Obtención de energía eléctrica a partir del sonido por medio de un resonador de membrana.

Oscar Julián Garzón Pérez

Rafael Felipe Camacho Bermúdez

Asesores:

Ing. Fernando Segura.

Ing. Juan Carlos Franco.

Pontificia Universidad Javeriana

Facultad de artes

Carrera de Estudios Musicales con énfasis en Ingeniería de Sonido

Bogotá D.C.

Noviembre 2018

Tabla de Contenido

Pág

Resumen……....6
Introducción……..7
1. Justificación……..8
2. Objetivos…….....8
2.1 Objetivo general.....8
2.2 Objetivos específicos.....8
3. Marco conceptual…….....9
3.1 Estado del arte de Energy Harvesting.....9
3.1.1 Energy Harvesting en otras áreas.....10
3.1.2 Energy Harvesting en aplicaciones del sonido.....10
3.2 Sonido.....11
3.2.1 Ondas sonoras.....11
3.2.2 Interferencia y la serie armónica.....15
3.2.3 Modos normales y resonancia.....16
3.3 Acondicionamiento acústico.....19
3.3.1 Resonador de Helmholtz de cavidad simple.....20
3.3.2 Resonador de Helmholtz de múltiple cavidad.....21
3.3.3 Resonador de membrana o diafragmático.....22
3.4 Piezoelectricidad.....22
3.5 Circuitos.....25
3.5.1 Ley de Ohm.....27
3.5.2 Leyes de Kirchhoff.....27
3.6 Fuentes conmutadas.....28
3.6.1 Convertidor tipo reductor (Buck).....30
3.6.2 Convertidor tipo elevador (Boost).....31
4. Metodología.....32
4.1 Materiales.....33
4.1.1 Materiales Mecánicos.....33
4.1.2 Materiales electrónicos.....34

5. Desarrollo, resultados y análisis de resultados.....37
5.1 Fase 1: Estudio acústico y desarrollo del recolector acústico.....38
5.2 Fase 2 : Estudio del dispositivo de transducción acústico-eléctrica.....52
5.3 Fase 3: Montaje y análisis del sistema completo.....58
5.4 Comparación energética fuente - receptor…….84
6. Conclusiones y recomendaciones.....82
Referencias Bibliográficas.....84

Lista de figuras

Pág

Figura 1 Proyecto de Harvesting con bicicleta……10
Figura 2 Nano estructuras que generan pulsos por acción del sonido……10
Figura 3 Esferas de intensidades…….13
Figura 4 Nodos y antinodos en cuerda……16
Figura 5 Modo axial……17
Figura 6 Modo tangencial……...18
Figura 7 Oblicuo …….18
Figura 8 Primeros modos propios de un recinto cúbico……..18
Figura 9 A la izquierda gráfica de ruido rosa y a la derecha gráfica de ruido blanco…….19
Figura 10 Esquema básico de resonador de Helmholtz de cavidad simple,a la derecha curva de absorción……..20
Figura 11 A la izquierda esquema básico de Helmholtz de múltiple cavidad,a la derecha curva de absorción……...21
Figura 12 A la izquierda esquema básico de resonador de membrana,a la derecha curva de absorción…….....22
Figura 13 Publicaciones sobre piezoelectricidad en los últimos años……....23
Figura 14 A la izquierda estructura cúbica PZT antes de polarización (1) y después de polarización (2), a la derecha alineamientos de los dipolos antes y después de polarización.24
Figura 15 A la izquierda dipolo generando tensión eléctrica, a la derecha varios dipolos organizados según su carga……..24
Figura 16 Tracción y compresión de un piezoeléctrico que genera un voltaje AC…….25
Figura 17 Microchips con encapsulado de silicio……...26

Figura 18 A la izquierda esquema básico de un circuito para la ley de Ohm, a la derecha relaciones de la ley de Ohm…….27
Figura 19 Primer ley y segunda ley de Kirchoff…….28
Figura 20 Esquema de transformador reductor de tensión…….....29
Figura 21 Esquema de una fuente de alimentación para un dispositivo de audio …….....29
Figura 22 Fuente conmutada tipo Buck……..30
Figura 23 Fuente conmutada tipo Boost…….31
Figura 24 Esquema de funcionamiento de una fuente conmutada real……...31
Figura 25 Laminas de MDF……33
Figura 26 Resorte de tipo común……33
Figura 27 PVC común……34
Figura 28 Circuito integrado BQ 25504…….....34
Figura 29 Sensores piezoeléctricos…….37
Figura 30.a: Microfono de medicion ubicado en la posición 1……..39
Figura 30 b: Medición de posición 1 con musica en sistema de audio 2.1 ……40
Figura 30 c : Medición de posición 1 con ruido blanco en el sistema de audio 2……...40
Figura 31 a: Microfono de medicion ubicado en la posición 2……..41
Figura 31 b: Medición de posición 2 con musica en sistema de audio 2.1…….41
Figura 31 c: Medición de posición 2 con ruido blanco en sistema de audio 2.1……....42
Figura 32 a: Microfono de medicion ubicado en la posición 3……..42
Figura 32 b: Medición de posición 3 con música en sistema de audio 2.1…….43
Figura 32 c: Medición de posición 3 con ruido blanco en sistema de audio 2.1……...43
Figura 33 a: Microfono de medicion ubicado en la posición 4……..44
Figura 33 b: Medición de posición 4 con música en sistema de audio 2.1 ……...44
Figura 33 c : Medición de posición 4 con ruido blanco en sistema de audio 2.1……....45
Figura 34 a: Microfono de medicion ubicado en la posición 5……..45
Figura 34 b: Medición de posición 5 con música en sistema de audio 2.1…….46
Figura 34c: Medición de posición 5 con ruido blanco en sistema de audio 2.1……....46
Figura 35: A la izquierda esquema del panel para diseño……..50
Figura 36: Trabajo de obtención de modos normales del panel…….51
Figura 37: Modos normales para 60 hz, 80 hz y 100 hz respectivamente……..51
Figura 38 : Simulación de modos normales para una placa rectangular…….52

Figura 39: Primer montaje……..53
Figura 40: Segundo Montaje a 50 cm del parlante……..……...55
Figura 41: A la izquierda esquema de construcción del tercer montaje, derecha sistema final…….....57
Figura 42: Sistema de transducción acústico-eléctrica con dos piezoeléctricos…….57
Figura 43: A la izquierda ubicación de los cuatro sistemas de transducción al interior del panel, a la derecha numeración de los mismos……58
Figura 44: Comparación de fase micrófono 1 y 2……...60
Figura 45: Comparación de fase microfono 3 y 4……...60
Figura 46: Comparación de fase micrófono 2 y 3……..61
Figura 47: Comparación de fase micrófono 1 y 4……...61
Figura 48: Adición de micrófonos para medición de fases…….62
Figura 49: Comparación de fase micrófono 1 y 7……...62
Figura 50: Comparación de fase micrófono 4 y 6……...63
Figura 51: Comparación de fase micrófono 1 y 5……...63
Figura 52: Gráfica de Potencia contra Corriente Piezo 1 Pared Amarilla……..73
Figura 53: Gráfica de Potencia contra Corriente Piezo 2 Pared Amarilla……..73
Figura 54: Gráfica de Potencia contra Corriente Piezo 3 Pared Amarilla……..73
Figura 55: Gráfica de Potencia contra Corriente Piezo 4 Pared Amarilla……..73
Figura 56: Gráfica de Potencia contra Corriente Piezo 1 Pared Blanca…….74
Figura 57: Gráfica de Potencia contra Corriente Piezo 2 Pared Blanca…….74
Figura 58: Gráfica de Potencia contra Corriente Piezo 3 Pared Blanca…….74
Figura 59: Gráfica de Potencia contra Corriente Piezo 4 Pared Blanca…….74
Figura 60: Gráfica de Potencia contra Corriente todos los Piezo Pared Amarilla……..74
Figura 61: Gráfica de Potencia contra Corriente todos los Piezo Pared Blanca…….74
Figura 62: Gráfica de Potencia contra Corriente Piezo 1 en estudio Foley……78
Figura 63: Gráfica de Potencia contra Corriente Piezo 2 en estudio Foley……78
Figura 64: Gráfica de Potencia contra Corriente Piezo 3 en estudio Foley……79
Figura 65: Gráfica de Potencia contra Corriente Piezo 4 en estudio Foley……79
Figura 66: Gráfica de Potencia contra Corriente todos los Piezo en estudio Foley……....79
Figura 67: Panel de recolección acústica finalizado…….....80
Figura 68: Circuito de rectificación……81

Figura 69: Circuito con CI BQ 25504……..…...81

Lista de tablas

Pág

Tabla 1: Nivel de intensidades y decibeles equivalentes……...….14
Tabla 2: Presiones sonoras y sus respectivos niveles de presión sonora……....15
Tabla 3: Serie armónica……...…...16
Tabla 4: Frecuencia contra voltaje para el primer montaje……...….54
Tabla 5: Frecuencia contra voltaje para el segundo montaje……...…..55
Tabla 6: Voltaje y Corriente micrófono 1……...…....65
Tabla 7: Voltaje y Corriente micrófono 2……...…....65
Tabla 8: Voltaje y Corriente micrófono 3……...66
Tabla 9: Voltaje y Corriente micrófono 4……...…....66
Tabla 10: Voltaje y Corriente para todos los micrófonos…….....66
Tabla 11: Medición de potencia para micrófonos 1 y 2 en pared amarilla……...…..68
Tabla 12: Medición de potencia para micrófonos 3 y 4 en pared amarilla……...…..69
Tabla 13: Medición de potencia para micrófonos 1 y 2 en pared blanca……...70
Tabla 14: Medición de potencia para micrófonos 3 y 4 en pared blanca……....71
Tabla 15: Medición de potencia para todos los micrófonos conectados en paralelo, pared amarilla y pared blanca……...73
Tabla 16: Medición de potencia para micrófonos 1 y 2 en estudio Foley…….....76
Tabla 17: Medición de potencia para micrófonos 3 y 4 en estudio Foley……..77
Tabla 18: Medición de potencia para todos los micrófonos en estudio Foley……..…78

Lista de diagramas:

Diagrama 1: Estructura del proyecto……..32
Diagrama 2: Diagrama de trabajo del CI BQ 25504……..36

Resumen

El trabajo consignado en este documento presenta la investigación desarrollada como proyecto de grado de la carrera de Estudios Musicales con énfasis en Ingeniería de Sonido de la Pontificia Universidad Javeriana. Esta investigación involucra los conceptos de Harvesting Energy, teoría piezoeléctrica, teoría de circuitos y fenómenos sonoros para desarrollar un prototipo de cosecha de energía que aprovecha la energía sonora residual presente en distintos espacios propios de la Ingeniería de Sonido.

Por medio de mediciones, desarrollo tecnológico y aplicación de conceptos este trabajo logra finalizar con la fabricación de un resonador de membrana sintonizado a una frecuencia de 80Hz, cuyo interior está provisto de 4 sistemas de transducción acústico-eléctrica, basados principalmente en discos piezoeléctricos PZT encontrados comercialmente con facilidad.

Dicho sistema finalmente alimenta una etapa de optimización lograda con un Circuito Integrado de Texas Instruments de referencia BQ 25504, el cual encuentra el punto óptimo de potencia para entregar la energía necesaria que alimente un dispositivo de almacenamiento al final del proceso, dicho dispositivo es responsable de acumular la energía proveniente de los sistemas de transducción y entregarla a cualquier aplicación requerida, para el caso de este proyecto, un LED de alta luminosidad.

Abstract

The work consigned in this document presents the investigation developed as a grade project in the career of Estudios Musicales con énfasis en Ingeniería de Sonido in the Pontificia Universidad Javeriana. This investigation involves the concepts of Harvesting Energy, the Piezoelectric Theory, Circuits Theory and sound phenomena in order to develop a prototype energy harvester which takes advantage of the residual sound energy presented in several places concerning to the Audio Engineering.

By means of measurements, technological development and the application of concepts, this work finishes with the manufacture of a membrane resonator syntonized in a frequency of 80Hz, which is provided of 4 systems of acoustic-electric transduction inside, based mainly in piezoelectric discs PZT found commercially in an easy way.

Said system finally feed an optimization stage achieved with an Integrated Circuit of Texas Instruments with reference BQ25504, which finds the optimal point of power in order to deliver the necessary energy to feed a capacitor at the end of the proces, this capacitor is responsible of accumulate the energy from the transduction systems to later deliver it to any required appliance, in this case, a high luminosity LED.

Introducción

En la actualidad distintos sistemas de audio profesional, como los sistemas de monitoreo en estudios de Mezcla y Mastering, o los sistemas PA (Public Address) encontrados en conciertos usan una gran cantidad de energía eléctrica para desarrollar grandes niveles de potencia acústica, por desgracia gran porcentaje de esta energía acústica es desaprovechada pues se disipa en el medio ambiente después de cumplir su función. De este modo, el propósito de este proyecto plantea la siguiente pregunta orientadora:

¿Se puede obtener energía eléctrica a partir del sonido para así aprovechar dicha energía acústica residual?

El desarrollo de este proyecto muestra que es posible, mediante el fenómeno físico de resonancia y la transducción acústico-eléctrica. Sin embargo es necesario entender que con los recursos actuales el porcentaje de obtención energética en base al sonido es muy bajo.

Ahora bien, basados en el concepto de Energy Harvesting o Cosecha de Energía, “proceso mediante el cual se aprovecha la energía residual presente en el ambiente para producir energía eléctrica que puede ser almacenada o utilizada para alimentar pequeños dispositivos eléctricos o electrónicos de bajo consumo” (Beeby et al,2011), este proyecto busca aplicar de forma práctica conceptos propios de la Física, las Matemáticas, la Acústica y la Electrónica

para desarrollar un sistema de transducción acústico-eléctrica, sistema basado en un panel transductor llamado Panel EcoSound, el cual aprovecha la resonancia por modos normales dentro de una placa y la teoría piezoeléctrica para generar niveles de corriente y potencia moderados, que sin embargo, comienzan a ser representativos teniendo en cuenta el factor tiempo.

1. Justificación

Con este proyecto se quiere cumplir con una responsabilidad social pues beneficiaría a una gran población de llegar a masificarse, debido a que el sonido está presente en cualquier espacio, su uso como fuente energética ayudaría en un pequeño porcentaje a combatir el problema energético mundial. Además este proyecto busca ampliar el abanico de posibilidades que tiene la carrera de Estudios Musicales con énfasis en Ingeniería de Sonido pues logra enmarcar la integralidad que caracteriza la carrera (arte y ciencia).

De igual forma, los aportes de este trabajo fortalecerán el desarrollo de tecnologías cada vez más responsables con el medio ambiente, las cuales lograran generar un avance y desarrollo a la realidad del país.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general:

Determinar la viabilidad de obtener energía eléctrica a partir del sonido mediante un sistema transductor acústico-eléctrico.

2.2 Objetivos específicos:

1) Diseñar un prototipo basado en un sistema de transducción acústico-eléctrica con el que se pueda obtener energía eléctrica.

2) Realizar mediciones con el panel Ecosound en un espacio de mezcla profesional.

3) Analizar la viabilidad del uso del panel Ecosound en el estudio foley del centro ático de la universidad Javeriana con base a los resultados obtenidos en la experimentación.

3. Marco Conceptual

3.1 Estado del arte de Energy Harvesting

La humanidad, con el paso del tiempo ha transformado su realidad a través de tecnologías que requieren el uso de energía, sin embargo, no todas las formas de obtención energética han sido beneficiosas para el medio ambiente lo que ha generado una crisis energética global, para enfrentar esto la Organización de las Naciones Unidas ONU ha estado tomando ciertas medidas para que los países más contaminantes empiecen a usar formas de obtención energética sostenibles. Una de estas medidas es el programa creado en el 2011 llamado *Iniciativa Energía Sostenible para Todos* el cual busca que los sectores más representativos de la sociedad logren procesos energéticos mucho más eficientes y menos contaminantes. En este programa Colombia está inscrito y ha tomado medidas para que en el año 2030 el 30% de la producción energética del país sea por medio de energías renovables según la revista Dinero[1].

Todas estas nuevas formas de obtención energética, como la energía eólica, la energía hidráulica o la energía solar, están basadas en la obtención y transducción energética a gran escala, pero ¿qué pasaría si podemos obtener energía de cosas tan simples como caminar sobre el piso o hablarle a nuestro celular? Pues bien, el concepto de "Harvesting Energy" o "Cosecha de energía" está buscando desarrollar estas ideas y hacerlas realidad, ya que busca la obtención de pequeñas cantidades de energía que en un tiempo determinado de almacenamiento pueden ser usadas en cualquier circuito que lo requiera, para que de este modo el aprovechamiento de energía residual pueda empezar a crear un impacto a gran escala en el problema energético en el que actualmente está la humanidad.

[1] Revista Dinero en su artículo: *Colombia da sus primeros pasos para implementar energías renovables.* https://www.dinero.com/pais/articulo/colombia-avanza-en-generacion-de-energias-renovables/257078

3.1.1 Energy Harvesting en otras áreas:

Existen varias formas de realizar Cosecha de Energía por medio de actividades cotidianas y simples, un ejemplo es el estudio realizado en el año 2008 por la universidad de Cergy-Pontoise Francia donde se tomaron las vibraciones generadas por el desplazamiento de una bicicleta para lograr valores interesantes de energía eléctrica. Esto por medio de un transductor piezoeléctrico que alcanzó valores de 3.5 mW, suficientes para finalmente encender un LED (Minazara, et al,2008) (ver Fig.1).

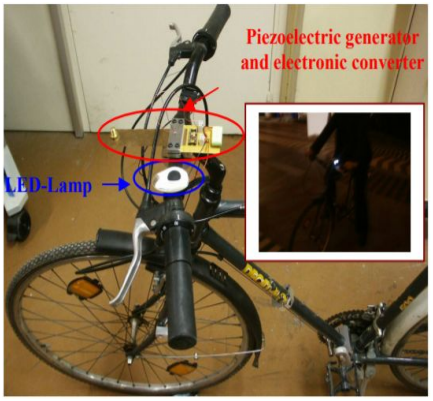

Fig.1 Proyecto de Harvesting con bicicleta.

Otro ejemplo de Energy Harvesting es el proyecto *Power Bumps,* desarrollado por Kamyar Shirvanimoghaddam de la universidad de Deakin en Australia y la investigadora Minoo Naebe de la universidad de Isfahan en Irán en el año 2018, en el que se buscó obtener energía por medio del paso de vehículos en una calle determinada. Lo interesante de este proyecto es que arrojó resultados bastante alentadores para los investigadores, pues el paso de un solo carro sobre un reductor de velocidad conectado a un dispositivo hecho a base de bobinas móviles e imanes, produjo una potencia de 85 mW (Shirvanimoghaddam, et al,2018).

3.1.2 Energy Harvesting en aplicaciones del sonido:

Ahora bien, una idea novedosa ha empezado a tomar fuerza en el mundo, y se trata de la cosecha de energía en base al sonido.Ya desde muchos años atrás se conocía la posibilidad de convertir ondas sonoras en impulsos eléctricos, pero solo hasta ahora se ha empezado a pensar en el aprovechamiento energético de dicha transducción. Existen varios ejemplos al respecto, uno de ellos es el estudio realizado por la universidad de *Queen Mary University of London,2012* donde científicos encontraron la forma de obtener energía por medio de

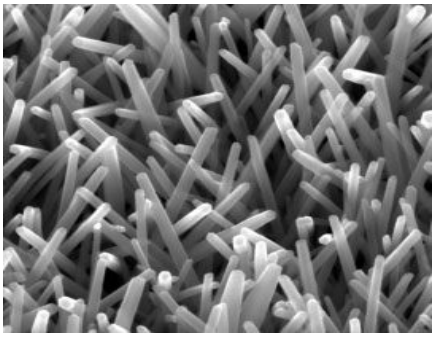
Fig.2 Nano estructuras que generan pulsos por acción del sonido.

vibraciones que alimenta pequeños circuitos mediante el uso de materiales piezoeléctricos, los cuales pueden generar impulsos eléctricos mediante los movimientos causados por las oscilaciones de las vibraciones (Queen mary university of london,2012)(ver Fig.2).
Otro ejemplo por mencionar es el del proyecto del estudiante de postgrado Jesus Torrres de la universidad UNAM quien fue el creador e inventor de un cosechador de energía que funciona en base al ruido del tráfico; dicho cosechador tiene forma esférica como un fulereno (estructura atómica de pentágonos y hexágonos) y transduce energía por medio de micrófonos piezoeléctricos (Boletín unam,2015).

Un último ejemplo muy interesante es el estudio realizado en el año 2015 por Xiaowan Wang, un alumno del Instituto Europeo di Design en Madrid quien está trabajando en la obtención de energía eléctrica para celulares Android por medio del sonido. Este proyecto consta de un nanogenerador y una película de politetrafluoroetileno el cual toma las vibraciones del sonido para luego ser transducidas por medio del nanogenerador, dispositivo que sería capaz de dar una carga básica a un celular android o similares (Gutiérrez M ,2015).

3.2 Sonido:

3.2.1 Ondas sonoras:

El sonido es un fenómeno físico producido por ondas mecánicas longitudinales que viajan a través del aire, cuando una fuente crea fluctuaciones de presión en el aire (compresión - rarefacción) aparece una onda mecánica que percibimos como sonido. Esta onda mecánica tiene propiedades como la amplitud, el periodo, la frecuencia, etc.

La ecuación que describe el comportamiento de una onda sonora es la siguiente:

$$y(x,t) = A\cos(kx - \omega t) \quad (1)$$

Esta onda que describe un movimiento sinusoidal con amplitud A, en la cual se tiene un número de onda k (magnitud de frecuencia que indica el número de veces que vibra una onda en una unidad de distancia) ($\frac{2\pi}{\lambda}$) y una velocidad angular ω (vk).

Sin embargo otra forma de describir las ondas sonoras es de acuerdo a la compresión y rarefacción de un medio material; En la siguiente ecuación veremos como la presión máxima Pmax, es proporcional a la amplitud A, al número de onda k y al módulo de volumen B que describe que tanto un fluido se deforma respecto a su estado de reposo:

$$Pmax = BkA \qquad (2)$$

Debido a que el sonido es una onda mecánica, solamente puede propagarse en un medio material, a diferencia de la luz que puede viajar en el vacío por ser una onda electromagnética, esta característica hace que el viaje de las ondas sonoras sea dependiente de las propiedades del medio, como la temperatura, la densidad y el estado entre otros. Esto explica porqué el sonido viaja más rápido en un medio sólido que en un medio líquido y aún más que en un medio gaseoso. De este modo, la ecuación (2) describe la rapidez del sonido en un medio gaseoso que es el medio pertinente para este proyecto y tiene en cuenta la temperatura T, la cantidad γ o *razón de capacidades calórica*s, que describe las propiedades térmicas de un gas, la constante para todos los gases R y la masa molar M del gas, manifestando qué tan fácil o difícil es comprimir o enrarecer dicho gas.

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \qquad (3)$$

Además, las ondas sonoras al desplazarse en un medio transportan una energía determinada. Esta energía puede saberse si se tiene en cuenta una fuente puntual que irradia ondas sonoras en todas las direcciones, lo que crea una esfera de incidencia con un radio determinado (ver Fig.3).

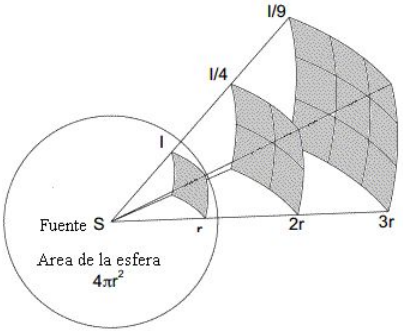

Fig.3 *Esfera de intensidades.*

Como se ve en la figura 3, a medida que la esfera de incidencia aumenta, la intensidad va disminuyendo, esto explica porque a mayor distancia una fuente sonora tiene menor energía. La siguiente ecuación describe esta intensidad en función de la potencia P y el radio de dicha esfera:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} \qquad (4)$$

Ahora bien, generalmente el sonido se mide en decibeles (dB SPL). La relación que involucra decibeles e intensidad es la siguiente:

$$\beta = (10\ dB)\ log\ \frac{I}{Io} \qquad (5)$$

La intensidad de referencia Ió tiene una magnitud de 10^{-12} W/m^2, que es la mínima intensidad perceptible por un oído humano sano, esto es 0 dB SPL, 120 dB SPL equivalente a 1 W/m^2, la siguiente tabla muestra los valores de intensidades y su equivalencia en decibeles:

Fuente o descripción del sonido	Nivel de intensidad del sonido, β (dB)	Intensidad, I (W/m^2)
Avión militar a reacción a 30 m	140	10^{2}
Umbral del dolor	120	1
Remachador	95	3.2×10^{-3}
Tren elevado	90	10^{-3}
Tráfico urbano intenso	70	10^{-5}
Conversación ordinaria	65	3.2×10^{-6}
Automóvil silencioso	50	10^{-7}
Radio con volumen bajo en el hogar	40	10^{-8}
Murmullo normal	20	10^{-10}
Susurro de hojas	10	10^{-11}
Umbral del oído a 1000 Hz	0	10^{-12}

Tabla 1: *Nivel de intensidades y decibeles equivalentes.*

Dichos decibeles mostrados en la tabla son dB SIL (nivel de intensidad sonora), sin embargo en la mayoría de mediciones de audio suelen emplearse los dB SPL (nivel de presión sonora), los cuales están más relacionados con la variación de presión en un recinto como ya se expresó anteriormente. Para hallar el nivel de presión sonora se debe usar la siguiente ecuación que es parecida a la fórmula de intensidad sonora:

$$L_P = 20 \times \log \frac{P_1}{P_0}. \quad (6)$$

Donde P1 es la presión sonora medida en Pa (N/m^2) y P2 es la presión de referencia de 20 Pa que es la mínima presión audible. La siguiente tabla ilustra los niveles de presión sonora en dB SPL con sus respectivas presiones sonoras en Pa:

Source	Sound Pressure (Pa)	Sound Pressure Level (dB)
Leaf rustling	0.0000632	10
Normal conversation	0.01	54
TV set at home	0.02	60
Passenger car as heard from roadside	0.1	74
Jack hammer	2.0	100
Jet engine as heard from 100 yards	100	134
Extremely loud rock band	200	140
Jet engine as heard from 1 yard	630	150

Tabla 2: *Presiones sonoras y sus respectivos niveles de presión sonora.*

Para el análisis energético del sonido en un espacio cerrado muchas veces es mejor entender el sonido como fluctuaciones de presión, debido a que en ellas está implícito el volumen del espacio, es decir sus dimensiones y forma, en cambio entender el sonido como ondas con una intensidad sonora determinada nos obliga a incluir en el analisis tambien la energia propia de las reflexiones de dichas ondas sonoras.

