RAE

1. **TIPO DE DOCUMENTO:** Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero de Sonido

2. **TÍTULO:** Relación entre la cavidad trasera de un folded horn woofer y su respuesta en frecuencia y eficiencia

3. **AUTORES:** Daniel Andrés Pérez Martínez y Luis Alejandro Hernández Leuro

4. **LUGAR:** BOGOTÁ, D.C

5. **FECHA:** Octubre del 2019

6. **PALABRAS CLAVE:** Altavoz, Woofer, Cavidad acústica, Eficiencia, Respuesta en frecuencia, Volumen, Geometría.

7. **DECRIPCIÓN DEL TRABAJO:** Se plantea la variación geométrica y volumétrica de la cavidad trasera de una guía de onda para baja frecuencia, diseñada a partir de los parámetros Thielle & Small del altavoz; con el objetivo de evaluar la influencia de dicha cavidad en características como la eficiencia y la respuesta en frecuencia. Se caracteriza, se compara y se evalúa la correlación de las variables a partir del análisis descriptivo y de correlación proporcionado por algunas herramientas estadísticas como el ANOVA en el rango de 20Hz a 400 Hz. A partir de la norma ISO 3744 se determina el procedimiento para el calculo de la potencia acústica con la cual se calcula eventualmente los porcentajes de eficiencia.

8. **LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:** Diseño de sistemas de sonido

9. **METODOLOGÍA:** Estudio de enfoque cuantitativo, de tipo experimental y alcance de correlación

10. **CONCLUSIONES:**

- La implementación del diseño de una bocina para baja frecuencia a partir de los parámetros TS del altavoz facilita los cálculos correspondientes al volumen de la cavidad trasera, la superficie de la garganta, frecuencias de corte, banda de paso y eficiencia del dispositivo.
- A partir del análisis de la varianza de un factor se logró determinar que existe una relación entre la geometría de la cavidad interior de la bocina con la respuesta en frecuencia de la misma.
- Las variaciones geométricas demuestran un efecto significativo en la RF de la bocina, mientras que el volumen no. Sin embargo, la variación volumétrica demostró disminuir los porcentajes de eficiencia de la bocina, al igual que la geometría.
- En cuanto a la eficiencia, el método de medición y la implementación de la norma para determinar los niveles de potencia acústica fueron efectivos y con ello se logró establecer los porcentajes de eficiencia por bandas de tercio de octava en el rango de operación.

RELACIÓN ENTRE LA CAVIDAD TRASERA DE UN FOLDED HORN WOOFER Y SU RESPUESTA EN FRECUENCIA Y EFICIENCIA

Luis Alejandro Hernández Leuro
Daniel Andrés Pérez Martínez

Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá
Facultad de ingeniería
Programa de ingeniería de sonido
Bogotá, Colombia
2019

RELACIÓN ENTRE LA CAVIDAD TRASERA DE UN FOLDED HORN WOOFER Y SU RESPUESTA EN FRECUENCIA Y EFICIENCIA

Luis Alejandro Hernández Leuro
Daniel Andrés Pérez Martínez

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de ingeniero de sonido:

Título y nombre del director
Ingeniero de Sonido
Belman Jahir Rodríguez Niño

Línea de Investigación:
Diseño de Sistemas de Sonido

Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá
Facultad de ingeniería
Programa de ingeniería de sonido
Bogotá, Colombia
2019

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a Dios por darme la voluntad de desarrollar este proyecto junto con mi compañero; y ayudarnos a superar los inconvenientes que pudieron haber surgido. Igualmente al Ingeniero Belman Rodríguez quien nos brindo su asesoría en este proyecto. A mis padres Blanca Leuro y Luis Arturo Hernández por su amor y apoyo incondicional durante todo este proceso académico y a mi compañero Daniel Pérez que compartió esta idea de investigación desde el principio y siempre mostro la misma motivación durante el proyecto.

Luis Alejandro Hernández Leuro

Agradezco a mis padres por el apoyo constante no solo en la realización del proyecto de grado sino en todo el proceso académico en la universidad. A mi compañero, Luis Alejandro por todo el trabajo realizado, su aporte y responsabilidad, y al ingeniero Belman Rodríguez por el acompañamiento en el desarrollo de este trabajo. Adicionalmente Darío Páez y Luis Hermida por su labor pedagógica y formativa en el programa de ingeniería de Sonido de la universidad de San Buenaventura.

Daniel Andrés Pérez Martínez

Por su interés, amable asesoría e intervención durante el proyecto queremos agradecer a los ingenieros Belman Rodríguez, Manuel Fernando Torres y Oscar Acosta. Cada uno nos brindó su apoyo, además de su aporte significativo en el desarrollo del proyecto y lograron guiarnos a través del proceso, siempre procurando la buena comunicación, el respeto y el amor al conocimiento. Igualmente expresar nuestra gratitud al equipo de los laboratorios que con mucha paciencia nos brindaron sus servicios. Por último a la Universidad de San Buenaventura y sus instalaciones que nos brindó el espacio y los equipos que requerimos. A todos muchas gracias.

Daniel y Alejandro

RESUMEN

Se ha demostrado por diversos autores que el comportamiento de los altavoces es susceptible al cambio de las características constructivas de los mismo. Ejemplo de esto son las bocinas que cumplen la función de adaptar las impedancias entre el diafragma del altavoz y el aire. Estos sistemas suelen ser utilizados por su respuesta a varias de las características que conforman el comportamiento del altavoz, tales como la respuesta en frecuencia y la eficiencia. Para la baja frecuencia el diseño de estos dispositivos suele dar como resultados dispositivos de gran envergadura que hacen uso no solo de la bocina sino de un segundo sistema llamado caja acústica. El estudio de este proyecto se centra en la variación geométrica y volumétrica de esta cavidad para eventualmente evaluar su afectación en las características ya mencionadas. Como resultado del proyecto se demuestra que existe relación entre las geometrías estudiadas y las respuestas en frecuencia al igual que la eficiencia. También se evalúa la influencia del volumen que se ve reflejado en el cambio de la respuesta de eficiencia del sistema sin embargo su influencia no es lo suficientemente significativa para generar una correlación. A manera de recomendación se sugiere el uso de otro tipo de materiales para conseguir variar el volumen y determinar si dicha variación es significativa para la respuesta en frecuencia y la eficiencia.

Palabras Clave: Altavoz, Woofer, Cavidad acústica, Eficiencia, Respuesta en frecuencia, Volumen, Geometría.

ABSTRACT

It has been demonstrated by several authors that the behavior of the loudspeakers is susceptible to the change of the constructive characteristics of the same. An example of this are the speakers that fulfill the function of adapting the impedances between the diaphragm of the loudspeaker and the air. These systems are often used for their response to several of the characteristics that make up the speaker's behavior, such as frequency response and efficiency. For the low frequency the design of these devices usually results in large devices that make use not only of the horn but also of a second system called acoustic box. The study of this project focuses on the geometric and volumetric variation of this cavity to eventually assess its involvement in the aforementioned characteristics. As a result of the project, it is shown that there is a relationship between the geometries studied and the answers in frequency as well as the efficiency. The influence of the volume that is reflected in the change of the efficiency response of the system is also evaluated, however, its influence is not significant enough to generate a correlation. As a recommendation, it is suggested to use other types of materials in order to vary the volume and determine if this variation is significant in terms of frequency response and efficiency.

Key Words: Speaker, Woofer, Acoustic Cavity, Efficiency, Frequency Response, Volume, Geometry.

Tabla Contenido

Pag

1 CAPÍTULO I. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 21
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 21
1.1.1 Pregunta de investigación 22
1.2 OBJETIVOS 23
1.2.1 Objetivo General 23
1.2.2 Objetivos Específicos 23
1.3 JUSTIFICACIÓN 24

2 CAPÍTULO II. MARCO DE REFERENCIA 25
2.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA 25
2.2 MARCO CONCEPTUAL 27
2.2.1 Principios de Radiación Sonora 27
2.2.2 El Altavoz 30
2.2.3 Radiación Directa - Radiación Indirecta 40
2.2.4 Métodos Numéricos de Simulación 49
2.2.5 Herramientas Estadísticas 52
2.3 MARCO NORMATIVO 57
2.3.1 ISO 3744 Acoustics — Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure — Engineering methods for an essentially free field over a reflecting plane 58
2.3.2 IEC 60268-5 Sound system equipment-Part 5: Loudspeakers 60

3 CAPÍTULO III. DISEÑO METODOLÓGICO 61
3.1 ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN 61
3.2 ENFOQUE Y TIPO DE INVESTIGACIÓN 62

4 CAPÍTULO IV. DESARROLLO INGENIERIL 63
4.1 PARÁMETROS THIELE & SMALL DEL ALTAVOZ 63
4.1.1 Medición de impedancia 65
4.2 MEDICIÓN DE RESPUESTA EN FRECUENCIA (RF) 67
4.2.1 Procedimiento de Medición 68
4.3 DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE EFICIENCIA DEL SISTEMA 70
4.3.1 Procedimiento de medición 72
4.4 DISEÑO DE LAS GUÍAS DE ONDA 76
4.4.1 Elección de las geometrías 78
4.5 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO 81
4.5.1 Proceso de Simulación 84

5 CAPÍTULO V. RESULTADOS Y ANÁLISIS 89
5.1 DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA 89
5.1.1 Geometría 1 Acoplada a la Bocina 93
5.1.2 Geometría 2 Acoplada a la Bocina 96
5.1.3 Geometría 3 Acoplada a la Bocina 98
5.1.4 Variación Volumétrica 100

5.2 DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA RESPUESTA DE EFICIENCIA 103
5.2.1 Puntos de interés en el análisis grafico de los resultados 108
5.3 ANÁLISIS MODAL 113
5.4 FACTORES DE VARIACIÓN Y RESULTADOS 117

6 CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 121
6.1 CONCLUSIONES 121
6.2 RECOMENDACIONES 123

7 BIBLIOGRAFÍA 125

ANEXOS DEL DOCUMENTO 130

Lista de Figuras **Pág.**

Figura 2-1 Tabla de valores de referencia para representaciones logarítmicas o de nivel. Fuente handbook for sound engineers. 29

Figura 2-2 Circuito equivalente de un altavoz 31

Figura 2-3 Circuito equivalente del altavoz extrayendo los transformadores..... 32

Figura 2-4 Representación del circuito equivalente anti reciproco del altavoz..... 32

Figura 2-5 Reducción del circuito equivalente en baja frecuencia..... 33

Figura 2-6 curva de resonancia para distintos valores de Qts. Fuente (Sacerdoti, Parámetros Thiele-Small, 2017) 37

Figura 2-7 Diagrama de una caja cerrada acoplada al altavoz junto con las variables electroacústicas. Fuente electroacústica de altavoces y micrófono. fuente basilo pueo 41

Figura 2-8 Diagrama de una bocina exponencial 43

Figura 2-9 Circuito equivalente de la bocina 45

Figura 2-10 Respuesta teórica de eficiencia de la bocina para baja frecuencia. Extraido de (D.B. Keele, LOW-FREQUENCY HORN DESIGN USING THIELE/SWALL DRIVER PARAMETERS, 1977)..... 45

Figura 2-11 etapas de un proceso de simulación numérica..... 52

Figura 2-12 Grafica extraída del ANOVA. Extraída del video…. 56

Figura 4-1 Datasheet entregado por el fabricante beyma del altavoz 15WR400 64

Figura 4-2 . Diagrama de conexión para obtener los parámetros TS del altavoz. Extraída del software REW..... 65

Figura 4-3 Diagrama de conexión para la calibración del sistema de medición. Extraída del software REW..... 66

Figura 4-4 Altavoz suspendido para la medición de parámetros TS 67

Figura 4-5 Diagrama de conexión para la medición de respuesta en frecuencia 70

Figura 4-6 Diagrama de conexión para la medición de potencia eléctrica de entrada 73

Figura 4-7 Posiciones de micrófono parta la medición de la potencia acústica 74

Figura 4-8 Diagrama genérico de una guía de onda para baja frecuencia. (Bright, Analysis of a Folded Horn, 2003) 77

Figura 4-9 Dimensiones externas de la caja exterior de la guía de onda 78

Figura 4-10 Forma geométrica del sistema caja acústica acoplado a la guía de onda 80

Figura 4-11 Formas geométricas a implementar en la medición 81

Figura 4-12 sistema de acople entre la caja y la lámina superior otorgando modularidad del sistema 82

Figura 4-13 Geometría 3 a implementar en el sistema caja acústica acoplada a la bocina .. 83

Figura 4-14 reducción de volumen mediante la implementación de frescasa 84

Figura 4-15 dimensiones de las cavidades acústicas 85

Figura 4-16 modulo Model de Ansys 86

Figura 4-17 superficie de radiación en la cavidad acústica para la simulación en Ansys. .. 87

Figura 4-18 simulación de la guía de onda en Ansys 87

Figura 4-19 configuración de Ansys para realizar análisis modal 88

Figura 5-1 geometría 1 acoplada a la bocina 93

Figura 5-2 geometría 2 acoplada a la bocina 96

Figura 5-3 geometría 3 acoplada a la bocina 98

Figura 5-4 simulación de actividad modal en las cavidades 114

Figura 5-5 comportamiento modal en simulación a) geometría 1 b) geometría 2 y c) geometría 3 116

Figura K-0-1 Caja de referencia Imágenes tomadas del documento 160

Figura K-0-2 Coordenadas y posiciones de micrófono según norma ISO 3744 161

Figura K-0-3 Coordenadas y posiciones de micrófono según norma ISO 3744 162

Lista de Tablas **Pág.**

Tabla 4-1 Parámetros TS del altavoz beyma 15wr400 medidos con el software REW 67

Tabla 4-2 Parámetros de diseño calculados a partir de los parámetros TS del altavoz beyma 15WR400 77

Tabla 4-3 Dimensiones de la guía de onda 82

Tabla 5-1 Descriptores estadísticos de las RF de la geometría 1. 93

Tabla 5-2 Descriptores estadísticos de las RF de la geometría 1 en la banda de paso. 95

Tabla 5-3 Descriptores estadísticos de las RF de la geometría 2. 96

Tabla 5-4 Descriptores estadísticos de las RF de la geometría 2 en la banda de paso. 97

Tabla 5-5 Descriptores estadísticos de las RF de la geometría 3. 99

Tabla 5-6 Descriptores estadísticos de las RF de la geometría 3 en la banda de paso 99

Tabla 5-7 Diferencias de los descriptores estadísticos comparando cada geometría en para el volumen 1 100

Tabla 5-8 Diferencias de los descriptores estadísticos comparando cada geometría en para el volumen 2 102

Tabla 5-9 actividad modal 113

Tabla 5-10 simulación de modos acústicos 114

Tabla 5-11 Anova de todas las poblaciones bajo estudio. Test de levene aplicado a todas las poblaciones 117

Tabla 5-12 Anova de las tres geometrías conservando el volumen 1 . Test de levene aplicado a las tres geometrías volumen1 118

Tabla 5-13 Anova de las tres geometrías conservando el volumen 2 . Test de levene aplicado a las tres geometrías volumen 2 118

Tabla 5-14 ANOVA aplicado a ambos volúmenes de la geometría 1 119

Tabla 5-15 ANOVA aplicado a ambos volúmenes de la geometría 2 119

Tabla 5-16 ANOVA aplicado a ambos volúmenes de la geometría 3 119

Lista de gráficas Pág.

Gráfica 5-1 respuesta en frecuencia beyma..... **¡Error! Marcador no definido.**

Gráfica 5-2 respuesta en frecuencia para cada geometría y volumen**¡Error! Marcador no definido.**

Gráfica 5-3 respuesta en frecuencia para cada geometría y volumen..... 90

Gráfica 5-4 Respuesta en frecuencia para cada geometría en volumen 1..... 92

Gráfica 5-5 Respuesta en frecuencia para cada geometría en volumen 2..... 92

Gráfica 5-6 Gráfico de respuesta en frecuencia promediada de la geometría 1, volumen 1 en color rojo y volumen 2 en color verde 95

Gráfica 5-7 Grafico de respuesta en frecuencia promediada de la geometría 2, volumen 1 en color azul y volumen 2 en color morado..... 98

Gráfica 5-8 Grafico 8 Grafico de respuesta en frecuencia promediada de la geometría 3, volumen 1 en color amarillo y volumen 2 en color verde. A este grafico se le ha aplicado un suavizado de 1/48..... **¡Error! Marcador no definido.**

Gráfica 5-9 eficiencia obtenida para cada geometría y volumen 103

Gráfica 5-10 a y b. comparación de volúmenes para geometría 1**¡Error! Marcador no definido.**

Gráfica 5-11 a y b. comparación de volúmenes para geometría 2**¡Error! Marcador no definido.**

Gráfica 5-12 a y b. comparación de volúmenes para geometría 3**¡Error! Marcador no definido.**

Gráfica 5-13 a y b. Comparación de las tres geometrías para Volumen 1..... 108

Gráfica 5-14 Respuesta en frecuencia de la caja 1 volumen 1 y 2 grafica superior e inferior respectivamente, en donde se evidencia una disminución drástica del SPL para la banda de 160 Hz y 250 Hz..... 109

Gráfica 5-15 Análisis del cambio de volumen y presencia del material absorbente en a) geometría 1 b) geometría 2 y c) geometría 3..... 111

Gráfica 5-16distribución modal..... 113

Gráfica 5-17 distribución modal por geometrías 115

Introducción

Para los fabricantes de altavoces, el uso de bocinas en los sistemas de reproducción aumenta la eficiencia de estos dispositivos (White, 1995). Esta información es respaldada por Klipsch en varios de sus estudios, afirmando que la eficiencia de estos sistemas puede llegar a ser desde 10 hasta 50 veces mayor que la de un sistema que no implemente bocinas de reproducción o también llamados radiadores directos (KLIPSCH, A Low-Frequency Horn of Small Dimensions, 1979). Así mismo, en sus estudios demuestra que la implementación de estos sistemas se ve reflejada no solo en la eficiencia, sino en la respuesta en frecuencia e igualmente menciona que el uso de las guías de onda permite alcanzar mayores niveles de potencia acústica con una excursión del diafragma menor, en comparación a la excursión necesaria en los sistemas de radiación directa para alcanzar los mismos niveles de potencia, lo que según Klipsch, se ve reflejado en una menor distorsión armónica.

Así, hoy en día es muy frecuente el uso de las guías de onda en sistemas que requieren alta fidelidad, debido a las características ya mencionadas y adicionalmente a las ventajas que estos sistemas traen en cuanto a directividad (E. C. WENTE, 1978). Por esta razón Wente & Thuras expresan con claridad que para los sistemas de PA, así como los sistemas de reproducción musical y discursos en auditorios de gran escala; es amplio el uso que se les da a las bocinas. Incluso Alan Fierstein & Richard Long hablan de la influencia que tuvo la implementación de las guías de onda, expresamente en la zona de baja frecuencia, para la prosperidad de una discoteca en New York que requirió de una intervención competa en el sistema de sonido usado en dicho espacio (Alan Fierstein, 1980). Por otro lado, John Watkinson, habla en su investigación de algunas desventajas de los radiadores directos, como la falta de linealidad en la fase, con lo cual son requeridos procesadores de señal que sacrifican algunas otras características como la respuesta transitoria y el área de cobertura de los altavoces (HOLLAND, 2003). Estos efectos son discutidos por los autores mencionados anteriormente, algunos de ellos resaltando el equilibrio que pueden presentar las guías de onda en cuanto a estos criterios de frecuencia, tiempo y espacio sobre los

cuales es comúnmente evaluado el comportamiento de un altavoz (WATKINSON, 2003) y (Rumsey, 2015).

Por esta razón, se vuelve una necesidad para la ingeniería el estudio de este tipo de sistemas. A pesar de que existe gran cantidad de información y bibliografía referente a ello, en donde se mencionan las principales características teóricas y constructivas, existen componentes físicos que hacen parte de estos sistemas y que aun no han sido completamente explorados por la ingeniería. Ejemplo de esto es la cavidad trasera del woofer de bocina plegada de la cual no se tiene mucha información pero aun así hace parte del análisis de las guías de onda.

Con este proyecto se pretende priorizar el estudio de la cavidad trasera del woofer de bocina plegada para determinar su relación con características como la respuesta en frecuencia y eficiencia del sistema. Lo anterior se dará a partir del calculo de los parámetros Thiele & Small con los cuales se plantea un diseño modular del Folded Horn Woofer[1], para un altavoz de 15". Con ello, los autores consideran tres geometrías y dos volúmenes por cada geometría aplicados a la cavidad bajo estudio y sobre estos modelos se realizan todos los procedimientos de medición planteados para el cumplimiento de los objetivos.

