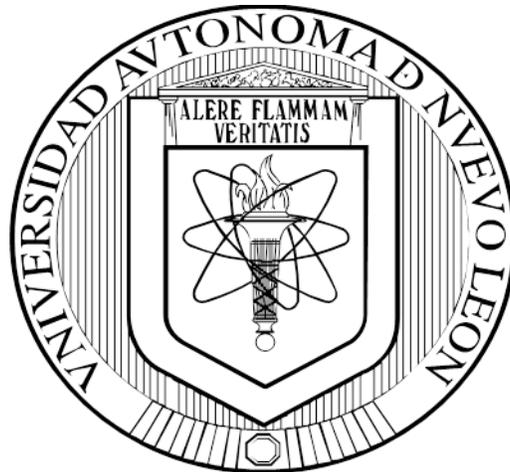


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS**



**MEDICIÓN DE PROPIEDADES ELÁSTICAS EN SÓLIDOS POR  
EFECTO FOTO-TERMO-ACÚSTICO**

**POR**

**NESTOR ANTONIO FLORES MARTÍNEZ**

**COMO VALOR CURRICULAR EN LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA FÍSICA INDUSTRIAL**

**DICIEMBRE, 2016**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS

CENTRO DE INVESTIGACIONES EN CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis “MEDICIÓN DE PROPIEDADES ELÁSTICAS EN SÓLIDOS POR EFECTO FOTO-TERMO-ACÚSTICO”, realizada por el alumno Nestor Antonio Flores Martínez, con número de matrícula 1449468, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestría en Ingeniería Física Industrial.

El Comité de Tesis

Dr. Valentín Guzmán Ramos  
Asesor de Tesis

Dr. Juan Manuel Sierra Hernández  
Secretario

Dra. Nora Elizondo Villarreal  
Vocal

Dr. Romeo de Jesús Selvas Aguilar  
Subdirector de Estudios de Posgrado  
Centro de Investigaciones en Ciencias Físico Matemáticas

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, 2016

## AGRADECIMIENTOS

Primero que nada, quiero agradecer a mi familia: Antonio Flores Hernández, mi padre, María Guadalupe Martínez López, mi madre, Dora Emma Flores Martínez, mi hermana, Julián Nicolás Álvarez Rojas, mi cuñado. Ya que la familia nos da ese pequeño impulso que nos hace falta cuando el cansancio, el estrés, el hastío y la desesperación se hacen presentes. También agradecerles porque me tuvieron paciencia cuando mi situación estudiantil se volvía una pesadez que se reflejaba en mi estado de ánimo. Así mismo, agradecerles por esos breves ratos de convivencia que me ayudaron a distraerme y retomar fuerzas para continuar con mis obligaciones.

Quiero agradecer a mis compañeros de la facultad que formaron parte también del equipo de investigación orientado a Fotoacústica: Andrés, Haroldo, Manuel Borjas, Juan José, Ilse Rocha. Fue un gran apoyo tenerlos ayudándome, ya que incluso con sus dudas, preguntas o críticas me hacían darme cuenta de la importancia del trabajo, de pequeños asuntos por aclarar en el trabajo y me ayudaban a concentrarme mejor. Gracias por su apoyo en el dominio del equipo y de las múltiples dudas que surgían de ustedes.

Por ultimo pero no menos importante, gracias a los profesores que hicieron posible en primera instancia, que yo pudiera cubrir estudios de Maestría. Dr. Valentín Guzmán Ramos, Dr. Romeo de Jesús Selvas Aguilar, Dr. Arturo Alberto Castillo Guzmán, mis agradecimientos por haberme apoyado a desarrollar mi tema de tesis, por permitirme formar parte de su equipo de investigación y por aceptarme como un estudiante del PIFI, cada uno respectivamente.

“Si tomamos a los hombres tal y como son, los haremos peores de lo que son. En cambio, si los tratamos como si fuesen lo que deberían ser, los llevaremos allí donde tienen que ser llevados”.

Goethe

# ÍNDICE

	<b>Pág.</b>
ABREVIATURAS DE INTERÉS	6
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABLAS	10
LISTA DE GRÁFICAS	11
RESUMEN	12
HIPÓTESIS	13
OBJETIVOS GENERALES	13
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
1. INTRODUCCIÓN	14
2. MARCO TEÓRICO	16
2.1 CONCEPTOS BÁSICOS	16
2.1.1 Sonido: Definición y características	16
2.1.1.1 Acústica	20
2.1.1.2 Ultrasonido e infrasonido	21
2.1.1.3 Vibraciones mecánicas en cuerpos sólidos	26
2.1.1.4 Micrófonos	27
2.1.2 Óptica física	30
2.1.2.1 Láseres	30
2.1.2.2 Efecto fotoacústico	31
2.1.2.3 Efecto termoacústico	32
2.1.3 Dinámica de fluidos	34
2.1.3.1 Dinámica de gas ideal	35
2.1.3.2 Compresibilidad	36
2.1.3.3 Gas dispersivo	38

2.1.4 Ley de Hooke	39
2.1.4.1 Descripción simple de la Ley de Hooke	39
2.1.4.2 Visión general de la Ley de Hooke	41
2.1.5 Análisis de ondas sónicas	42
2.1.5.1 Ruido blanco	44
2.1.5.2 Ruido en las mediciones	46
3. METODOLOGÍA	47
3.1 MATERIALES	47
3.1.1 Osciloscopio	48
3.1.2 Multímetro digital	48
3.1.3 Controlador láser LDC 3065	49
3.1.4 Termómetro digital	50
3.2 PROCEDIMIENTO MATEMÁTICO	51
3.2.1 Velocidad dinámica del sonido	67
3.3 JUSTIFICACIÓN NUMÉRICO-GRÁFICA	70
3.3.1 Simulación numérica	70
3.4 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	77
4. RESULTADOS	81
4.1 TRATAMIENTO DE DATOS	81
5. CONCLUSIONES	89
BIBLIOGRAFÍA	91

## ABREVIATURAS DE INTERÉS

BPM – Beats per minute (Pulsos por Minuto)  
dB – decibeles  
ED – Ecuación Diferencial  
EDH – Ecuación Diferencial Homogénea  
EDNH – Ecuación Diferencial No Homogénea  
EF – Efecto fotoacústico  
EFT – Efecto foto-termo-acústico  
ELH – Efecto de tipo Ley de Hooke  
FG – Función de Green  
Hz – Hertz  
kHz – kilohertz  
LD – Diodo láser  
LH – Ley de Hooke  
MC – Módulo de compresibilidad  
MD – Módulo de deformación  
ME – Factor equivalente a la masa (mass equivalent)  
MMD – Multímetro digital  
MY – Módulo de Young  
PA – Proceso Adiabático  
PI – Proceso Isotérmico  
TFG – Teoría de Función de Green

## LISTA DE FIGURAS

<b>Descripción</b>	<b>Página</b>
<i>Figura 2.1. Descripción básica de una onda y sus elementos más básicos, para el caso de una función temporal.</i>	18
<i>Figura 2.2. (A) Imagen instantánea del comportamiento de compresión y rarefacción de las partículas en el aire, durante el viaje de una onda de sonido. (B) Las zonas comprimidas se encuentran ligeramente por encima y las zonas rarefadas ligeramente por debajo del valor de la presión atmosférica. Por ende, las variaciones de presión para las ondas de sonido se encuentran superpuestas sobre las variaciones barométricas de presión (es decir, las generadas en la naturaleza).</i>	20
<i>Figura 2.3. Mapeo de la zona “audible” dentro del espectro de todas las vibraciones mecánicas posibles.</i>	22
<i>Figura 2.4. Contornos de niveles similares de volumen en el oído humano. Estos contornos muestran la falta de sensibilidad del oído a tonos bajos, especialmente para sonidos de baja frecuencia. La forma inversa de esta gráfica nos dice, los valores de la frecuencia a los que hay respuesta del oído para determinados niveles de volumen.</i>	23
<i>Figura 2.5. Comparativa de la respuesta del oído a 20 Hz con respecto a su respuesta a 1 000 Hz. A un nivel de volumen de 30 fonos, el nivel de presión sónica de un tono de 20 Hz debe ser 58 dB más alto que a 1 000 Hz para que tenga el mismo volumen. A un nivel de 90 fonos, se requiere sólo un aumento de 32 dB.</i>	24
<i>Figura 2.6. El pitch (en mels, una unidad subjetiva) está relacionado con la frecuencia (en Hz, una unidad física) de acuerdo a esta curva obtenida a través de un grupo de control.</i>	25
<i>Figura 2.7. Representación gráfica de la estructura básica del micrófono de capacitor o de diafragma.</i>	28
<i>Figura 2.8. Representación gráfica de la estructura del micrófono de cristal.</i>	29
<i>Figura 2.9. Celda fotoacústica. La luz incide en la muestra por la parte superior a través de una fibra óptica; el micrófono está situado lateralmente.</i>	31

<i>Figura 2.10. Ilustración de algunos efectos fototérmicos (y/o termoacústicos).</i>	34
<i>Figura 2.11. Representación del movimiento del oscilador armónico simple para el uso de un muelle/resorte y sus ecuaciones que describen el comportamiento.</i>	40
<i>Figura 2.12. Representación sencilla de la zona de validez para el uso de LH.</i>	40
<i>Figura 2.13. La zona correspondiente al habla natural dentro de la región audible.</i>	43
<i>Figura 2.14. Zona utilizada típicamente para la música dentro de la región audible. La frecuencia corresponde a la medible en términos de su variación y no al pitch.</i>	44
<i>Figura 2.15. El ruido aleatorio tiene el mismo valor de energía por cada variación de Hz. Si el espectro del ruido es medido (sonido blanco) con un analizador de onda manejando un ancho de banda fijo, el espectro resultante será plano con respecto a la frecuencia, como en A.</i>	45
<i>Figura 2.16. La prueba de la aleatoriedad en una señal de ruido, se presenta en un espectro de pruebas para voltaje instantáneo medido para un muestreo de 1 000 puntos igualmente espaciados en tiempo. Si la muestra es totalmente aleatoria, se debe presentar la curva gaussiana.</i>	46
<i>Figura 3.1. Osciloscopio modelo DSOX2002A.</i>	47
<i>Figura 3.2. MMD Agilent Technologies modelo U1232A.</i>	48
<i>Figura 3.3. Controlador de electricidad para el LD de 809 nm, modelo LDC 3065.</i>	49
<i>Figura 3.4 Termómetro digital con lectura de humedad en tiempo real.</i>	50
<i>Figura 3.5. Representación gráfica del arreglo experimental, denotando los ángulos como su uso para efectos de simetría.</i>	54
<i>Figura 3.6. En el ángulo sólido mostrado, se distribuye la misma energía sónica a través de cada zona esférica correspondiente al área estudiada, conforme la distancia (d) se incrementa, se muestra el mismo comportamiento. La intensidad del sonido es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia con respecto al punto fuente.</i>	56
<i>Figura 3.7. Del lado izquierdo está el micrófono de cristal receptor del sonido, del lado derecho está la fuente de sonido, micrófono de membrana.</i>	60
<i>Figura 3.8. La ley del inverso del cuadrado para la intensidad del sonido tiende a regirse como la ley del inverso de la distancia en cuanto a la presión sónica. Es decir, que el nivel de presión del sonido se reduce en 6 dB cada vez que se duplica la distancia.</i>	66

<i>Figura 3.9. Corte transversal estructural de la placa metálica. Representación básica para el efecto de ley de Hooke en la perturbación del cuerpo.</i>	75
<i>Figura 3.10. Corrimiento de fase para la propagación de sonido debido a interacción de luz láser en una estructura tridimensional de una placa.</i>	76
<i>Figura 3.11. El arreglo experimental después de usarse, la hoja milimétrica tiene la finalidad de poder conocer las distancias del arreglo en todo momento y verificar que todos los componentes guarden el arreglo simétrico necesario.</i>	77
<i>Figura 3.12. Imagen representativa de cómo está dispuesto el sistema y de cómo funcionan las interacciones.</i>	78

## LISTA DE TABLAS

<b>Descripción</b>	<b>Página</b>
<i>Tabla 3.1.- Constante adiabática para algunos de los gases más comunes.</i>	68
<i>Tabla 4.1. Se muestra los datos obtenidos para una de las primeras pruebas. Las condiciones están especificadas dentro de la tabla. *Los cálculos matemáticos se hicieron siempre en términos de metros.</i>	81
<i>Tabla 4.2. Se muestra los datos obtenidos para una de las pruebas secundarias, una vez cambiado el material. Las condiciones están especificadas dentro de la tabla.</i>	83
<i>Tabla 4.3. Valores reportados en textos para las características elásticas más importantes en los materiales más comunes. *Todas las velocidades del sonido corresponden a una temperatura de 20° C (293.15 K)</i>	84
<i>Tabla 4.4. Muestreo de los datos usados en el estudio de las características de las placas. *La palabra 'sonido' hace referencia a que se hicieron pruebas con ultrasonido únicamente y sin la fuente láser funcionando. **Esta prueba se tomó con un haz de baja potencia, con la finalidad de probar si depende o no de la potencia del láser sino del efecto térmico por la longitud de onda (energía absorbida).</i>	87
<i>Tabla 4.5. Muestreo de los datos promedio usados en el estudio de las características de la placa de aluminio.</i>	88

## LISTA DE GRÁFICAS

<b>Descripción</b>	<b>Página</b>
<i>Gráfica 3.1. Gráfica obtenida de la página de acceso libre de Wolfram Alpha. Se muestra el comportamiento de la solución a la EDNH. Sobre el eje de abscisas tenemos la distancia recorrida, en el eje de ordenadas tenemos la amplitud resultante.</i>	71
<i>Gráfica 3.2. Se muestran los datos obtenidos de la simulación. Rango de sonido audible. Iteración realizada a 10 Hz, <math>\alpha = 1</math>.</i>	72
<i>Gráfica 3.3. Rango de sonido audible. Iteraciones realizada a 10 Hz, <math>\alpha = 4</math>.</i>	72
<i>Gráfica 3.4. Rango de sonido audible. Iteraciones realizada a 20 Hz, <math>\alpha = 1</math>.</i>	73
<i>Gráfica 3.5. Rango de sonido audible. Iteraciones realizada a 20 Hz, <math>\alpha = 4</math>.</i>	73
<i>Gráfica 3.6. Rango de sonido audible. Iteraciones realizada a 5 kHz, <math>\alpha = 1</math>.</i>	74
<i>Gráfica 3.7. Límite del sonido audible. Iteraciones realizada a 20 kHz, <math>\alpha = 1</math>.</i>	74

## RESUMEN

El presente trabajo es un compendio de diversos temas para describir un solo fenómeno de la ciencia. Se ha usado de la acústica, óptica física, termodinámica, electrónica y matemática aplicada a la física. Algunas de estas tienen mayor presencia en el trabajo pero todas se usan para describir el efecto con múltiples parámetros generando con esto un factor de error bajo. Se establece el trabajo a partir de una teoría nueva desarrollada en base a otras ya establecidas, se busca tener un método de medición de propiedades elásticas que sea válido para usarse en cualquier tipo de ambiente controlado o en situaciones de poco control (como las condiciones industriales). El desarrollo matemático también se puede usar para que las mediciones sean sin entrar en contacto con los objetos en estudio, lo cual es una ventaja para darle uso en materiales que ya forman parte de alguna tecnología, aparato o que pudiesen estar en algún tratamiento químico o térmico. El trabajo tiene también una base de datos simulados para poder establecer de mejor manera la validez del estudio, coincidiendo los datos medidos, las ecuaciones y las predicciones numéricas.

## **HIPÓTESIS:**

Todas las ondas se generan a partir de ciertas perturbaciones en la energía, por lo que podemos correlacionar diferentes tipos de estas que se pueden usar en pruebas experimentales como: luz, sonido, vibraciones mecánicas internas. etc. Conociendo las correlaciones entre luz y onda acústica, junto con las vibraciones en un cuerpo, se puede medir ciertos cambios en estructuras sólidas que dependen de las características de estas en relación con la evolución del sonido en su medio gaseoso.

## **OBJETIVO GENERAL:**

Establecer un modelo teórico-experimental para medir densidad, módulo de Young y el espesor de ciertas placas u objetos muy delgados utilizando el efecto foto-termo-acústico con materiales de uso común.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

- Probar que cualquier tipo de fuente láser puede provocar perturbaciones en un sistema en equilibrio.
- Probar que las perturbaciones generadas en una placa por incidencia del láser dependen de la potencia y no la longitud de onda.
- Medir características físicas haciendo uso de vibraciones mecánicas.
- Establecer un desarrollo matemático que sea útil para el experimento que se analiza aquí, como para otros posibles casos de aplicación que se busquen.
- Establecer un precedente para hacer uso del efecto foto-termo-acústico y fotoacústico para estudios industriales de bajo costo (económico y de recursos).

## INTRODUCCIÓN

Dentro del texto se toman un conjunto de definiciones, es importante recurrir a estas ya que con el paso del tiempo y el uso excesivo por parte de cientos de artículos y ensayos, dichos conceptos se han ido mal interpretando o se les ha dado usos que no corresponden a su verdadero significado.

Lo que la gente logra asimilar como sonido, ultrasonido e infrasonido, son por lo general concepciones erróneas. En un sentido estricto debemos clasificar los experimentos desarrollados aquí como efecto foto-termo-acústico, pero para simplificar el texto se puede llamar simplemente fotoacústica.

Poco a poco se van uniendo los conceptos pero no como un añadido, sino más bien explicando porque todo esta correlacionado y cómo encaja todo desde un principio.

En el texto se tomarán los casos simples de una cuerda, una membrana y una vara de sección transversal variable. Esto para introducir algunos conceptos sobre sonido y acústica. En algunos de los conceptos se aclarará que tipo de consideraciones especiales se tendrán para resolver los problemas o para el análisis de las características a introducir.

Decenas de parámetros están relacionados con el sonido (independientemente si hablamos del sonido como un fenómeno físico, matemático o incluso de la industria musical) y todos en conjunto sirven para dar entendimiento a las relaciones que hay entre las propiedades mecánicas y las funciones de onda que se usan para perturbaciones en cuerpos. Algunos de ellos son sumamente complejos y surgen de otros más básicos, los últimos se irán explicando durante el desarrollo del escrito.

Dentro de la metodología del proyecto se considerarán ciertas características necesarias del sistema de ultrasonido que se hicieron mención antes, como se ha denotado, se busca unir todos los elementos en uno solo, y aunque los datos se analicen sólo de un cierto conjunto de ecuaciones, todas estas salen de tener un fenómeno físico completo que viene de varios tipos de interacciones físicas convergiendo en un solo experimento.

En el apartado de resultados se muestran varias tablas con datos, alguna para los valores obtenidos numéricamente, otras para las medidas en el experimento y además varias tablas más donde se analizan todos estos valores tomados del programa. Se repetirán algunos datos ya que se busca hacer una explicación profunda sobre todos los valores tomados y el porqué de cada uno de estos.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 CONCEPTOS BÁSICOS

#### 2.1.1 Sonido: Definición y características

En un sentido estricto, la palabra *sonido* debería usarse en relación a efectos que son directamente perceptibles por el oído humano. Debemos considerar la palabra *sonido* para cubrir toda fenomenología de las ondas en el aire en el rango de frecuencias de 30 Hz (o 20 Hz dependiendo de las cualidades anatómicas del oído de la persona) a 15 000 ciclos/s (o 20 000 Hz, dependiendo de la sensibilidad del oído) y debemos usar adjetivos calificativos que estén relacionados por las propiedades de dichas ondas, tales como “desplazamiento de partículas”, “presión excedente”, y similares.

De esta definición, podemos decir que el sonido como tal solo existe en el aire, o en cualquier gas que pudiera rodear al oído. Para cualquier objeto sólido que se genere bajo una perturbación mecánica, una respuesta de desplazamiento de materia o de alteraciones de energía, suelen ubicarse dentro del sonido, pero si pertenece a la acústica.

La acústica abarca el estudio de todas las ondas mecánicas presentes en un material, ya sea que se trate de alguna estructura macroscópica como de una estructura microscópica (o incluso de nivel nano).

Si tomamos las diversas aplicaciones de esta y las perturbaciones mecánicas (sean sonido o no), todo esto contiene un conjunto de parámetros que determinan cómo se comporta la onda, algunos de los cuales toman validez solo en algunos casos:

- *Pitch* (una propiedad de la acústica y de la música que tienen en común, más no hay una definición formal para dicho parámetro y mucho menos una traducción)
- Decibel
- Timbre
- Frecuencia
- Longitud de onda
- Volumen (*loudness* por su nombre en inglés)
- Presión
- Temperatura
- Energía
- Intensidad
- Potencia
- Tiempo
- Ruido
- Densidad del medio

Decibel.- Es una cantidad fundamental, medida en términos relativos de la intensidad, en una comparación de una onda con respecto a otra, principalmente usado en la electrónica y la industria musical. Para dos intensidades de sonido diferentes  $I_1$ ,  $I_2$ , se dice que una es de mayor intensidad que la otra por una cantidad de *decibeles* (db o dB), donde:

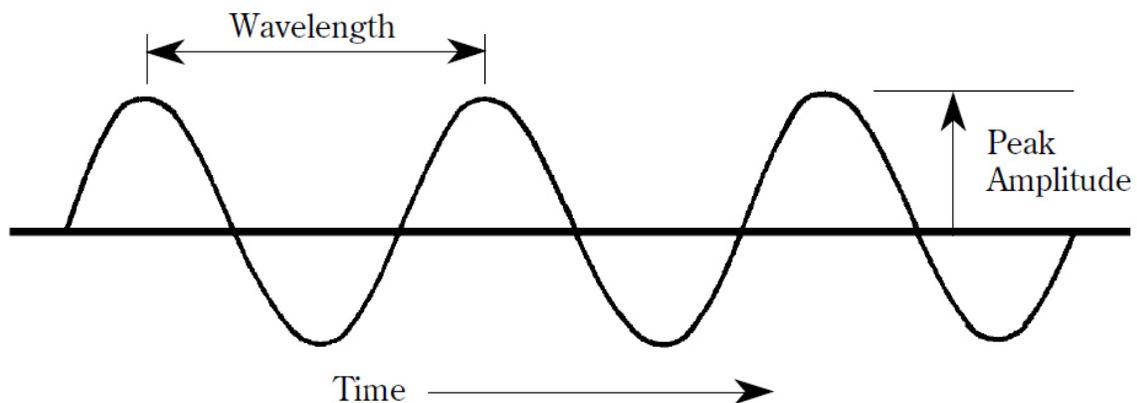
$$\text{Diferencia de intensidad en dB} = 10 \log_{10} \frac{I_1}{I_2}$$

El uso más común en la electrónica y la industria musical para el decibel es en una comparativa con el ‘ruido blanco’ o con una señal de fondo que bien puede ser controlada. Se utiliza por lo general para tener un control de las variaciones que tiene una señal de audio generada por computadora o por un sistema electrónico, con respecto a una señal de fondo o señal de ruido, para ver la pureza de la señal que se está obteniendo. Aunque en ocasiones puede ser que la señal que se desea conocer sea la de ruido, para comprender la forma en que se comporta el

sistema o para tener un control de los errores en el diseño del sistema electrónico (o de la música).

Frecuencia.- Se llama frecuencia al grado en que se repite el movimiento periódico de una fuente vibrante de sonido. En el sonido puede variar con respecto a todos los parámetros del sistema, e incluso con respecto a otras. Por lo general se relaciona a la frecuencia con la energía, siempre una mayor frecuencia implica una mayor energía que proviene de la fuente.