3.2.2 Interferencia y la serie armónica:

Cuando el sonido se desarrolla en un espacio cerrado, siempre se van a presentar interferencias entre las ondas provenientes de la fuente y las distintas reflexiones de las mismas en puntos determinados. Cuando dos ondas se mezclan el resultado es una interferencia constructiva o destructiva dependiendo la fase de ambas ondas. Si las ondas se encuentran en un desfase exacto de 180° se da una interferencia totalmente destructiva, y cuando se encuentran en fase de 0° se da una interferencia totalmente constructiva. Este fenómeno es trascendental en el comportamiento del sonido en cualquier recinto pues explica porque cada espacio tiene una respuesta sonora determinada.

El sonido que generalmente se escucha es mucho más complejo que una simple onda sinusoidal, pues es la composición de muchas de estas ondas generando interferencias destructivas y constructivas entre sí, lo cual produce un resultado final que se percibe como sonido. Así, cuando se produce una oscilación, además se producen vibraciones relacionadas matemáticamente con esta primera, vibraciones llamadas armónicos. De este modo, la frecuencia fundamental tiene un número de armónicos que están relacionados entre sí por un número entero, es decir, el primer armónico n=1, el segundo n=2, el tercero n=3, etc. En este concepto se basa la serie armónica, pues la fundamental o primer armónico se multiplica por un entero y aparecen sus armónicos respectivos (1f, 2f, 3f...) como se muestra en la siguiente tabla:

Armónico	Frecuencia (Hz)	Nota	Intervalo
Primer	264	Do1	Fundamental
Segundo	528	Do2	Octava
Tercero	792	Sol2	Quinta
Cuarto	1056	Do3	Octava
Quinto	1320	Mi3	Tercera Mayor

Tabla 3: Serie armónica

3.2.3 Modos normales y resonancia:

Al estudiar la acústica de un espacio, es necesario entender que el fenómeno de interferencia depende de muchos factores, de la geometría del espacio, de los materiales de paredes, piso y techo del mismo, de las dimensiones del lugar, entre otros. Todos estos factores hacen que en los espacios acústicos se presenten nodos y antinodos específicos a cada frecuencia sónica. Los nodos son puntos en los cuales las partículas no tienen

Fig.4 *Nodos y antinodos en una cuerda.*

movimiento alguno generando allí vacíos sonoros perceptibles, los antinodos por el contrario son puntos en los cuales existe el máximo desplazamiento de las partículas con respecto a su punto de reposo, generando allí el máximo nivel sonoro. Todos los sistemas acústicos poseen un determinado comportamiento de nodos y antinodos, que en última instancia determina su comportamiento de modos propios de vibración o modos normales. Si se hace la analogía de nodos y antinodos en una cuerda, se puede ver que los nodos es donde la cuerda no se mueve y los antinodos es donde existe su máximo desplazamiento espacial. En la figura 4, se representa el segundo modo normal para esa cuerda (ver Fig.4).

Como ya se mencionó, un recinto posee un comportamiento de modos normales mucho más complejo que una cuerda, pues estos se desarrollan en tres dimensiones. En recintos cerrados existen ondas estacionarias generadas por las interferencias, estas ondas estacionarias cambian de acuerdo a la frecuencia para un mismo espacio por lo que se dice que para cada frecuencia existe un modo de vibración específico en cada sala. Existen tres modos propios dependientes de los ejes X, Y y Z en un recinto cúbico (entiéndase techo y piso también como paredes del cubo):

Modos Axiales: los modos axiales dependen del eje x, es decir se forman por la interacción de los frentes de ondas con las paredes paralelas (ver Fig.5).

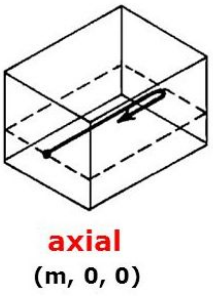

Fig.5: *Modo Axial.*

Modos Tangenciales: los modos tangenciales dependen del eje x y además del y, es decir se forman por la interacción de los frentes de onda con las paredes paralelas y perpendiculares (el plano x,y) (ver Fig.6).

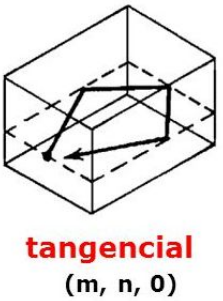

Fig.6: *Modo Tangencial.*

Modos Oblicuos: los modos oblicuos dependen de los ejes x, y y z, es decir se forman por las interacciones de los frentes de ondas con todas las paredes del recinto (ver Fig.7).

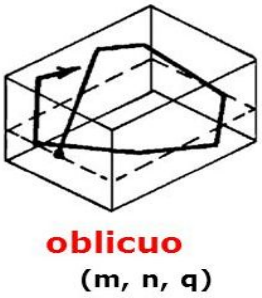

Fig.7: *Modo Oblicuo.*

El análisis de los modos propios de un recinto es de suma importancia para entender la distribución energética que tiene dicho espacio dependiendo de una frecuencia determinada, de acuerdo a este se puede saber qué puntos presentan la mayor concentración de presión sonora para una frecuencia específica (ver Fig.8).

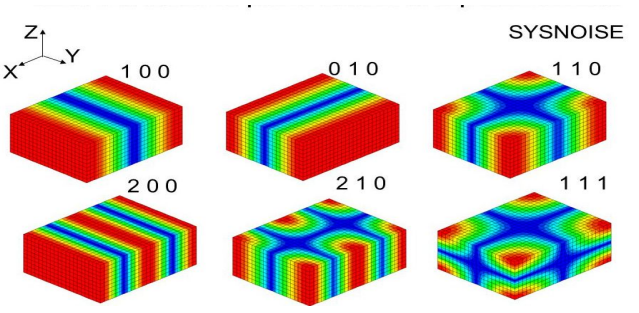

Fig.8: *Primeros modos propios de un recinto cúbico.*

Cuando una fuente sonora emite una frecuencia exactamente igual a una frecuencia propia de un modo normal se dice que la fuente está en resonancia con dicho modo normal. El fenómeno de resonancia se da cuando existe un acople entre la fuente impulsora y el sistema vibratorio, este fenómeno de

resonancia es de suma importancia no solo en el estudio del sonido sino también en estudios de física mecánica y de electromagnetismo, pudiendo ser usada en muchos aspectos tales como transferencia de energía, pues la máxima transferencia de energía en un sistema oscilante se da en las frecuencias de resonancia dependendiendo de la geometría del sistema así como del material.

3.3 Acondicionamiento acústico:

Debido a todas estas características ya mencionadas del sonido en espacios cerrados, es necesario en muchos casos tratar acústicamente espacios sonoros tales como salas de mezcla, salas de mastering, salas de conciertos, etc. Este proceso se logra mediante la modificación de las paredes techos y pisos, cambiando aspectos como forma y materiales para lograr una distribución homogénea del sonido en los puntos de escucha. Para ello se usan difusores, absorbentes y resonadores. Cada uno de ellos trabaja a bandas de frecuencia específicas en las que para encontrar estas bandas problemáticas suele emplearse ruido. El ruido es un sonido en el que aleatoriamente se encuentran todas las frecuencias audibles (20 a 20000 Hz), existen dos tipos de ruido, ruido blanco y ruido rosa, el primero tiene una densidad espectral de potencia constante para cada banda, mientras que en el segundo la densidad espectral de potencia es inversamente proporcional a la frecuencia (ver Fig.9).

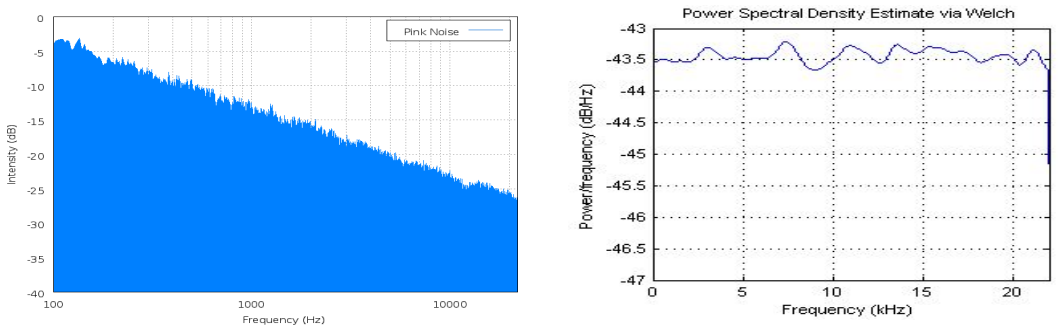

Fig.9: *A la izquierda gráfica de ruido rosa y a la derecha gráfica de ruido blanco.*

Cabe resaltar que para encontrar la energía real por bandas en un espacio, es necesario usar el ruido blanco, ya que el ruido rosa es una adaptación acorde a las curvas isofónicas de Fletcher

y Munson, quienes trabajaron en la forma en que se caracteriza la percepción humana del sonido.

Ahora bien, cada uno de los dispositivos de tratamiento acústico ya mencionado trabajan problemas distintos, por ejemplo los difusores dispersan el sonido en puntos estratégicos para que no se concentren en un solo lugar. En ocasiones existen bandas de frecuencia que se resaltan por encima de las otras bandas, lo cual es perjudicial para la inteligibilidad del sonido sobre todo en frecuencias graves, para tratar esto generalmente se usan resonadores acústicos que actúan como absorbentes acústicos, los cuales se clasifican de 3 formas:

3.3.1 Resonador de Helmholtz de cavidad simple:

Se trata de un sistema cerrado con una única cavidad, este tipo de resonador actúa como un sistema masa resorte, donde el cuello es una masa de aire y el aire por dentro es un resorte, con esto este sistema tiene una frecuencia de resonancia específica debida a las dimensiones del sistema (ver Fig.10).

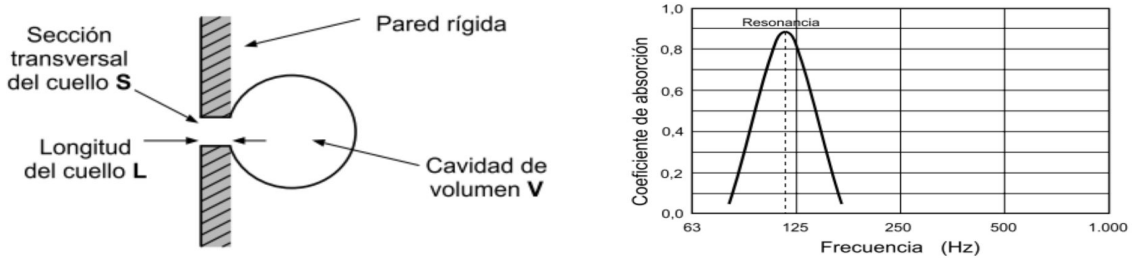

Fig.10: *A la izquierda esquema básico de resonador de Helmholtz de cavidad simple, a la derecha curva de absorción.*

Para hallar la frecuencia de absorción a la que este resonador resuena se usa la siguiente fórmula, en la cual S es la sección transversal del cuello (cm^2), L es la longitud del cuello (cm) y V el volumen de la cavidad (cm^3):

$$f_0 = 5480 \sqrt{\frac{S}{LV}} \text{ (en Hz)} \qquad (7)$$

3.3.2 Resonador de Helmholtz de múltiple cavidad:

Este tipo de resonador podría considerarse como varios resonadores de cavidad simple, la ventaja de este tipo de resonadores es que la selectividad es menor e incluso puede ser configurable adicionando un material absorbente dentro del panel (ver Fig.11).

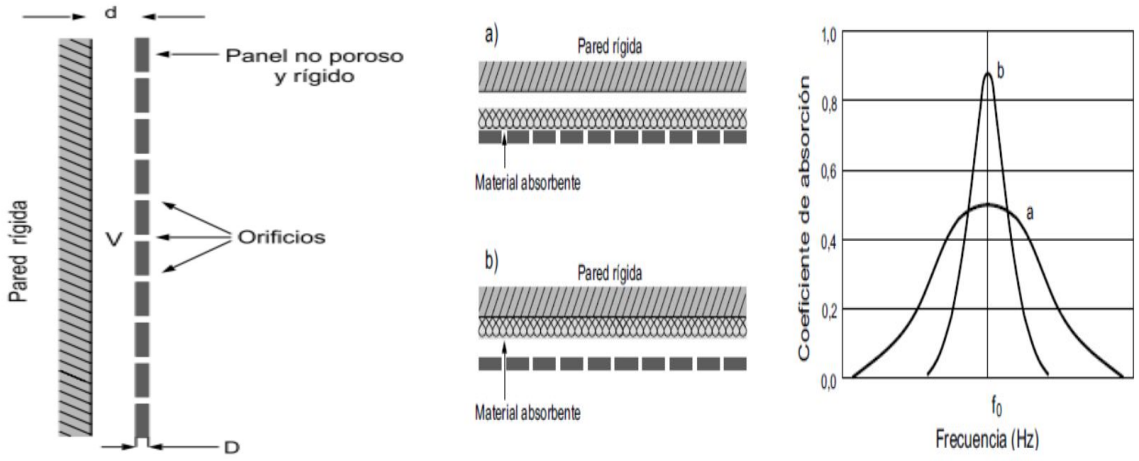

Fig.11: *A la izquierda esquema básico de resonador de Helmholtz de múltiple cavidad, a la derecha curva de absorción.*

Para hallar la frecuencia de resonancia de este resonador se debe usar la siguiente ecuación, en la cual p es el porcentaje de perforación del panel, D es la profundidad de los huecos (cm) y d es el espesor de la capa de aire (cm):

$$f_0 = 5480\sqrt{\frac{p}{Dd}} \qquad (8)$$

3.3.3 Resonador de membrana o diafragmático:

Este tipo de resonador es muy eficiente en bandas de frecuencia bajas, se basa en una placa de una densidad determinada cuyos extremos están sujetos, por ende la placa puede entrar en

resonancia con una frecuencia determinada. La impedancia del sistema está debida por la flexión de la placa con respecto a los extremos, dado que allí hay un trabajo, la placa transforma la energía de la onda sonora en calor (ver Fig.12).

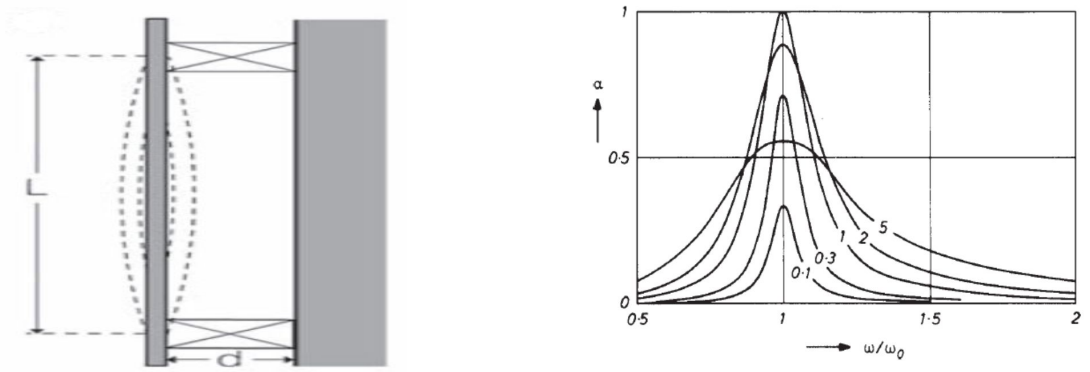

Fig.12: A la izquierda esquema básico de resonador de membrana, a la derecha curva de absorción.

Para hallar la frecuencia de resonancia de dicho absorto se debe usar la siguiente fórmula donde M es la mas del panel por unidad de superficie (Kg/m^2) y d es la distancia entre la membrana y la pared rígida (cm):

$$f_0 = \frac{60}{\sqrt{M \times d}} \qquad (9)$$

3.4 Piezoelectricidad:

El efecto piezoeléctrico denota la relación existente entre una tensión mecánica (expansión o compresión) a un material y una tensión eléctrica, se produce cuando ciertos materiales adquieren un potencial eléctrico al deformarse, de forma inversa, dichos materiales pueden cambiar su forma al ser expuestos a un campo eléctrico. Este fenómeno fue descubierto por Pierre y Jacques Curie en 1881 mientras estaban estudiando un cristal de cuarzo, descubrieron que dicho cristal presentaba potenciales eléctricos al sufrir tensión mecánica. Sin embargo no fue sino hasta el siglo XX cuando la piezoelectricidad empezó a estudiarse y se hicieron varios dispositivos usados en detección ultrasónica. Con el auge de nuevas tecnologías a

comienzos del siglo XXI, y con la aparición y producción industrial de nuevos materiales, el fenómeno piezoeléctrico empezó a generar gran interés en la industria electrónica (ver Fig.13).

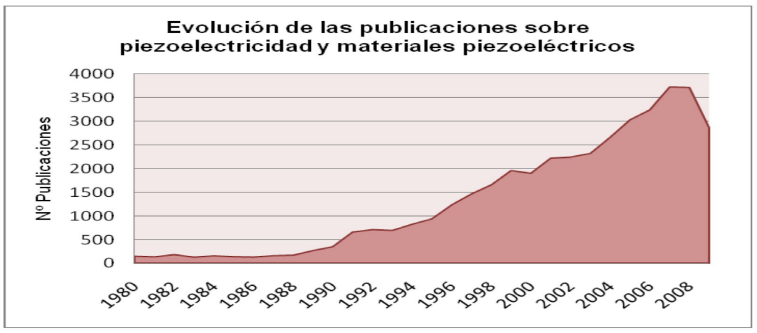

Fig.13: *Publicaciones sobre piezoelectricidad en los últimos años.*

La piezoelectricidad no es una propiedad de todos los materiales, tal y como el magnetismo, ciertos materiales poseen esta propiedad de forma natural, el cuarzo es uno de ellos debido a que presenta una estructura molecular específica basada en cubos de silicio y oxígeno. Con el tiempo se han podido fabricar materiales con propiedades piezoeléctricas tales como los materiales cerámicos policristalinos, dentro de los que se encuentra el más usado, el Titanato Zirconato de Plomo (PZT). Este material tienen una estructura cristalina cúbica centrada en las caras en forma neutra. Tal y como los materiales ferrosos magnetizados artificialmente, estos PZT deben ser polarizados para volverlos materiales piezoeléctricos, esto se logra mediante la aplicación de un campo eléctrico de alrededor 2 KV/mm y una temperatura elevada, de esta manera el ion de titanio de cada molécula cambia de posición polarizando dicha estructura. Todos estos dipolos finalmente se alinean en la misma dirección del campo eléctrico con lo cual el material empieza a presentar propiedades piezoeléctricas (ver Fig.14).

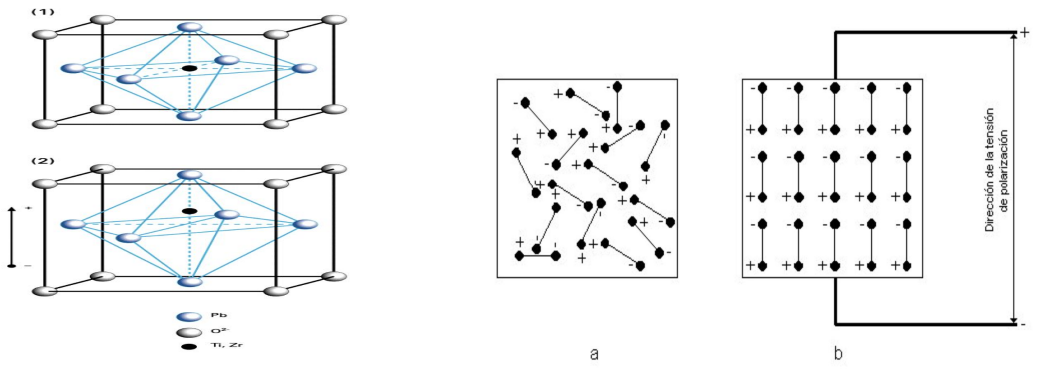

Fig.14: *A la izquierda estructura cúbica PZT antes de polarización (1) y después de polarización(2), a la derecha alineamientos de los dipolos antes y después de polarización.*

Cuando una tensión mecánica es aplicada a dicho material, la fuerza eléctrica entre los iones negativos y positivos genera un potencial eléctrico debido a la separación o acercamiento entre las cargas, y si se arma un circuito entre los polos negativos y positivos del material se puede generar un flujo eléctrico (ver Fig.15).

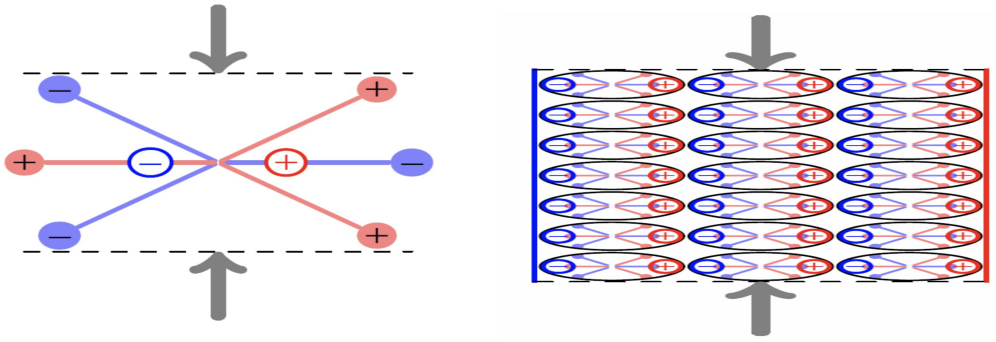

Fig.15: *A la izquierda dipolo generando tensión eléctrica, a la derecha varios dipolos organizados según su carga.*

Por supuesto entre más se aplique tensión mecánica más voltaje va a producir dicho material, lo cual quiere decir que la intensidad del campo eléctrico generado es directamente proporcional al esfuerzo aplicado (T) y a las características de deformación propias de cada material piezoeléctrico (g):

$$E = -g \times T \qquad (10)$$

De este modo, si a un material piezoeléctrico se le aplica una tracción y una compresión repetidamente a una frecuencia determinada se lograra un voltaje AC, equivalente a las tensiones aplicadas (ver Fig.16).

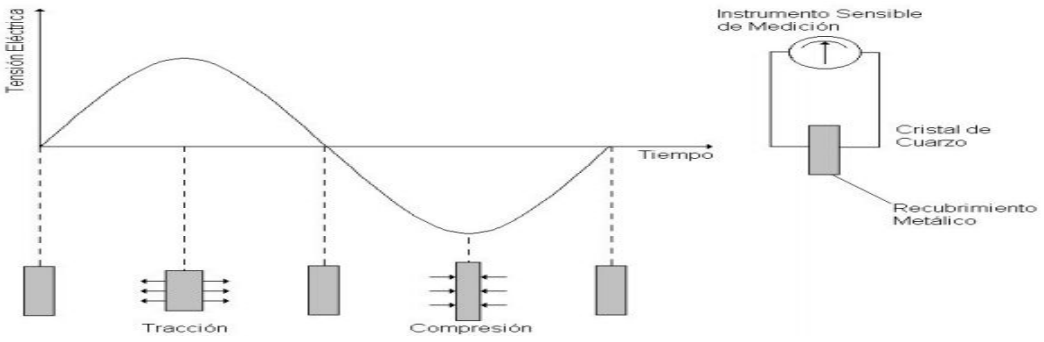

Fig.16: *Traccion y compresion de un piezoeléctrico que genera un voltaje AC.*

En la actualidad los materiales piezoeléctricos presentan gran cantidad de utilidades, sobretodo para obtencion de energia por medio de sistemas vibracionales.

3.5 Circuitos:

El desarrollo de los circuitos eléctricos se remonta al estudio mismo del fenómeno eléctrico en los siglos XVI y XVII, desde el descubrimiento de la electricidad estática se sabía que este fenómeno se da por cargas en movimiento de un lugar a otro, si se pone un camino para que estas cargas fluyan (cable conductor) entonces se puede hacer un circuito en el que las cargas, por su desplazamiento realicen un trabajo. No fue sino hasta el siglo XIX que pudieron crearse los primeros circuitos que emplean dispositivos rudimentarios y topologías muy sencillas, tales como una baterías, resistencias y una bombillas, sin embargo, con el estudio del electromagnetismo pudieron realizarse circuitos cada vez más complejos que empezaron a ser útiles para la construcción de máquinas que hasta el momento eran hechas a base de vapor. El primer gran paso para el desarrollo de la electrónica fue la invención del tubo de vacío tipo diodo por John Ambrose Fleming en 1906, este dispositivo era capaz de gobernar pequeñas corrientes, paralelamente el ingeniero estadounidense Lee de Forest inventó un tubo de vacío con tres filamentos, triodo, el cual podía además amplificar pequeñas corrientes, con esto empezó el desarrollo de los primeros circuitos electrónicos a gran escala.

No fue sino hasta el año 1947 con el surgimiento del Transistor en los Laboratorios Bell (USA) que la electrónica sufrió un cambio considerable pues circuitos más compactos y eficientes pudieron ser desarrollados, el Transistor era capaz de amplificar, rectificar, conmutar, etc, por lo que se pudieron construir dispositivos electrónicos más eficientes. Sin embargo aún existía el problema del tamaño en los circuitos a base de transistores lo que hacía difícil la masificación de la electrónica.

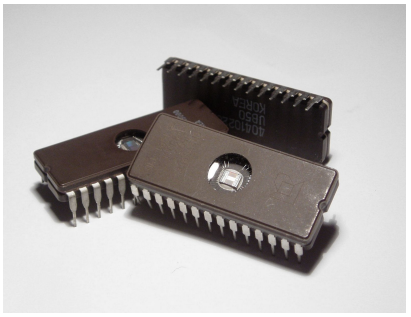

Fig.17: *Microchips con encapsulado de Sllicio.*

En 1959 el ingeniero estadounidense Jack S. Kilby de la compañía Texas Instruments desarrolló el primer arreglo de seis transistores en una misma base de germanio, este fue el primer Circuito Integrado o Microchip de la historia, que cambiaría el mundo de la tecnología para siempre, los circuitos integrados pueden realizar bastantes funciones que posibilitan la ejecución de procesos eléctricos, siendo así la parte esencial de cualquier sistema electrónico existente (ver Fig.17). Básicamente los Microchips ejecutan una operación basada en una preconfiguración establecida, lo que genera una salida de corriente dependiente de una corriente de entrada y dicha preconfiguración.

Los circuitos integrados más complejos en la actualidad son los microprocesadores, los cuales ejecutan millones de operaciones por minuto, y son los que dan vida a la tecnología actual y se encuentran presentes en los televisores, celulares, computadoras, etc.