Por lo anterior, durante el documento será discutida la teoría electroacústica referente a los sistemas de radiación directa e indirecta, que fundamenta tanto el diseño como el funcionamiento del dispositivo, y a partir de una serie de mediciones (respaldadas por documentos normativos como la norma ISO 3744 y la norma IEC 60268-5), se obtendrán los resultados de la variación geométrica y volumétrica de la cavidad trasera del Folded Horn Woofer. De igual forma, se discute también el procedimiento referido a la obtención de la eficiencia del sistema, que es otra de las variables dependientes que los autores han hecho parte del análisis.

[1] Esta es la denominación convencional que se le da a la guía de onda para baja frecuencia en donde la bocina se pliega alrededor del altavoz acoplado a la caja acústica (denominada en este documento como cavidad trasera), su nombre traduce "Woofer de bocina plegada". Este pliegue de la bocina se da por las dimensiones que puede llegar a tener debido al rango de operación para las que son diseñadas .

Por ultimo, basándose en el documento de Chaparro Gutiérrez (Colorado, 2018) se determinan los procesos estadísticos que mejor se adaptan al análisis requerido, como el ANOVA, el análisis de dispersión típica, el coeficiente de asimetría de Pearson, entre otros. Así, se observa a partir de las mediciones y su análisis, la relación que existen entre algunas de las variables bajo estudio como la respuesta en frecuencia y la geometría que adopta la cavidad trasera del Folded Horn Woofer, comprobando la dependencia que existe entre los componentes constructivos de los sistemas de sonorización y su comportamiento. Se observa igualmente anomalías en el comportamiento de estos sistemas que llama la atención de los autores y genera discusión en cuanto a la causa de dicho comportamiento. Adicionalmente se muestra el diseño modular del sistema que permitió realizar la cantidad de iteraciones necesaria para conseguir las poblaciones de datos que hacen parte del análisis.

1 Capítulo I. Problema De Investigación

Durante este capítulo el lector encontrará el planteamiento principal del problema y la pregunta que propició la investigación. Se hace un breve recorrido de la información a disposición sobre los sistemas de audio y se encamina dicho contenido para formular una pregunta que tiene como objeto plantear la base del proyecto. Posteriormente se detallan los objetivos de investigación que darán respuesta a esa pregunta y la justificación de la necesidad de dar respuesta a la investigación.

1.1 Planteamiento Del Problema

El comportamiento de los altavoces es susceptible a cambios que guardan relación con las características constructivas del sistema y las posibles variaciones que estas puedan tener (Voetmann & Brixen, 2011). Por esta razón muchos autores se han dedicado al estudio de los altavoces y sistemas acoplados a estos (Ballow, 2008). La guía de onda y las cajas acústicas son ejemplo de ello, al ser un tema de estudio de gran interés para el desarrollo de nuevos dispositivos de sonido.

El objetivo de estos sistemas es el control de ciertas características que definen el comportamiento del dispositivo. La respuesta en frecuencia y eficiencia son ejemplo de esto ya que para algunos sistemas como los altavoces de baja frecuencia dichas características permiten sacar el mayor provecho del altavoz acorde con los requerimientos del mercado (Talbot, 2013). Por esta razón suelen ser implementadas guías de ondas para los sistemas de baja frecuencia debido a su influencia sobre estas dos características. Sin embargo, es posible notar que la mayor parte de la bibliografía se dedica al estudio de la bocina y su relación con el comportamiento del sistema, dejando de lado algunos componentes físicos allí presentes.

Los estudios que hacen énfasis en las guías de onda implementadas en sistemas de reproducción de baja frecuencia no brindan suficiente información acerca de la relación

entre la cavidad trasera del altavoz y su influencia en el comportamiento del sistema. Sin embargo se ha demostrado que eliminar la cavidad de compresión (cavidad trasera) o el sistema de radiación indirecta cambia la relación entre la energía eléctrica y energía acústica radiada (White, 1955).

Determinar si características como la respuesta en frecuencia y eficiencia guardan relación con dicha cavidad puede establecer información que permita el desarrollo de nuevos sistemas e incluso servir como punto de partida para futuras investigaciones que busque innovar en el diseño de estos dispositivos.

1.1.1 Pregunta de investigación

¿Cómo varía la eficiencia y respuesta en frecuencia de un folded horn woofer, a partir de la modificación de la geometría y el volumen de la cavidad trasera?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Evaluar la relación entre la cavidad trasera de un woofer de bocina plegada (folded horn woofer) y su eficiencia y respuesta en frecuencia, a partir de la modificación del diseño de la cavidad, en el rango de frecuencias de 20Hz a 400 Hz.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Diseñar tres variaciones para la geometría y dos para el volumen de la cavidad trasera del altavoz, teniendo en cuenta el funcionamiento del folded horn woofer.
- Analizar el comportamiento de la respuesta en frecuencia y eficiencia para cada sistema implementado
- Evaluar la variación de la eficiencia y respuesta en frecuencia de cada sistema y su relación con la cavidad acústica implementada.

1.3 Justificación

Se han desarrollado diversas teorías que fundamentan la implementación de sistemas acústicos, con el fin de mejorar las tecnologías ya existentes o dar solución a problemas que puedan presentar los sistemas de audio. La eficiencia y respuesta en frecuencia de estos dispositivos suelen ser dos de las características de mayor interés para los fabricantes debido a que buscan brindar, en la medida de lo posible y, a partir de las necesidades del mercado, un aporte significativo y equilibrado de estas en sus sistemas. En vista de esto, innovar y mejorar los sistemas de sonido se vuelve prioridad en el desarrollo de la ingeniería. Esto sugiere una renovación constante en la información que existe al respecto. Hoy en día existe un gran extensión de este conocimiento y la necesidad de aplicarlo, quizás en formas poco estudiadas, da la opción de generar nueva información o simplemente corroborar la ya existente.

La principal razón por la que se quisiera desarrollar la idea, se da a con el fin de comprobar la aplicabilidad de algunas teorías y a partir de esto generar información que pueda ser base para futuras investigaciones. Por tal motivo, el fin ultimo del proyecto esta orientado a la implementación de teorías y desarrollos en el campo de diseño de dispositivos teniendo como objeto de estudio la forma en que las cavidades acústicas pueden alterar las características sonoras de un sistema como el folded horn woofer.

2 Capítulo II. Marco De Referencia

En este capítulo se introduce al lector a la información con la que los autores cuentan para desarrollar el proyecto. Se presentan los antecedentes en donde se evidencia la falta de información con respecto al tema de investigación propuesto y posteriormente se da inicio al marco de referencia del cual hacen uso los autores para soportar teóricamente la información expuesta. También se encuentra el marco normativo, base fundamental para los procesos de medición realizados durante el trabajo y su significancia en el proyecto.

2.1 Antecedentes Del Problema

Las cavidades acústicas acopladas a los transductores son utilizadas para corregir o mejorar características como la eficiencia y respuesta en frecuencia de un altavoz (Bright , 2003). Por tal motivo, el estudio de estas cavidades es necesario para llevar a cabo procesos de diseño y construcción de este tipo de dispositivos. Estos procesos comprenden tanto la caracterización del transductor y estructuración de los parámetros de diseño, hasta la elección de los materiales a usar en la implementación de todo el sistema acústico, ya que estas características constructivas intervienen en el comportamiento del sistema; en proyectos de investigación previos se ha demostrado como los componentes físicos del driver o altavoz, específicamente cono, bobina y suspensión afectan su comportamiento en aspectos como la respuesta en frecuencia, directividad y sensibilidad (Galindo Castro, González Rodríguez, & Paz Ramírez., 2016).

Sin embargo, estas características constructivas no son las únicas con las que puede verse alterado el funcionamiento de un sistema sonoro. El estudio electroacústico de los altavoces y las cavidades acopladas a ellos, a hecho que se entiendan estos dispositivos como un solo sistema acústico. Es decir que la respuesta de un altavoz también puede verse afectada por la cavidad acoplada a este (Basilio Pueo & Romá Romero, 2003). Ejemplo de esto es el estudio llamado "*La influencia de las cajas acústicas planas en las propiedades vibratorias de los transductores electrodinámicos"* en el que se demuestra como es afectada la

sensibilidad y respuesta en frecuencia de un transductor a partir de la variación geométrica de la cavidad acoplada al altavoz (Beer, Ehrig, & Betz, 2013).

También son objeto de interés los sistemas de reproducción de baja frecuencia o woofers, cuya cavidad acoplada permite dar solución al efecto de cancelación en baja frecuencia, además de modificar la respuesta en frecuencia de este. A estos sistemas también suelen ser acopladas guías de onda como bocinas (Horns), que son cavidades implementadas en drivers dedicados a la reproducción de cualquier rango de frecuencias (altas, medias y bajas). Para los woofers, cuya longitud de onda asociada oscila aproximadamente entre uno y diez y ocho metros aproximadamente, es usual el uso de una bocina plegada (folded horn) con dimensiones proporcionales a estas longitudes de onda (Beranek & Mellow, 2012). Uno de los diseños más convencionales para woofers de gran tamaño se compone por una cavidad trasera acoplada al transductor electro-acústico, y la guía de onda que es en este caso una bocina plegada, ubicada en la parte delantera del altavoz. Este sistema se conoce como radiación indirecta ya que el altavoz no tiene una exposición al medio, sino que esta se da a través de la guía de onda (White, 1955). Con este sistema se hace evidente un aumento en la eficiencia del speaker, debido a la compresión y la adaptación de impedancias proporcionados por la cavidad trasera y la guía de onda del sistema respectivamente.

Actualmente existen variaciones a este diseño que modifican la característica de radiador indirecto exponiendo el altavoz al exterior de la cabina y eliminando la cavidad de compresión del sistema. El resultado obtenido con esto demostró que el acople de impedancias generado por la guía de onda, disminuyó y así mismo el rendimiento del altavoz a falta de un sistema de compresión. Además de esto, el aporte energético de la parte trasera del altavoz no es significativo (White, 1955). Hasta el momento, el estudio de estos sistemas se ha centrado en como interviene la guía de onda en las características sonoras del dispositivo, sin embargo, no se ha profundizado en estudios que se centren en la influencia que puede tener la variación del sistema acústico implementado en la cavidad de compresión del altavoz, es decir, la implementación de una cavidad acústica que substituya a la de compresión con el objetivo de obtener un cambio en el comportamiento del sistema.

Como ya se ha mencionado, las variaciones que pueda tener el comportamiento de un altavoz se pueden dar como consecuencia de cambios en los componentes físicos que lo conforman (Bright , 2003), incluyendo la cavidad trasera del woofer tal y como se muestra en el articulo *High - Effciency Three-way Speaker System* (White, 1955). Sin embargo la información aportada por esta investigación no es suficiente para determinar la relación entre dicha cavidad y la respuesta en frecuencia y eficiencia del sistema. Esta falta de información plantea un problema para el desarrollo de dispositivos de audio teniendo en cuenta que no todos los componentes de este sistema han sido estudiados en profundidad y generar información se vuelve prioridad para el desarrollo de nuevos sistemas o investigaciones. Por esta razón se plantea la pregunta problema que se centra en la variación de las características mencionadas anteriormente y su relación con el objeto de estudio.

2.2 Marco Conceptual

En el marco conceptual se ingresa toda la información bibliográfica que corresponde a la teoría desarrollada para el proceder de los autores durante el proyecto. Todas las decisiones tomadas y procedimientos realizados se encuentran respaldados en el marco conceptual que pretende dar a entender al lector el conocimiento que se requiere para el desarrollo del proyecto

2.2.1 Principios de Radiación Sonora

Las ondas sonoras, entendidas como pequeñas variaciones de presión generadas por una superficie que ha entrado en vibración, constituyen un proceso de propagación de energía dado a través de un medio elástico como el aire o el agua[2]. Las partículas que componen el medio de propagación describen un movimiento armónico, con lo cual es posible atribuir características como frecuencia, amplitud, fase y longitud de onda; a la onda sonora. Ahora bien, el termino radiación se refiere a la emisión y distribución de energía a través de el

[2] Un medio elástico es aquel que puede experimentar deformaciones cuando está sometido a fuerzas o bien a presiones y luego cuando ellas desaparecen recobre su forma original. Por ejemplo el aire confinada dentro de un inflador es un medio elástico.

espacio (DAVIS, 1987) y, tratándose de ondas sonoras, el concepto se enfoca en estudiar (i) la emisión de energía a través de las ondas sonoras y (ii) la distribución de dicha energía en el espacio (Möser & Barros, 2009).

A partir de lo anterior, es posible definir los sistemas de radiación sonora como aquellos que propician esta emisión de energía y la distribución de la misma. Ejemplo de esto son los altavoces que bajo el termino de radiación sonora pueden ser descritos a partir de sus características direccionales e impedancia de radiación (Pueo, 2003)

2.2.1.1 Intensidad, potencia y nivel de presión sonora

Como consecuencia de la propagación de la onda, se tiene una cierta cantidad de energía que fluye a través del medio. La intensidad esta definida como la energía que atraviesa una superficie perpendicular a la dirección de propagación (Beranek, Acústica, 1961). Este termino esta íntimamente relacionado con la magnitud de percepción sonora y es definida por varios autores a partir de la ecuación 1, en donde se encuentra ρ_0 como la densidad del aire [kg/m^3] y c, como la velocidad del sonido [m/s]:

$$I = \frac{p^2}{\rho_0 c} \ watt/m^2 \qquad \textit{Ecuación.1}$$

La potencia acústica, por su parte, se refiere a la cantidad de energía por unidad de tiempo. Por lo que ambos términos, tanto la intensidad como la potencia se refieren a la cantidad de energía, con la diferencia que la potencia considera la unidad de tiempo (Ballow, 2002); teniendo entonces la definición expresada en la ecuación 2

$$W = I * s \qquad \textit{Ecuación.2}$$

Durante el proyecto también se ha tenido en cuenta la siguiente expresión aportada en la investigación de D. B. Keele, Jr para calcular la potencia acústica (D. B. Keele, 1976), ecuación 3

$$W = \left(\frac{16\pi}{\rho_0 c} * 10^{-10}\right) * \frac{r^2}{Q} 10^{\frac{SPL}{10}} \qquad \textit{Ecuación.3}$$

En handbook for sound engineers aportan una tabla en donde se relacionan los valores de referencia para obtener los niveles de potencia tanto eléctrica como acústica. Esta tabla se muestra en la figura 2.1 de este apartado.

En cuanto a los niveles de presión sonora y en general los niveles de las magnitudes anteriormente discutidas, se trata de representaciones logarítmicas que hacen más sencilla la manipulación de los datos con respecto a los valores lineales que puedan adquirir (Ballow, 2002). Al tratarse de niveles de presión se asume la ecuación 4 mientras que al tratarse de niveles de energía se asume la ecuación 5

$$SPL = 20\ Log\left(\frac{p}{pref}\right)\ dB \qquad \textit{Ecuación.4}$$

$$L' = 10Log\left(\frac{x}{xref}\right) \qquad \textit{Ecuación.5}$$

donde p hace referencia a la presión sonora observada y p_{ref} es la presión de referencia que se muestra en la figura 2.1. La x de la ecuación 5 hace referencia al valor que adquiere la intensidad o potencia acústica y x_{ref} es el valor de referencia de cada magnitud.

Electrical Power	
dBW	1 Watt
dBm	0.001 Watt
Acoustical Power	
dB-PWL or L_w	10^{-12} Watt
Electrical Voltage	
dBV	1 Volt
dBu	0.775 Volts
Acoustical Pressure	
dB SPL or L_p	0.00002 Pascals

Figura 2-1 Tabla de valores de referencia para representaciones logarítmicas o de nivel. Fuente handbook for sound engineers.

2.2.2 El Altavoz

El proceso de transducción electroacústica conlleva la transformación de energía a través de tres sistemas, eléctrico, mecánico y acústico. Una señal eléctrica, como el audio, es llevada desde el generador hasta el altavoz que se encarga de convertir esta señal eléctrica en una señal acústica (Holland, 2007). Esto se da a partir de la transformación de dicha señal eléctrica, al movimiento de la membrana del altavoz convirtiendo la señal original en la energía requerida para mover el diafragma y finalmente tornando esta energía mecánica en energía acústica a partir de los principios de radiación discutidos en la sección anterior.

Este proceso, estudiado por la electroacústica y el uso de analogías entre sistemas, ha llevado a la bibliografía a profundizar en el funcionamiento de los altavoces como dispositivos de transducción electro-mecánico-acústico motivo por el cual durante esta sección se abordaran brevemente los temas relacionados con el altavoz y sus características generales (OLSON, 1940).

2.2.2.1 Transducción Electroacústica

Un altavoz electrodinámico es un dispositivo que se encarga de convertir energía eléctrica en energía mecánica y esta última convertirla en energía acústica (OLSON, 1940). De esta forma se obtiene la reproducción de una señal acústica a partir de una señal eléctrica. Para entender el funcionamiento de estos dispositivos es oportuno definir dos etapas referidas al tipo de transducción llevado a cabo (Cifuentes). En la primer etapa se tiene la interacción de los elementos mecánicos y eléctricos que componen el altavoz. En la segunda etapa se toma en consideración la interacción de los elementos mecánicos con el medio acústico de propagación; sin embargo antes de proceder con la explicación de cada etapa es necesario definir algunos conceptos que facilitaran el entendimiento del proceso de transducción.

Las partes que componen un altavoz, tanto mecánicas como eléctricas, definen varios de los parámetros tenidos en cuenta para caracterizarlo. Cada uno de sus elementos cumple una función especifica y si se ven alterados de algún modo, el funcionamiento del sistema también se vera afectado. Algunos de los elementos que componen el altavoz son la bobina,

el diafragma del altavoz, un imán que produce un campo magnético y una resistencia generada por la bobina. El altavoz electrodinámico suele tener un sistema de suspensión que se encarga de alinear y dar rigidez al diafragma. Este sistema esta compuesto de una suspensión interna, comúnmente llamada araña, y una suspensión externa (Castro, 2016).

Dichos elementos se mencionan y son tenidos en cuenta porque con ellos se puede generar un circuito equivalente que se utiliza como herramienta para conocer el comportamiento del sistema y caracterizarlo según los parámetros Thiele & Small.

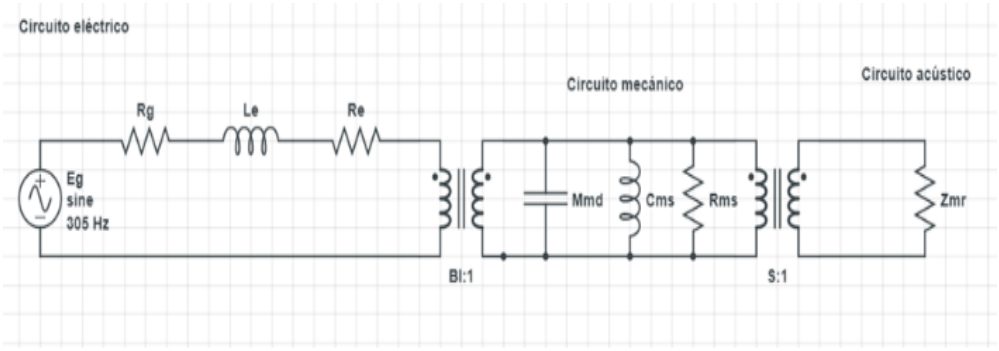


Figura 2-2 Circuito equivalente de un altavoz

En la figura 2-2 se aprecia el circuito equivalente al altavoz al que se denomina circuito anti-reciproco, al tener dos tipos de analogías representadas en el, donde $\boldsymbol{Rg}$, representa la resistencia del generador, $\boldsymbol{Le}$ es el elemento inductor de almacenamiento de energía y $\boldsymbol{Re}$ es la resistencia que genera. En el circuito mecánico se encuentra la masa mecánica, $\boldsymbol{Mmd}$, representada por el capacitor, la compliancia, es decir el sistema de suspensión, representado por la bobina $\boldsymbol{Cms}$ y la resistencia asociada a este $\boldsymbol{rms}$. En el último circuito se encuentra la impedancia mecánica de radicación, $\boldsymbol{Zmr}$, representada por una resistencia, debido a las propiedades del software no fue posible representar dicha impedancia con el diagrama comúnmente utilizado (símbolo de una caja), sin embargo se hace la aclaración de que se trata de una impedancia compuesta por la resistencia mecánica de radiación y la masa mecánica de radiación.

Al quitar los transformadores del circuito, teniendo en cuenta las analogías electroacústicas (Pueo, 2003), se determina que el circuito equivalente para este sistema esta dado por el que se muestra en la Figura 2-3.

