeño dinámico del sistema y en consecuencia, alejarse considerablemente de los resultados deseados.

Los modelos teóricos para el análisis dinámico de membranas permiten abordar el problema en casos particulares, en donde están implícitas las condiciones que la identifican como tal. Es importante destacar que en situaciones prácticas, estas condiciones se cumplen de forma parcial, por lo cual el modelo teórico resulta insuficiente para predecir el efecto sobre el sistema y, por supuesto, sobre los procesos involucrados según su aplicación.

El deterioro o desgaste es un proceso irreversible vinculado a la aplicación particular, y que indudablemente tiene un impacto sobre el resultado esperado. Dado el amplio rango de aplicación de elementos en forma de membranas y considerando el efecto sobre el desempeño dinámico que puede originar el desgaste superficial, en este trabajo se propone analizar la influencia de mini orificios en las frecuencias naturales de vibración de membranas.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Analizar la influencia de mini orificios en las frecuencias naturales de vibración de membranas

1.3.2. Objetivos Específicos

1. Realizar una revisión bibliográfica de los trabajos de investigación desarrollados en el área de vibración libre de membranas.
2. Establecer los vínculos físicos, características morfológicas, estructurales y de composición de las membranas que serán consideradas en el estudio.
3. Rediseñar un banco de pruebas para el análisis dinámico de membranas considerando las características descritas en el punto 2.
4. Llevar a cabo las adaptaciones al banco de pruebas siguiendo las consideraciones de rediseño.

5. Llevar a cabo las pruebas de las membranas en el banco de ensayo.
6. Analizar los resultados obtenidos.
7. Redactar el informe final del trabajo especial de grado.

1.4. Justificación de la Investigación

El presente trabajo de investigación se fundamenta en la necesidad de identificar el efecto desde el punto de vista dinámico, que produce el desgaste en elementos en forma de membrana. Como valor agregado, el banco de pruebas empleado, será incorporado al Laboratorio de Vibraciones Mecánicas de esta Escuela, de esta forma el aporte del trabajo no sólo incluye los resultados de la investigación científica como tal, sino que considera la incorporación de una práctica de Laboratorio que permita a los estudiantes observar con detalle el efecto de las vibraciones en distintos tipos de materiales y geometrías.

1.5. Alcances y Limitaciones

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

- La excitación externa sobre la membrana será del tipo armónico y perpendicular a la mayor cantidad de la superficie en estudio.
- El material de las membranas deberá ser isótropo o materiales que puedan ser considerados como tales.
- El material de las membranas deberá ser homogéneo o materiales que puedan ser considerados como tales.
- El espesor de las membranas debe ser constante.
- El rediseño del banco de pruebas debe cumplir con los siguientes aspectos:
 - Dimensiones adecuadas para el ensayo de membranas de diferente geometría.
 - Posibilidad de establecer distintos vínculos físicos.
 - Diseño de fácil operación y manipulación.
 - Rediseño que garantice la seguridad del equipo y del operador durante el ensayo y traslado.

RECURSOS DISPONIBLES

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

1. Hardware

- (a) PC portátil inspiron 1420 1Ghz, 1 Gb RAM, DD 120 GB.
- (b) Impresora, escáner, copiadora HP psc 1210 all in one.

2. Software

- (a) Microsoft Windows Vista Home Basic
- (b) Microsoft Office 2003 Professional

3. Otros recursos:

- (a) Instalaciones y equipos del Laboratorio de Dinámica de Máquinas de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Venezuela.
- (b) Acceso a Internet en la Biblioteca Central y en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Venezuela
- (c) Material bibliográfico existente en las bibliotecas: Central, de la Facultad de Ingeniería, La Escuela de Ingeniería Mecánica y la Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Venezuela.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Toda investigación científica debe estar basada en fundamentos teóricos que respalden el progreso del aspecto experimental, en este capítulo se presentan los cimientos de los cuales parte el desarrollo del trabajo. Se comienza con los antecedentes, se hace una referencia respecto a la vibración en medios continuos, luego se incluye la definición de membrana anexando la misma desde el punto de vista dinámico, luego se exponen las ecuaciones que rigen el movimiento y por último se describe el desgaste y sus posibles consecuencias

2.1. Antecedentes de la Investigación

Jenkins y Korde (2006) relatan que a pesar de que los estudios de vibraciones en membranas se remontan a los años 1700, sólo algunos de estos han sido publicados en la literatura. Según estos investigadores la razón se debe a las dificultades experimentales inherentes a la escasa cantidad en masa y delgadez de la estructuras.

El estudio dinámico de elementos en forma de membrana para diversas aplicaciones ha crecido rápidamente en los últimos años. Al exponer este elemento a condiciones ambientales severas, las cuales pueden ocurrir en aplicaciones estructurales (figura I.3.), así como también en contacto con fluidos que experimenten cambios de presión, densidad, temperatura, etc., es posible detectar indicios de desgaste o deterioro de la superficie. Este desgaste superficial se puede evidenciar con puntos de discontinuidad del material o mini agujeros, con lo cual se modifican las características del sistema y su consecuente desempeño.

En este sentido W. H. Lin (1981), presenta un método analítico para el cálculo de las vibraciones transversales libres para membranas con agujeros excéntricos, aportando valiosa información sobre la determinación de la frecuencia natural y amplitud de estos elementos.

Por otra parte, Ventsel y Krauthammer (2001), establecen algunas condiciones para que un elemento sea considerado como membrana. Las membranas deben ser superficies suaves y continuas, los ejes pueden desplazarse libremente en la dirección de la normal al medio de la superficie y sus fronteras deben estar libres de fuerzas cortantes y momentos.

Filipich y Bambill (2005) destacan la influencia de los tipos de vínculos en la frecuencia natural de membranas, colocando vínculos intermedios hallaron las frecuencias naturales de vibración en ellas llegando a la conclusión de que son distintas a la teórica esperada.

Jenkins y Korde (2006) utilizaron una excitación armónica como la empleada en este trabajo, experimentaron con membranas circulares y demostraron que cuando la región de excitación es mucho más pequeña que el diámetro, las oscilaciones se vuelven más y más localizadas en esa zona. Además, con estas investigaciones también se puso de manifiesto que cuando la membrana es de tamaño finito, las oscilaciones tienden a ser cada vez más localizadas, con aumentos de la frecuencia para una determinada tensión. Este efecto se amplifica si se reduce la tensión en la membrana.

Febres (2007), determina la frecuencia natural de placas delgadas, su estudio se basa en el uso de una excitación no mecánica y de frecuencia variable. Más adelante Faragalli (2007), emplea la misma metodología en placas de diferentes espesores dejando una clara evidencia de la influencia de este parámetro sobre el desempeño dinámico. Faragalli propone el estudio de elementos estructurales en forma de placas delgadas con espesores menores a los considerados en su trabajo que se acerquen a lo que podría ser considerado como membrana.

2.2. Vibración en medios continuos

Los medios continuos son aquellos que poseen infinitos grados de libertad y por ende, un número infinito de modos de vibración. El material utilizado en este trabajo cumple con la Ley de Hooke, es decir que su elongamiento es elástico y directamente proporcional a la fuerza aplicada. Además de esto el elemento es ser homogéneo e isótropo.

Las vibraciones en medios continuos son ampliamente vistas en el campo de la ingeniería. Cuerdas vibrantes, vigas, placas, membranas y ejes de máquinas son sólo algunos de los casos que se pueden mencionar al respecto.

Cada sistema, sea continuo o no, posee una cantidad infinita de frecuencias naturales que son características propias de cada uno. Si el elemento es excitado en alguna de estas frecuencias su movimiento tendría una amplitud máxima, produciéndose así un efecto conocido como *resonancia*.

Ahora bien, el impacto negativo de la resonancia en componentes de máquinas, materiales y estructuras radica en la magnitud del movimiento generado, estas vibraciones pueden causar daños y desgastes que influyan en el desempeño dinámico y en la vida útil de cada uno.

2.2.1. Definición de Membrana

Algunos investigadores como Palacio (1999) y Macanás (2006), coinciden en la idea de que a pesar del auge y de la importancia que estos elementos tienen recientemente, la definición de “membrana” aún no está del todo clara, lo cual se debe a la variedad morfológica, estructural y de composición que poseen. Modificando ligeramente alguna de sus propiedades, se puede obtener un elemento totalmente distinto que se adapte mejor a las necesidades del fabricante, como por ejemplo en los procesos de filtración donde la permeabilidad entre membranas es diferente y va a depender del tipo de filtración que se esté realizando.

En el caso de una bomba de membrana, el posible desgaste de la superficie del elemento podría afectar notablemente el desempeño de la máquina. Estos desgastes pueden ser causantes de rangos de presión inadecuados así como también de la presencia de mini orificios en la superficie, que podrían ocasionar fugas de aire de una cámara a otra.

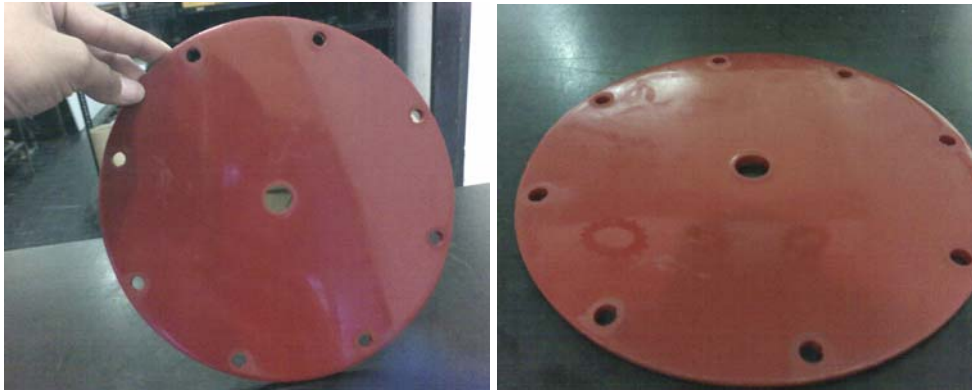


Figura 2.1: Membrana para Bombas de Riego, Parte I.

Fuente: el autor

Por otra parte, cuando se trata de aplicaciones estructurales, se observa que la exposición continua a condiciones ambientales severas tales como rayos solares, lluvias con tormentas y ráfagas de viento, son uno de los principales factores que contribuyen al desgaste de los mismos. Debido a esto, el desempeño dinámico de estas estructuras podría verse afectado de forma significativa, ejemplo de ello son las variaciones en el tensado del elemento y la presencia de mini orificios que pueden afectar su capacidad de proveer sombra y de soportar vientos de cualquier tipo.

Cualquier tipo de estructura y/o parte de alguna maquinaria sufre daños y deterioro asociados al trabajo que realizan. Tales cambios en la morfología afectan el funcionamiento del sistema. En general, al haber indicios de daños superficiales se produce un cambio en el comportamiento esperado, ejemplo de esto puede ser la presencia de agujeros en la superficie de una estructura, lo cual dejaría pasar el agua de lluvia y el sol y la presencia de los mismos en aislantes

térmicos podrían permitir el paso de calor. Tal es el caso de membranas utilizadas para mantos asfálticos impermeabilizantes en azoteas, la presencia de excesiva carga impuesta (como por ejemplo el peso de radio bases repetidoras de telefonía celular), entre otros factores pueden causar el deterioro temprano además de filtraciones en apartamentos.



Figura 2.2.: Daños en mantos asfálticos. Fuente: Mario Gorrin, fotografía tomada el 20/08/2008



Figura 2.3: Radio base repetidora en azotea, sitio impermeabilizado con membrana asfáltica y pinturas especiales. Fuente: Mario Gorrin, fotografía tomada el 11/09/2008

En el siguiente gráfico, se observa un crecimiento en el número de publicaciones (Journal) sobre las aplicaciones de elementos en forma de membrana, en esta última década.

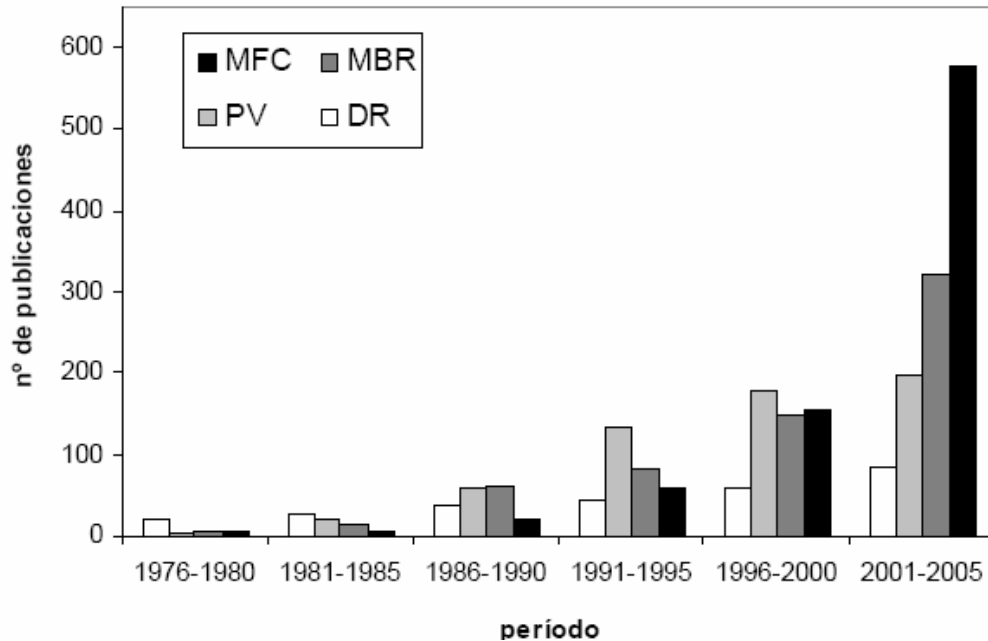


Gráfico 2.1.: Estado de la investigación de algunas aplicaciones de membrana. Fuente: Macanás, Jorge. (2006). *Desarrollo de nuevas membranas compuestas para la separación de iones metálicos y aplicaciones electroquímicas*. Trabajo doctoral, Universidad Autónoma de Barcelona, Barcelona.

Leyenda: MBR; tratamiento de aguas residuales, MFC; generación de energía eléctrica, PV; separación de gases y preevaporación, DR; liberación controlada de fármacos

2.2.2. Definición desde el punto de vista de la dinámica

El análisis dinámico y matemático de membranas se realiza a partir del estudio de una cuerda vibrante. La superficie de estos elementos es considerada como “una serie completa de cuerdas tensas paralelas unas a otras a lo largo (por ejemplo) de la dirección x, en las que todas han de satisfacer a dicha dirección” French (1974). Para completar esta definición tenemos lo dicho por Ventsel y Krauthammer en el año 2001 y ya mencionado anteriormente en los antecedentes de este trabajo.

2.2.3. Ecuaciones Fundamentales de la Teoría de membranas

i. Deducción de la Ecuación de Diferencial de Movimiento

Se puede representar gráficamente en un plano tridimensional a una membrana de la siguiente forma:

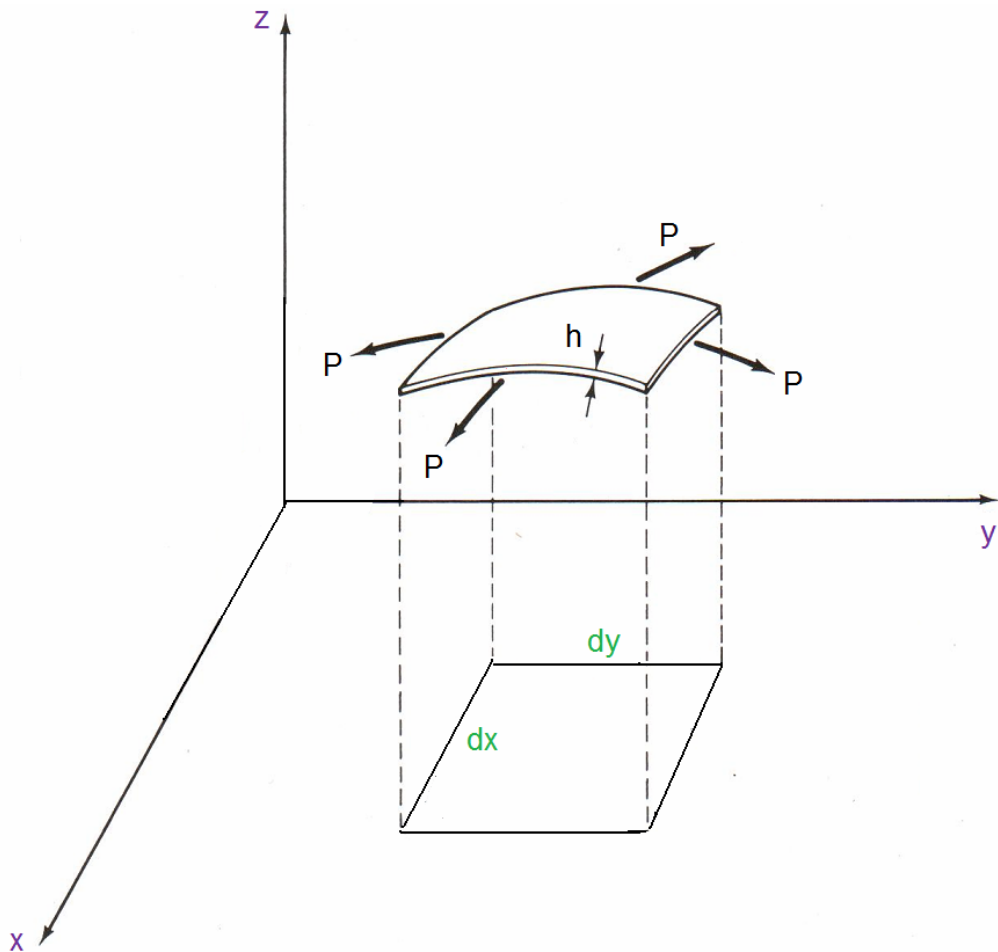


Figura 2.4. Elemento Diferencial de masa. Fuente: el autor

Consideraciones:

- La membrana se encuentra inicialmente tensada
- La tensión es uniforme a lo largo de su superficie
- Sistema en estudio un diferencial de masa “dm”
- Siendo $u(x, y, t)$ el movimiento

La representación gráfica de las fuerzas que actúan sobre la membrana son las siguientes

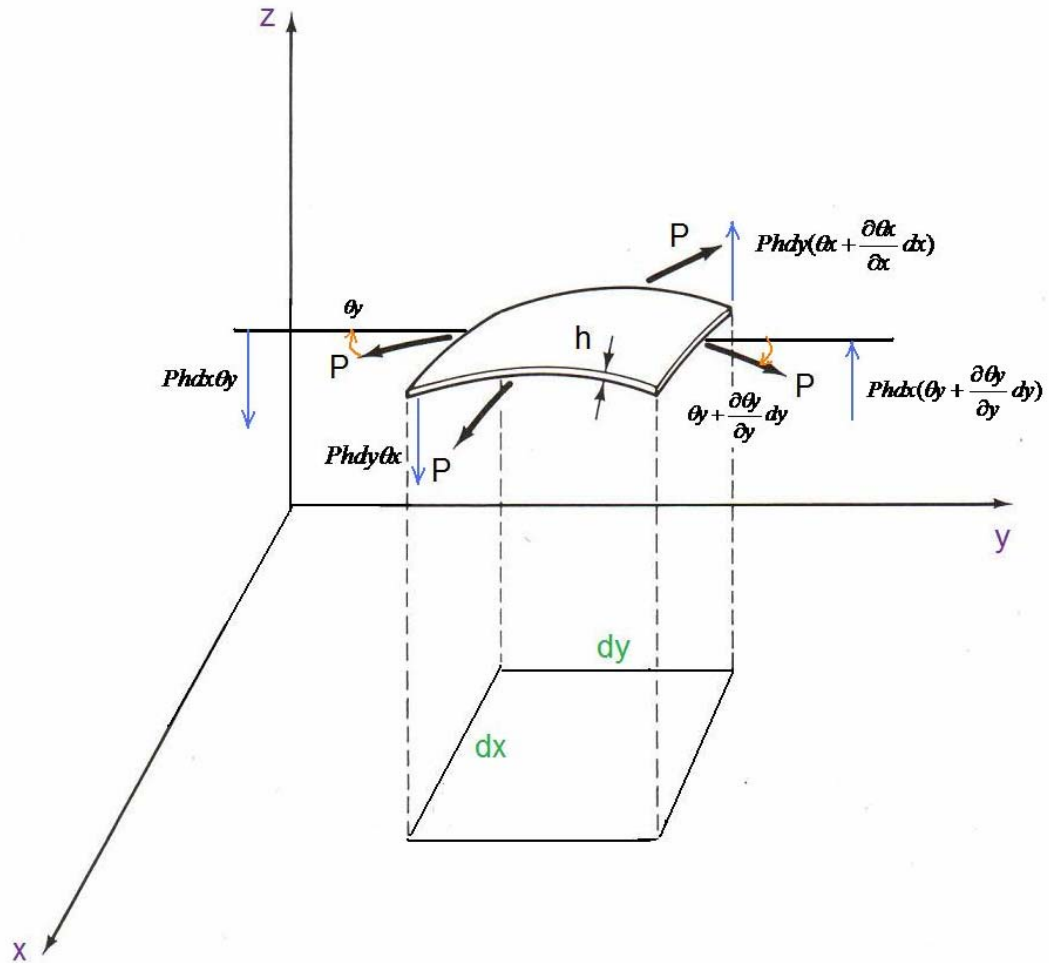


Figura 2.5. Análisis de Fuerzas en un elemento diferencial de membrana. Fuente: el autor.