Longitud de onda.- Para perturbaciones de naturaleza armónica, se tiene que la longitud de onda es la distancia que hay entre crestas adyacentes. Gracias a la correlación  $\lambda = \frac{v}{f} = vT$ , donde  $v$  es la velocidad de la onda (dicha velocidad puede o no ser la misma del sonido), podemos conocer que al inverso de la frecuencia, entre mayor la energía del sistema menor la longitud de onda.



*Figura 2.1. Descripción básica de una onda y sus elementos más básicos, para el caso de una función temporal.*

El volumen del sonido, en términos de acústica moderna, es una medida meramente subjetiva sobre la sensación de impacto de una onda con el oído. De su definición en inglés tenemos que el volumen está más relacionado con el ruido que con alguna propiedad clásica del sonido. Como una característica debería ayudar a entender su fuente, su amplitud, su fase o incluso su nivel de energía, no

obstante esta medida subjetiva tiene que ver con alguna señal de referencia propia de un sistema real (no en total quietud) por lo tanto se basa en un “ruido” de fondo, y al medirlo por lo general se supone como una superposición de señales.

Densidad de energía. Intensidad en la onda.- Densidad de energía se le llama al valor promedio de energía por unidad de volumen en el medio, debido a la onda producida. La *intensidad* en la onda está definida como el flujo de energía por unidad de tiempo y por unidad de área (o de volumen, si hacemos nuestro análisis de ondas en 3D), moviéndose de forma normal con respecto a la dirección de la propagación de la onda.

$$I = \frac{1}{2} p_m \dot{\xi}_m = \frac{1}{2} \rho_0 c \omega^2 \xi_m^2 \quad (2.1)$$

También podemos verlo como la cantidad de energía promedio que se desplaza por el cuerpo a cada unidad de volumen. De forma que la intensidad nos permite hacer nuestro análisis de las ecuaciones diferenciales a través de equivalencias de energía y no sólo de funciones adimensionales. Si tomamos expresiones para la función de onda que describe el sistema, tenemos que dicha intensidad depende de las características del mismo.

Ruido. El espectro acústico continuo.- En algunos textos se define al *ruido* como sonido no deseado. Dicho ruido puede ser obtenido por diversas condiciones del medio. No todo el ruido que se tiene en un estudio de acústica proviene, siendo estrictos, de un ruido de fondo sino también de las imperfecciones causadas en el sonido debido a una alteración en el medio donde se comunica el material: para gases, convección en los mismos debidos a cambios de temperatura, para metales puede ser la no homogeneidad del material.

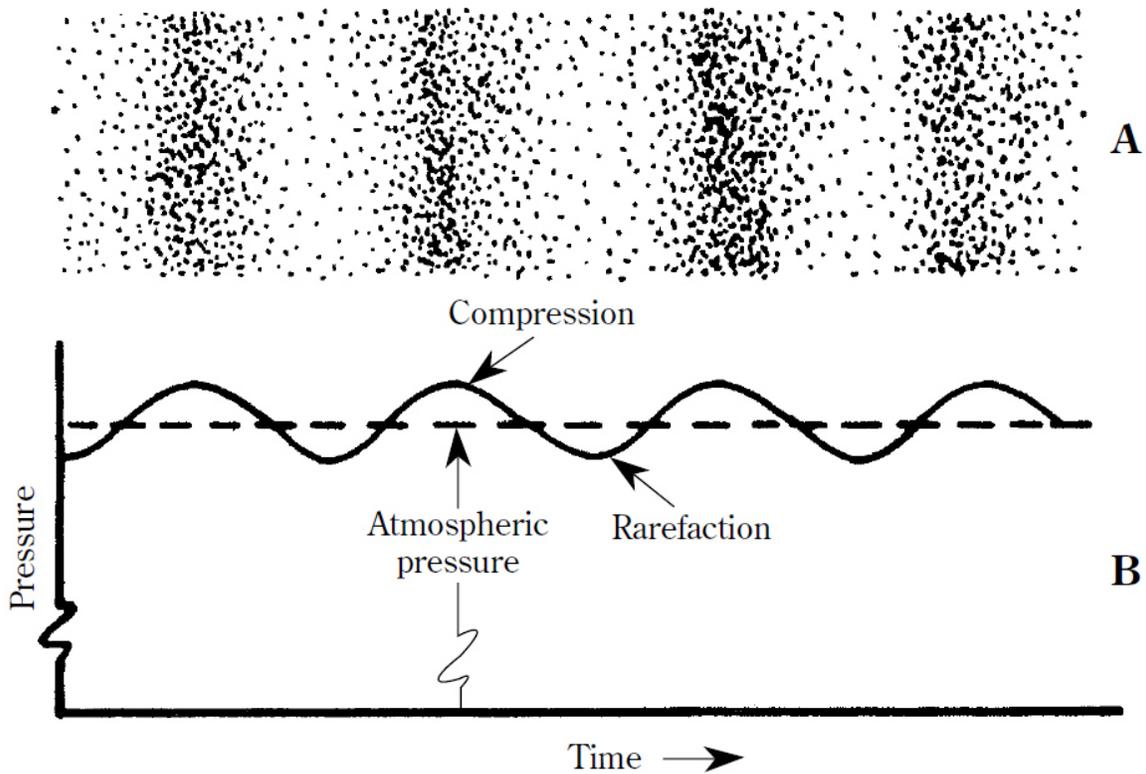


Figura 2.2. (A) Imagen instantánea del comportamiento de compresión y rarefacción de las partículas en el aire, durante el viaje de una onda de sonido. (B) Las zonas comprimidas se encuentran ligeramente por encima y las zonas rarefactions ligeramente por debajo del valor de la presión atmosférica. Por ende, las variaciones de presión para las ondas de sonido se encuentran superpuestas sobre las variaciones barométricas de presión (es decir, las generadas en la naturaleza).

### 2.1.1.1 Acústica

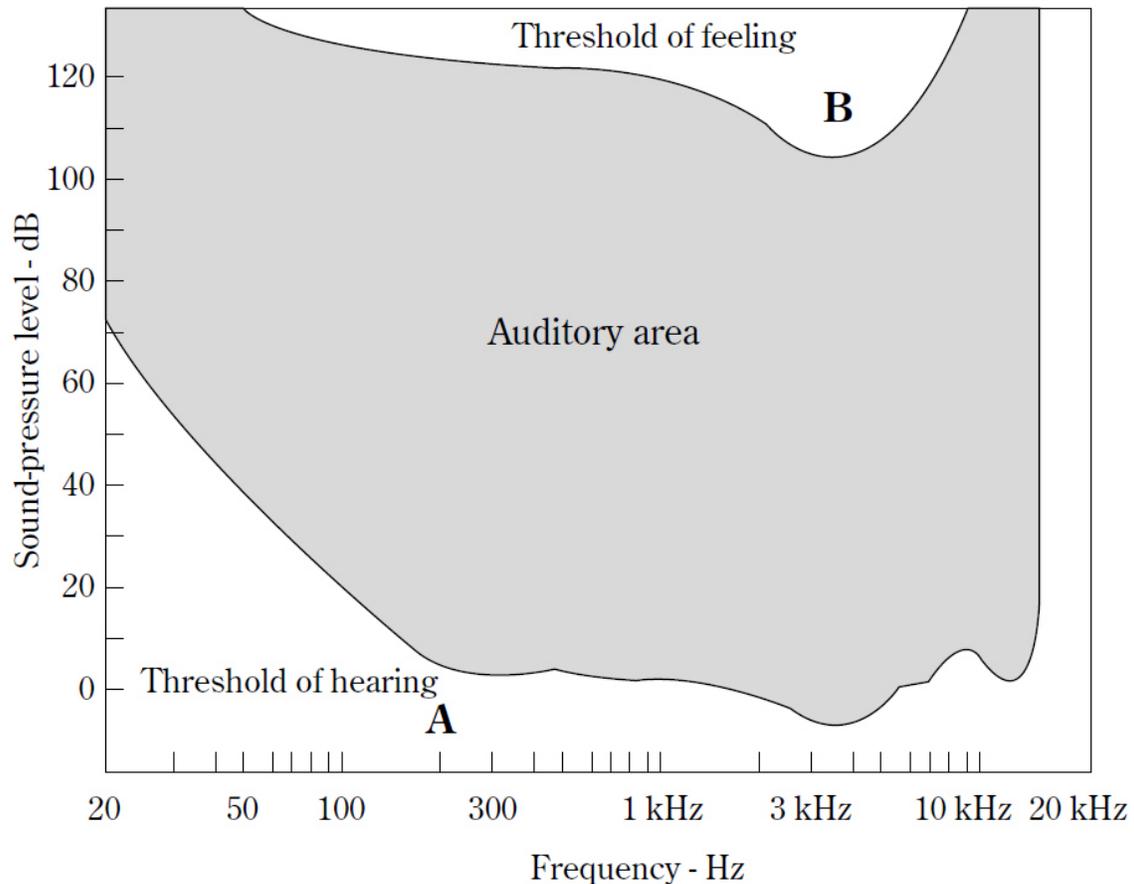
La palabra *sonido* solo debería usarse en relación con los efectos directamente percibidos por el oído humano; estos efectos están normalmente relacionados con el movimiento de ondas en el aire. Se puede considerar al sonido como cualquier fenómeno de vibración que se da en el aire para cualquier rango de frecuencias, lo cual ya sería una descripción con consideraciones muy básicas.

La palabra *acústica* originalmente era asociada a las propiedades sónicas de los cuartos, auditorios, etc., pero ha sido extendido para incluir casi cualquier efecto generado por vibraciones mecánicas y para las ondas, independientemente de si se trata de frecuencias audibles o no. Aunque no se le toma mucha importancia a qué tipo de características tienen, pero si se hace especial énfasis a los rangos de frecuencias pertenecientes al audible y más aún, para lo llamado ultrasonido.

### **2.1.1.2 Ultrasonido e infrasonido**

La frecuencia presente en el límite superior para el rango audible de un oído promedio es no mayor a 20 000 ciclos/s. Frecuencias más altas que estas son llamadas ultrasónicas. A frecuencias altamente ultrasónicas, la velocidad de onda en los gases tiende a regirse más por un proceso isotérmico que por un proceso adiabático. Para perturbaciones de frecuencias altas y con energías también altas, tenemos el desarrollo de la matemática para las ondas de choque.

Cabe aclarar que toda frecuencia mayor a 20kHz y menor a 20 Hz (o 30Hz según qué libro se consulte) no debería, en primera instancia, llamarse sonido. A pesar de que a todas estas frecuencias mayores se llaman ultrasonido y las menores al límite inferior se llaman infrasonido (u ondas subsónicas) no son exactamente esto. Sin embargo, con el paso de los años se ha acostumbrado a utilizar este tipo de palabra para hablar de dichas perturbaciones.



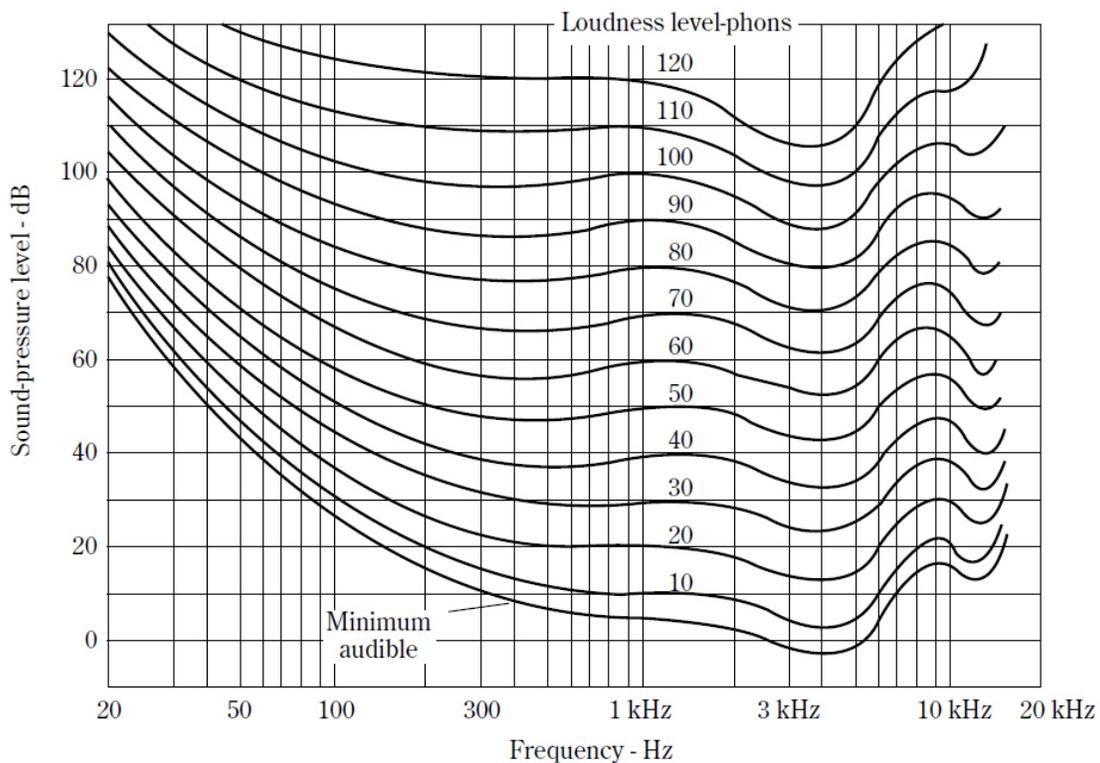
*Figura 2.3. Mapeo de la zona “audible” dentro del espectro de todas las vibraciones mecánicas posibles.*

La gráfica marca una cierta área de audición ésta es definida en términos médicos, por lo que de alguna forma incluye también las señales que el cerebro puede escuchar pero los oídos no. Dicho de otra forma, al área de audición incluye aquellos tipos de ondas que son percibidas incluso por nuestro sistema nervioso periférico pero que de alguna manera no podemos interpretar a nivel consciente como un sonido o incluso como un “ruido”.

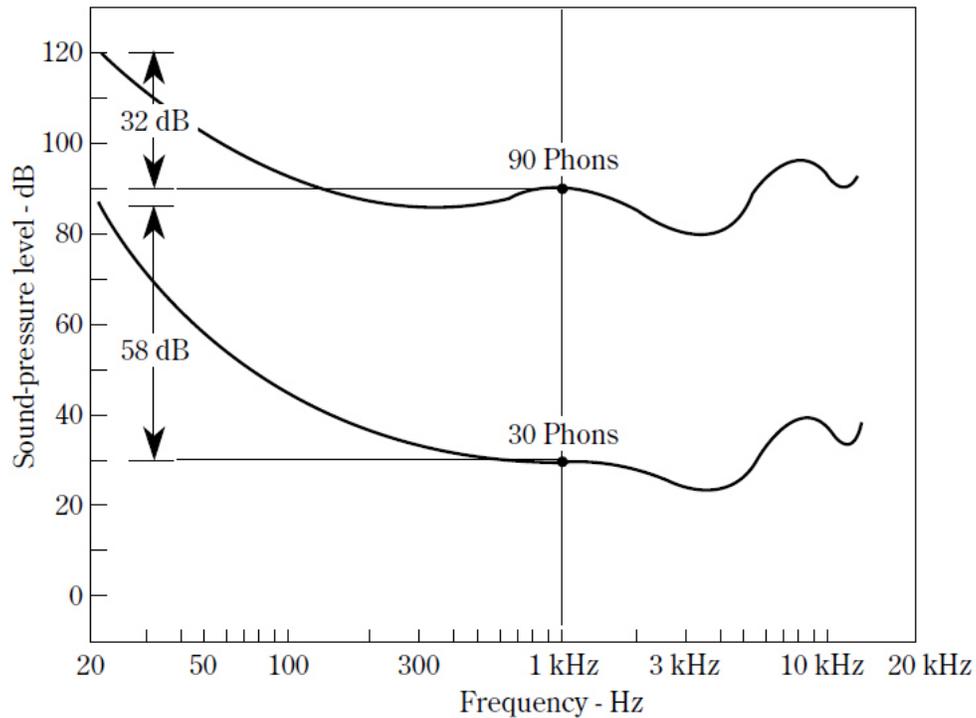
Por otro lado, estas señales que no podemos fácilmente interpretar como un sonido son niveles de presión que interfieren con la estructura celular, por lo que, aunque no podemos “escucharlas” dichas ondas pueden perjudicar el sistema nervioso y por ende el resto del cuerpo. Es por esto que debemos considerarlas

parte importante del sonido. Luego, excluyendo todas estas ondas podemos obtener todas aquellas señales que son percibidas por el oído y que podemos interpretar como sonidos tal cual. Solo en este pequeño rango de valores, en una muy delimitada zona auditiva es donde se encuentra lo que realmente es el sonido.

Volumen vs nivel de presión sónica.- El *fono* (o *phon*, por su nombre en inglés) es la unidad de nivel de volumen correlacionada al nivel de presión sónica, en particular, a 1 000 Hz de frecuencia. El *son* es definido como la percepción de volumen de una persona que escucha un tomo de 40 fonos de nivel de presión.



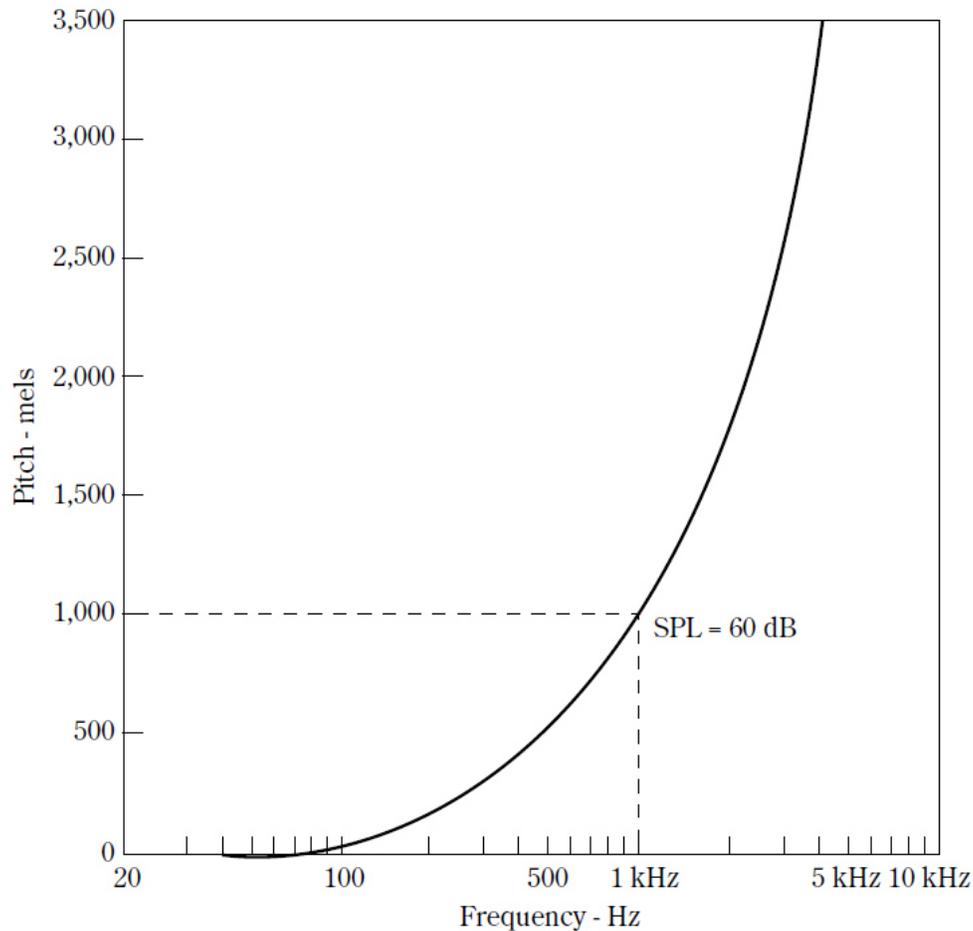
*Figura 2.4. Contornos de niveles similares de volumen en el oído humano. Estos contornos muestran la falta de sensibilidad del oído a tonos bajos, especialmente para sonidos de baja frecuencia. La forma inversa de esta gráfica nos dice, los valores de la frecuencia a los que hay respuesta del oído para determinados niveles de volumen.*



*Figura 2.5. Comparativa de la respuesta del oído a 20 Hz con respecto a su respuesta a 1 000 Hz. A un nivel de volumen de 30 fonos, el nivel de presión sónica de un tono de 20 Hz debe ser 58 dB más alto que a 1 000 Hz para que tenga el mismo volumen. A un nivel de 90 fonos, se requiere sólo un aumento de 32 dB.*

Pitch vs frecuencia.- Pitch es un término subjetivo, es una especie de función de la frecuencia pero no está directamente relacionada con esta. Se requiere otra unidad subjetiva, el *mel* (en algunas escuelas de música y algunos programas de edición de música, se utiliza también al Hertz como unidad de medida; por esto mismo, en la sección de resultados y conclusiones se usará este término y no el mel). Frecuencia es un término físico que denota la cantidad de ciclos por segundo de un proceso vibracional, esto se mide en Hertz. A pesar de que una señal de 1 000 Hz sea débil, sigue siendo una señal de 1 000 Hz, si se aumenta su nivel, el pitch de un sonido dependerá entonces del nivel de presión sónica. Una medida

de referencia de pitch de 1 000 mels ha sido definida como un tono de 1 000 Hz con una presión sonora (o sónica) de 60 dB.



*Figura 2.6. El pitch (en mels, una unidad subjetiva) está relacionado con la frecuencia (en Hz, una unidad física) de acuerdo a esta curva obtenida a través de un grupo de control.*

La importancia del pitch pese a ser subjetivo, se basa en la industria musical y la electrónica de los componentes como los micrófonos. Cada vez que se consigue un micrófono o bocina, viene acompañado de especificaciones técnicas dentro de las cuales, a veces se hace referencia a un margen de error en términos de dB que al buscarse en tablas, indican un cierto nivel de *mel* que no es otra cosa que el nivel de fidelidad de una onda, la cantidad de ruido posible con respecto al sonido blanco.

### 2.1.1.3 Vibraciones mecánicas en cuerpos sólidos

En un caso ideal, para el estudio de las pruebas experimentales de *reflexión de sonido* buscaríamos un material cuya atenuación de las ondas mecánicas, fuera muy alto, haciendo que dichas vibraciones se desvanezcan rápidamente en el tiempo. Podemos pensar que si tenemos un material totalmente rígido y con un nivel de homogeneidad en su estructura, nula o casi nula, las ondas se perderían casi tan pronto como estas entren en contacto. Sin embargo, ningún material del uso diario o de uso industrial es absolutamente rígido. Tampoco absolutamente flexible.

En un caso real hay que tomar en cuenta tres posibles consecuencias:

- Resonancia: el cuerpo está formado por partículas (átomos o moléculas) donde cada una está a una cierta distancia de las partículas vecinas, para el caso más sencillo podemos suponer que cada esfera (si así tomamos cada molécula) esta equidistante con sus vecinos. Además cada una de estas partículas tiene una cierta frecuencia de vibración angular propia, un *eigenvalor* de sus vibraciones que, bajo ciertas condiciones estas se pueden poner a vibrar en la misma frecuencia del sonido incidente. Aunque no pierda la estructura, ya que la energía que conlleva la onda de sonido se pierde rápidamente con materiales suficientemente rígidos para que estos recuperen su estructura original y a la vez, que el sonido logre escapar del cuerpo.
- Reverberación: cuando una onda de sonido viaja dentro de un cuarto cualquiera, podemos ver que en ocasiones se genera el efecto de “eco” cuando la onda de sonido que enviamos regresa en casi las mismas condiciones. A veces este efecto de eco genera una onda con mayor intensidad. Si lo mentalizamos como una caja, el sonido puede viajar en ambas direcciones más de una vez, generando una nueva onda en colapso con todas las demás que están viajando al mismo tiempo. Esta

superposición, surgida de otras con características similares, es lo que se conoce como reverberación.