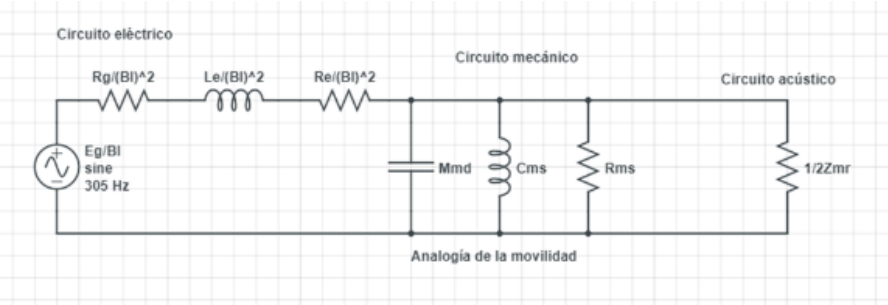


Figura 2-3 Circuito equivalente del altavoz extrayendo los transformadores

Respetando los factores de transformación de cada sistema, el circuito equivalente mostrado en la figura 2-3 representa el sistema acoplado del altavoz, sin embargo, existe aun una diferencia en las analogías implementadas en el circuito, por lo tanto no es el circuito equivalente final, mientras que en la figura 2-4 el circuito no es anti reciproco (Cifuentes). Allí, las resistencias en serie del generador y la bobina son sumadas y el resto de elementos son transformados a la analogía correspondiente, es decir la de impedancia, además de esto la fuente de voltaje es convertida en una fuente de corriente por lo tanto los elementos en serie pasaran a ser elementos en paralelo.

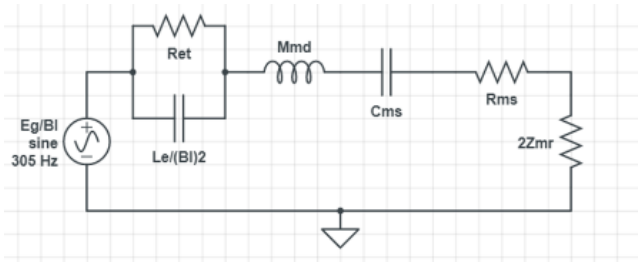


Figura 2-4 Representación del circuito equivalente anti reciproco del altavoz

A partir de este circuito es posible conocer su comportamiento por medio de su función de transferencia asociada. Para esto se analizará el sistema en frecuencias bajas y altas correspondiendo a una función de transferencia dada para LF y otra para HF debido al amplio espectro en frecuencia que pueden manejar los altavoces.

El siguiente análisis corresponde a la primera etapa de transducción, allí se analiza la relación entre el voltaje y la velocidad adquirida por los elementos del sistema. En esta primera etapa, interesa conocer la función de transferencia que defina el comportamiento de la velocidad a partir de la señal eléctrica de entrada, es por esto que el generador de fuerza

será tomado como un generador de corriente y la velocidad será análoga al voltaje en el circuito.

2.2.2.2 Parámetros Thiele & Small del altavoz

A partir del análisis de los componentes eléctricos, mecánicos y acústicos del altavoz, se hace posible describir y predecir su comportamiento (Beranek, Acústica, 1961). Sin embargo, en la práctica, obtener los valores correspondientes a estos componentes físicos no es sencillo por lo que aun teniendo una ecuación que modele dicho comportamiento no es funcional si los valores de cada elemento en la ecuación no se ajustan a la realidad (GUSTAVO, 2015). Estos elementos tienen la desventaja de no ser medibles en forma directa una vez que el altavoz ha sido ensamblado por lo que, a partir del análisis de la curva de impedancia del altavoz, Neville Thiele y pocos años después Richard Small, lograron describir dicho comportamiento a partir de parámetros de los cuales sus valores eran fácilmente obtenidos. Como ya se ha mostrado ellos describen el funcionamiento del altavoz como si fuese un filtro eléctrico, es decir que analizan un dispositivo electro-mecano-acústico como un filtro meramente eléctrico. De esta manera cualquier circuito resonante, ya sea eléctrico, mecánico o acústico se comportan de manera equivalente (Sacerdoti, Parámetros Thiele-Small, 2017). El análisis que Thiele & Small plantean, se sitúa en la zona de muy baja frecuencia, por lo que del circuito equivalente se desprecian aquellos elementos que no influencian en gran medida el comportamiento del altavoz en este rango de operación.

- *Baja frecuencia (LF)*

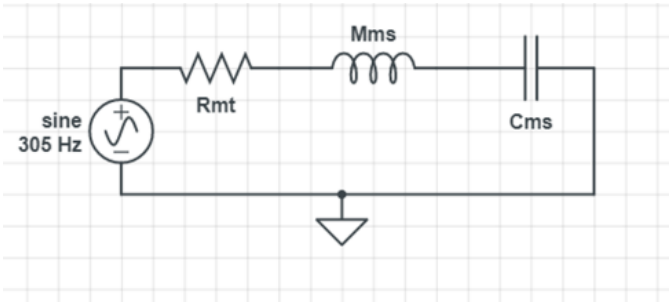


Figura 2-5 Reducción del circuito equivalente en baja frecuencia

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{S}{S^2 + \frac{R_{mT}}{M_{mS}}S + \frac{1}{M_{mS}C_{MS}}} \qquad \textit{Ecuación.6}$$

$$v_i = \frac{e_g\ Bl}{R_{eT}M_{mS}} \qquad \textit{Ecuación.7}$$

Al analizar este circuito en baja frecuencia es posible notar que algunos elementos desaparecen como se muestra en la figura 2-5. En primer lugar, el capacitor que hace referencia a la bobina del sistema, en baja frecuencia se comporta como un circuito abierto por lo tanto la corriente fluirá solo a través de la resistencia. La impedancia mecánica de radiación Zmr, compuesta por la suma de la masa y la resistencia mecánica de radiación, en baja frecuencia tiende a ser puramente reactiva, por lo tanto, el termino asociado a la resistencia también desaparece dejando así a la bobina en representación de la masa mecánica de radiación Mmr. Es por esto que en la ecuación 6 y 7, respectivamente, se generan términos como R_{mT} que es la suma de la resistencia eléctrica total y la resistencia mecánica asociada y, M_{mS} que es la suma de la masa mecánica del diafragma, M_{mD} y la masa mecánica de radiación M_{mr}, asi se muestra en las ecuaciones 8 y 9.

$$R_{mT} = R_{me} + R_{mS} \qquad \textit{Ecuación.8}$$

$$M_{mS} = M_{mD} + 2M_{mr} \qquad \textit{Ecuación.9}$$

La fuente de voltaje, para este sistema se entiende como un generador de fuerza. Esta fuente atravesó varios procesos de conversión mientras se determinaba el circuito equivalente del sistema. Inicialmente se trataba de una fuente de voltaje que proporcionaba una fuerza al sistema denotada por la ecuación 10, donde i es la corriente entregada al sistema y Bl es el campo magnético (B) multiplicado por la longitud de la bobina expuesta a este. Los elementos que hacían parte del circuito eléctrico fueron tratados como una sola impedancia en serie con la fuente de voltaje. Cuando la fuente de voltaje fue transformada en fuente de corriente, siguiendo los parámetros propuestos en la teoría de circuitos para la transformación de fuentes, dicha fuente quedo descrita como lo muestra la ecuación 11.

$$F = i \cdot Bl$$

Ecuación.10

$$v_i = \frac{e_g \; Bl}{R_{eT} + Le}$$

Ecuación.11

Siendo así, la respuesta del sistema, v_o, en bajas frecuencias estará dado por el producto de v_i y la función de transferencia asociada, Ec 12.

$$v_o(LF) = \frac{e_g \; Bl}{R_{eT} M_{mS}} \cdot \frac{S}{S^2 + \frac{R_{mT}}{M_{mS}} S + \frac{1}{M_{mS} C_{MS}}}$$

Ecuación.12

A partir de esta ecuación es fácil generar las relaciones entre términos asociados entre si, por ejemplo, para este caso existirá una frecuencia de resonancia f_s tal que:

$$\omega_s^2 = 2\pi f_s = \frac{1}{M_{mS} C_{MS}}$$

Ecuación.13

La relación expuesta en la ecuación 13 se sustrajo de la forma general de una función de transferencia para filtros (Cifuentes). Se puede observar que en baja frecuencia de manera teórica la frecuencia angular de resonancia dependerá de la masa mecánica del sistema y el sistema de suspensión del mismo, como se muestra en la ecuación 14.

$$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{M_{mS} C_{MS}}}$$

Ecuación.14

Tambien es posible generar la relacion con el termino Q tipico de una funcion de transferencia de segundo orden.

$$\frac{\omega_s}{Q_{TS}} = \frac{R_{mT}}{M_{mS}}$$

Ecuación.15

La ecuación 15 permite notar la aparición del término Q y a partir de esta expresión es posible despejar dicha variable como se presenta en la ecuación 16.

$$Q_{TS} = \frac{M_{mS}}{R_{mT}} \cdot \omega_s$$

Ecuación.16

Sabiendo que algunos terminos de la ecuación 16 están compuestos por sumas de otros terminos es posible notar que:

$$Q_{TS} = \frac{M_{mD} + 2M_{mr}}{R_{me} + R_{mS}} \cdot \omega_s \qquad \textit{Ecuación.17}$$

A partir de la expresion anterior se determinan dos nueva variables definidas en la ecuación 18 y 19(40).

$$Q_{eS} = \frac{M_{mS}}{R_{me}} \cdot \omega_s \qquad \textit{Ecuación.18}$$

$$Q_{mS} = \frac{M_{mS}}{R_{mS}} \cdot \omega_s \qquad \textit{Ecuación.19}$$

Estas expresiones permiten identificar algunos de los parametros que caracterizan el comportamiento del altavoz ya que muestra su comportamiento en frecuencia. En resumen se han identificado diferentes variables que caracterisan el altavoz y que tienen por nombre parametros de Thiele-Small en honor a sus creadores. Aunque los parámetros estipulados en las especificaciones son varios, la mayoría pueden obtenerse a partir de los siguientes: $\boldsymbol{f_s}$, Frecuencia de resonancia del parlante al aire libre (sin bafle y lejos de superficies reflectantes). El valor de este parámetro proporciona una aproximación muy cercana a la frecuencia de corte inferior del altavoz, es deir que es, aproximadamente, la mínima frecuencia que el altavoz puede reproducir, y como tal, es un parámetro de importancia al seleccionarlo. $\boldsymbol{Q_{mS}}$, es el factor de calidad debido a las pérdidas mecánicas y $\boldsymbol{Q_{eS}}$, el factor de calidad debido a las pérdidas eléctricas. Ambos terminos se refieren a el amortiguamiento del sistema por parte de los componentes fisicos (friccion) y de los componentes electromagneticos respectivamente. $\boldsymbol{Q_{TS}}$, es el factor de calidad total, mecánico y eléctrico. Se define factor de calidad a la relación entre la energía reactiva, es decir la energía almacenada y la energía disipada de un sistema resonante. Es de tener en cuenta que la energía reactiva se encuentra en la masa del diafragma y en la elasticidad de la suspensión; mientras que la energía disipada sólo se da en la resistencia que posee la suspensión.

Por lo anterior, el $\boldsymbol{Q_{mS}}$ indica la relación entre estos dos tipos de energías. Un valor bajo de $\boldsymbol{Q_{mS}}$ sugiere que el altavoz pierde energía en la suspensión, es decir, la suspensión está demasiado amortiguada y genera oposición al desplazamiento, se gasta demasiada energía en el movimiento. Mientras que un valor grande de $\boldsymbol{Q_{mS}}$ revela que la resonancia mecánica está poco amortiguada y el parlante encuentra poca oposición mecánica al desplazamiento, es decir, utiliza mayor parte de la energía para generar desplazamiento del diafragma sin perder energía en la suspensión (Sacerdoti, Parámetros Thiele-Small, 2017). Por otro lado, $\boldsymbol{Q_{eS}}$ relaciona la energía reactiva que posee la masa mecánica del diafragma con la capacidad del motor magnetico de generar fuerza electromotriz. Un valor bajo de $\boldsymbol{Q_{eS}}$, por ejemplo 0.3, indica que el motor magnético del parlante es suficientemente poderoso para controlar la masa del diafragma en la frecuencia de resonancia. Asi mismo, un $\boldsymbol{Q_{eS}}$ mayor a 1, por ejemplo, podria traducir que, el parlante posee una masa mecánica mayor de lo que el motor es capaz de controlar, o también podría indicar que el imán es débil o que la resistencia continua de la bobina es muy alta.

El parámetro $\boldsymbol{Q_{TS}}$ es finalmente la suma en paralelo de ambos Q, el eléctrico y el mecánico. Si su valor es mucho más bajo que el de $\boldsymbol{Q_{eS}}$ podria indicar que el $\boldsymbol{Q_{mS}}$ es muy bajo y se disipa energía en la suspensión o que el $\boldsymbol{Q_{eS}}$ es demasiado grande y el motor no tiene control sobre el diafragma. En la figura 2-6 se observa la curva de resonancia de la respuesta en frecuencia normalizada a la frecuencia de resonancia. Centrándose en -3dB se ve como la frecuencia de resonancia se desplaza para diferentes valores de $\boldsymbol{Q_{TS}}$

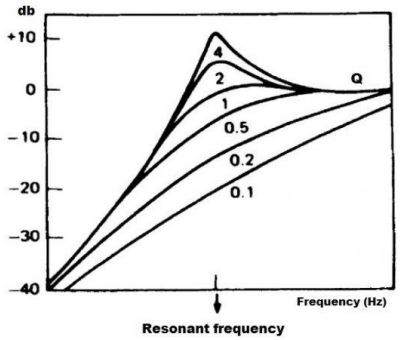


Figura 2-6 curva de resonancia para distintos valores de Qts. Fuente (Sacerdoti, Parámetros Thiele-Small, 2017)

Considerando que los demás parámetros se mantienen sin cambios, a medida que aumenta el valor de $\boldsymbol{Q_{TS}}$ se obtiene una menor frecuencia de resonancia del altavoz. Sin embargo,

esto se logra generando un aumento en el nivel de presión sonora en las inmediaciones de la frecuencia de resonancia, aún con igual nivel de excitación del altavoz, lo que podría ser o no benéfico para un diseño. El **Vas** es el volumen cuya compliancia acústica equivale a la de la suspensión; indica que tan blanda o dura resulta la suspensión del altavoz. La elasticidad de la suspensión y por ende el **Vas** es de escaso interés práctico, pero debe destacarse que su valor está relacionado directamente con el volumen final de la caja y con la sensibilidad del altavoz. Los demás parámetros son los que se nombran a continuación:

$\boldsymbol{R_e}$: Resistencia eléctrica de la bobina en corriente continua
$\boldsymbol{R_{es}}$: Resistencia eléctrica equivalente a la fricción de la suspensión
Le: Inductancia de la bobina
Bl: Constante de transducción electromecánica
Cms: Compliancia mecánica de la suspensión
Mmd: Masa del diafragma
Mms: Masa equivalente incluyendo la masa de radiación

2.2.2.3 Descriptores de los altavoces

A partir de la definición de los altavoces, resulta conveniente definir algunas características que permiten conocer el comportamiento de estos sistemas (Holland, 2007). Entendiendo que el altavoz es un sistema de transducción electro – mecánico – acústico y, en virtud de el objetivo del proyecto, se definen las siguientes características: sensibilidad, respuesta en frecuencia potencia, eficiencia.

- *Sensibilidad*

Se trata de la característica mas usada para definir la capacidad que tiene un transductor para producir, en el caso de los altavoces, energía acústica (Ballow, 2002). La sensibilidad caracteriza un altavoz a partir de la relación entre el nivel de energía eléctrica entrante y el nivel de presión sonora que es capaz de producir el altavoz (Pueo, 2003). Generalmente medido a un metro de distancia (1m) y con un watt de potencia (1W) y el rendimiento o eficiencia mide en porcentaje, la cantidad de energía eléctrica que es convertida en energía acústica.

- *Respuesta en Frecuencia*

La respuesta en frecuencia, delimita el rango de operación de cada dispositivo, es decir que muestra el comportamiento que tiene el altavoz en correspondencia con la totalidad del rango de frecuencias audibles, y en algunos caso no audibles por el ser humano (Ballow, 2002)A partir de este rango de operación es posible entender que cada altavoz puede tener un uso especifico de acuerdo con el rango de frecuencias para el que se encuentre diseñado Esta característica representa las variaciones de presión sonora de un altavoz en función de la frecuencia, medido en alguna unidad generalmente dBSPL (Beranek, Acústica, 1961).

A partir de la respuesta en frecuencia es posible clasificar los altavoces dependiendo del rango de frecuencias que pueden reproducir según su constitución. Son comúnmente denominados tres tipos de altavoces para tres rangos de frecuencia específica, altos, medios y bajos. Los altavoces dedicados a estos rangos de frecuencia son llamados twitters, mid-range y woofers respectivamente. Sin embargo, existen otro tipo de clasificaciones que toman en cuenta frecuencias intermedias entre los rangos ya nombrados, tales como los subwoofers o los altavoces full rango.

- *Potencia y Eficiencia*

La potencia se refiere a la cantidad de energía eléctrica que admite el altavoz antes de comenzar a distorsionar la señal, sin embargo, existen diferentes aplicaciones a este concepto debido al uso que se le da a estos dispositivos. Cada fabricante define para el altavoz características referidas a la potencia que difieren una de la otra por las características de la medición tenidas en cuenta (DAVIS, 1987).

A partir de la relación entre la potencia eléctrica que entra al sistema de transducción y la potencia acústica radiada por el altavoz es que se define la eficiencia (rendimiento) del mismo. Esta relación se da de manera porcentual para su fácil entendimiento. Sin embargo es de aclarar que este valor suele ser bastante bajo para los radiadores debido a la energía que se distribuye en los sistemas mecánicos y la disipación de esta por color. Por

esta razón se hace uso de sistemas acoplados para el lograr un mayor aprovechamiento de esta energía. D. B. Keele, Jr aporta desde su investigación el concepto de eficiencia (D.B. Keele, LOW-FREQUENCY HORN DESIGN USING THIELE/SWALL DRIVER PARAMETERS, 1977) descrito a partir de la ecuación 20

$$\eta = \frac{P_{ein}}{P_{Aout}} \qquad \textit{Ecuación.20}$$

2.2.3 Radiación Directa - Radiación Indirecta

Como se habló anteriormente, el altavoz, cuyo propósito es convertir energía eléctrica en energía acústica (DAVIS, 1987) , en medio de la transducción y el movimiento vibratorio presenta un fenómeno llamado corto circuito acústico (OLSON, 1940). Esta situación se debe a que la radiación posterior del altavoz describe un desfase de 180º grados con respecto a la radiación frontal del altavoz, lo que quiere decir que, las partículas colindantes de la parte frontal del altavoz, que propician en principio la propagación de la onda, alcanzan su máxima amplitud en dirección positiva mientras que las partículas colindantes de la parte posterior alcanzan su máxima amplitud en dirección negativa, ambas con respecto a la posición de equilibrio y en el mismo instante de tiempo (Beranek, Acústica, 1961). En correspondencia, los vectores de velocidad que describen la misma dirección del desplazamiento presentan esta misma situación lo que significa que los valores máximos y mínimos de las ondas generadas en ambas caras del altavoz eventualmente generaran superposiciones de onda destructivas o llamadas habitualmente cancelaciones (DAVIS, 1987). Este fenómeno se presenta en mayor proporción a medida que el rango de reproducción se acerca a la baja frecuencia, lo cual esta estrechamente relacionado con las longitudes de onda de estas frecuencias y la dimensión del dispositivo.

Por lo anterior surge la necesidad de aislar la radiación de la parte posterior del altavoz generando así, a través del desarrollo ingenieril, dos conceptos asociados a las características de interacción del altavoz con el medio (Holland, 2007). La radiación directa se refiere a la radiación de ondas sonoras directamente en el aire o medio, permitiendo inmediatamente la propagación de la onda a través del recinto o campo sonoro. La

radiación indirecta se refiere a la presencia de una bocina en medio del altavoz y el aire (o medio de propagacion); una vez la onda sonora atraviesa la bocina se da su propagación en el campo sonoro (Beranek, Acústica, 1961). Por esta razón se ha decidido hablar de ambos tipos de radiación y las diferentes cavidades acústicas que propician cada situación. Se hablaá brevemente de las cajas acústicas convencionales haciendo énfasis en la caja cerrada y, posteriormente, se hablara de las bocinas o guías de onda, su funcionamiento y algunos parámetros de diseño para las mismas.

2.2.3.1 Cajas acústicas

El diseño y la implementación de estas cajas es un tema ampliamente discutido por diversos autores y de gran controversia en los mercados actuales debido a que no existe una teoría única y verídica para el aprovechamiento de estos recintos en función del altavoz; en ocasiones esto se debe a la falta de información por parte de los fabricantes de altavoces (Beranek, Acústica, 1961). Debido a que el diseño de estas cajas se da principalmente para los altavoces dedicados a la baja frecuencia, por las razones ya expuestas, existen diferentes tipos de cajas que pretenden en algunos casos, no solo dar solución al corto circuito acústico, sino aprovechar en lo posible la energía que suministra la cara trasera del altavoz al medio.