Para entender el funcionamiento de un circuito sencillo generalmente se usan dos teorías básicas, la ley de Ohm y las leyes de Kirchoff.

3.5.1 Ley de Ohm:

Esta ley fue postulada por el físico y matemático alemán Georg Simon Ohm, la cual establece que la diferencia de potencial entre dos puntos es igual a la corriente por la resistencia existente en dicho circuito:

$$V = R \cdot I \qquad (11)$$

La ley de ohm relaciona la fuerza electromotriz (el voltaje) con la intensidad de corriente en un conductor, la corriente está determinada por la carga transportada en un tiempo determinado (q/t), siendo esto imprescindible a la hora de estudiar cualquier circuito eléctrico (ver Fig.18).

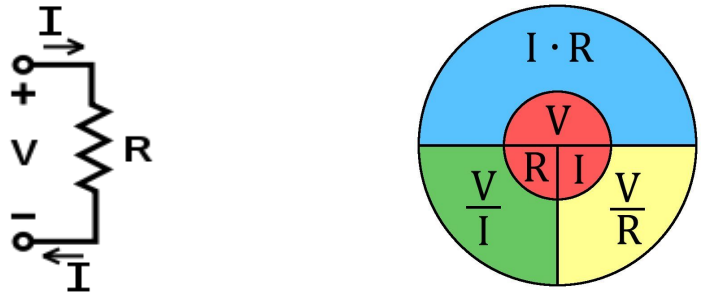

Fig.18: *A la izquierda esquema basico de un cicuito para la ley de Ohm, a la derecha relaciones de la ley de Ohm.*

3.5.2 Leyes de Kirchhoff:

Estas leyes fueron descritas por el científico alemán Gustav Kirchhoff en 1846 y se basan en la conservación de la energía en un circuito eléctrico:

-Primera ley de Kirchhoff: también llamada ley de los nodos y se refiere que en cualquier nodo la suma de las corrientes entrantes es igual a la suma de las corrientes salientes, es decir que la sumatoria de todas las corrientes que pasan por un nodo es igual a cero (ver Fig.19a).

$$\sum_{k-1}^{n} \tilde{I}_k = 0 \quad (12)$$

-Segunda ley de Kirchhoff: también llamada ley de mallas de kirchhoff, esta ley dice que la suma de todas las caídas de tensión en una malla es igual a la tensión suministrada, es decir que la sumatoria de todas las tensiones en la malla es igual a cero (ver Fig.19b).

$$\sum_{k=1}^{n} \tilde{V}_k = 0 \quad (13)$$

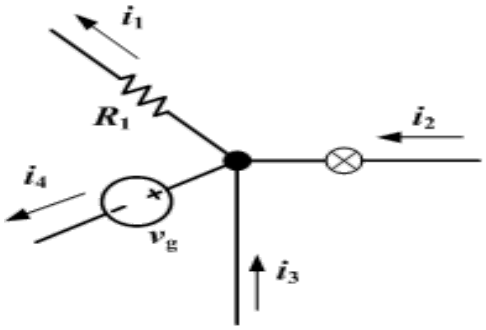

Fig.19a: *Primer ley de Kirchoff.*

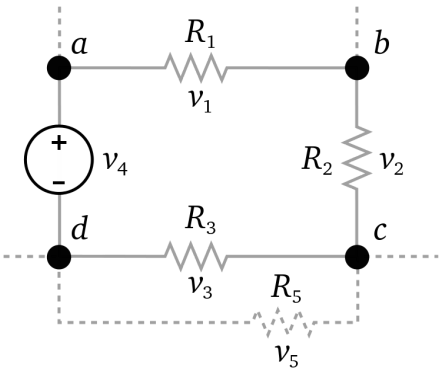

Fig.19b: *Segunda ley de Kirchoff.*

3.6 Fuentes conmutadas:

Todos los dispositivos electrónicos requieren de una fuente de alimentación que provea energía eléctrica a sus circuitos, estas fuentes de alimentación constan de dos fases de transformación de la corriente alterna que viene de la red pública, la primer fase se basa en transformaciones lineales, en las cuales se reduce o eleva la tensión de salida con respecto a la tensión de entrada por medio de un transformador, dicho transformador emplea dos bobinados devanados en un núcleo de hierro y se basa en la inducción electromagnética para inducir una corriente con una tensión mayor o menor dependiendo del número de espiras en el segundo devanado, este segundo devanado se encuentra eléctricamente aislado del primero, el uso del núcleo de hierro garantiza la concentración del campo magnético, aspecto necesario para evitar el desperdicio de energía (ver Fig.20).

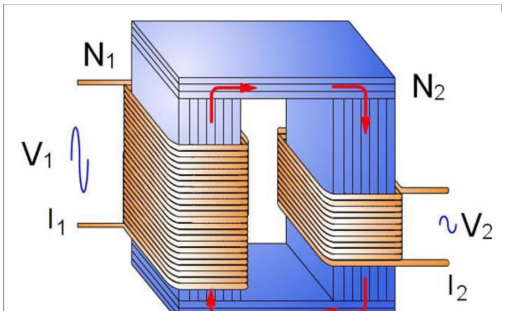

Fig.20: *Esquema de transformador reductor de tensión.*

La segunda fase se basa en la rectificación y filtrado de la corriente de salida, pues la mayoría de circuitos electrónicos de la actualidad funcionan con corriente continua, para ello un puente de diodos, y un

capacitor o varios (como ejemplo más básico) entregan al final de la etapa una señal continua sin rizado que afecte el buen funcionamiento de los circuitos de carga. Este tipo de filtrado ha sido el más usado desde los inicios de la electrónica debido a su sencillez y coste aceptable. En la siguiente ilustración se puede observar la topología típica para este tipo de fuentes, para el ejemplo, se muestra una fuente de alimentación de un dispositivo de amplificación de audio:

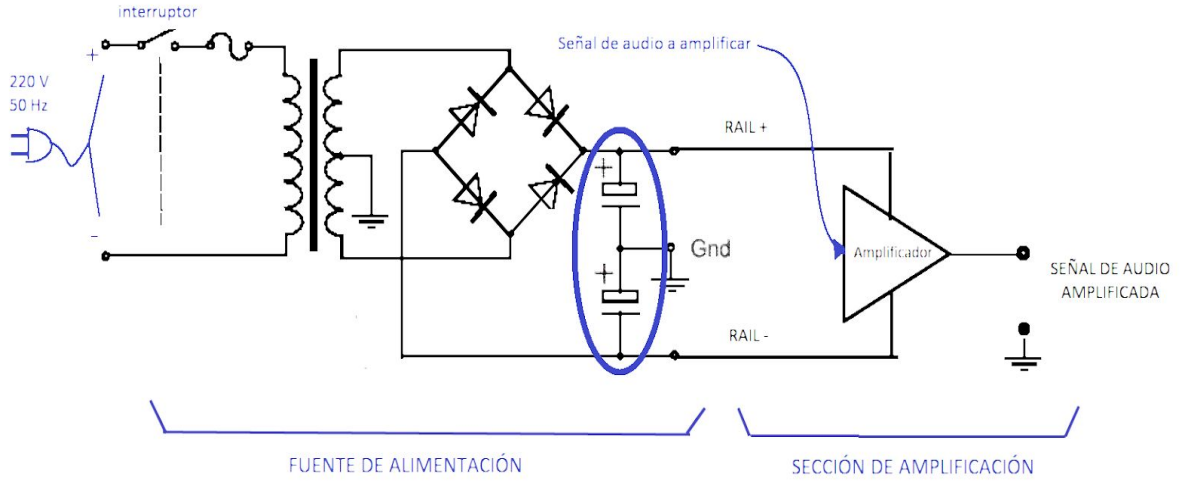

Fig.21: *Esquema de una fuente de alimentación para un dispositivo de audio.*

Ahora bien, el problema de este tipo de fuentes es su tamaño por basarse en un transformador pesado y poco eficiente, pues parte de la potencia recibida se transforma en calor., por ello en la actualidad se está empleando un nuevo tipo de fuente llamado Fuente Conmutada, este tipo de fuente es mucho más eficiente y económica porque basa su funcionamiento en la conmutación de la energía de entrada para entregar una tensión mayor o menor según sea necesario. Las fuentes conmutadas generalmente reciben y entregan corriente continua pero con un nivel de voltaje diferente.

En su composición más básica, las fuentes conmutadas constan de un conmutador (Switch), un inductor, un capacitor y un diodo. Cuando se realiza una conmutación por medio del Switch (generalmente un transistor MOSFET) de la energía de entrada, con una frecuencia determinada y un ancho de pulso determinado, el inductor se carga, pero debido a que no puede perder su energía de carga repentinamente la libera mientras no recibe energía de la fuente de entrada, cargando el condensador a un voltaje determinado, este voltaje es el que

estará finalmente presente en la salida de la fuente, el diodo garantiza que la corriente tenga solo un sentido.

De acuerdo a la topología de estos mismos componentes se puede tener una fuente elevadora o reductora de voltaje:

3.6.1 Convertidor tipo reductor (Buck):

Esta fuente conmutada funciona con una conmutación On corta y Off larga, dicho de otro modo el inductor va a pasar más tiempo descargandose que cargándose, produciendo así un voltaje menor en el capacitor con respecto a la fuente (ver Fig.22).

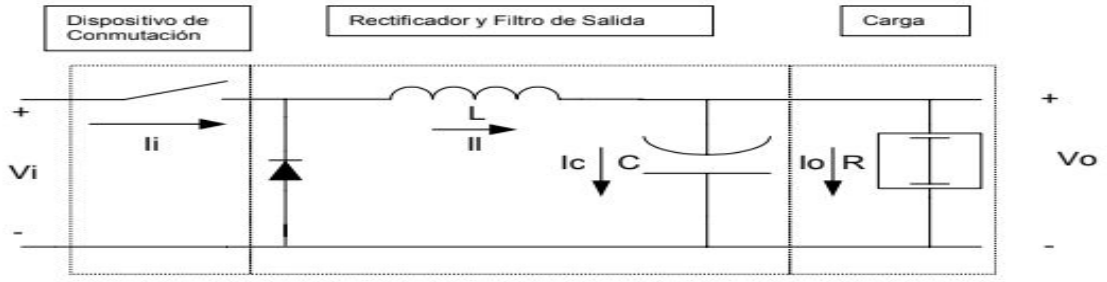

Fig.22: Fuente conmutada tipo Buck.

3.6.2 Convertidor tipo elevador (Boost):

Esta fuente conmutada funciona más con la suma de tensiones entre la fuente de entrada y la del inductor al descargarse, por lo que la tensión que ve el capacitor es esta suma y no solo la de la fuente, ahora bien, el tiempo On y Off del Switch va a determinar en cuánto se elevará el voltaje (ver Fig.23).

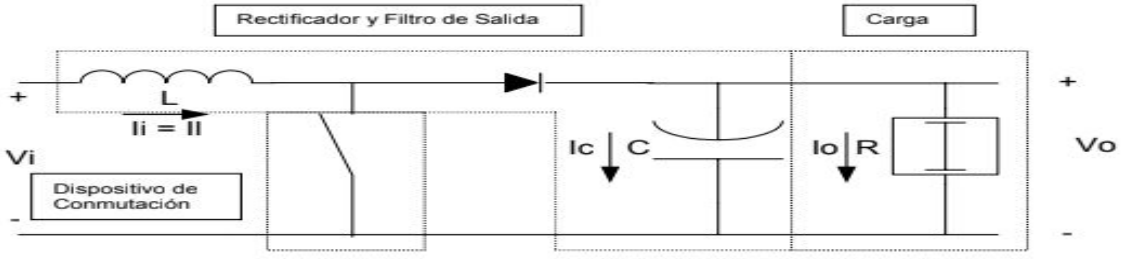

Fig.23: *Fuente conmutada tipo Boost.*

Por supuesto las fuentes reales son más complejas que estos esquemas debido a que se debe sensar la tensión de salida, la temperatura, entre otras cosas (ver Fig.24).

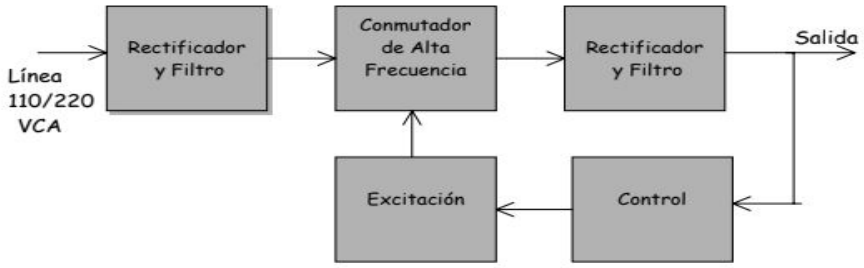

Fig.24: *Esquema del funcionamiento de una fuente conmutada real.*

En la actualidad todo este montaje se logra en espacios muy reducidos gracias al uso de circuitos integrados en cuyo interior está todo lo necesario para el funcionamiento controlado de este tipo de fuentes, un ejemplo de ello es el circuito integrado BQ 25504, el cual se basa en una fuente conmutada tipo Buck-Boost que puede elevar o reducir el voltaje de salida dependiendo de la necesidad.

4. Metodología

La metodología de trabajo para este proyecto giró en torno a la optimización de los recursos económicos y de tiempo, los cuales siempre son una limitante en el desarrollo e implementación de cualquier proyecto. Así pues, este trabajo se divide en tres fases fundamentales que integran un todo para poder llegar al objetivo general (ver Gráfica.1).

- Fase 1: estudio de los aspectos acústicos del proyecto, en donde se debe estudiar a fondo las características acústicas del espacio a trabajar (en este caso un estudio de Mezcla), y con base en ello diseñar y construir la mejor opción de captación acústica.
- Fase 2: estudio del dispositivo de transducción acústico-eléctrica, en concreto la utilización de micrófonos piezoeléctricos por su eficiencia, economía y facilidad de uso.
- Fase 3: montaje y análisis del sistema completo, (realización de pruebas del sistema aislado y en el espacio de mezcla).

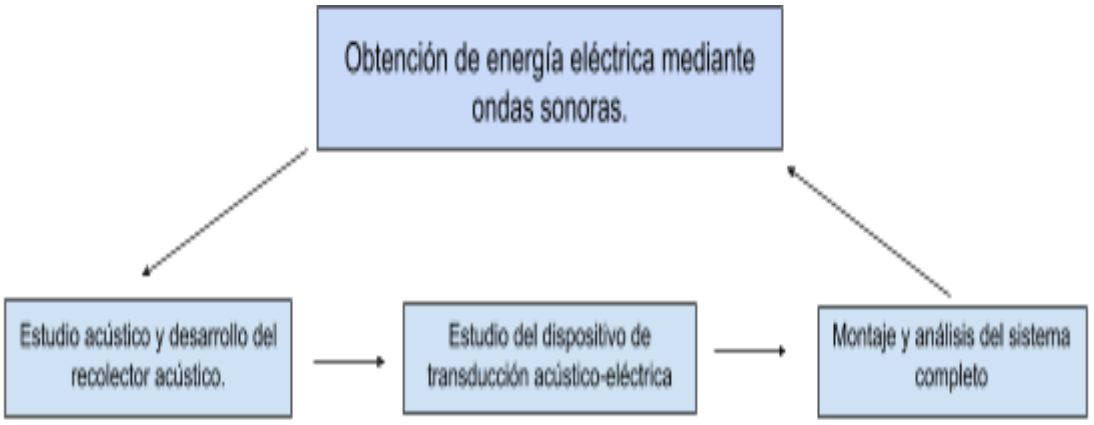

Diagrama 1: Estructura del proyecto.

4.1 Materiales:

4.1.1 Materiales Mecánicos:

***Madera MDF*:** Medium Density Fiberboard (M.D.F) es una lámina de fibras de madera compactada y procesada técnicamente para ser utilizada como un buen sustituto de la madera maciza. El MDF es una madera de densidad media, alrededor de 500 a 800 Kg/m3, lo que la hace ideal para la implementación en grandes superficies, su textura lisa la hace bastante apetecida para trabajos de carpintería económicos. Por estar hecho de polvo de residuos de madera, es bastante económico comparado con maderas tradicionales como el pino o el ébano, además, es una madera rígida pero con una resistencia a la flexión baja (30 N/mm^2), por lo que es usada en aplicaciones acústicas para la construcción de paneles absorbentes. Una desventaja del MDF es que tiene una resistencia baja a condiciones ambientales como humedad o erosión, lo cual hace del MDF un material inviable en aplicaciones al aire libre. Actualmente en Colombia es bastante usado por su economía y facilidad de producción (ver Fig.25).

Fig.25: *Laminas de MDF.*

Resortes: Se define resorte a los dispositivos elásticos que almacena energía y se desprenden de ella sin sufrir una deformación permanente regresando a su estado original una vez la

fuerza ejercida ya ha desaparecido, para su fabricación se usan materiales como acero, carbono y cromo. De acuerdo a construcción se clasifican en tres tipos debidos a sus modos de empleo: por tracción donde se caracterizan por tener un gancho con una fuerza ya comprometida, por compresión donde soportan fuerzas elevadas y por torsión, ahora bien sus aplicaciones se ven reflejadas en estructuras de gran dimensión como edificios en la actividad antisísmica y en usos comerciales de pequeña escala como esferos (ver Fig.26). Los resortes pueden estudiarse mediante una fórmula simple que involucra su resistencia a la deformación y su elongación con una fuerza incidente, dicha fórmula está basada en la ley de Hooke.

Fig.26: *Resorte de tipo común.*

$$F = -kx\,, \qquad (14)$$

Aquí, F es la fuerza aplicada, K es la constante elástica del material y x la elongación sufrida.

PVC: Policloruro de vinilo es un material plástico derivado del petróleo y la sal que surge de la polimerización del monómero del cloruro de vinilo, para su fabricación puede sufrir etapas tales como: suspensión, emulsión, masa y solución. En el mercado actual se encuentran dos tipos de estructura para el PVC, rígida y flexible, ahora bien en cuanto a su aplicación se caracteriza por ser altamente moldeable a altas temperaturas y de costos muy bajos permitiendo su fabricación en masa y empleo en infinidad de proyectos a nivel industrial y a pequeña escala (ver Fig.27).

Fig.27: *PVC comun.*

4.1.2 Materiales electrónicos:

BQ 25504: circuito integrado diseñado y manufacturado por la compañía Texas Instruments, tiene la capacidad de administrar valores muy bajos de potencia,valores del orden de micro

watts (μW) o miliwatts (mW). Es bastante eficiente en aplicaciones donde la entrada energética es sumamente baja, por ejemplo en instalaciones con celdas fotovoltaicas; Además es un integrado relativamente barato, alrededor de 4$ USD la unidad, aunque no de fácil acceso (ver Fig.28). Este circuito integrado consta de una fuente conmutada de tipo Buck - Boost, es decir de un elevador o reductor de voltaje DC - DC dependiendo de la necesidad, su complejidad radica en que es capaz además de sensar la energía de entrada para extraer el mayor porcentaje de potencia posible de la fuente, es decir la mayor corriente posible dependiente del voltaje de entrada. Con este CI se pueden cargar baterías de al menos 3,5 Voltios, o supercapacitores de más de 1 F.

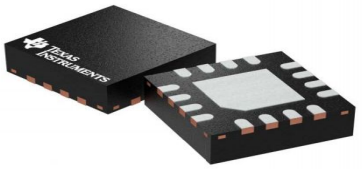

Fig.28: *Circuito Integrado BQ 25504.*

- Funcionamiento:

El funcionamiento de este dispositivo es sencillo y puede ser evidenciado en el siguiente esquema:

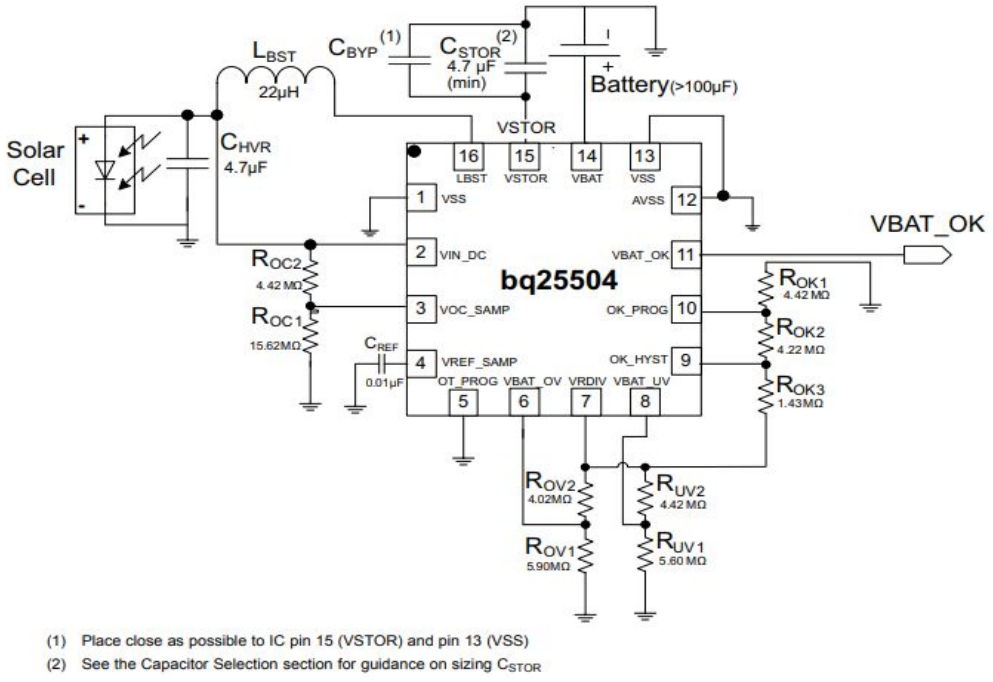

Fig.29: *Diagrama de conexiones del BQ 25504 para un circuito de carga basado en una celda solar.*

Para iniciar, este CI (circuito integrado necesita un voltaje mínimo de 300 mV, a partir de los cuales empezará a cargar a CSTOR a un voltaje VSTOR de 1.8V, dicho capacitor es el responsable de cargar la batería final. Una vez se alcance dicha tensión, el CI puede recibir un voltaje de entrada menor (alrededor de 100 mV) con el que seguirá cargando a CSTOR. El CI cuenta con varios umbrales para proteger la batería final que son ajustables, dichos umbrales son:

-Vuv: es el voltaje máximo de descarga de la batería cuando esto entregue su carga a un circuito externo, esto quiere decir que cuando CSTOR tenga un voltaje menor a este umbral, tanto CSTOR como la batería serán desconectados.
-Vov: es el voltaje máximo al cual va a cargarse la batería para evitar daños por sobrecarga.
-Vbat ok: es el voltaje al cual la batería está lista para ser usada.

Todos estos parámetros pueden ser vistos más claramente en el siguiente diagrama:

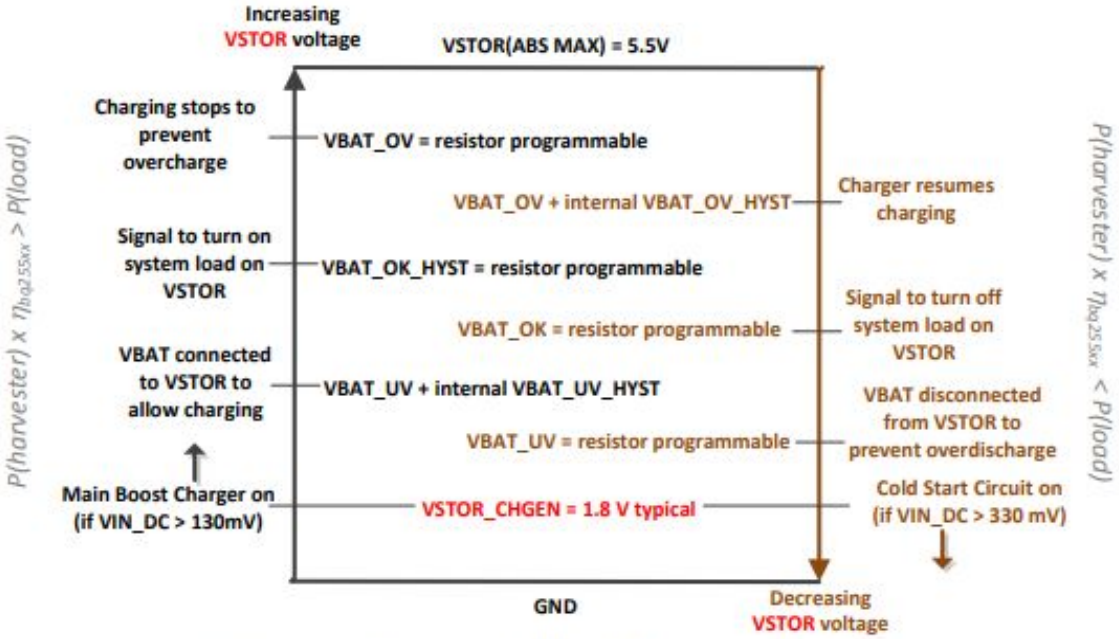

Figure 11. Summary of VSTOR Threshold Voltages

Diagrama 2: *Diagrama de trabajo del CI BQ 25504.*

Sensor piezoeléctrico: un sensor piezoeléctrico es un dispositivo que utiliza el efecto piezoeléctrico para medir presión, tensión o fuerza; transformando dichas magnitudes en señales eléctricas. El voltaje generado por el dispositivo es directamente proporcional a la fuerza aplicada en el mismo, así pues, la señal generada puede producir una corriente medible si se tiene un circuito conectado a los terminales del sensor.

Los sensores piezoeléctricos pueden generar voltajes elevados pero corrientes pequeñas debido a su alta impedancia interna; sin embargo, mediante capacitores, dichas corrientes pueden almacenarse y utilizarse posteriormente. Estos sensores son también conocidos como micrófonos piezoeléctricos pues son usados en ingeniería de sonido como micrófonos de contacto (ver Fig.30).

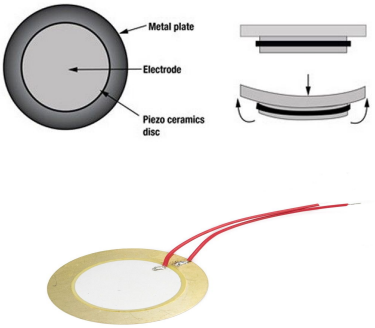

Fig.29: *Sensores piezoeléctricos.*

Los sensores piezoeléctricos pueden captar vibraciones y además pueden emitir ondas sonoras, de hecho estos sensores son usados en timbres y parlantes; tienen una frecuencia de resonancia cercana a los 3 KHz, sin embargo su frecuencia de resonancia puede modificarse mediante la implementación de masas inerciales. Para el caso de los sensores piezoeléctricos con forma de disco (como los de la imagen) el máximo voltaje se alcanza cuando la fuerza es aplicada perpendicularmente al centro del disco y existe un apoyo en el borde del mismo.