- Reflexión: una onda incidente tiene una cierta probabilidad de ser reflejada, total o parcialmente. Cuando la onda se refleja totalmente, hay dos opciones para ello: 1) el cuerpo es totalmente rígido, 2) la energía de la onda es menor de la necesaria para transmitirse. Pero independientemente de cual sea el caso, esta reflexión viajará en la misma dirección de la onda incidente. Por ende, habrá una interferencia constante entre una y otra, la cual puede ir evolucionando con el tiempo hasta impedir la transmisión de la incidente.

#### **2.1.1.4 Micrófonos**

Siendo el micrófono un sistema electrónico que comunica señales de forma bidireccional, ya sea generando una onda de sonido en el aire a través de vibraciones moduladas en su sistema interno o bien en el sentido contrario, transformando un señal de sonido incidente, a través de su estructura electrónica en una señal eléctrica medible y que se puede caracterizar.

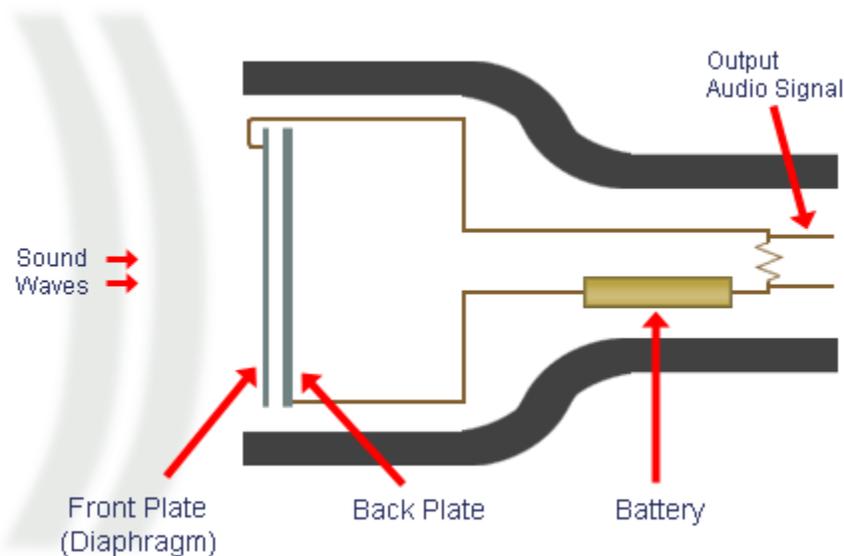
Con el paso de los años han surgido diferentes tipos de micrófono, algunos muy sofisticados pero los más importantes para término de la tesis son todos aquellos que pueden estudiarse con una cierta frecuencia de movimiento de su sistema. Aquellos que trabajan en base a una diferencia de potencial.

Micrófono de diafragma (de capacitor).- el diafragma es una membrana metálica delgada que forma un capacitor dieléctrico en contacto con el aire, siendo la primer placa. La otra placa es relativamente rígida y gruesa. Para ondas de amplitud pequeña, la capacidad  $C$  varia de forma sinusoidal de acuerdo a la ecuación

$$C = C_0 + (C_m)_s \cos \omega t \quad (2.2)$$

Donde  $C_0$  es la capacitancia que tiene el sistema en equilibrio y  $(C_m)_s$  es el valor máximo del incremento en la capacitancia debido al efecto de las ondas incidentes en el diafragma. A partir de esta capacitancia podemos calcular la corriente generada en la inducción del circuito y después la fuerza electromotriz a modo de variación del potencial eléctrico generado en el sistema de membranas.

Para movimientos de amplitudes pequeñas, o bien para energía generada por ondas pequeña (menor que la oposición del medio) la fuerza electromotriz del sistema del micrófono es proporcional a la amplitud del diafragma  $x_m$ , dado que la capacitancia medida se comporta casi lineal con respecto a esta amplitud. Por ende, toda perturbación que puede ser capturada por el sistema electrónico será equivalente a la misma amplitud que tiene la onda incidente, transformado directamente en un voltaje o una corriente.

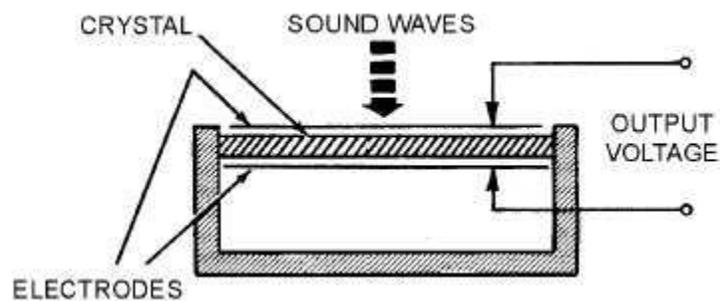


*Figura 2.7. Representación gráfica de la estructura básica del micrófono de capacitor o de diafragma.*

Micrófono de cristal.- algunos micrófonos basados en el funcionamiento de un cristal, se analizan por la polarización eléctrica en éste debido a una deformación en su cuerpo dada por la incidencia de ondas sónicas. Es básicamente, una forma

modificada del funcionamiento de un piezoeléctrico. En este sistema, el tipo de deformación y la dirección con respecto a los ejes del cristal en estado de equilibrio, imponen el valor de la diferencia de potencial.

El voltaje que aparece alternante en la base fija con relación a la superficie próxima del cristal. Cuando la deformación en el cristal es periódica con respecto al tiempo y las zonas, y si estos cambios en el volumen son pequeños, por relación directa con la amplitud de la onda incidente, entonces la amplitud medida es la de la perturbación. Para este sistema, ya que no depende de la elasticidad de una membrana, todo tipo de resonancia en el funcionamiento deja de tener influencia y el ruido en la medición solo dependerá del circuito eléctrico para medición.



*Figura 2.8. Representación gráfica de la estructura del micrófono de cristal.*

La validez del uso de los micrófonos está relacionada con el funcionamiento del oído. Cualquier señal que llega a los oídos genera una señal eléctrica que viaja por el cerebro y se mide las variaciones en la señal, su tiempo, su fase, longitud de onda e intensidad. De aquí que se pueda usar en analogía un sistema similar para estudiar ondas en gases o provenientes de metales.

## 2.1.2 Óptica física

### 2.1.2.1 Láseres

El funcionamiento del láser se basa en los estados energéticos de los elementos que se van a excitar para su funcionamiento. Por tanto, el láser es una onda de luz basada totalmente en energía y que tiene una cierta potencia de funcionamiento, también una potencia de salida la cual puede ser calculada en su fabricación.

Cualquier fuente de luz, incluyendo el láser, produce emisiones luminosas al descender de nivel los átomos excitados. Los estados de interés son metaestables: aquellos en los que el átomo puede permanecer durante bastante tiempo si no sufre influencias externas como colisiones o luz de ciertas longitudes de onda.

En ocasiones, un electrón situado en un estado metaestable salta espontáneamente a otro inferior, que generalmente es el fundamental. Con ello emite radiación de una longitud de onda que tiene una enorme influencia sobre otras moléculas vecinas. La onda luminosa estimula a las demás moléculas haciéndolas emitir la misma luz y pasando simultáneamente a sus estados fundamentales. Una característica especial de esta radiación estimulada es que, cada vez que se incorpora un fotón adicional de otra molécula al proceso, su fase, dirección y polarización es exactamente la misma. La intensidad de luz crece rápidamente a medida que participan más moléculas.

En general, la cantidad de energía incorporada en cada paso es pequeña, por lo que se necesitan muchos millones de oscilaciones para recoger toda la energía disponible. Cuando el láser forma una cavidad resonante, la onda luminosa es estacionaria dentro de la misma, con su fase definida a lo largo del tubo. La acumulación de energía que desencadena el proceso láser se denomina también

*reacción en cadena o avalancha*. Tal como establece su nombre, el láser amplifica la luz por emisión estimulada.

Es gracias a esta estimulación conjunta que el láser se mantiene con la misma longitud de onda en su funcionamiento. Se logra ver que debido al tiempo de excitación de las moléculas, el funcionamiento del láser es suficientemente rápido para despreciar su efecto de intermitencia en cuerpos grandes pero útil en aplicaciones como plasmónica, donde se le da tiempo al material de retomar su estado de equilibrio.

### 2.1.2.2 Efecto fotoacústico

La tecnología fotoacústica (y su experimentación) (...) el inventor del teléfono, Alexander Graham Bell (1847-1922), tenía problemas auditivos, y en su afán por descubrir nuevas formas de transmitir el sonido, hace más de 100 años se dió cuenta que al iluminar una muestra con radiación modulada en una cámara cerrada (cámara fotoacústica), figura 2.9, era posible captar sonidos con intensidad directamente proporcional a la longitud de onda absorbida por la muestra.



*Figura 2.9. Celda fotoacústica. La luz incide en la muestra por la parte superior a través de una fibra óptica; el micrófono está situado lateralmente.*

Cuando tenemos un cuerpo sólido o fluidos, podemos hacer incidir una fuente de luz, sea o no láser, generando un cambio en la temperatura del sistema o una ionización de sus partículas (en el caso de los gases) que cambian las frecuencias

de vibración propias del cuerpo, generando un efecto de emisión de ondas sonoras debido al exceso de energía y el sistema volviendo a su estado estacionario. La absorción se debe a que las moléculas en un fluido están sujetas a posiciones que varían por su vibración intrínseca, que a su vez están sujetas a las perturbaciones en la estructura debido a sus vecinas.

Un efecto similar se presenta en sólidos cristalinos. En estos cuerpos los átomos están ubicados a distancias equitativas y constantes en el equilibrio, de aquí surge otras características medibles del cuerpo, como por ejemplo, dentro del arreglo cristalino se general ciertos grupos que se rigen por condiciones similares y tiene cierta respuesta de absorción de radiación. Para todos los grupos, se genera una característica medible del cuerpo. Las aplicaciones más interesantes de este tipo de absorción ocurren principalmente en la región espectral del infrarrojo.

### **2.1.2.3 Efecto termoacústico**

El efecto fotoacústica se puede entender a partir de fenómenos térmicos y mecánicos. La radiación que incide sobre el material y que es absorbida en el seno de éste se transforma en calor, el cual se transmite a través del material, generando un perfil periódico de temperaturas que, al alcanzar el gas que ocupa la celda fotoacústica (generalmente aire), provoca ciclos alternos de calentamiento-enfriamiento en una capa muy delgada del gas en contacto con la superficie del material. Estas fluctuaciones dan lugar a cambios de presión en el interior de la celda fotoacústica, que es el sonido que se detecta por medio de un micrófono en el interior de la celda.

Un haz láser tiene un momento lineal y un momento angular como cualquier onda que se manifiesta. De este momento podemos despejar una expresión para una fuerza y para presión. Por lo cual quiere decir que todo tipo de luz genera una presión en cualquier cuerpo con el que impacta. La presión debida a la radiación

puede medirse solamente cuando se desprecia un efecto térmico conocido como *efecto radiométrico (radiometer effect)*.

Si la radiación impacta con una superficie, las moléculas del medio vibran en conjunto dispersando la perturbación hacia el resto del cuerpo que no esté cercano a la zona de impacto. La cantidad de fotones (o quantum) que impactan con una zona, genera para un cuerpo en un medio atmosférico normal, una perturbación comunicada con el aire. Es decir, que toda alteración térmica en el cuerpo sólido se transmite al aire por medio de conducción de calor, entonces la presión que ejerce la luz viene denotada por

$$P = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (2.3)$$

Estas vibraciones forzadas generadas por el haz, se convierten en un cambio térmico. Dicho calor, si se genera en un cuerpo muy grande comparado con la zona de impacto, entonces la temperatura fluye primero hacia un medio de menor densidad (en este caso el aire) y después pasa a distribuirse por dentro de la placa. Esto último es poco notable y su efecto se puede despreciar en la mayoría de los casos. Pero dicha comunicación de calor hacia el aire es importante para poder hacer proposición de comportamiento tipo LH.

La temperatura de la muestra varía entonces con la misma periodicidad que lo hace la radiación incidente, induciendo cambios en los parámetros del material (y/o del medio en el que se encuentra inmerso) dependientes de ella. La detección de estas variaciones es la base de diferentes esquemas experimentales.

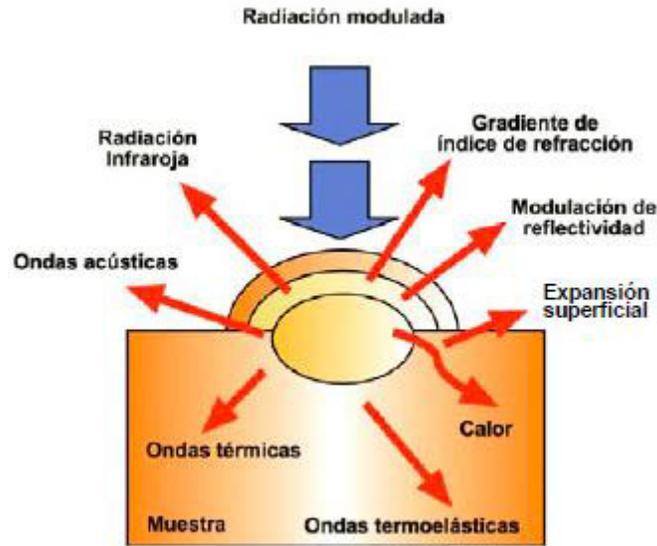


Figura 2.10. Ilustración de algunos efectos fototérmicos (y/o termoacústicos).

### 2.1.3 Dinámica de fluidos

La ecuación de estado de los gases ideales es una razonable aproximación al comportamiento de un gas real, siempre y cuando se encuentre a una temperatura elevada (en relación con la temperatura crítica) y su densidad sea muy baja (como en el caso del aire). En estas condiciones se pueden despreciar las interacciones entre moléculas y estas se pueden suponer puntiformes. Con esa hipótesis la Teoría Cinética permite deducir la ecuación de estado del gas ideal

$$PV = nRT \quad (2.4)$$

Hay muchos flujos de interés práctico de gases o vapores a baja temperatura y alta densidad (por ejemplo, flujos bifásicos) en los que participan un líquido junto con su vapor, como ocurren en condensadores y otros dispositivos industriales). En estos casos puede ser necesario usar una mejor aproximación de la ecuación de estado real, que tome en cuenta aproximadamente los efectos que hemos despreciado. Una fórmula muy usada es la *ecuación de estado de Van der Waals*

$$\left(P + \frac{an^2}{v^2}\right)(V - nb) = nRT \quad (2.5)$$

En la ecuación 2.5  $a$  y  $b$  son constantes características del gas, cuyo significado físico se desprende de lo siguiente:

- El término  $\frac{an^2}{V^2}$  proviene de que la presión que ejerce un gas real es menor que la de un gas ideal debido a las fuerzas de atracción entre las moléculas; este efecto es proporcional a la probabilidad de que dos moléculas interactúen, que a su vez es proporcional al cuadrado de la densidad (proporcional a  $n/V$ ).
- El término  $nb$  proviene de que las moléculas tienen un volumen finito y por lo tanto el volumen del gas no se puede reducir a valores arbitrariamente pequeños.

Otra ecuación que se suele emplear es la *ecuación de estado virial*, que se fundamenta en un tratamiento estadístico de las interacciones intermoleculares. Para los líquidos, no se conocen ecuaciones de estado exactas y sencillas basadas en teorías fundamentales, de modo que en la práctica se emplean coeficientes fenomenológicos determinados experimentalmente. De la ecuación de estado se derivan ciertas propiedades de los fluidos (como la velocidad del sonido).

### **2.1.3.1 Dinámica de gas ideal**

El aspecto esencial del modelo de gas ideal es que *en el equilibrio* (y por lo tanto, en un gas en reposo), los parámetros termodinámicos y mecánicos del gas tiene igual valor de ambos lados (digamos lado 1 y lado 2, si suponemos que en el centro de la masa de gas está el origen de un sistema de coordenadas dividiendo el cuerpo en dos) de toda superficie ideal en su seno. Por lo tanto, en promedio, el efecto de la migración de moléculas (por la agitación térmica) desde el lado 1 hacia el lado 2 se compensa exactamente con el efecto de la migración desde 2 hacia 1, de manera que el resultado neto es nulo, tanto en lo referente a la

concentración, como en cuanto al transporte de la cantidad de movimiento y de la energía.

En la práctica hay una gran variedad de casos en los cuales los efectos de los apartamientos del equilibrio térmico (o del reposo) son pequeños. Gracias a ello, para cada elemento infinitesimal del fluido se pueden seguir usando las variables termodinámicas de equilibrio, y también se puede definir la presión. En estos casos se dice que hay equilibrio termodinámico local. Los efectos asociados con la falta de equilibrio termodinámico sobre escalas espaciales grandes (como la difusión de partículas y difusión térmica), y con el movimiento (la difusión de la cantidad movimiento, es decir la fricción interna) se agregan como correcciones.

Para sistemas donde las condiciones no pueden ser controladas como en el caso de una fábrica, es necesario poder conocer como varia la temperatura en el ambiente para conocer cómo se da el cambio de densidad del gas o incluso si hay en éste un gradiente de su temperatura o no. Con base en esto medir en tiempo real la velocidad del sonido que en otros términos será usado para el análisis del sistema y los cuerpos que estén en éste.

### **2.1.3.2 Compresibilidad**

Cuando se debe tomar en cuenta la compresibilidad del gas, hay que tener presente que la ecuación de estado depende fuertemente de la temperatura y por tanto la respuesta a los esfuerzos de compresión depende de qué pasa con la temperatura durante el proceso. Podemos considerar dos casos límite, según si la compresión ocurre muy lentamente o muy rápidamente.

Si la compresión de una parcela del gas es muy lenta, intercambiará calor con el gas que la rodea y/o con las paredes del recipiente que lo contiene. Por lo tanto se mantendrá a temperatura constante durante el proceso. La respuesta del gas a un

esfuerzo de compresión esta entonces determinada por el *módulo de compresión isotérmica*  $k_T$ , definido como:

$$k_T \equiv -V \left( \frac{\partial P}{\partial V} \right)_T \quad (2.6)$$

Para un gas ideal, resulta de la ecuación 2.4 que

$$k_T = P \quad (2.7)$$

Si en cambio la compresión es muy rápida, no habrá intercambio de calor entre la parcela y el gas que la rodea y/o con las paredes del recipiente que lo contiene. Por lo tanto el proceso será adiabático, y la entropía del gas se mantendrá constante. La respuesta del gas está entonces determinada por el *módulo de compresión adiabático*  $k_s$ , definido como:

$$k_s \equiv -V \left( \frac{\partial P}{\partial V} \right)_s \quad (2.8)$$

Para un gas ideal, resulta de la ecuación 2.4 (y es el coeficiente adiabático) que...

$$k_s = \gamma P \quad (2.9)$$

En situaciones intermedias, en que hay cierto intercambio de calor, pero no lo suficiente para que el proceso sea isotérmico, se pueden definir módulos de compresión politrópicos, con valores intermedios entre  $k_s$  y  $k_T$ .

La hipótesis de incompresibilidad es una suposición razonable para líquidos pero no para los gases. La materia condensada es poco compresible porque los átomos y moléculas están dispuestos en arreglos compactos. Sin embargo hay situaciones en las cuales se debe tomar en cuenta la compresibilidad (por ejemplo al estudiar la propagación del sonido).

Por debajo de la temperatura crítica, la energía cinética de las moléculas de un líquido es pequeña frente a la energía potencial de las fuerzas intermoleculares, por lo tanto el trabajo de compresión incrementa fundamentalmente a esta última.

En consecuencia no hay diferencia apreciable entre los módulos de compresión isotérmico y adiabático y se suele hablar de módulo de compresión  $k$ , a secas.

Un gas puede tratarse como incompresible si su movimiento es tal que las diferencias de presión que aparecen, no son demasiado grandes. El rozamiento interno en un fluido da lugar esfuerzos constantes cuando dos capas adyacentes se mueven la una sobre la otra (donde la perspectiva en términos de los ejes se ajusta la simetría necesaria) o cuando el fluido se mueve por tubos (como el cuerno acústico) o se encuentra a un obstáculo. En algunos casos estos esfuerzos son despreciables si se comparan con fuerzas gravitatorias o con la originada por diferencias de presión (como en un sistema inducido).

### 2.1.3.3 Gas dispersivo

En algunos medios las ondas que se propagan sin alterarse son de tipo sinusoidal. Su velocidad de onda, entonces, depende de la frecuencia o su equivalente, longitud de onda. Un medio con dichas propiedades se dice que es *dispersivo*. En el caso de medios dispersivos, si la velocidad de fase decrece con la frecuencia o en algún rango de frecuencia, se dice que el medio posee una dispersión *normal* en dicho rango. Si dicha velocidad decrece de acuerdo a la frecuencia en un cierto rango de frecuencia, entonces se dice que posee una dispersión *anómala* en dicho rango.

Cuando la temperatura de un fluido no es uniforme es preciso tomar en cuenta las variaciones de densidad que ocurren debido a la expansión térmica. El parámetro que mide este efecto es el *coeficiente de expansión térmica* a presión constante,  $\alpha_P$ , que mide la variación de volumen de un elemento del fluido por efecto de una variación de temperatura:

$$\alpha_P \equiv \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P = -\frac{1}{P} \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_P \quad (2.10)$$

Para un gas ideal, la ecuación de estado 2.4 nos da simplemente:

$$\alpha_P = \frac{1}{T} \quad (2.11)$$

Para los líquidos, el coeficiente de expansión térmica es mucho menor que el de un gas, y se puede considerar constante en un amplio rango de temperaturas.

## 2.1.4 Ley de Hooke

### 2.1.4.1 Descripción simple de la Ley de Hooke

Se considera homogéneo a un medio elástico cuando sus propiedades físicas no dependen de la posición en que se midan. Y también puede ser *isotrópico* cuando sus propiedades se conservan independientemente de la dirección.

Se dice que el medio donde se desplaza la onda se rige por la ley de Hooke, cuando la distorsión o deformación en el medio es linealmente dependiente de la magnitud de la fuerza aplicada, o el estrés/tensión que genera la distorsión. Por lo general se relaciona este comportamiento vibratorio con la dinámica de un resorte, con el movimiento de oscilación simple. La LH es aplicable para otro tipo de fenómenos en materiales que no tienen que ser sólidos, como el movimiento de las moléculas que conforman un fluido o como se da la resistencia de materiales elásticos.