El caso mas común es el Sonodeflector de caja cerrada o caja cerrada simplemente, que consiste en una caja herméticamente sellada con el altavoz montado sobre una de sus caras, envolviendo la radiación posterior del altavoz y permitiendo así la radiación frontal directamente al medio de propagación como se muestra en la figura 2-7.

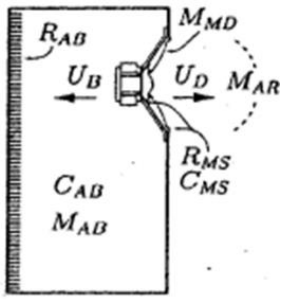


Figura 2-7 Diagrama de una caja cerrada acoplada al altavoz junto con las variables electroacústicas. Fuente electroacústica de altavoces y micrófono. fuente basilo pueo

Sin embargo, este tipo de diseño incurre en el funcionamiento natural del altavoz debido a que el recinto presenta modos normales de vibración, que pueden llegar a limitar el desplazamiento del altavoz y su reproducción de frecuencias (Pueo, 2003). Debido a la presencia de modos de resonancia al interior de la caja, se generan máximos y mínimos que favorecen o no ciertas frecuencias, lo que se verá reflejado en la respuesta en frecuencia del dispositivo. A este fenómeno se le podría dar solución garantizando el no paralelismo entre las caras de la caja consiguiendo una mejor distribución de los modos de vibración internos. Adicional a esto se considera que la presencia de material absorbente al interior de la caja puede disipar la energía de los máximos y mínimos de presión generados por los modos, disminuyendo el efecto de estos sobre la respuesta del altavoz.

La presencia de material absorbente en el interior de la caja conlleva otras consideraciones con respecto a la compliancia acústica presente por el volumen de aire en el interior. La interacción de esta compliancia acústica con la suspensión del altavoz, hace que esta última aumente su rigidez por las propiedades elásticas del volumen de aire, limitando así su excursión. Al introducir material absorbente, las propiedades adiabáticas de la onda sonora se ven afectadas por los cambios de temperatura debidos a la disipación de energía de los valores máximos y mínimos de los modos de resonancia presentes. Esto a su vez genera un cambio en las propiedades del sonido y así mismo de la radiación sonora de la parte posterior de altavoz, disminuyendo la velocidad de partícula y también la propagación de la onda, consiguiendo así el efecto de un volumen de aire relativamente más grande visto por el frente de onda y compensando en cierta proporción la rigidez adquirida por la suspensión (Pueo, 2003).

2.2.3.2 Bocinas

Las bocinas o guías de onda son elementos de radiación indirecta de importante uso para la sonorización y los sistemas de reproducción de alta fidelidad (Ballow, 2002). Algunas de las razones son por la baja distorsión que presentan en la reproducción de frecuencias, la capacidad directiva que tienen y, tal vez su característica más apreciable, la adaptación de impedancias entre el dispositivo de radiación directa o altavoz y el medio de propagación. Esta última ha sido desarrollada por la mayoría de los autores a partir de varias definiciones

en cuanto a su comportamiento físico, su interpretación como elemento de radiación y el análisis que esto conlleva.

La adaptación de impedancias es un tema de interés debido a que está íntimamente ligada con la eficiencia del sistema que, como ya se mencionó, representa la relación entre la potencia eléctrica de entrada al altavoz y la potencia acústica radiada. Normalmente esta relación para el caso de radiadores directos se encuentra alrededor del 1% y 3% y centrándose en la baja frecuencia difícilmente estos valores ascienden al 1% (KLIPSCH, A Low-Frequency Horn of Small Dimensions, 1979). Por este motivo, el aumento de la eficiencia entre el 10% y el 50%, proporcionado por las bocinas, es una característica bastante conveniente en la implementación de sistemas acústicos. La principal ventaja de las guías de onda es la capacidad de presentar casi cualquier valor de resistencia, a la vista de la resistencia de carga del driver o altavoz (OLSON, 1940), por esta razón se le llama adaptación de impedancia, ya que una vez recibida la carga acústica generada por el altavoz, acoge esta carga y la amplifica a partir de las propiedades de propagación alcanzadas por la geometría de la bocina y la tendencia de ensanchamiento del area trasversal del dispositivo con relación a la distancia, tal y como se muestra en la figura 2-8. En ella se aprecia la garganta, correspondiente al inicio de la bocina y área de menor sección, luego el progreso de la guía de onda hasta llegar al extremo de la bocina que coincide con el área de mayor sección a la que se le llama boca.

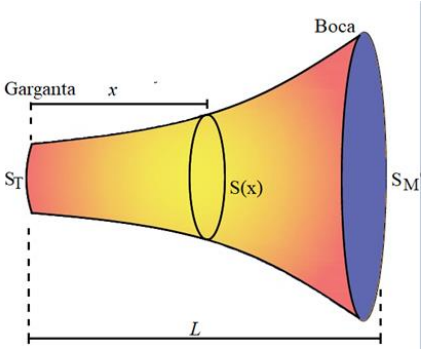


Figura 2-8 Diagrama de una bocina exponencial

La ecuación diferencial que rige la propagación de una onda plana al interior de la bocina, conocida como la ecuación de webster se presenta a continuación (Pueo, 2003):

$$\frac{1}{S(x)}\frac{\partial}{\partial x}\left[S(x)\frac{\partial p}{\partial x}\right]=\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$ *Ecuación.21*

A partir del desarrollo matemático que presenta la bibliografía (Pueo, 2003), la solución de este caso particular viene dado por la ecuación 22:

$$p(x,t)=e^{-\alpha x}\left[Ae^{j(\omega t+\beta x)}+Be^{j(\omega t-\beta x)}\right]$$

Ecuación.22

El primer término entre corchetes se asocia a la onda reflejada que se da cuando la longitud de onda es mayor que el área de la boca de la bocina. Mientras que el segundo término entre corchetes representa la onda expansiva radiada al interior de la bocina (Pueo, 2003).

2.2.3.3 Diseño de bocina para baja frecuencia a partir de parámetros TS

A partir de los parámetros Thiele & Small el diseño de estas cavidades se vuelve mas manipulable convirtiéndose así en el estándar de diseño al menos de las cajas acústicas. Esto no significa que dichos parámetros no sean aplicables para el diseño de las bocinas, mas aun tratándose de baja frecuencia debido a su relación con variables que pueden ser medidas con mayor facilidad como la frecuencia de resonancia y el factor Q (D.B. Keele, LOW-FREQUENCY HORN DESIGN USING THIELE/SWALL DRIVER PARAMETERS, 1977).

Normalmente el diseño de bocinas para baja frecuencia debe lidiar con aspectos como la selección del área tanto de la garganta como de la boca, que al ubicarse en la región de baja frecuencia se sabe que se tratara de un dispositivo de gran envergadura; además el diseño se enfrenta a la selección de la cavidad trasera del altavoz para disminuir la reactancia y también generar los máximos niveles de potencia en la banda de paso del dispositivo. Para el análisis de estos aspectos, se hace uso del circuito equivalente simplificado de la bocina que se muestra en la figura 2-9.

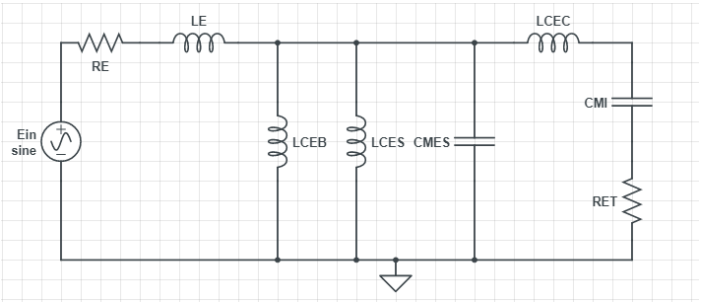


Figura 2-9 Circuito equivalente de la bocina

La eficiencia está definida como la potencia acústica radiada por el altavoz dividida entre la potencia eléctrica nominal entregada al altavoz, tal y como se define en la bibliografía (Beranek, Acústica, 1961). Para la banda de paso, se maximiza este valor si se cumple que la resistencia de carga de la bocina iguala la resistencia eléctrica del altavoz producida por la bobina. Esto ocurre cuando el área de la garganta presenta un valor igual al descrito por la ecuación 23:

$$S_T = \frac{\rho_0 c R_E S_D^2}{B^2 l^2} \qquad \textit{Ecuación.23}$$

En cuanto a la respuesta en frecuencia como Beranek lo indica, esta se divide en tres regiones gobernadas por la baja media y alta frecuencia; en el rango de frecuencias de trabajo (Beranek, Acústica, 1961). Tratándose del caso hipotético en el que la guía de onda se asume como de carga puramente resistiva y constante con la frecuencia, que es el caso de una guía de onda infinita, la gráfica que se ajusta al comportamiento de la eficiencia en relación a la frecuencia seria como la que se muestra en la figura 2-10.

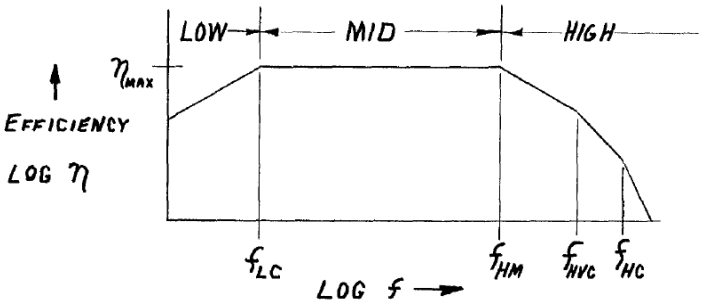


Figura 2-10 Respuesta teórica de eficiencia de la bocina para baja frecuencia. Extraido de (D.B. Keele, LOW-FREQUENCY HORN DESIGN USING THIELE/SWALL DRIVER PARAMETERS, 1977)

Algunos autores definen el rango de operación de la bocina entre las frecuencias F_{LS} y F_{HS}, definidas a continuación, que indican respectivamente el limite inferior y superior de la

region controlada por la resistencia de carga del dispositivo (D.B. Keele, LOW-FREQUENCY HORN DESIGN USING THIELE/SWALL DRIVER PARAMETERS, 1977).

$$F_{Hs} = \frac{B^2 l^2}{2\pi R_E M_{MS}}$$ *Ecuación.24*

$$F_{Ls} = \frac{R_E}{2\pi B^2 l^2 C_{MS}}$$ *Ecuación.25*

$$Fs = \sqrt{F_{Ls}\ F_{Hs}}$$ *Ecuación.26*

Si se acopla la bocina y se hace máxima la eficiencia haciendo uso de la ecuación 26; suponiendo además que la cavidad trasera es infinita, el límite inferior queda definido como:

$$F_{LC} = \frac{F_{Ls}}{2}$$ *Ecuación.27*

A partir de esta relación es posible realizar el análisis cuando existe una magnitud determinada para la cavidad trasera ajustándose al modelo real, esta relación adquiere la forma de la ecuación 28:

$$F_{LBC} = F_{LC}(1+\alpha) = \frac{F_{Ls}(1+\alpha)}{2} = \frac{R_E(1+\alpha)}{4\pi B^2 l^2 C_{MS}}$$ *Ecuación.28*

donde $\alpha = C_{MS}/C_{AB}$, es decir la relación entre la compliancia de la suspensión del altavoz y la compliancia del aire contenido en la cavidad trasera. En la banda de media frecuencia la ecuación 29 es la que modela el comportamiento del sistema bajo esas condiciones:

$$\eta = \frac{2R_E R_{ET}}{(R_E + R_{ET})^2}$$ *Ecuación.29*

En esta última ecuación se puede observar que la eficiencia alcanza su valor máximo cuando $R_E = R_{ET}$ donde R_{ET} , que es la resistencia electrica que varia con respecto a la frecuencia debido a la potencia radiada al interior de la bocina, se define como:

$$R_{ET} = \frac{S_T B^2 l^2}{\rho_0 c S_D^2} \qquad \textit{Ecuación.30}$$

Por último en la zona de alta frecuencia existen tres frecuencias de corte que describen un filtro de tercer orden cuyo comportamiento, en relación con la ecuación de St esta regido por la masa móvil del altavoz, la inductancia de la bobina y la cavidad frontal del sistema; se definen respectivamente a partir de las ecuaciones 31 a 33.

$$F_{HM} = 2F_{Hs} \qquad \textit{Ecuación.31}$$

$$F_{HVC} = \frac{R_E}{\pi L_E} \qquad \textit{Ecuación.32}$$

$$F_{HC} = \frac{2\rho_0 c R_E S_D^2}{B^2 l^2 V_{FC}} \qquad \textit{Ecuación.33}$$

Donde V_{FC} representa volumen de la cavidad frontal. En un escenario real estas frecuencias solo dan cuenta del comportamiento del sistema acoplado y la relación entre estas es una combinación compleja de las tres.

La cancelación de la reactancia consiste en la disminución de la masa acústica generada en la garganta de la bocina y a su vez el aumento de la eficiencia en las frecuencias cercanas a la frecuencia de corte de la guía de onda. Este método propuesto por Klipsch y posteriormente por PLach & Williams usa la reactancia capacitiva generada en conjunto por la suspensión del altavoz y la cavidad trasera para compensar la reactancia inductiva de la masa de la garganta (Beranek, Acústica, 1961). El análisis del circuito equivalente simplificado en la región de baja frecuencia muestra que el efecto de la cancelación de reactancia ocurre cuando el limite inferior de la región controlada por resistencia del altavoz con la cavidad trasera acoplada, iguala la frecuencia de corte de la bocina, así se muestra en la ecuación 34.

$$F_{LS}(1+\alpha) = F_C = 2F_{LBC} \qquad \textit{Ecuación.34}$$

Nuevamente teniendo en cuenta que $\alpha = C_{MS}/C_{AB}$ siendo C_{AB} definido bajo la ecuación 35

$$C_{AB} = \frac{V_B}{\rho_0 c S_D^2} \qquad \textit{Ecuación.35}$$

donde,

$$V_B = \frac{\rho_0 c^2 R_E S_D^2}{2\pi F_C B^2 l^2} \qquad \textit{Ecuación.36}$$

que al relacionarse con la ecuación que maximiza la eficiencia en la banda de paso, es decir ecuación de St, da como resultado la ecuación 37.

$$V_B = \frac{S_T c}{2\pi F_C} \qquad \textit{Ecuación.37}$$

En cuanto a los niveles máximos de potencia acústica radiada, esta dada por la capacidad máxima de desplazamiento del altavoz, la capacidad térmica máxima del altavoz y la distorsión no lineal de la cavidad trasera. Olson expresa la potencia acústica máxima radiada, considerando únicamente las limitaciones del desplazamiento del altavoz y en términos de la frecuencia de corte de la bocina, ecuación 38:

$$P_{AR} \approx \frac{3\pi\rho_0 c^2 S_D^2 x_p^2 F_C^2}{S_T} \qquad \textit{Ecuación.38}$$

Que puede ser reescrita al relacionarla con la ecuación de St dando como resultado la ecuación 39:

$$P_{AR} \approx \frac{3\pi B^2 l^2 x_p^2 F_C^2}{R_E} \qquad \textit{Ecuación.39}$$

La relación entre estos parámetros de diseño y los parámetros TS del altavoz se expresan en el ANEXO A (D.B. Keele, LOW-FREQUENCY HORN DESIGN USING THIELE/SWALL DRIVER PARAMETERS, 1977). De allí se adquieren las ecuaciones que implementan los parámetros TS del altavoz en el diseño de la guía de onda.

2.2.4 Métodos Numéricos de Simulación

Es bien sabido que la matemática emplea el análisis numérico para la resolución de situaciones prácticas, de las cuales no es posible establecer una solución exacta (Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica, 2011). Con frecuencia, la solución analítica de la que hace uso la matemática para resolver situaciones cuyas condiciones de interacción son conocidas, no son fácilmente aplicables a casos reales, quizá, debido a que el método para calcular la solución exacta es de gran complejidad, o no se conozca un método adecuado, o incluso puede ser que no exista un método que permita, mediante cálculos elementales, encontrar la solución (Cruz & Vivero, 2013).

Por lo anterior, surge la necesidad de aplicar el análisis numérico al estudio práctico en la ingeniería. Este tipo de análisis se encarga principalmente de diseñar algoritmos para simular aproximaciones de solución a problemas de análisis matemático (Lynx Simulations, 2014). Desde este punto de vista, el análisis numérico brinda las herramientas necesarias para llevar a cabo los procedimientos matemáticos que pueden ser expresados algorítmicamente, basándose en procesos que permitan su cálculo empleando números (Lynx Simulations, 2014). Los procesadores trabajan en un dominio discretizado y los métodos numéricos se encargan de adaptar el *análisis matemático*, a un sistema de representación de información discreto, principalmente porque la mayoría de los métodos analíticos empleados en ingeniería utilizan variables continuas, al trasladar estos métodos a una memoria de procesador, hay que lidiar con la baja eficiencia del computador para la resolución de cálculos en esta tipología de variable, lo cual no ocurre con la implementación de algoritmos de resolución de cálculos basados en el *análisis numérico* (Asmar, 1999).

Existen dos familias de técnicas en la realización de la simulación por métodos numéricos: el cálculo por el método de los elementos finitos o el método de elementos de contorno que es el siguiente más usado, y la simulación cinemática y dinámica de mecanismos (Lynx Simulations, 2014). Mediante el cálculo por el método de los elementos finitos es posible predecir el comportamiento de las piezas cuando son sometidas a esfuerzos, temperaturas, vibraciones, entre otros (Cruz & Vivero, 2013). La simulación cinemática y dinámica de

mecanismos permite analizar el movimiento relativo entre las distintas piezas, detectar posibles interferencias, calcular velocidades, aceleraciones y fuerzas. Todas estas técnicas tienen sus limitaciones, ventajas e inconvenientes en comparación con los ensayos en prototipos. Por un lado, ofrecen información complementaria, dan idea de parámetros que a veces resulta imposible medir en la práctica, permiten técnicas de optimización, etc. Por otro lado, no permiten tener en cuenta todos los fenómenos que se producen en la realidad y por lo tanto sus resultados han de manejarse siempre con precaución (Lynx Simulations, 2014).

Los métodos de elementos finitos y de contorno (FEM-BEM, respectivamente) son métodos numéricos aplicados a diferentes disciplinas de la física y la ingeniería, tales como estructural, térmico, acústico y electromagnético. En acústica la aplicación del proceso de simulación radica en el estudio de la radiación sonora y vibraciones en estructuras, además del estudio modal de los elementos de interacción acústica. Ambos métodos discretizan el dominio continuo para dividir un gran problema en varios problemas pequeños y fáciles de resolver. El método consiste en subdividir el sólido en pequeñas partes (elementos) interconectadas entre sí a través de los nodos de los elementos, con lo cual se asume que, el campo de desplazamientos en el interior de cada elemento, puede expresarse en función de los desplazamientos que sufren los nodos del elemento (desplazamientos nodales); posteriormente, se podrá determinar la matriz de rigidez de cada elemento, las cuales una vez ensambladas (siguiendo los pasos del análisis matricial de estructuras), permitirán la obtención de los desplazamientos en los nodos de cada elemento (Asmar, 1999). De esa manera, una vez conocidos dichos desplazamientos, es posible determinar, de una forma aproximada como ya se dijo antes, las tensiones y las deformaciones en el interior del elemento.

En principio la simulación numérica requiere de la creación de una geometría en la cual se establecerá los nodos o puntos característicos sobre los que se resuelven las ecuaciones correspondientes al análisis numérico (Bondensiek & Barreiro, 2010). Dicha geometría es representada a través de puntos, líneas, superficies o volúmenes que constituyen la estructura física de un objeto que hace parte de un sistema real. La elección de cada

dimensión o la combinación de las mismas depende de varios factores como las condiciones de frontera, el grado de detalle de la simulación y la forma física del objeto. Por tanto, el método se centra en transformar un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado, proceso al cual se denomina discretización del modelo (Bondensiek & Barreiro, 2010). El comportamiento de lo que sucede al interior del sistema modelado aproximado se obtiene a partir de la interpolación de los datos obtenidos en los nodos. Por lo que el método consiste en una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado y finito de puntos característicos.

Así, se resume en tres etapas el proceso de simulación, que se muestra en la figura 2-12:

- Pre-procesador, en donde se prepara el modelo a simular a partir de herramientas de dibujo como CAD, SketchUp o Spaceclaim. Se seleccionan el tipo de elementos a implementar ya sean lineales, triangulares o cuadráticos. Se genera la malla teniendo en cuenta la cantidad de elementos por longitud de onda. Se ajustan las cargas o fuerzas que actúan sobre el modelo y se establecen las condiciones de frontera.