Considerando el movimiento perpendicular a la superficie, es decir en el plano Z, la sumatoria de las fuerzas están representadas por las siguientes ecuaciones:

Ec. (2.1):

$$\sum F_z = -Phdx\theta_y + Phdx\left(\theta_y + \frac{\partial\theta_y}{\partial y} dy\right) - Phdy\theta_x + Phdy\left(\theta_x + \frac{\partial\theta_x}{\partial x} dx\right)$$

$$\sum F_z = Phdy \frac{\partial\theta_x}{\partial x} dx + Phdx \frac{\partial\theta_y}{\partial y} dy \quad (2.2)$$

Finalmente queda la siguiente ecuación:

$$\sum F_z = Phdydx \left(\frac{\partial \theta_x}{\partial x} + \frac{\partial \theta_y}{\partial y} \right) \quad (2.3)$$

Sabiendo que:

$$\rho = dm/dv \quad (2.4)$$

$$dv = dx dy h \quad (2.4)$$

$$dm = \rho h dx dy \quad (2.5)$$

$$\theta_x = \partial u / \partial x \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) = \frac{\partial \theta_x}{\partial x} \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial \theta_x}{\partial x} \quad (2.8)$$

$$\theta_y = \partial u / \partial y \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) = \frac{\partial \theta_y}{\partial y} \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{\partial \theta_y}{\partial y} \quad (2.11)$$

Sustituyendo las Ecuaciones (2.8) y (2.11) en la ecuación (2.3) se tiene:

$$\boxed{\sum F_z = Phdxdy\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)} \quad (2.12)$$

De la tercera ley de Newton se sabe que:

$$\sum F = ma \quad (2.13)$$

$$\boxed{\sum F_z = \partial m \frac{\partial^2 u(x, y, t)}{\partial t^2}} \quad (2.14)$$

Igualando la ecuación (2.12) y la ecuación (2.14):

$$Phdxdy\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) = \rho h dxdy \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.15)$$

Desarrollando la ecuación:

$$\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) = \frac{\rho}{P} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.16)$$

Con la velocidad de Propagación definida como:

$$c = \sqrt{\frac{P}{\rho}} \quad (2.17)$$

Y sustituyendo la ecuación (2.17) en la ecuación (2.16):

$$\boxed{\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}} \quad \text{Ecuación Diferencia del movimiento de una membrana} \quad (2.18)$$

ii. Deducción de la ecuación de Frecuencia Natural para una membrana rectangular

Considerando una membrana Rectangular fija en sus extremos tal como se aprecia en la figura:



Figura 2.6. Membrana Rectangular.

Fuente: el autor

$$\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.18)$$

$$u(x, y, t) = \varphi(x, y) \quad \text{Posición} \quad (2.19)$$

$$u_t(x, y, t) = \psi(x, y) \quad \text{Velocidad} \quad (2.20)$$

Condiciones de borde:

$$u(0, y, t) = u(L_x, y, t) = 0 \quad (2.21)$$

$$u(x, 0, t) = u(x, L_y, t) = 0 \quad (2.22)$$

Aplicando el método de separación de variables se obtiene la ecuación de frecuencia natural de una membrana rectangular, para esto se considera que la solución de la ecuación diferencial es de la forma:

$$u(x, y, t) = X(x)Y(y)T(t) \quad (2.23)$$

De tal forma que las condiciones de frontera quedan:

$$u(0, y, t) = X(0)Y(y)T(t) = 0 \quad X(0) = 0 \quad (2.24)$$

$$u(x, 0, t) = X(x)Y(0)T(t) = 0 \quad Y(0) = 0 \quad (2.25)$$

$$u(L_x, y, t) = X(L_x)Y(y)T(t) = 0 \quad X(L_x) = 0 \quad (2.26)$$

$$u(x, L_y, t) = X(x)Y(L_y)T(t) = 0 \quad Y(L_y) = 0 \quad (2.27)$$

Sustituyendo la ecuación (2.23) en la ecuación (2.18)

$$X''Y.T + X.Y''T = \frac{1}{c^2} X.Y.T'' \quad (2.28)$$

Dividiendo todo entre: $X.Y.T$ se obtiene la ecuación:

$$\frac{X''}{X} + \frac{Y''}{Y} = \frac{1}{c^2} \frac{T''}{T} \quad (2.29)$$

Con las siguientes ecuaciones:

$$C_1 + C_2 = -C_3 \quad (2.30)$$

$$\frac{X''}{X} = -C_1 \quad (2.31)$$

$$\frac{Y''}{Y} = -C_2 \quad (2.32)$$

$$\frac{1}{c^2} T'' = -C_3 \quad (2.33)$$

Se obtienen tres ecuaciones diferenciales:

$$X'' + C_1 X = 0 \quad (2.34)$$

$$X(0) = X(L_x) = 0 \quad (2.35)$$

$$Y'' + C_2 Y = 0 \quad (2.36)$$

$$Y(0) = Y(L_y) = 0 \quad (2.37)$$

$$T'' + C_3 \cdot c \cdot T = 0 \quad (2.38)$$

La solución de estas ecuaciones diferenciales de coeficientes constantes está dada de la siguiente forma:

$$X_m(x) = A_m \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi x}{L_x}\right) \quad (2.39)$$

$$C_1 = \lambda_m^2 = \left(\frac{m\pi}{L_x}\right)^2 \quad (2.40)$$

$$Y_n(x) = B_n \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi x}{L_y}\right) \quad (2.41)$$

$$C_2 = \mu_n^2 = \left(\frac{n\pi}{L_y}\right)^2 \quad (2.42)$$

$$T_{mn}(t) = B_1 \cos(c.k_{mn}.t) + B_2 \sin(c.k_{mn}.t) \quad (2.43)$$

$$C_3 = K_{mn}^2 = \lambda_m^2 + \mu_n^2 \quad (2.44)$$

De esta forma la solución particular de la ecuación viene dada por:

$$u_{mn}(x, y, t) = X_m(x) \cdot Y_n(y) \cdot T_{mn}(t) \quad (2.45)$$

Ec. (2.46):

$$u_{mn}(x, y, t) = (A_{mn} \cos(c.k_{mn}.t) + B_{mn} \text{sen}(c.k_{mn}.t)) \cdot \text{sen}\left(\frac{m.\pi.x}{L_x}\right) \cdot \text{sen}\left(\frac{n.\pi.y}{L_y}\right)$$

De esta forma la solución general viene dada por:

Ec. (2.47):

$$u(x, y, t) \sum_{m,n} u_{mn}(x, y, t)$$

Ec. (2.48):

$$u(x, y, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} (A_{mn} \cos(c.k_{mn}.t) + B_{mn} \text{sen}(c.k_{mn}.t)) \cdot \text{sen}\left(\frac{m.\pi.x}{L_x}\right) \cdot \text{sen}\left(\frac{n.\pi.y}{L_y}\right)$$

Ec. (2.49):

$$u(x, y, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} (A_{mn} \cos(w_{mn}.t) + B_{mn} \text{sen}(w_{mn}.t)) \cdot \text{sen}\left(\frac{m.\pi.x}{L_x}\right) \cdot \text{sen}\left(\frac{n.\pi.y}{L_y}\right)$$

Donde:

$$w_{mn} = c.k_{mn} \tag{2.50}$$

$$k_{mn} = \sqrt{\left(\frac{m.\pi}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n.\pi}{L_y}\right)^2} \tag{2.51}$$

Los coeficientes A_{mn} y B_{mn} se obtienen a partir de las condiciones iniciales

Entonces las **frecuencias naturales de una membrana rectangular** vienen dada por la ecuación:

$$w_{mn} = c.k_{mn} = c \sqrt{\left(\frac{m.\pi}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n.\pi}{L_y}\right)^2} \tag{2.52}$$

2.2.4. Desgaste de membranas

Kalpakjian, S. y Schmid, S. (2002) definieron el desgaste como “la pérdida o remoción progresiva de material de una superficie”, casi ningún equipo que sea expuesto al uso continuo se escapa al deterioro de los elementos que lo componen. En el caso de las membranas esta condición no evade la realidad, en algunas de sus aplicaciones estas piezas son sometidas a cambios de presión y temperatura, en otras son expuestas a agentes químicos y condiciones ambientales que con la práctica constante podrían ocasionar daños irreversibles que afecten el funcionamiento del mecanismo del cual forman parte.

La magnitud del problema del desgaste radica en que cada vez más se exige que los materiales tengan una vida útil mayor y un uso prolongado durante ese período. Algunas membranas como las utilizadas para materiales de empaque, bombas y compresores son elaboradas con plásticos (poliuretano, polietileno, entre otros), el comportamiento de estos elementos frente al desgaste es parecido al de los metales y a pesar de que cada día elaboran estos materiales reforzándolos para evitar su deterioro esta condición tarde o temprano se manifiesta.

El desgaste puede manifestarse de diferentes formas: ranuras, ralladuras, fracturas, orificios, grietas, que pueden ocasionar daños en la superficie de todo tipo de materiales y específicamente en membranas. El estudio experimental de este trabajo incluye la presencia de mini orificios como representación de los daños debidos al uso prolongado.

Comentario complementario:

Del diccionario de la real Academia española la palabra *mini* significa “pequeño, breve o corto” y la palabra *orificio* significa “abertura, agujero”. Solamente estas definiciones no dan una clara explicación. Sin embargo, si se unen estos conceptos al de *micro* que según a la misma fuente equivale a “muy pequeño, una millonésima (10^{-6}) parte” y que es mundialmente utilizado y denotado por el símbolo μ , se puede formar un concepto más preciso. Conceptos disponibles en: <http://www.rae.es/rae.html>.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

Los fundamentos metodológicos de la presente investigación científica se muestran en este capítulo, comenzando por el tipo y nivel de la investigación realizada, el tipo de muestreo, variables, criterios y aspectos considerados durante los ensayos.

3.1. Tipo de Investigación

La investigación de este trabajo es del tipo *experimental*, donde las variables utilizadas son controladas para su estudio, como es el caso de la tensión, la distancia de la fuente de excitación al material, el tamaño y el tipo de material, entre otras. Tal como lo dice Ramírez (1999) “La diferencia básica de la investigación experimental con respecto a otros tipos de investigaciones reside precisamente en el grado de control de las variables”.

3.1.1. Nivel de la Investigación

El nivel de la investigación realizada es del tipo *exploratorio*, donde no se conoce la influencia de mini orificios en las frecuencias naturales de vibración en membranas, desarrollando para ello una serie de pruebas con algunas variables controladas.

3.1.2. Tipo de muestreo

El tipo de muestreo establecido para la investigación es *no probabilístico*, en el que se desconoce la probabilidad que tiene cualquier espécimen para formar parte de la muestra. La razón por la cual no se realiza un muestreo probabilístico es que se desconoce todo el registro de la población en estudio, es decir, que no se tiene información precisa de las características del material, proceso de fabricación y

proporciones de los diferentes elementos que se emplean en la elaboración de las membranas.

La selección de los elementos o especímenes se realizó por medio de un muestreo *casual* en donde se elijen las membranas a juicio del investigador.

Con respecto a la ubicación de los mini orificios en las membranas de prueba, en la revisión bibliográfica realizada no se evidencia una metodología para la disposición de los mismos, por lo tanto en esta investigación se considera una malla circular, con puntos equidistantes, de manera de ubicar los orificios en orden creciente desde el centro de la geometría hacia los laterales. Este arreglo fue realizado considerando el efecto del pistón central sobre la superficie de las membranas de bombas y compresores cuya geometría es circular.

En la bibliografía consultada no se refleja una clara definición de “*mini orificios*”, por lo tanto según las investigaciones y consultas a destacados profesores de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, el concepto de *mini orificio* es considerado como el de una perforación circular de aproximadamente 0,001 a 0,002 m. de diámetro que corresponden del 0,33% al 0,66% de la longitud de los laterales de la membrana. A través de los mini orificios se pretende simular el efecto de la erosión o desgaste que cualquier agente externo pueda causarle al material por consecuencia de la rutina.

CAPÍTULO IV

MARCO EXPERIMENTAL

El marco experimental incluye todo lo referente al desarrollo de la investigación científica, comenzando por los equipos e instrumentos empleados y la incertidumbre de los mismos, continuando con el rediseño y condición final del banco de pruebas, las características de los especímenes en estudio, el procedimiento experimental donde se explica paso a paso la metodología para realizar los ensayos, las variables en estudio y el esquema donde se da una clara idea de la disposición general de los equipos.

4.1. Banco de Pruebas

4.1.1. Equipos e Instrumentos

Durante las actividades se considera el tipo de excitación perpendicular a la mayor superficie de las membranas; ésta se induce mediante una onda sonora de frecuencia variable.

A continuación se presenta una tabla con las características de los equipos e instrumentos empleados en los ensayos.

Tabla 4.1 Ficha técnica de los equipos e instrumentos utilizados en los ensayos

EQUIPOS E INSTRUMENTOS			
Tipo	Modelo	Rango de Trabajo	Incertidumbre
Generador de señal	LAG - 125	1 a 100.000 Hz	Varía según la frecuencia de trabajo (Ver Tabla 4.2)
Amplificador de audio	DA – 333	0 a 20 watos	NA
Osciloscopio	DSO-2090 USB	Para el eje Vertical: Rango de trabajo de 10 mili Voltios a 5 Voltios. Para el eje Horizontal: Rango de trabajo de 50 nanosegundos a 0.5 segundos.	Para el eje Vertical: Desviación de +/- 10 milivoltios. Para el eje Horizontal: desviación de +/- 4 nanosegundos.
Sonómetro	Extech 407730	40 a 130 dB	+/- 2 dB
Altavoz	Subwoofer Modelo W7-120 150 W y 4 Ω	38-4500 Hz	NA
Transductor	Modelo Buzzer	NA	NA
Luz Estroboscópica	Model 1965	No se especifica	NA
Brazo Mecánico	Soporte para Lámpara	NA	NA
CABLES			
Cantidad	Nº	Tipo	Terminales
1	18	Negro - Rojo	RCA – Caimán (Figura 4.6.)
1	18	Negro - Rojo	Plano – Banana (Figura 4.7.)

Generador de señal marca Leader

La incertidumbre del equipo varía según la siguiente tabla:

Tabla 4.2 Incertidumbre del generador de señal

Rango de Frecuencias (Hz)	Incertidumbre del Equipo (Hz)
1 a 1.2	0.02
1.2 a 2	0.05
2 a 4	0.1
4 a 6	0.2
6 a 10	0.5

Las frecuencias anteriormente descritas alcanzan los 10 Hz, sin embargo para valores de 10 a 100 Hz se multiplica por diez los valores de la tabla anterior, de 100 a 1000 se multiplican por 100 y así sucesivamente.



Figura 4.1. Generador de Señal. Fuente: el autor



Figura 4.2. Amplificador de audio. Fuente: el autor



Figura 4.3. Osciloscopio. Fuente: el autor



Figura 4.4. Sonómetro. Fuente: el autor



Figura 4.5. Altavoz. Fuente: el autor



Figura 4.6. Transductor. Fuente: el autor.



Figura 4.7. Brazo Mecánico. Fuente: el autor



Figura 4.8. Cable N° 18 Negro- Rojo, terminales: RCA - caimán



Figura 4.9. Cable N° 18 Negro- Rojo, terminales: plano - banana

4.1.2. Rediseño y construcción del Banco de Pruebas

El análisis de los bancos de pruebas empleados en trabajos precedentes, condujo a algunas modificaciones pertinentes según las necesidades impuestas para esta investigación. Para ello se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:

- Seguridad del operador, los equipos e instrumentos utilizados no deben causar ningún daño al operador por el manejo de los mismos, en caso de que sea necesario se sugiere el uso de instrumentos o equipos de protección y seguridad industrial que garanticen la integridad física de las personas que trabajan cerca del banco de pruebas.
- Recursos disponibles, el banco de prueba debe ser realizado con los equipos e instrumentos disponibles para la investigación.
- Dimensiones adecuadas, en una geometría de excesivo tamaño no es posible representar con los equipos e instrumentos disponibles, vibraciones en el material que sean significativas para el análisis experimental. A su vez para geometrías pequeñas se cumple también dicha limitación, es por esto que se debe rediseñar buscando una geometría intermedia que permita estudiar el desempeño dinámico del material empleado.
- Factibilidad de fabricación, los materiales que se utilicen en la elaboración del rediseño del banco de pruebas deben encontrarse fácilmente en el mercado nacional, debe ser factible la fabricación desde el punto de vista de los procesos que incluyen la elaboración de sus partes.
- Bajo Costo, incluye todo lo referente al tipo de materiales empleados para la elaboración del banco de pruebas.
- Operabilidad, el banco de pruebas debe ensamblarse de una manera sencilla, donde se realicen demostraciones ilustrativas que contribuyan a la comprensión de los fenómenos físicos que en el se estudian.

i. Materiales

Los materiales utilizados para realizar el diseño final del banco de pruebas incluyen los siguientes componentes:

Madera

La estructura que constituye el soporte para el altavoz se elaboró con visopán y el resto de los elementos de madera donde se colocaría la base para la membrana se realizó de cedro, con lo cual se puede proporcionar estabilidad y rigidez sin que ello resulte pesado o incómodo durante el uso. La madera es un material que permite cortes de cierta precisión y de bajo costo.



Figura 4.10. Trozos de madera para la base. Fuente: el auto

Los cortes de la madera se hicieron según los planos presentados en la sección de planos y esquemas, páginas 38 y 39, láminas 2 y 3.

Acero Inoxidable

Para la sección superior del banco de pruebas se utilizó acero inoxidable, por su capacidad para soportar el peso, durabilidad y acabado superficial.



Figura 4.11. Láminas de acero inoxidable. Fuente: el autor.

Al igual que la base de madera, los cortes del acero se hicieron según los planos presentados en la sección de planos y esquemas, página 40 lámina 4.

Aislante

Como aislante se utilizó poliestireno expandido, es un material que proporciona buenas condiciones de aislamiento a las vibraciones debidas a la transmisibilidad y a la condición de resonancia que se inducen en las membranas.



Figura 4.12. Poliestireno expandido. Fuente: el autor.

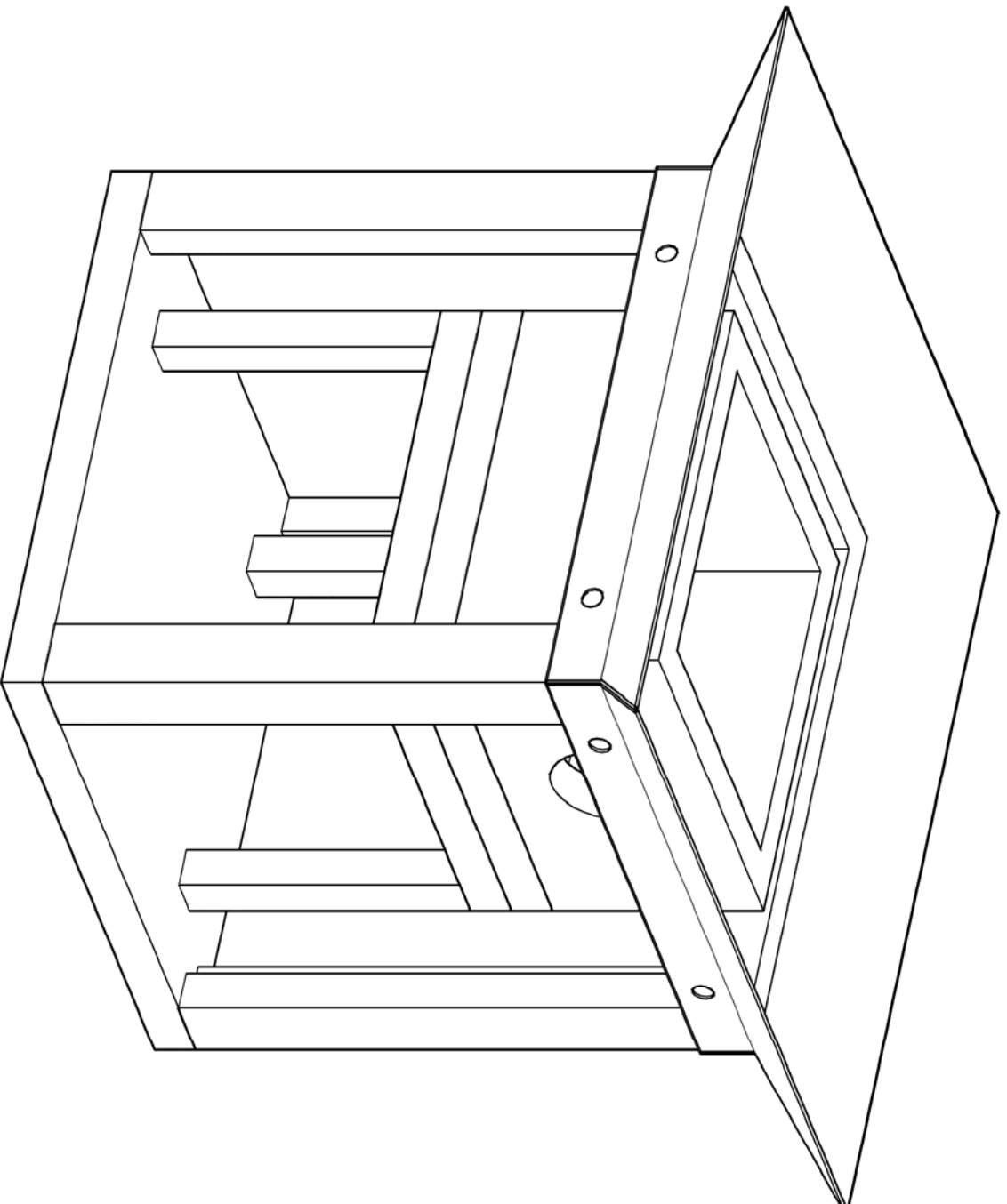
ii. Dimensiones y Geometrías

En este trabajo se reportan geometrías del tipo cuadrada, el banco de pruebas permite también ensayos de membranas de diversas formas elípticas y circulares de diversos diámetros. Con respecto a las dimensiones del banco de pruebas se especifican en la siguiente sección en donde se colocan los planos de su diseño.