Cuando estiramos (o comprimimos) un muelle, la fuerza recuperadora es directamente proporcional a la deformación  $x$  (al cambio de longitud  $x$  respecto de la posición de equilibrio) y de signo contraria a ésta;

$$F = -kx \text{ [=]} - \left[ \frac{N}{L} \right] [L] \quad (2.12)$$

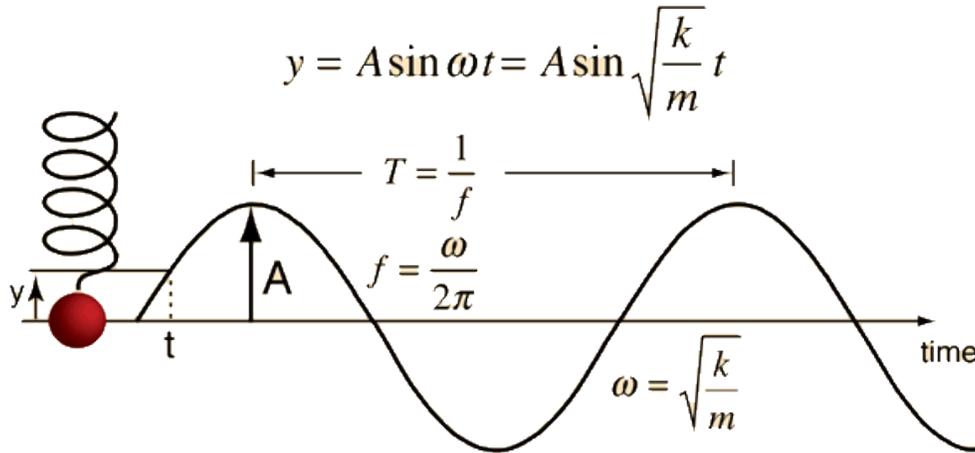


Figura 2.11. Representación del movimiento del oscilador armónico simple para el uso de un muelle/resorte y sus ecuaciones que describen el comportamiento.

Siendo  $k$  una constante de proporcionalidad, denominada constante elástica del muelle y cuyas unidades de medida son de Newton/distancia. La ley de Hooke es solo aplicable a deformaciones unitarias pequeñas, hasta que se alcanza el límite de proporcionalidad (figura 2.12).

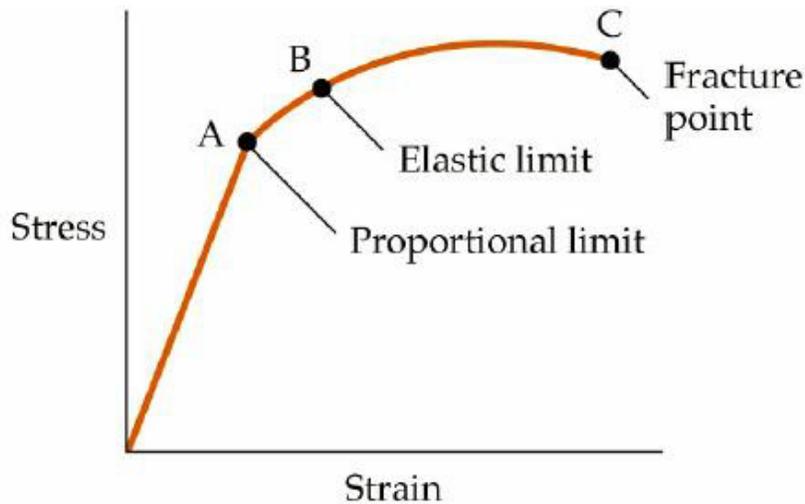


Figura 2.12. Representación sencilla de la zona de validez para el uso de LH.

Otra forma de describirlo se basa en el comportamiento general que se da en los cuerpos sin entrar en detalle para que casos se utiliza. LH relaciona la

deformación  $\theta$  de una barra sometida a esfuerzo axial, con la tensión normal generada por dicho esfuerzo  $p$ , mediante la constante  $Y$  que se denomina módulo de elasticidad lineal o módulo de Young:

$$p = -Y\theta \quad (2.13)$$

#### 2.1.4.1 Visión general de la Ley de Hooke

La LH en forma general para un material sólido sea o no isotrópico depende de los factores de distorsión, compresión y deformación, aplicados en todas las direcciones del sistema. En relación a las fuerzas aplicadas en los múltiples vectores, vemos que hay un conjunto de tensores que describen las bases del funcionamiento de LH, por lo que esta ley tiene como descripción matemática (al menos para el sistema cartesiano);

$$f_{ij} = \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 c_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad (2.14)$$

Donde  $c_{ijkl}$  representa los componentes del tensor de cuarto rango. De aquí podemos hacer uso de la simetría para encontrar los coeficientes como una matriz simétrica con la diagonal como identidad entre los valores posibles. Pero en un aspecto un poco más general, podemos descomponer la fuerza de deformación en sus ejes 'x', 'y', 'z';

$$f_{xx} = a\epsilon_{xx} + b\epsilon_{yy} + b\epsilon_{zz} \quad (2.15)$$

$$f_{yy} = b\epsilon_{xx} + a\epsilon_{yy} + b\epsilon_{zz} \quad (2.16)$$

$$f_{zz} = b\epsilon_{xx} + b\epsilon_{yy} + a\epsilon_{zz} \quad (2.17)$$

Donde  $a$ ,  $b$  son módulos elásticos. Para que coincidan estos con los módulos generalmente usados en los textos, se toma como base los *coeficientes de Lamé*

$$f_{xx} = \lambda(\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}) + 2\mu\epsilon_{xx} \quad (2.18)$$

$$f_{yy} = \lambda(\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}) + 2\mu\epsilon_{yy} \quad (2.19)$$

$$f_{zz} = \lambda(\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}) + 2\mu\epsilon_{zz} \quad (2.20)$$

Es entonces, en base a estas ecuaciones que sabemos que si generamos una perturbación en un cuerpo sólido, podemos medir la evolución de las vibraciones en cualquier punto del mismo y en base a los coeficientes mostrados antes, ya que están entrelazados, podemos predecir cómo se comporta el cuerpo en cualquier punto y a cualquier instante de tiempo.

### **2.1.5 Análisis de ondas sónicas**

En mediciones acústicas, el uso de tonos puros es algo difícil de controlar cuando se hace uso de un ancho de banda pequeño centrado en una frecuencia de sonido deseada. Comúnmente se define al ruido como un sonido indeseado. En cuanto a la acústica, el sonido puede ser de naturaleza musical o indeseable ya que genera interferencias en las comunicaciones. El sonido consiste en ocasiones de componentes para frecuencias pequeñas relativamente, pero por lo general es una mezcla heterogénea (en análisis) de frecuencias y amplitud, que cambian rápidamente con el tiempo pero que convergen en una sola onda como un promedio.

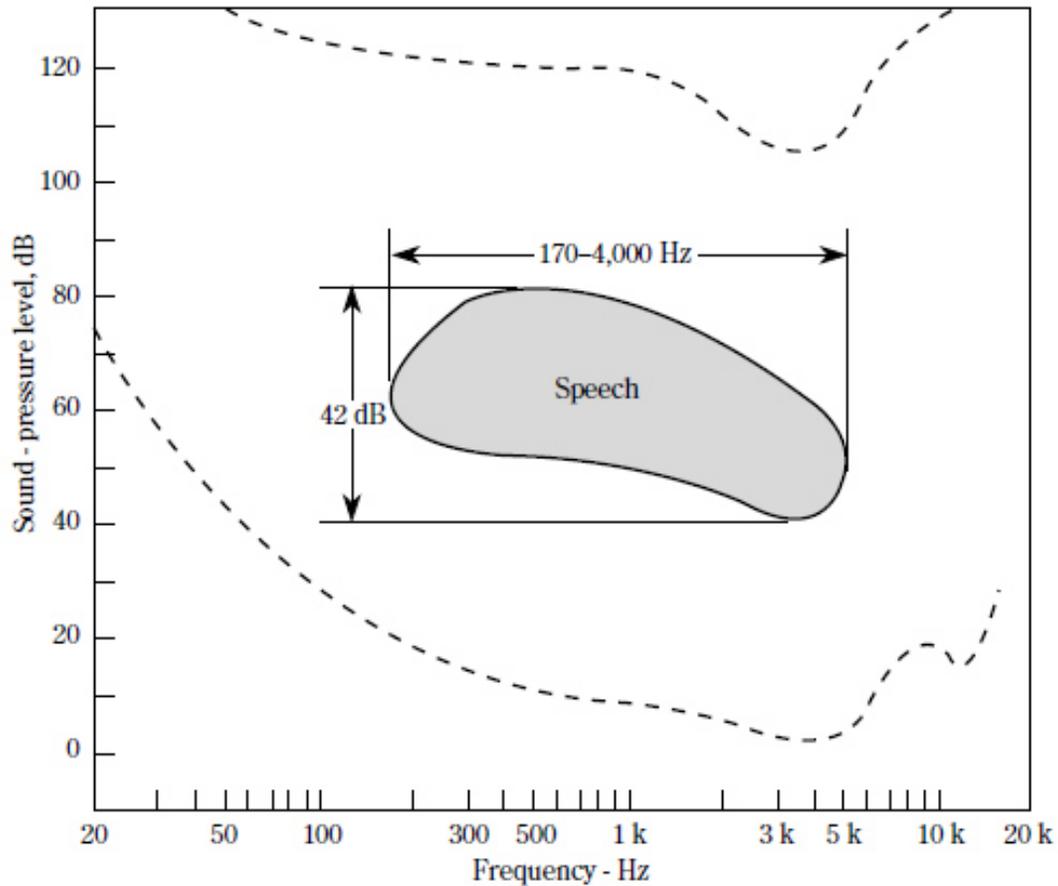


Figura 2.13. La zona correspondiente al habla natural dentro de la región audible.

Las variaciones entre las frecuencias para el rango audible como para las recreaciones de sonido en bocinas y micrófonos tiene un nivel de relación en base al ruido blanco, y en base a la intensidad del sonido (volumen) por lo que en ocasiones los sistemas electrónicos deben poder modularse para cuatro valores extremos: nivel superior e inferior para variación de sonido (pitch) y niveles superior e inferior para los dB medidos en torno al registro de ruido que puede generar el muestreo.

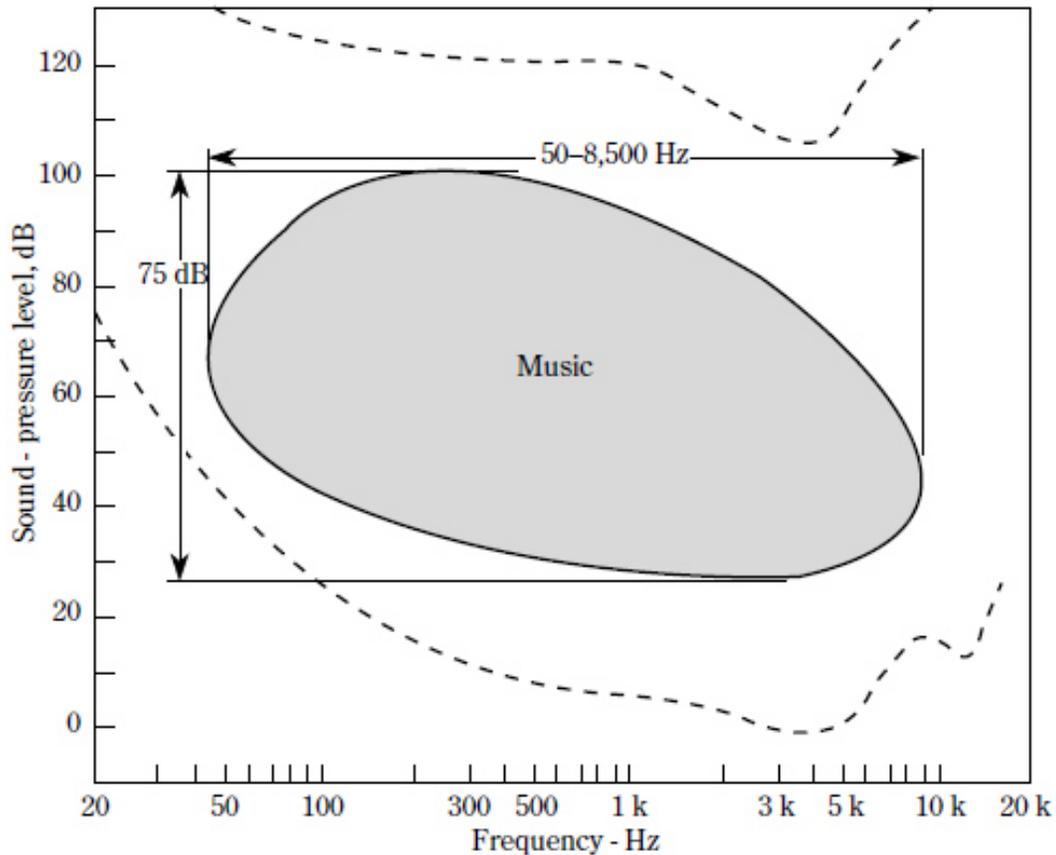


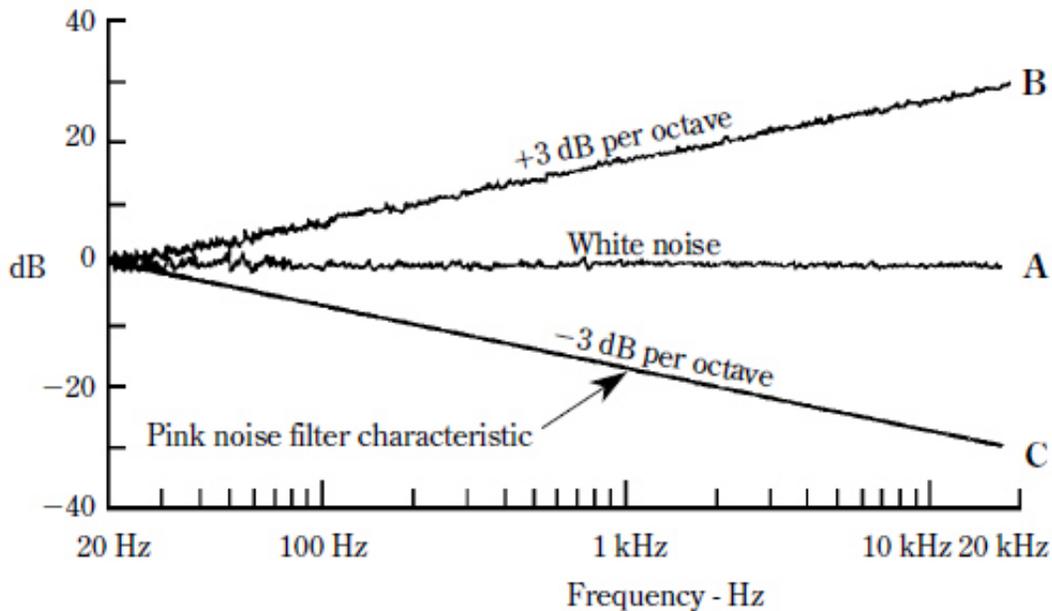
Figura 2.14. Zona utilizada típicamente para la música dentro de la región audible. La frecuencia corresponde a la medible en términos de su variación y no al pitch.

### 2.1.5.1 Ruido blanco

Cuando usamos un sistema de circuito electrónico como bocinas o micrófonos, hay un nivel de frecuencia funcional para el estado de equilibrio. Esto debido a que la membrana o cristal que integra el micrófono no se mantiene bajo las mismas condiciones, debido al tipo de filtrado que se requeriría para esto. Por lo tanto se genera un muestreo de múltiples señales aleatorias debida al funcionamiento imperfecto (pero suficientemente idealizado) del componente.

Dicho muestreo para el estado de equilibrio genera un registro de todas las frecuencias posibles donde todas son equiprobables y también tienen energías idénticas. Si esto lo graficamos tendremos una línea plana para el sistema en

constante funcionamiento. Por debajo de esto se encuentra una línea de ruido rosa que se utiliza principalmente para volver a modular las ondas de sonido que se generan y que tienen como finalidad, no alcanzar zonas de riesgo para el usuario en el espectro audible.

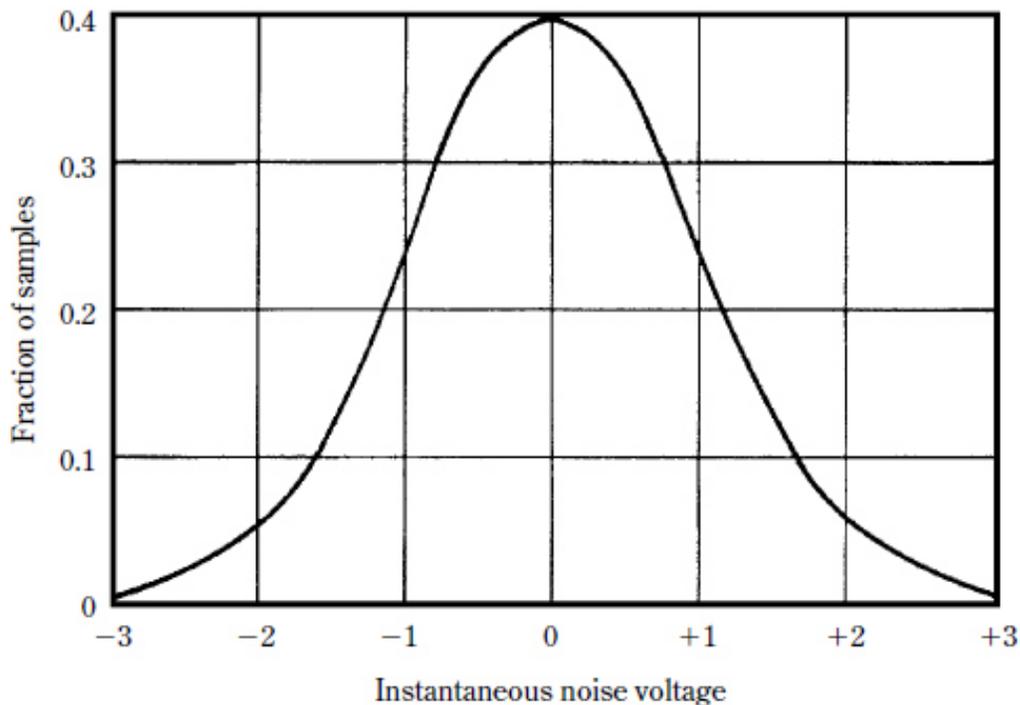


*Figura 2.15. El ruido aleatorio tiene el mismo valor de energía por cada variación de Hz. Si el espectro del ruido es medido (sonido blanco) con un analizador de onda manejando un ancho de banda fijo, el espectro resultante será plano con respecto a la frecuencia, como en A.*

Ya que los sistemas electrónicos siempre cuentan con este tipo de señal excepto aquellos que son totalmente digitalizados, al momento de darles uso para mediciones de sonido, se debe considerar dicha señal de ruido blanco como un “ruido de fondo” y no como un dato indeseable. Esta señal se vuelve entonces algo propio del sistema y se puede ver influenciada por las condiciones en que se encuentra el micrófono. Para un sistema totalmente digital dicho ruido se filtra en automático y puede eliminar toda señal deseada que no sobresalga de la curva de muestro de ruido aleatorio.

### 2.1.5.2 Ruido en las mediciones

El ruido en las mediciones, mejor conocido como ruido aleatorio se genera en cualquier circuito eléctrico y minimizar sus efectos puede ser complicado. Se dice que el ruido es totalmente aleatorio si tiene una distribución normal (Gaussiana) en torno a sus amplitudes medidas. Esto simplemente significa que si muestreamos el voltaje instantáneo a intervalos de tiempos iguales, tendremos algunas mediciones positivas, otras negativas, otras grandes, otras pequeñas, y una gráfica de todas estas se aproximan a la curva gaussiana.

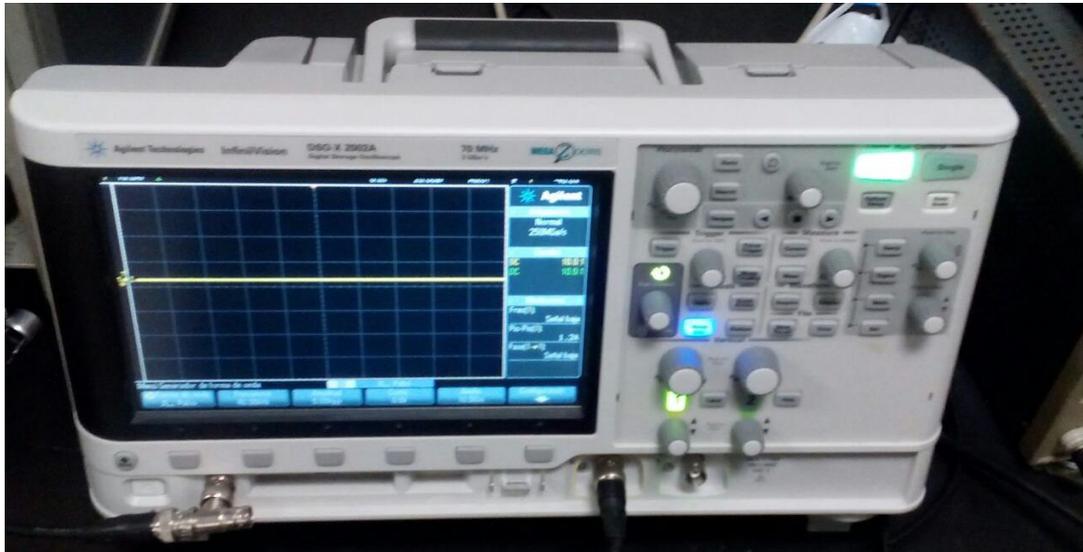


*Figura 2.16. La prueba de la aleatoriedad en una señal de ruido, se presenta en un espectro de pruebas para voltaje instantáneo medido para un muestreo de 1 000 puntos igualmente espaciados en tiempo. Si la muestra es totalmente aleatoria, se debe presentar la curva gaussiana.*

## 3. METODOLOGÍA

### 3.1 MATERIALES

#### 3.1.1 Osciloscopio



*Figura 3.1. Osciloscopio modelo DSOX2002A.*

Osciloscopio digital con dos canales analógicos, ambos con funcionamiento para entrada y salida de datos. Ocho canales digitales para procesamiento de datos y almacenamiento en memoria externa vía cable USB y/o HDMI. Perteneciente a la compañía Keysight Technologies. Con funcionamiento de lectura de datos y generación de señales en tiempo real, bajo especificaciones técnicas de:

- Ancho de banda: 70 MHz
- Profundidad máxima de memoria: 1 Mpts
- Rango máximo de muestreo: 2 GSa/s
- Rango máximo de respuesta de forma de la onda: 50 000 wfms/s
- ADC bits: 8 bits

Se utilizó como generador de señales para el sistema de micrófono con una onda de forma sinusoidal, constante en el tiempo y a una frecuencia de 40 kHz. Se usó a modo de canal sencillo y ningún dato fue grabado a partir del osciloscopio.

### 3.1.2 Multímetro digital



Figura 3.2. MMD Agilent Technologies modelo U1232A.

El MMD de modelo U1232A True RMS 6000 es un sistema de lectura de datos para AC/DC con modulación para sistemas de baja y alta impedancia. Capaz de medir voltaje (con un máximo de 600 V), corriente, frecuencia (de 99.99Hz a 99.99kHz), resistencia (600 ohms a 60 mega ohms) y capacitancia (1000 nF a 10mF). Tiene sistema de almacenado de datos interno (*last data hold*).para un máximo de 10 valores. Se puede conectar vía bluetooth a cualquier smarthphone a través del uso de las apk Agilent Mobile Logger y/o Agilent Mobile Meter con sistema de grabado de datos en tiempo real, donde el límite de memoria viene dado por la capacidad del celular como por su batería.

Con el uso de la apk se guardan los datos en un archivo de Excel y se pueden manipular después. Tiene capacidad para manejar múltiples conexiones a multímetros compatibles con la aplicación o del mismo tipo de MMD y estructurar todos los datos como independientes.