- Procesamiento o calculo, en donde se desarrolla el procedimiento que lleva a la solución de las ecuaciones diferenciales en cada punto característico, es decir en donde se realiza todo el cálculo del FEM y se generan sus soluciones, proceso llevado a cabo normalmente por el solver o procesador.

- Post-procesamiento en donde se genera la representación gráfica y en algunos casos las animaciones que permiten deducir resultados indirectos al proceso de resolución.

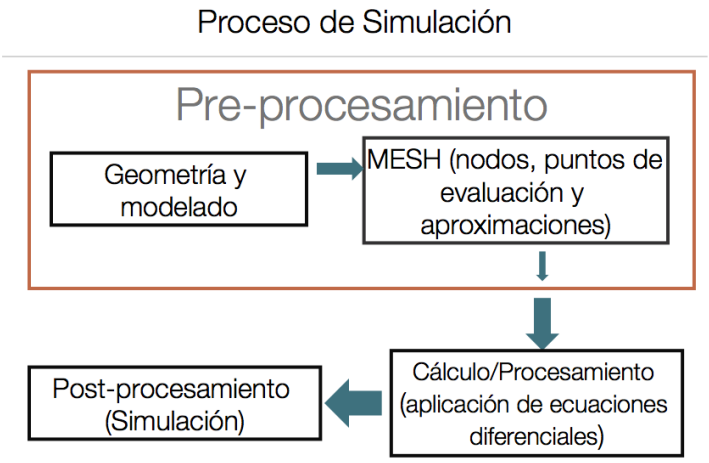


Figura 2-11 etapas de un proceso de simulación numérica

2.2.4.1 Estudio de convergencia de malla

Este proceso se refiere al menor tamaño que se atribuye a los elementos que conforman el mallado del modelo, lo cual se determina en función del orden de interpolación con el objetivo de que los resultados sean lo más fiables posible. El estudio de convergencia consiste en realizar el proceso de simulación sobre el objeto de estudio, con diferentes tamaños de elemento. Con cada simulación se realiza un refinamiento de los elementos procurando que cada vez sean de un tamaño menor, con lo que el objeto bajo estudio estará definido a su vez por una mayor cantidad de elementos. Con los resultados obtenidos se verifica en que iteración los datos obtenidos de la simulación empiezan a converger o a presentar diferencias poco significativas. Se inicia el estudio para elementos de interpolación lineal en 4 o 6 elementos por longitud de onda y puede extenderse hasta 10 o más elementos por longitud de onda (Lynx Simulations, 2014).

2.2.5 Herramientas Estadísticas

Es posible definir esta ciencia como aquella que se encarga de recopilar, organizar, procesar e interpretar datos que propician el entendimiento de poblaciones y facilitan la toma de decisiones. Estudia cómo debe emplearse la información y como dar una guía de acción en situaciones prácticas que conllevan cierta incertidumbre (Gutiérrez, 1998). Esta tiene como objetivo el estudio de ciertos métodos inductivos aplicables a fenómenos susceptibles de expresión cuantitativa (Gutiérrez, 1998), lo que quiere decir que extrae información de eventos que puedan ser representados a partir de datos numéricos.

Una de las ramas está enfocada en desarrollar técnicas para reducir y presentar los datos observados y estudiar la dependencia de dos o más características bajo observación en una serie de individuos. Se le conoce como estadística descriptiva y algunas de sus técnicas se les llama técnicas de regresión y correlación (Fernández Fernández , Cordero Sanchez , & Córdoba Lago, 2002). Esta rama de la estadística suele entenderse como un método para describir cuantitativamente conjuntos numerosos de datos (Sabadías, 1995).

Como se mencionó, la estadística descriptiva permite atribuir características cuantitativas a grupos poblacionales bajo estudio, lo que resulta conveniente para el proyecto debido a que en el caso del altavoz, existe un nivel de presión sonora por cada frecuencia o grupo de frecuencias que hacen parte del rango de operación de interés; lo que conforma una población de datos. Por esta razón se ha decidido hacer uso de algunos descriptores y herramientas estadísticas que facilitan entender el comportamiento de las variables bajo estudio y se presentan a continuación; este procedimiento está basado en el análisis hecho por Chaparro Colorado y Cortés Guerrero en su investigación (Colorado, 2018):

- Desviación Estándar. Este descriptor indica como se distribuyen los datos con respecto a un comportamiento nominal o valor medio. Algunos autores la definen como el valor rms del promedio de los cuadrados o desviaciones y se entiende como la dispersión de los datos frente al valor promedio de la población (Stanley Wolf, 1992). Con ello el observador tiene la noción de que tan alejado podría estar un valor con respecto a la media aritmética; se calcula a partir de la ecuación 40.

$$DE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2}{N}} \qquad \textit{Ecuación.40}$$

  Donde N es el número total de datos, x_i es el *'iesimo'* valor de la serie de datos y $\bar{x}$ es el promedio aritmético o valor medio de la serie.

- *Promedio Aritmético. Se entiende como el valor característico de una serie de datos bajo estudio y se obtiene a partir de la sumatoria de todos los valores que pertenecen a la serie de datos bajo observación, dividida entre la cantidad 'n' de datos que hacen parte de la serie* (Stanley Wolf, 1992)*, como se muestra en la ecuación 41.*
-

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{N} x_i}{N} \qquad \textit{Ecuación.41}$$

- Rango. Este valor se refiere a la magnitud del conjunto de números sobre los cuales adquiere cada valor la variable bajo estudio (Fernández Fernández , Cordero Sanchez , & Córdoba Lago, 2002). Para el caso de la respuesta en frecuencia del altavoz este valor indica el rango de operación en dB SPL o en pascales *Pa*. A partir de esta información el observador da cuenta del espacio que hay entre los máximos valores presentados por la RF y los mínimos valores presentados por la misma. Se calcula a partir de la diferencia entre el valor máximo y mínimo de la serie de datos como se muestra en la ecuación 42.

$$R = x_{max} - x_{min} \qquad \textit{Ecuación.42}$$

- Coeficiente de Asimetría. Esta medida representa el grado de asimetría de la distribución probabilística de una variable, es decir que teniendo como referencia la media aritmética de una serie de datos, se considera que la distribución de valores es simétrica si existe el mismo número de valores a ambos lados del eje de referencia, de lo contrario dicho coeficiente indicara cuál de los dos lados contiene a la mayoría de los datos (Stanley Wolf, 1992). Para el caso de una respuesta en frecuencia esto se interpreta con la predominancia de los picos sobre los valle de la RF o viceversa. Si la tendencia de los picos de una RF es mayor que la de los valles de la misma el valor del coeficiente de asimetría será mayor a cero y en el caso contrario en el que los valles sean más significativos, el coeficiente será menor a cero. Se calcula a partir de la siguiente ecuación 43.

$$\gamma = \frac{\bar{x} - M_o}{DE} \qquad \textit{Ecuación.43}$$

Donde M_o es la moda de la serie de datos bajo estudio y las demás variables conservan el mas significado que en la ecuación 40

- Coeficiente de Correlación de Pearson. Es una medida que indica la linealidad y dependencia entre dos variables aleatorias cuantitativas, lo que puede ser entendido como un índice que puede utilizarse para determinar el grado de relación entre dos variables y se determina a partir de la ecuación 44.

$$\rho xy = \frac{\sigma xy}{DExDEy} \qquad \textit{Ecuación.44}$$

Donde σxy representa la covarianza entre las variables x, y. La DE representa la desviación estándar de cada variable.

Otra de las técnicas más útiles de la estadística para determinar la relación entre variables es el ANOVA y test de Levene (González, 1997). Estas medidas estadísticas permiten al observador hacer inferencias sobre los descriptores estadísticos de una población cuando estas se ven afectadas por varios factores. El análisis de varianza es útil para analizar mediciones que dependen de varios efectos que operan simultáneamente al igual que para estimar cuales de estos efectos son importantes en el comportamiento de la variable.

Se trata de un conjunto de procedimientos ajustados a las características del método experimental usado en la obtención de datos. Con ello, recurre a la comparación de dos o más tratamientos, cada uno representando una población. El objetivo de esta comparación entre poblaciones a las que se les ha aplicado algún tipo de tratamiento es conseguir demostrar la hipótesis nula, en donde se acepta la igualdad de la varianza entre poblaciones (González, 1997).

$$H_o\colon\ \mu_1 = \mu_2$$

$$H_A\colon\ \mu_1 \neq \mu_2$$

La expresión H_o hace referencia a la igualdad y homogeneidad de la variancia con lo cual se acepta la hipótesis nula y se infiere que ambas poblaciones son independientes y no demuestran relación ante el tratamiento. Por otro lado la expresión H_A sugiere que las medias de las poblaciones difieren significativamente por lo que se acepta una hipótesis alterna que sugiere que el tratamiento ha influido de alguna manera en la media de alguna población (Gutiérrez, 1998) (Díaz, 2009). Para ejecutar este análisis el ANOVA introduce el termino 'valor critico' sobre el cual se define la varianza de cada población. Con la suma de cuadrados y determinación de los grados de libertad a partir de la cantidad de observaciones (datos) independientes de la población, el ANOVA genera un valor estadístico F. Si dicho valor es menor al valor critico, establecido a partir del nivel de significancia (que para este proyecto ha sido $\alpha = 0{,}05$) y grados de libertad, entoces se asume la hipótesis nula. De lo contrario la inferencia recae sobre la hipótesis alterna y se procede a realizar el análisis requerido para el resultado. Ejemplo de esto se muestra en la figura 2-13 en donde se ilustra el nivel de significancia en color verde igual 0,05, la zona de aceptación que corresponde a la hipótesis alterna y la zona de rechazo que corresponde a la hipótesis nula (Díaz, 2009).

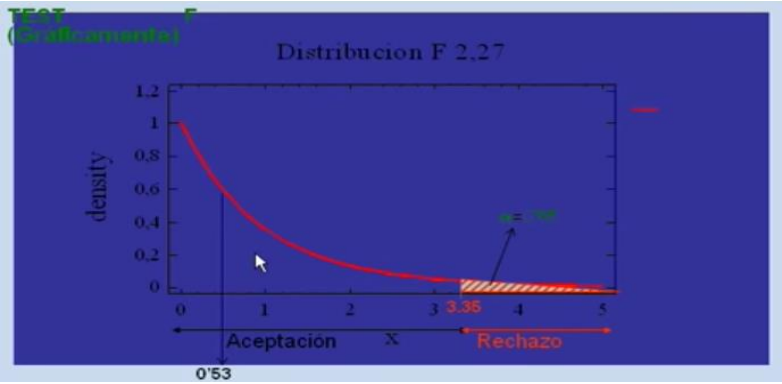


Figura 2-12 Grafica extraída del ANOVA

Uno de los requerimientos para este análisis es comprobar homogeneidad de la varianza, es decir en donde se demuestra que la varianza de ambas poblaciones es la misma con lo que

se demostraría la hipótesis nula. Para ello es posible aplicar el test de Levene el cual se encarga de evaluar esta característica a partir de un valor P (P-Value) y su comparación con respecto al nivel de significancia. Si dicho valor es menor que el nivel de significancia es poco probable que las diferencias obtenidas en las variaciones de la muestra se hayan producido sobre la base de un muestreo aleatorio de una población con varianzas iguales. Esta herramienta es bastante útil antes de aplicar el ANOVA ya que da certeza de su resultado. El procedimiento para aplicar el ANOVA y obtener los resultados de análisis de las poblaciones se explica con detalle en el ANEXO H.

2.3 Marco Normativo

Este marco de referencia anexa los documentos de carácter normativo tenidos en cuenta para realizar las mediciones correspondientes a la recopilación de datos. Para este proyecto fuero dos las principales normas que determinaron el proceder de los autores.

En la actualidad, dentro de los descriptores de un altavoz se encuentra la sensibilidad como referente de la capacidad que tiene el dispositivo para producir un cierto nivel de presión sonora a un voltaje dado, necesario para producir 1 watt de potencia eléctrica. Para obtener dicha referencia existen dos condiciones: (i) la distancia requerida para medir este parámetro, que suele ser de un metro (1m) y (ii) la potencia eléctrica de entrada al altavoz situada en una frecuencia en específico, normalmente 1 watt en 1kHz (1W, 1kHz) (Jensen, 2011). Sin embargo, este término suele ser confuso, mas aun cuando la información que provee es solo un indicador que expresa la capacidad de transducción del dispositivo.

Por otro lado, existe la eficiencia que igualmente esta relacionada con la capacidad de transducción del dispositivo, pero esta se obtiene a partir de la relación entre la potencia acústica emitida por el altavoz y la potencia eléctrica de entrada al mismo. Este parámetro podría ser un descriptor mucho mas fiable y detallado del comportamiento del altavoz (D. B. Keele, 1976), sin embargo los procesos requeridos para determinar dicha relación pueden ser complejos y requerir de un tiempo prolongado de ejecución (Atkinson, 1997). Esto se debe a que no existe una forma sencilla de procurar una potencia nominal en la

entrada del altavoz debido a que, como ya se ha mencionado, la impedancia del dispositivo varia con respecto al domino de la frecuencia (Sacerdoti, ¿Eficiencia o Sensibilidad?, 2014).

Lo anterior significa que para cada valor de frecuencia existe un valor de impedancia con el cual se calcula la potencia eléctrica de entrada y, así mismo, para cada valor de frecuencia existirá un valor de potencia eléctrica de entrada y un valor de potencia acústica emitida por el altavoz. Al evaluar dicha relación en todo el rango de frecuencias de operación la cantidad de mediciones a realizar aumenta de manera considerable, específicamente al medir la potencia acústica del altavoz. Los fabricantes deciden entonces usar el indicador de la sensibilidad para tener una medida de referencia de esta relación energética, por lo cual, hasta el día de hoy parece no haber interés por parte de las entidades de normalización en describir un método único y acertado para determinar los niveles de potencia acústica emitidos por el altavoz (Atkinson, 1997). Sin embargo, en el área de la salud y ruido ocupacional el interés por conocer los niveles de potencia acústica, por parte de elementos de uso industrial, ha incurrido en la elaboración de la normativa ISO 3744 en la que se detalla el procedimiento para calcular los niveles de potencia acústica emitidos por fuentes de ruido de tipo industrial. De allí los autores han decidido extraer solo el procedimiento para la recopilación de datos y obtener así los niveles de potencia acústica del altavoz.

2.3.1 ISO 3744 Acoustics — Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure — Engineering methods for an essentially free field over a reflecting plane

La Organización Internacional de Estandarización (ISO por sus siglas en ingles) presenta la normativa 3744 que ha servido como base de investigación y referencia de diferentes normativas a nivel mundial como la NT acou 080_Industrial Plants Noise emmision Nordtest Method. Este documento presenta el procedimiento para determinar el nivel de potencia acústica emitido por fuentes de ruido de tipo industrial. En su apartados se explica

cuales son los parámetros a tener en cuenta con respecto al criterio de ruido de fondo, las posiciones de micrófono y la cantidad de estas, así como el procedimiento para determinar el nivel de potencia acústica a partir de los niveles de presión sonora. A continuación, se presentan, brevemente, los requerimientos de sus apartados para poder aplicar el procedimiento de medición y el ANEXO K se detalla el diagrama de las posiciones usadas en la medición junto con el calculo de las coordenadas de cada una, al igual que el calculo de la caja de referencia y superficie de medición.

- El nivel de presión sonora del ruido de fondo debe ser de al menos 6 dB, y preferiblemente más de 15 dB, por debajo del nivel de presión sonora de la fuente bajo estudio. Para las mediciones en bandas de frecuencia, este requisito se debe cumplir en cada banda de frecuencia dentro del rango de frecuencia de interés. Si se cumple este requisito, se cumplen los criterios de ruido de fondo de la Norma Internacional.
- Antes y después de cada serie de mediciones, se realiza la calibración del micrófono para verificar todo el sistema de medición. La diferencia entre las lecturas realizadas antes y después de cada serie de mediciones debe ser menor o igual a 0,5 dB. Si se excede este valor, se descartarán los resultados de la serie de mediciones.
- La fuente debe instalarse con respecto al plano o los planos reflejantes, como si estuvieran en uso normal, procurando un espacio libre de reflexiones.
- Se debe delinear una caja de referencia hipotética definida por las dimensiones externas que encierran la fuente bajo prueba. El cálculo de las dimensiones de la caja de referencia se encuentran en el ANEXO K.
- Las posiciones del micrófono en las que se miden los niveles de presión sonora se encuentran en la superficie de medición, una superficie hipotética de área S que envuelve la caja de referencia y termina en el plano reflejante. En el ANEXO K se consignan todas las posiciones usadas para la medición junto con un esquema en el que se ven reflejadas cada una.
- El micrófono debe estar orientado de modo que la dirección de referencia del micrófono sea normal a la superficie de medición.

2.3.2 IEC 60268-5 Sound system equipment-Part 5: Loudspeakers

La Comisión electrotécnica internacional, IEC cuya función es la preparación y publicación de normativas y estándares internacionales acerca de tecnologías eléctricas y electrónicas presenta esta norma que se refiere a equipamiento de sistemas de sonido, uno de sus apartados trata el tema de altavoces pasivos y el procedimiento a realizar para la medición de respuesta en frecuencia. Con el fin de realizar la medición, se establecen las siguientes condiciones normales de medición:

- El altavoz debe estar montado en: un bafle o cerramiento estandarizado (caja tipo A o B), al aire libre, o un espacio semi-abierto a nivel con la superficie reflectante.
- El entorno acústico puede ser al aire libre, para este caso se debe garantizar para todo el espectro de frecuencias de la medición, que se cumpla con un decrecimiento de 1/r al variar la distancia (r) entre la fuente y el receptor (en axis).
- Se recomienda la distancia de medición establecida para altavoces de una sola unidad es de 1m
- La señal de prueba puede ser una onda sinusoidal, ruidos rosa o impulsos. En cualquier caso, se debe garantizar que el voltaje es el mismo para las frecuencias a reproducir.
- Los equipos de medición deben ser el tipo RMS y se deben conocer sus datos de calibración.
- Adicionalmente, la norma establece en su apartado 6 que la relación señal-ruido debe ser superior a 10 dB

3 Capítulo III. Diseño Metodológico

Basados en la pregunta y los objetivos de la investigación, los autores exponen en este capítulo el enfoque que guiara el proceso y así mismo la recopilación de datos. Aquí se exponen las principales razones por las que se ha decidido determinar el enfoque y el tipo de investigación, teniendo en cuenta referencias bibliográficas como (Sampieri, 2010).

Con el planteamiento de dos factores de variación, a saber, geometría y volumen, el estudio se centra en la correspondencia que tienen dichas variaciones sobre las variables dependientes, respuesta en frecuencia y eficiencia. Los autores determinan desde el punto de vista metodológico algunas apreciaciones e interpretaciones de la información ya existente y la que se obtendrá a partir de los procedimientos de recolección de datos, discutidos en la sección 4 de este documento.

3.1 Enfoque de Investigación

Algunos autores mencionan que una investigación de tipo cuantitativa requiere de una recolección de datos y su posterior análisis para la adquisición de resultados y comprobación de la o las hipótesis planteadas durante el proceso de investigación (Gomez, 2006). Además de esto, se caracteriza a este tipo de enfoque como secuencial y probatorio, debido a que sugiere un procedimiento metodológico que lleva a probar y responder a las preguntas de investigación (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2010).

En esta investigación, se plantea la construcción de un sistema modulado, con el objetivo de realizar las modificaciones al diseño original, que permitirá evaluar la relación entre la cavidad trasera del woofer de bocina plegada y la respuesta en frecuencia y eficiencia del sistema, que son las variables a medir.

Por lo anterior, el enfoque que se da a la investigación es **cuantitativo**, debido a que durante el desarrollo del proyecto se ha planteado una pregunta problema y en

consecuencia una hipótesis las cuales han de comprobarse a partir de una metodología y experimentación para la recolección y análisis de datos.

3.2 Enfoque y Tipo de Investigación

La elección del tipo de investigación, según su alcance, permite definir con claridad el diseño de la metodología y el procedimiento experimental de la investigación. Esto se debe a que la recolección y el análisis de datos, así como los resultados obtenidos puede variar según el alcance de la investigación (Gomez, 2006). El objetivo de esta investigación plantea un ***alcance correlacional*** (Sampieri, 2010) ya que el fin último del estudio es evaluar la relación existente entre la cavidad trasera del woofer y la respuesta en frecuencia y eficiencia del sistema. Así, tratándose de una investigación correlacional, el estudio tendrá el objetivo de conocer la relación entre las variables en un contexto particular, midiéndolas y planteando posibles vínculos a partir del análisis de resultados. A partir de ello se expondrá como es que dicha cavidad interviene en el comportamiento de estas variables.