5. Desarrollo, resultados y análisis de resultados:

Para la ejecución exitosa de este proyecto de investigación fue necesario separar el desarrollo en tres fases fundamentales como ya se mencionó, la primer fase consistió en el estudio riguroso del comportamiento del recinto cerrado en el cual se basaría la construcción del panel acústico (para este caso un estudio de mezcla), junto con esto debió realizarse el panel acústico de acuerdo a las características necesarias para su adecuación en el espacio ya mencionado, como segunda fase se debió desarrollar un sistema de transducción acústico eléctrico efectivo que cumpliera con un mínimo de producción eléctrica, la tercer y última fase consistió en el montaje y análisis del sistema en dos lugares principalmente, el

laboratorio de trabajo y el estudio de mezcla, en este caso un estudio de Foley pero usado como recinto de mezcla 2.1 por facilidad de disposición del espacio.

5.1 Fase 1: Estudio acústico y desarrollo del recolector acústico:

En primera instancia fue necesario estudiar los puntos en donde más se concentra la energía acústica en el estudio de mezcla escogido (estudio Foley del Centro Ático de la Pontificia Universidad Javeriana), para ello se realizaron ciertas mediciones con un Software de medición acústica especializado (Smaart V7.0), que además cuenta con un RTA (Real Time Analyzer) necesario para definir la energía acústica presente por bandas de frecuencia. El estudio Foley, al igual que todos los estudios profesionales de audio, tienen un tratamiento acústico bastante eficiente, por lo que su respuesta en frecuencia es bastante plana en puntos cercanos al centro de escucha, sin embargo, y gracias al comportamiento de modos normales de cualquier sala, existen puntos donde la concentración energética de bajas frecuencias es importante, estos puntos suelen estar ubicados en las esquinas donde la suma de los modos propios axiales, tangenciales y oblicuos de la sala son mayores. Para esta sala, la concentración energética estaba presente pero atenuada por el tratamiento acústico ya mencionado, dicha atenuación es lograda por medio de absorbentes. Esto hace que los estudios tratados acústicamente no sean el espacio ideal para buscar energía acústica residual, aun así, un porcentaje de esta energía está presente y puede ser aprovechada.

Para nuestro primer ejercicio de mediciones se hizo uso de:

1) Sonómetro previamente calibrado con un pistófono a una frecuencia de 1 KHz y presión sonora de 94 dB SPL.
2) Microfono de medicion omnidireccional.
3) Software de medición acústica (smaart V7.0).
4) Sistema de audio 2.1 calibrado a 79 dB SPL. (estudio Foley).

El procedimiento fue el siguiente:

Se genero audio con los parlantes del estudio localizando el micrófono de medición en diferentes disposiciones en el espacio, siempre manejando el mismo nivel de presión sonora para cada disposición el cual fue 79 dB SPL debido a que este nivel es usualmente usado en la industria para mezcla de audio.

Para las mediciones se usaron dos tipos de referentes de audio, el primero fue ruido blanco, el cual era la mejor opción de ruido debido a que presenta la misma densidad espectral para todas las bandas, con lo que se podría medir la energía acústica real que estaba presente en el espacio, lo que no se lograría con ruido rosa pues este presenta mayor energía para bandas de frecuencias bajas. El segundo referente fue la música, para lo cual se usaron diferentes géneros, Trap, Reggaeton y House, ya que presentan en sus mezclas un amplio espectro frecuencial y especialmente bastante energía en las bandas de frecuencias medias - bajas.
A continuación se muestra cada una de las mediciones en Smaart V7 con sus respectivos posicionamientos en el cuarto:

Posición 1:

Fig.30a: *Micrófono de medición ubicado en la posición 1.*

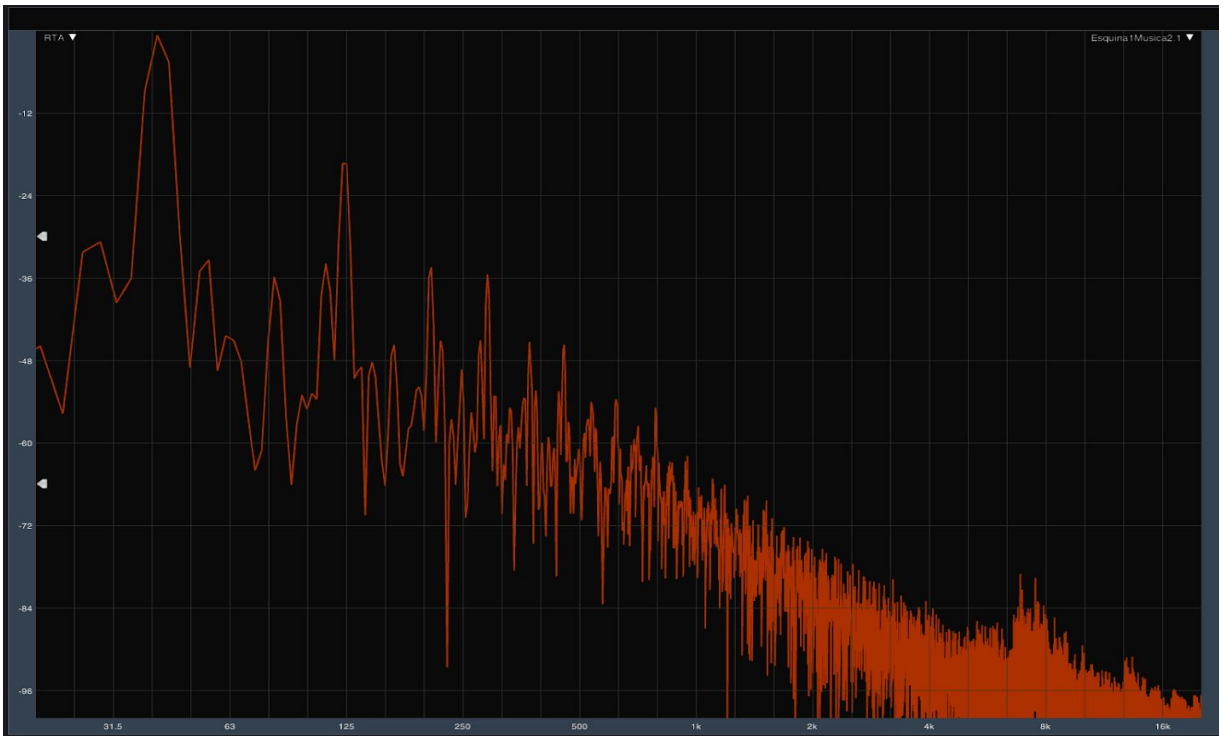

Fig.30b: Medición de posición 1 con música en sistema de audio 2.1.

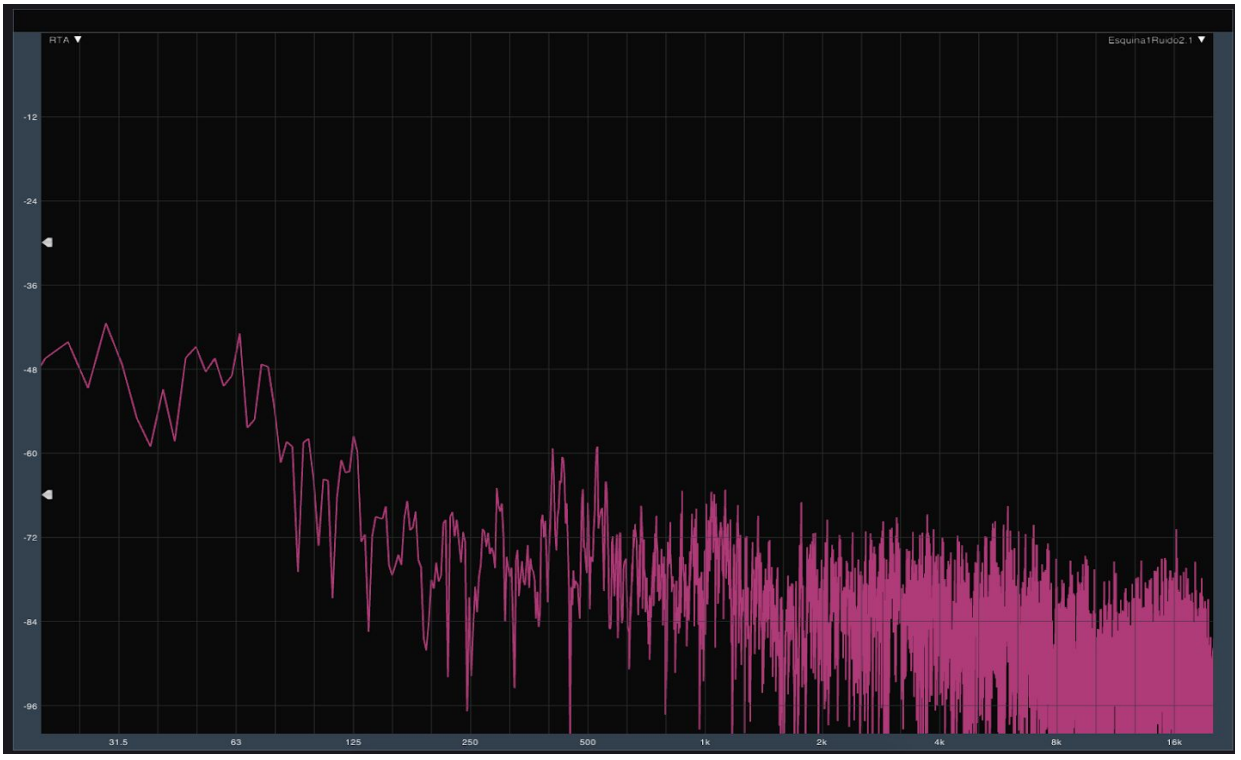

Fig.30c: Medición de posición 1 con ruido blanco en sistema de audio 2.1.

Posición 2:

Fig.31a: Micrófono de medición ubicado en la posición 2.

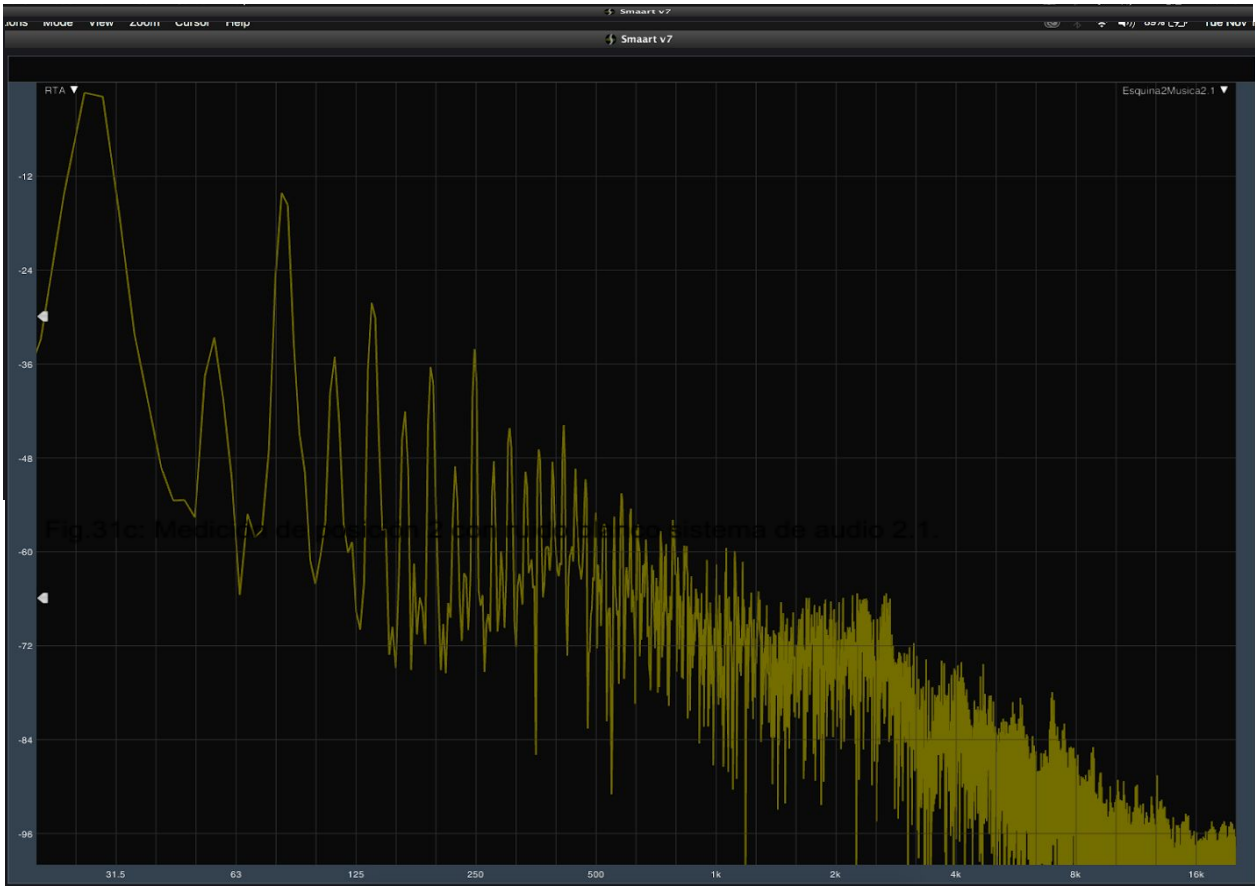

Fig.31b: Medición de posición 2 con música en sistema de audio 2.1.

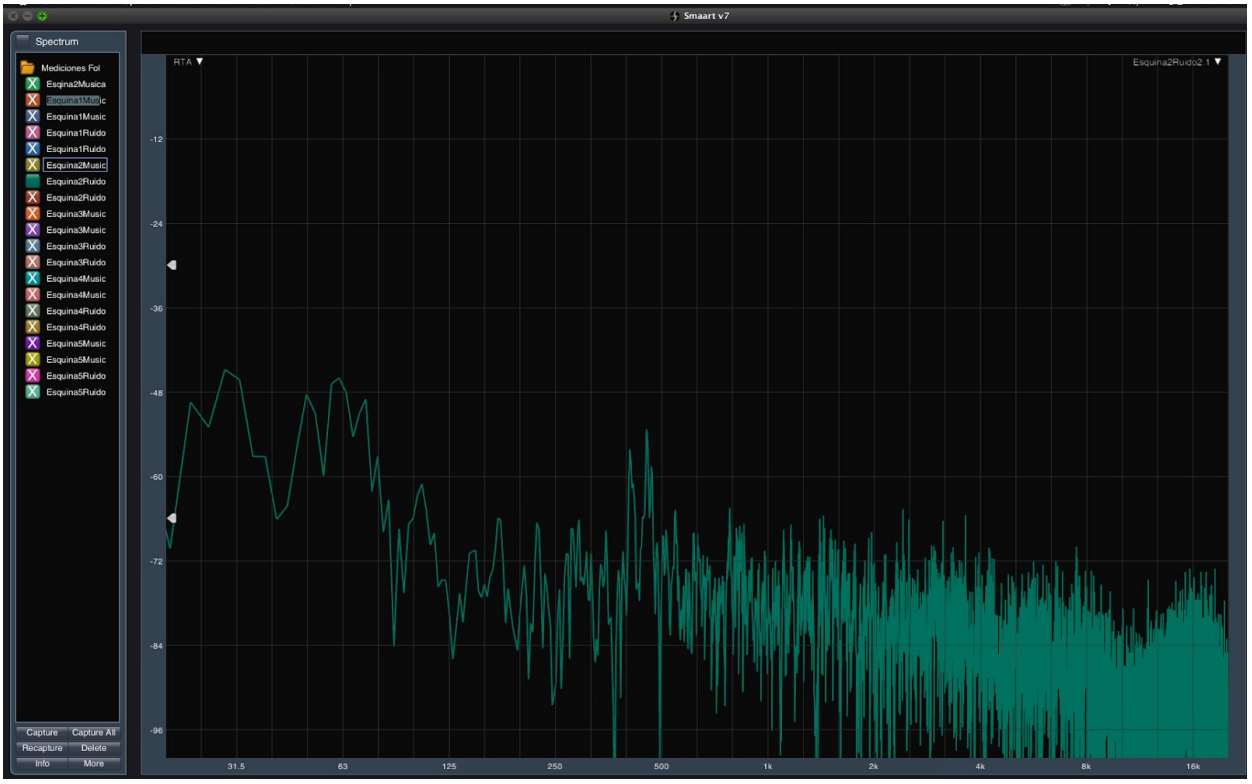

Fig.31c: Medición de posición 2 con ruido blanco en sistema de audio 2.1.

Posición 3:

Fig.32a: Micrófono de medición ubicado en la posición 3.

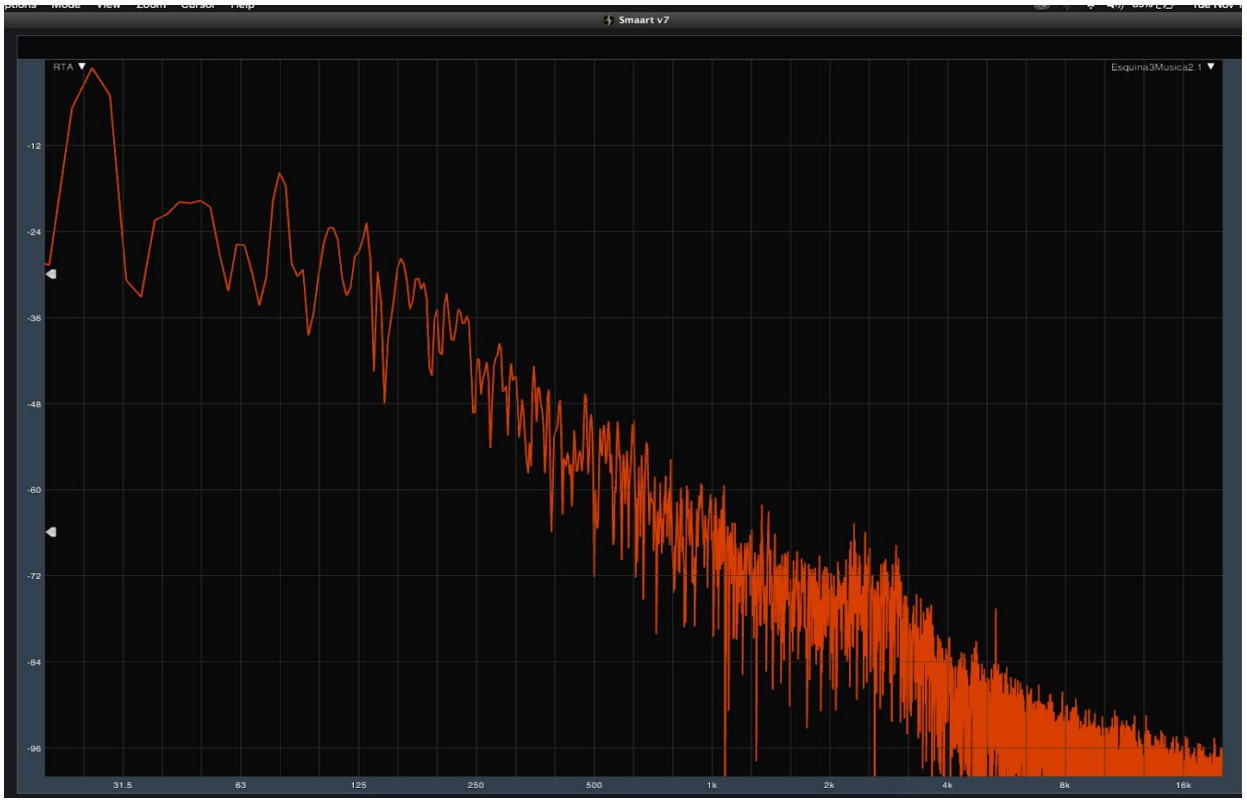

Fig.32b: Medición de posición 3 con música en sistema de audio 2.1.

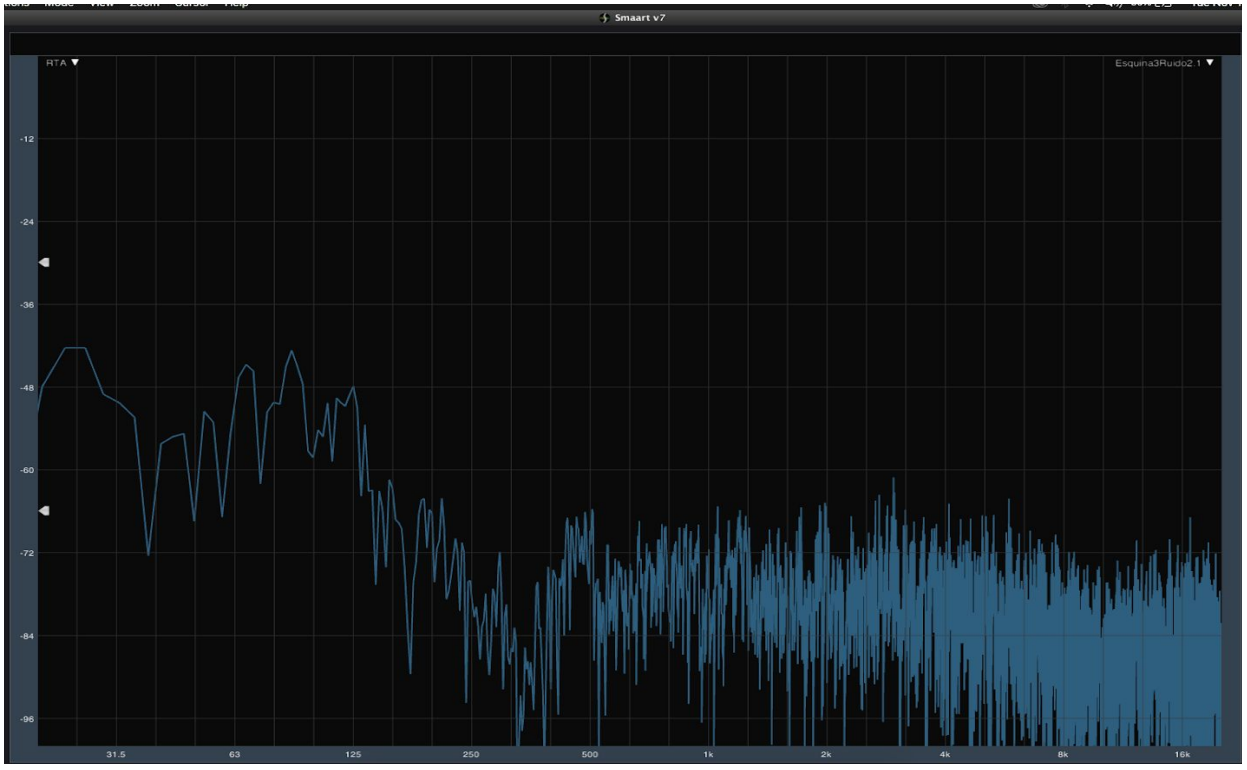

Fig.32c: Medición de posición 3 con ruido blanco sistema de audio 2.1.

Posición 4:

Fig.33a: Micrófono de medición ubicado en la posición 4.

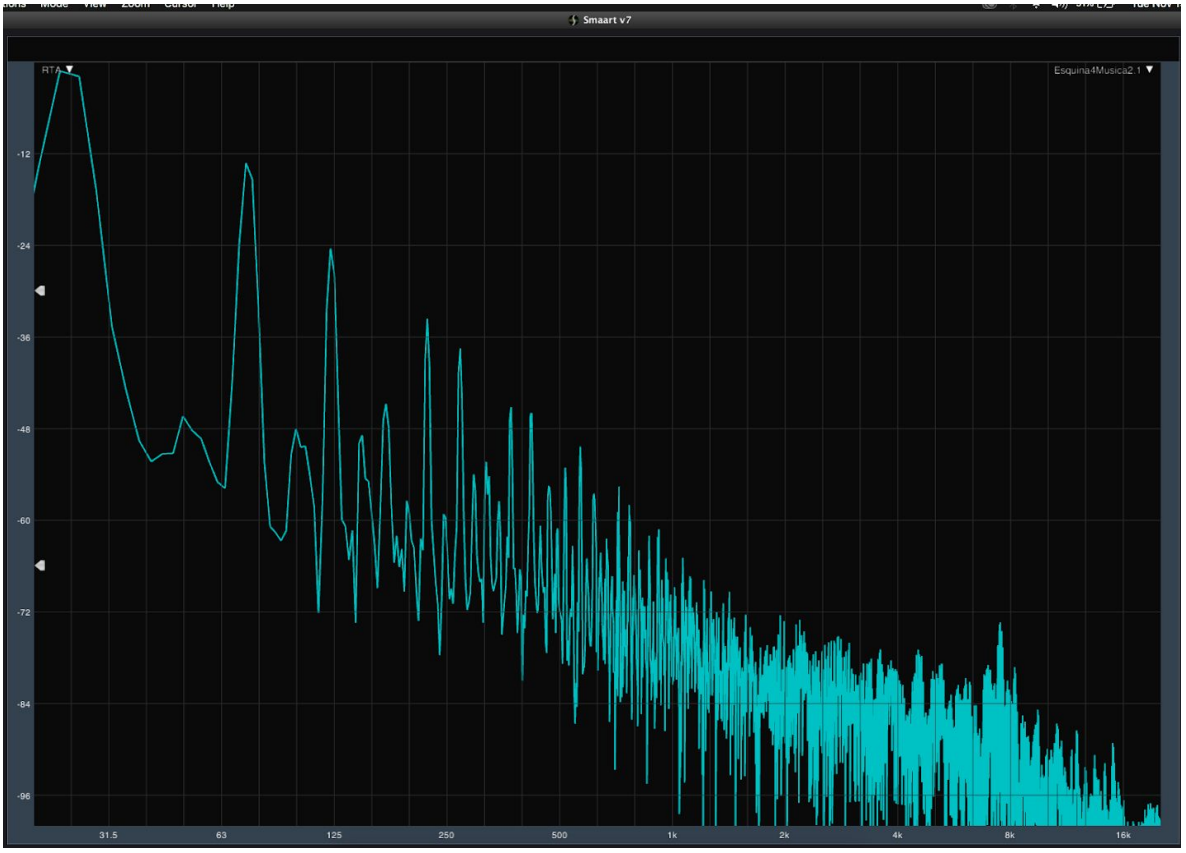

Fig.33b: Medición de posición 4 con música en sistema de audio 2.1.