### 3.1.3 Controlador láser LDC 3065

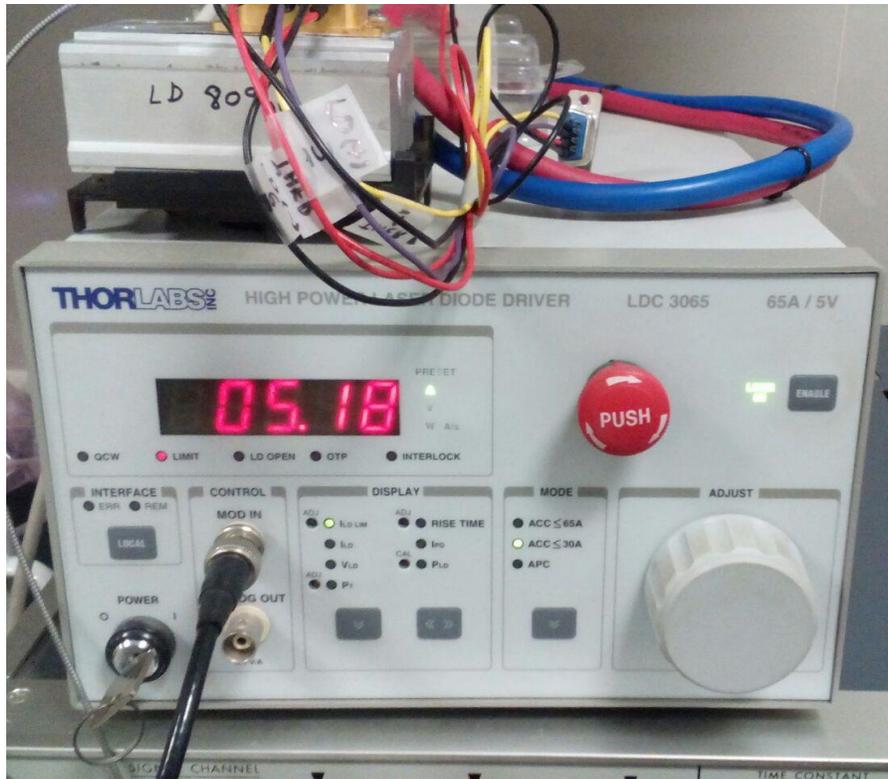
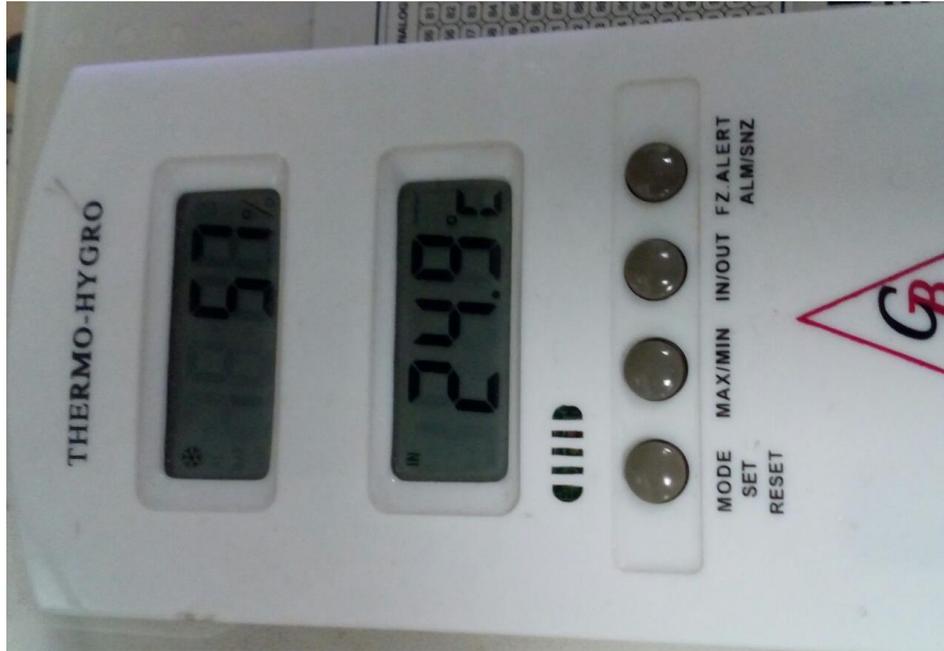


Figura 3.3. Controlador de electricidad para el LD de 809 nm, modelo LDC 3065.

El LDC3065-488 High Power Laser Diode Driver, tiene dos tipos de funcionamiento con respecto a la corriente, con un máximo de 65 A y con un máximo de 30 A. Se utilizó con este último para no llevar al límite el funcionamiento del controlador y tener potencias de salida del láser necesarias para no aumentar la temperatura en la muestra. Tiene dos modalidades de funcionamiento: señal pulsada y señal continua. Con respecto a su ficha técnica:

- Corriente del LD: De 0 a 65 A, resolución de 10 mA, precisión de  $\pm 300$  mA
- Voltaje de salida para LD: De 0 a 5V, resolución de 1 mV, precisión de  $\pm 10$  mV
- Frecuencia de funcionamiento de LD: de 20 Hz a 2 MHz, con resolución de  $\pm 50$  Hz para señales arriba de 6 kHz

### 3.1.4 Termómetro digital



*Figura 3.4 Termómetro digital con lectura de humedad en tiempo real.*

Se utilizó el termómetro digital como referencia para la temperatura del aire y la humedad en el mismo para tener una base de que medición de velocidad del sonido debemos tomar. En algunas bases de datos existen mediciones precisas para temperatura y humedad. Aunque no se tiene un espectro continuo para absolutamente todos los datos, algunas páginas muestran el tipo de cálculos que usan para esas mediciones.

### 3.2 PROCEDIMIENTO MATEMÁTICO

La energía transportada por las ondas requiere que su fuente de producción sea continua; de lo contrario, el movimiento se desvanece o desaparece súbitamente. Las moléculas de aire, en conjunto como un cuerpo se comprimen ligeramente debido a las perturbaciones creadas por la fuente. Estos cambios de presión se propagan por el aire a la velocidad del sonido. En la mayoría de los casos se considera que es ideal y que la onda no pierde su forma, esto es así para condiciones térmicas en que el aire conserva su homogeneidad.

Lo que no hay de momento es la explicación matemática de porqué dicho comportamiento se da. Basándonos en principios físicos y tomando como referencia la figura 2.1 podemos entender claramente que el sonido son variaciones de presión en el aire. Pero si recordamos la ecuación de gas ideal veremos que entre mayor será la presión mayor la temperatura.

Al aumentar la temperatura, el orden de las partículas se pierden y la elasticidad características del aire va disminuyendo hasta el punto en que la energía de vibración que tienen las partículas en el aire es mayor que la energía presente en las ondas que se están generando, y por lo tanto se imposibilita el que haya un sonido.

Hasta ahí vemos porque siempre se busca una función convergente en el tiempo y en la distancia (o casi siempre), pero lo que aún sigue como incógnita es el desarrollo matemático para entender el cambio de una onda de sonido (vibración mecánica) hacia una onda de calor debida a la alta variación en la presión (ondas descritas en su mayoría por la energía). Si lográsemos entender como una perturbación en el aire pasa de ser una onda de sonido a un gradiente (o rotacional) de temperatura, podríamos hacer un uso de tres tipos de sensores en conjunto; sónicos, térmicos y de radiación IR o NIR. Así podríamos entender más sobre las estructuras, desde lo que es la estructura sólida del objeto como las

alteraciones en sus propiedades (conductividad térmica y eléctrica) debida a la homogeneidad.

Se toma el comportamiento de una varilla de sección transversal variable, también conocido en español como cuerno acústico o cuerno sonoro, el cual de igual manera tendrá una fuerza inicial que genere una perturbación en el sistema, en alguno de sus extremos para después dejar evolucionarlo. En este caso ciertas condiciones físicas son importantes, como la densidad del medio, el cambio en el ancho del medio y para el caso más sencillo, se toma simetría con respecto a los ejes 'y' y 'z' (cuerno con base circular).

A partir de ecuación de onda en sus múltiples áreas (termodinámica, acústica, electromagnetismo, dinámica de fluidos, mecánica, física nuclear, difusión molecular) podemos establecer una función de onda que evoluciona de acuerdo a las propiedades del sistema (densidad, flujo, velocidad de onda, frecuencia, vector desplazamiento, propiedades mecánicas, afinidad electrónica, entre otros). Cada ecuación de onda puede representarse en múltiples dimensiones sea generada por análisis físico o por medio de parametrizaciones matemáticas. En su forma más conocida:

$$\nabla^2 \psi(\vec{r}, t) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \psi(\vec{r}, t)}{\partial t^2} \quad (3.1)$$

Describe en términos generales como se comporta la perturbación en un sistema y debido a la estructura de la ecuación diferencial, intrínsecamente está relacionada con la velocidad de la onda, por lo cual dicha función puede usarse para calcular la energía cinética de la onda:

$$T_i = \frac{1}{2} m_e v_e^2 = \frac{1}{2} m_e \left( \frac{\partial \psi}{\partial t} \right)^2 \quad (3.2)$$

Para la ecuación anterior aparece el termino de 'mass equivalent' o equivalente a la masa,  $m_e$ , que viene a ser una perturbación del sistema y de la propagación (ya sea que haya medio o no) que tiene un efecto similar a la masa en colisiones de

tipo newtonianas. Este equivalente puede estar relacionado con propiedades como presión, número de colisiones, coeficiente de fricción, viscosidad, flujo (electromagnético o de masa), carga, momento de spin.

A su vez, toda perturbación puede poseer una energía potencial, en especial para casos en que la onda viaja por un medio. La energía potencial en este caso, se debería a la oposición del medio o a sus características físicas como un cuerpo o cúmulo de cuerpos (en el caso de los gases):

$$V_i = \frac{1}{2} k \left( \frac{\partial \Psi}{\partial r} \right)^2 \quad (3.3)$$

Ahora, para el caso de la luz, se debe calcular un equivalente a la energía potencial que dependa de las condiciones en que se propaga el haz y las del sistema en estudio. Todo aquello que pueda interferir con el funcionamiento de la onda electromagnética. Por lo ya establecido por Einstein, sabemos que la masa y la energía están relacionados, y aunque se usa en términos de cuántica y relatividad, matemáticamente puede ser aplicado a todo.

De las ecuaciones anteriores calculadas para energía instantánea, y suponiendo una fuente de onda totalmente constante o suficientemente constante, podemos calcular las energías cinética y potencial total promediadas en el tiempo y después, la energía total del sistema. Si por un lado tenemos a la función de onda en forma simplificada  $\Psi(r, t) = R(r)T(t) = R(r) \cos \omega t$ . Así, gracias a su periodicidad temporal dicha energía nos da:

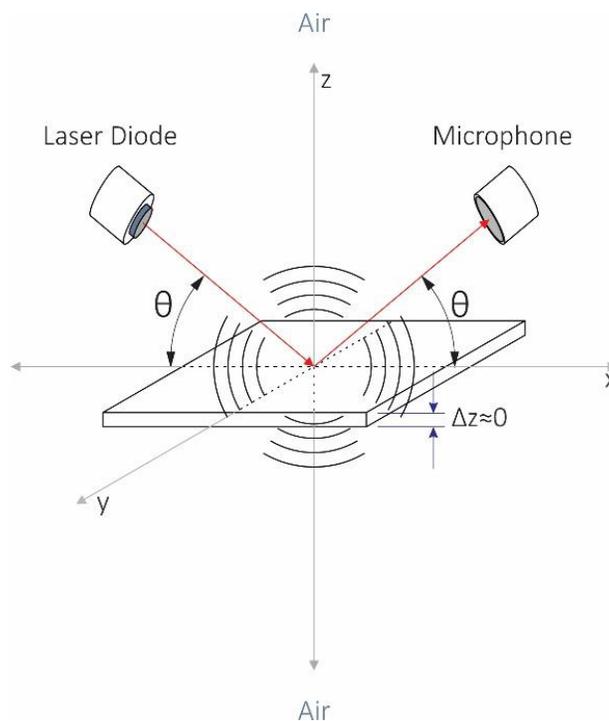
$$H = T + V = \langle T_i \rangle + \langle V_i \rangle = \frac{1}{4} m_e \omega^2 (R(r))^2 + \frac{1}{4} k \left( \frac{dR}{dr} \right)^2 \quad (3.4)$$

Aunque la ecuación diferencial no se establecerá a fondo, nos sirve para ver como la energía del sistema depende de su vector espacial, por tanto las ondas (a menos que tengan una fuente constante en un tiempo infinito) perderán energía conforme se propaguen. Todo tipo de onda que al desplazarse por un medio pierde energía, puede tener un rebote, o en otros términos, al pasar por un medio tiene una probabilidad de transmitirse y otra de reflejarse. En casos donde las

colisiones son dispersivas (medios dispersivos) también hay una probabilidad de que la onda se disperse.

Queda establecido que si todas las ondas tienen como fundamento la energía y su cambio en ella, podemos asegurar que la luz y el sonido pueden estar relacionados y a su vez pueden afectarse mutuamente.

Cuando una fuente de sonido es puntual podemos suponer que para un medio homogéneo, la onda se propaga en todas las direcciones bajo las mismas condiciones de velocidad de onda ( $c$ ), frecuencia angular ( $\omega$ ), vector de desplazamiento ( $\vec{k}$ ), fase y amplitud. Pero cuando un cuerpo tiene propiedades dispersivas en cuanto a su masa o en cuanto a las ondas viajeras, se genera entonces una perturbación entre el grupo de ondas que incidan en este sistema, de las cuales puede haber una variación en la velocidad de onda y de grupo.



*Figura 3.5. Representación gráfica del arreglo experimental, denotando los ángulos como su uso para efectos de simetría.*

Tomemos como referencia (figura 3.5) a una placa delgada que se mantiene en la misma posición y cuyo único movimiento se debe a vibraciones internas y las esperadas pequeñas variaciones en respuesta a la perturbación generada por el sonido y la fuente láser.

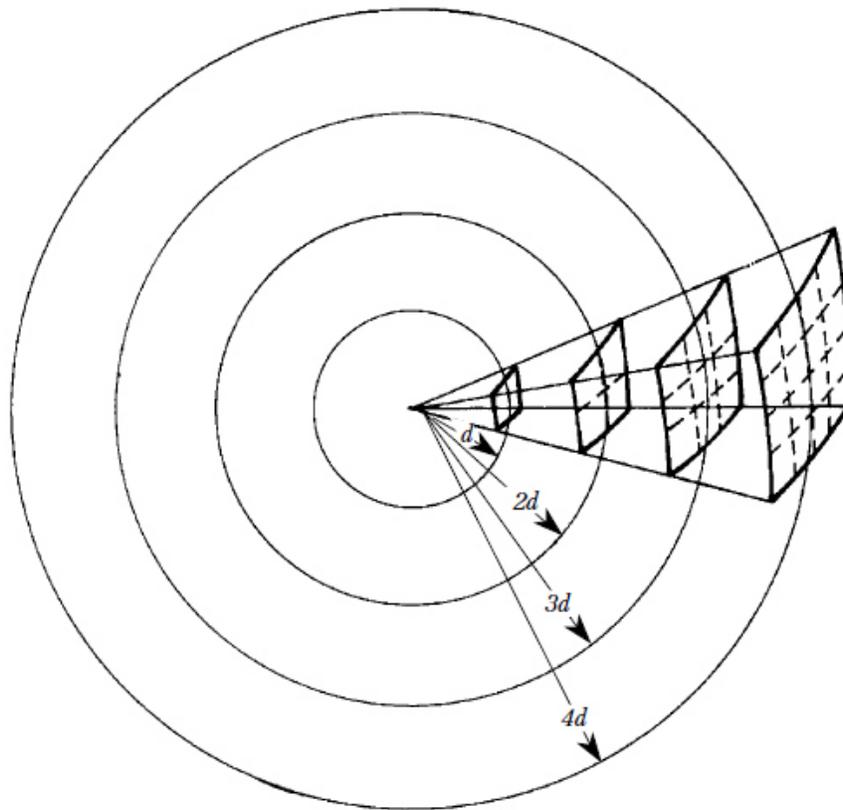
Para facilitar los cálculos, se coloca la bocina fuente (con un funcionamiento de 40 kHz) y la bocina receptora (o micrófono) de forma que guarden el mismo ángulo con un eje vertical imaginario que pasa justo por el centro de la placa. Si el arreglo se modifica (como fue el caso debido al grosor de la placa usada en el experimento) se tiene que conservar el mismo ángulo aunque las posiciones no sean las mismas propuestas en la figura 3.5.

La fuente láser tiene una salida de luz lo suficientemente pequeña para considerar que la zona de interacción en la placa es puntual. Si pensamos por un momento que dicho haz de luz posee un momentum angular y lineal, estamos ejerciendo una fuerza sobre el objeto, y al dejarse de aplicar este volverá a su estado de equilibrio.

Por más preciso que sea un láser, sabemos que tiene una cierta oscilación en su señal debido a la propia naturaleza imperfecta (con respecto al cálculo) de la materia. Lo mismo para el funcionamiento de la bocina, ya que el osciloscopio maneja paquetes de ondas como pulsos a 40 kHz. De ahí que tengamos un ELH, debido a estas vibraciones generadas en el cuerpo.

La física acústica nos dice que debido a este comportamiento y la fuente de dicha vibración cuasi puntual podemos suponerla como una esfera pulsante, donde su radio estará denotado por la mitad de la extensión de la placa (o el lado más extenso que posea si no se puede ubicar centrado). Aquí ya introducimos la idea de usar coordenadas esféricas, pero para esto necesitamos que se cumplan las siguientes consideraciones necesarias en el desarrollo matemático como en la simulación numérica:

- El medio para propagación del sonido es el aire: homogéneo, sin efecto de convección y siendo este un gas ideal.
- Se considera a la placa como un objeto bidimensional.
- La densidad del aire y del objeto son constantes.
- Las interacciones entre el cuerpo y el medio, pueden generar un fenómeno de tipo isotérmico o adiabático.



*Figura 3.6. En el ángulo sólido mostrado, se distribuye la misma energía sónica a través de cada zona esférica correspondiente al área estudiada, conforme la distancia ( $d$ ) se incrementa, se muestra el mismo comportamiento. La intensidad del sonido es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia con respecto al punto fuente.*

Ahora supongamos también, que el sonido que se dispersa en dicha esfera pulsante es igualmente válido para la perturbación en una varilla de sección

transversal variable (o cuerno acústico). El área transversal inicial la consideraremos del mismo tamaño que la salida de luz de la fuente láser. Para el primer desarrollo matemático tomaremos la zona de impacto como un punto.

Si tomamos dicho cuerno acústico que tenga una base circular, entonces tenemos una simetría en los ejes 'z' y 'y'. Las variaciones se dan en la dirección 'x' siguiendo la regla:

$$S = S(x) = S_0 e^{2\alpha x} \quad (3.5)$$

Donde  $\alpha$  es una constante sin unidad de medición, que rige el crecimiento de grosor del cuerno.  $S_0$  es el área transversal inicial, que puede o no ser cero. Puede haber variaciones de la presión del gas/medio de tipo adiabático o isotérmico, que se distinguen por:

$$P = \frac{RT}{V} = cte \text{ isotérmico} \quad (3.6)$$

$$P = \frac{RT}{V^\gamma} = cte \text{ adiabático} \quad (3.7)$$

Por lo tanto, de dichos casos podemos ver que hay dos tipos de crecimiento de sección transversal. Antes de considerar cualquiera de los dos casos, se cambiarán las coordenadas a esféricas. La expresión para el volumen denota variaciones tan pequeñas que podemos despreciar cambio alguno en la densidad como ignorar las variaciones en el gas por convección térmica. Al hacer cambio de variable aparece un cierto término angular debido a la proyección del vector en eje 'x', sin embargo, podemos despreciarlo en este punto debido a la mencionada simetría;

$$\Delta V = \Delta x S(x) = \Delta r S(r) \quad (3.8)$$

En un sistema sencillo de cuerno acústico, generado bajo la perturbación de un cuerpo en equilibrio y que, no genera ninguna deformación en este, de aquí tenemos una ecuación diferencial como referencia;

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + 2\alpha \frac{\partial \xi}{\partial x} = \frac{1}{c_b^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad (3.9)$$

Cuya solución es:

$$\xi(x, t) = Ae^{-\alpha x} e^{i(k_1 x - \omega t)} + Be^{-\alpha x} e^{i(-k_1 x - \omega t)} \quad (3.10)$$

Dónde:

- $\xi$  perturbación viajera a través del área transversal,
- $k_1 \equiv (k_0^2 - \alpha^2)^{1/2}$ ,
- $\alpha$  parámetro de crecimiento de la sección transversal,
- $k_0 = \omega/c_b$  vector desplazamiento,
- $c_b$  velocidad de propagación para las ondas longitudinales.

Pasando al sistema de la placa delgada, hay tres fuerzas interactuantes en total, una de ellas proviene del sonido como agente externo, las otras dos son parte de la reacción del cuerpo. No se toma al láser como una fuerza interactuante de manera directa en este primer análisis, pero forma parte del efecto de LH por la vibración del cuerpo intentando mantener el equilibrio en su estructura, como una respuesta de ondas mecánicas. De la tercera ley de Newton, tenemos fuerzas internas que mantienen el equilibrio donde una de ellas describe dicha perturbación como el cambio con respecto a la sección transversal,

$$F = BS \frac{\partial \eta}{\partial r} \quad (3.11)$$

Depende de:

- MC del medio (aire en este caso), B, debido a que este nuevo caso en estudio tiene como material para el cuerno acústico al aire.
- Área de la sección transversal (S).

Por otro lado, tenemos una fuerza que se opone a la perturbación, a su vez la vibración de oscilación armónica generada por la pequeña intermitencia del láser junto con el sonido, esta última es descrita por LH. Juntas forman la fuerza de respuesta:

$$F = \rho_0 S \Delta r \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} - \left( -B \frac{dS}{dr} \right) \Delta r e^{-i\omega t} \quad (3.12)$$

Donde

- Y es el módulo de Young de la placa u objeto de estudio

-  $\rho_0$  la densidad del medio (aire en este caso)

Es evidente a través de un análisis de unidades que el término  $-B \frac{dS}{dr}$  tiene unidades iguales a la constante de resorte.

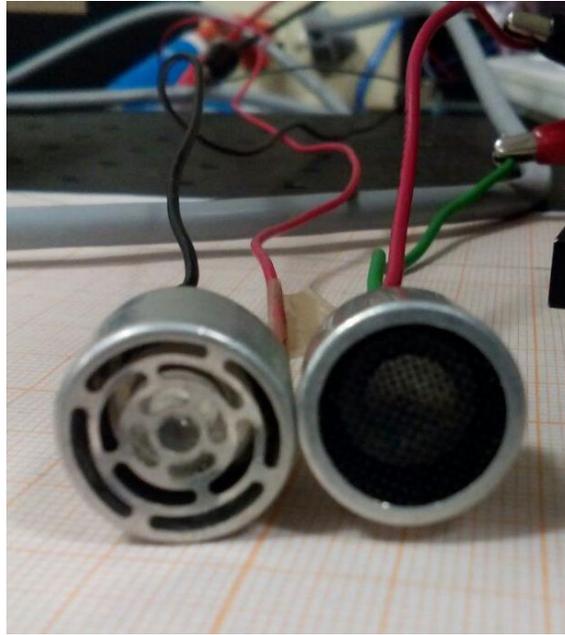
Según la tercera ley de Newton, las fuerzas pueden mantenerse en equilibrio. Tenemos diferentes fuerzas netas, lo que más se aproxima a nuestro análisis son las variaciones de estas fuerzas, las cuales en último término, son las que deben ser igualadas. Si además tomamos que todo el sistema evoluciona con el tiempo, de manera que

$$\eta(r, t) = f(r)T(t) = f(r)e^{-i\omega t} \quad (3.13)$$

Dándonos como resultado una ED independiente del tiempo en la forma:

$$\frac{d^2 f}{dr^2} + 2\alpha\gamma \frac{df}{dr} + k^2 f = 2\alpha\gamma\beta; \quad \gamma = \left(\frac{c_p}{c_v}\right) \quad (3.14)$$

La presión ejercida por la bocina es intermitente ya que funciona por pulsos, mientras que el haz al ser continuo (se considera así por la frecuencia tan alta que tiene) genera un cierto estado preferencial del cuerpo. Si juntamos ambos fenómenos, veremos que la estructura superficial del cuerpo se comprime y se expande, como en una sección que vibra armónicamente, en la misma manera que lo hace un resorte bajo el efecto de LH.