Por tanto, el estudio es de ***tipo experimental*** (Sampieri, 2010), ya que se conseguirán los resultados de la investigación a partir del análisis de la variación de las características ya mencionadas a partir de la modificación del elemento de estudio implementado en cada sistema. Para establecer esta correlación, se creará un sistema cuyo diseño original sea el de un woofer de bocina plegada al cual se le realizaran modificaciones en cuanto al diseño de la cavidad trasera del sistema. Se plantea la implementación de seis variaciones que tendrán en cuenta dos volúmenes y tres geometrías por cada volumen y se medirán sus características generales a partir de los procesos habituales de medición de altavoces. Una vez obtenidos los resultados de medición, se hará un análisis descriptivo de cada uno de los sistemas implementados con el objetivo de describir de manera detallada el comportamiento y la respuesta general de cada sistema. Finalmente se realizará un análisis comparativo entre cada uno de los sistemas evaluando los posibles cambios de las variables de estudio entre cada diseño. A partir de este análisis se evaluará si existe o no relación entre los datos obtenidos y las variables de estudio.

4 Capítulo IV. Desarrollo Ingenieril

Durante el progreso del proyecto se tuvo un acercamiento a diversas herramientas de la ingeniería que propiciaron el desarrollo de este trabajo en virtud de los objetivos. Estas herramientas fueron proporcionadas por algunas de las ramas de esta ingeniería como los fundamentos de acústica, la teoría de radiación sonora, la teoría electroacústica, el diseño y desarrollo de sistemas de sonido, y la construcción de modelos reales a partir del diseño ingenieril. Gracias a estas diversas aplicaciones se logró tomar decisiones acertadas en cuanto a la implementación de la teoría en el sistema sonoro estudiado, su construcción y medición.

En esta sección del documento se encuentra el procedimiento detallado que se siguió en cada etapa del proyecto en virtud del cumplimiento de los objetivos planteados. Algunos de estos procedimientos se vieron afectados por diversas variables, logrando aumentar, en algunas ocasiones, el tiempo de ejecución de diferentes procesos, al igual que su complejidad. A pesar de esto, la mayor parte de los procesos fueron realizados con éxito obteniendo así los resultados requeridos para el análisis y su discusión.

4.1 Parámetros Thiele & Small del altavoz

Para el desarrollo del proyecto ha sido indispensable mantener claro el rango de operación en frecuencia del dispositivo. Tratándose de la baja frecuencia, por la teoría anteriormente discutida se requiere de un altavoz cuyo diafragma sea grande y con una inductancia suficiente para generar la energía que requiere la masa móvil del transductor. También es indispensable tener en cuenta las especificaciones entregadas por el fabricante para tener un indicio del comportamiento del altavoz, aun antes de adquirirlo.

Al tener en cuenta las sugerencias realizadas por la literatura, resulta conveniente que el factor Qms del altavoz sea mucho mayor que el factor Qes, garantizando la proximidad entre el valor Qts y Qes (JOHN C. YOUNG, 1979). Además, si se procura un valor bajo de Qts y Qes se genera un indicador que sugiere que la masa mecánica del altavoz y su

resonancia son bien controladas por el motor magnético del dispositivo, lo que resulta conveniente para su respuesta en frecuencia. Se asemeja a la idea de ser suficientemente rígido para generar los volúmenes de aire requeridos y suficientemente liviano para generar las velocidades volumétricas. Por esta razón se eligió el altavoz de 15 pulgadas del fabricante Beyma cuyas especificaciones se relacionan a continuación en la figura 4-1 de este apartado.

TECHNICAL SPECIFICATIONS		
Nominal diameter	380 mm	15 in
Rated impedance		8 Ω
Minimum impedance		6,4 Ω
Power capacity*		400 W_{AES}
Program power		800 W
Sensitivity	99 dB	1W / 1m @ Z_N
Frequency range		35 - 4.000 Hz
Recom. enclosure vol.	70 / 150 l	2,45 / 5,25 ft^3
Voice coil diameter	76,2 mm	3 in
Bl factor		19,2 N/A
Moving mass		0,091 kg
Voice coil length		16 mm
Air gap height		8 mm
X_{damage} (peak to peak)		30 mm

THIELE-SMALL PARAMETERS**	
Resonant frequency, f_s	36 Hz
D.C. Voice coil resistance, R_e	5,5 Ω
Mechanical Quality Factor, Q_{ms}	8,2
Electrical Quality Factor, Q_{es}	0,32
Total Quality Factor, Q_{ts}	0,30
Equivalent Air Volume to C_{ms}, V_{as}	224 l
Mechanical Compliance, C_{ms}	205 µm / N
Mechanical Resistance, R_{ms}	2,5 kg / s
Efficiency, η_0	3,4 %
Effective Surface Area, S_d	0,088 m^2
Maximum Displacement, X_{max} ***	6,3 mm
Displacement Volume, V_d	555 cm^3
Voice Coil Inductance, L_e @ 1 kHz	1 mH

Figura 4-1 Datasheet entregado por el fabricante beyma del altavoz 15WR400

Otro de los aspectos que prescindió el uso de este altavoz fue la frecuencia de resonancia cercana a los 36 Hz ya que se busca conseguir un rango amplio de operación para el dispositivo. Sin embargo, para efectos de precisión, los parámetros TS[3] fueron igualmente calculados durante el proyecto para tener certeza de estos valores. Existen diversos métodos para el cálculo de estos parámetros entre los cuales encontramos el método más convencional que consiste en sacar valores de la impedancia a intervalos regulares. Para ello se requiere un generador de frecuencias puras, una resistencia de potencia, una masa (plastilina), una tarjeta de sonido y un amplificador. Se adquieren así las frecuencias y la medida de la impedancia a cada frecuencia.

[3] Los parámetros TS es la abreviación convencional para los parámetros Thiele & Small

4.1.1 Medición de impedancia

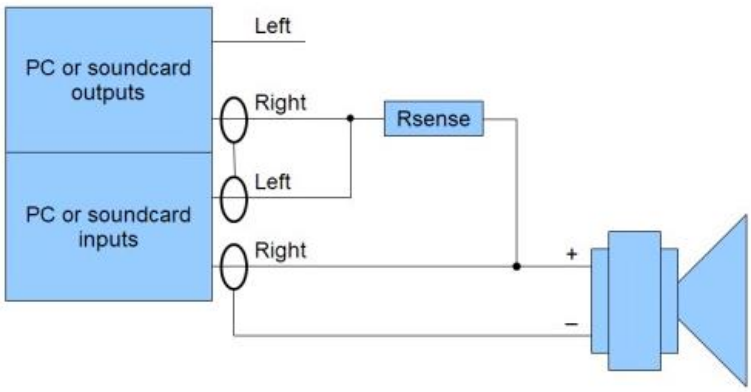


Figura 4-2 . Diagrama de conexión para obtener los parámetros TS del altavoz. Extraída del software REW

Siguiendo las especificaciones del método tradicional y haciendo uso del software de medición REW de licencia libre, el procedimiento realizado parte de la resistencia de medición (Rsense indicado en el diagrama); como se muestra en el diagrama de conexión de la figura 4-2, se utiliza para medir la corriente que fluye hacia la carga, que será el de la ecuación 45. Tanto la ecuación 45 como 46 se han extraído de la documentación del software REW.

$$i = \frac{V_{Left} - V_{Right}}{R_{Sense}} \qquad \textit{Ecuación.45}$$

El voltaje a través de la carga es Vright, por lo que la impedancia es,

$$Z = \frac{v}{i} = \frac{R_{Sense} * V_{Right}}{V_{Left} - V_{Right}} \qquad \textit{Ecuación.46}$$

Para el procedimiento se utilizó la salida de auriculares de la interfaz siendo esta una recomendación hecha por el software, con una resistencia de medición de 100 ohmios. Una alternativa fue conducir la carga a través de un amplificador de potencia, que proporciona los niveles de ruido más bajos y los resultados más precisos. La entrada de la tarjeta de sonido conectada a la carga debe ser la misma que se ha elegido como entrada en la

configuración de la tarjeta de sonido REW. En la figura 4-2, esa es la entrada que se utilizó en el momento de la medición.

Antes de realizar la medición se realizó la respectiva calibración de la interfaz de audio usada, mandando un barrido de frecuencias directamente desde la salida de audífonos de la interfaz y llevando esta señal a ambas entradas Right y Left alternándolas, a esta configuración se le reconoce como loopback, tal y como se muestra en el diagrama de conexión de la figura 4-3; esto con el fin de verificar la respuesta en frecuencia de la tarjeta de sonido en ambos canales. Adicionalmente se realizó la calibración de la medición de impedancia con el mismo diagrama de conexión y siguiendo las recomendaciones del software REW ya que según el software las pequeñas diferencias de ganancia entre los canales de entrada de la tarjeta de sonido causan un cálculo incorrecto de la corriente de carga y la impedancia. Para calíbralo se realiza una medición con la carga desconectada y la resistencia de detección cortocircuitada. La medición muestra el nivel del canal de medición en comparación con el canal de referencia, donde una lectura de 100 ohmios corresponde al 100%, 99 ohmios sería del 99%, etc. En el software, al digitar el valor de la resistencia de medición Rsense en cero, este reconoce el modo de calibración y se dispone a entregar la información pertinente.

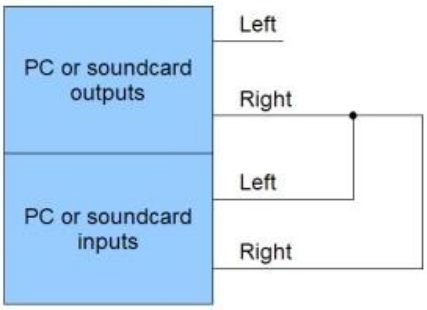


Figura 4-3 Diagrama de conexión para la calibración del sistema de medición. Extraída del software REW

Adicional a esto, el altavoz fue suspendido con el objetivo de minimizar la influencia de cualquier factor externo en la medición, como se muestra en la imagen de la figura 4-4. Los resultados obtenidos muestran ciertas variaciones con respecto a los datos entregados por el fabricante. La razón de esto no es del todo clara para los autores y se sale del objetivo de estudio del proyecto, sin embargo, los autores atribuyen parte de este resultado a la

manipulación del elemento durante su traslado desde la fábrica en España. En la tabla 4-1 se relacionan los resultados de la medición de parámetros TS del altavoz Beyma 15WR400, en ella se puede observar la variación de los parámetros como la frecuencia de resonancia y el factor Qts, los cuales fueron clave para el diseño de la bocina.

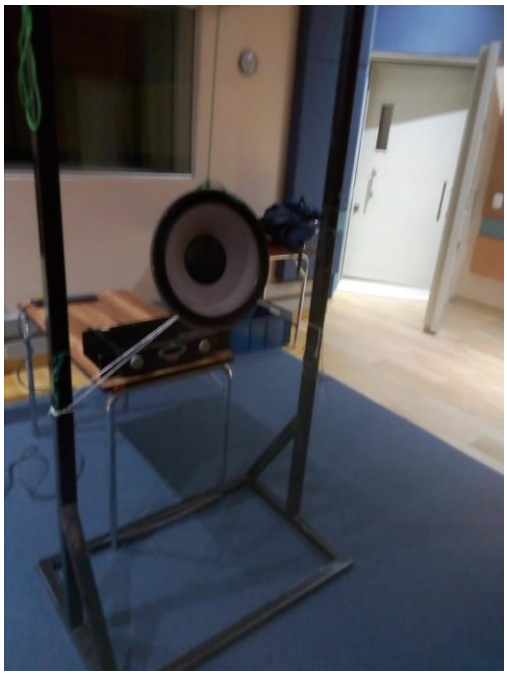


Figura 4-4 Altavoz suspendido para la medición de parámetros TS

Parámetros TS		
$f_s = 45{,}2\ Hz$	$M_{MS} = 66{,}25\ g$	
$Q_{MS} = 3{,}71$	$C_{MS} = 0{,}172\ mm/N$	
$Q_{ES} = 0{,}278$	$R_{MS} = 5{,}304\ Kg/s$	
$Q_{TS} = 0{,}259$	$v_{AS} = 317{,}34\ L$	
$F_{TS} = 182{,}1\ Hz$	$BI = 108{,}511\ Tm$	
$L_P = 102{,}83\ dB(\frac{1W}{1m})$	$Sd = 1140{,}7\ cm^2$	added mass = $108g$

Tabla 4-1 Parámetros TS del altavoz beyma 15wr400 medidos con el software REW

4.2 Medición de Respuesta en Frecuencia (RF)

Uno de los puntos de partida para el diseño de la guía de onda y su posterior construcción es la elección del altavoz, como ya se ha mencionado. Teniendo esto en cuenta, se hace necesario para el proyecto conocer el comportamiento del altavoz individual. Siendo la respuesta en frecuencia una de las variables de interés del proyecto, los autores consideraron necesaria la medición y caracterización de la RF del altavoz para,

posteriormente, realizar el análisis de la RF de la bocina plegada. Además de esto, resulta conveniente para el proyecto conocer el comportamiento del altavoz en el rango de operación con lo cual es posible tener mayor claridad en el análisis de todo el sistema acoplado.

El procedimiento se realizó con base en la sección 4.1 del documento "*Evaluación del efecto, en la respuesta en frecuencia, al implementar material absorbente al interior de bocinas cónicas y exponenciales, desde 500 Hz hasta 5 kHz."* (Colorado, 2018), en donde se realiza un proceso de linealización y determinación de los coeficientes de variación entre las mediciones de RF hechas a partir de tres micrófonos, con el objetivo de obtener mayor fidelidad en los datos obtenidos. Uno de los objetos de interés del proyecto es la variación de la respuesta en frecuencia acorde al cambio de geometría y de volumen, en virtud de esto los autores consideran conveniente aplicar los procedimientos realizados en el documento mencionado en donde se evalúa también la variación de la RF de las bocinas con respecto a la presencia o no de material absorbente en tres posiciones al interior de la misma.

4.2.1 Procedimiento de Medición

Haciendo uso de las recomendaciones hechas por la normativa IEC 60268-5 se establecieron las condiciones de medición para el correcto registro de los datos. El sitio en el que se desarrolló la medición fue en la cancha de fútbol de la Universidad de San Buenaventura sede Bogotá. Los equipos de medición fueron suministrados igualmente por la institución y se relacionan a continuación:

- Amplificador de potencia clase D genérica.
- Interfaz de audio Alesis Onix Blackjack
- Cables XLR

- Software de medición Room EQ Wizard (Computador Macbook Pro)

- Micrófonos de medición BEHRINGER ECM8000 y GOLD LINE TEF04

- Pistófono de calibración Bruel & Kjaer

Habiendo especificado las condiciones de medición en la seccion 2.3.2 y los equipos que fueron utilizados, se presenta a continuación el procedimiento para la medición de la respuesta en frecuencia del altavoz Beyma 15WR400 con los dos micrófonos de medición mencionados:

- La calibración de la interfaz, este proceso permite conocer la linealidad de la tarjeta de sonido de la interfaz con el objetivo de cerciorarse que este instrumento no altere los datos registrados durante la medición. Se consigue a través de la configuración loopback del software REW y se debe procurar que no hallan variaciones de mas de 1 dB en la tarjeta. Los resultados de esta calibración se pueden apreciar en el Anexo C.

- Se establecen las conexiones de los equipos de medición y el flujo de señal ilustrado a partir de la figura 4-5

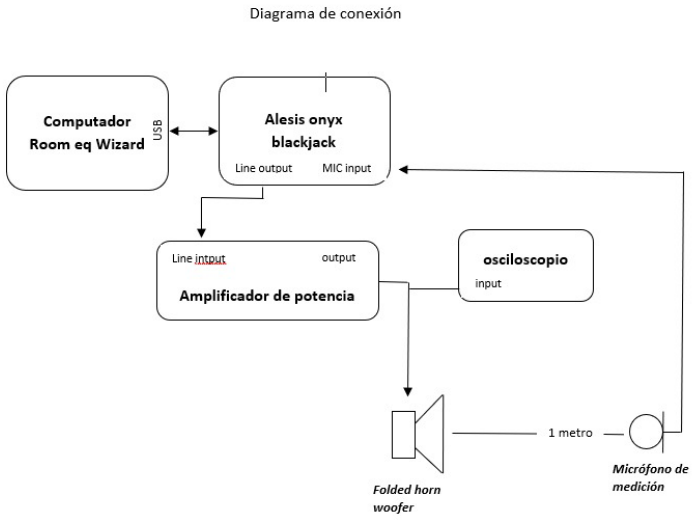


Figura 4-5 Diagrama de conexión para la medición de respuesta en frecuencia

- Se configuró el software de medición estableciendo cuatro barridos de frecuencias logarítmicos desde 20 Hz hasta 10000 Hz, a un nivel de -6dBFS para cada frecuencia.
- Siguiendo las recomendaciones y forma de uso proporcionadas por el software, se calibró cada micrófono en todas las mediciones realizadas a un valor de 94 dBSPL proporcionado por el pistófono cuyo valor registrado por el software fue de aproximadamente -20 dBFS

- El software plasma los resultados en la pantalla los cuales se pueden extraer en formato .txt para su manipulación.

Como ya se mencionó, este procedimiento toma como referencia el documento de Chaparro Colorado y Cortés Guerrero en donde se hace uso de dos métodos para linealizar la RF obtenida del driver usado. De allí se ha extraído el proceso referido a la promediación aritmética de la presión sonora, el cual se explica en el ANEXO J, para aplicarlo a las mediciones realizadas durante este proyecto (Colorado, 2018).

4.3 Determinación del porcentaje de eficiencia del sistema

La eficiencia es otro de los puntos de interés del proyecto de acuerdo con los objetivos planteados. Esta característica del altavoz permite conocer que tanta energía de la señal eléctrica es radiada por parte del altavoz de manera efectiva, es decir como sonido. Este valor se determina a partir de la relación de potencias entre la salida y la entrada del sistema, es decir que para conocer el porcentaje de eficiencia se requiere tanto la potencia eléctrica de entrada al altavoz como la potencia acústica radiada por el mismo. Actualmente no existe un proceso normalizado para determinar el porcentaje de eficiencia de este tipo de dispositivos, por tal motivo, el proceso de medición se estableció a partir de la definición propuesta por D. B. Keele, Jr (D.B. Keele, LOW-FREQUENCY HORN DESIGN USING THIELE/SWALL DRIVER PARAMETERS, 1977).

En primera instancia, es necesario tener en cuenta que los procedimientos seguidos para la medición de la potencia tanto eléctrica como acústica se hicieron simultáneamente. Para los autores fue primordial asegurarse de que los valores encontrados de potencia eléctrica pudiesen ser correlacionados directamente con los valores encontrados de potencia acústica, lo cual pudo conseguirse garantizando que los niveles fueran los mismos en cada medición, además de que fuesen registrados en el mismo instante de tiempo, es decir que, mientras se registraron los valores de voltaje de entrada en el altavoz de manera manual, simultáneamente se realizaba la medición de los niveles de presión sonora generados por la fuente en los diez puntos de medición estipulados por la norma.

Al trabajar con los niveles de potencia acústica por bandas de tercio de octava se hizo necesario hacer una promediación de la potencia eléctrica de entrada también por bandas de tercio de octava, de esta forma los autores plantean una relación directa entre las bandas críticas sobre las cuales se realiza el cálculo y posterior análisis. Esta promediación de los voltajes se soporta a partir del funcionamiento de los sonómetros que transducen la energía acústica en señales eléctricas que son promediadas para adquirir los valores medios de cada banda según la resolución. El fabricante de sonómetros Cirrus Reserach S. L. explica cómo realizar la promediación de una banda en su documento Como calcular dB(A) de los niveles acústicos de banda de octava, con lo cual los autores aplican dicho procedimiento a los valores lineales no de presión sino de voltaje de entrada al altavoz y sin aplicar ningún tipo de ponderación como si lo hacen en el documento del fabricante (Anguera, 2013).

Haciendo uso de la ecuación 47, se establece que la relación de eficiencia está dada a partir de:

$$\%Eff = \frac{P_A}{P_E} * 100 \quad [\%]$$

Ecuación.47

4.3.1 Procedimiento de medición

Para determinar el porcentaje eficiencia se hace uso del procedimiento planteado por Beranek definido por la relación entre la potencia acústica emitida y la potencia eléctrica de entrada al altavoz (Beranek, Acústica, 1961), tal y como se expone en la ecuación 47.