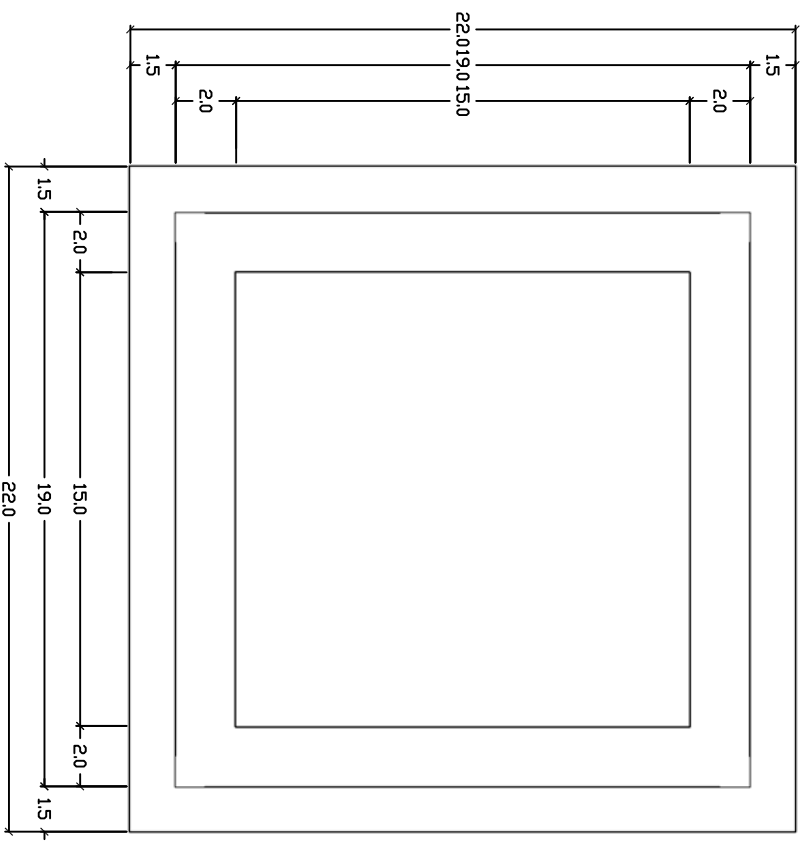
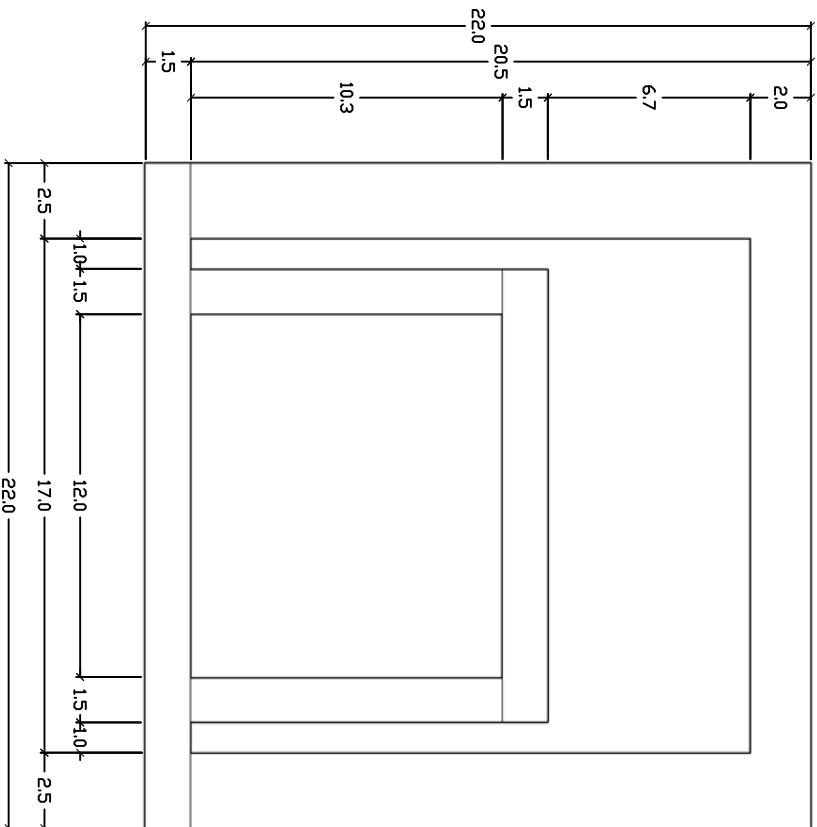


Figura 4.13. Aros para ensayos de geometrías circulares y elípticas. Fuente: el autor.

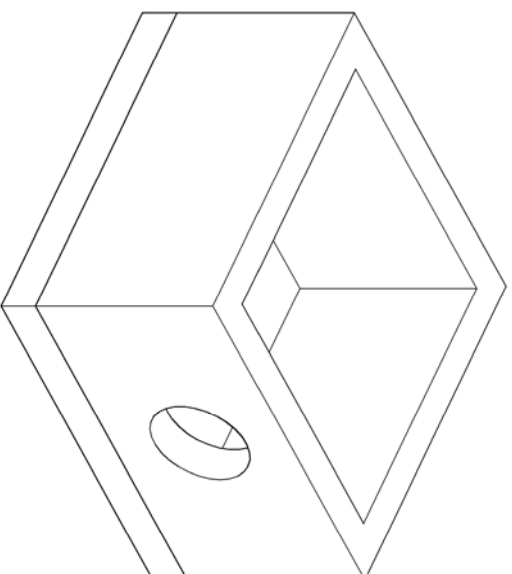
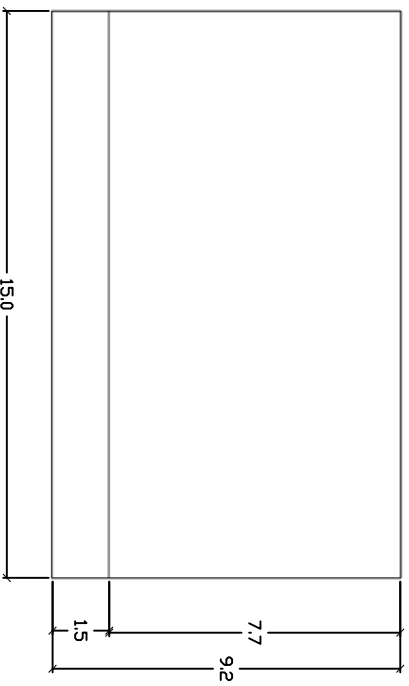
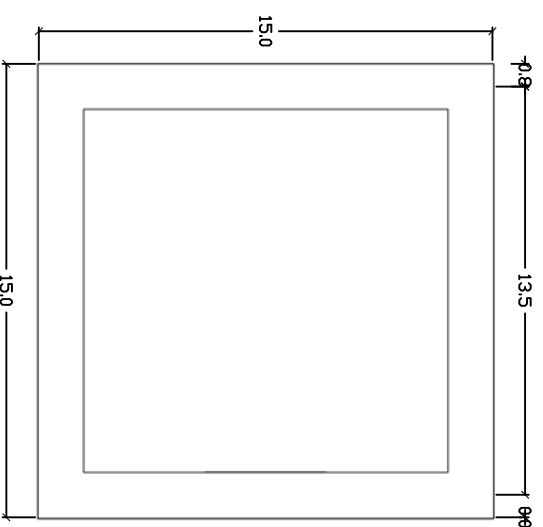
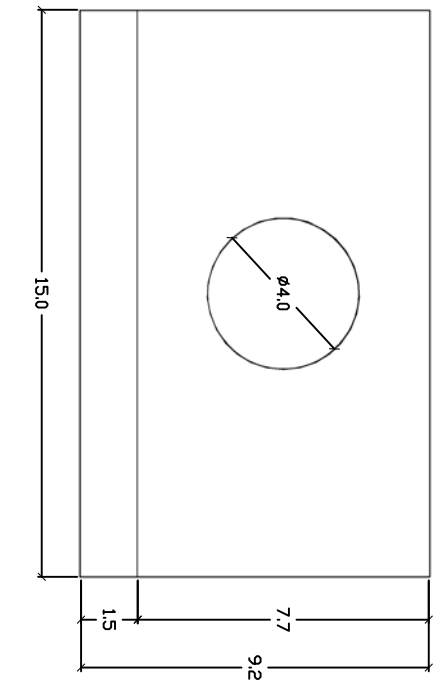
ii. Planos y Esquemas



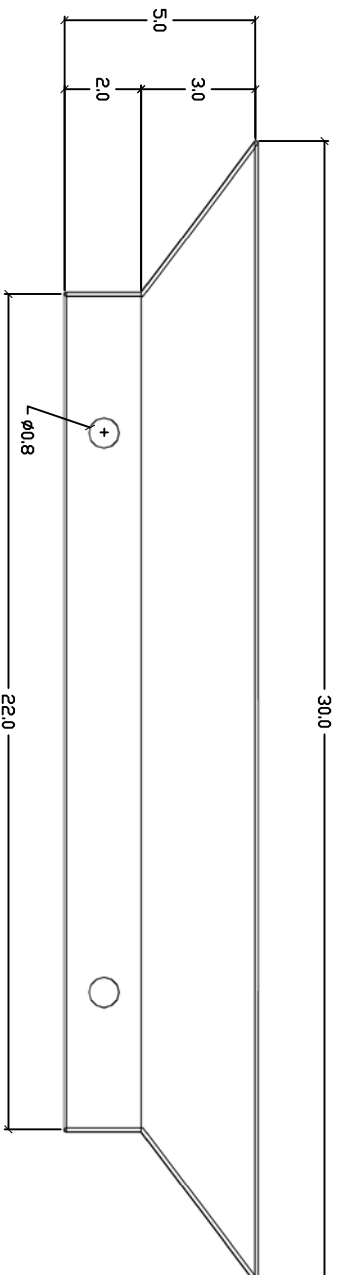
UCV		
Escuela de Ingeniería Mecánica	Sotórzano Luna, Johana Alexandra	Lámina
Título: Base de Prueba	Medidas no escaladas	número
Fecha: 15 de Septiembre del 2008	Unidades dadas en cm.	1



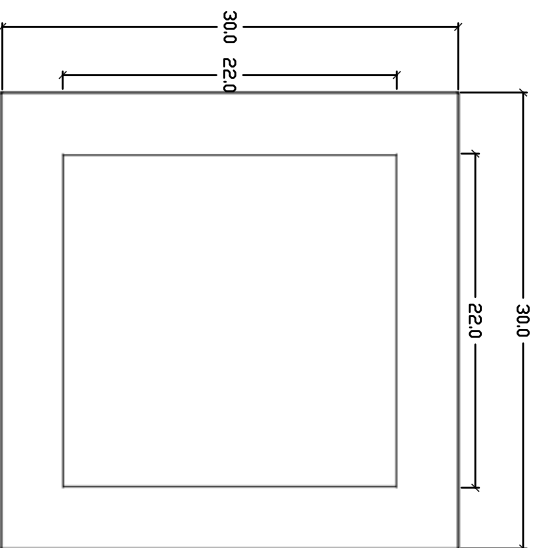
UCV	Escuela de Ingeniería Mecánica	Sotórzano Luna, Johana Alexandra	Lámina número 2
	Título: Base de madera	Escala 1 : 0.25	
	Fecha: 15 de Septiembre del 2008	Unidades dadas en cm.	



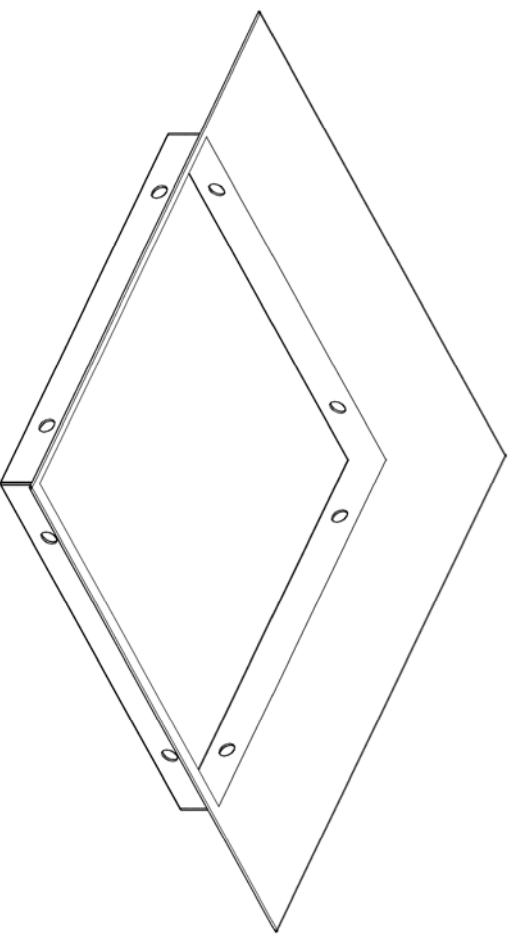
UCV	Escuela de Ingeniería Mecánica	Sotórzano Luna, Johana Alexandra	Lámina número 3
	Título: Caja de Corneta	Escala 1 : 0.20	
	Fecha: 15 de Septiembre del 2008	Unidades dadas en cm.	



Escala 1 : 0.20



Escala 1 : 0.50



UCV			
Escuela de Ingeniería Mecánica	Sotórzano Luna, Johana Alexandra	Lámina	número 4
Título: Soporte de Membrana	Escalas las indicadas		
Fecha: 15 de Septiembre del 2008	Unidades dadas en cm.		

v. Condición final



Figura 4.14. Banco de prueba en su condición final. Fuente: el autor.

4.2. Representación Física de la condición de Tensión

Jenkins y Korde (2006) Realizaron experimentos de vibración en membranas circulares, en donde el valor de la variable tensión era aproximada según lo explican en la siguiente afirmación: “Es fácil demostrar que el esfuerzo máximo debido a la libre determinación de peso en una tira de membrana en posición vertical sólo depende de la masa y la densidad de longitud de la tira y la aceleración gravitacional local”. En este trabajo se utilizará una forma de ejercer tensión que cumple con lo dicho por estos investigadores.

La tensión proporcionada en los extremos de las membranas se realizó empleando cilindros circulares de sección constante con la intención de mantener una condición de tensión de igual magnitud en toda la periferia. En la figura siguiente se ilustra dicha situación:



Figura 4.15. Vista general de posición de los cilindros.

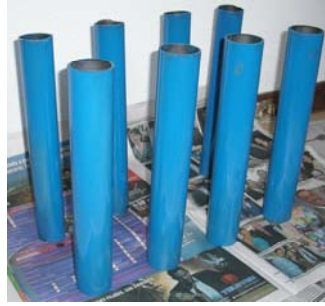


Figura 4.16. Cilindros de Acero. Fuente: el autor.

La membrana es colocada de manera que se suspenden libremente cargas de igual magnitud en sus extremos, el valor de la tensión es directamente proporcional a dicha carga según lo demuestra la siguiente ecuación:

$$\vec{P} = \frac{\vec{F}}{A} \quad (4.1)$$

$$\vec{F} = m \times \vec{g} \quad (4.2)$$

Donde: \vec{P} es la tensión por unidad de superficie y \vec{F} es la carga aplicada.

Además, se puede demostrar que la fuerza de contacto entre los cilindros se determina de acuerdo con el análisis de cuerpo libre estático de las cargas y que la misma puede considerarse despreciable:

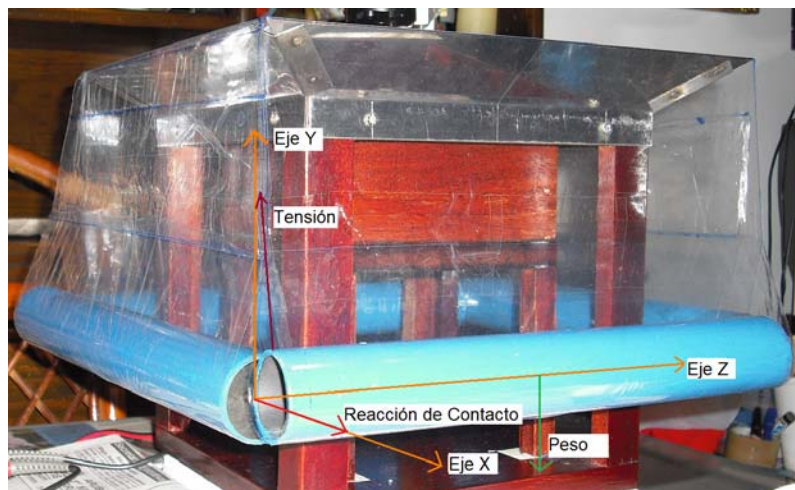


Figura 4.17. Esquema de fuerzas. Fuente: el autor.

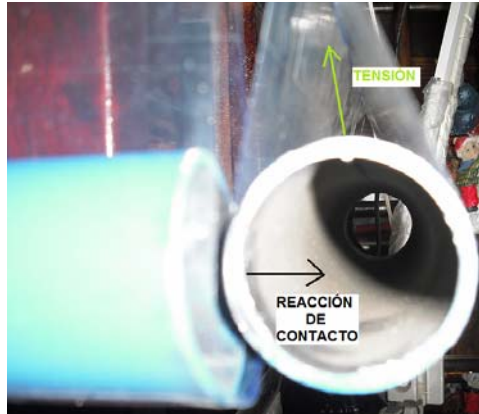


Figura 4.18. Esquema de tensión y reacción de contacto. Fuente: el autor.

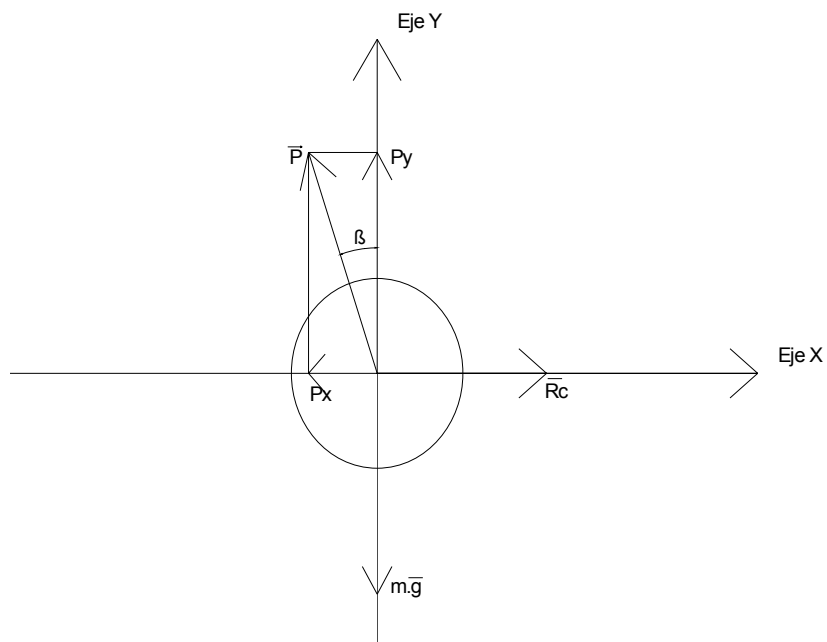


Figura 4.19. Diagrama de cuerpo libre de la sección transversal de un cilindro. Fuente: el autor.

Donde:

\overline{Rc} : es el vector reacción de contacto entre los dos cilindros.