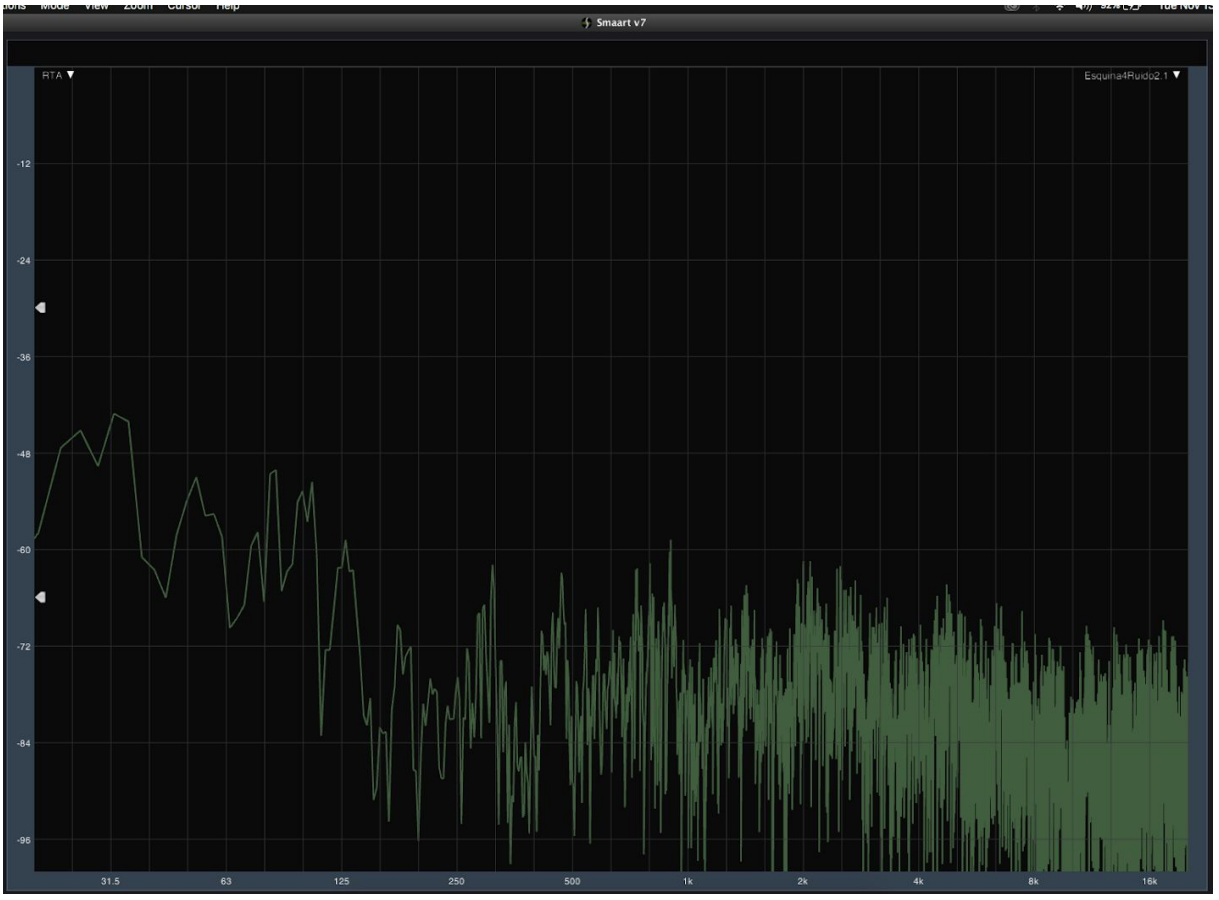

Fig.33c: Medición de posición 4 con ruido blanco sistema de audio 2.1.

Posición 5:

Fig.34a: Micrófono de medición ubicado en la posición 5.

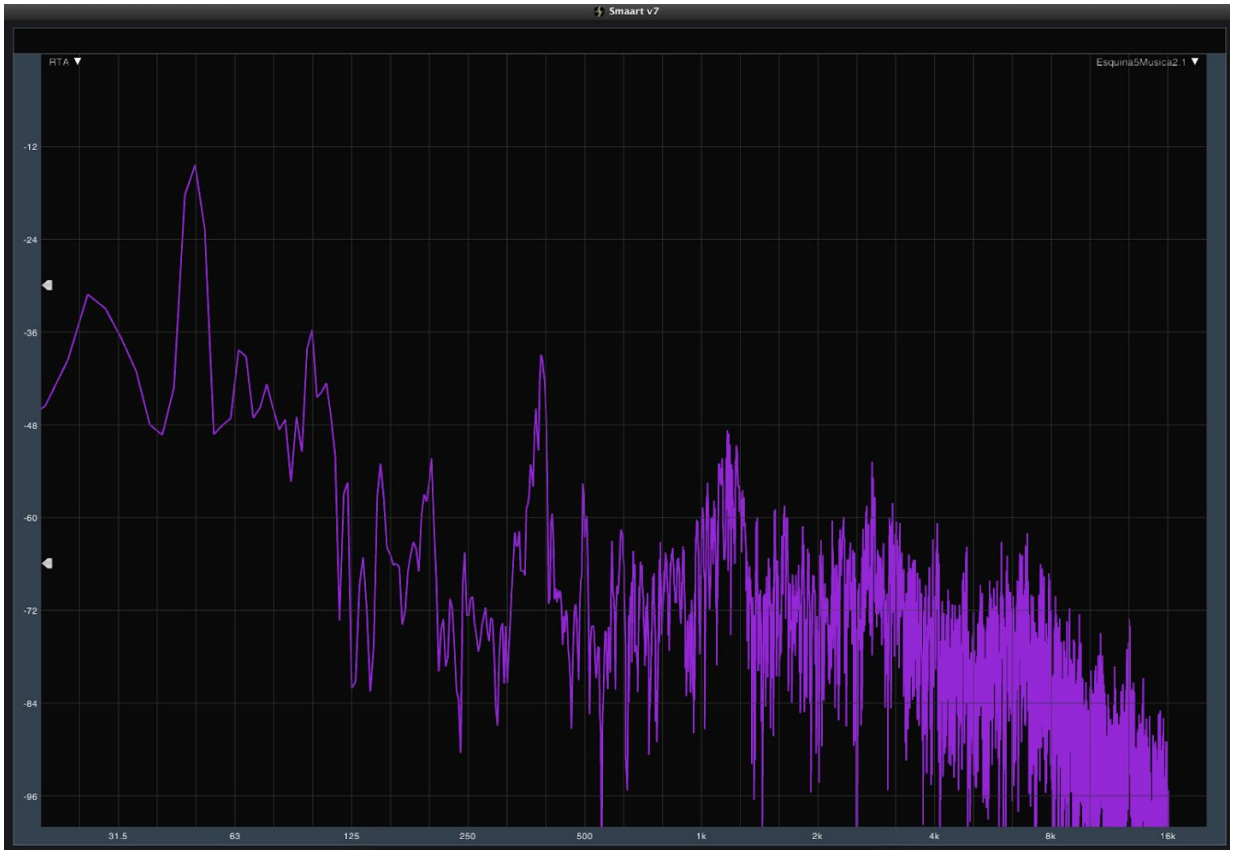

Fig.34b: Medición de posición 5 con música en sistema de audio 2.1.

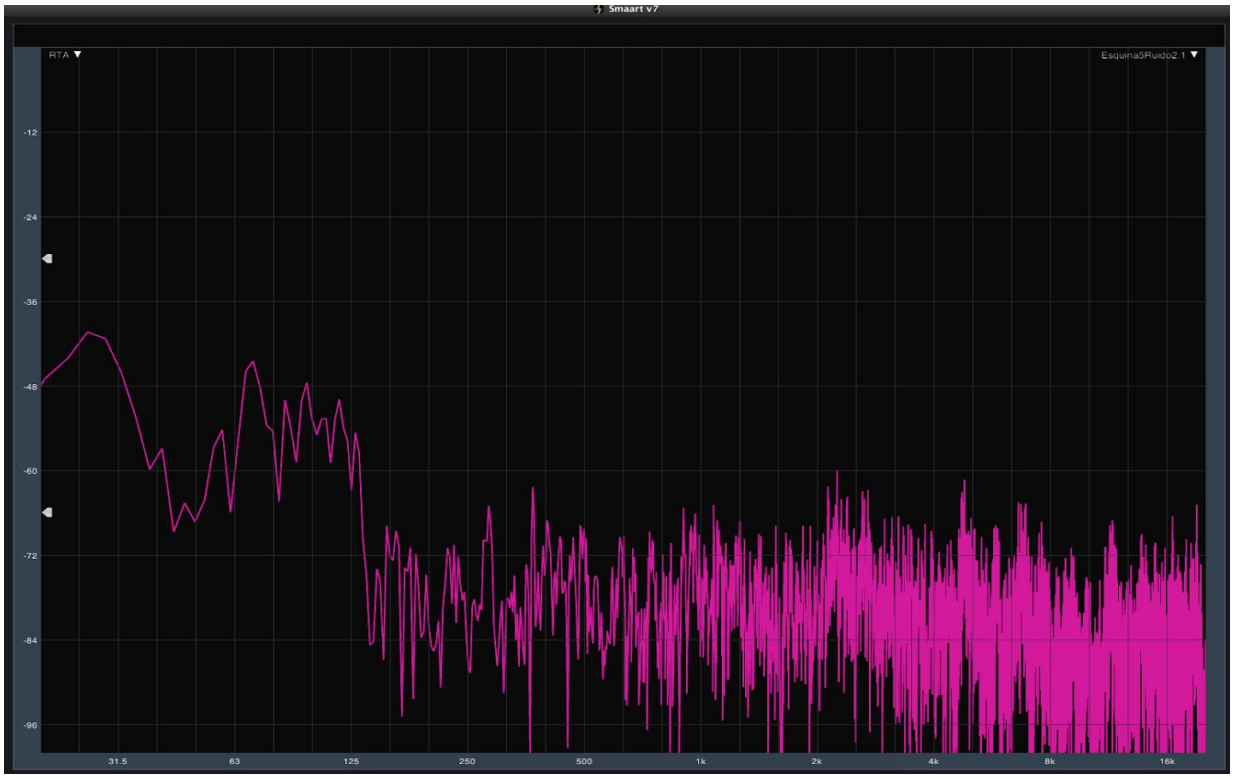

Fig.34c: Medición de posición 5 con ruido blanco en sistema de audio 2.1.

Debido a que la energía de las frecuencias graves se distribuyen en muchas direcciones a diferencia de las frecuencias agudas, su energía en la sala estaba concentrada en los rincones y especialmente en las esquinas, donde la interacción de los modos normales axiales, tangenciales y oblicuos hace que estas posiciones presenten mayor energía acústica, lo que hace de estos puntos, ubicaciones ideales para la captacion de energia acustica residual.

Comparando cada una de las posiciones entre sí, con ruido blanco y con música, se puede observar que la posición con más energía acústica residual es la posición tres, pues en ella la banda entre los 60Hz y los 100Hz siempre presenta mayor nivel energético tanto con ruido blanco como con música, y que hacía la banda de 125 Hz la concentración energética empieza a decrecer. Esto tiene sentido pues debe recordarse que en una sala entre más perpendicular sea una esquina mayor será la interacción de todos los modos normales, justamente en esa posición dicha esquina está hecha de material reflectivo y con un ángulo de casi 90°. Probablemente las irregularidades en las paredes y techo de las otras posiciones sumado a su terminado con paneles absorbentes, hacen que la concentración energética allí fuera menor.

Al analizar estos resultados se puede definir que para la mayoría de casos las frecuencias de de 80 Hz y 100 Hz van a estar presentes en ese espacio, por lo cual se decidió realizar un resonador con una frecuencia central en 100 Hz. La mejor opción para dicho resonador era un panel absorbente diafragmático o resonador de membrana, esto debido a que se necesitaba usar la energía acústica para generar movimiento vibracional en un medio sólido, donde se pudieran captar dichas vibraciones mediante algún tipo de transductor mecánico - eléctrico, tal y como ocurre en cierto tipo de micrófonos, como los de bobina móvil o los micrófonos piezoeléctricos. Un panel resonador de membrana logra cumplir esta función por lo que fue elegido y diseñado de tal forma que se adaptara a las condiciones espaciales de la sala.

Para su realización se debieron definir las dimensiones del mismo, sin embargo antes fue necesario investigar los tipos de maderas existentes en el mercado que pudieran ser funcionales y además económicos, pues este último factor fue una variable importante para el desarrollo del proyecto.

Después de varias reuniones con docentes y profesionales en Luthería, se encontraron tres tipos de madera usadas convencionalmente para la creación de estos dispositivos acústicos de las cuales una era de carácter profesional pero con un costo elevado y las otras dos opciones eran asequibles pero con un rendimiento menor:

1. Pino Abeto.
2. MDF.
3. Triplex o Aglomerado.

El Pino Abeto era una opción costosa pues esta madera debe ser importada de países del hemisferio norte, como Estados Unidos, Rusia o Canadá, el Triplex por otro lado es un material poco costoso pero al analizar su estructura se llegó a la conclusión que no es tan eficiente pues presenta una densidad irregular debido a que es un cúmulo de astillas de madera, afectando así las propiedades acústicas del material. Por ende se escogió la madera MDF pues es un material poco costoso, fácil de encontrar y con propiedades físicas interesantes para el uso en trabajos acusticos. En primer lugar presenta una densidad uniforme, lo cual garantiza una distribución energética vibracional uniforme en toda su superficie, en segundo lugar presenta una resistencia a la flexión baja, importante si lo que se quiere es transmitir energía acústica a su estructura, y en tercer lugar presenta una rigidez considerable lo que lo hace un material robusto para trabajos en baja frecuencia acústica. Es decir es el MDF es un material rígido pero flexible, lo que lo hace perfecto para la construcción de paneles acústicos.

Sabiendo esto, se procedió a la compra del material, para lo cual se hizo una cotizacion de varios almacenes de maderas, finalmente se optó por el almacén Homecenter cuyos precios eran los más cercanos al presupuesto inicial. Un problema práctico a la hora de construir el panel fue que según la fórmula (9), se debe saber la Masa por unidad de superficie del material a usar, sin embargo, normalmente en los almacenes de maderas solo se dan las dimensiones volumétricas de las láminas y su densidad (Kg/m^3), por lo que se debió hacer una relación física para encontrar los valores correctos. La lámina óptima para la construcción del panel tenía unas medidas de 0,80 m x 1,20 m, con un grosor de 0.0055 m y una densidad (ρ) de 720 Kg/m^3 de tal forma que la siguiente fórmula daría la relación necesaria:

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad (14)$$

De esta fórmula se obtiene que:

$$m = \rho \,.\, L \,.\, A \,.\, G$$

Donde m es la masa de la lámina de MDF en Kg, L el largo, A el ancho y G el grosor, reemplazando los valores:

$m = 720\ \frac{Kg}{m^3}$. 0,80 m . 1,20 m . 0,0055 m

$m = 3{,}8016$ Kg

Con este valor ya se puede saber el valor de la masa por unidad de superficie M en Kg/ m^2 de la fórmula (9) :

$$M = \frac{m}{L \,.\, A}$$

$M = 3{,}8016$ Kg . 0,80 m . 1,20 m

$M = 3{,}96$ Kg/ m^2

Y así finalmente se puede determinar la frecuencia de resonancia deseada para el panel por medio de la fórmula (9), como la masa por unidad de superficie no puede cambiarse pues ya está determinada por las propiedades y dimensiones de la lámina, sólo puede variarse de la fórmula la profundidad del panel para buscar la frecuencia deseada, para este caso se decidió una profundidad de 9 cm:

$$f = \frac{60}{\sqrt{3{,}96\ \frac{Kg}{m^2} \,.\, 0{,}0909\ m}}$$

$$f = 100\ Hz$$

Con este razonamiento se procedió a construir el panel con ayuda de un carpintero, cuya experiencia fue fundamental para la obtención de un panel de calidad (ver Fig.35).

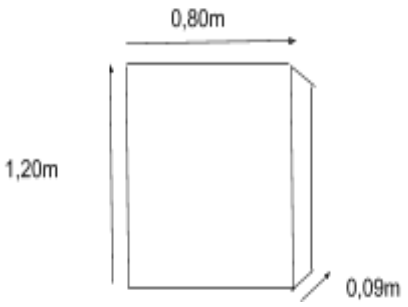

Fig.35: A la izquierda esquema del panel para diseño.

Prueba de modos normales del panel:

Una vez construido nuestro panel resonador, se optó por realizar una experimentación que diera una idea del comportamiento de la placa respecto a la señal incidente, para así poder saber los puntos de mayor energía en la placa para ubicar posteriormente los transductores acústico-eléctricos, para ello usamos el DAW Pro Tools con el cual se generó una onda seno de 100 Hz a una presión sonora cercana a 79 dB SPL, también usamos granos finos de un multivitamínico, y con ayuda de 2 bases en madera apoyamos el panel de modo que el Subwoofer quedara debajo del resonador y pudiese incidir e interactuar con la membrana.

En esta primera etapa colocamos un contacto entre el parlante y el centro de la placa buscando recrear las figuras de Chladni (patrones formados por una sustancia granular sobre una superficie plana vibrando en un modo propio), sin embargo esta aproximación no fue efectiva dado que el tubo no tenía la su superficie pegada al cono de la bocina pues esta estaba dentro de la caja acústica, lo que hace que su vibración no fuera coherente con las vibraciones generadas, por ello decidimos cambiar el punto de interacción del parlante con el prototipo ubicándolo en la parte superior aunque sin contacto en la membrana, aquí efectivamente se pudo concentrar una mayor parte de la energía y se pudo emular los modos normales de la placa con sus respectivas componentes, de este modo, en 100 Hz obtuvimos

una subdivisión de la placa en seis partes iguales, para 80 Hz en cuatro partes y en 60 Hz en dos partes.

Podría decirse entonces que como todo instrumento acústico, este panel acústico es consecuente con las propiedades de modos normales. Así, para medir se empezó con el uso de sal, se pasó por la levadura y finalmente fue el multivitamínico Tarrito Rojo de JGB con el que mejor se divisaron los modos, adaptándose a las condiciones de la experimentación dado a sus propiedades físicas pues es un compuesto con una alta densidad, notoriamente visible por su coloratura y bastante liviano (ver Fig.36).

Fig.36: Trabajo de obtención de modos normales del panel.

En ese orden de ideas los resultados obtenidos son mostrados a continuación:

Fig.37: Modos normales para 60 Hz, 80 Hz y 100 Hz respectivamente.

Si se comparan estos resultados con alguna simulación por computador de una placa rectangular se obtendrá una similitud apreciable:

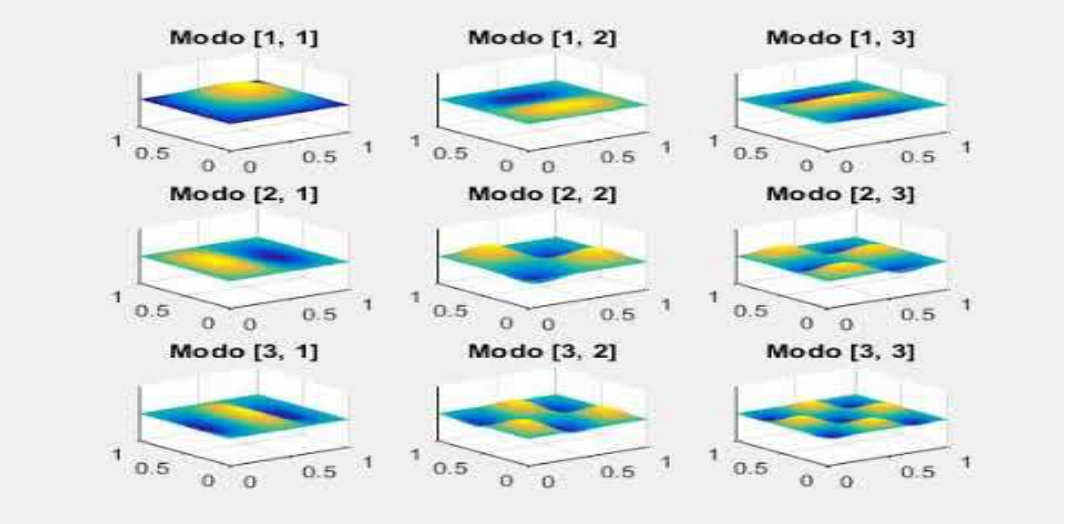

Fig.38: *Simulación de modos normales para una placa rectangular lograda en MatLab.*

Con estos resultados fue sencillo escoger los puntos en la membrana donde se ubicarían los transductores, pues los puntos donde se ubican los máximos de los antinodos son los que tienen la mayor presencia energética en la placa; Ahora bien, aunque la placa tenía su máximo de resonancia en 100Hz, con esta frecuencia se produce el modo [3,2], esto quiere decir que se deberían usar seis transductores, el problema es que el contacto de tantas masas inerciales podía debilitar la vibración de la membrana, dando como resultado la obtención de menos energía eléctrica, en cambio la frecuencia de 80Hz no estaba muy alejada del pico de resonancia y con ella se obtuvo el modo normal [2,2], por ende si se usaba esta frecuencia, menos masas inerciales incidirán en la placa, además en la sala la banda de 80 Hz siempre presenta mayor concentración energética que 100Hz, por esta razón se decidió trabajar la banda de 80Hz sin necesidad de diseñar un panel nuevo.

5.2 Fase 2 : Estudio del dispositivo de transducción acústico-eléctrica:

Una vez definido el recolector acústico, fue necesario empezar a buscar la mejor alternativa de transducción acústico-eléctrica, se pensaron varias opciones entre ellas el uso de una bobina móvil que afecte un campo magnético al moverse por acción de la membrana, sin embargo esta opción era inviable debido a que para producir corrientes apreciables debía tenerse una bobina con bastantes espiras, y por ende bastante pesada, lo que afectaría la vibración de la membrana. De manera que, la opción más factible era el uso de sensores piezoeléctricos pues son dispositivos livianos y además captan las ondas mecánicas de un medio sólido bastante bien, los sensores piezoeléctricos eran una opcion economica tambien, asi que se realizó un pedido directamente desde China para tener un número significativo de piezoeléctricos de gran fiabilidad .

El siguiente paso fue caracterizar el micrófono piezoeléctrico, es decir hacerse una idea previa de cómo sería su respuesta a diferentes estímulos sonoros en diferentes espacios, para esto se emplearon diferentes montajes:

- *Primer montaje:*

Para la experimentación con el primer montaje se utilizaron los siguientes materiales:

1. Osciloscopio.
2. Multímetro digital.
3. Parlante yamaha 500 Watts.
4. Placa de madera .
5. Microfono piezoelectrico.

Para esta experimentación se ubicó el disco piezoeléctrico perpendicular a la placa de madera, y adherido con un pegante epóxico al borde de la misma (ver Fig.39), después se inició un barrido de frecuencias iniciando desde 80 Hz, en principio se utilizó

Fig.39: Primer montaje.

el osciloscopio para ver la señal entregada por el piezoeléctrico pero esta tenia mucho ruido, por tal motivo se procedió a medir con el multímetro en una distancia del parlante de 10 cm.

Los resultados obtenidos en esta prueba están consignados en la siguiente tabla:

Frecuencia (Hz)	Voltaje (mV)
80	420
160	184
320	32
500	111
800	70
1000	45
2000	33
3000	27

Tabla 4: Frecuencia contra voltaje para el primer montaje.

Algo muy interesante que ocurrió en este montaje es que el piezoeléctrico respondía a la frecuencia de resonancia de la placa de madera a la cual estaba adherido, esto se aprecia en el pico de voltaje que se ve en 80 Hz, el cual después decrece. Nuevamente en 500 Hz hay un pico pero no tan pronunciado, lo que hace pensar que la frecuencia de resonancia del piezoeléctrico en este caso está dependiendo del montaje en general, lo cual era beneficioso para el montaje en el panel resonador.

- *Segundo montaje:*

Para el segundo montaje se decidió usar dos distancias entre el montaje y el parlante, estas fueron 10 cm y 50 cm, esta vez se decidió usar un tubo de PVC para apoyar de forma efectiva el disco por el borde, dejando al aire el centro del mismo (ver Fig.40).

Por supuesto, se usó el mismo nivel de presión sonora usado en el primer montaje, los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Fig.40: Segundo montaje a 50 cm del parlante

Frecuencia (Hz)	Voltaje para distancia de 10 cm	Voltaje para distancia de 50 cm
80	60	30
160	70	33
320	82	40
500	88	44
800	190	47
1000	240	140
2000	250	420
3000	190	140
5000	23	26

Tabla 5: Frecuencia contra voltaje para el segundo montaje.

Lo interesante de esta segunda prueba, es que se encontró el pico en la frecuencia de resonancia que se esperaba para este tipo de sensor piezoeléctrico, esta se halla en la banda de 3KHz y en el experimento dio en una frecuencia cercana (2KHz), con un voltaje tan significativo como 420 mV para una distancia de separación de 50 cm.

Con estos resultados en mente, el paso siguiente fue hacer experimentación con el piezoeléctrico apoyado directamente en la membrana del panel resonador, dicha experimentación fue llevada a cabo en el laboratorio de pruebas (que no tiene una adecuación acústica rigurosa), esta experimentación se dividió en tres posicionamientos:

-Disco piezoeléctrico apoyado en su totalidad:

En esta primera prueba, la superficie posterior del disco (es decir la parte de laton) fue apoyada en su totalidad haciendo contacto con la membrana, así mismo se ubicó en un punto antinodal encontrada en la prueba de modos normales, esta prueba se llevó a cabo con una onda sinusoidal de 80Hz y música, los resultados fueron los siguientes:

- Música (Chanel go get it (Young Thug)) : 12 mV RMS.

- Onda seno: 40 mV RMS a 80Hz.

-Disco piezoeléctrico perpendicular apoyado solo en un extremo:

El segundo experimento se basó en poner el micrófono de manera paralela a la membrana pegando solo uno de sus extremos a la misma, lo que hacía que la mayoría del disco quedara al aire, suponiendo que los movimientos de aire interno afectaría el comportamiento del dispositivo, los resultados fueron los siguientes:

- Musica: (Chanel go get it(Young Thug)) : 11 mV RMS.

- Onda seno: 30 mV RMS a 80 Hz.

-Disco piezoeléctrico sobre un tubo de PVC y con resorte en el centro:

En esta última prueba, se decidió construir un sistema en el cual el disco piezoeléctrico estuviese apoyado sobre el tubo de PVC, con un resorte en el centro cuya función era realizar el máximo esfuerzo posible al centro del micrófono con respecto al apoyo del borde, esto permitia que al estar el resorte apoyado sobre la membrana y levemente comprimido, la energía se transfiriera mecánicamente de la membrana al piezoeléctrico, debido a que el resorte es una masa elástica, tiene un modo de oscilación propio que es necesario tener en cuenta, sin embargo dicho resorte no presenta una resistencia significativa al movimiento de la membrana como sí lo haría un apoyo fijo, como un palillo de madera o algo parecido, por tal motivo se procedió a medir dicho sistema (ver Fig.41).