4.3.1.1 Potencia eléctrica de entrada

La ecuación de potencia eléctrica de entrada es la misma que usa D. B. Keele, Jr. En el documento usado por los autores como base de diseño de la guía de onda para baja frecuencia a partir de los parámetros TS del altavoz (D.B. Keele, LOW-FREQUENCY HORN DESIGN USING THIELE/SWALL DRIVER PARAMETERS, 1977) y se define como el voltaje de entrada medido en el altavoz dividido entre dos veces la resistencia nominal, tal y como se expresa en la ecuación 48.

$$P_E = \frac{V_{in}^2}{2R} \qquad \textit{Ecuación.48}$$

Como se observa, la potencia eléctrica de entrada al transductor puede ser medida directamente en las terminales del altavoz, sin la necesidad de interferir en el sistema, para ello se hizo uso de los siguientes elementos y el diagrama de conexión se muestra en la figura 4-7:

- Amplificador de potencia clase D
- Interfaz de audio Alesis Onix Blackjack
- Software de medicion Room EQ Wizard (Computador Macbook Pro)
- Osciloscopio

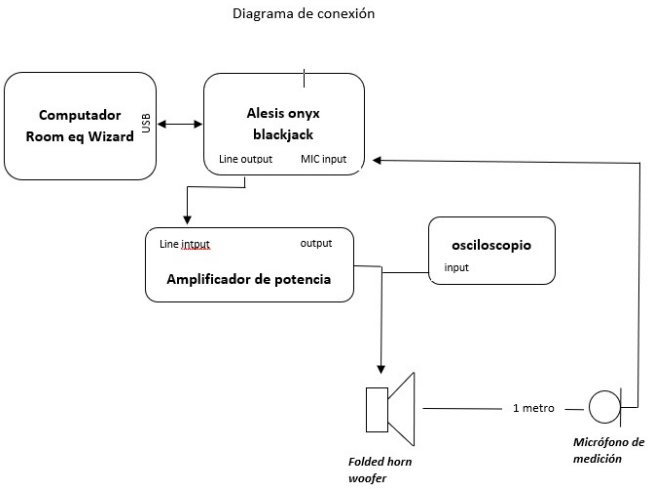


Figura 4-6 Diagrama de conexión para la medición de potencia eléctrica de entrada

Los datos que se extraen corresponden al voltaje que existe en las terminales del altavoz por cada frecuencia de reproducción dentro del rango de estudio; con el cual se procede a calcular la potencia eléctrica a partir de la ecuación 48. Es necesario aclarar que la toma de datos se realizó con pasos de 5 Hz entre frecuencias, iniciando desde 20 Hz y finalizando en 450 Hz (Stanley Wolf, 1992). Nuevamente se aclara que estos valores fueron promediados en bandas de tercio de octava para su correlación con los datos arrojados por el sonómetro.

4.3.1.2 Potencia acústica radiada

Para determinar la potencia acústica los autores decidieron hacer uso de la normativa internacional ISO 3744 en donde se expone el procedimiento para conocer el nivel de potencia acústica de una fuente de ruido industrial a partir de los niveles de presión sonora emitidos por esta. A pesar de que la norma se dirige a fuentes de ruido industrial, en ella no se excluye ningún tipo de fuente ya sea un altavoz o cualquier emisor de ruido, y se centra expresamente en el procedimiento para el cálculo de la variable, potencia acústica. Para esto la normativa plantea las condiciones de medición discutidas en la sección 2.3.1, procurando disminuir la probabilidad de error en la medición y generando la fidelidad requerida en los datos. De igual forma en el ANEXO K se discuten nuevamente dichas condiciones, además de exponer el procedimiento planteado por la norma para establecer la

caja de referencia sobre la cual es situada la superficie de medición. La normativa ISO 3744 dispone diez posiciones de micrófono situadas sobre una superficie hipotética de medición que para el caso de estudio es un hemisferio. Las coordenadas y el diagrama en el que se ubica cada posición se muestra en el ANEXO K y el procedimiento de calculo para cada una de estas se detalla en este mismo anexo. A continuación se muestra en la figura 4-7 las posiciones de micrófono situadas en el lugar de la medición junto con la caja de referencia.

Figura 4-7 Posiciones de micrófono parta la medición de la potencia acústica

Para las mediciones se hizo uso del sonómetro Brüel & Kjaer 2250. En primera instancia se realizó la calibración del sonómetro generando un nivel de presión sonora de 94 dB a 1 KHz. Seguido a la calibración, y con base en la norma de referencia, se configuró el sonómetro en ponderación Z con analizador por banda de tercio de octava. Las mediciones efectuadas tuvieron una duración de 20 segundos. Cada calibración se realizó antes y después de cada serie de mediciones y se realizó la medición de ruido de fondo por cada posición de micrófono propuesta por la norma.

El procedimiento de cálculo de la potencia acústica es el que determina la norma en el apartado 8 de ese documento. Teniendo en cuenta el cumplimiento del criterio relativo de ruido de fondo establecido por la norma, lo cual sugiere que no existe corrección por ambiente para los valores obtenidos durante la medición, el cálculo de potencia acústica

que se describe, corresponde al planteado por la norma ISO 3744 y así mismo las ecuaciones que se relacionan a continuación:

- Se realiza la Promediación espacial de las diez posiciones de micrófono tanto de la medición como del ruido de fondo a partir de la ecuación 49 y 50:

$$\overline{L_{p(ST)}} = 10 * Log_{10}\left(\frac{1}{S}\sum_{i=1}^{N_M} S_i * 10^{0,1L_{pi(ST)}}\right) \quad [dB] \qquad \textit{Ecuación.49}$$

$$\overline{L_{p(B)}} = 10 * Log_{10}\left(\frac{1}{S}\sum_{i=1}^{N_M} S_i * 10^{0,1L_{pi(B)}}\right) \quad [dB] \qquad \textit{Ecuación.50}$$

Donde $\overline{L_{p(ST)}}$ y $\overline{L_{p(B)}}$ son los niveles de presión sonora y ruido de fondo, respectivamente; promediados espacialmente en cada banda de tercio de octava.

- Al no haber correcciones por ruido de fondo se procede al calculo del nivel de potencia acústica a partir del nivel de presión sonora $\overline{L_{p(ST)}}$.

- A continuación, se calcula el nivel de potencia a partir del nivel de presión sonora promedio total y su distribución en la superficie de medición, ecuación 51.

$$L_W = \overline{L_p} + 10 * Log_{10}\left(\frac{S}{S_0}\right) \quad [dB] \qquad \textit{Ecuación.51}$$

- Por último se extrae de este valor la potencia acústica a partir de la ecuación 29 para eventualmente generar la relación con la potencia eléctrica registrada.

$$P_A = 10^{-12} * 10^{\frac{L_W}{10}}$$

En el ANEXO N se detalla un ejemplo de cálculo de eficiencia con los valores obtenidos en el proceso de medición. Estos resultados allí expuestos son los que posteriormente se usan en la sección de análisis de resultados a partir de las graficas allí expuestas.

4.4 Diseño de las guías de onda

En esta sección se hace énfasis en la modularidad que tuvo el sistema, ya que al ser un dispositivo de grandes dimensiones, se procuró que este tuviera la capacidad de acoplar las tres geometrías que adoptó la caja acústica o cavidad interior de la guía de onda y que proporcionara la facilidad de variar el volumen de cada una de estas geometrías. Este fue uno de los factores que más propicio la dilatación del tiempo estimado de medición ya que la intervención entre cada una de las mediciones requería desacoplar la cavidad interior, retirar el altavoz de esta, instalarlo en la siguiente cavidad y reacoplar todo el sistema. Hubo que tener cuidado con la manipulación del peso de los elementos para el termino exitoso de las mediciones.

La modularidad del sistema se logró a partir de bisagras o ángulos de acople que permitieron convertir dos laminas estructurales del diseño en tapas, como se muestra en la figura 4-13, una ubicada en la parte superior de la bocina y la otra en la lámina posterior de la cavidad trasera. Para los autores fue importante garantizar el sellamiento de la caja, sin embargo, es de tener en cuenta que este sistema pudo haber introducido cierto porcentaje de error, contemplado también por la bibliografía, pero usualmente desestimado en el análisis de estos sistemas (Pueo, 2003).

En lo que respecta al diseño de la guía de onda, se tomaron en cuenta las consideraciones del apartado segundo de este documento, específicamente la sección 2.2.3.3 correspondiente al diseño de la guía de onda a partir de parámetros TS. Por esta razón el cálculo de las medidas del volumen y el área de la garganta corresponden a las ecuaciones A-3 y A-14 del ANEXO A. En cuanto a la forma que adquiere la bocina se ha decidido continuar con la forma convencional para la baja frecuencia, en los que se tiene la caja acústica del altavoz y la guía de onda plegada alrededor de esta cavidad como se muestra en la figura 4-8.

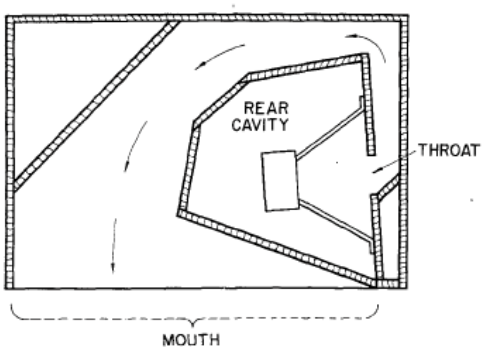


Figura 4-8 Diagrama genérico de una guía de onda para baja frecuencia. (Bright, Analysis of a Folded Horn, 2003)

A continuación, se muestra el cálculo de las medidas correspondientes a la aplicación de las ecuaciones 1 a 15 del ANEXO A. Estos cálculos fueron realizados a partir de la información extraída del proceso de medición de los parámetros TS del altavoz y se relacionan en la tabla 4-3.

$\boldsymbol{S_T}$	706, 64 cm^2
$\boldsymbol{F_{Hs}}$	181,46 Hz
$\boldsymbol{F_{Ls}}$	12Hz
$\boldsymbol{F_{LC}}$	6Hz
$\boldsymbol{F_{LBC}}$	17,4 Hz
$\boldsymbol{F_{HM}}$	362,93 Hz
$\boldsymbol{V_B1}$	170,3 L
$\boldsymbol{V_B2}$	106,55 L
$\boldsymbol{P_{AR}}$	0,136
$\boldsymbol{F_c}$	36 Hz

Tabla 4-2 Parámetros de diseño calculados a partir de los parámetros TS del altavoz beyma 15WR400

El segundo volumen $\boldsymbol{V_B2}$, que corresponde a una disminucion aproximada de 35% del volumen 1, se determina haciendo coincidir la frecuencia de corte de la bocina con la frecuencia de resonancia medida por los autores, es decir 47 Hz esto debido a que se desea observar el comportamiento de la zona cercana a la frecuencia de resonancia del sistema con ambos volúmenes y su influencia con respecto a las variables bajo estudio.

Tratándose de un modelo de bocina para baja frecuencia, conseguir las características propuestas por la bibliografía para este rango de operación no es del todo posible ni

tampoco conveniente (Beranek, Acústica, 1961), ya que se trata de dispositivos de gran envergadura. Su costo de producción es muy elevado y la manipulación de estos dispositivos resulta no ser viable en comparación con las propuestas hechas por el mercado actual de sistemas de sonido. Sin embargo los autores han decidido acoplarse, en la medida de lo posible, a los cálculos propuestos por la teoría (D.B. Keele, LOW-FREQUENCY HORN DESIGN USING THIELE/SWALL DRIVER PARAMETERS, 1977), teniendo en cuenta excepciones como el área de la boca, que para frecuencias inferiores a 100 Hz son áreas mayores a los $12m^2$ (Beranek, Acústica, 1961). A partir de las dimensiones resultantes de los cálculos previamente expuestos, se obtuvo el siguiente diseño que se muestra en la figura 4-9. Como ya se mencionó, la forma que adquiere el sistema caja acústica-altavoz-bocina se basa en la más usada por el mercado actual de sistemas de sonido, la cual se acoge al nombre 'Folded Horn Woofer', en donde se tiene la guía de onda alrededor de la caja acústica.

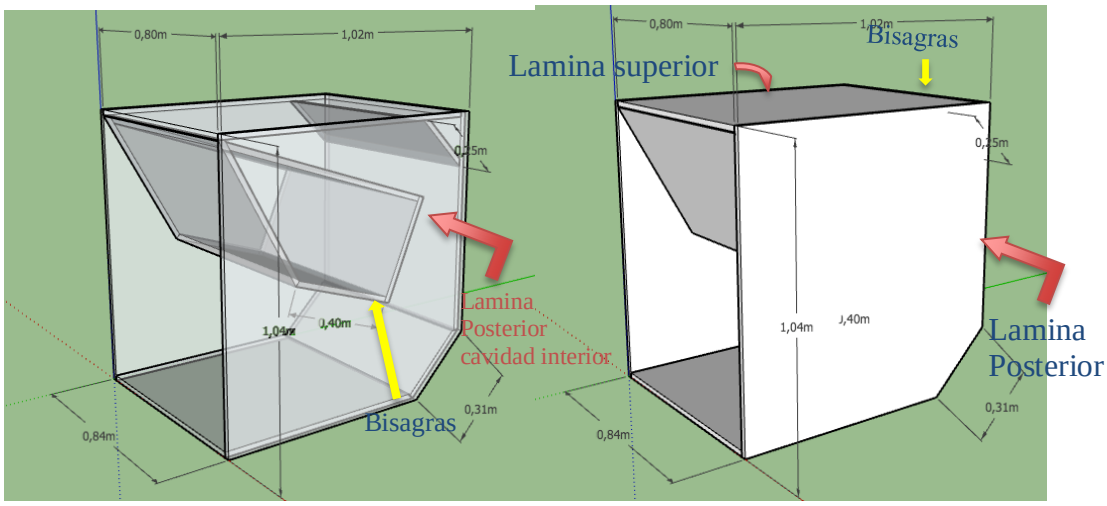


Figura 4-9 Dimensiones externas de la caja exterior de la guía de onda

4.4.1 Elección de las geometrías

La forma que adquiere todo el sistema acoplado se ajusta al nombre con el que se denomina este tipo de guías de onda, es decir, bocina plegada. Esto quiere decir que una de las principales características de la guía de onda para baja frecuencia, al menos en cuanto a la forma geométrica, es que esta se encuentra doblada de manera tal, que recubre la caja acústica acoplada al altavoz ubicando esta última en el interior del sistema acoplado. En la

figura 4-10 se observa como el aire que desplaza el altavoz en su cara frontal recorre la guía de onda que envuelve la caja acústica acoplada al altavoz.

Por lo anterior, se observa también en la figura 4-10 y posteriormente en la figura 4-11, que la caja acústica (cavidad trasera del altavoz) delimita el contorno del ensanchamiento de la guía de onda. En virtud de los objetivos del proyecto, cualquier variación que se realice a la cavidad trasera, debe interferir lo menos posible en el funcionamiento del sistema acoplado, caja acústica-altavoz-bocina. Por este motivo, la variación geométrica que se realice a la cavidad debe procurar mantener el altavoz situado en la misma posición permitiendo que el desplazamiento del aire conserve el mismo recorrido. Se tuvo en cuenta también la teoría expuesta en la sección de cajas acústicas del apartado segundo de este documento, sección 2.2.3.1, en donde se discuten algunos beneficios de procurar que las superficies al interior de la caja no sean paralelas.

Al variar la geometría, es primordial garantizar un volumen de aire calculado previamente a partir de los parámetros TS. Por tal motivo, para cumplir esta condición se tuvo en cuenta el área lateral de la caja acústica, que describe la forma expuesta en la figura 4-10, de manera tal que, al multiplicar dicha área por el ancho de la guía de onda, que corresponde a 80 cm, prevaleciera el volumen necesario para el funcionamiento del sistema. Se hizo uso del software Excel, en el que se calculó el área de dicha figura geométrica a partir del método de gauss, del cual se habla en el ANEXO D. Procurando esto, los autores deciden realizar la variación geométrica en la sección que determina el ensanchamiento de la guía de onda. De esta forma se procura un cambio geométrico en cada iteración, conservando un ensanchamiento similar en las geometrías.

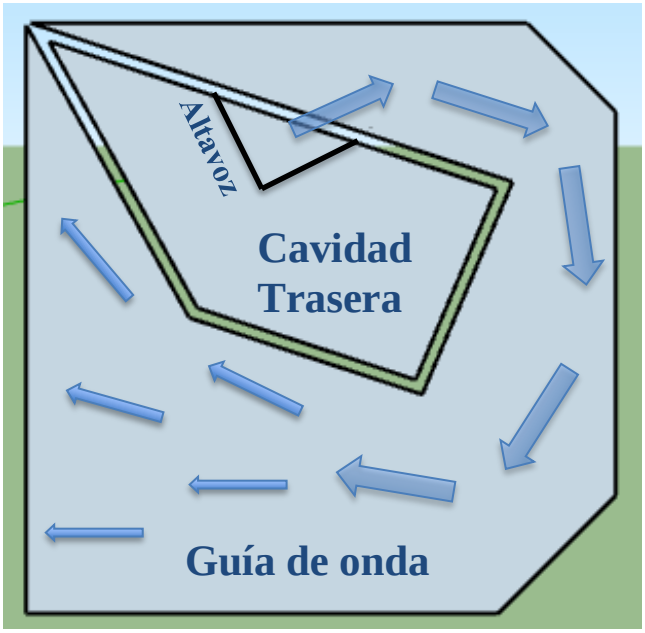


Figura 4-10 Forma geométrica del sistema caja acústica acoplado a la guía de onda

Al remitirse a la figura 4-11 es posible notar que la sección creciente de la bocina obedece a la geometría de la cavidad trasera, como ya se mencionó. Es en este punto en donde se decidió realizar los cambios, seccionando este contorno de la boca de la bocina en un mayor número de piezas para describir en cada modelo una curvatura diferente. Con ello se obtiene el cambio de geometría eliminando los paralelismos al interior de la caja acústica sin modificar el funcionamiento del diseño general de la guía de onda. A partir de esto se determinaron tres geometrías, expuestas en la figura 4-11, que procuran un mismo volumen y son coherentes con el diseño original. Finalmente, con ayuda del software Excel se calculó las dimensiones que debía tener cada pieza para posteriormente llevarla al proceso de producción.

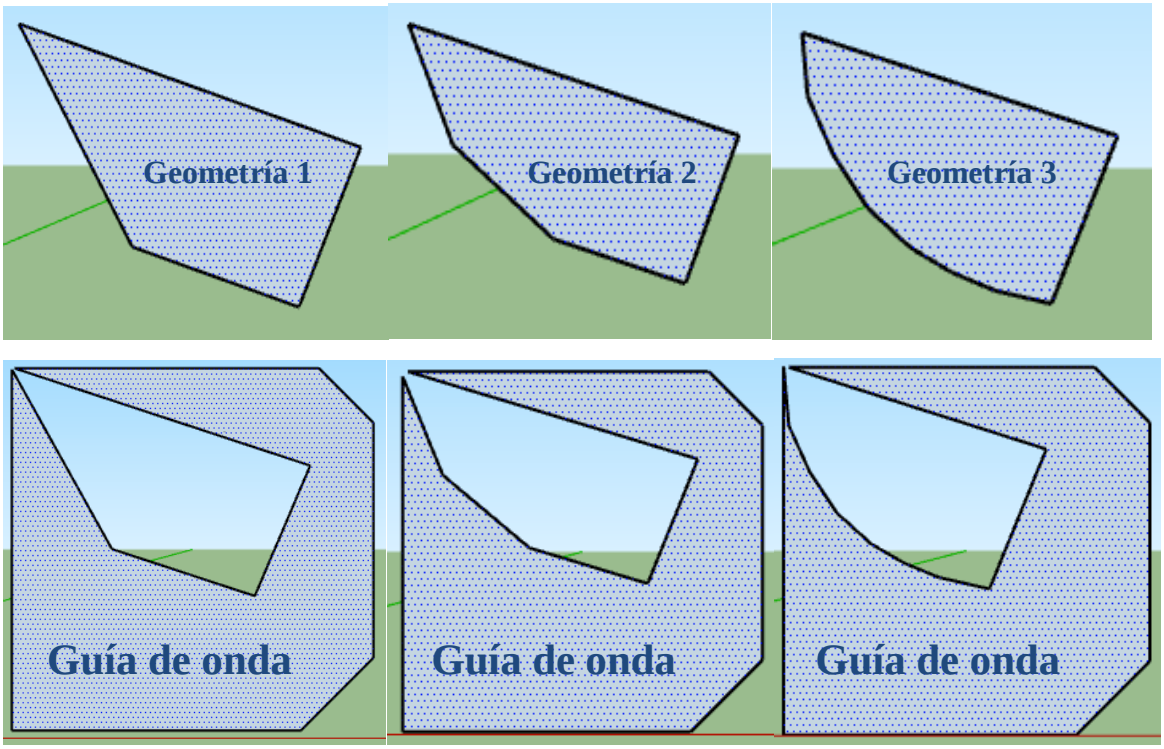


Figura 4-11 Formas geométricas a implementar en la medición

4.5 Construcción del modelo

Para este proceso fue determinante tener en cuenta el costo de producción de cada modelo para llevar a cabo el proyecto en su totalidad. En primer lugar, se tomó la decisión de trabajar madera de tipo MDF de la más alta densidad posible ofrecida por el proveedor, ya que en medio de las opciones resultaba ser la más económica sin ser desfavorable para el funcionamiento del sistema. En el ANEXO L se exponen algunas características de los materiales disponibles por el proveedor y se discute allí mismo las razones que llevaron a elegir el MDF para la construcción del sistema. También, teniendo en cuenta que eran tres modelos de estudio, era oportuno poder construir cada modelo por separado, sin embargo, esta decisión acarreaba el costo de tres sistemas independientes aumentando la cantidad de material y así mismo el costo del proyecto. Esta fue otra de las razones por las que se decidió construir solo un modelo con el fin de adaptarlo a los dos restantes.