*Figura 3.7. Del lado izquierdo está el micrófono de cristal receptor del sonido, de lado derecho está la fuente de sonido, micrófono de membrana.*

Como primera observación, existe un vector de desplazamiento dependiente de la velocidad del sonido en el medio, la frecuencia angular, justo como suele suceder en la mayoría de los casos en que se hace uso de la ecuación de onda. También tenemos la nueva constante  $\beta = (Y/B)$  que impone un límite para la validez de nuestras consideraciones especiales: solo se pueden tener unos cuantos órdenes de magnitud de diferencia entre el MY y el MC, para que nuestra solución sea uniformemente convergente.

Aplicando el método de FG para encontrar solución a la EDNH vista previamente, basando la aplicación del modelo a través de resolver la ecuación diferencial homogénea en términos de la FG,  $G(r; \xi)$ , que corresponde al caso ya analizado en el texto:

$$\frac{d^2 G(r; \xi)}{dr^2} + 2\alpha\gamma \frac{dG(r; \xi)}{dr} + k^2 G(r; \xi) = 0 \quad (3.15)$$

Esta ED tiene dos soluciones posibles, una función convergente y otra divergente. Ya que estamos analizando respuesta en forma de sonido, podemos predecir que

después de un cierto lapso de tiempos y a ciertas distancias, las ondas se desvanecen, por lo tanto consideraremos únicamente el factor convergente. También estamos suponiendo que no hay reflexión alguna del sonido debido a las condiciones del objeto en estudio, que tiene una densidad muy alta en relación al medio.

Para un sistema no controlado, la distancia que pueden recorrer dichas ondas depende de la temperatura ambiente, efecto de convección de gases, intensidad de sonido y la geometría del medio. Ahora, volviendo a la solución, tenemos la integral de Green requerida:

$$f(r) = \int_{r_0}^r G(r'; \xi) f'(\xi) d\xi = \int_{r_0}^r 2\alpha\gamma\beta A e^{-(\alpha+ik_1)(x-\xi)} d\xi \quad (3.16)$$

Una parte real y otra imaginaria surgen de integrar, pero se dará uso sólo la primera, que además estamos tomando al valor de distancia inicial a ser cero ( $r_0 = 0$ );

$$f(r) = \frac{2\alpha\gamma k A \beta}{(\alpha^2\gamma^2 - k^2)} \left( \frac{\alpha\gamma}{k} + e^{-\alpha\gamma r} \sin kr \right) \quad (3.17)$$

Una integral de Green se evalúa en todo el dominio de los números reales, pero en este caso no tiene sentido pensar en un valor de radio negativo, ya que se dijo que analizamos una esfera pulsante de sonido. La cual debe tener un origen y está establecido en la placa.

Tenemos que encontrar el valor o la expresión que denota la equivalencia de 'A' en la solución, usando como referencia la amplitud inicial generada en la bocina. En el sistema experimental esta dependerá de las características del material, dándonos sus propiedades por descarte. También ahora, con la función obtenida podemos ver que se explica la condición limitante del caso de estudio:

- Si  $Y \gg B$ ,  $\beta$  y la función tienden a ser extremadamente grande, algo no posible con ondas de sonido en el aire.

- Si  $B \gg Y$ ,  $\beta$  tiende a cero. Es entonces, que la función se mantendrá existiendo solamente si la amplitud generada es extremadamente grande.

Evaluemos la condición inicial, y única condición que podemos suponer en el sistema,  $f(r = 0) = A_0$ . Donde  $A_0$  es el valor de la amplitud inicial, determinado por cómo responde el material por la interacción con el láser. Omitiendo álgebra en el texto, tenemos:

$$A = \frac{(\alpha^2 \gamma^2 - k^2) A_0}{2\alpha^2 \gamma^2 \beta} \quad (3.18)$$

Y en conjunto con esto, una función dada como:

$$\eta(r, t) = \frac{A_0 k}{\alpha \gamma} \left( \frac{\alpha \gamma}{k} + e^{-\alpha \gamma r} \sin kr \right) \cos \omega t \quad (3.19)$$

Para cualquier cuerno acústico de material sólido, la variación del área transversal puede o no ser de forma exponencial, pero siempre habrá un parámetro  $\alpha$  que denote como cambiará. Al sustituir la función en la EDNH, veremos la expresión que demuestra que factores explícitamente rigen el valor de  $\alpha$ ;

$$\alpha = \frac{A_0 k_0^3}{\gamma \sqrt{2(2\beta^2 + A_0^2 k_0^4)}} \quad (3.20)$$

Recordando otros valores como  $k_0^2 = \omega/c_b$ ,  $\beta = Y'/Y$ ,  $k^2 = k_0^2 - \alpha^2 \gamma^2$ , para establecerlos dentro de la expresión anterior, dándonos por último

$$\alpha = \frac{A_0 \omega^3 \gamma}{\gamma c_b \sqrt{4Y'^2 c_b^4 + 2A_0^2 \omega^4 Y^2}} \quad (3.21)$$

Hasta el momento ya quedo comprobado que puede haber un modelo para describir ondas generadas en un cuerno acústico con aire como material. Pero a su vez, se dijo que esto era igual (o equivalente) a la propagación de sonido por una esfera pulsante. Si esto es verdad se debe poder encontrar una correlación que asegure la igualdad, pero para establecer esto se debe primero generar un nuevo conjunto de ecuaciones. Esta vez, se trabajará en el sistema de la esfera.

Tomemos del texto la ecuación diferencial para una esfera pulsante de radiación sónica, que se da para un fuerza actuando en un solo instante de tiempo y después dicho agente externo desaparece, dejando al sistema evolucionar hasta alcanzar de nuevo el estado de energía basal:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial p}{\partial r} \right) = \frac{1}{c_f^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (3.22)$$

Donde la velocidad de propagación del sonido difiera en factores de la obtenida en la otra ED, para este caso  $c_f^2 = B/\rho_0$ . Siguiendo la guía del libro, se hace la proposición de un cambio de variable,  $\eta = rp$ , con la finalidad de encontrar una ED más manejable:

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial r^2} = \frac{1}{c_f^2} \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} \quad (3.23)$$

Ésta expresión es conocida como ecuación de onda, pero lo que aquí nos interesa será obtener una función convergente para apegarnos al sistema de una esfera y su variación de la onda radialmente.

Si ahora reconstruimos la ecuación, pero haciendo uso de un factor que rijan el efecto armónico de la ley de Hooke, y apegándonos a consideraciones usadas en el sistema anterior, llegaremos a la siguiente EDNH:

$$B \frac{\partial^2 \eta}{\partial r^2} = \rho_0 \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} - \left( -\frac{B'}{S} \right) e^{-i\omega t} \quad (3.24)$$

De aquí tenemos:

- $B$  módulo de bulto/bulk del medio/MC.
- $B'$  módulo de bulto del objeto/MC del objeto.
- $\omega$  velocidad angular del medio.
- $\rho_0$  densidad del medio, constante.
- $S = S(r) = S_0 e^{2\alpha\gamma r}$ .

Con un poco de matemática, siendo  $\eta(r, t) = h(r)T(t) = h(r)e^{-i\omega t}$ , podemos llevar la ED anterior a una versión más simple

$$\frac{d^2 h}{dr^2} + k_1^2 h = \frac{\mu}{S_0} e^{-2\alpha\gamma r} \quad (3.25)$$

Cuyas nuevas constantes son  $\mu = B'/B$ ,  $k_1^2 = \omega^2/c_f^2$ .

A diferencia de la ocasión anterior, consideraremos un límite para el alcance de la perturbación generada en la placa, esta cierta distancia sólo será denotada como  $L$  y algo que debe calcularse por las condiciones del sistema. Se espera que a una cierta distancia muy grande, el sonido desvanezca o mejor dicho, se acople a las condiciones del medio.

De todo lo dicho, queda ahora que tenemos una función en dos partes, dada por:

a) Para  $r \leq L$ :

$$h(r) = \frac{D2\alpha\gamma\mu e^{-ik_1 r}(1-e^{-(2\alpha\gamma-ik_1)L})}{S_0(4\alpha^2\gamma^2+k_1^2)} \quad (3.26)$$

$$h(r) = A_0 e^{-ik_1 r} \quad (3.27)$$

b) Para  $r \geq L$ :

$$h(r) = \frac{E\mu2\alpha\gamma e^{ik_1 r}(e^{-(2\alpha\gamma+ik_1)L}-1)}{S_0(4\alpha^2\gamma^2+k_1^2)} \quad (3.28)$$

Donde  $D$ ,  $E$  son constantes de la función, y bajo la evaluación de condición inicial y de interface tienen el valor:

$$E = -\frac{D(e^{-ik_1 L}-e^{-2\alpha\gamma L})}{(e^{ik_1 L}-e^{-2\alpha\gamma L})} \quad (3.29)$$

$$D = \frac{A_0 S_0(4\alpha^2\gamma^2+k_1^2)}{2\alpha\gamma\mu(1-e^{-(2\alpha\gamma-ik_1)L})} \quad (3.30)$$

Se ha conservado la validez de todas las condiciones matemáticas, no obstante, al momento de hacer uso del experimento, siempre queda sujeto al funcionamiento de los generadores de señal y a las mediciones, razón por la cual en las funciones tomaremos una única amplitud inicial denotada solamente como  $A_0$ . De aquí que podamos reescribir estas soluciones como:

$$f(r) = A_0(1 - e^{-(\alpha\gamma+ik)r}) \quad (3.31)$$

$$h(r) = A_0 e^{-ik_1 r} \quad (3.32)$$

Ambas funciones deben regirse hasta el mismo punto, el cual está impuesto por la función radial, que es límite máximo donde la perturbación genera un sonido antes de desvanecerse. Haciendo toda la matemática al igualar las funciones evaluadas en el punto, en su forma compleja para considerar posibles pérdidas de información:

$$e^{-(\alpha\gamma+ik)L} - e^{-ik_1 L} = 1 \quad (3.33)$$

En la mayoría de los casos la función como tal no es lo que medimos sino cantidades derivadas de éstas. Algunas de las más comunes son potencia de radiación, intensidad de la radiación. La primera mencionada nos indica cómo se dan las variaciones de la energía y de las ondas de sonido conforme se propagan en el medio. La segunda, es una cantidad promedio en el tiempo de toda la potencia de radiación que se presenta en el fenómeno. Estas dos se expresan a través de:

$$\vec{P} = p \frac{\partial \eta}{\partial t} \hat{r} \quad (3.34)$$

$$I = \frac{1}{2} \rho_0 c_b \omega^2 \eta_m^2 \quad (3.35)$$

Aparece la presión del medio entre los términos, que para un sistema de un fluido bien comportado esta viene determinada por:

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} + \nabla p = 0 \quad (3.36)$$

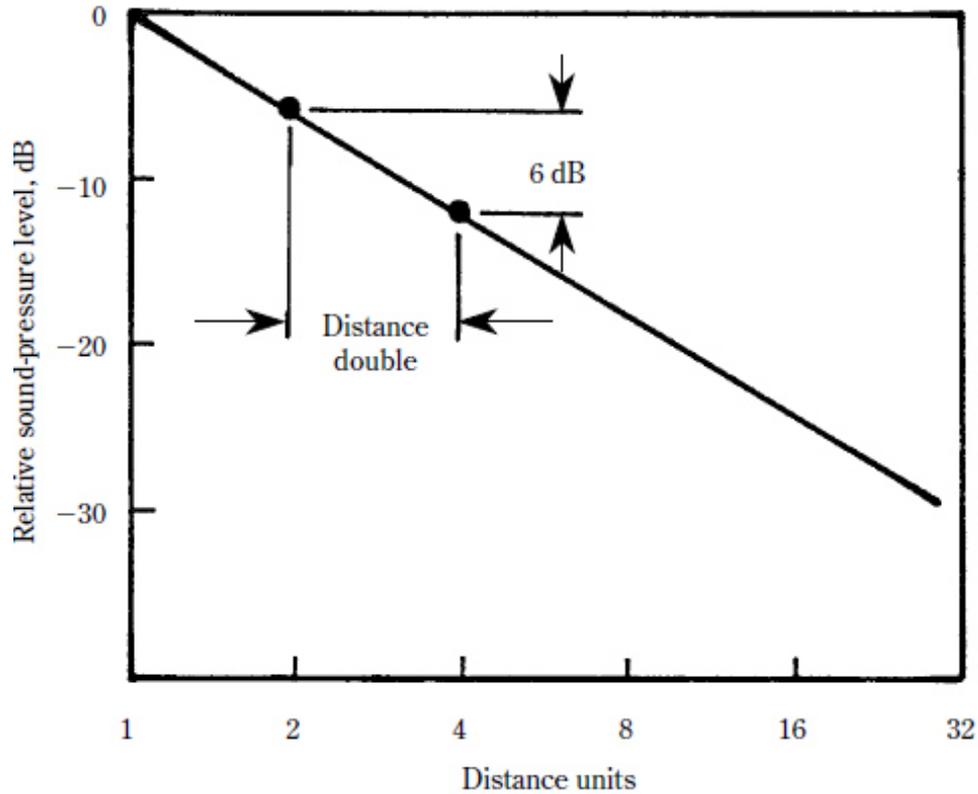


Figura 3.8. La ley del inverso del cuadrado para la intensidad del sonido tiende a regirse como la ley del inverso de la distancia con respecto a la presión sónica. Es decir, que el nivel de presión del sonido se reduce en 6 dB cada vez que se duplica la distancia.

La velocidad que viene aquí señalada, está determinada por la evolución del fluido en todas las direcciones,  $\vec{v} = \vec{\nabla}\eta$ . Si retomamos las expresiones de función en variable real, al calcular la potencia y la intensidad llegamos las expresiones de debajo:

$$\vec{P} = \frac{\omega^2 \rho_0 A_0^2 k^2}{\alpha^2 \gamma^2} \left( \frac{\alpha \gamma}{k} e^{-2\alpha \gamma r} \sin kr + e^{-4\alpha \gamma r} (\sin kr)^2 \right) (\cos \omega t)^2 \hat{r} \quad (3.37)$$

$$I = \frac{\omega^2 \rho_0 A_0^2 c_b k^2}{4\alpha^2 \gamma^2} \left( \left( \frac{\alpha \gamma}{k} \right)^2 + 2\alpha \gamma e^{-\alpha \gamma r} \sin kr + k^2 e^{-2\alpha \gamma r} (\sin kr)^2 \right) \quad (3.38)$$

Todo lo anterior elaborado ha sido bajo la suposición de un sistema adiabático con respecto al medio gaseoso, ahora falta tomar el caso isotérmico. Cualquier persona que haga la matemática paso a paso, podrá ver que basta con ajustar un

valor,  $\gamma = 1$ , dentro de todas las ecuaciones. Así solo queda expresar todas las cantidades siguiendo este cambio:

- La solución para la EDNH del cuerno acústico:

$$\eta(r, t) = \frac{A_0 k}{\alpha} \left( \frac{\alpha}{k} + e^{-\alpha r} \sin kr \right) \cos \omega t \quad (3.39)$$

- La ecuación para cálculo del parámetro  $\alpha$  en términos del sistema:

$$\alpha = \frac{A_0 \omega^3}{c_b \sqrt{4Yr^2 c_b^4 + 2A_0^2 \omega^4 Y^2}} \quad (3.40)$$

- Potencia de radiación:

$$\vec{P} = \frac{\omega^2 \rho_0 A_0^2 k^2}{\alpha^2} \left( \frac{\alpha}{k} e^{-2\alpha r} \sin kr + e^{-4\alpha r} (\sin kr)^2 \right) (\cos \omega t)^2 \hat{r} \quad (3.41)$$

- Intensidad irradiada:

$$I = \frac{\omega^2 \rho_0 A_0^2 c_b k^2}{4\alpha^2} \left( \left( \frac{\alpha}{k} \right)^2 + 2\alpha e^{-\alpha r} \sin kr + k^2 e^{-2\alpha r} (\sin kr)^2 \right) \quad (3.42)$$

### 3.2.1 Velocidad dinámica del sonido

El desarrollo matemático muestra una serie de valores y ecuaciones que pueden usarse en diferentes tipos de estudios para el efecto fotoacústico. Cada uno contiene diferente información con respecto al sistema, no importa que se analice con un resonador o con un micrófono, las ecuaciones se pueden conjugar para hacer el análisis completo. Lo único que queda por añadir el comportamiento general para la velocidad del sonido en gases, para los experimentos realizados, se utilizaron solo condiciones donde no hay gradiente de temperatura, pero parte de la finalidad de la tesis es establecer un marco teórico mas general para poder usarse e casos de no equilibrio térmico.

Tomando como base el desarrollo de teoría de los gases ideales, podemos obtener directamente valores de la velocidad del sonido para gases en 0% de humedad. Hay dos principales variantes para estos cálculos en los libros de texto, para procesos adiabáticos

$$c_{ad} = \left( \gamma \frac{P}{\rho_0} \right)^{1/2} = \left( \gamma \frac{RT}{\mu} \right)^{1/2} = \left( \gamma \frac{kT}{m_0} \right)^{1/2} \quad (3.43)$$

Y para procesos isotérmicos

$$c_{iso} = \left(\frac{p}{\rho_0}\right)^{1/2} = \left(\frac{RT}{\mu}\right)^{1/2} = \left(\frac{kT}{m_0}\right)^{1/2} \quad (3.44)$$

Siendo que ambos se presentan como incompletos o consistentes solo para algunas condiciones.

Por definición estricta, debemos tomar como sonido toda aquella perturbación mecánica que pueda llegar a nosotros y ser procesado por el cerebro como un conjunto de información significativa, cuantificable y capaz de recodificarse. Esto se cumple en exclusiva para ciertos valores específicos de:

- intensidad relativa (dB): 0 a 130
- volumen (son/fon): 30 a 90
- frecuencia (Hz): 20 a 20 000
- pitch (Hz): 120 a 650
- pulsos por minuto (BPM, adimensional):
- tiempo
- presión e implícitamente, temperatura: 0 K a 100 K

Algunos parámetros adimensionales o que no tienen unidades, son exclusivos para ciertos valores en específico de temperatura, presión y densidad. Igualmente varían dependiendo del tipo de elemento o de la pureza de un sistema gaseoso (como en el aire, cuando medimos su porcentaje de humedad).

<b>Gas</b>	<b>Temperatura</b>	<b><math>\gamma</math> (constante adiabática)</b>
Aire	290.15 K	1.403
Dióxido de carbono	288.15 K	1.304
Hidrógeno	288.15 K	1.410
Nitrógeno	288.15 K	1.404
Oxígeno	288.15 K	1.401

*Tabla 3.1.- Constante adiabática para algunos de los gases más comunes.*

Cuando usamos el término de “velocidad dinámica” estamos generalizando para un sistema de evaluación de dicha rapidez bajo las condiciones en que se desenvuelve la fenomenología del sistema. Es decir, en lugar de generar un conjunto de ecuaciones que describan una sola función, podemos generar una única expresión que sea totalmente multivariada y al mismo tiempo, que se pueda dejar un valor fijo y correr todos los demás (o incluso variar solo un dato).

Para muchos gases se conoce la velocidad del sonido que pueden tener bajo una perturbación sencilla, debido a que conocemos datos comunes como su densidad, la presión que los sometemos o incluso la temperatura promedio del contenedor del fluido.

### 3.3 JUSTIFICACIÓN NUMÉRICO-GRÁFICA

#### 3.3.1 Simulación numérica

Todas las simulaciones fueron realizadas en el compilador Fortran 95, variando la cantidad de ciclos (50, 100, 200, 500), los resultados mostrados en el texto son para la cantidad de ciclos que devuelve valores más óptimos. Para pocos ciclos el sistema ni siquiera logra evaluar la función en todo el espacio definido. Se utilizaron las gráficas de 200 ciclos, para 500 iteraciones, el sistema realiza por si solo la condición de reflexión. Para las simulaciones se generan las expansiones en serie de Taylor requeridas para las derivadas, mostradas a continuación:

$$f_x = \frac{f(x+h)-f(x-h)}{2h} \quad (3.45)$$

$$f_{xx} = \frac{f(x+h)-2f(x)+f(x-h)}{h^2} \quad (3.46)$$

Que al reemplazarlas en la ecuación diferencial correspondiente para el cuerno acústico tenemos la expresión que será la base para el código de Fortran 95:

$$\frac{f_{r+h}-2f_r+f_{r-h}}{h^2} + 2\alpha\gamma \frac{f_{r+h}-f_{r-h}}{2h} + k^2 f_r = 2\alpha\gamma\beta \quad (3.47)$$

Como se puede ver sólo se toman las coordenadas espaciales, de forma arbitraria se selecciona que avance desde el origen ( $r = 0$ ) hasta un valor de  $r = 30$ . Las primeras gráficas de esta correlación entre teoría y simulación fueron generadas en Wolfram Alpha, su versión gratuita de internet. Todas las demás gráficas subsecuentes son elaboradas con Excel.

Cualquier perturbación se puede propagar por el aire, teniendo la amplitud (energía) suficiente, por lo que la longitud de onda/frecuencia que dicha onda debe tener puede no importar. Lo mismo para el efecto fotoacústico presente en este caso. Se usó el aluminio como referencia en las funciones matemáticas como en la simulación. A su vez, se eligió considerar que todo el sistema funciona como un proceso adiabático.

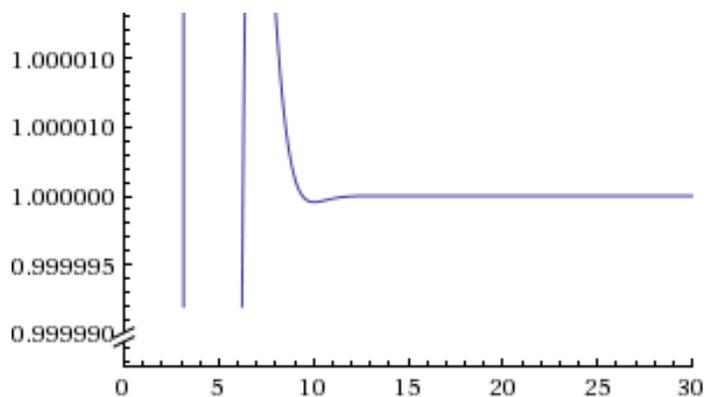
De la simulación es importante resaltar ciertos valores

- Valor espacial de inicio: 0
- Valor espacial final: 30
- MC del medio: 0.2 MPa (aire)
- MY del material: 70 GPa (aluminio)
- $\alpha = 1, 4$  (parámetro de crecimiento del cuerno)
- Velocidad del sonido en el aire (20° C, 0% de humedad): 343 m/s
- Grupo de frecuencias: 10, 20, 5 000, 20 000 Hz

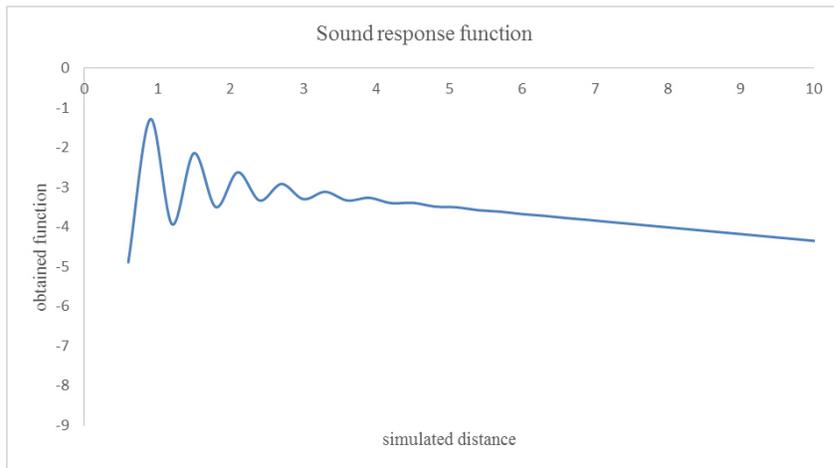
Como nota, se tiene que la simulación se apegará parcialmente al caso real. Aunque no se llegue a esto aún, puede concluirse debido a que hay ciertos parámetros que no forman parte de las ecuaciones diferenciales conseguidas tales como convección del gas por gradiente de temperatura, nivel de humedad, irregularidades en el cuerpo, entre otras.