B: es el ángulo que forma el vector tensión con el eje vertical.

$m \cdot \vec{g}$: es la masa de cada cilindro por el vector aceleración de gravedad.

Según el diagrama planteado en la figura anterior se tienen las siguientes Sumatorias de fuerzas:

$$\sum F_x = R_c - P \sin \beta = 0 \quad (4.3)$$

$$\sum F_y = P \cos \beta - mg = 0 \quad (4.4)$$

Despejando R_c de la Ecuación (4.3) se tiene:

$$R_c = P \sin \beta \quad (4.5)$$

Despejando P de la ecuación (4.3) se tiene:

$$P = \frac{mg}{\cos \beta} \quad (4.6)$$

Sustituyendo la ecuación (4.6) en la ecuación (4.5), se obtiene:

$$R_c = mg \tan \theta \quad (4.7)$$

Como los ángulos de la tensión son relativamente pequeños (no superan los 5°), la tangente del ángulo tiende a cero y por consiguiente la reacción de contacto se hace despreciable. Es por esto que se considera que la magnitud de la tensión es básicamente la fuerza aplicada por las cargas.

Es importante que la magnitud del peso colocado en la superficie del material no sobrepase su carga a ruptura ya que en ese caso, se hacen daños irreversibles en el material. La carga colocada al realizar los ensayos es suficiente para tensar su área y no perjudica las condiciones del mismo.

4.3. Características de los especímenes de prueba

4.3.1. Material

Para determinar el material de las membranas se estudiaron especímenes de diversa naturaleza. Entre ellos una membrana para bombas de riego (ver figura 2.1), sin embargo debido a la rigidez de la misma los equipos existentes en el laboratorio no son capaces de inducir vibraciones significativas en ella.



Figura 4.20. Membranas para bombas de riego parte II. Fuente: el autor.

También se consideró una membrana para radiador, que es un material con las mismas características del aluminio comercial y aunque su rigidez permite que los equipos de laboratorio proporcionen en ella amplitudes de vibración considerables, la condición de resonancia no resulta evidente, lo cual dificulta identificar este estado para llevar a cabo los ensayos.



Figura 4.21. Membranas para radiadores. Fuente: el autor.

Se ensayaron especímenes a base de polietileno con mayores propiedades elásticas, en los cuales la condición de resonancia es evidente para algunas de sus frecuencias naturales. Además, se puede observar el movimiento de la superficie de la membrana con la ayuda de una luz estroboscópica, este suceso es de especial interés ya que ayuda a entender de una manera más didáctica el desempeño dinámico del material.

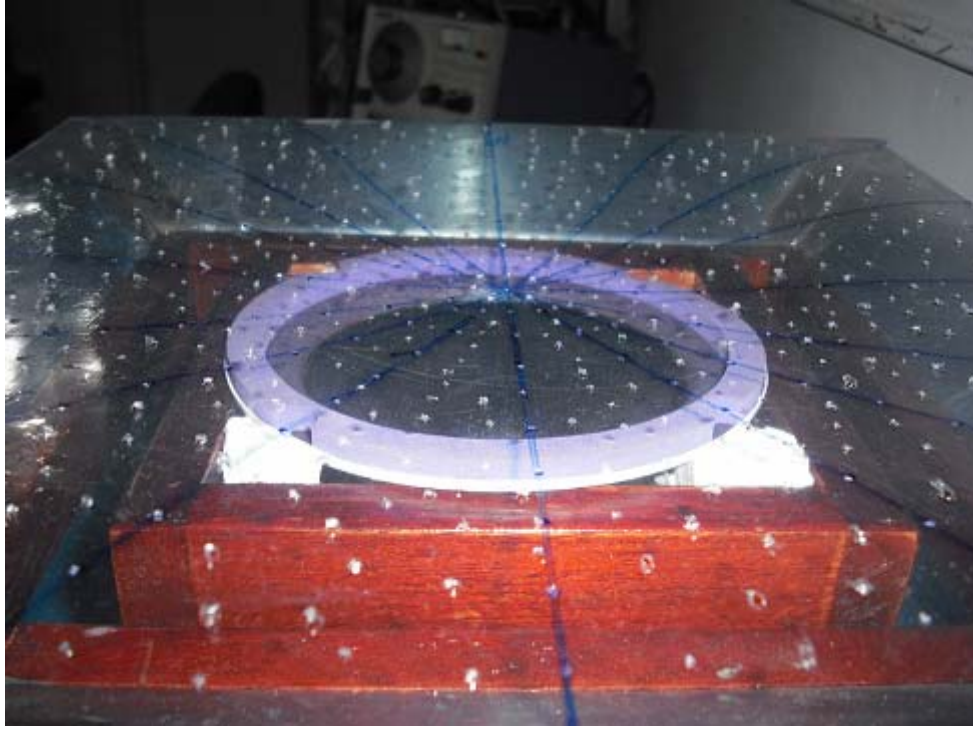


Figura 4.22. Ondas en la superficie del material visualizadas con luz estroboscópica. Fuente: el autor.

Las actividades previstas contemplan el uso de membranas de material homogéneo e isótropo, o que pueda ser considerado como tal. El material utilizado para las membranas es un Termoplástico, una película transparente coextruída de polietileno lineal de baja densidad, de alta elongación y excelentes propiedades mecánicas. Kalpakjian S. y Schmid S. (2002) afirman que cuando se deforman los termoplásticos, el polímero que lo conforma se convierte en anisótropo, sin embargo las cargas empleadas para realizar los ensayos no son lo suficientemente grandes para deformar el material más allá de su límite elástico y por lo tanto se puede afirmar que su comportamiento es cercano al isótropo.

Las propiedades físicas del material se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4.3. Propiedades del material

Fuente: Teleplastic C.A. [On-Line]. Disponible en: <http://www.teleplastic.net/>

Características	Método de Análisis	Unidad de Medida	Magnitud
Espesor	COVENIN 466	m	0,000035
Densidad	COVENIN 461	Kg/m ³	920
Gramaje	COVENIN 2480	Kg/m ²	0,0322
Rendimiento	Calculado	m ² /Kg	31.1
Carga a Ruptura	COVENIN 2557	Kg/m ²	L ≥ 4000000
			T ≥ 2000000
%		L ≥ 700	
		T ≥ 800	
Módulo Elástico		Kg/m ²	L ≥ 4000000
			T ≥ 6000000
Resistencia al Rasgado	COVENIN 994	Kg	L ≥ 0,12

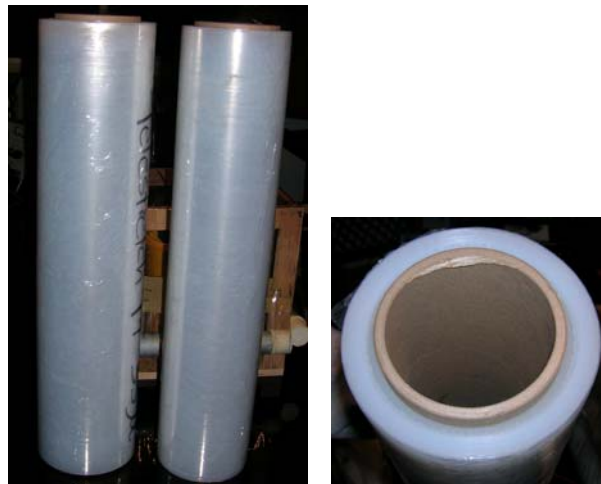


Figura 4.23. Bobinas de Termoplásticos. Fuente: el autor.

4.3.2. Características geométricas

En esta investigación se consideran membranas de forma cuadrada, esto se debe a la necesidad de proporcionar niveles de tensión idénticos en todos los puntos de la

periferia. Al considerar dimensiones arbitrarias en cada uno de los lados de la membrana, es necesario identificar muy bien el peso requerido para finalmente proporcionar la misma tensión en todo el contorno.

El estudio realizado incluyó una geometría de 0,3 x 0,3 m +/- 0,002 m para cada membrana.

4.4. Variables

Parámetros controlados: material de prueba, espesor del material, geometría, posición relativa en el banco, tensión, dirección de la perturbación o excitación, ubicación de los orificios.

Parámetros variables: composición química específica de las muestras, pequeños cambios de sección en las membranas, pequeños cambios de sección del cilindro de acero, tamaño exacto de todos los agujeros, perturbaciones externas (transmisibilidad), frecuencia natural de los especímenes, temperatura del medio ambiente.

Las variables controladas según la ecuación (2.52) se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 4.4. Variables controladas

Parámetros numéricos		
Tipo de Variable	Unidad	Magnitud
Distancia de la Fuente de excitación a la membrana	[m]	0,015
Distancia desde el transductor a la membrana	[m]	0,02
Espesor	[m]	0,000035
Densidad	[Kg/m ³]	0,035
Dimensiones	[m ²]	0,3
Peso Cilindros de Carga 1 (c/u)	[Kg]	0,6
Peso Cilindros de Carga 2 (c/u)	[Kg]	0,75
T ₁	[N]	560377,143
T ₂	[N]	700471,429
Parámetros no numéricos		
Tipo de Variable	Características	
Tipo de Material	Termoplástico	

4.4.1. Número de Mediciones

Para seleccionar el número de mediciones realizadas se utilizó el criterio de porcentaje de dispersión (%Dis), si este valor es menor al 5% son suficientes tres mediciones, para valores entre 5% y 8% serán necesarias de 6 a 10 mediciones y cuando el valor excede el 8% se efectuarán 15 mediciones.

El Porcentaje de dispersión se define como:

$$\%Dis = \frac{100 \times D}{\bar{x}} \quad (4.8)$$

Donde D se obtiene restando el menor valor de las medidas y la mayor de éstas. \bar{x} No es más que la media aritmética de todos los valores medidos, se obtiene según la siguiente ecuación:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.9)$$

Para determinar la exactitud de los resultados obtenidos para ensayar membranas sin ningún orificio en su superficie, se usó la ecuación de error relativo:

$$E = \frac{|\overline{\omega_{\text{exp}}} - \omega_{\text{teórico}}|}{\omega_{\text{teórico}}} \times 100 \quad (4.10)$$

Para membranas en las cuales se presentaban discontinuidades en su superficie se determinó la variación porcentual del valor de frecuencia medio experimental con respecto al resultado teórico esperado con la siguiente fórmula:

$$Dif = \frac{|\omega_{\text{teórico}} - \overline{\omega_{\text{exp}}}|}{\omega_{\text{teórico}}} \times 100 \quad (4.11)$$

4.4.2. Número y Geometría de Orificios

Se realizaron ensayos previos con orificios de diámetro aproximado de 1,3 mm, los mismos poseían una distribución radial que obedece a la similitud del efecto que tienen los pistones centrales en los procesos de desgaste en bombas y compresores de membrana. Así mismo, la cantidad de discontinuidades comenzó desde cero, luego un orificio y posteriormente fue aumentando a partir de este número de 16 en 16 hasta llegar a la cantidad de 200 orificios y a partir de este valor de 50 en 50 hasta 600 perforaciones.

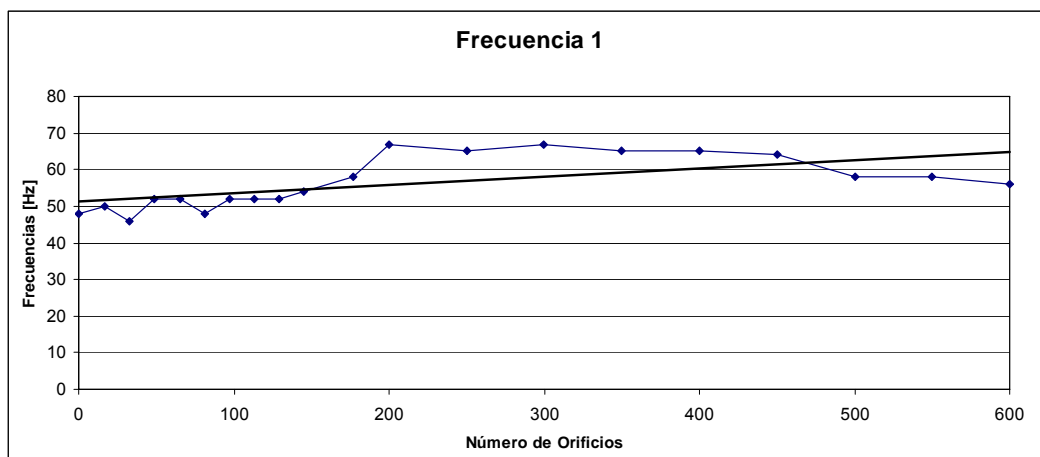
Experimentalmente se pueden observar dos estados de resonancia con más facilidad que los demás, estas frecuencias teóricamente se inclinan a los valores de 58,17 Hz. y 116,34 Hz. Los valores obtenidos experimentalmente para una de las pruebas preliminares se observan en la siguiente tabla:

Tabla 4.5. Valores de Frecuencias en ensayos preliminares.

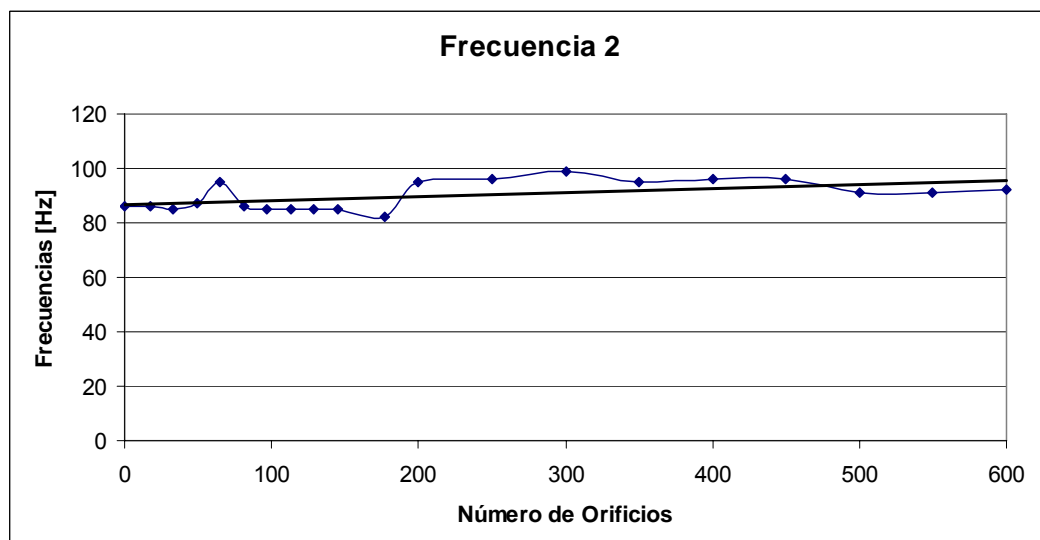
Frecuencia 1 (58,17 Hz.)		Frecuencia 2 (116,34 Hz.)	
Número de Orificios	Frecuencia (Hz.)	Número de Orificios	Frecuencia (Hz.)
0	48	0	86
17	50	17	86
33	46	33	85
49	52	49	87
65	52	65	95
81	48	81	86
97	52	97	85
113	52	113	85
129	52	129	85
145	54	145	85
177	58	177	82
200	67	200	95
250	65	250	96
300	67	300	99
350	65	350	95
400	65	400	96

450	64	450	96
500	58	500	91
550	58	550	91
600	56	600	92
Promedio	56,45	Promedio	89,9

Así mismo se pueden representar estos resultados a los ensayos previos mediante las siguientes gráficas, en donde se observa el rango de frecuencias y la tendencia de cambio de las mismas.



Gráfica 4.1. Valores preliminares para la Frecuencia 1.



Gráfica 4.2. Valores preliminares para la Frecuencia 2.

Mediante la realización de estos ensayos previos se determinó que hasta 600 Orificios los valores de frecuencia natural se mantienen en un rango aparentemente creciente, si embargo el crecimiento de la frecuencia es lento. Debido a esto se decidió trabajar con una cantidad menor de orificios que dieran una mejor perspectiva al comportamiento experimental del suceso.

Para estudiar 5 casos diferentes se utilizaron 5 membranas, todos los orificios se realizaron con una aguja de diámetro 0,0013 m., cada espécimen es ensayado bajo condiciones similares de manera que se trate de no incluir errores del tipo humano en las mediciones.

La disposición geométrica de los orificios obedece a las siguientes características: La primera membrana se ensayó con dos circunferencias de diez orificios cada una en una distribución radial de 0,01m. de diámetro a partir del centro de la geometría, de esta forma para cada caso se fue aumentando la cantidad de discontinuidades en la superficie del material, de veinte en veinte hasta llegar a cien aberturas en total. Se realizaron las perforaciones a partir de un mapa trazado en cada membrana con anterioridad y con las mismas ya colocadas en el banco de pruebas justo antes de ensayarlas. Luego se procedió a determinar las nuevas frecuencias naturales de vibración. En las siguientes figuras se observa detalladamente como se ensayó cada espécimen:

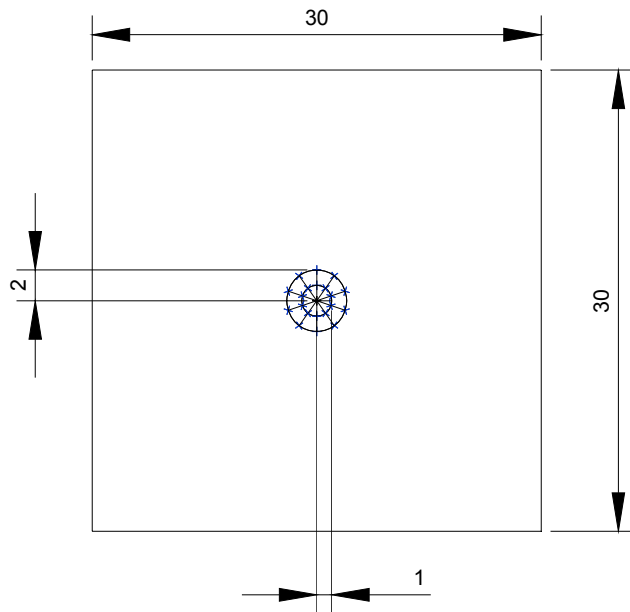


Figura 4.24. Disposición de orificios, membrana 1. Medidas dadas en cm. Fuente: el autor

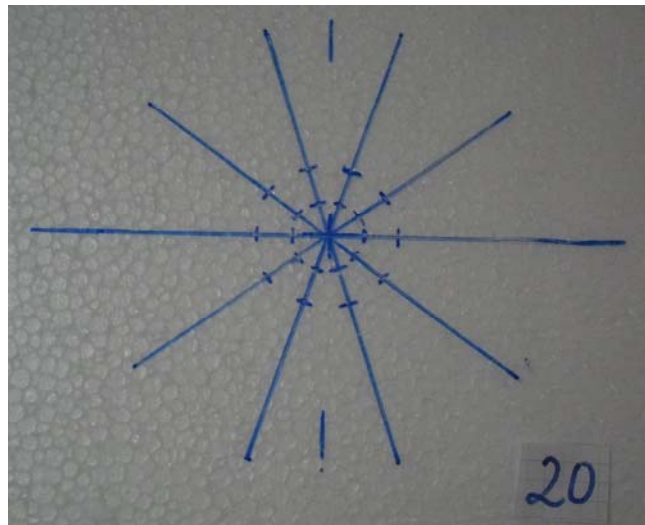


Figura 4.25. Malla dibujada en la Membrana 1. Fuente: el autor.

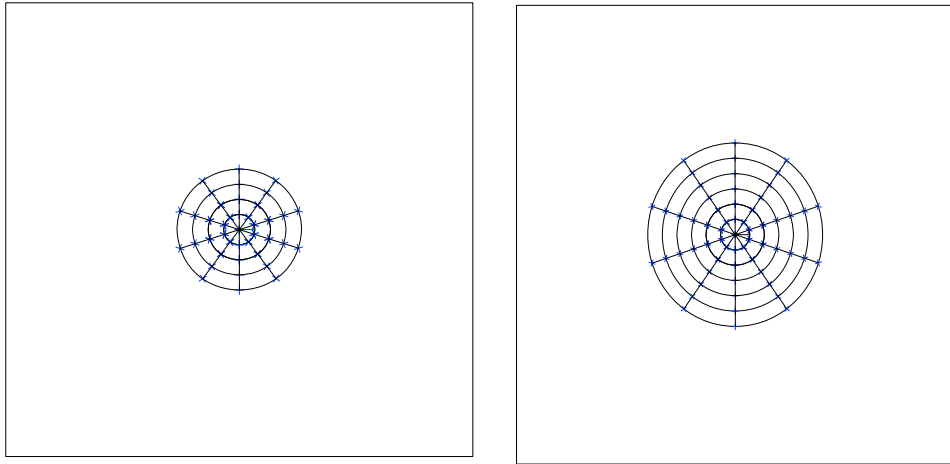


Figura 4.26. Disposición de orificios, membrana 2 (izquierda) y membrana 3 (derecha). Fuente: el autor.