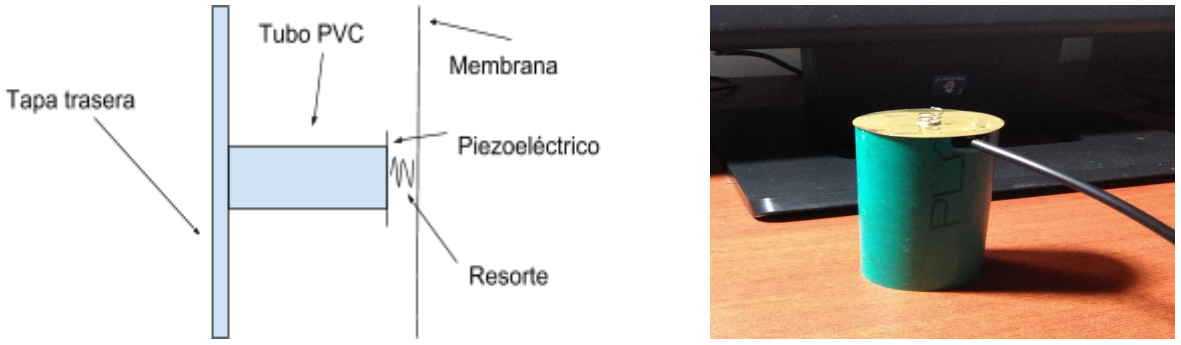

Fig.41: A la izquierda, esquema de construcción del tercer montaje, a la derecha, sistema de transducción acústico-eléctrica final.

Los resultados obtenidos, que fueron sorprendentes, son los siguientes:

- Musica: (Chanel go get it (Young Thug)): 300 mV RMS.

- Onda seno: 1.3 V RMS a 80 Hz.

Se realizó una última prueba que consistió en construir una especie de cápsula que compartiera en ambas caras un micrófono piezoeléctrico (ver Fig.42), así, una de ellas acumlaria el movimiento de la membrana resonante delantera y el otro el de la tapa trasera;

Fig.42: Sistema de transducción acústico-eléctrica con dos piezoeléctricos.

sin embargo, esto no fue efectivo debido a que el resorte trasero amortiguaba el movimiento del sistema, cancelando así el esfuerzo ejercido de las membranas sobre los piezoeléctricos.

De este modo, el montaje escogido al final de este proceso fue el tercero, ya que generaba una transducción energética bastante considerable debido a su apoyo efectivo.

5.3 Fase 3: Montaje y análisis del sistema completo:

Esta última fase estuvo basada en los resultados encontrados en la primer y segunda fase, aquí se llevó a cabo el montaje completo y se realizaron pruebas para determinar la mejor forma de obtener energía con los montajes ya diseñados.

Debido a que en la prueba de modos normales se obtuvo para 80 Hz el modo [2,2], se decidió ubicar cuatro sistemas de transducción acústico-eléctrica, uno en cada máximo de los antinodos encontrados:

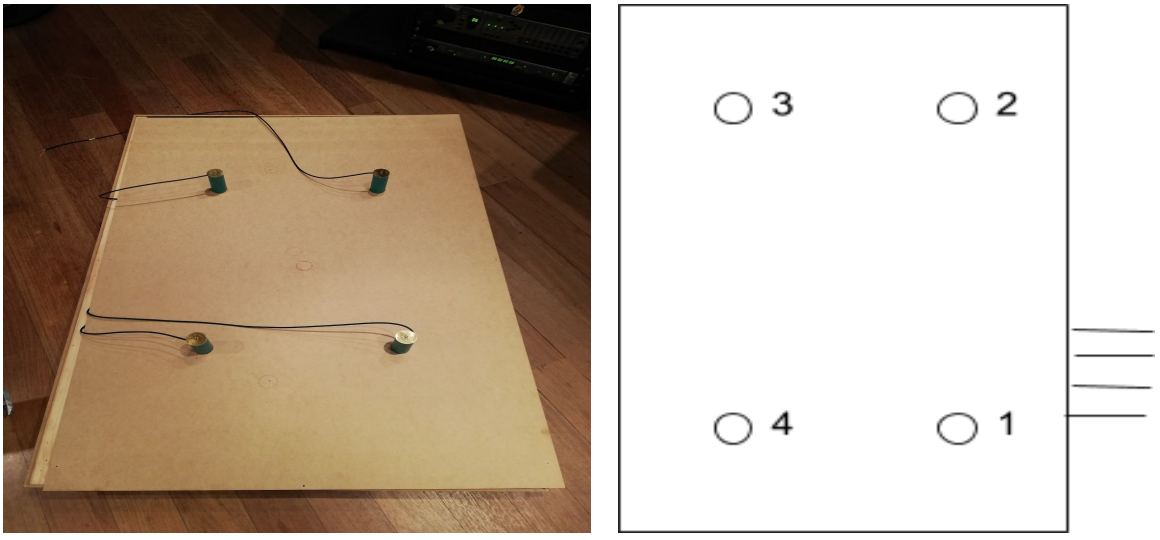

Fig.43: A la izquierda ubicación de los cuatro sistemas de transducción al interior del panel, a la derecha numeración de los mismos.

Una primera medición de voltaje con una onda de 80 Hz a 79 dB SPL de esta disposición arrojó los siguientes resultados:

-Micrófono 1: 0,8 V RMS.
-Micrófono 2: 1,3 V RMS.
-Micrófono 3: 1,7 V RMS.
-Micrófono 4: 0,7 V RMS.

Después, se quiso probar poniendo cuatro sistemas de transducción mas, a 5 cm de los primeros sistemas, los resultados fueron muy inferiores:

-Micrófono 1: 0,3 V RMS.
-Micrófono 2: 0,2 V RMS.
-Micrófono 3: 0,7 V RMS.
-Micrófono 4: 0,8 V RMS.
-Micrófono 1a: 0,3 V RMS.
-Micrófono 2a: 1,2 V RMS.
-Micrófono 3a: 0,6 RMS.
-Micrófono 4a: 0,2 V RMS.

De este primer experimento se obtuvieron varias conclusiones, la primera es que al existir más masas inerciales en contacto con la membrana, esta pierde flexibilidad y por ende capta menos energía acústica, por ello el voltaje se reparte entre todos los sistemas de transducción generando una energía eléctrica total menor que con solo cuatro sistemas, la segunda conclusión obtenida es que la membrana no vibra exactamente igual en todos los puntos, sino que es dependiente de varios factores como la posición, su apoyo, las condiciones del lugar etc.

Con esto en mente, el paso siguiente fue medir las fases de cada uno de los cuatro micrófonos primero con una frecuencia de 80Hz, esto con el fin de saber el comportamiento de modos normales de la membrana con los sistemas de transducción en contacto y para determinar

cuales micrófonos podían ser conectados en paralelo y cuáles no, para esto se empleó un osciloscopio y los resultados fueron los siguientes:

-Micrófono 1 comparado con el 2: están en fase.

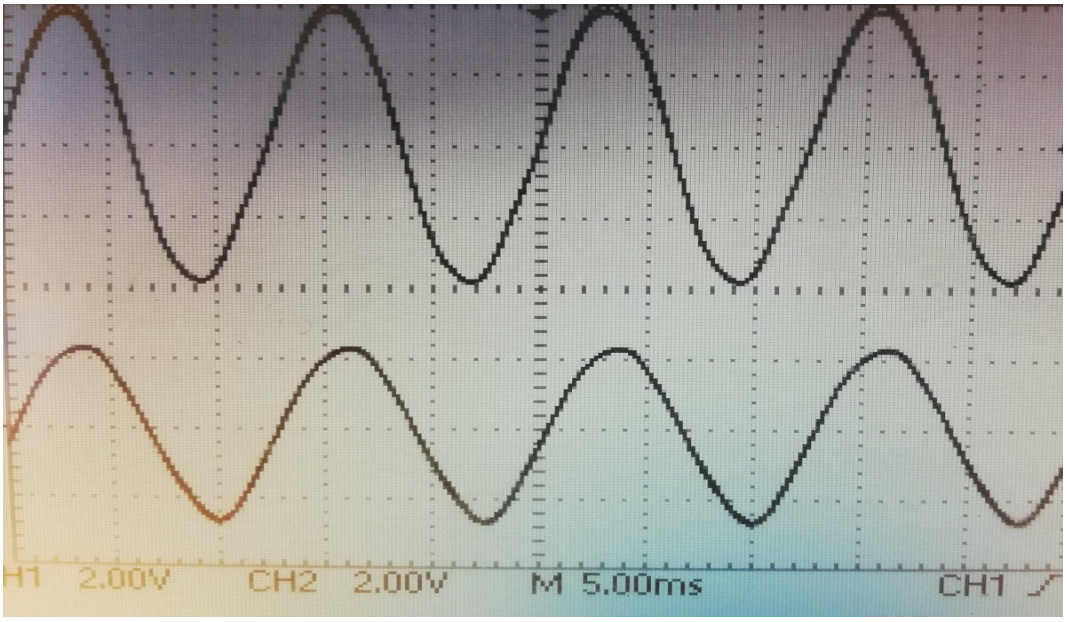

Fig.44: Comparación de fase micrófono 1 y 2.

-Microfono 3 comparado con el 4: están en fase.

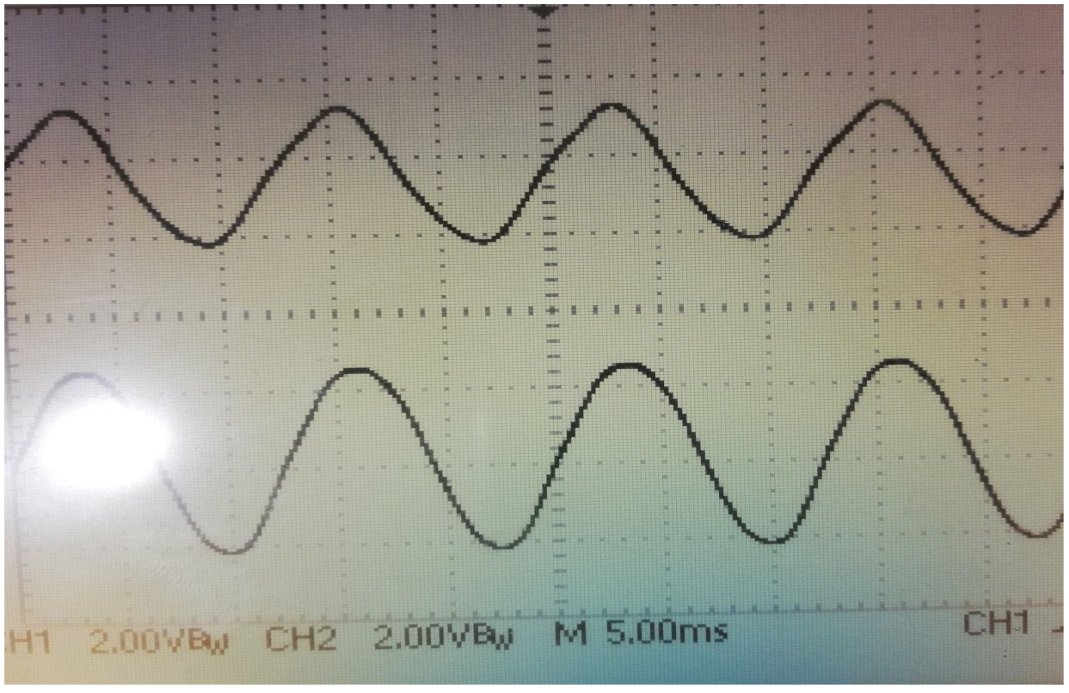

Fig.45: Comparación de fase micrófono 3 y 4.

-Micrófono 2 comparado con el 3: en fase.

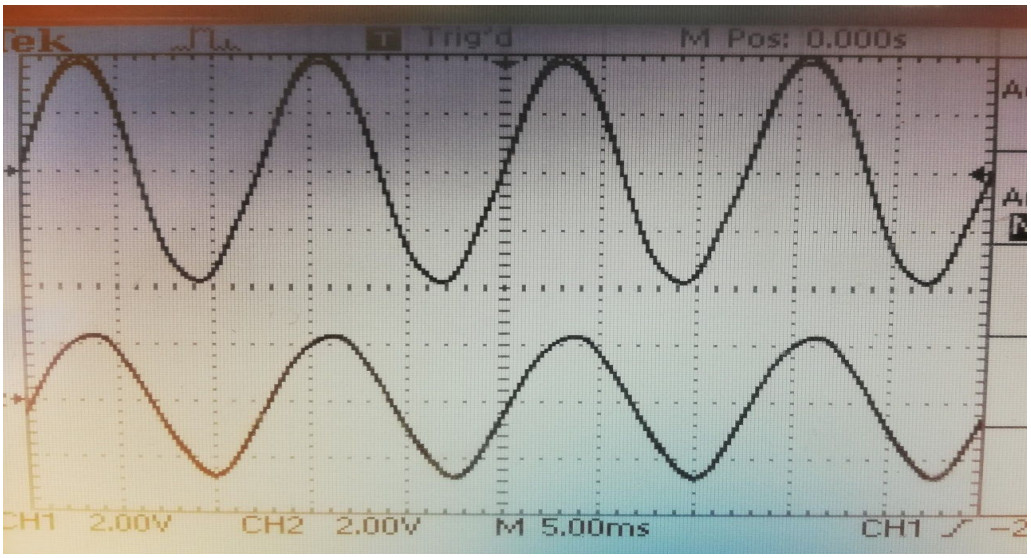

Fig.46: Comparación de fase micrófono 2 y 3.

-Micrófono 1 comparado con el 4: en fase.

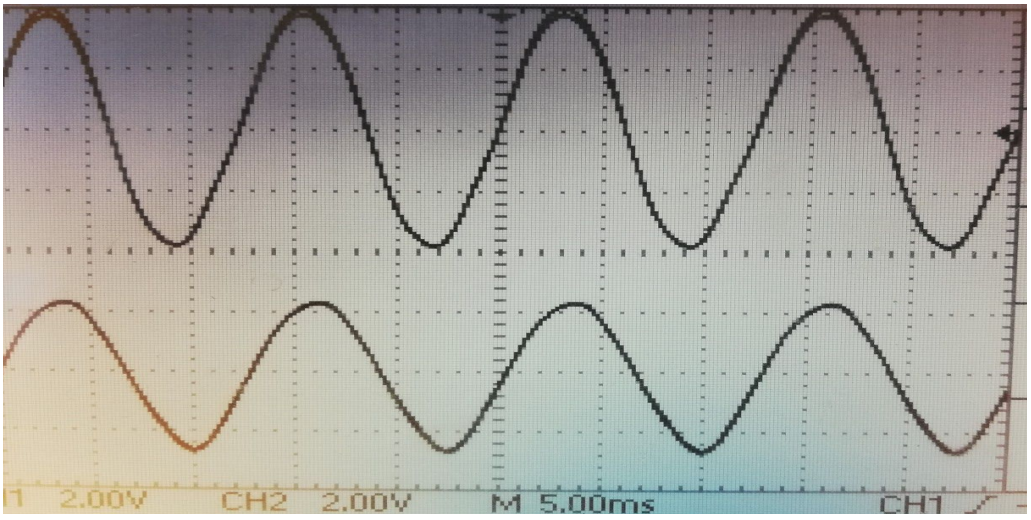

Fig.47: Comparación de fase micrófono 1 y 4.

Por supuesto este comportamiento de la placa es bastante inesperado pues en el modo de oscilación [2,2], mientras dos antinodos bajan los otros dos suben, según esta medición todos los antinodos estan moviendose de igual manera, lo que no concuerda con la teoría, por ello

fue necesario realizar más mediciones de fase, pero ahora con tres micrófonos dispuestos en el centro de la placa como se muestra en la siguiente ilustración:

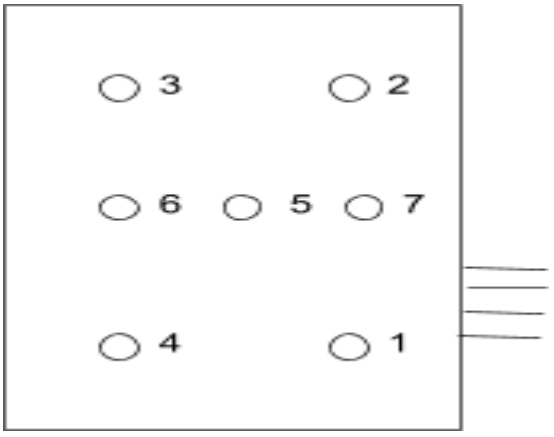

Fig.48: Adición de microfonos para medición de fases.

Los resultados fueron los siguientes:

-Micrófono 1 comparado con 7: en desfase.

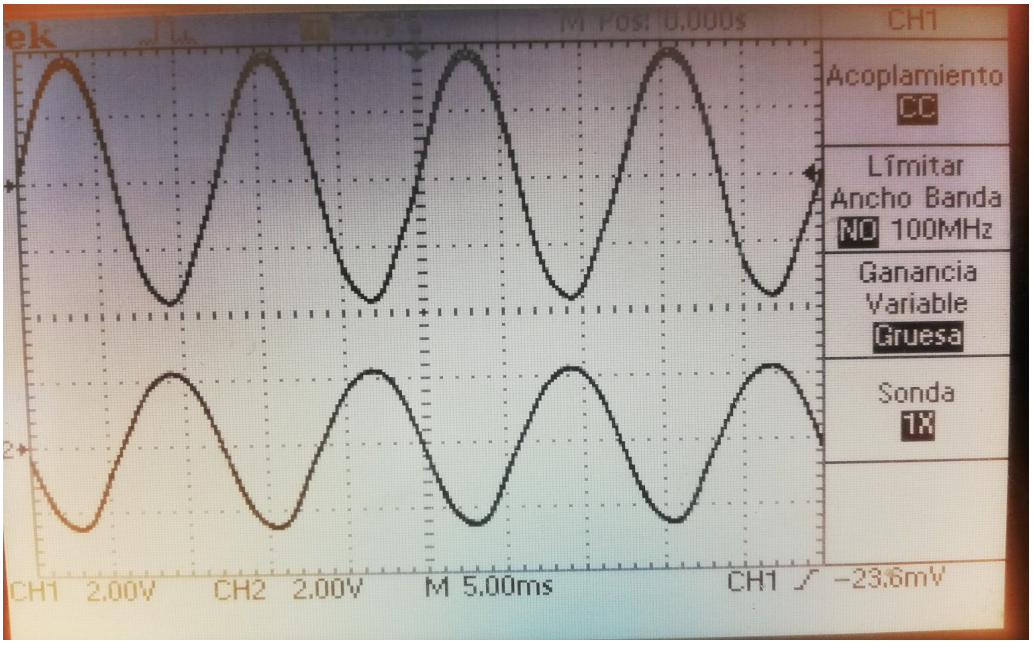

Fig.49: Comparación de fase micrófono 1 y 7.

-Microfono 4 comparado con 6: en desfase.

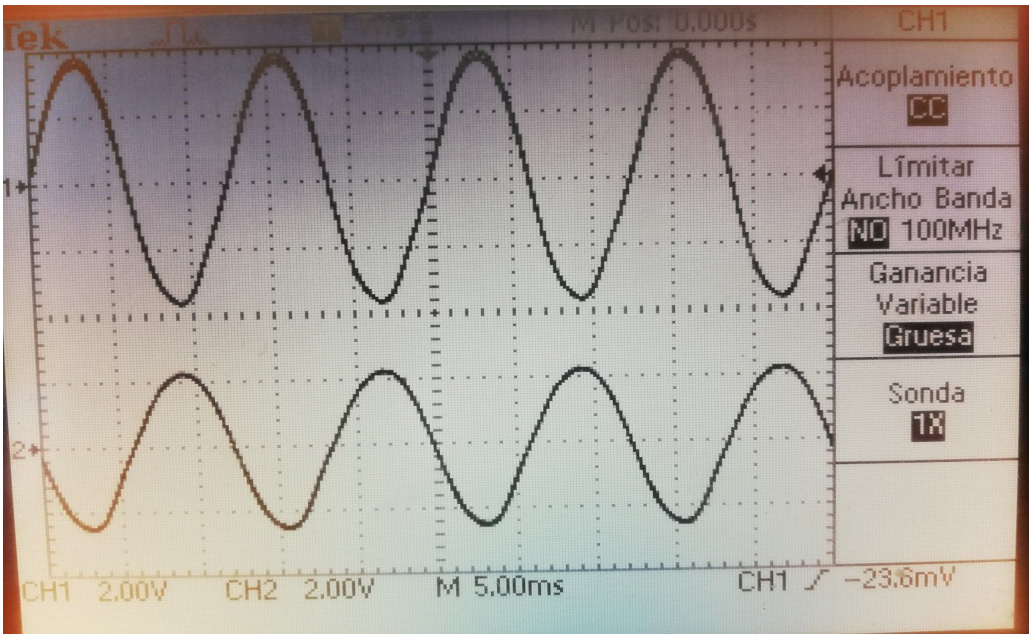

Fig.50: Comparación de fase micrófono 4 y 6.

-Micrófono 1 comparado con el 5: en desfase.

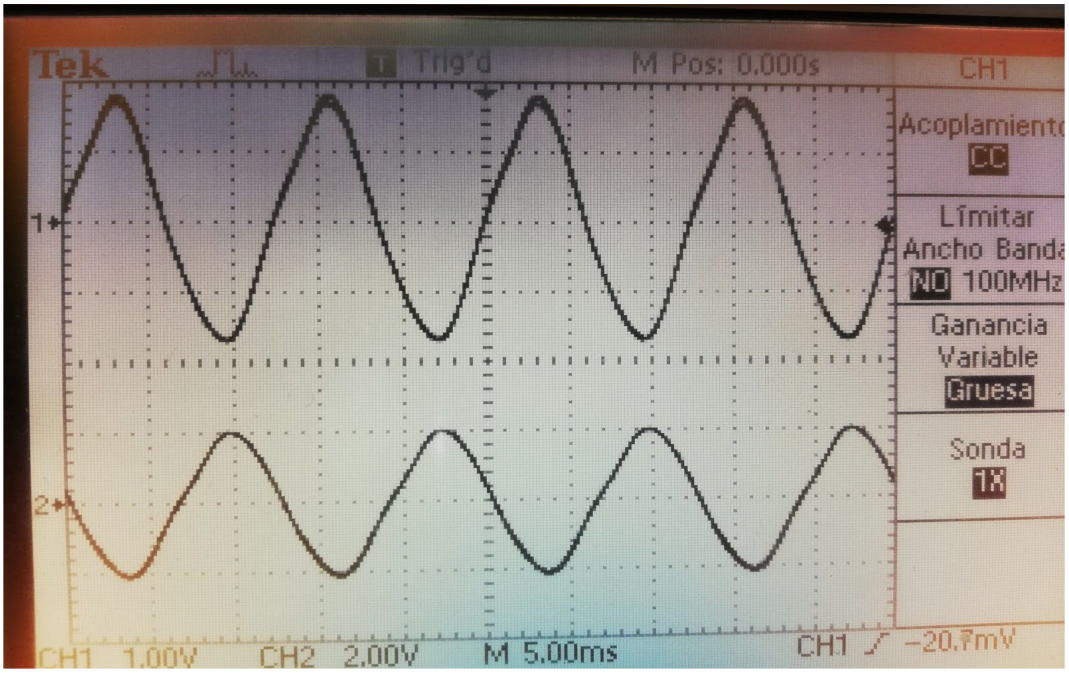

Fig.51: Comparación de fase micrófono 1 y 5.

Con estos resultados ya se puede tener una idea más clara de cómo está vibrando la placa al interior, al parecer la incidencia de las masas inerciales de los sistemas de transducción hace que la placa cambie su modo de vibración para una misma frecuencia, según la medición de fases, el sistema ahora está vibrando en un modo [3,1], donde los extremos se mueven en una dirección y el centro en la dirección contraria, por suerte, para este caso esto no afecta la captación energética en gran medida, por lo que se pudo continuar con el mismo montaje sin contratiempos.

Medición de potencia del sistema:

El Energy Harvesting se fundamenta en la obtencion de energias de muy baja magnitud, por lo cual es de esperar corrientes del orden de microamperios en sistemas basados en este concepto, por ello la importancia de tener un dispositivo capaz de extraer la máxima potencia posible del sistema, sin pérdidas apreciables de energía. Para ello se tenía pensado usar el Circuito Integrado BQ 25504, cuya arquitectura garantiza una eficiencia importante en la extracción energética. Sin embargo, antes de conectar dicho dispositivo era necesario conocer la curva de potencia que tenía el panel acústico, ello se podría lograr con la siguiente fórmula:

$$P = V \cdot I \qquad (15)$$

Este producto nos diría en qué punto hay una corriente máxima posible dependiendo de un voltaje determinado, es así que se decidió realizar un circuito básico que constaría del uso de una resistencia variable (en este caso un potenciómetro), para la medición se usó un multímetro digital para medir voltaje y corriente.

Antes de hacer las mediciones para hallar la curva de potencia, se quiso confirmar que efectivamente a 80Hz se tiene la mayor energía posible para la disposición de transductores piezoeléctricos ya mostrada, para ello se usaron una serie de frecuencias y se dejó una misma resistencia (3 KΩ), los resultados fueron los siguientes:

Microfono 1			
Frecuencia (Hz)	Resistencia (Ω)	Corriente (uA)	Voltaje (mV)
40	3000	1.5	3.3
60	3000	5.5	16
80	3000	32	97.5
100	3000	4.8	13.8
120	3000	9	28
160	3000	1.6	3.6

Tabla 6: Voltaje y corriente micrófono 1.

Micrófono 2			
Frecuencia (Hz)	Resistencia (Ω)	Corriente (uA)	Voltaje (mV)
40	3000	3	8.3
60	3000	10	30.6
80	3000	25	71.5
100	3000	5	16.6
120	3000	18	53
160	3000	3	7.1

Tabla 7: Voltaje y corriente micrófono 2.

Microfono 3			
Frecuencia (Hz)	Resistencia (Ω)	Corriente (uA)	Voltaje (mV)
40	3000	4	11.8
60	3000	9	31.8
80	3000	50	164
100	3000	11	12.6
120	3000	23	76
160	3000	3	8.1

Tabla 8: Voltaje y corriente micrófono 3.

Micrófono 4			
Frecuencia (Hz)	Resistencia (Ω)	Corriente (uA)	Voltaje (mV)
40	3000	2	6.4
60	3000	3	8.9
80	3000	60	182
100	3000	5	11.3
120	3000	9	27.3
160	3000	2	3.5

Tabla 9: Voltaje y corriente micrófono 4.