La mayoría de los parámetros incluidos la amplitud se consideran como unitarios, excepto aquellos que ya fueron mencionados previamente, lo que nos indica, al menos para el caso del programa en línea una función con la forma:

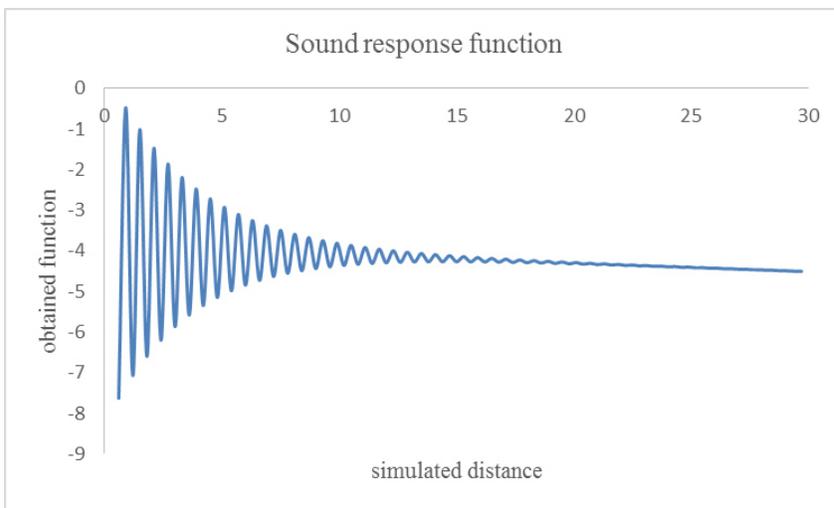
$$f(r) = A(1 + e^{-1.4r} \sin r); \quad A = 1 \quad (3.48)$$



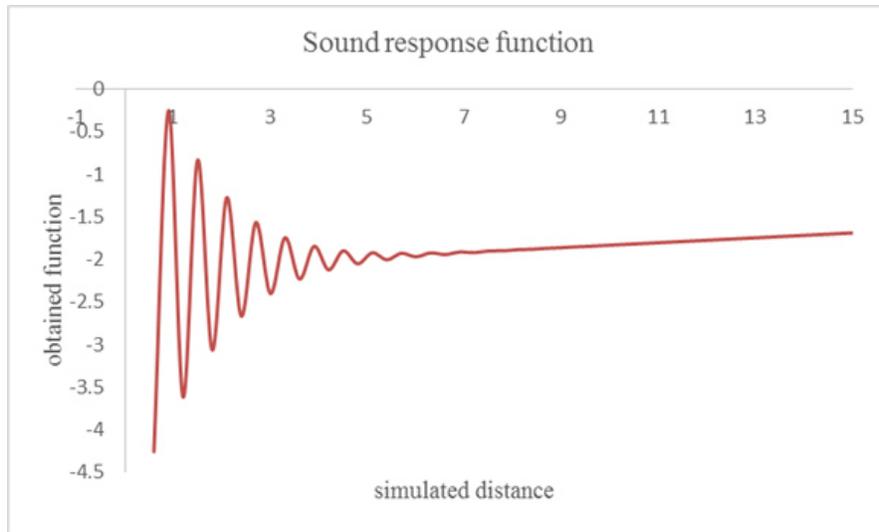
*Gráfica 3.1. Gráfica obtenida de la página de acceso libre de Wolfram Alpha. Se muestra el comportamiento de la solución a la EDNH. Sobre el eje de abscisas tenemos la distancia recorrida, en el eje de ordenadas tenemos la amplitud resultante.*



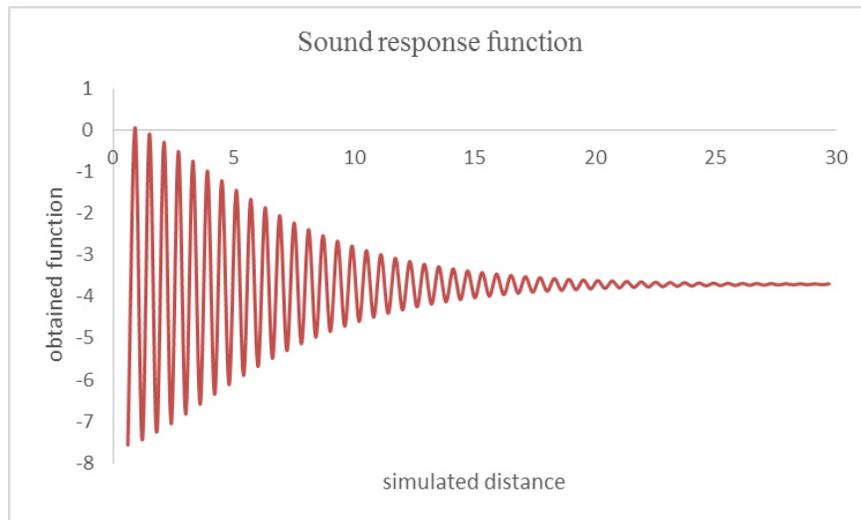
Gráfica 3.2. Se muestran los datos obtenidos de la simulación. Rango de sonido audible. Iteraciones realizada a 10 Hz,  $\alpha = 1$ .



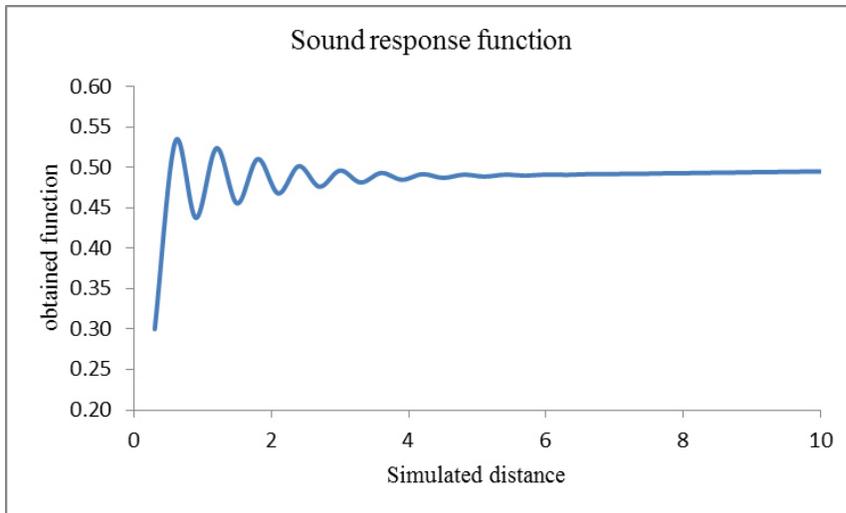
Gráfica 3.3. Rango de sonido audible. Iteraciones realizada a 10 Hz,  $\alpha = 4$ .



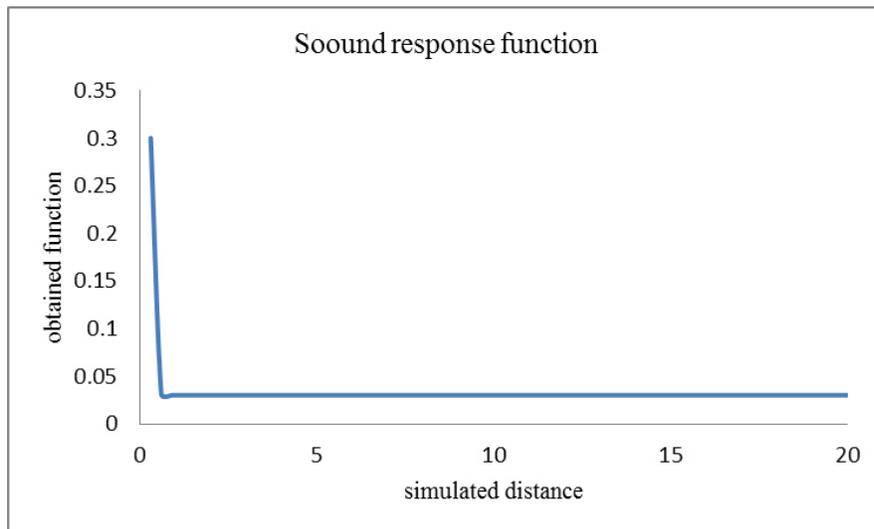
Gráfica 3.4. Rango de sonido audible. Iteraciones realizada a 20 Hz,  $\alpha = 1$ .



Gráfica 3.5. Rango de sonido audible. Iteraciones realizada a 20 Hz,  $\alpha = 4$ .



Gráfica 3.6. Rango de sonido audible. Iteraciones realizada a 5 kHz,  $\alpha = 1$ .

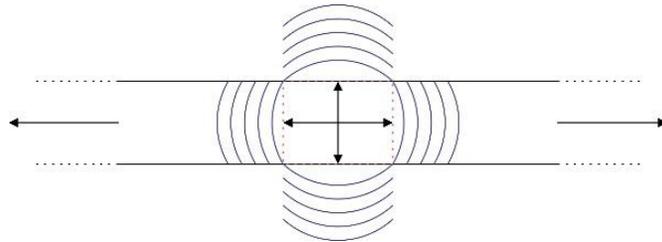


Gráfica 3.7. Límite del sonido audible. Iteraciones realizada a 20 kHz,  $\alpha = 1$ .

Para las simulaciones podemos ajustar el valor de la amplitud como nosotros queramos, pero en el caso real vemos que la amplitud viene determinada por los parámetros del sistema. De ahí que podamos encontrar relaciones entre las múltiples variaciones y los datos experimentales que, en trabajos futuros, se pueden tomar.

Los valores altos en frecuencia parecen no ser significativos, pero esto es solo porque no hay una amplitud muy grande, es decir, la cantidad de energía que

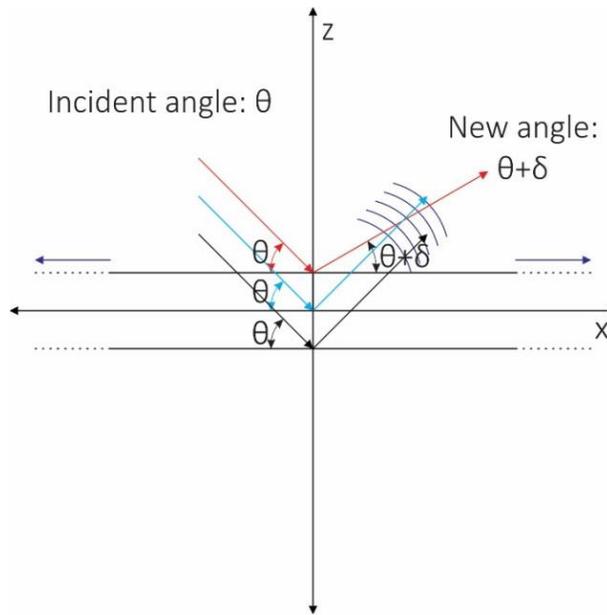
tiene la onda no es suficiente para poder existir en aire durante intervalos de tiempo grandes. A mayor cantidad de energía mayor será el tiempo de existencia de la onda de sonido idealmente, aunque a su vez genera mayores variaciones térmicas y la probabilidad de transmisión y reflexión cambian.



*Figura 3.9. Corte transversal estructural de la placa metálica. Representación básica para el efecto de ley de Hooke en la perturbación del cuerpo.*

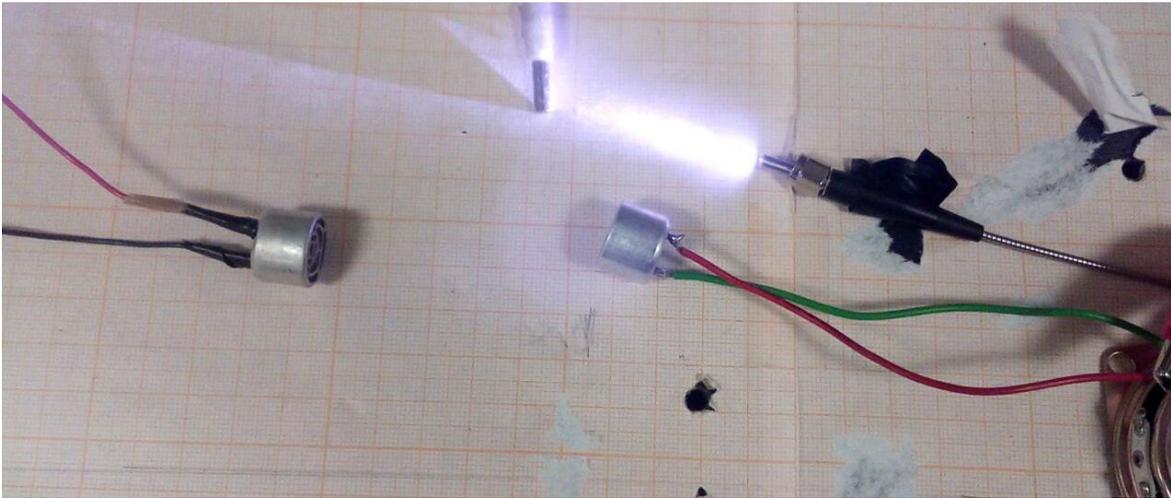
La figura 3.10 muestra claramente que una placa, por muy delgada que sea, no tiene un espesor específico de cero, por lo que se genera un retardo en el viaje de la onda que tiene que recorrer toda la estructura del objeto. De las propiedades del sonido en aire, sabemos que un conjunto de señales sónicas pueden converger en una sola, teniendo como fase y amplitud características aquellas del colapso de todas las ondas fuente, creando una nueva onda única.

Esto último es muy importante para el estudio del efecto fotoacústico en material con densidad próxima a la del medio, ahí el grosor puede ser mayor pero como si hay un rebote perceptible por los aparatos de medición, requeriríamos un análisis de desfases y no de amplitud.



*Figura 3.10. Corrimiento de fase para la propagación de sonido debido a interacción de luz láser en una estructura tridimensional de una placa.*

### 3.4 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

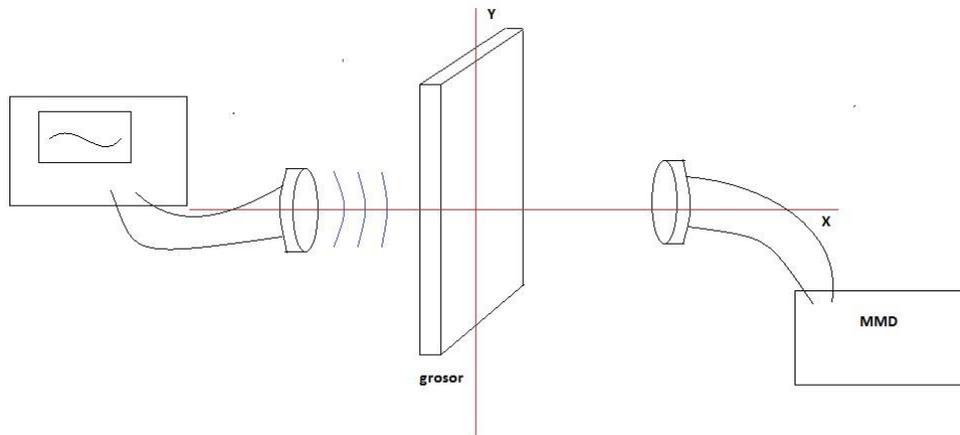


*Figura 3.11. El arreglo experimental después de usarse, la hoja milimétrica tiene la finalidad de poder conocer las distancias del arreglo en todo momento y verificar que todos los componentes guarden el arreglo simétrico necesario.*

Con respecto al sistema real en estudio para el experimento tenemos un sistema sencillo de bocinas/micrófonos, que están colocadas bajo el mismo eje de funcionamiento. En el punto intermedio de ambas se colocó el objeto en estudio, que en este caso fueron una placa de acero y una placa de aluminio, se hicieron pruebas con ambas. Se midió el punto exacto en el que la señal de audio impactaba y para las pruebas de efecto fotoacústico se apuntó el láser hacia el mismo punto cuidando un ángulo de  $45^\circ$  para cuestiones de simetría.

Para el estudio con sonido únicamente tomamos que el aire es solamente un medio “fantasma” que solo cumple como medio para conservar la onda viajera, por esto cuando se debe estudiar como una onda cambia se hará dentro del cuerpo en estudio y se unen en el análisis propiedades de ambos: la velocidad del sonido en la placa, la frecuencia del sonido inducida en el aire. Cuando analizamos el efecto foto-termo-acústico generado por la interacción del láser, vemos que la onda generada es demasiado pequeña para ser detectada por el MMD, por lo que se utilizó la señal de sonido también en superposición de ambas ondas

resultantes. De ahí se despeja la que es exclusiva del láser y se hace el estudio necesario.



*Figura 3.12. Imagen representativa de cómo está dispuesto el sistema y de cómo funcionan las interacciones.*

El medio por el cual se propaga el sonido es, en este caso, aire y su densidad se mantiene lo suficientemente constante. Como explicación a esto, si tomamos mediciones en el laboratorio o en la calle, incluso en una casa o una fábrica, sabemos que el gas contenido en estos se mantiene bajo las propiedades térmicas que rigen el volumen neto. Siempre que no haya variaciones de presión importantes (es decir, siempre que la velocidad del viento sea cero) podemos suponer que la redistribución de las partículas es suficientemente bien comportada para decir que la densidad del fluido es constante.

Cuando se estudia como el sonido se modifica con respecto a su viaje cuando hay un obstáculo, podemos: a) estudiar cómo cambia el sonido cuando hay una reflexión y por ende medir el desfase de la onda, dicho desfase es directamente proporcional al grosor de la placa, pero cuando la densidad de la placa es mucho mayor que la del medio gaseoso, tenemos, b) el sonido debe atravesar el cuerpo a menos que este sea totalmente rígido, la onda que viaja como sonido tiene ciertas características de amplitud y por lo descrito en el marco teórico, esto es el voltaje

medido. En base a ese voltaje podemos hacer un despeje para conocer como medio el grosor del cuerpo que tenemos como obstáculo.

Las consideraciones pertinentes y necesarias para simplificar los cálculos matemáticos en el despeje para las propiedades físicas son:

- No hay gradiente de presión o de temperatura en el medio gaseoso.
- El uso de altas frecuencias pero bajo nivel de energía no genera una pérdida del equilibrio térmico.
- La pequeña variación térmica solo funge como una alteración de amplitud de la onda, válida sólo cuando la placa es muy delgada.
- Se considera a todas las densidades usadas en el sistema como constantes o cuasi constantes, para la resolución de toda la matemática.
- Al hacer los cálculos debemos suponer que el espesor medido es una cantidad promedio. Esto para no tomar importancia a la no homogeneidad y no manejar ED no lineales.

Como las bocinas tienen forma cilíndrica, podemos suponer que la onda de sonido que se propaga por el aire, tiene a su vez forma cilindra, como una varilla de material determinado que sufre una perturbación.

La placa en estudio reacciona ante el estímulo del ultrasonido, la señal se comunica al resto del cuerpo y cuando vuelve a salir tiene la interacción con las estructura de la placa, cambiando la amplitud que tiene éste. Esto es lo que se analiza en los datos, donde dicho cambio de amplitud depende de las propiedades del cuerpo, en este momento, principalmente del espesor. Si interpretamos esto exclusivamente con las ecuaciones matemáticas, vemos que en la señal de salida tenemos una amplitud  $A_0 = 5$  y una señal de respuesta  $A_2$  que obtendremos de las mediciones. Una vez hecho el despeje vemos:

$$d = \left| \frac{c}{\omega} \ln \left( \frac{A_1 - A_2}{A_1} \right) \right| \quad (3.49)$$

A pesar de que el sistema está en equilibrio termodinámico con respecto al gas, la placa puede recibir calor de forma considerable sin posibilidad de bajar su temperatura. Esto se da principalmente cuando el grosor es muy pequeño, menor a 1 mm según las pruebas experimentales. Para este tipo de casos, la onda generada por la temperatura se amplifica en su amplitud y dicho valor debe ser re modulado también para hacer la medición. Hay dos maneras de corregir dicho cambio, reducir la amplitud medida por un factor o aumentar la de funcionamiento con un factor que en principio es térmico, pero no tiene unidades de temperatura, medido en temperatura absoluta.

$$d = \left| \frac{c}{\omega} \ln \left( \frac{A_1 \exp(T_a/T_0) - A_2}{A_1 \exp(T_a/T_0)} \right) \right| \quad (3.50)$$

Donde  $T_a$  es la temperatura medida en el ambiente,  $T_0$  es la temperatura de cambio de fase ( $0^\circ$  C o bien 273.15 K). De las mediciones tenemos a  $A_1$  como la amplitud antes de que el obstáculo este presente,  $A_2$  con la placa en el punto intermedio.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 TRATAMIENTO DE DATOS

Para todas las pruebas se tomaron conjuntos de datos, entre 25 a 60 datos para un cierto tipo de condiciones (temperatura, humedad, con sonido, con láser), el único parámetro que no cambió fue la distancia a la que se midieron las amplitudes. El tamaño de la muestra se guía en base al tiempo en que se pueden conservar las mismas condiciones de temperatura y humedad en el laboratorio.

Las posiciones se mantuvieron fijas y se realizaron tomas de datos por pasos:

- Se midió la amplitud real viajera en el aire, sin consideraciones matemáticas, esto a modo de referencia (ruido blanco).
- Se tomaron datos para la variación del sonido con la placa como obstáculo.
- Se volvió a tomar datos como base para el análisis previo del EFT. Al no poder asegurar que las variaciones térmicas son nulas, cualquier pequeño cambio es medido por el MMD.
- Con el láser apuntando al centro de la placa y haciendo superposición de ondas se miden las vibraciones resultantes del EFT.