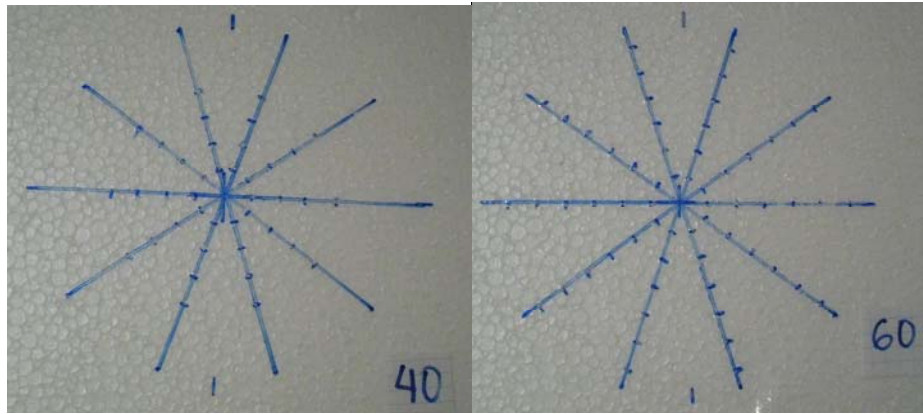


Figura 4.27. Malla dibujada en la Membrana 2 (izquierda) y Membrana 3 (derecha). Fuente: el autor.

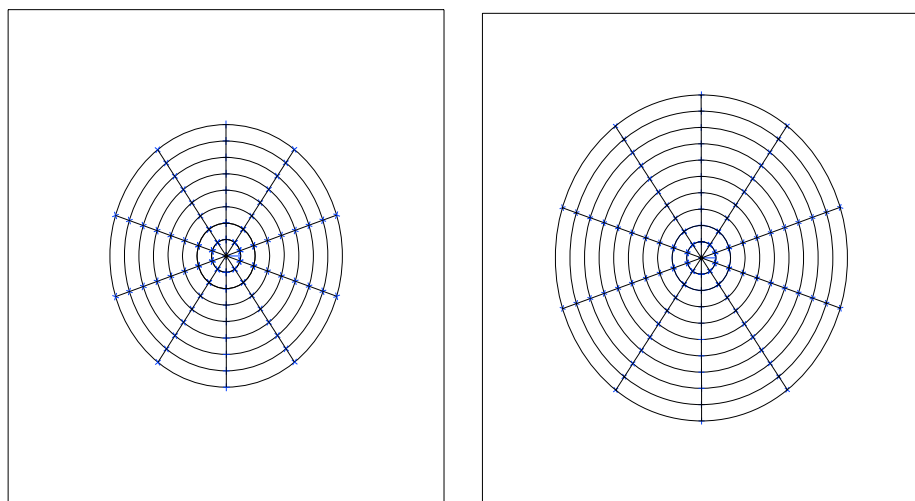


Figura 4.28. Disposición de orificios, membrana 4 (izquierda) y membrana 5 (derecha). Fuente: el autor.

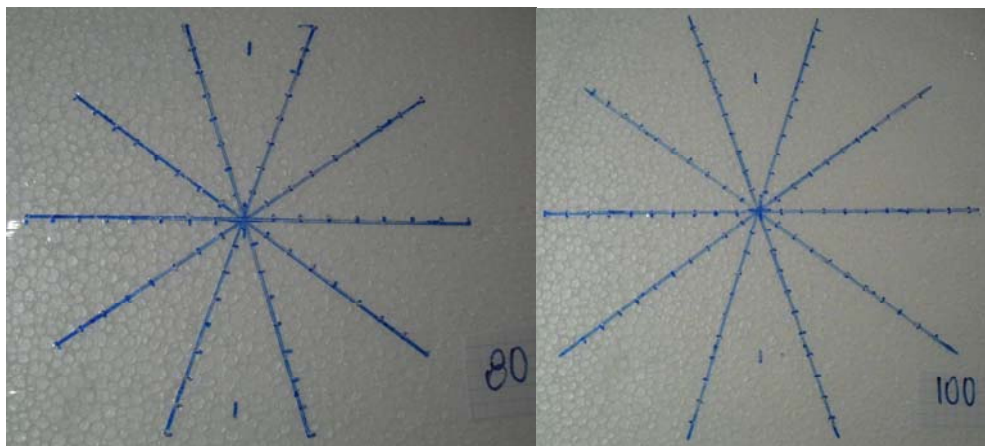


Figura 4.29. Malla dibujada en la Membrana 4 (izquierda) y Membrana 5 (derecha). Fuente: el autor.

4.5. Esquema de Equipos e Instrumentos



Figura 4.30. Conexiones del generador de señales y el amplificador. Fuente: el autor.

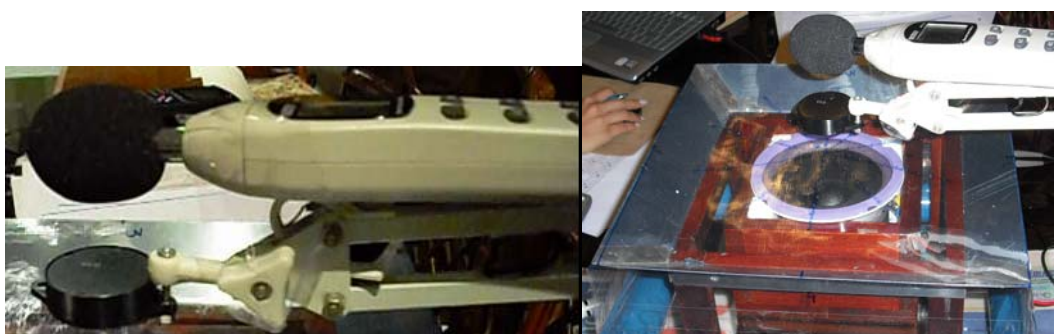


Figura 4.31. Posición del sonómetro y el transductor. Fuente: el autor.

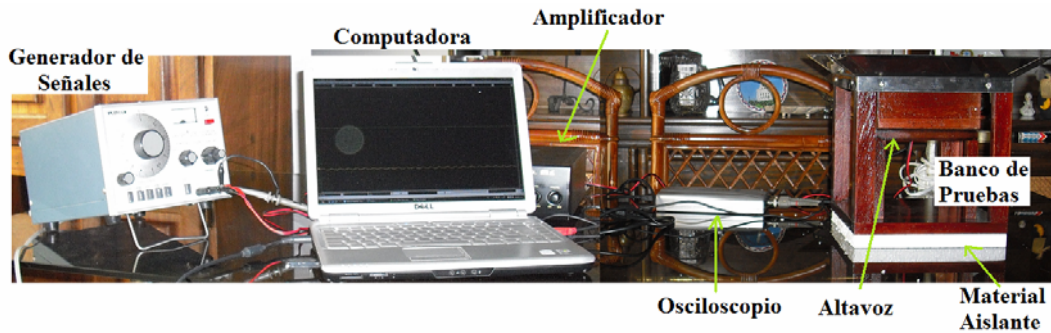


Figura 4.32. Vista General de los Equipos. Fuente: el autor.

4.6. Aspectos de Seguridad

Con respecto a los estudios de seguridad auditiva, los trabajos de Febres y Faragalli (2007) incluyen un estudio de nivel de ruido utilizando los criterios presentados en la Norma Covenin 1565:1995 “Ruido Ocupacional. Programa de conservación auditiva. Niveles permisibles y criterios de evaluación”, donde el valor máximo permisible es de 85 dB. Debido a que estos autores trabajan con materiales más rígidos y frecuencias más elevadas que las consideradas en la presente investigación, sus recomendaciones resultan pertinentes en lo relativo a tiempos y niveles de exposición de ruido.



Figura 4.33. Protectores Auditivos. Fuente: el autor.

4.7. Identificación de la Condición de Resonancia

La condición de resonancia puede ser reconocida a través del sonómetro y el osciloscopio. Para ilustrar cómo se identifica la condición de resonancia en el material empleado se utilizará uno de los casos estudiados en la investigación de este trabajo, con cualquiera de los ensayos se puede realizar esta explicación sin embargo se escogerá uno al azar a juicio del investigador.

La condición de la membrana para este ensayo es de 100 orificios en su superficie,

tal como se explica en el punto 4.3.2. El valor teórico esperado según la ecuación (2.52) para una frecuencia natural es de 58,17 Hz.

4.7.1. Gráficas Obtenidas con el Osciloscopio

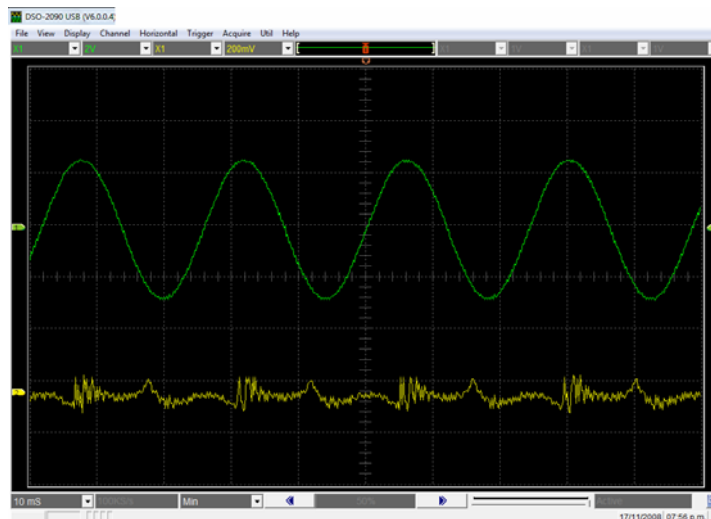
Las gráficas obtenidas por el osciloscopio poseen una escala horizontal que varía 4 mili segundos por intervalo con una incertidumbre de 0,8 mili segundos y una escala vertical de 2 Voltios por intervalo y con una incertidumbre de 0,4 mili segundos. Estas escalas son ajustables a las necesidades del operador que se fundamentan en una adecuada visualización del suceso.

La curva de color verde representa directamente a la señal que emite el generador y la curva de color amarillo constituye a la señal captada por el transductor que se encuentra ubicado aproximadamente a 2cm. sobre la membrana.

Se estudiaron frecuencias superiores e inferiores a la condición de resonancia y se obtuvieron las siguientes gráficas:

i. Frecuencia cuya magnitud es menor al valor de resonancia teórico.

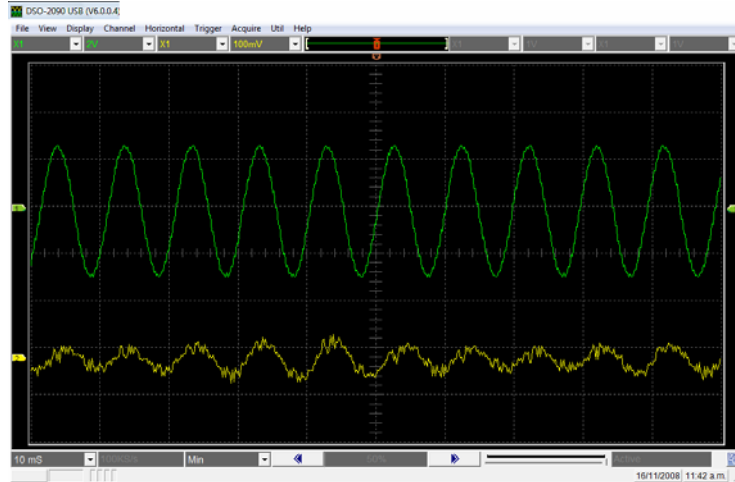
Para 50 Hz. se presenta la siguiente gráfica en el osciloscopio:



Gráfica 4.3. Obtenida en el osciloscopio para 50 Hz emitidos por el generador de señales. En esta gráfica se puede observar un comportamiento de la curva emitida por el transductor (curva amarilla) en donde las amplitudes se mantienen relativamente constantes a través del tiempo.

ii. Frecuencia cuya magnitud es mayor al valor de resonancia teórico.

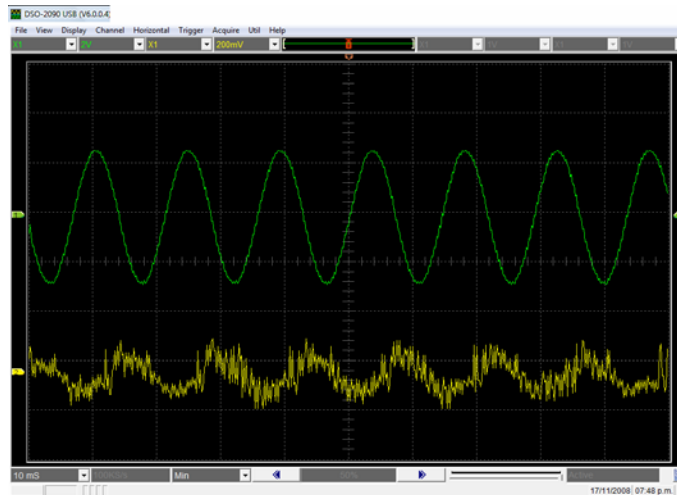
Para 78 Hz. se obtuvo la siguiente gráfica en el osciloscopio:



Gráfica 4.4. Obtenida en el osciloscopio para 78 Hz emitidos por el generador de señales. Al igual que en el caso anterior para la curva descrita por la señal emitida por el transductor se observan amplitudes se mantienen constantes a través del tiempo.

ii. Frecuencia de resonancia experimental.

En la frecuencia de resonancia experimental se obtiene la siguiente gráfica:



Gráfica 4.5. Obtenida en el osciloscopio para 64 Hz. emitidos por el osciloscopio. La curva descrita con la señal emitida por el transductor describe un comportamiento donde las amplitudes son aparentemente constantes pero considerablemente mayores a las obtenidas por las frecuencias antes y después de la resonancia. Estas amplitudes se mantienen a través del tiempo mientras

no se modifiquen las frecuencias emitidas por el generador de señales.

4.7.2. Niveles de sonido registrados por el sonómetro

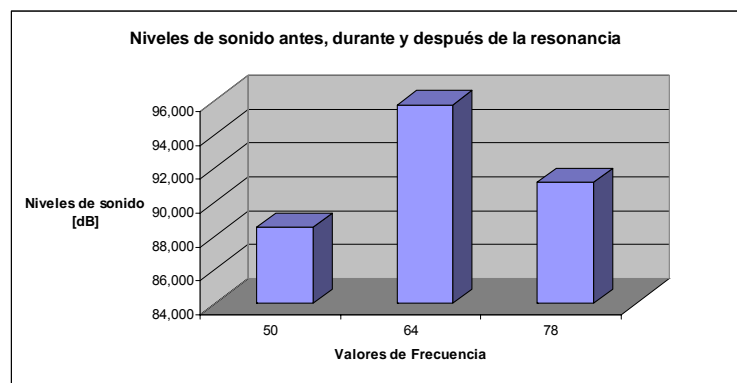
Los niveles de sonido registrados por el sonómetro aumentan cuando la membrana se encuentra en estado de resonancia. A continuación se presentan tablas y gráficas con los valores reportados por el equipo utilizado, los cuales fueron tomados en el mismo instante en que son guardadas las gráficas del osciloscopio para el punto anterior.

En la siguiente tabla se reportan los niveles de sonido registrados por el sonómetro:

Tabla 4.6. Niveles de sonido promedio para antes, durante y después de la frecuencia de resonancia teórica 58,17 Hz.

	Frecuencia (Hz)	Niveles de Sonido (dB)
Antes del estado de resonancia	50	88,500
Durante el estado de resonancia	64	95,767
Después del estado de resonancia	78	91,167

Gráfica 4.6. Niveles de sonido antes, durante y después de la frecuencia de resonancia teórica 58,17 Hz.



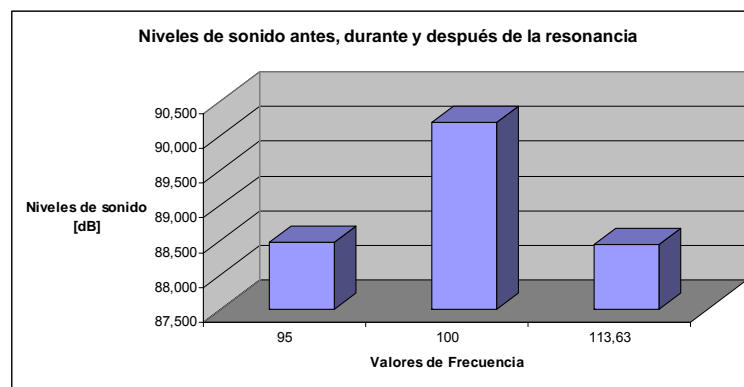
Como se puede observar en la gráfica anterior los niveles de sonido aumentan cuando la membrana se encuentra en estado de resonancia, para corroborar estos datos presentaremos lo ocurrido con otra frecuencia de resonancia teórica, en

donde el comportamiento experimental se mantiene con lo expuesto anteriormente. Para una frecuencia de resonancia teórica de 116,34 Hz, se obtienen los siguientes datos experimentales:

Tabla 4.7. Niveles de Sonido promedio para antes, durante y después del estado de resonancia para la frecuencia teórica 116,34 Hz.

	Frecuencia (Hz)	Niveles de Sonido (dB)
Antes del estado de resonancia	95	88,467
Durante el estado de resonancia	100	90,187
Después del estado de resonancia	113,63	88,433

Gráfica 4.7. Niveles de sonido antes, durante y después de la resonancia, Frecuencia teórica 116,34 Hz.



Estas gráficas y los valores registrados por el sonómetro demuestran que los niveles de sonido aumentan para las frecuencias de resonancia y luego disminuyen significativamente, es decir, que se puede identificar la condición de resonancia también a través del sonómetro.

Estos valores registrados por el sonómetro cuando la membrana se encuentra en estado de resonancia se utilizan como referencia para determinar cuando cada espécimen ensayado atraviesa esta fase ya que los valores experimentales de niveles de sonido son parecidos para los distintos casos.

4.8. Procedimiento Experimental

Recomendaciones y aspectos a considerar antes de realizar los ensayos:

- a) Se recomienda el uso del equipo de seguridad correspondiente, el mismo es explicado en el punto 4.4.
- b) Las membranas deben ser preparadas según la geometría del banco de prueba, cada espécimen es marcado y seccionado de manera tal que quede la superficie de estudio para ser colocada en la parte superior del banco y un espacio en cada extremo de aproximadamente 10 cm. de largo para colocar los cilindros, cada uno de ellos quedará suspendido a 5 cm. de la base.
- c) Una vez colocada la membrana en el banco de pruebas se debe energizar uno por uno los equipos electrónicos en el siguiente orden: Generador de señales, amplificador de audio y tener conectado a su vez, el osciloscopio a la computadora. Es muy importante el hecho de poner en funcionamiento los equipos de esta forma, ya que en caso contrario es posible dañar el altavoz, por la misma razón se debe mantener el volumen de la planta en un medio de su capacidad para asegurar la integridad física de los equipos.
- d) Se recomienda realizar las pruebas sobre una superficie lisa y horizontal, como por ejemplo una mesa ya que de esta forma se garantiza que todos los equipos estén al mismo nivel y se realicen de manera más adecuada los ensayos.
- e) Si se desea visualizar las ondas formadas en la superficie del material, se recomienda el uso de una luz estroboscópica que emita frecuencias iguales a las del generador de señales. Esto puede realizarse para cualquiera de las frecuencias estudiadas.

Una vez realizada la conexión de los equipos para inducir la vibración mediante sonido, se procede a llevar a cabo las siguientes actividades:

- a) Se debe ubicar la membrana sobre el banco de pruebas y con extremo cuidado colocar cada uno de los tubos en sus extremos, de manera que la superficie quede completamente lisa.
- b) Se verifica que el transductor se encuentre a una distancia de 2 cm. aproximadamente de la membrana. El sonómetro debe estar colocado sobre el transductor en el extremo del brazo mecánico y el altavoz en su soporte.
- c) Se aumenta gradualmente la frecuencia emitida por el generador de señales, se mantiene contacto visual con las gráficas emitidas por el osciloscopio y con los datos suministrados por el sonómetro, cuando la gráfica obtenida mediante el transductor de señales comienza a aumentar sus amplitudes y los valores de sonido se acercan a los valores de referencia la membrana se encuentra en estado de resonancia. Si se desea se toman datos de los valores registrados por el sonómetro y se guarda una copia de la gráfica emitida por el osciloscopio.
- d) Luego de esto se lleva nuevamente el generador de señales a su mínima señal.
- e) Se repiten los pasos b y c cuantas veces sea necesario para tomar un rango de datos acorde con el porcentaje de dispersión de la medida. En el caso de esta investigación se realizaron 15 mediciones para cada frecuencia experimental estudiada.
- f) Luego de identificar las frecuencias requeridas en el banco de pruebas y haber tomado nota de los datos necesarios, se desconectan los equipos y se desmonta la membrana.

CAPÍTULO V

RESULTADOS

Cada investigación científica debe apoyarse en resultados teóricos y experimentales que permitan llegar a conclusiones sobre el trabajo realizado. En este capítulo se presentan los datos teóricos y de los ensayos ejecutados que permiten desarrollar conclusiones en el siguiente capítulo.