Todos los micrófonos en paralelo.			
Frecuencia (Hz)	Resistencia (Ω)	Corriente (uA)	Voltaje (mV)
40	3000	6	16
60	3000	20	61
80	3000	167	495
100	3000	24	72
120	3000	40	120
160	3000	2	8

Tabla 10: Voltaje y corriente para todos los micrófonos.

Como se puede observar en estas tabulaciones, en todos los casos la frecuencia de 80Hz es la que produce mayor resonancia en el sistema, cabe mencionar que estas pruebas se hicieron a un nivel de presión sonora de 79 dB SPL, y el ruido electrico era 0,07 mV y 1 μA.

Con estos resultados ya se podía entrar a determinar las curvas de potencia para el sistema, dicha experimentación se llevó a cabo en dos espacios distintos, por supuesto la señal todavia no habia sido rectificada por lo que las mediciones debieron hacerse en AC (corriente alterna) RMS.

Medición de potencia en laboratorio de pruebas (sin acondicionamiento acústico):

Para esta medición se usaron dos posiciones distintas basadas en dos paredes de la sala, la primera (pared amarilla) estaba ubicada al frente de la fuente sonora a unos 5 metros de distancia, la segunda (pared blanca) estaba ubicada a la izquierda de la fuente sonora a unos 3 metros de distancia. Para esta medición se usó una onda sinusoidal de 80Hz a 79 dB SPL, los resultados fueron los siguientes:

Piezo # 1 Pared Amarilla			
Resistencia (Ω)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)
50	2,80E-05	1,27E-03	3,56E-08
100	2,80E-05	2,78E-03	7,78E-08
250	2,80E-05	7,00E-03	1,96E-07
500	2,80E-05	1,29E-02	3,61E-07
1000	2,78E-05	2,72E-02	7,56E-07
2000	2,77E-05	5,58E-02	1,55E-06
3000	2,74E-05	8,35E-02	2,29E-06
4000	2,78E-05	1,11E-01	3,07E-06
5000	2,78E-05	1,39E-01	3,85E-06
6000	2,76E-05	1,64E-01	4,53E-06
7000	2,76E-05	1,93E-01	5,32E-06
8000	2,75E-05	2,19E-01	6,01E-06
9000	2,73E-05	2,46E-01	6,72E-06
10000	2,73E-05	2,76E-01	7,52E-06
20000	2,60E-05	5,20E-01	1,35E-05
30000	2,42E-05	7,20E-01	1,74E-05
40000	2,21E-05	8,74E-01	1,93E-05
50000	2,15E-05	1,08E+00	2,32E-05
60000	2,04E-05	1,23E+00	2,51E-05
70000	1,87E-05	1,29E+00	2,40E-05
80000	1,72E-05	1,38E+00	2,37E-05

Piezo # 2 Pared Amarilla			
Resistencia (Ω)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)
50	3,88E-05	1,28E-03	4,97E-08
100	3,88E-05	3,00E-03	1,16E-07
250	3,88E-05	8,00E-03	3,10E-07
500	3,88E-05	1,50E-02	5,82E-07
1000	3,87E-05	3,04E-02	1,18E-06
2000	3,86E-05	6,40E-02	2,47E-06
3000	3,86E-05	9,80E-02	3,78E-06
4000	3,85E-05	1,30E-01	5,01E-06
5000	3,80E-05	1,70E-01	6,46E-06
6000	3,80E-05	2,05E-01	7,79E-06
7000	3,76E-05	2,40E-01	9,02E-06
8000	3,75E-05	2,70E-01	1,01E-05
9000	3,73E-05	3,10E-01	1,16E-05
10000	3,73E-05	3,26E-01	1,22E-05
20000	3,50E-05	6,30E-01	2,21E-05
30000	2,89E-05	8,44E-01	2,44E-05
40000	2,68E-05	1,04E+00	2,79E-05
50000	2,32E-05	1,15E+00	2,66E-05
60000	2,22E-05	1,29E+00	2,86E-05
70000	2,05E-05	1,34E+00	2,76E-05
80000	1,85E-05	1,40E+00	2,59E-05

90000	1,59E-05	1,41E+00	2,24E-05		90000	1,69E-05	1,45E+00	2,45E-05
100000	1,47E-05	1,47E+00	2,16E-05		100000	1,57E-05	1,50E+00	2,36E-05
110000	1,34E-05	1,47E+00	1,97E-05		110000	1,33E-05	1,52E+00	2,01E-05
120000	1,24E-05	1,49E+00	1,85E-05		120000	1,24E-05	1,54E+00	1,91E-05
130000	1,16E-05	1,50E+00	1,74E-05		130000	1,20E-05	1,55E+00	1,86E-05
140000	1,08E-05	1,51E+00	1,63E-05		140000	1,19E-05	1,60E+00	1,90E-05
150000	9,70E-06	1,54E+00	1,49E-05		150000	1,08E-05	1,58E+00	1,71E-05
160000	9,50E-06	1,55E+00	1,47E-05		160000	1,05E-05	1,58E+00	1,66E-05
170000	8,90E-06	1,55E+00	1,38E-05		170000	9,90E-06	1,60E+00	1,58E-05
180000	8,50E-06	1,56E+00	1,33E-05		180000	9,40E-06	1,59E+00	1,49E-05
190000	8,40E-06	1,57E+00	1,32E-05		190000	8,90E-06	1,61E+00	1,43E-05
200000	8,00E-06	1,62E+00	1,30E-05		200000	8,50E-06	1,61E+00	1,37E-05

Tabla 11: Medición de potencia para micrófonos 1 y 2 en pared amarilla.

Piezo # 3 Pared Amarilla					Piezo # 4 Pared Amarilla			
Resistencia (Ω)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)		Resistencia (Ω)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)
50	2,90E-05	1,50E-03	4,35E-08		50	1,60E-05	1,00E-03	1,60E-08
100	2,90E-05	3,00E-03	8,70E-08		100	1,60E-05	2,00E-03	3,20E-08
250	2,80E-05	9,00E-03	2,52E-07		250	1,55E-05	4,00E-03	6,20E-08
500	2,75E-05	1,60E-02	4,40E-07		500	1,54E-05	6,00E-03	9,24E-08
1000	2,72E-05	2,83E-02	7,70E-07		1000	1,53E-05	9,20E-03	1,41E-07
2000	2,70E-05	5,84E-02	1,58E-06		2000	1,53E-05	2,00E-02	3,06E-07
3000	2,57E-05	9,00E-02	2,31E-06		3000	1,52E-05	3,05E-02	4,64E-07
4000	2,48E-05	1,20E-01	2,98E-06		4000	1,51E-05	4,47E-02	6,75E-07
5000	2,45E-05	1,60E-01	3,92E-06		5000	1,50E-05	6,00E-02	9,00E-07
6000	2,44E-05	1,97E-01	4,81E-06		6000	1,50E-05	7,70E-02	1,16E-06
7000	2,43E-05	2,26E-01	5,49E-06		7000	1,49E-05	8,60E-02	1,28E-06
8000	2,43E-05	2,60E-01	6,32E-06		8000	1,49E-05	1,00E-01	1,49E-06
9000	2,42E-05	2,98E-01	7,21E-06		9000	1,49E-05	1,17E-01	1,74E-06
10000	2,41E-05	3,20E-01	7,71E-06		10000	1,48E-05	1,32E-01	1,95E-06
20000	2,40E-05	6,16E-01	1,48E-05		20000	1,48E-05	2,55E-01	3,77E-06

30000	2,31E-05	8,36E-01	1,93E-05		30000	1,35E-05	3,50E-01	4,73E-06
40000	2,24E-05	8,50E-01	1,90E-05		40000	1,24E-05	4,70E-01	5,83E-06
50000	1,96E-05	1,00E+00	1,96E-05		50000	1,09E-05	5,50E-01	6,00E-06
60000	1,88E-05	1,09E+00	2,05E-05		60000	1,03E-05	5,980E-01	6,16E-06
70000	1,74E-05	1,16E+00	2,02E-05		70000	9,60E-06	6,40E-01	6,14E-06
80000	1,59E-05	1,23E+00	1,96E-05		80000	8,70E-06	6,57E-01	5,72E-06
90000	1,45E-05	1,25E+00	1,81E-05		90000	8,00E-06	6,90E-01	5,52E-06
100000	1,34E-05	1,30E+00	1,74E-05		100000	7,80E-06	7,00E-01	5,46E-06
110000	1,15E-05	1,34E+00	1,54E-05		110000	7,20E-06	7,20E-01	5,18E-06
120000	1,11E-05	1,35E+00	1,49E-05		120000	6,60E-06	7,30E-01	4,82E-06
130000	1,10E-05	1,36E+00	1,50E-05		130000	6,10E-06	7,50E-01	4,58E-06
140000	1,00E-05	1,41E+00	1,41E-05		140000	5,80E-06	7,60E-01	4,41E-06
150000	9,40E-06	1,42E+00	1,33E-05		150000	5,40E-06	7,70E-01	4,16E-06
160000	9,20E-06	1,38E+00	1,27E-05		160000	5,20E-06	7,80E-01	4,06E-06
170000	8,70E-06	1,43E+00	1,24E-05		170000	5,00E-06	7,77E-01	3,89E-06
180000	8,40E-06	1,46E+00	1,22E-05		180000	4,70E-06	7,83E-01	3,68E-06
190000	7,70E-06	1,47E+00	1,13E-05		190000	4,50E-06	8,00E-01	3,60E-06
200000	7,50E-06	1,48E+00	1,11E-05		200000	4,40E-06	8,10E-01	3,56E-06

Tabla 12: Medición de potencia para micrófonos 3 y 4 en pared amarilla.

Piezo # 1 Pared Blanca					Piezo # 2 Pared Blanca			
Resistencia (Ω)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)		Resistencia (Ω)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)
50	2,10E-05	2,00E-03	4,20E-08		50	2,70E-05	1,00E-03	2,70E-08
100	2,08E-05	4,50E-03	9,36E-08		100	2,60E-05	3,00E-03	7,80E-08
250	2,07E-05	7,00E-03	1,45E-07		250	2,60E-05	8,00E-03	2,08E-07
500	2,06E-05	1,70E-02	3,50E-07		500	2,60E-05	1,60E-02	4,16E-07
1000	2,06E-05	2,00E-02	4,12E-07		1000	2,56E-05	2,40E-02	6,14E-07
2000	2,04E-05	4,35E-02	8,87E-07		2000	2,60E-05	5,12E-02	1,33E-06
3000	2,03E-05	6,60E-02	1,34E-06		3000	2,60E-05	8,10E-02	2,11E-06
4000	2,04E-05	8,90E-02	1,82E-06		4000	2,54E-05	1,05E-01	2,67E-06

5000	2,02E-05	1,10E-01	2,22E-06		5000	2,54E-05	1,30E-01	3,30E-06
6000	2,04E-05	1,30E-01	2,65E-06		6000	2,54E-05	1,53E-01	3,89E-06
7000	2,03E-05	1,51E-01	3,07E-06		7000	2,53E-05	1,76E-01	4,45E-06
8000	1,96E-05	1,70E-01	3,33E-06		8000	2,46E-05	1,99E-01	4,90E-06
9000	1,96E-05	1,90E-01	3,72E-06		9000	2,45E-05	2,26E-01	5,54E-06
10000	1,96E-05	1,85E-01	3,63E-06		10000	2,42E-05	2,17E-01	5,25E-06
20000	1,87E-05	4,00E-01	7,48E-06		20000	2,28E-05	4,70E-01	1,07E-05
30000	1,76E-05	5,70E-01	1,00E-05		30000	2,13E-05	6,15E-01	1,31E-05
40000	1,60E-05	6,90E-01	1,10E-05		40000	1,96E-05	7,90E-01	1,55E-05
50000	1,48E-05	8,00E-01	1,18E-05		50000	1,78E-05	8,90E-01	1,58E-05
60000	1,37E-05	8,70E-01	1,19E-05		60000	1,64E-05	9,90E-01	1,62E-05
70000	1,23E-05	9,25E-01	1,14E-05		70000	1,50E-05	9,28E-01	1,39E-05
80000	1,17E-05	9,37E-01	1,10E-05		80000	1,37E-05	1,00E+00	1,37E-05
90000	1,05E-05	9,45E-01	9,92E-06		90000	1,26E-05	1,05E+00	1,32E-05
100000	1,00E-05	9,63E-01	9,63E-06		100000	1,15E-05	1,09E+00	1,25E-05
110000	9,20E-06	1,05E+00	9,66E-06		110000	9,50E-06	1,15E+00	1,09E-05
120000	8,70E-06	1,06E+00	9,18E-06		120000	9,40E-06	1,20E+00	1,13E-05
130000	7,60E-06	1,08E+00	8,21E-06		130000	9,00E-06	1,23E+00	1,11E-05
140000	7,60E-06	1,09E+00	8,25E-06		140000	8,90E-06	1,23E+00	1,09E-05
150000	7,30E-06	1,10E+00	8,03E-06		150000	8,70E-06	1,16E+00	1,01E-05
160000	7,00E-06	1,11E+00	7,77E-06		160000	8,10E-06	1,24E+00	1,00E-05
170000	6,50E-06	1,09E+00	7,09E-06		170000	7,60E-06	1,20E+00	9,12E-06
180000	6,30E-06	1,13E+00	7,12E-06		180000	6,40E-06	1,24E+00	7,94E-06
190000	5,50E-06	1,12E+00	6,16E-06		190000	6,30E-06	1,02E+00	6,43E-06
200000	5,50E-06	1,15E+00	6,33E-06		200000	6,50E-06	1,25E+00	8,13E-06

Tabla 13: Medición de potencia para micrófonos 1 y 2 en pared blanca.

Piezo # 3 Pared Blanca					Piezo # 4 Pared Blanca			
Resistencia (Ω)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)		Resistencia (Ω)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)
50	1,40E-05	1,00E-03	1,40E-08		50	1,15E-05	1,40E-03	1,61E-08
100	1,40E-05	4,00E-03	5,60E-08		100	1,14E-05	5,00E-03	5,70E-08

250	1,40E-05	6,00E-03	8,40E-08		250	1,10E-05	7,00E-03	7,70E-08
500	1,39E-05	9,00E-03	1,25E-07		500	1,07E-05	7,50E-03	8,03E-08
1000	1,39E-05	1,14E-02	1,58E-07		1000	1,05E-05	8,50E-03	8,93E-08
2000	1,37E-05	2,49E-02	3,41E-07		2000	1,05E-05	1,95E-02	2,05E-07
3000	1,35E-05	3,80E-02	5,13E-07		3000	1,04E-05	2,90E-02	3,02E-07
4000	1,36E-05	5,10E-02	6,94E-07		4000	1,03E-05	3,74E-02	3,85E-07
5000	1,37E-05	6,10E-02	8,36E-07		5000	1,02E-05	5,00E-02	5,10E-07
6000	1,37E-05	7,10E-02	9,73E-07		6000	1,02E-05	5,80E-02	5,92E-07
7000	1,36E-05	8,30E-02	1,13E-06		7000	1,01E-05	6,20E-02	6,26E-07
8000	1,29E-05	9,40E-02	1,21E-06		8000	1,00E-05	7,70E-02	7,70E-07
9000	1,28E-05	1,06E-01	1,36E-06		9000	9,60E-06	8,00E-02	7,68E-07
10000	1,28E-05	1,03E-01	1,32E-06		10000	9,70E-06	8,00E-02	7,76E-07
20000	1,18E-05	2,25E-01	2,66E-06		20000	9,40E-06	1,66E-01	1,56E-06
30000	1,10E-05	3,19E-01	3,51E-06		30000	8,40E-06	2,24E-01	1,88E-06
40000	1,01E-05	3,80E-01	3,84E-06		40000	8,00E-06	3,00E-01	2,40E-06
50000	9,30E-06	4,40E-01	4,09E-06		50000	7,30E-06	3,40E-01	2,48E-06
60000	8,40E-06	4,90E-01	4,12E-06		60000	6,50E-06	3,40E-01	2,21E-06
70000	7,50E-06	5,30E-01	3,98E-06		70000	6,00E-06	3,60E-01	2,16E-06
80000	7,00E-06	5,50E-01	3,85E-06		80000	5,40E-06	3,70E-01	2,00E-06
90000	6,40E-06	5,60E-01	3,58E-06		90000	5,00E-06	3,80E-01	1,90E-06
100000	5,90E-06	5,80E-01	3,42E-06		100000	4,50E-06	4,20E-01	1,89E-06
110000	5,70E-06	5,80E-01	3,31E-06		110000	3,80E-06	4,30E-01	1,63E-06
120000	5,20E-06	6,00E-01	3,12E-06		120000	3,60E-06	4,30E-01	1,55E-06
130000	4,70E-06	6,10E-01	2,87E-06		130000	3,60E-06	4,30E-01	1,55E-06
140000	4,60E-06	6,10E-01	2,81E-06		140000	3,50E-06	4,20E-01	1,47E-06
150000	4,50E-06	6,23E-01	2,80E-06		150000	3,30E-06	4,20E-01	1,39E-06
160000	4,20E-06	6,20E-01	2,60E-06		160000	3,00E-06	4,30E-01	1,29E-06
170000	3,90E-06	6,30E-01	2,46E-06		170000	3,00E-06	4,32E-01	1,30E-06
180000	3,40E-06	6,30E-01	2,14E-06		180000	2,80E-06	4,35E-01	1,22E-06
190000	3,60E-06	6,35E-01	2,29E-06		190000	2,70E-06	4,35E-01	1,17E-06
200000	3,30E-06	6,49E-01	2,14E-06		200000	2,60E-06	4,39E-01	1,14E-06

Tabla 14: Medición de potencia para micrófonos 3 y 4 en pared blanca.

Todos los Piezo Pared Amarilla			
Resistencia (Ω)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)
50	9,80E-05	5,00E-03	4,90E-07
100	9,78E-05	9,00E-03	8,80E-07
250	9,77E-05	2,35E-02	2,30E-06
500	9,75E-05	4,78E-02	4,66E-06
1000	9,80E-05	8,85E-02	8,67E-06
2000	9,70E-05	1,78E-01	1,73E-05
3000	9,50E-05	2,60E-01	2,47E-05
4000	9,30E-05	3,43E-01	3,19E-05
5000	9,00E-05	4,20E-01	3,78E-05
6000	8,50E-05	4,90E-01	4,17E-05
7000	8,30E-05	5,47E-01	4,54E-05
8000	7,90E-05	6,00E-01	4,74E-05
9000	7,90E-05	6,72E-01	5,31E-05
10000	7,70E-05	7,00E-01	5,39E-05
20000	5,30E-05	9,95E-01	5,27E-05
30000	3,80E-05	1,07E+00	4,07E-05
40000	3,00E-05	1,15E+00	3,45E-05
50000	2,45E-05	1,16E+00	2,84E-05
60000	2,00E-05	1,17E+00	2,34E-05
70000	1,73E-05	1,19E+00	2,06E-05
80000	1,56E-05	1,20E+00	1,87E-05
90000	1,43E-05	1,22E+00	1,74E-05
100000	1,21E-05	1,23E+00	1,49E-05
110000	1,16E-05	1,24E+00	1,44E-05
120000	1,09E-05	1,23E+00	1,34E-05
130000	1,00E-05	1,22E+00	1,22E-05
140000	9,00E-06	1,22E+00	1,10E-05
150000	8,00E-06	1,22E+00	9,76E-06

Todos los Piezo Pared Blanca			
Resistencia (Ω)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)
50	4,22E-05	2,10E-03	8,86E-08
100	4,22E-05	3,70E-03	1,56E-07
250	4,20E-05	9,60E-03	4,03E-07
500	4,17E-05	2,03E-02	8,47E-07
1000	4,15E-05	4,14E-02	1,72E-06
2000	4,08E-05	7,95E-02	3,24E-06
3000	4,04E-05	1,18E-01	4,77E-06
4000	3,97E-05	1,55E-01	6,15E-06
5000	3,86E-05	1,93E-01	7,44E-06
6000	3,77E-05	2,26E-01	8,52E-06
7000	3,60E-05	2,58E-01	9,29E-06
8000	3,56E-05	2,86E-01	1,02E-05
9000	3,44E-05	3,10E-01	1,07E-05
10000	3,28E-05	3,34E-01	1,10E-05
20000	2,30E-05	4,65E-01	1,07E-05
30000	1,68E-05	5,14E-01	8,64E-06
40000	1,32E-05	5,38E-01	7,10E-06
50000	1,08E-05	5,51E-01	5,95E-06
60000	9,10E-06	5,56E-01	5,06E-06
70000	7,90E-06	5,58E-01	4,41E-06
80000	7,00E-06	5,61E-01	3,93E-06
90000	6,20E-06	5,63E-01	3,49E-06
100000	5,40E-06	5,50E-01	2,97E-06
110000	5,20E-06	5,50E-01	2,86E-06
120000	4,80E-06	5,56E-01	2,67E-06
130000	4,50E-06	5,51E-01	2,48E-06
140000	4,10E-06	5,51E-01	2,26E-06
150000	3,90E-06	5,56E-01	2,17E-06

160000	7,90E-06	1,22E+00	9,64E-06		160000	3,60E-06	5,56E-01	2,00E-06
170000	7,70E-06	1,23E+00	9,47E-06		170000	3,40E-06	5,58E-01	1,90E-06
180000	7,20E-06	1,24E+00	8,93E-06		180000	3,30E-06	5,58E-01	1,84E-06
190000	7,00E-06	1,23E+00	8,61E-06		190000	3,10E-06	5,60E-01	1,74E-06
200000	6,40E-06	1,23E+00	7,87E-06		200000	3,10E-06	5,60E-01	1,74E-06

Tabla 15: Medición de potencia para todos los micrófonos conectados en paralelo, para pared amarilla y pared blanca..

Con estos resultados se pudo obtener la potencia para cada caso, a continuación se presentan las gráficas de Potencia contra Corriente respectivas a los resultados anteriores:

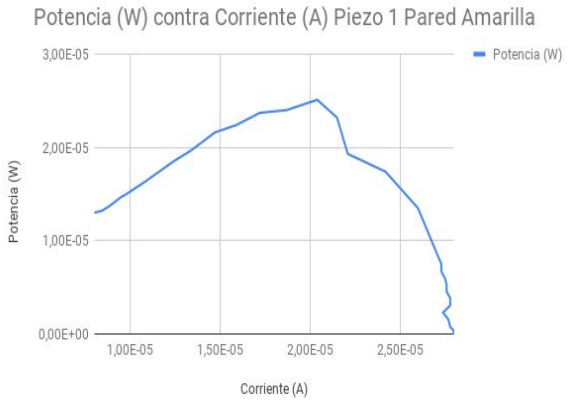

Fig.52: Gráfica de Potencia contra Corriente Piezo 1 Pared Amarilla.

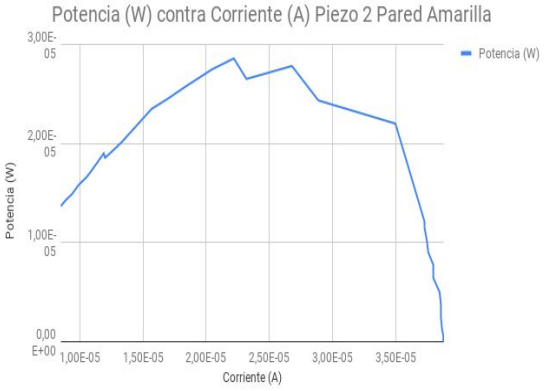

Fig.53: Gráfica de Potencia contra Corriente Piezo 2 Pared Amarilla.

Fig.54: Gráfica de Potencia contra Corriente Piezo 3 Pared Amarilla.

Fig.55: Gráfica de Potencia contra Corriente Piezo 4 Pared Amarilla.

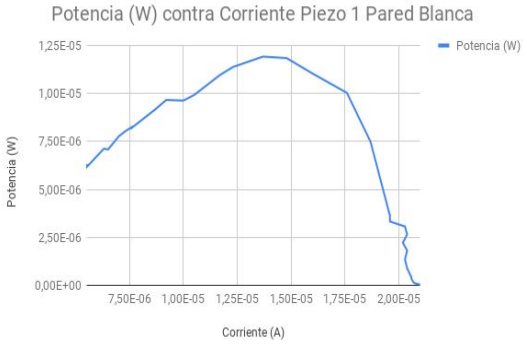

Fig.56: Gráfica de Potencia contra Corriente Piezo 1 Pared Blanca.

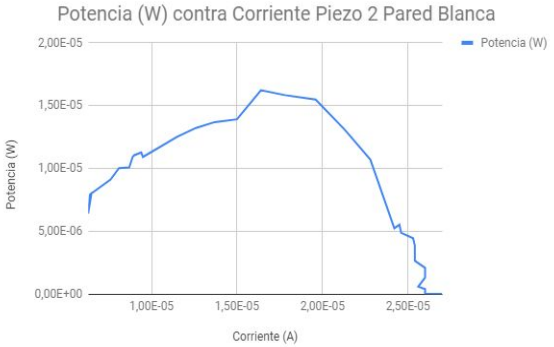

Fig.57: Gráfica de Potencia contra Corriente Piezo 2 Pared Blanca.

Fig.58: Gráfica de Potencia contra Corriente Piezo 3 Pared Blanca.

Fig.59: Gráfica de Potencia contra Corriente Piezo 4 Pared Blanca.

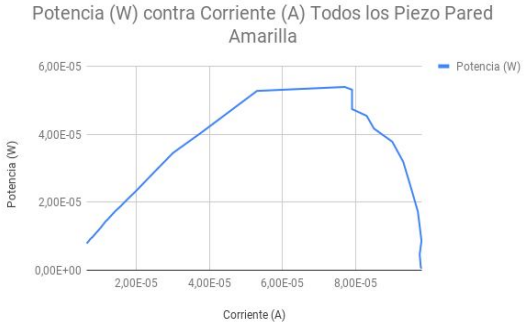

Fig.60: Gráfica de Potencia contra Corriente todos los Piezo Pared Amarilla.

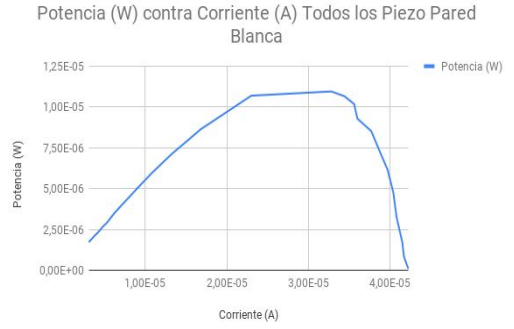

Fig.61: Gráfica de Potencia contra Corriente todos los Piezo Pared Blanca.