<b>Amplitud medida para aluminio</b>			
Temperatura	24° C / 297.15 K	Humedad	60%
Distancia*	5.5 cm (0.055 m)	Longitud de onda del láser	650 nm
Densidad reportada	2700 kg/m <sup>3</sup>	Velocidad de sonido	6400 m/s
Espesor medido	1.65 mm		
<b>Previo 1</b>	<b>Sonido</b>	<b>Previo 2</b>	<b>Láser</b>
2.72E-01	2.69E-01	2.70E-01	8.64E-03
2.72E-01	7.74E-03	2.71E-01	8.17E-03
2.72E-01	8.19E-03	2.71E-01	8.52E-03
2.72E-01	8.95E-03	2.71E-01	8.97E-03

2.71E-01	9.06E-03	2.70E-01	9.15E-03
2.71E-01	9.33E-03	2.70E-01	9.41E-03
2.72E-01	9.49E-03	2.70E-01	9.40E-03
2.72E-01	9.53E-03	2.70E-01	9.31E-03
2.71E-01	9.33E-03	2.70E-01	9.25E-03
2.71E-01	9.39E-03	2.70E-01	9.25E-03
2.71E-01	9.41E-03	2.70E-01	9.12E-03
2.71E-01	9.38E-03	2.70E-01	9.05E-03
2.70E-01	9.55E-03	2.70E-01	9.20E-03
2.70E-01	9.42E-03	2.70E-01	9.28E-03
2.70E-01	9.48E-03	2.70E-01	9.26E-03
2.70E-01	9.62E-03	2.70E-01	9.25E-03
2.71E-01	9.68E-03	2.69E-01	9.24E-03
2.70E-01	9.70E-03	2.69E-01	9.26E-03
2.70E-01	9.63E-03	2.69E-01	9.24E-03
2.70E-01	9.64E-03	2.69E-01	9.21E-03
2.70E-01	9.53E-03	2.69E-01	9.16E-03
2.71E-01	9.43E-03	2.69E-01	9.05E-03
2.71E-01	9.16E-03	2.70E-01	9.13E-03
2.70E-01	9.19E-03	2.70E-01	9.13E-03
2.70E-01	9.28E-03	2.70E-01	9.03E-03
2.70E-01	9.26E-03	2.70E-01	8.89E-03
2.70E-01	9.37E-03	2.70E-01	8.93E-03
2.70E-01	9.35E-03	2.69E-01	8.88E-03
2.70E-01	9.37E-03	2.69E-01	9.04E-03
2.70E-01	9.33E-03	2.69E-01	5.90E-03
2.70E-01	5.98E-03	2.69E-01	8.26E-03
2.70E-01	7.71E-03	2.69E-01	6.00E-03
2.70E-01	7.71E-03		

*Tabla 4.1. Se muestra los datos obtenidos para una de las primeras pruebas. Las condiciones están especificadas dentro de la tabla. \*Los cálculos matemáticos se hicieron siempre en términos de metros.*

Las tablas 4.1 y 4.2 solo tienen fines demostrativos, ya que una gráfica muestra el tipo de comportamiento esperado pero no muestra el tamaño de los muestreos. La mayoría de los programas matemáticos interpolan datos al momento de generar un gráfico. Algunas características de importancia son solo listadas en las tablas pero son retomadas cuando se miden en específico los parámetros de importancia en el sistema.

<b>Amplitud medida para acero</b>			
Temperatura	24.4° C / 297.55 K	Humedad	66%
Distancia*	5.5 cm (0.055 m)	Longitud de onda del laser	809 nm
Densidad reportada	7850 kg/m <sup>3</sup>	Velocidad de sonido	6100 m/s
Espesor medido	0.650 mm		
<b>Previo 1</b>	<b>Sonido</b>	<b>Previo 2</b>	<b>Láser</b>
1.32E-01	5.26E-02	1.33E-01	6.58E-02
1.33E-01	5.24E-02	1.34E-01	2.47E-02
1.33E-01	5.28E-02	1.34E-01	2.37E-02
1.33E-01	5.29E-02	1.34E-01	2.34E-02
1.33E-01	5.30E-02	1.34E-01	2.33E-02
1.33E-01	5.31E-02	1.34E-01	2.31E-02
1.33E-01	5.31E-02	1.34E-01	2.29E-02
1.33E-01	5.31E-02	1.35E-01	2.29E-02
1.33E-01	5.31E-02	1.35E-01	2.30E-02
1.32E-01	5.31E-02	1.35E-01	2.32E-02
1.32E-01	5.31E-02	1.36E-01	2.32E-02
1.32E-01	5.32E-02	1.36E-01	2.31E-02
1.32E-01	5.33E-02	1.36E-01	2.30E-02
1.32E-01	5.33E-02	1.36E-01	2.31E-02
1.32E-01	5.32E-02	1.36E-01	2.32E-02
1.32E-01	5.33E-02	1.36E-01	2.31E-02
1.32E-01	5.34E-02	1.36E-01	2.31E-02
1.32E-01	5.34E-02	1.37E-01	2.31E-02

1.32E-01	5.34E-02	1.37E-01	2.31E-02
1.32E-01	5.34E-02	1.37E-01	2.34E-02
1.32E-01	5.34E-02	1.37E-01	2.33E-02
1.32E-01	5.29E-02	1.37E-01	2.33E-02
1.32E-01	5.30E-02	1.37E-01	2.34E-02
1.32E-01	5.31E-02	1.38E-01	2.33E-02
1.32E-01	5.32E-02	1.38E-01	2.34E-02
1.32E-01	5.34E-02	1.38E-01	2.23E-02
1.32E-01	5.34E-02	1.38E-01	2.26E-02
1.32E-01	5.35E-02	1.38E-01	2.25E-02
1.32E-01	5.36E-02	1.39E-01	2.28E-02
		1.38E-01	2.31E-02
		1.38E-01	2.23E-02
		1.38E-01	2.27E-02
		1.39E-01	2.28E-02

*Tabla 4.2. Se muestra los datos obtenidos para una de las pruebas secundarias, una vez cambiado el material. Las condiciones están especificadas dentro de la tabla.*

También necesitamos una referencia con respecto a los materiales sólidos y con respecto a los gases (en caso de que se quieran hacer pruebas con otros medios para el sonido). Se usan como base de información las ecuaciones de libros de texto para el cálculo de la velocidad del sonido en el aire (cuando se requiera) para las condiciones de temperatura de cada prueba.

<b>Material</b>	<b>MY, Y (Pa) - 10<sup>10</sup> -</b>	<b>MD, μ (Pa) - 10<sup>10</sup> -</b>	<b>MC, B (Pa) - 10<sup>10</sup> -</b>	<b>Velocidad del sonido* (m/s)</b>	<b>Densidad, ρ (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Aluminio	7.1	2.65	7.4	6400	2700
Latón	10.4	3.8	13	-	8530
Cobre	12.8	4.7	15	3570	8900
Hierro	20	7.8	16	4910	7850

Níquel	21	8.0	18	4970	8900
Tungsteno	36	13.4	37	5174	19000
Silicio fundido	7.3	3.1	3.7	8433	2200
Vidrio Pyrex	6.2	2.5	4.0	-	2320
Acrílico	0.40	0.14	0.66	-	1182
Agua	-	-	2.2	1493	1000
Mercurio	-	-	29	1407	13600
Acero	21	-	-	6100	7850
Aire	-	-	0.0000142	343.711	.1.29

*Tabla 4.3. Valores reportados en textos para las características elásticas más importantes en los materiales más comunes. \*Todas las velocidades del sonido corresponden a una temperatura de 20° C (293.15 K)*

De las ecuaciones (3.49) y (3.50) podemos calcular el grosor de la placa bajo las condiciones establecidas en el laboratorio. Pero como la finalidad de la tesis es calcular al menos 3 parámetros (grosor, densidad, MY) debemos probar las expresiones matemáticas que servirán para determinarlos en relación con las condiciones ya conocidas: las del medio y las ondas medidas. Por su relación podemos usar las mismas ecuaciones en sentido inverso, conociendo las propiedades del obstáculo podemos caracterizar el medio gaseoso.

Tomando como base la tercera ley de Newton, la fuerza (segundo a segundo) generada en la placa debido al sonido debe ser igual la que el objeto genera como respuesta. El efecto de la fuerza que ejerce la placa deberá ser el mismo a cada instante, pero por otro lado, el sonido en el aire genera una fuerza promedio. La del cuerpo depende de sus propiedades elásticas, su grosor ( $d$ ) y la distancia ( $r$ ) en la cual se ejerce esa fuerza. También tienen relación con las amplitudes medidas ( $\eta_m$ ) y la original ( $\eta$ ), ya que el efecto generado se redimensiona. Por otro lado, tenemos la fuerza resultante por parte de la placa que se comunica al aire, pero este aire tiene una ligera expansión con respecto a su temperatura cero (0° C). Todo esto en conjunto nos da la ecuación:

$$\frac{\eta_m Y d^2}{\eta} = \eta \exp(T/T_0) BS \langle (\cos \omega t)^2 \rangle \quad (4.1)$$

El factor exponencial solo aparece cuando hay algún calentamiento en la placa que no pueda disiparse por el tamaño de la estructura. Por despeje algebraico, obtenemos la expresión para medir el MY:

$$Y = \frac{BS}{2\eta_m d^2} \eta^2 \exp(T/T_0) \quad (4.2)$$

Solo nos hace falta la expresión para la densidad del material. Si nos basamos en su definición básica donde  $\rho [=] [m/V]$  parece que requerimos una masa, pero por principio el experimento consiste en no tener contacto directo con el sistema durante las pruebas, por lo que podemos hacer uso de una ME para la fuerza generada por el aire, expresada como:

$$m_e = \frac{F}{a} \quad (4.3)$$

Para la fuerza tenemos:

$$F = Y S \eta_0 \exp\left(\frac{T}{T_0}\right) \quad (4.4)$$

Y para la aceleración:

$$a = \frac{1}{\eta_1} \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} \quad (4.5)$$

Denotando que el volumen es aquel donde el sonido incide con el obstáculo y suponiendo que no varía durante el recorrido de éste, entonces simplemente tenemos  $V = Sd$ , donde ya se dijo que  $d$  es el espesor de la placa. Juntando la ecuación (4.3) y la expresión para volumen, también aparece el término de  $\eta_1$  que indica que será la amplitud medida antes del láser, por como se dijo de la superposición de ondas. Tenemos entonces que la densidad viene calculada por:

$$\rho = \frac{Y \eta_0 \eta_1}{a \omega^2} \exp\left(\frac{T}{T_0}\right) \quad (4.6)$$

Los cálculos permiten medir las 3 propiedades juntas, incluso de no conocer ninguna, podríamos medir una sola y en base a eso medir las otras dos. En este caso, se considera que para cada medición se conocen 2 y una no, después se van haciendo cambios con eso. La finalidad es mostrar la eficiencia del método con el error para determinar un solo parámetro. De la tabla siguiente los datos en azul fueron medidos con una temperatura de 24.4° C y una humedad del 66%, la otra prueba se midió a 24° C y una humedad del 60%.

<b>Placa de acero</b>			
Grosor medido	0.635 mm	Densidad reportada	7850
MY reportado	$21 \times 10^{10}$ Pa	Velocidad de sonido	6100 m/s
Valores promedio de amplitud			
Previo 1	Sonido*	Previo 2	Láser
$9.5426 \times 10^{-2}$	$6.3733 \times 10^{-3}$	$2.6976 \times 10^{-1}$	$8.7552 \times 10^{-3}$
$9.5509 \times 10^{-2}$	$5.23 \times 10^{-3}$	$2.6862 \times 10^{-1}$	$8.7568 \times 10^{-3}$
$3.1221 \times 10^{-1}$	$1.9414 \times 10^{-2}$	$2.6716 \times 10^{-1}$	$8.406 \times 10^{-3}$
$1.2267 \times 10^{-1}$	$8.4488 \times 10^{-3}$	$2.01 \times 10^{-2}$	** $1.85 \times 10^{-2}$
<b>MY medido (Pa)</b>	<b>% error relativo</b>	<b>Densidad medida (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>% error relativo</b>
$22.297101 \times 10^{10}$	6.17667	8065.892921	2.750228
$22.966811 \times 10^{10}$	9.36577	8031.806630	2.316008
$23.925264 \times 10^{10}$	13.92983	7988.152257	1.759901
** $1.087881 \times 10^{10}$	Fuera de rango	**Fuera de rango	-
<b>Grosor medido</b>	<b>% error relativo</b>		
0.5524 mm	13.00787		
0.4520 mm	28.81890		
0.5139 mm	19.07087		
**0.5690 mm	10.39370		

*Tabla 4.4. Muestreo de los datos usados en el estudio de las características de las placas. \*La palabra 'sonido' hace referencia a que se hicieron pruebas con ultrasonido únicamente y sin la fuente láser funcionando. \*\*Esta prueba se tomó con un haz de baja potencia, con la finalidad de probar si depende o no de la*

*potencia del láser sino del efecto térmico por la longitud de onda (energía absorbida).*

<b>Placa de aluminio</b>			
Grosor medido	1.600 mm	Densidad reportada	2700
MY reportado	$7.1 \times 10^{10}$ Pa	Velocidad de sonido	6400 m/s
Valores promedio de amplitud			
Previo 1	Sonido	Previo 2	Láser
$1.09208 \times 10^{-1}$	$1.7830 \times 10^{-2}$	$1.37351 \times 10^{-1}$	$1.546 \times 10^{-3}$
<b>MY medido (Pa)</b>	<b>% error relativo</b>	<b>Densidad medida (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>% error relativo</b>
$6.903906 \times 10^{10}$	2.76189	2867.929705	6.219619
<b>Grosor medido</b>	<b>% error relativo</b>		
1.441277	9.920162		

*Tabla 4.5. Muestreo de los datos promedio usados en el estudio de las características de la placa de aluminio.*

Hay que recordar que solo el grosor de la placa es medido con el efecto generado en el sonido cuando pasa por el cuerpo. Las otras dos propiedades se calculan con lo medido en base al EFT. Para placas muy gruesas (mayor a 1 mm), donde el estudio matemático requiere mejorarse usando el análisis de un cuerpo en 3D, se puede hacer una corrección. El efecto surgido en este caso viene de suponer una especie de imagen espejo con respecto al punto medio, por lo que el efecto vendría a ser como recorrer el camino del cuerpo dos veces.

## 5. CONCLUSIONES

Se prueba la validez del modelo como primera aproximación para medir propiedades elásticas y mecánicas de los cuerpos en placas delgadas, todo esto sin entrar en contacto con el objeto en estudio. Para objetos muy delgados su validez se rige por un error porcentual de entre 6% y 10% que puede ser mejorado con el uso de termodinámica de cambios de fase y para transferencia de energía.

La onda de sonido decreciente en el aire y por obstáculos se acopla a lo esperado, pero queda por calcular el reflejo de la onda cuando impacta con un cuerpo rígido. Para densidades promedio como el caso del aluminio y del acero es válido poder tener una transferencia de la onda y una reflexión. Para densidades más bajas lo esperado es una reverberación y/o una resonancia, ya sean constructivas o destructivas.

En este tipo de pruebas, el aire solo funciona como medio para propagar la onda de sonido en algunos casos para generar una pequeña amplificación de la onda debido a la diferencia térmica, la mayoría de sus propiedades elásticas quedan fuera de las ecuaciones al comportarse de forma casi homogénea y cuasi ideal. Para sistemas no controlados (pruebas fuera del laboratorio) surgen términos que vienen del gradiente de temperatura y la convección del aire.

Dentro de las pruebas ya mostradas, queda aclarado en los cálculos que la potencia del láser juega un papel importante. A mayor potencia, mayor será la energía transmitida y de igual magnitud será la fuerza transmitida al medio gaseoso como respuesta del cuerpo en su enfriamiento. El ciclo calentamiento-enfriamiento ocurre casi instantáneamente y para una densidad mayor, el calor emitido al gas debería ser menor.

El modelo prueba ajustarse a los datos medidos contra los reportados. Al crear la teoría a partir de modelos matemáticos conocidos y sin recurrir a mínimos

cuadrados o cualquier tipo de liberalización, podemos corroborar que el sistema es aplicable para múltiples cuerpos sólidos en medios gaseosos.

Todos los parámetros están relacionados. Esto es importante para la industria y la aplicación. A través de conocer unos pocos parámetros podemos determinar los demás, ya sea directamente con el uso de las ecuaciones o estudiando la disposición geométrica del sistema para encontrar variaciones pertinentes entre el modelo y la naturaleza.

Para futuros trabajos, se pretende mejorar la fiabilidad de los cálculos, hacer uso de otro tipo de características listadas en el modelo matemático como la intensidad de sonido, la potencia o incluso poder usar la impedancia sónica. Se pretende también aplicar el sistema de medición para cuerpos más delgados como algunos tipos de papel o incluso películas delgadas de nanoestructuras. Otra forma de darle aplicación al sistema sería hacer el estudio en sentido inverso, a través de obstáculos conocidos como metales puros, podemos medir como se propaga el sonido en ciertos medios gaseosos.

Se debe trabajar también en un sistema de recepción de sonido con mayor sensibilidad. Por un lado podemos hacer uso de láseres de mayor potencia cuando analizamos objetos sólidos, pero al trabajar con tejido biológico debemos usar fuentes de luz que sean poco dañinas por lo que la potencia y la longitud de onda toman peso.

Todo este trabajo fue solo un primer paso en un modelo generalizado o una teoría generalizada que permita analizar características mecánicas, elásticas y térmicas en fluidos y cuerpos sólidos para múltiples características. Incluso hacer uso de funciones multivariadas.

# BIBLIOGRAFÍA

## Libros

Eugene Butkov (1973)

Mathematical Physics

Addison-Wesley Publishing Company, St. John's University, Nueva York, Estados Unidos / Páginas 154-156, 291-294, 503-543

F. Alton Everest (2000)

The Master Handbook of Acoustics

McGraw Hill, 4ta edición, Nueva York, Estados Unidos / Páginas 50-64, 110-115

John H. Mauldin (1992)

Luz, laser y óptica

McGraw Hill, 1era edición, España / Páginas 12, 245, 246

Julio Gratton (Octubre, 2002)

Introducción a la Mecánica de Fluidos.

Buenos Aires, Argentina / Páginas 51, 52, 57-59

L. M. Mile-Thomson (2011)

Theoretical Hydrodynamics

Dover Publications, INC., 5ta edición, Nueva York, Estados Unidos / Páginas 72-76

R. W. Ditchburn (Abril, 1991)

Light

Dover Publications, INC., 1era edición, Nueva York, Estados Unidos / Páginas 463, 464, 555-559

Robert H. Randall (2005)

An Introduction to Acoustics.

Dover Publications, INC., Mineola, New York, Estados Unidos / Páginas 240-246, 252-254

William C. Elmore, Mark A. Heald (1985)

Physics of Waves

Dover Publications, INC., Nueva York, Estados Unidos / Páginas 2, 70-92, 94-96, 104-106, 129-147, 152

## **Artículos**

E. Marín (3 de marzo de 2008). Escuchando la luz: breve historia y aplicaciones del efecto fotoacústico. *Latin-American Journal of Physics Education*, 2, 209-215.

Nestor Antonio Flores Martínez, Valentín Guzmán Ramos, Romeo de Jesús Selvas Aguilar (201X). Calculo de modos de vibración en gases por aproximación de velocidad dinámica. *Revista Mexicana de Física* (en revisión).

Nestor Antonio Flores Martínez, Valentín Guzmán Ramos, Romeo de Jesús Selvas Aguilar (201X). Photoacoustic model for measuring of plate width, density and Young modulus: A Primer. *SPIE: Optical Engineering* (en revisión)

Pedro Alejandro Lornelí Mejía, Norma Pilar Castellanos Abrego, María Magdalena Méndez González, Alfredo Cruz Orea, José Luis Jiménez Pérez. (Septiembre-Diciembre 2012). Aplicaciones biofísicas de la acústica. *Investigación en discapacidad*, 1, 90-94.

## **Tesis**

Nestor Antonio Flores Martínez (Junio, 2014)

Estudio multidisciplinario para control de señales neuronales por medio de física acústica, aplicado a los estudiantes de nivel superior en Ciudad Universitaria de la UANL.

## **Archivos electrónicos**

Appendix C. Physical properties of water.

<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781118131473.app3/pdf>

eFunda. Gas Acoustic Properties.

[http://www.efunda.com/materials/common\\_matl/Common\\_Matl.cfm?MatlPhase=Gas&MatlProp=Acoustic#Acoustic&search\\_string=air](http://www.efunda.com/materials/common_matl/Common_Matl.cfm?MatlPhase=Gas&MatlProp=Acoustic#Acoustic&search_string=air)

eFunda. Gas Physical Properties.

[http://www.efunda.com/materials/common\\_matl/Common\\_Matl.cfm?MatlPhase=Gas&MatlProp=Physical#Physical&search\\_string=air](http://www.efunda.com/materials/common_matl/Common_Matl.cfm?MatlPhase=Gas&MatlProp=Physical#Physical&search_string=air)

Hyperphysics: Simple Harmonic Motion (imagen)

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/imgmec/shm.gif>

Keysight Technologies. DSOX2002A Oscilloscope: 70 MHz, 2 analog channels. Especificaciones y ficha técnica.

<http://www.keysight.com/en/pdx-x201827-pn-DSOX2002A/oscilloscope-70-mhz-2-analog-channels?pm=spc&nid=-32542.1150180&cc=US&lc=eng>

Keysight Technologies. U1232A True RMS 6000 Count Handheld Digital Multimeter. Ficha técnica y especificaciones.

<http://www.keysight.com/en/pd-2000224-pn-U1232A/true-rms-6000-count-handheld-digital-multimeter?cc=MX&lc=eng>

Laser Diode Technologies. High-Power (65A) Laser Diode Controller: Manual  
<https://www.thorlabs.com/catalogpages/425.pdf>

Lección 7. Dinámica de Fluidos. Universidad de Granada, España  
<http://www.ugr.es/~jtorres/t7.pdf>

Micrófono de cristal.  
<http://www.mediacollege.com/audio/images/mic-condenser.gif>

Micrófono de diafragma.  
[http://electriciantraining.tpub.com/14184/img/14184\\_51\\_1.jpg](http://electriciantraining.tpub.com/14184/img/14184_51_1.jpg)

National Aeronautics and Space Administration. Speed of Sound  
<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/sound.html>

Tema 6. Elasticidad. Universidad de Almeria  
<http://www.ual.es/personal/mnavarro/Tema%206%20%20Elasticidad.pdf>

The Engineering Toolbox. Air Density and Specific Weight.  
[http://www.engineeringtoolbox.com/air-density-specific-weight-d\\_600.html](http://www.engineeringtoolbox.com/air-density-specific-weight-d_600.html)

The Engineering Toolbox. Metals and Alloys – Densities.  
[http://www.engineeringtoolbox.com/metal-alloys-densities-d\\_50.html](http://www.engineeringtoolbox.com/metal-alloys-densities-d_50.html)

The Engineering Toolbox. Metals and Alloys – Bulk Modulus.  
[http://www.engineeringtoolbox.com/bulk-modulus-metals-d\\_1351.html](http://www.engineeringtoolbox.com/bulk-modulus-metals-d_1351.html)

The Engineering Toolbox. Modulus of Elasticity of Young's modulus – and Tensile Modulus for common Materials.  
[http://www.engineeringtoolbox.com/young-modulus-d\\_417.html](http://www.engineeringtoolbox.com/young-modulus-d_417.html)

The Engineering Toolbox. Speed of Sound in common Liquids.  
[http://www.engineeringtoolbox.com/sound-speed-liquids-d\\_715.html](http://www.engineeringtoolbox.com/sound-speed-liquids-d_715.html)

The Engineering Toolbox. The Speed of Sound in Air.  
[http://www.engineeringtoolbox.com/air-speed-sound-d\\_603.html](http://www.engineeringtoolbox.com/air-speed-sound-d_603.html)

ThorLabs. LDC3065-488 – High Power Laser Diode Driver: Especificaciones  
<https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=LDC3065-488>

Wikipedia: Constante elástica, Anexo: Constantes elastoplásticas de diferentes materiales.  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Constante\\_elástoplásticas\\_de\\_diferentes\\_materiales](https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Constante_elástoplásticas_de_diferentes_materiales)