En la revisión bibliográfica no se encuentra un diseño igual o similar al planteado en este trabajo para el estudio de vibraciones en membranas, debido a esto se verifican los resultados experimentales ensayando una membrana sin ninguna discontinuidad en su superficie a dos tensiones diferentes.

5.1 Resultados teóricos.

Para la membrana sin ningún orificio, ensayada con las dimensiones ya establecidas, se reconocen los valores de frecuencias naturales desde 0 Hz. hasta 150 Hz. Se utilizan dos tensiones diferentes y para proporcionarlas se usan grupos de cilindros de $(0,6 \pm 0,0025)$ Kg y $(0,75 \pm 0,0025)$ Kg. cada uno. En la siguiente tabla se presentan los valores de frecuencias fundamentales según la ecuación (2.52) que son concebidos según las tensiones descritas anteriormente, donde m y n representan las líneas nodales:

Tabla 5.1. Valores Teóricos de Frecuencia natural para dos tensiones

Tensión 1 (560377,143 N)			Tensión 2 (700471,429 N)		
m	n	$\omega_{teórico}$ (Hz)	m	n	$\omega_{teórico}$ (Hz)
0	1	41,13	0	1	45,99
1	1	58,17	1	1	65,04
2	1	91,98	2	1	102,83
3	1	130,08	3	1	145,43
1	0	41,13	1	0	45,99
1	2	91,98	1	2	102,83
1	3	130,08	1	3	145,43
2	2	116,34	2	2	130,08
2	3	148,31	2	3	165,81
0	2	82,27	0	2	91,98
0	3	123,40	0	3	137,97

5.2. Resultados experimentales

5.2.1. Tensión 1 (560377,143 N)

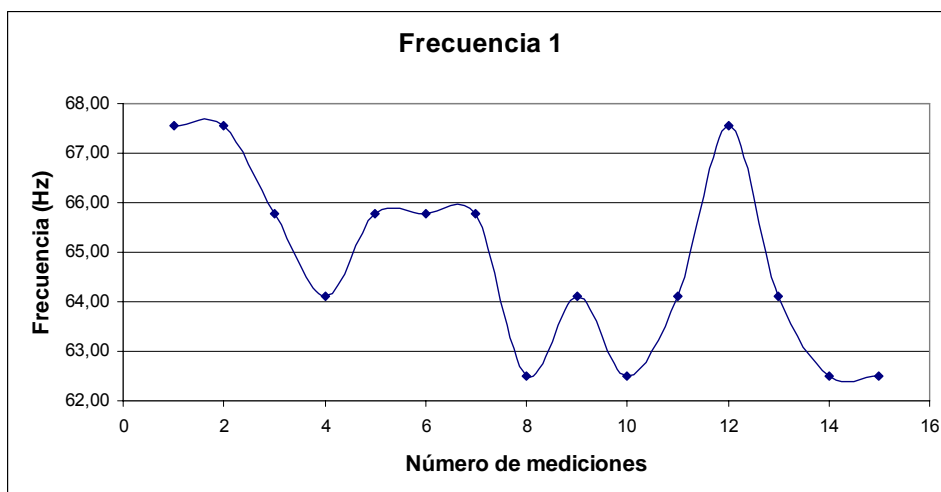
Las frecuencias esperadas según el modelo teórico son 58,17 Hz., la cual se indica como Frecuencia 1 y 116,34 Hz. como Frecuencia 2. A continuación se presenta una tabla con los resultados experimentales obtenidos correspondientes a estas dos condiciones de resonancia:

Tabla 5.2. Valores experimentales obtenidos para la Tensión 1 (560377,143 N)

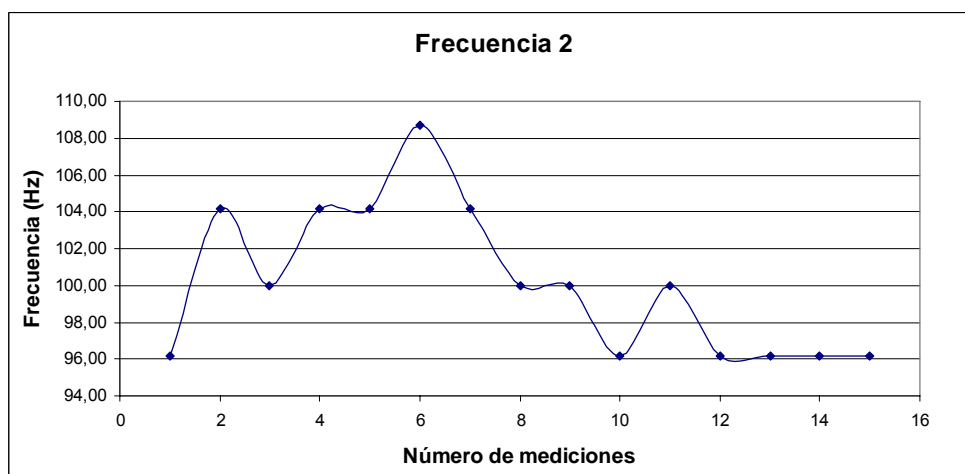
Frecuencia 1 (58,17 Hz.)			Frecuencia 2 (116,34 Hz.)		
Medición	Periodo (seg)	Frecuencia (Hz)	Medición	Periodo (seg)	Frecuencia (Hz)
1	0,0148	67,57	1	0,0104	96,15
2	0,0148	67,57	2	0,0096	104,17
3	0,0152	65,79	3	0,01	100,00
4	0,0156	64,10	4	0,0096	104,17
5	0,0152	65,79	5	0,0096	104,17
6	0,0152	65,79	6	0,0092	108,70
7	0,0152	65,79	7	0,0096	104,17
8	0,016	62,50	8	0,01	100,00
9	0,0156	64,10	9	0,01	100,00
10	0,016	62,50	10	0,0104	96,15
11	0,0156	64,10	11	0,01	100,00
12	0,0148	67,57	12	0,0104	96,15

13	0,0148	64,10	13	0,0104	96,15
14	0,0156	62,50	14	0,0104	96,15
15	0,016	62,50	15	0,0104	96,15
	$\overline{\omega_{\text{exp}}}$	64,82		$\overline{\omega_{\text{exp}}}$	100,15
	% Disp	7,818		% Disp	12,523

Los valores experimentales son representados mediante las dos gráficas siguientes:



Gráfica 5.1. Valores obtenidos para la frecuencia 1 (58,17 Hz.)



Gráfica 5.2. Valores obtenidos para la frecuencia 2 (116,34 Hz.)

Se toma el valor teórico como referencia de cambio con respecto a la media aritmética de los datos experimentales, según se aprecia en las siguientes tablas:

Tabla 5.3. Resultados, Tensión 1 (560377,143 N) Frecuencia 1 (58,17 Hz.)

$\overline{\omega}_{exp}$ (rad/seg)	$\omega_{teórico}$ (rad/seg)	Error (%)
407,264	365,502	11,426

Tabla 5.4. Resultados, Tensión 1 (560377,143 N) Frecuencia 2 (116,34 Hz.)

$\overline{\omega}_{exp}$ (rad/seg)	$\omega_{teórico}$ (rad/seg)	Error (%)
629,276	731,006	13,916

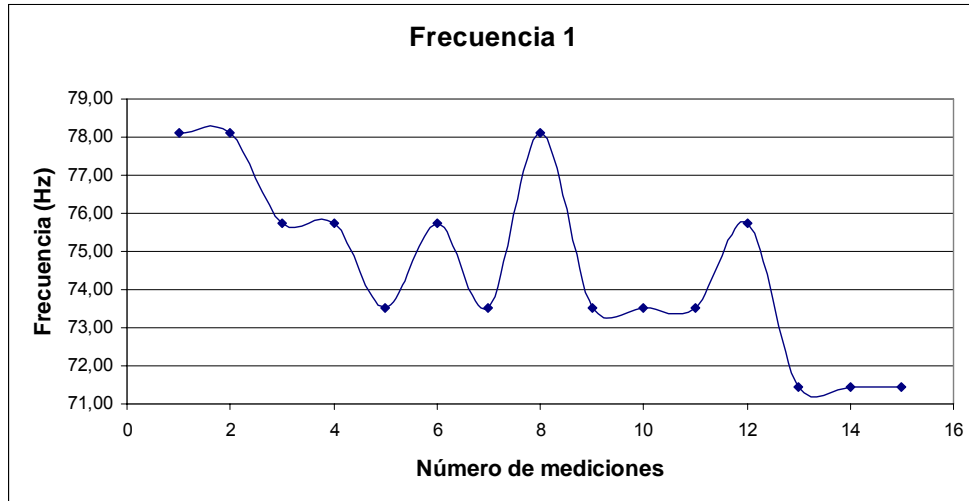
5.2.2. Tensión 2 (700471,429 N)

Las frecuencias esperadas según el modelo teórico son 65,04 Hz., la cual se indica como Frecuencia 1 y 91,98 Hz. como Frecuencia 2. A continuación se presenta una tabla con los resultados experimentales obtenidos correspondientes a estas dos condiciones de resonancia:

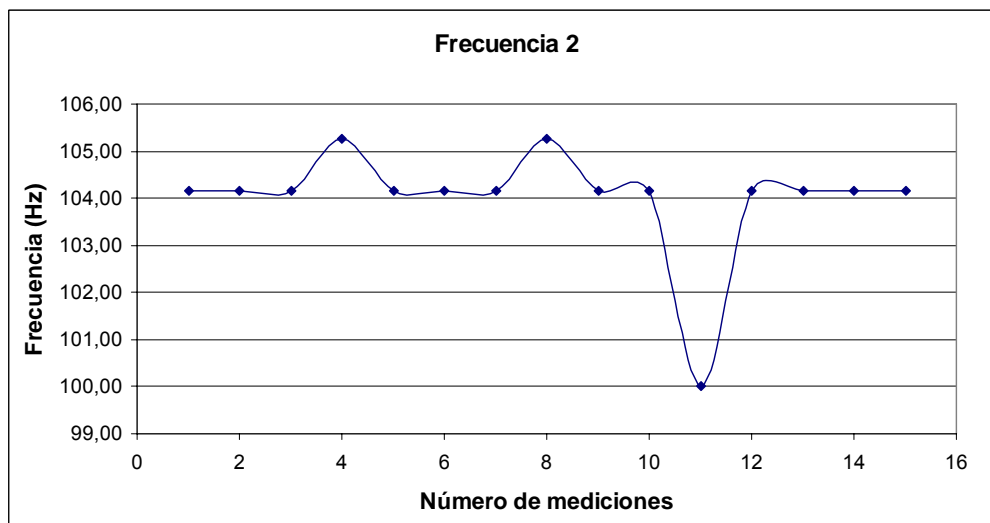
Tabla 5.5. Valores obtenidos para la tensión 2 (700471,429 N)

Frecuencia 1 (65,04 Hz.)			Frecuencia 2 (91,98 Hz.)		
Medición	Periodo (s)	Frecuencia (Hz)	Medición	Periodo (s)	Frecuencia (Hz)
1	0,0128	78,13	1	0,0096	104,17
2	0,0128	78,13	2	0,0096	104,17
3	0,0132	75,76	3	0,0096	104,17
4	0,0132	75,76	4	0,0095	105,26
5	0,0136	73,53	5	0,0096	104,17
6	0,0132	75,76	6	0,0096	104,17
7	0,0136	73,53	7	0,0096	104,17
8	0,0128	78,13	8	0,0095	105,26
9	0,0136	73,53	9	0,0096	104,17
10	0,0136	73,53	10	0,0096	104,17
11	0,0136	73,53	11	0,01	100,00
12	0,0132	75,76	12	0,0096	104,17
13	0,014	71,43	13	0,0096	104,17
14	0,014	71,43	14	0,0096	104,17
15	0,014	71,43	15	0,0096	104,17
	$\overline{\omega}_{exp}$	74,62		$\overline{\omega}_{exp}$	104,04
	% Disp	8,974		% Disp	5,059

Los valores experimentales son representados mediante las dos gráficas siguientes:



Gráfica 5.3. Valores obtenidos para la frecuencia 1 (65,04 Hz.)



Gráfica 5.4. Valores obtenidos para la frecuencia 2 (91,98 Hz.)

Se toma el valor teórico como referencia de cambio con respecto a la media aritmética de los datos experimentales, según se aprecia en las siguientes tablas:

Tabla 5.6. Resultados, Tensión 2 (700471,429 N),
Frecuencia 1 (65,04 Hz.)

$\overline{\omega}_{exp}$ (rad/seg)	$\omega_{teórico}$ (rad/seg)	Error (%)
468,867	408,644	14,737

Tabla 5.7. Resultados, Tensión 2 (700471,429 N),
Frecuencia 2 (91,98 Hz.)

$\overline{\omega}_{exp}$ (rad/seg)	$\omega_{teórico}$ (rad/seg)	Error (%)
653,672	577,911	11,590

5.2.3. Análisis de Resultados

Para la Tensión 1 (560377,143 N) y la Tensión 2 (700471,429 N), se observa que el error relativo de cada frecuencia varía entre 9% y 14%, estos errores se deben a las diferencias que presentan las condiciones dadas por el banco de pruebas y las consideraciones tomadas en la ecuación de frecuencia natural (Ec. 2.52). Entre ellas podemos mencionar: el peso de los cuatro cilindros no es exactamente el mismo, esto implica que el valor de tensión no es precisamente igual para toda la periferia. El desarrollo teórico que conduce a la ecuación (2.52) considera un valor de tensión idéntico para cada lado de la membrana, por lo tanto esto representa una diferencia con respecto a las condiciones impuestas por el banco. Otro aspecto lo constituyen las vibraciones debidas a la transmisibilidad entre el banco de pruebas y la membrana, esto trae como consecuencia que el espécimen en estudio esté sometido a otras frecuencias además de la impuesta por el altavoz. También se puede destacar que el material ensayado puede presentar irregularidades en su composición química que afecten a la densidad del mismo, al verse comprometido este valor las frecuencias naturales de vibración cambian según la ecuación (2.52).

La diferencia entre el valor teórico y la media aritmética de los datos experimentales permanece similar para los ensayos realizados con la tensión 1 y la tensión 2. El error obtenido para la Frecuencia 1 con la tensión 1 es de 11,426% y

para la tensión 2 es de 14,737%, la diferencia entre ambos es de 3,311%. En el caso de la Frecuencia 2 estos valores presentan una discrepancia de 2,326%. Lo cual indica que los resultados se mantienen similares a pesar de cambiar la carga aplicada.

5.3. Influencia de mini orificios en las frecuencias naturales de vibración en membranas

Las frecuencias utilizadas para realizar los siguientes ensayos corresponden a los valores teóricos de 58,17 Hz. para la Frecuencia 1 y de 116,34 Hz. para la Frecuencia 2. La cantidad y geometría de los orificios se efectuó según lo planteado en el punto 4.4. para el valor de Tensión 1 (560377,143 N) y se obtuvieron los siguientes resultados experimentales:

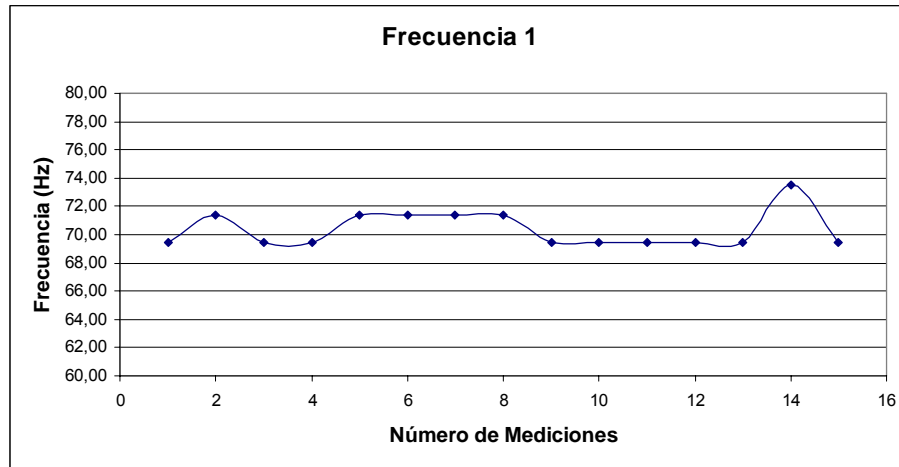
5.3.1. Membrana 1

La primera membrana fue ensayada con 20 Orificios. En las siguientes tablas se presentan los resultados obtenidos:

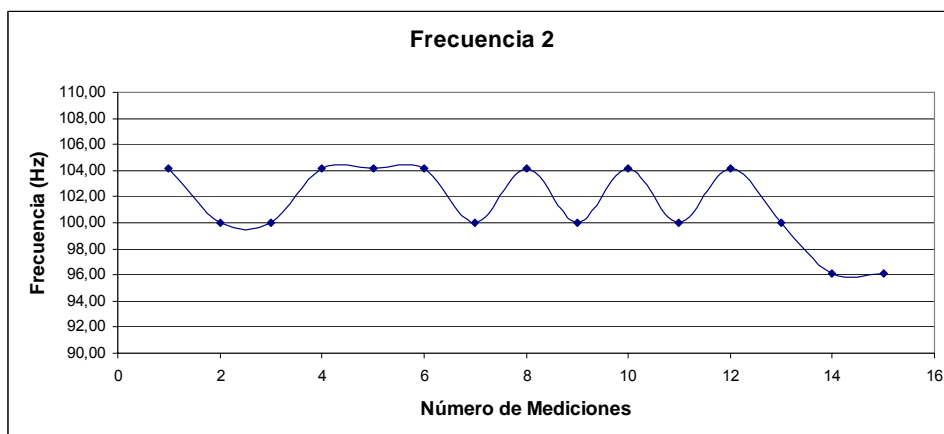
Tabla 5.8. Valores obtenidos para la Membrana 1

Frecuencia 1 (58,17 Hz.)			Frecuencia 2 (116,34 Hz.)		
Medición	Periodo (s)	Frecuencia (Hz)	Medición	Periodo (s)	Frecuencia (Hz)
1	0,0144	69,44	1	0,0096	104,17
2	0,014	71,43	2	0,01	100,00
3	0,0144	69,44	3	0,01	100,00
4	0,0144	69,44	4	0,0096	104,17
5	0,014	71,43	5	0,0096	104,17
6	0,014	71,43	6	0,0096	104,17
7	0,014	71,43	7	0,01	100,00
8	0,014	71,43	8	0,0096	104,17
9	0,0144	69,44	9	0,01	100,00
10	0,0144	69,44	10	0,0096	104,17
11	0,0144	69,44	11	0,01	100,00
12	0,0144	69,44	12	0,0096	104,17
13	0,0144	69,44	13	0,01	100,00
14	0,0136	73,53	14	0,0104	96,15
15	0,0144	69,44	15	0,0104	96,15
	$\overline{\omega_{exp}}$	70,38		$\overline{\omega_{exp}}$	101,43
	% Disp	5,804		% Disp	7,900

Los valores experimentales son representados mediante las dos gráficas siguientes:



Gráfica 5.5. Valores obtenidos para la frecuencia 1 (58,17 Hz.), Membrana 1



Gráfica 5.6. Valores obtenidos para la frecuencia 2 (116,34 Hz.), Membrana 1

Se toma el valor teórico como referencia de cambio con respecto a la media aritmética de los datos experimentales, según se aprecia en las siguientes tablas:

Tabla 5.9. Resultados obtenidos para la Frecuencia 1 (58,17 Hz.)

$\overline{\omega}_{exp}$ (rad/seg)	$\omega_{teórico}$ (rad/seg)	Dif (%)
442,199	365,503	20,984

Tabla 5.10. Resultados obtenidos para la Frecuencia 2 (116,34 Hz.)