Con estas tablas y gráficas, se pueden tener varias conclusiones, en principio puede verse que para los micrófonos individuales la resistencia óptima para la obtención energética es 60 KΩ, mientras que para los micrófonos conectados en paralelo es 10 KΩ. También se puede decir que la máxima potencia entregada por el sistema es del orden de micro Watts, y depende del nivel de presión sonora así como de la ubicación del mismo.

Medición de potencia en estudio de mezcla Foley (con acondicionamiento acústico):

Para esta medición se ubicó el panel en la posición 3 de la sala, se usaron resistencias muy parecidas a las usadas en la primer prueba, la razón por la que no se usaron las mismas es que se decidió realizar un proceso más efectivo reemplazando los potenciómetros usados anteriormente por resistencias de valores comerciales, sin embargo esto no debe afectar la obtención de la curva de potencia. Para este experimento se usó una onda sinusoidal de 80Hz a 79 dB SPL de presión sonora. Vale la pena resaltar que tanto en esta prueba como en la anterior se tomaron quince muestras de cada medición, para lograr obtener resultados acertados, los resultados consignados aquí son el promedio final de las mediciones, de este modo, los resultados obtenidos en Foley fueron los siguientes:

Piezo # 1			
	Promedio	Promedio	
Resistencia (Ω)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)
50	1,41E-05	8,13E-03	1,15E-07
100	1,40E-05	1,19E-02	1,67E-07
250	1,39E-05	1,57E-02	2,17E-07
500	1,35E-05	2,04E-02	2,76E-07
1000	1,34E-05	2,87E-02	3,86E-07
2000	1,32E-05	3,50E-02	4,64E-07
3000	1,32E-05	4,73E-02	6,23E-07
4000	1,31E-05	5,02E-02	6,57E-07
5000	1,30E-05	6,38E-02	8,27E-07

Piezo # 2			
	Promedio	Promedio	
Resistencia (Ω)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)
50	1,49E-05	5,80E-03	8,65E-08
100	1,48E-05	6,80E-03	1,01E-07
250	1,47E-05	8,20E-03	1,21E-07
500	1,46E-05	1,02E-02	1,49E-07
1000	1,42E-05	1,47E-02	2,09E-07
2000	1,39E-05	2,18E-02	3,02E-07
3000	1,35E-05	3,53E-02	4,77E-07
4000	1,33E-05	4,26E-02	5,67E-07
5000	1,29E-05	5,21E-02	6,71E-07

6000	1,28E-05	7,18E-02	9,19E-07		6000	1,25E-05	6,79E-02	8,47E-07
7000	1,26E-05	8,81E-02	1,11E-06		7000	1,19E-05	7,87E-02	9,34E-07
8000	1,24E-05	9,91E-02	1,23E-06		8000	1,13E-05	9,03E-02	1,02E-06
9000	1,26E-05	1,10E-01	1,39E-06		9000	1,10E-05	1,01E-01	1,11E-06
10000	1,25E-05	1,23E-01	1,55E-06		10000	1,09E-05	1,07E-01	1,17E-06
20000	1,19E-05	2,28E-01	2,71E-06		20000	1,03E-05	1,99E-01	2,05E-06
30000	1,10E-05	3,16E-01	3,47E-06		30000	9,51E-06	2,75E-01	2,62E-06
39000	1,01E-05	3,85E-01	3,88E-06		39000	8,71E-06	3,34E-01	2,91E-06
47000	9,30E-06	4,36E-01	4,06E-06		47000	7,95E-06	3,69E-01	2,94E-06
62000	8,25E-06	4,93E-01	4,07E-06		62000	6,97E-06	4,23E-01	2,95E-06
68000	7,71E-06	5,14E-01	3,96E-06		68000	6,51E-06	4,39E-01	2,86E-06
82000	6,86E-06	5,47E-01	3,75E-06		82000	5,82E-06	4,66E-01	2,71E-06
91000	6,30E-06	5,66E-01	3,56E-06		91000	5,33E-06	4,80E-01	2,56E-06
100000	6,35E-06	5,77E-01	3,66E-06		100000	5,02E-06	4,90E-01	2,46E-06
110000	5,47E-06	5,90E-01	3,23E-06		110000	4,64E-06	5,00E-01	2,32E-06
120000	5,08E-06	6,00E-01	3,05E-06		120000	4,33E-06	5,07E-01	2,20E-06

Tabla 16: Medición de potencia para micrófonos 1 y 2 en estudio Foley.

Piezo # 3					Piezo # 4			
	Promedio	Promedio				Promedio	Promedio	
Resistencia (Ω)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)		Resistencia (Ω)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)
50	1,52E-05	3,67E-03	5,58E-08		50	2,57E-05	8,08E-02	2,08E-06
100	1,49E-05	5,80E-03	8,65E-08		100	2,56E-05	9,93E-02	2,54E-06
250	1,48E-05	6,80E-03	1,01E-07		250	2,52E-05	1,05E-01	2,66E-06
500	1,47E-05	8,20E-03	1,21E-07		500	2,50E-05	1,19E-01	2,98E-06
1000	1,46E-05	1,02E-02	1,49E-07		1000	2,49E-05	1,22E-01	3,03E-06
2000	1,42E-05	1,47E-02	2,09E-07		2000	2,46E-05	1,30E-01	3,21E-06
3000	1,39E-05	2,18E-02	3,02E-07		3000	2,45E-05	1,42E-01	3,50E-06
4000	1,35E-05	3,54E-02	4,79E-07		4000	2,41E-05	1,51E-01	3,64E-06
5000	1,33E-05	4,23E-02	5,63E-07		5000	2,39E-05	1,60E-01	3,82E-06
6000	1,28E-05	5,21E-02	6,70E-07		6000	2,35E-05	1,73E-01	4,07E-06

7000	1,25E-05	6,77E-02	8,46E-07		7000	2,32E-05	1,85E-01	4,28E-06
8000	1,19E-05	7,85E-02	9,32E-07		8000	2,30E-05	1,98E-01	4,55E-06
9000	1,13E-05	9,04E-02	1,02E-06		9000	2,28E-05	2,10E-01	4,79E-06
10000	1,07E-05	1,13E-01	1,21E-06		10000	2,23E-05	2,31E-01	5,15E-06
20000	1,02E-05	2,09E-01	2,13E-06		20000	2,11E-05	4,26E-01	8,98E-06
30000	9,56E-06	2,89E-01	2,77E-06		30000	1,96E-05	5,87E-01	1,15E-05
39000	8,69E-06	3,53E-01	3,07E-06		39000	1,79E-05	7,13E-01	1,27E-05
47000	8,05E-06	4,00E-01	3,22E-06		47000	1,64E-05	8,03E-01	1,31E-05
62000	7,14E-06	4,52E-01	3,23E-06		62000	1,44E-05	9,17E-01	1,32E-05
68000	6,71E-06	4,71E-01	3,16E-06		68000	1,35E-05	9,44E-01	1,28E-05
82000	5,95E-06	5,02E-01	2,99E-06		82000	1,20E-05	1,00E+00	1,20E-05
91000	5,49E-06	5,20E-01	2,85E-06		91000	1,10E-05	1,03E+00	1,14E-05
100000	5,18E-06	5,30E-01	2,75E-06		100000	1,04E-05	1,05E+00	1,09E-05
110000	4,78E-06	5,41E-01	2,59E-06		110000	9,58E-06	1,08E+00	1,03E-05
120000	4,46E-06	5,51E-01	2,46E-06		120000	8,91E-06	1,09E+00	9,75E-06

Tabla 17: Medición de potencia para micrófonos 3 y 4 en estudio Foley.

Todos los Piezo			
	Promedio	Promedio	
Resistencia (Ω)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)
50	5,51E-05	1,80E-01	9,94E-06
100	5,48E-05	1,93E-01	1,06E-05
250	5,44E-05	2,20E-01	1,20E-05
500	5,41E-05	2,49E-01	1,35E-05
1000	5,32E-05	2,70E-01	1,44E-05
2000	5,28E-05	2,90E-01	1,53E-05
3000	5,19E-05	3,10E-01	1,61E-05
4000	5,11E-05	3,40E-01	1,74E-05
5000	5,00E-05	3,52E-01	1,76E-05
6000	4,81E-05	3,70E-01	1,78E-05

7000	4,70E-05	3,91E-01	1,84E-05
8000	4,64E-05	4,10E-01	1,90E-05
9000	4,56E-05	4,20E-01	1,92E-05
10000	4,47E-05	4,30E-01	1,92E-05
20000	3,11E-05	5,91E-01	1,84E-05
30000	2,30E-05	6,43E-01	1,48E-05
39000	1,81E-05	6,69E-01	1,21E-05
47000	1,50E-05	6,83E-01	1,02E-05
62000	1,19E-05	6,93E-01	8,24E-06
68000	1,08E-05	6,97E-01	7,52E-06
82000	9,09E-06	7,02E-01	6,38E-06
91000	8,08E-06	7,04E-01	5,69E-06
100000	7,50E-06	7,05E-01	5,29E-06
110000	6,80E-06	7,07E-01	4,81E-06
120000	6,21E-06	7,08E-01	4,40E-06

Tabla 18: Medición de potencia para todos los micrófonos en estudio Foley.

Con estos resultados se pudo obtener la potencia para cada caso en el estudio Foley, a continuación se presentan las gráficas de Potencia contra Corriente respectivas a los resultados anteriores:

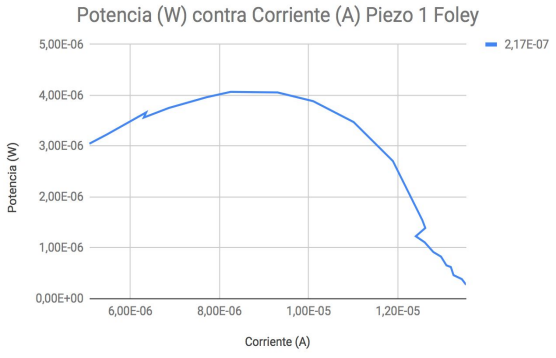

Fig.62: Gráfica de Potencia contra Corriente Piezo 1 en estudio Foley.

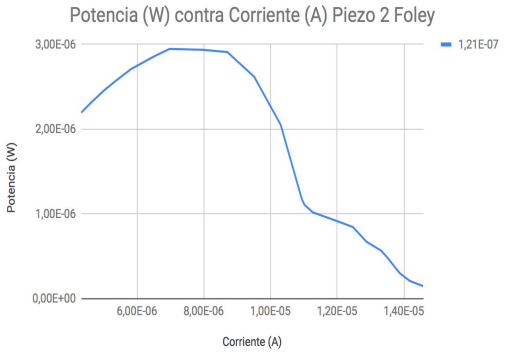

Fig.63: Gráfica de Potencia contra Corriente Piezo 2 en estudio Foley.

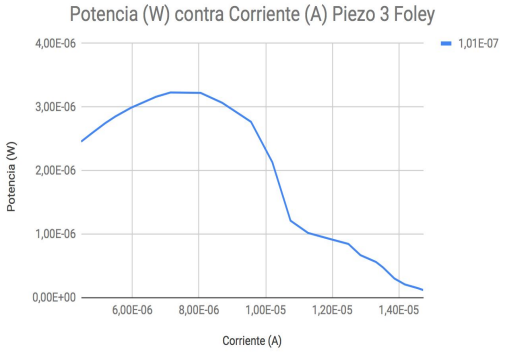

Fig.64: Gráfica de Potencia contra Corriente Piezo 3 en estudio Foley.

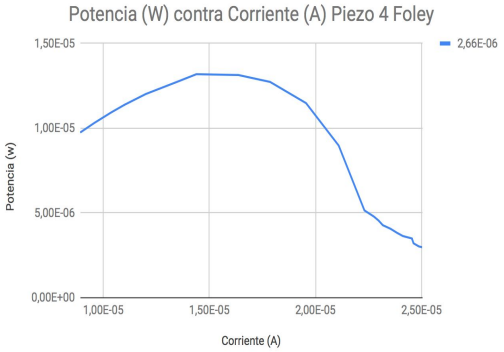

Fig.65: Gráfica de Potencia contra Corriente Piezo 4 en estudio Foley.

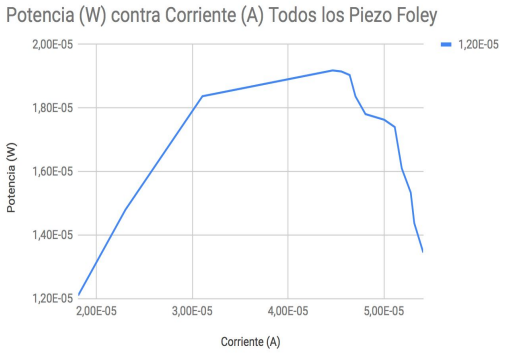

Fig.66: Gráfica de Potencia contra Corriente todos los Piezo en estudio Foley.

Es interesante notar que nuevamente, la resistencia a la cual se obtiene la mayor potencia posible es 62 KΩ para cada micrófono por separado, y 10 KΩ para todos los micrófonos conectados en paralelo, esto indica que independiente del espacio donde se trabaje con el panel, su curva de potencia es muy parecida por no decir igual. Asi mismo es necesario notar que la potencia máxima entregada por el panel recolector, con una onda 80Hz a un promedio de presión sonora de 79 dB SPL es del orden de decenas de microvatios. Esta gráfica final es con la que se trabajó el CI pues dice cual es la máxima energía que puede entregar el panel recolector, este punto máximo es en 19,2 uW donde hay un voltaje de 430 V y una corriente de 44,7 uA.

Resultados finales para el sistema de transducción acústico-eléctrica en estudio Foley:

Los resultados finales con el sistema completo fueron satisfactorios aunque un tanto inesperados, estos fueron encontrados en base a una serie de mediciones con una onda sinusoidal de 80Hz a 79 dB SPL y con música, para este caso de género Trap.

El montaje final del sistema de obtención energética consistió en lo siguiente:

Panel Acustico con cuatro transductores acústico-eléctricos:

Fig.67: Panel de recolección acústica finalizado

Circuito rectificador de las señales alternas provenientes de los micrófonos piezoeléctricos:

Este es un circuito muy sencillo hecho con diodos 1n5819 por su alta eficiencia (caída en tensión de solo 2V) y un par de capacitores de 10uF a 25V. Se decidió un montaje en paralelo para los puentes de diodos y en serie para los condensadores debido a que de esta forma se logra el mayor voltaje de salida, sin embargo los piezoeléctricos se conectaron en pares en paralelo para obtener la mayor corriente, los pares fueron 1 con 2 y 3 con 4.

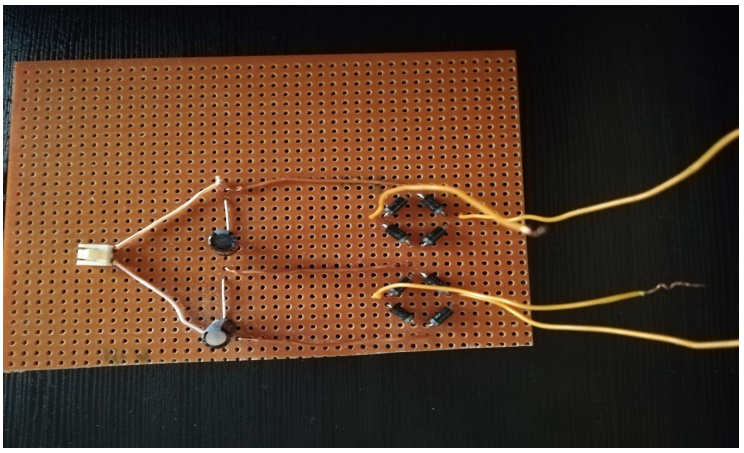

Fig.68: Circuito de rectificación.

Circuito con CI BQ 25504 y batería de carga:

Este fue el circuito final, en el cual se ubica el Chip de carga, y sus respectivas resistencias, inductores y capacitores, además tiene un LED para probar la funcionalidad del proyecto.

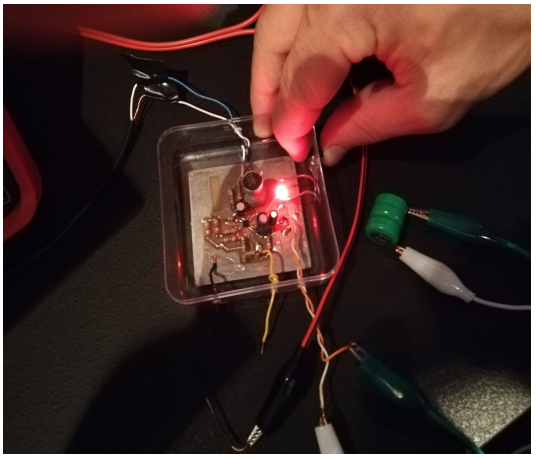

Fig.69: Circuito con CI BQ 25504.

Si bien ya se sabía el punto máximo de potencia a trabajar, se quiso manejar el sistema a un 58% de esta potencia debido a que en ciertos casos el voltaje de entrada podía caer a menos de 300 mV pero en otros la corriente podía ser muy pequeña, por ende se decidió dejar este porcentaje de obtención energética que es un tanto conservador con ambos parámetros, este porcentaje significa que por ejemplo para una potencia de entrada de 19,2 uW el Chip tomaría solo el 58%, es decir 11,1 uW, para con esto obtener la mayor corriente posible en sacrificio

del voltaje, este porcentaje es modificable con las resistencias Roc1 y Roc2 conectadas a los pines 2 y 3 del CI, el cálculo de este porcentaje y sus respectivas resistencias es mostrado a continuación:

$$\frac{V\,ref}{V\,inoc} = \frac{1{,}16V}{2V} = 0,58$$

$$Roc1 = 0,58 \,.\, 20 \,.\, 10^6 = 11,6\, M\Omega$$

$$Roc2 = (1 - 0,58) \,.\, 20 \,.\, 10^6 = 8,4\, M\Omega$$

Caso con onda sinusoidal de 80Hz:

En este caso el sistema se comportó bastante bien, para una presion sonora de 79 dB SPL la tasa de carga fue de alrededor de 3 minutos de sonido constante para subir el voltaje en la batería con 30 mAh de 2,4 V a 3,6 V. Por supuesto el tiempo de carga y descarga del dispositivo de almacenamiento es crítico en este sistema de recolección energética, por ende una bateria de mas capacidad se cargará mucho más lentamente, pero así mismo durará más en funcionamiento, así también, un capacitor pequeño (alrededor 10 uF) llegará a los 3,6 V muy rápido pero se descargara de forma casi instantánea. En adición a esto, la carga también depende de la energía acústica del lugar y de la distancia del parlante, pues ubicando el panel cerca a la fuente emisora se obtiene casi el doble de rapidez en la carga para el mismo caso.

Caso con musica de genero Trap (Visceral del artista Bernhoft):

Para el caso de música el sistema no se comportó igual de bien, si bien el CI se comporta muy bien con una onda sinusoidal, cuando la energía acústica es tan variable como en el caso de la música, el CI no puede tomar los 300 mV constantes necesarios para iniciar su operación, por ende la carga de la batería no puede iniciar. Sin embargo, al omitir el CI y conectar directamente un capacitor a la salida del circuito rectificador si se logró cargar un capacitor, nuevamente en este caso la rapidez de la carga depende de algunos factores, por

ejemplo la presencia de la banda de frecuencia de resonancia del sistema (80Hz) en la canción, entre más presencia de esta banda en la canción más rápido se cargará el condensador. Así pues para una canción de 4 minutos con esta condición descrita, en promedio se puede obtener 50 mV para un capacitor de 22000 μF.

5.4 Comparación energética fuente - receptor:

Existen dos maneras de medir la eficiencia de este panel recolector, la primera teniendo en cuenta el gasto eléctrico empleado para la obtención de energía Harvesting, la segunda teniendo en cuenta la energía acústica que recibe el panel acústico:

A) Comparación gasto eléctrico - almacenamiento eléctrico:

Para saber la eficiencia del sistema eléctricamente hablando, se debe conocer la tensión RMS de salida de la fuente y la impedancia del parlante, esto con el fin de obtener la potencia eléctrica gastada para generar la onda acústica que impactará el panel. En una onda senoidal es sencillo obtener este cálculo pues la onda no varía en el tiempo, por ende:

$$Potencia_{promedio} = \frac{V_{RMS}}{\Omega} = \frac{\frac{V_{Pico}}{\sqrt{2}}}{\Omega}$$

Sin embargo, en la señal de una onda de sonido propia de una canción se deben obtener fracciones de periodo para realizar una medición de la potencia promedio de toda la canción, si se saca la potencia promedio de cada periodo (T) y luego se saca un valor promedio de estos resultados sabremos cual es el valor eficaz de la señal de esta onda sonora.

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T V^2(x)dt}$$

$$V^2{}_{RMS} = \frac{1}{T}\int_0^T V^2(x)dt$$

$$V^2_{RMS} = \frac{1}{T}\int_0^{T_1} V^2(x)dt + \frac{1}{T_2-T_1}\int_{T_1}^{T_2} V^2(x)d + + \frac{1}{T_n-T_{n-1}}\int_{T_{n-1}}^{T_n} V^2(x)d$$

$$V_{RMS} = \sqrt{V^2_{RMST_1}(x)dt + V^2_{RMST_2-T_1}(x)dt + V^2_{RMST_n-T_{n-1}}(x)dt}$$

Finalmente, usamos este valor RMS para reemplazarlo en la fórmula de Potencia promedio, y poder así realizar una comparativa de la potencia gastada por la fuente y la potencia de recolección, para llegar a una conclusión de la eficiencia del sistema con esta señal sonora específica.

B) Comparación energía acústica - almacenamiento eléctrico:

Para determinar esta cuestión, es necesario saber la presión sonora presente justo al frente del panel en el momento de la transducción energética, en una onda seno es sencillo saber esto pues siempre será constante este nivel, en una onda sonora debe tratarse de forma similar a la comparación eléctrica, pues se deben tomar periodos y en cada uno debe hacerse una medición con un sonómetro, luego se puede sacar el promedio de estos valores y se logrará determinar la energía real en dBs SPL que tiene una onda sonora cuyo periodo es el tiempo de duración de la canción.

6. Conclusiones y recomendaciones

Si bien el objetivo de este proyecto se cumplio, lo mas importante es que esta investigación abre la posibilidad a estudios más profundos al respecto. Analizando los resultados finales se puede notar que existe cierta desventaja en el sistema a la hora de una aplicación práctica como en una sala de cine o en un concierto pues el ancho de banda de resonancia del panel al ser tan estrecho, desaprovecha mucha energía acústica presente en las otras bandas bajas del espectro, esto puede ser solucionado con un panel cuya respuesta tenga un ancho de banda mayor o con la construcción de más paneles por banda.

Sin embargo, es necesario recordar que el panel EcoSound basa su funcionamiento en el concepto de Energy Harvesting, por ende aunque en un tiempo pequeño entregue potencias del orden de uW, la acumulacion hara que en un tiempo determinado se pueda tener una gran cantidad de energía utilizable, al fin y al cabo la energía es la potencia multiplicado por el tiempo.

Otras conclusiones obtenidas, y a su vez más específicas fueron:

1. La creación de un sistema de transducción acústico-eléctrica fue exitoso a través del prototipo EcoSound, que por medio de extensas sesiones de modificación y experimentación logra obtener energía eléctrica de baja magnitud para aplicaciones de bajo consumo, donde el factor tiempo junto a la variación de nivel de presión sonora definirá la cantidad posible a almacenar.

2. El panel EcoSound logró adecuarse a un estudio de mezcla como el estudio Foley del centro ático de la Universidad Javeriana; sin embargo, la viabilidad de su uso para este espacio o espacios parecidos depende del mejoramiento de la eficiencia del sistema de transducción acústico-eléctrica.

3. Sin duda, este proyecto evidenció que la transformación de energía acústica a energía eléctrica es posible, trabajar en la eficiencia del sistema es el siguiente paso y puede ser objeto de futuras investigaciones de doctorados o maestrías. Esta eficiencia puede lograrse mediante la optimización del recolector con tecnologías más avanzadas que logren entregar energía del orden de miliWatts o inclusive del orden de Watts.

4. Al colocar 4 micrófonos dentro del panel, para la frecuencia de 80hz existe un cambio de modo (del [2,2] al [3,1]). lo que produce una curva de potencia más eficiente respecto al modo [3,2] de 100Hz debido a que en ella se deben utilizar más transductores, y por ende, la resistencia ejercida por los resortes sobre la membrana es mayor; con esto se deduce que a mayor número de micrófonos menor será el movimiento de la placa.

5. Este proyecto investigativo abrió el espectro de posibilidades en el estudio de la conversión de energia sonora a energia eléctrica, dando cabida a la búsqueda de nuevos métodos de obtención energética y a un nuevo campo de estudio para futuras generaciones.

6. A nivel de materiales, el prototipo basó su construcción en elementos básicos y económicos demostrando cómo a partir de los mismos se da viabilidad a la obtención de energía eléctrica por medios no convencionales, en este caso a través del uso de un resonador acústico de membrana.

7. Este prototipo tal y como esta puede ser usado en espacios donde exista por mucho tiempo la presencia de una única banda de frecuencia, como por ejemplo en fábricas donde se manejan niveles elevados de ruido acústico, o en aeropuertos donde casi siempre el ruido generado por los aviones presenta un mismo comportamiento espectral, el cual no es variable con el tiempo como el de la música.

Referencias Bibliográficas

1. Beeby, Steven and Tom Kazmierski.2011.“ Energy harvesting system,*Springer.*”

2. Boletín Unam-dgcs.2015. “ Desarrollan en la Unam cosechador de energía que genera electricidad a partir del ruido ”*ciudad universitaria.*Disponible en: http://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2015_154.html

3. Manuel j.gutiérrez.2015. “consiguen crear electricidad a través del sonido para cargar tu móvil” periódico el Español. Disponible en https://elandroidelibre.elespanol.com/2015/06/consiguen-crear-electricidad-a-traves-del-sonido-para-cargar-tu-movil.html

4. Minazara, E, Vasic and F costa.2008 “Piezoelectric generator harvesting bike vibrations energy to supply portable devices”, vol.1,No 6.

5. Shirvanimoghaddam, Mahyar et al. 2018. “ Paving the Path to a Green and Self-Powered Internet of Things.” CornellUniversity Library, disponible en: https://arxiv.org/pdf/1712.02277.pdf

6. Queen Mary university of London.2012.“The power of sound to generate electricity”.disponible en: https://www.qmul.ac.uk/research/news/features/2012/the-power-of-sound-to-generate-electricity.html

7. Young, D, Hough. Freedman, A, Roger. *Sears,* “*Física Universitaria Vol.1*”. Pearson Education. México. 2009.

8. Young, D, Hough. Freedman, A, Roger. *Sears,* “*Física Universitaria con física moderna*”. *Vol.2.* Pearson Education. México. 2009.