$\overline{\omega}_{\text{exp}}$ (rad/seg)	$\omega_{\text{teórico}}$ (rad/seg)	Dif (%)
637,314	731,006	12,817

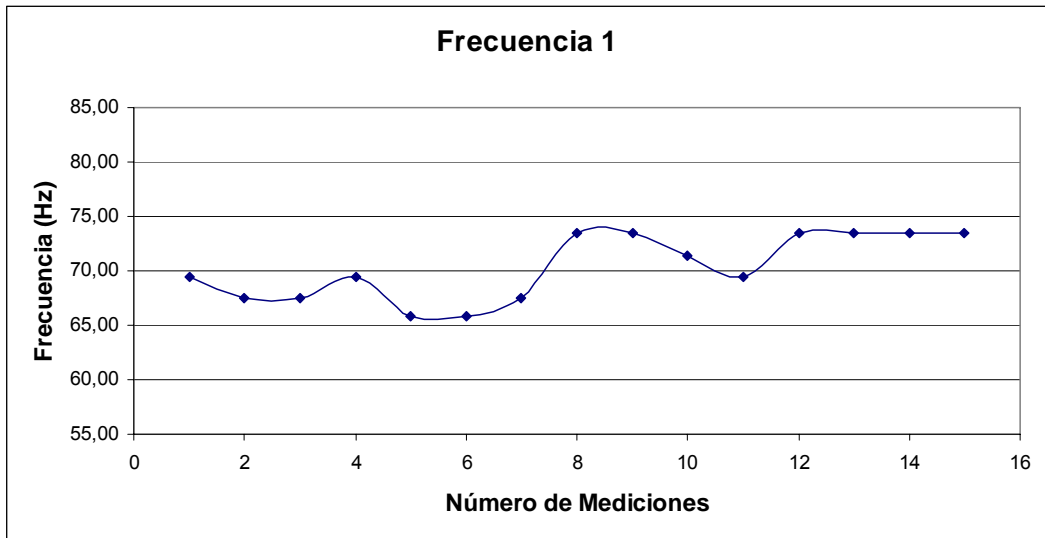
5.3.2. Membrana 2

La segunda membrana fue ensayada con 40 Orificios. En las siguientes tablas se presentan los resultados obtenidos:

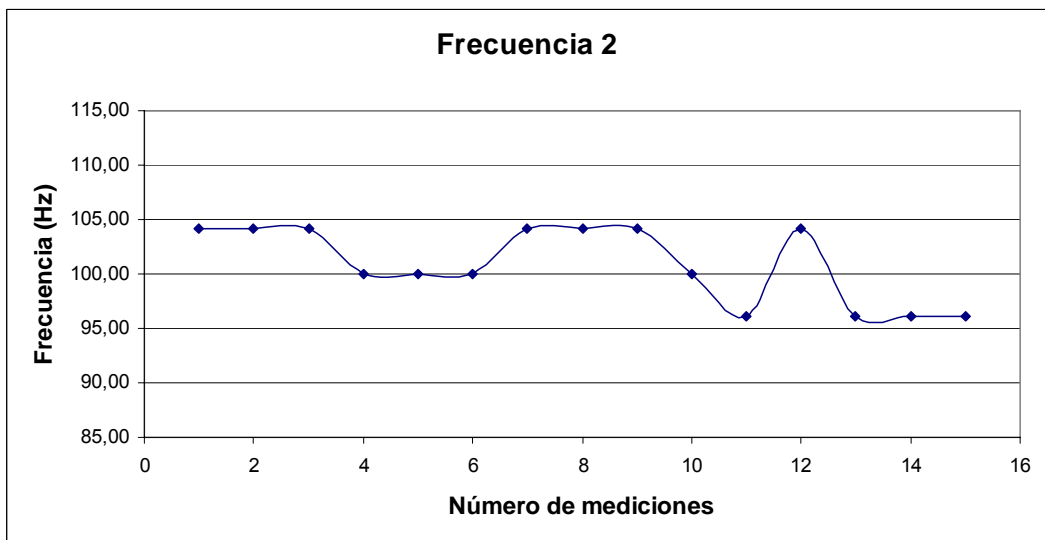
Tabla 5.11. Valores obtenidos para la Membrana 2

Frecuencia 1 (58,17 Hz.)			Frecuencia 2 (116,34 Hz.)		
Medición	Periodo (s)	Frecuencia (Hz)	Medición	Periodo (s)	Frecuencia (Hz)
1	0,0144	69,44	1	0,0096	104,17
2	0,0148	67,57	2	0,0096	104,17
3	0,0148	67,57	3	0,0096	104,17
4	0,0144	69,44	4	0,01	100,00
5	0,0152	65,79	5	0,01	100,00
6	0,0152	65,79	6	0,01	100,00
7	0,0148	67,57	7	0,0096	104,17
8	0,0136	73,53	8	0,0096	104,17
9	0,0136	73,53	9	0,0096	104,17
10	0,014	71,43	10	0,01	100,00
11	0,0144	69,44	11	0,0104	96,15
12	0,0136	73,53	12	0,0096	104,17
13	0,0136	73,53	13	0,0104	96,15
14	0,0136	73,53	14	0,0104	96,15
15	0,0136	73,53	15	0,0104	96,15
	$\overline{\omega}_{\text{exp}}$	70,35		$\overline{\omega}_{\text{exp}}$	100,92
	% Disp	8,475		% Disp	7,940

Los valores experimentales son representados mediante las dos gráficas siguientes:



Gráfica 5.7. Valores obtenidos para la frecuencia 1 (58,17 Hz.), Membrana 2



Gráfica 5.8. Valores obtenidos para la frecuencia 2 (116,34 Hz.), Membrana 2

Se toma el valor teórico como referencia de cambio con respecto a la media aritmética de los datos experimentales, según se aprecia en las siguientes tablas:

Tabla 5.12. Resultados para la Membrana 2, Frecuencia 1 (58,17 Hz.)

$\overline{\omega}_{\text{exp}}$ (rad/seg)	$\omega_{\text{teórico}}$ (rad/seg)	Dif (%)
442,010	365,503	20,932

Tabla 5.13. Resultados para la Membrana 2, Frecuencia 2 (116,34 Hz.)

$\overline{\omega}_{exp}$ (rad/seg)	$\omega_{teórico}$ (rad/seg)	Dif (%)
634,092	731,006	13,258

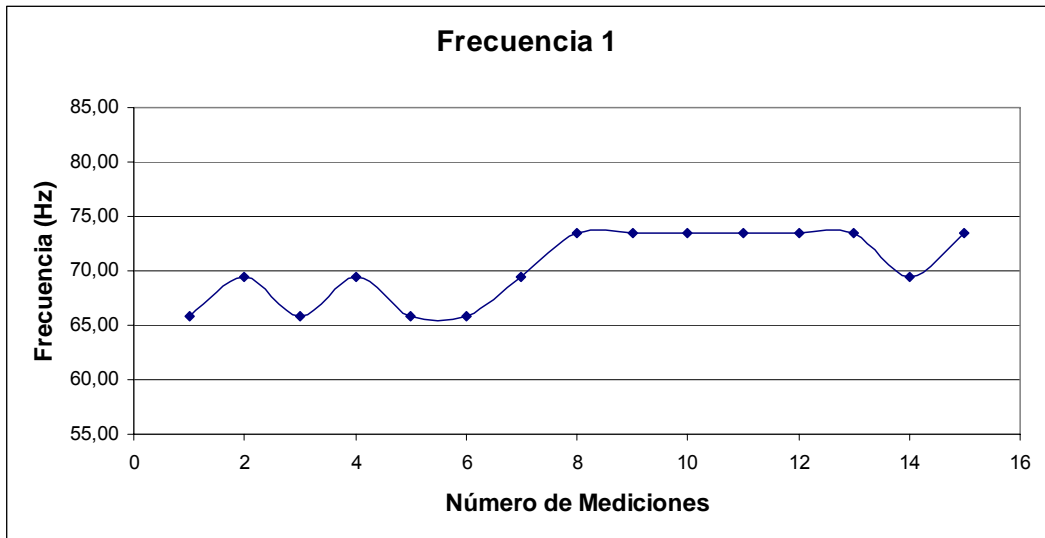
5.3.3. Membrana 3

La tercera membrana fue ensayada con 60 Orificios. En las siguientes tablas se presentan los resultados obtenidos:

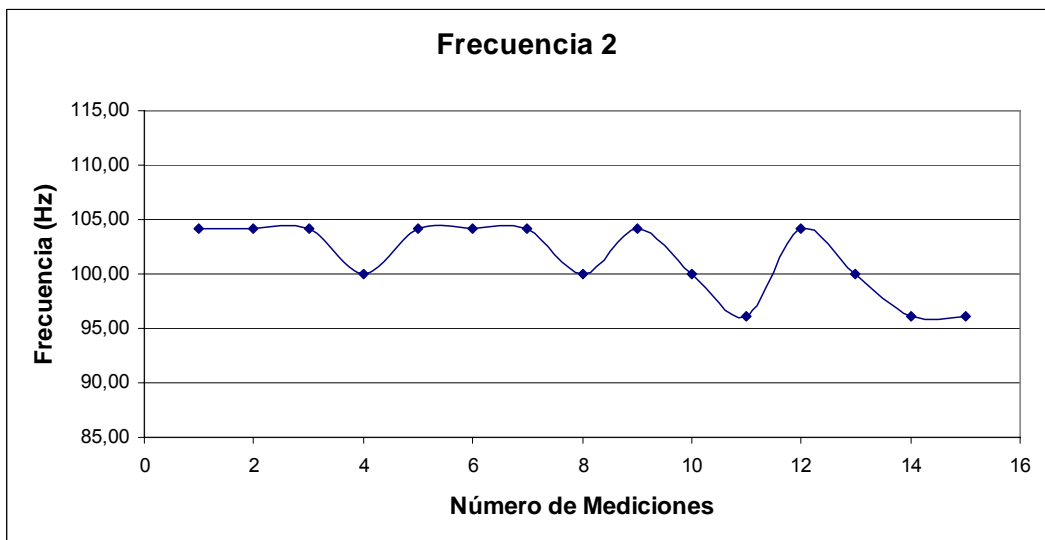
Tabla 5.14. Valores obtenidos para la Membrana 3

Frecuencia 1 (58,17 Hz.)			Frecuencia 2 (116,34 Hz.)		
Medición	Periodo (s)	Frecuencia (Hz)	Medición	Periodo (s)	Frecuencia (Hz)
1	0,0152	65,79	1	0,0096	104,17
2	0,0144	69,44	2	0,0096	104,17
3	0,0152	65,79	3	0,0096	104,17
4	0,0144	69,44	4	0,01	100,00
5	0,0152	65,79	5	0,0096	104,17
6	0,0152	65,79	6	0,0096	104,17
7	0,0144	69,44	7	0,0096	104,17
8	0,0136	73,53	8	0,01	100,00
9	0,0136	73,53	9	0,0096	104,17
10	0,0136	73,53	10	0,01	100,00
11	0,0136	73,53	11	0,0104	96,15
12	0,0136	73,53	12	0,0096	104,17
13	0,0136	73,53	13	0,01	100,00
14	0,0144	69,44	14	0,0104	96,15
15	0,0136	73,53	15	0,0104	96,15
	$\overline{\omega}_{exp}$	70,38		$\overline{\omega}_{exp}$	101,45
	% Disp	10,998		% Disp	7,898

Los valores experimentales son representados mediante las dos gráficas siguientes:



Gráfica 5.9. Valores obtenidos para la frecuencia 1 (58,17 Hz.), Membrana 3.



Gráfica 5.10. Valores obtenidos para la frecuencia 2 (116,34 Hz.), Membrana 3

Se toma el valor teórico como referencia de cambio con respecto a la media aritmética de los datos experimentales, según se aprecia en las siguientes tablas:

Tabla 5.15. Resultados para la Membrana 3, Frecuencia 1 (58,17 Hz.)

$\overline{\omega}_{exp}$ (rad/seg)	$\omega_{teórico}$ (rad/seg)	Dif (%)
442,186	365,503	20,980

Tabla 5.16. Resultados para la Membrana 3, Frecuencia 2 (116,34 Hz.)

$\overline{\omega}_{exp}$ (rad/seg)	$\omega_{teórico}$ (rad/seg)	Dif (%)
637,448	731,006	12,799

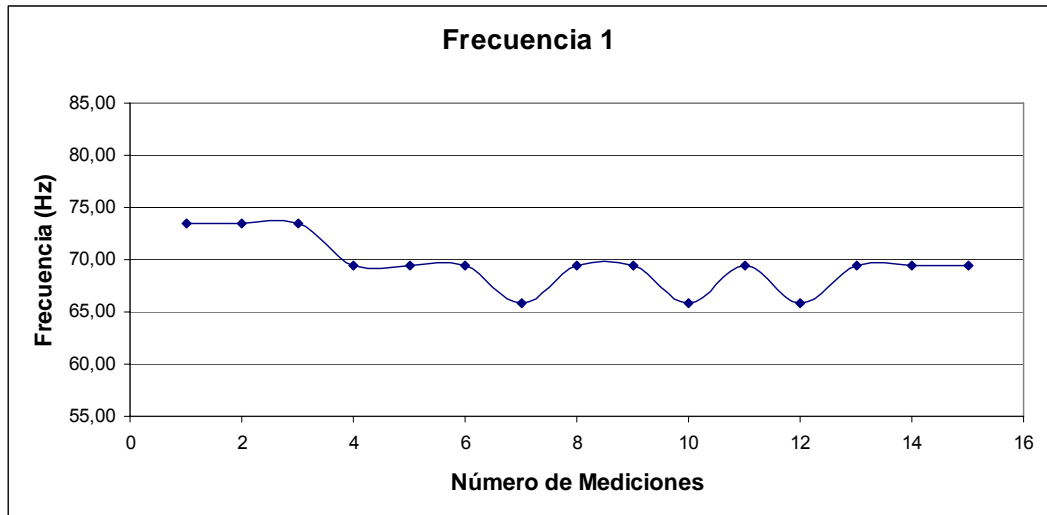
5.3.4. Membrana 4

La cuarta membrana fue ensayada con 80 Orificios. En las siguientes tablas se presentan los resultados obtenidos:

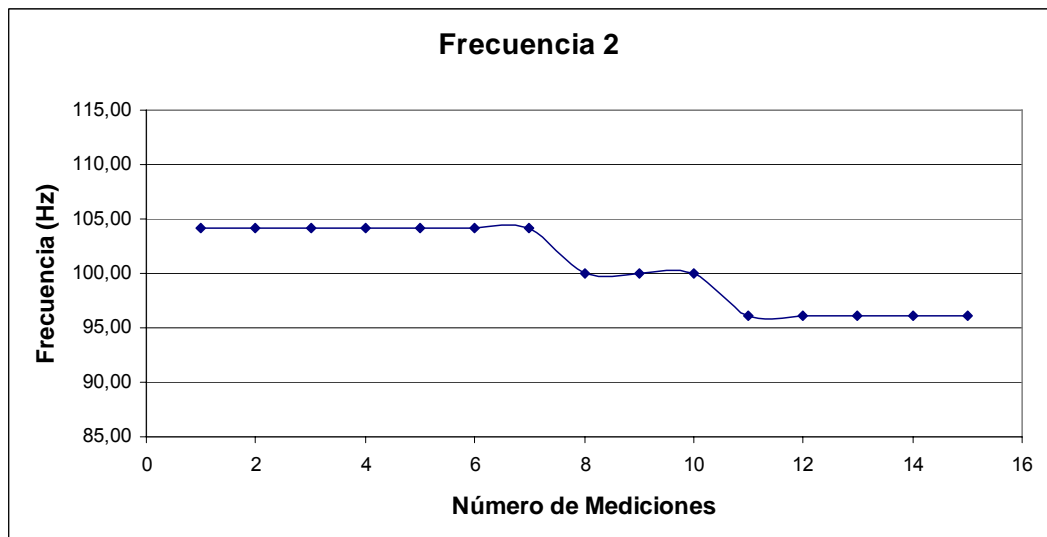
Tabla 5.17. Valores obtenidos para la Membrana 4

Frecuencia 1 (58,17 Hz.)			Frecuencia 2 (116,34 Hz.)		
Medición	Periodo (s)	Frecuencia (Hz)	Medición	Periodo (s)	Frecuencia (Hz)
1	0,0136	73,53	1	0,0096	104,17
2	0,0136	73,53	2	0,0096	104,17
3	0,0136	73,53	3	0,0096	104,17
4	0,0144	69,44	4	0,0096	104,17
5	0,0144	69,44	5	0,0096	104,17
6	0,0144	69,44	6	0,0096	104,17
7	0,0152	65,79	7	0,0096	104,17
8	0,0144	69,44	8	0,01	100,00
9	0,0144	69,44	9	0,01	100,00
10	0,0152	65,79	10	0,01	100,00
11	0,0144	69,44	11	0,0104	96,15
12	0,0152	65,79	12	0,0104	96,15
13	0,0144	69,44	13	0,0104	96,15
14	0,0144	69,44	14	0,0104	96,15
15	0,0144	69,44	15	0,0104	96,15
	$\overline{\omega}_{exp}$	69,53		$\overline{\omega}_{exp}$	100,66
	% Disp	11,132		% Disp	7,960

La cantidad de valores experimentales son representados mediante las dos gráficas siguientes:



Gráfica 5.11. Valores obtenidos para la frecuencia 1 (58,17 Hz.), Membrana 4



Gráfica 5.12. Valores obtenidos para la frecuencia 2 (116,34 Hz.), Membrana 4

Se toma el valor teórico como referencia de cambio con respecto a la media aritmética de los datos experimentales, según se aprecia en las siguientes tablas:

Tabla 5.18. Resultados para la Membrana 4, Frecuencia 1 (58,17 Hz.)

$\overline{\omega}_{exp}$ (rad/seg)	$\omega_{teórico}$ (rad/seg)	Dif (%)
436,873	365,503	19,526

Tabla 5.19. Resultados para la Membrana 4, Frecuencia 2 (116,34 Hz.)

$\overline{\omega}_{exp}$ (rad/seg)	$\omega_{teórico}$ (rad/seg)	Dif (%)
632,480	731,006	13,478

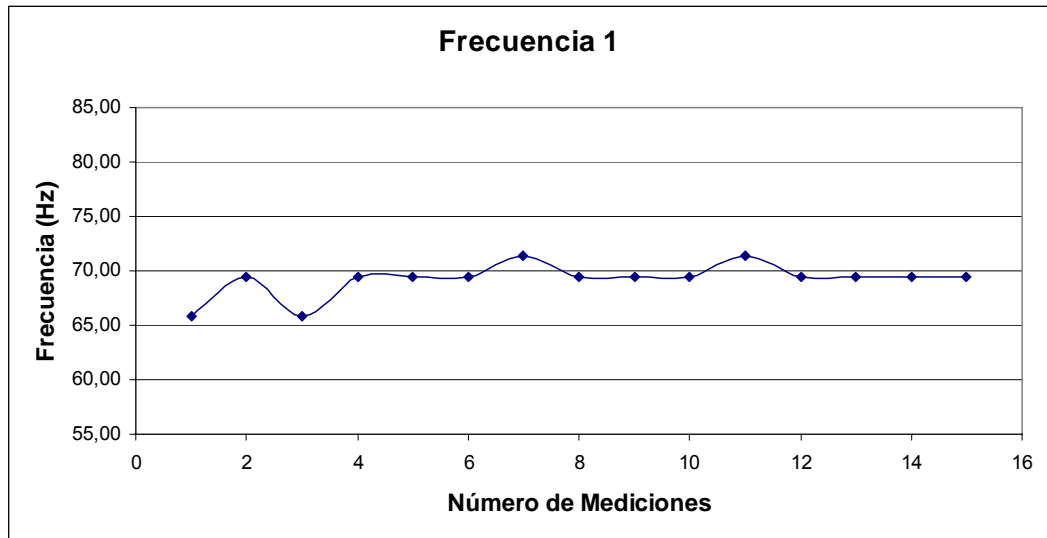
5.3.5. Membrana 5

La quinta membrana fue ensayada con 100 Orificios. En las siguientes tablas se presentan los resultados obtenidos:

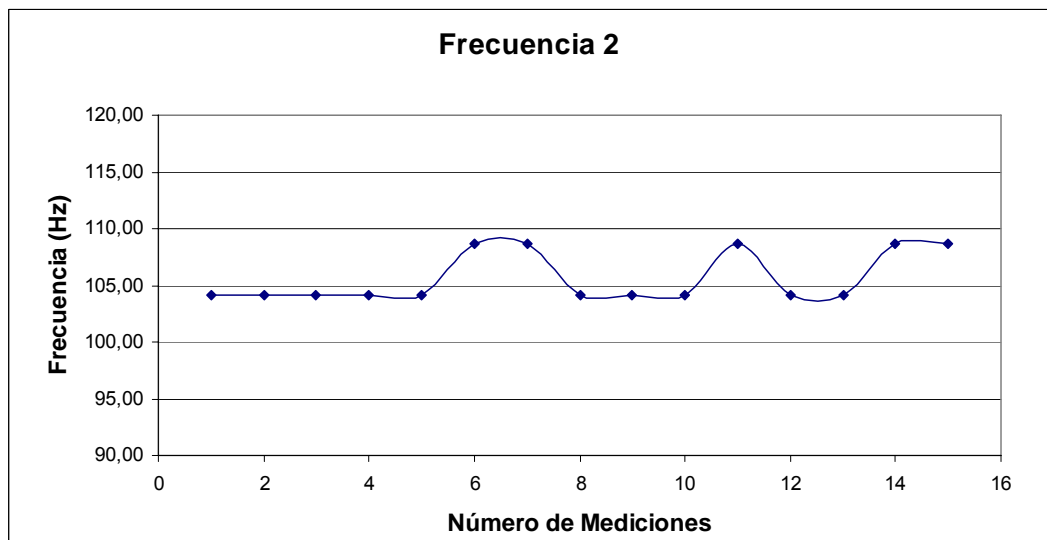
Tabla 5.20. Valores obtenidos para la Membrana 5

Frecuencia 1 (58,17 Hz.)			Frecuencia 2 (116,34 Hz.)		
Medición	Periodo (s)	Frecuencia (Hz)	Medición	Periodo (s)	Frecuencia (Hz)
1	0,0152	65,79	1	0,0096	104,17
2	0,0144	69,44	2	0,0096	104,17
3	0,0152	65,79	3	0,0096	104,17
4	0,0144	69,44	4	0,0096	104,17
5	0,0144	69,44	5	0,0096	104,17
6	0,0144	69,44	6	0,0092	108,70
7	0,014	71,43	7	0,0092	108,70
8	0,0144	69,44	8	0,0096	104,17
9	0,0144	69,44	9	0,0096	104,17
10	0,0144	69,44	10	0,0096	104,17
11	0,014	71,43	11	0,0092	108,70
12	0,0144	69,44	12	0,0096	104,17
13	0,0144	69,44	13	0,0096	104,17
14	0,0144	69,44	14	0,0092	108,70
15	0,0144	69,44	15	0,0092	108,70
	$\overline{\omega}_{exp}$	69,22		$\overline{\omega}_{exp}$	105,68
	% Disp	2,866		% Disp	4,286

Los valores experimentales son representados mediante las dos gráficas siguientes:



Gráfica 5.13. Valores obtenidos para la frecuencia 1 (58,17 Hz.), Membrana 5



Gráfica 5.14. Valores obtenidos para la frecuencia 2 (116,34 Hz.), Membrana 5

Se toma el valor teórico como referencia de cambio con respecto a la media aritmética de los datos experimentales, según se aprecia en las siguientes tablas:

Tabla 5.21. Resultados para la Membrana 6, Frecuencia 1 (58,17 Hz.)

$\overline{\omega}_{\text{exp}}$ (rad/seg)	$\omega_{\text{teórico}}$ (rad/seg)	Dif (%)
434,933	365,503	18,996

Tabla 5.22. Resultados para la Membrana 6, Frecuencia 2 (116,34 Hz.)

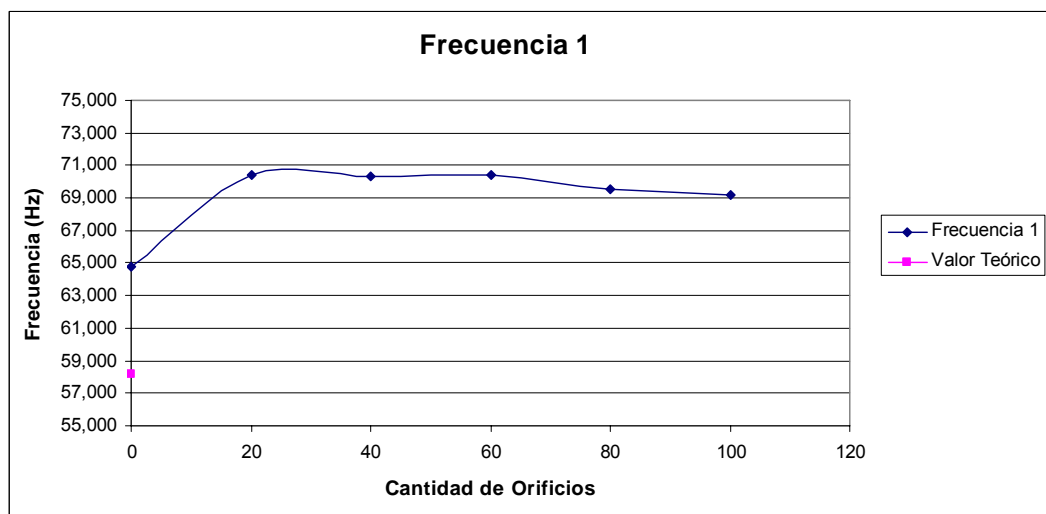
$\overline{\omega}_{exp}$ (rad/seg)	$\omega_{teórico}$ (rad/seg)	Dif (%)
663,984	731,006	9,168

5.4. Reporte General de Resultados Experimentales

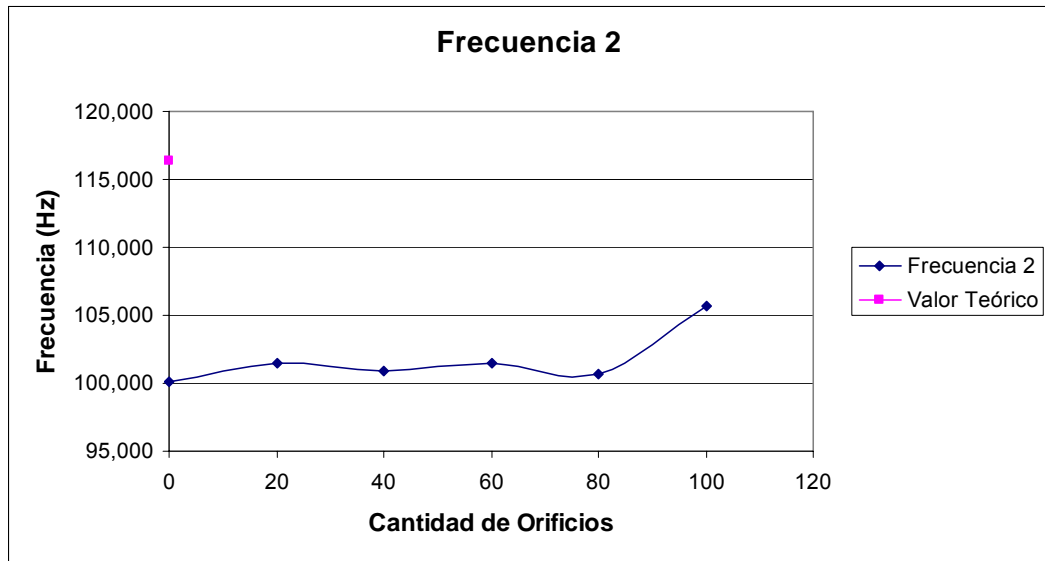
Los resultados obtenidos en los diferentes casos, son presentados mediante tablas y gráficas que permitan observar el comportamiento general del suceso:

Tabla 5.23. Resultados Generales

Cantidad de Orificios	Frecuencia 1 (58,17 Hz.)		Frecuencia 2 (116,34 Hz.)	
	$\overline{\omega}_{exp}$ (rad/seg)	$\omega_{teórico}$ (rad/seg)	$\overline{\omega}_{exp}$ (rad/seg)	$\omega_{teórico}$ (rad/seg)
0	407,264	456,088	629,276	684,131
20	442,199	456,088	637,314	684,131
40	442,010	456,088	634,092	684,131
60	442,186	456,088	637,448	684,131
80	442,186	456,088	632,480	684,131
100	437,163	456,088	654,498	684,131



Gráfica 5.15. Valores Generales obtenidos para la frecuencia 1 (58,17 Hz.)



Gráfica 5.16. Valores Generales obtenidos para la frecuencia 2 (116,34 Hz.)

5.5. Análisis de Resultados Experimentales

Al igual que en los ensayos preliminares la tendencia de las dos frecuencias fundamentales estudiadas (58,17 y 116,34 Hz.) para los resultados generales es de crecimiento. Al realizar perforaciones en la superficie la tensión aumenta debido a que al haber menor cantidad de masa la carga se distribuye en una menor área, la densidad, tal como se puede apreciar en la ecuación (2.4), aumenta debido a que la masa disminuye. Estos resultados concuerdan con la ecuación (2.52) donde la frecuencia natural es proporcional a la tensión e inversamente proporcional al valor de densidad del material.

En el caso de las gráficas individuales para cada membrana, no es posible establecer un patrón de comportamiento específico, sin embargo si puede afirmarse que los puntos en ambas gráficas se encuentran dispersos en un rango de frecuencias donde la diferencia entre el mayor y el menor valor no es superior a 10 Hz. para la Frecuencia 1 (58,17 Hz.) y para la Frecuencia 2 (116,34 Hz.)

CONCLUSIONES

De las actividades realizadas y en base a los resultados obtenidos se concluye lo siguiente:

Para una membrana de (0,30 x 0,30) m de termoplástico, con orificios en su superficie de 0,013 mm. de diámetro, dispuestos en forma radial y de crecimiento progresivo de 20 en 20 hasta un total de 100 perforaciones, las quince mediciones realizadas en cada ensayo, presentaron una tendencia general en la totalidad de los casos donde los valores obtenidos experimentalmente se mantienen en un rango de 10 Hz. entre la mayor y la menor medida. Lo cual implica que el comportamiento de los resultados experimentales tiende a un valor medio cercano a cada uno de ellos y por lo tanto se puede afirmar que el valor de frecuencia natural obtenido experimentalmente para cualquier medición realizada tiene una precisión de +/- 10 Hz., ensayado bajo las mismas condiciones geométricas y de tensión planteadas en este trabajo y para este mismo material, presumiblemente este comportamiento se puede aplicar a diferentes geometrías.

Por lo expuesto anteriormente se puede concluir, que la presencia de mini de orificios de 0,013 mm. de diámetro, dispuestos en forma radial y de crecimiento progresivo de 20 en 20 hasta un total de 100 perforaciones, en membranas cuadradas de (0,30 x 0,30) m de termoplástico, influye ligeramente en las frecuencias fundamentales de vibración consideradas (58,17 Hz. y 116,34 Hz.), lo cual se evidencia por un ligero crecimiento en los valores experimentales obtenidos.

RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar futuras investigaciones que impliquen el uso de distintas geometrías a las planteadas en este trabajo. Con ello se puede comprobar si las conclusiones de esta investigación se aplican a una mayor cantidad de formas físicas y probablemente establecer un patrón de comportamiento general.

También se recomiendan realizar investigaciones con una mayor cantidad de orificios y en disposiciones geométricas diferentes a las planteadas en este trabajo. A raíz de ellas establecer un patrón de comportamiento más amplio, que permita reconocer hasta que punto se puede comparar la variación porcentual de la media aritmética experimental con respecto al valor teórico esperado.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Arias, F. (2004). *El Proyecto de Investigación: Introducción a la Metodología Científica* (4^{ta} Edición). Caracas: Editorial Episteme.

Churrh, A. (1963). *Mechanical Vibrations* (2^{da} edición). Japón: Wiley.

Den Hartog, J. (1974). *Mecánica de las Vibraciones* (5^{ta} impresión). México: Editorial Continental.

Dimarogonas, A. (1993). *Vibration for Engineers* (2^{da} edición). USA: Prentice-Hall.

Faragalli, G. (2007). *Influencia del espesor en la determinación experimental de las frecuencias naturales de vibración de placas delgadas*. Tesis de grado, Ingeniería Mecánica Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Febres, L. (2007). *Determinación experimental de la frecuencia Natural de vibración de placas delgadas*. Tesis de grado, Ingeniería Mecánica Universidad Central de Venezuela, Caracas.

French, A. (2001). *Vibraciones y Ondas*. España: Editorial Reverté.

Gómez, N. y Mazzani, A. (2008). *Diseño y construcción de un banco de pruebas para el análisis de la cantidad de aire acondicionado mediante un equipo con filtro de plasma*. Tesis de grado, Ingeniería Mecánica Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Kalpakjian S. y Schmid S. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. México: Editorial Pearson Educación

León, J. (2004). *Dinámica de Máquinas. Introducción a la Teoría de Máquinas*. Caracas: Universidad Simón Bolívar.

Mabie, S. y Reinholtz, J. (2001). *Mecanismos y Dinámica de Máquinas* (2^{da} edición). México: Editorial Limusa.

Macanás, Jorge. (2006). *Desarrollo de nuevas membranas compuestas para la separación de iones metálicos y aplicaciones electroquímicas*. Trabajo doctoral, Universidad Autónoma de Barcelona, Barcelona España.

Mikaty, M., Padrón M. y Figuera L. (2005). *Instructivo para la presentación de tesis de pre grado, post grado, doctorado y trabajos de ascenso*. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Palacio, L. (1999). *Caracterización estructural y superficial de membranas microporosas*. Tesis Doctoral, Universidad de Valladolid, España.

Pérez, C. (2007). *Estudio de generación de micro burbujas en sistemas aire-agua para el transporte de efluentes de la industria petrolera*. Tesis de grado, Ingeniería Mecánica Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Ramírez, T. (1999). *Como hacer un Proyecto de Investigación*. Caracas: Editorial Panapo de Venezuela C. A.

Roca Vila, R. y León, J. (1981). *Vibraciones Mecánicas*. México: Editorial Limusa S. A.

Thomson, W. y Dale, M. (1998). *Theory of Vibration with Aplications* (5^{ta} edición). USA: Prentice Hall.

Volterra, E. and Zachmanogolv, E. (1965). *Dinamics of Vibrations*. USA: Merrill.

Publicaciones Periódicas

Filipich, C. y Bambill, E. (2005). *Vibraciones Naturales de Membranas Rectangulares con apoyos parciales intermedios de geometría Arbitraria*. Revista de Mecánica Computacional, Volumen XXIV.

J. Undurra L. y R. Venegas C. *Creación de material pedagógico para la resolución, modelación e interpretación numérica de ecuaciones diferenciales*, Proyecto Fondo de Investigación, innovación y desarrollo de la docencia FIDED, Universidad Tecnológica de Chile, 2006.

Jenkins, C. y Korde, U. (2006). *Membrane vibration experiments: An historical review and recent results*. Journal of Sound and Vibration, Volume 295, Páginas 602-613.

Fuentes Electrónicas

Universidad de Zaragoza. Procedimiento de Diálisis. Disponible en: http://www.unizar.es/departamentos/bioquimica_biologia/docencia/FMBvirtual/PurProt/Dialisis.htm. [Consultada 02/02/2008].

Techos de membrana. WAGG Soluciones Tensadas. Disponible en: <http://www.wagg.com.ar>. [Consultada: 10/02/2008].

Bombas de Membrana. DEBEM. Disponible en: www.debem.it/esp/boxer_es.html. [Consultada: 08/10/2008].

Diccionario de la Real Academia Española. Disponible en:

<http://www.rae.es/rae.html>. [Consultada: 15/10/2008].

Teleplastic C.A. Disponible en: <http://www.teleplastic.net/>. [Consultada: 06/06/2008].

Fuentes del Tipo Legal

COVENIN 1565:1995. Norma Venezolana. *Ruido Ocupacional. Programa de Conservación Auditiva. Niveles Permisibles y Criterios de Evaluación*. (3^{era} Revisión).

[ANEXOS]

Niveles de Sonido recolectados experimentalmente para cada membrana

Tabla A.1 Datos experimentales recolectados para la membrana 1, 20 orificios			
Frecuencia 1 (58,17 Hz.)		Frecuencia 2 (116,34 Hz.)	
Medición	Niveles de Sonido (dB)	Medición	Niveles de Sonido (dB)
1	95,5	1	90,7
	95,6		90,9
	95,9		91,1
2	97,2	2	90,4
	97,4		90,6
	97,6		90,8
3	96,1	3	89,8
	96,3		90,1
	96,8		90,5
4	96,3	4	89,9
	96,8		90,1
	96,6		90,5
5	97,4	5	90,1
	97,6		90,4
	97,8		90,8
6	97,2	6	90
	97,4		90,5
	97,6		90,8
7	97,4	7	90,6
	97,6		90,7
	97,8		90,8
8	97,2	8	90,3
	97,4		90,4
	97,6		90,7
9	95,9	9	90,5
	96,1		90,7
	96,3		90,9
10	95,9	10	88,8
	96,1		88,6
	96,3		89,1
11	96,6	11	90,1
	96,8		90,2
	97		90,4
12	95,9	12	90,4
	96,1		90,7
	96,3		90,9
13	96,3	13	89,6
	96,8		89,9

	96,6		90,1
14	96,8	14	89,6
	97		89,8
	97,2		89,7
15	97	15	89,6
	97,2		89,7
	97,4		89
Promedio	96,8	Promedio	90,2

Tabla A.2 Datos experimentales recolectados para la membrana 2, 40 orificios			
Frecuencia 1 (58,17 Hz.)		Frecuencia 2 (116,34 Hz.)	
Medición	Niveles de Sonido (dB)	Medición	Niveles de Sonido (dB)
1	98	1	91,6
	98,2		91,8
	98,4		92
2	98,7	2	91,4
	97,4		91,5
	97,6		91,7
3	96,8	3	91,2
	97		91,4
	97,2		91,5
4	97,6	4	91,2
	97,8		91,4
	98		91,6
5	97,4	5	91,2
	97,6		91,4
	97,2		91,5
6	97,2	6	91
	97,4		91,1
	97		91,3
7	97	7	90,5
	97,2		90,7
	97,4		90,9
8	97,2	8	90,7
	97,4		90,8
	97,6		90,9
9	96,8	9	90,5
	97		90,8
	97,2		90,9
10	96,8	10	90,6
	97		90,8
	97,2		90,9
11	96,6	11	90,5
	96,8		90,7
	97		90,9
12	96,6	12	90,5
	96,8		90,7

	97		90,9
13	96,1	13	90,7
	96,3		90,9
	96,8		91
14	95,9	14	90,5
	96,1		90,8
	96,3		91,2
15	97,2	15	90,7
	97,4		90,9
	97,6		91,2
Promedio	97,2	Promedio	91,0

Tabla A.3 Datos experimentales recolectados para la membrana 3, 60 orificios			
Frecuencia 1 (58,17 Hz.)		Frecuencia 2 (116,34 Hz.)	
Medición	Niveles de Sonido (dB)	Medición	Niveles de Sonido (dB)
1	95,9	1	90,2
	96,4		90,5
	96,3		90,7
2	96,1	2	90,5
	96,3		90,7
	96,6		90,9
3	95,6	3	90,3
	95,9		90,4
	96,1		90,8
4	95,4	4	89,5
	95,6		89,8
	95,9		89,9
5	95,6	5	90
	95,9		90,2
	96,1		90,5
6	95,1	6	90,3
	95,4		90,5
	95,6		90,7
7	95,1	7	90,5
	95,6		90,7
	95,9		90,9
8	98,2	8	90,3
	98,4		90,4
	98,6		90,8
9	96,1	9	90,2
	96,3		90,5
	96,6		90,8
10	95,9	10	90,1
	96,1		90,2
	96,3		90,3
11	95,4	11	89,4
	95,6		89,6
	95,9		89,8

12	95,4	12	90,3
	95,6		90,5
	95,9		90,7
13	96,6	13	90,1
	96,8		90,3
	95,7		90,5
14	96,1	14	89,3
	96,3		89,5
	96,6		89,7
15	97,2	15	89,5
	97,4		89,9
	97,6		90
Promedio	96,2	Promedio	90,2

Tabla A.4 Datos experimentales recolectados para la membrana 4, 80 orificios			
Frecuencia 1 (58,17 Hz.)		Frecuencia 2 (116,34 Hz.)	
Medición	Niveles de Sonido (dB)	Medición	Niveles de Sonido (dB)
1	97,2	1	92
	97,4		92,1
	97,6		92,2
2	97	2	90,1
	97,2		90,5
	97,4		90
3	97,2	3	91,1
	97,4		91,2
	97,6		91,4
4	95,4	4	89
	95,5		89,6
	95,9		89,8
5	95,4	5	91,1
	95,6		91,2
	95,9		91,3
6	96,3	6	89
	96,6		89,3
	96,9		89,7
7	95,6	7	90,2
	95,9		90,5
	96,1		90,9
8	96,3	8	88,6
	96,6		88,9
	96,8		89,2
9	96,1	9	90,2
	96,3		90,5
	96,6		90,8
10	95,9	10	90,5
	96,1		90,7
	96,3		90,9
11	96,3	11	90,1

	96,8		90,3
	96,6		90,5
12	95,9	12	89,6
	96,1		89,7
	96,3		89,8
13	95,9	13	89,3
	96,1		89,6
	96,3		89,7
14	96,3	14	88,4
	96,6		88,3
	96,8		88,7
15	96,3	15	89
	96,6		89,5
	96,8		89,9
Promedio	96,4	Promedio	90,1

Tabla A.5 Datos experimentales recolectados para la membrana 5, 80 orificios			
Frecuencia 1 (58,17 Hz.)		Frecuencia 2 (116,34 Hz.)	
Medición	Niveles de Sonido (dB)	Medición	Niveles de Sonido (dB)
1	96,1	1	90,6
	96,3		90,7
	96,6		90,8
2	95,4	2	90
	95,6		90,1
	95,9		90,2
3	95,9	3	90
	96,1		90,1
	96,3		90,3
4	95,6	4	90
	95,9		90,2
	96,1		90,4
5	95,4	5	90
	95,6		90,2
	95,9		90,3
6	95,6	6	90
	95,9		90,3
	96,1		90,4
7	95,9	7	90
	96,1		90,3
	96,3		90,6
8	95,4	8	90
	95,6		90,1
	95,9		90,2
9	95,4	9	90,2
	95,6		90,3
	95,9		90,4
10	95,1	10	90,1
	95,4		90,2

	95,6		90,3
11	95,4	11	89,8
	95,6		89,9
	95,9		90,1
12	95,6	12	89,7
	95,9		89,9
	96,1		90,1
13	95,1	13	90,1
	95,4		90,2
	95,6		90,4
14	95,1	14	90
	95,4		90,2
	95,9		90,3
15	95,9	15	90
	96,1		90,1
	96,3		90,3
Promedio	95,8	Promedio	90,2