Siguiendo la forma convencional de guía de onda para baja frecuencia, se obtuvo un total de seis láminas de madera MDF cuyo propósito es delimitar el contorno del woofer, obteniendo así las dimensiones que se relacionan en la tabla 4-8.

Garganta	706,64 cm^2
Boca	0,80 m^2
Volumen Cavidad Interior	170,3 L
Alto	1,04 m
Ancho	0,84 m
Largo	1,02 m

Tabla 4-3 Dimensiones de la guía de onda

Para tener claridad en cuanto a las partes que constituyen la guía de onda, se detalla en el ANEXO E las dimensiones de cada parte y su posición dentro del diseño. Entre la lámina superior y posterior de la caja fueron instaladas las bisagras que permiten que la lámina superior se comporte como una tapa, facilitando la instalación y extracción de la cavidad interior y a su vez del altavoz; así se muestra en la figura 4-12. El proceso de ensamble parte del contorno de una de las placas laterales, usada en principio como base, para adherir a esta las láminas correspondientes a la base, ángulo inferior y placa posterior, seguido de esto, una vez garantizado el sellamiento entres estos elementos se procede a poner la placa latera restante, procurando en todo momento cumplir con las características del diseño. El sellamiento se realiza con un pegamento industrial a presión y tornillería la cual termina de darle solides a la estructura.

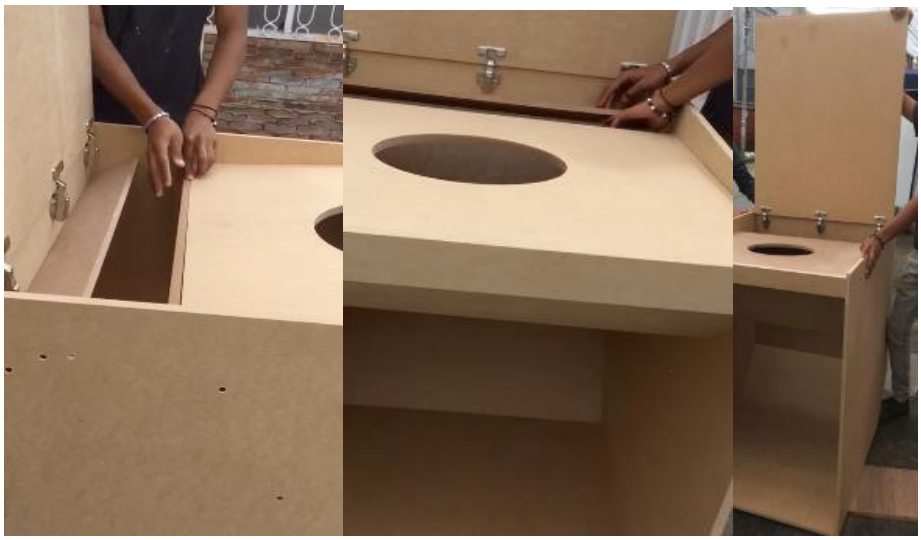


Figura 4-12 sistema de acople entre la caja y la lámina superior otorgando modularidad del sistema

Para las cajas acústicas, haciendo uso del software Excel se determinaron las dimensiones de cada una de las láminas a usar en cada geometría. Debido a que la variación se presenta sobre este elemento, fue necesario la construcción de las tres cajas acústicas las cuales posteriormente fueron acopladas a la caja exterior. En la geometría 1 se hizo uso de dos laminas para generar la curvatura de la caja y contorno de la boca de la bocina, la geometría 2 hizo uso de tres laminas en la sección de ensanchamiento y por último la curvatura de la caja 3, que en principio se había diseñado con 9 placas adheridas entre sí, pero fue construida a partir de una técnica de doblado de la lámina de madera proporcionada por el carpintero que dirigió la construcción de la bocina, lo cual disminuyo el riesgo de fugas en la caja al pasar de usar nueve laminas adheridas a usar una sola lamina curvada. El resultado se puede apreciar en la figura 4-13.

Figura 4-13 Geometría 3 a implementar en el sistema caja acústica acoplada a la bocina

Para conseguir variar el volumen de las cavidades sin aumentar en gran medida el costo del proyecto se decidió hacer uso de un material absorbente cumpliendo con las dimensiones requeridas para efectuar la variación. Se hizo uso de la frescasa cuyas propiedades acústicas se describen en el Anexo B, en donde también se discute la razón por la que los autores decidieron usar este material para efectuar el cambio de volumen. Este material permitió introducirse en todas las cajas adquiriendo la forma de cada una de ellas y ubicándose a los costados de cada una como se muestra en la figura 4-14. Además de esto y, refiriéndose a la bibliografía, se espera que el uso de este material disminuyera la actividad modal al interior de la cavidad.

Figura 4-14 reducción de volumen mediante la implementación de frescasa

4.5.1 Proceso de Simulación

En primera instancia se aclara al lector que el proceso de simulación y posteriormente el análisis modal se realiza para corroborar si el comportamiento modal de las cavidades tuvo alguna influencia sobre los resultados, por esta razón dicho análisis no intervino en el proceso de diseño ni tampoco en la toma de decisiones con respecto al cambio de volumen o elección de la geometría.

Esta simulación tiene el objetivo de realizar un análisis modal sobre ambas cavidades acústicas que conforman el sistema, es decir, tanto la cavidad trasera del altavoz (caja acústica), como la guía de onda acoplada. Con los resultados, los autores pueden contrastar los datos junto con los obtenidos en el proceso de medición e identificar si la actividad modal al interior de la caja acústica influye en los resultados de la respuesta en frecuencia. Para modelar ambas cavidades, se hizo uso de las plantillas generadas a partir del software SketchUp en el que se dibujó el perfil o vista lateral tanto de la guía de onda como de la cavidad trasera, cada perfil se muestra en la figura 4-11. Luego de esto se procedió a importar cada perfil al software de modelado de ANSYS llamado Spaceclaim. Se realizó de esta manera debido a que resultaba más sencillo realizar la extrusión de cada perfil en el software Spaceclaim el cual reconoce el sólido de manera inmediata al extruir el elemento. La importación del solido desde Sketchup presentó ciertas dificultades por parte del software Spaceclaim para reconocer el sólido importado.

En el ANEXO D se muestra como a partir del método de Gauss es posible obtener el área de cada geometría, necesaria para cumplir con el volumen requerido por el diseño una vez se considere el ancho de la guía de onda, es decir 0,8m. A partir de este modelo se determinó la longitud de los segmentos de recta que define el contorno de la cavidad, lo cual se logra aplicando la fórmula de la hipotenusa en cada par de coordenadas que definen la longitud de las laminas a usar en el modelo real y en consecuencia en el modelo de simulación. Las dimensiones de contorno de cada geometría se relacionan en la figura 4-15 que se muestra a continuación.

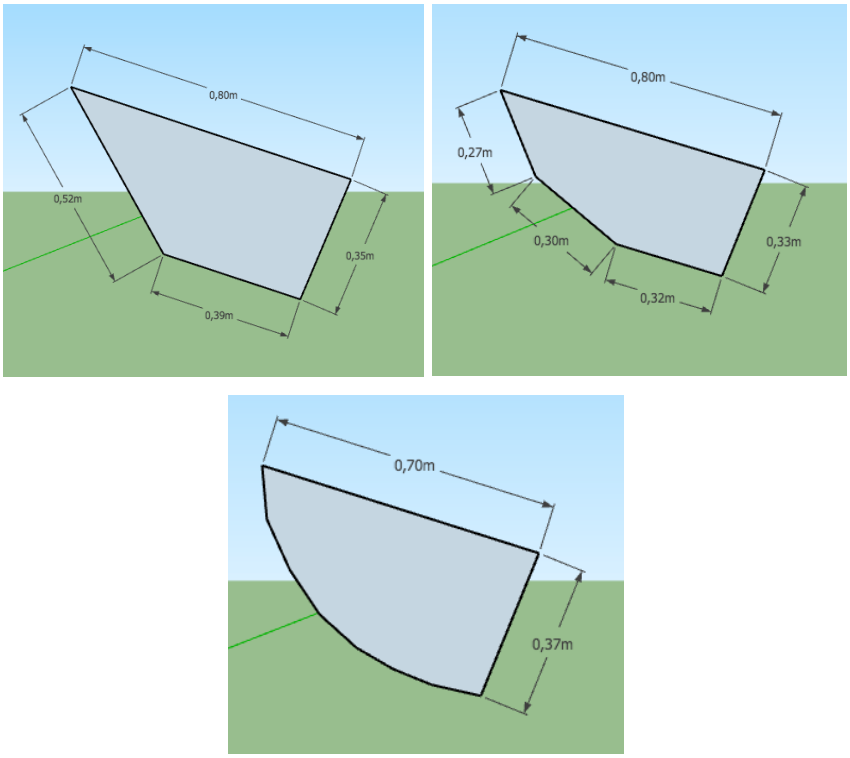


Figura 4-15 dimensiones de las cavidades acústicas

Al tener definidas las formas geométricas en software Sketchup, estas se importaron a Spaceclaim, como ya se había mencionado, en este último software se generó el sólido a partir de la herramienta de extrusión, con lo cual fue posible verificar si el volumen obtenido en cada solido correspondía con el volumen requerido por el diseño. Se relaciona en el ANEXO D los volúmenes registrados por el software de modelado, los cuales resultaron satisfactorios en todos los casos al demostrar un valor muy próximo al requerido

por el diseño; para el volumen dos en cada geometría, el procedimiento fue el mismo teniendo en cuenta que la distancia recorrida por la extrusión no sería de 0,8m sino de 0,5m.

Como se mencionó en la sección 2.2.4, el proceso de simulación consta de tres momentos, a saber: pre-procesamiento, calculo y post-procesamiento. Habiendo generado los sólidos de cada cavidad, geometría y volumen a su vez se dio inicio al trabajo de mallado y simulación proporcionados por el módulo Model del Software ANSYS que se muestra en la figura 4-16. Allí fue configurada la malla y realizado también el estudio de convergencia tanto para la cavidad trasera como para la guía de onda cuyos resultados se relacionan en el ANEXO H.

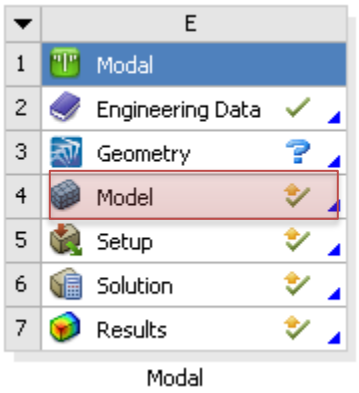


Figura 4-16 modulo Model de Ansys

La frecuencia máxima a simular fue de 500 Hz y el tamaño de elemento seleccionado para trabajar con 12 elementos por longitud de onda fue 0,05716 m, la obtención de este resultado también se encuentra en el ANEXO H. La topología de los elementos, por recomendación del mismo software, fue de elementos cuadráticos. También fueron establecidos los dominios en cada caso como condiciones de frontera, estableciendo una superficie de radiación y un puerto exterior para la cavidad trasera, como se muestra en la figura 4-17. Para la guía de onda se determinaron dos puertos exteriores y dos superficie de radiación correspondiente a la garganta y la boca de la bocina respectivamente, muestra de ello se encuentra en la figura 4-18. Por último, para el volumen 2 se establecieron las superficies de absorción a los costados de cada cavidad en correspondencia al material usado para generar el cambio de volumen. En cuanto los dos momentos restantes del

proceso de simulación, ANSYS hace uso de su propio solver para la resolución de las ecuaciones diferenciales aplicadas al modelo y presenta los resultados a partir de un informe generado por el mismo software.

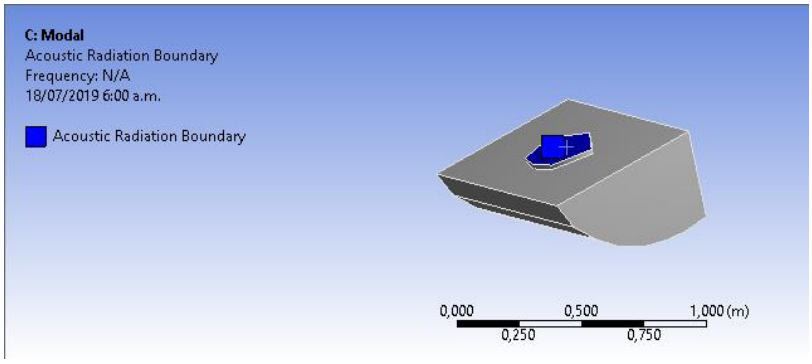


Figura 4-17 superficie de radiación en la cavidad acústica para la simulación en Ansys.

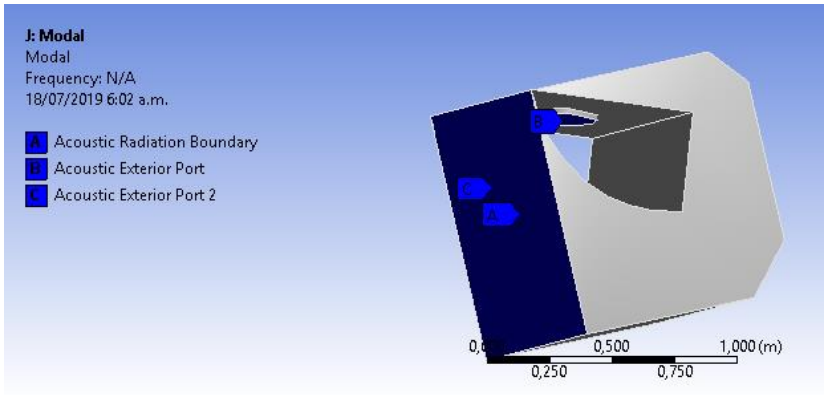


Figura 4-18 simulación de la guía de onda en Ansys

La información de interés para los autores corresponde a las frecuencias en las que se encuentra la actividad modal. El software debe ser configurado en la sección Análisis Settings que se muestra en la figura 4-19 de manera tal que se establezca el rango de operación en frecuencia y la cantidad de modos a identificar. Para todos los casos bajo estudio se configuro el software para trabajar entre 15 Hz y 500 Hz y la cantidad de modos a identificar fueron 15, sin embargo, aun con estas condiciones, ANSYS no detecto más de 6 modos en la cavidad trasera. Para el caso de la guía de onda si fueron detectados los 15 modos. Se repitió este proceso buscando aumentar a 20 la cantidad de modos a identificar en la guía de onda sin embargo el resultado solo llego a demostrar la presencia de 16 modos

en la guía de onda de la geometría 2, no obstante, este resultado no se consideró dejando como configuración 15 modos en cada simulación.

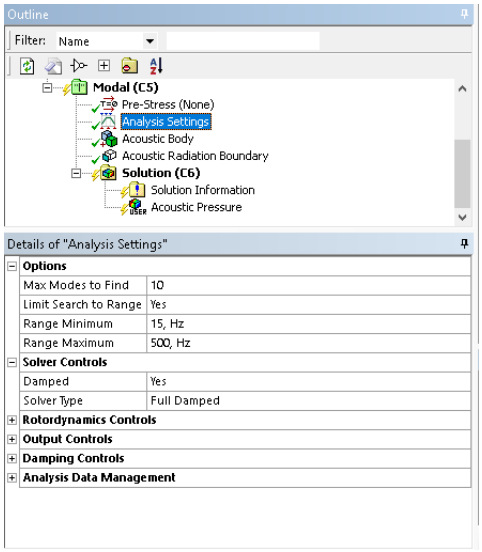


Figura 4-19 configuración de Ansys para realizar análisis modal

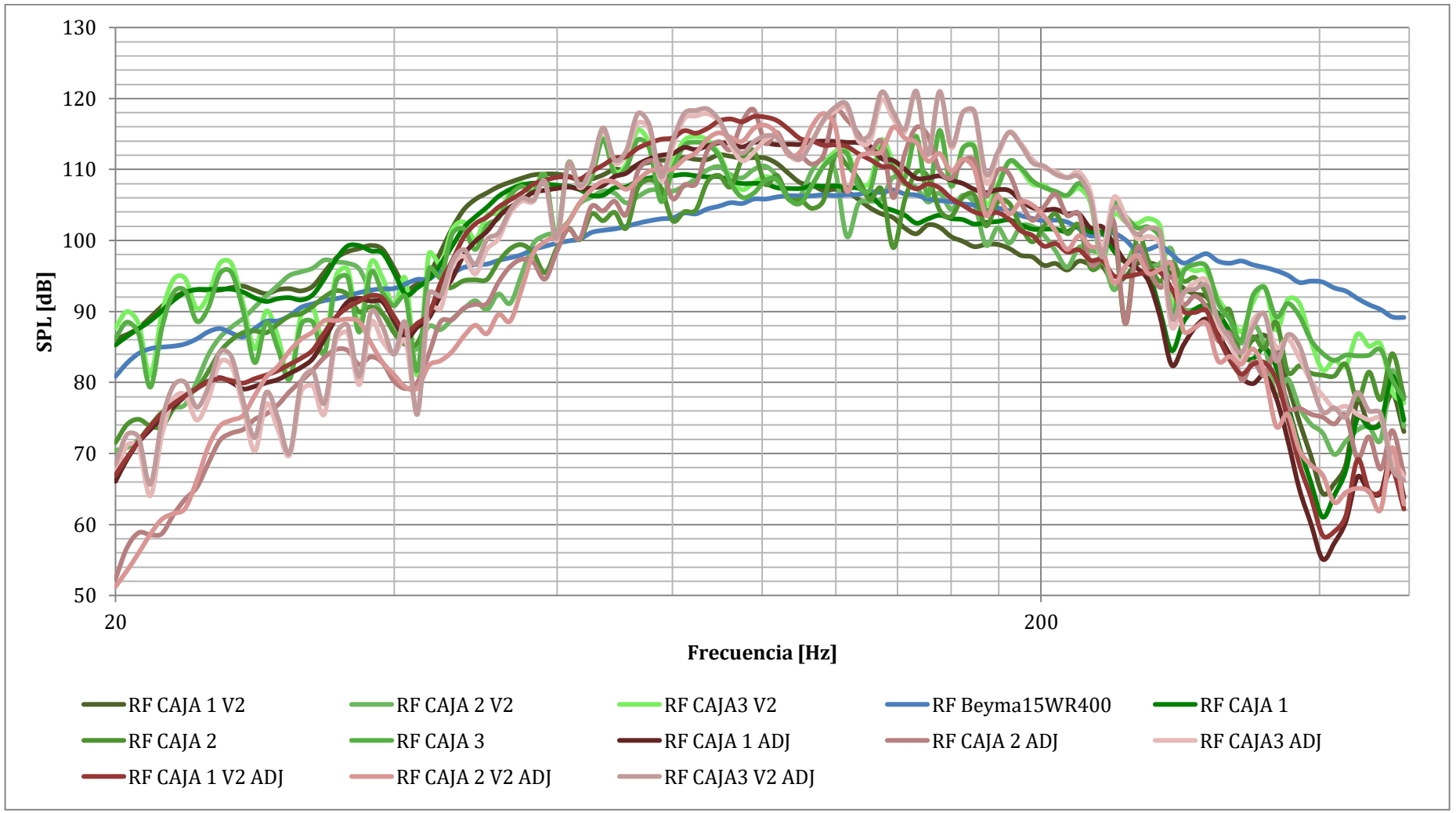
5 Capítulo V. Resultados y Análisis

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de los procedimientos expuestos en el apartado anterior. En esta sección, los autores discuten acerca de la información obtenida y la interpretación que se ha dado a partir de las herramientas estadísticas de análisis y los resultados gráficos. En el ANEXO M se adjuntan los resultados del altavoz radiando al aire libre que permitió realizar los ajustes necesarios para el análisis únicamente de las bocinas implementadas.

5.1 Descripción del Comportamiento de la Respuesta en Frecuencia

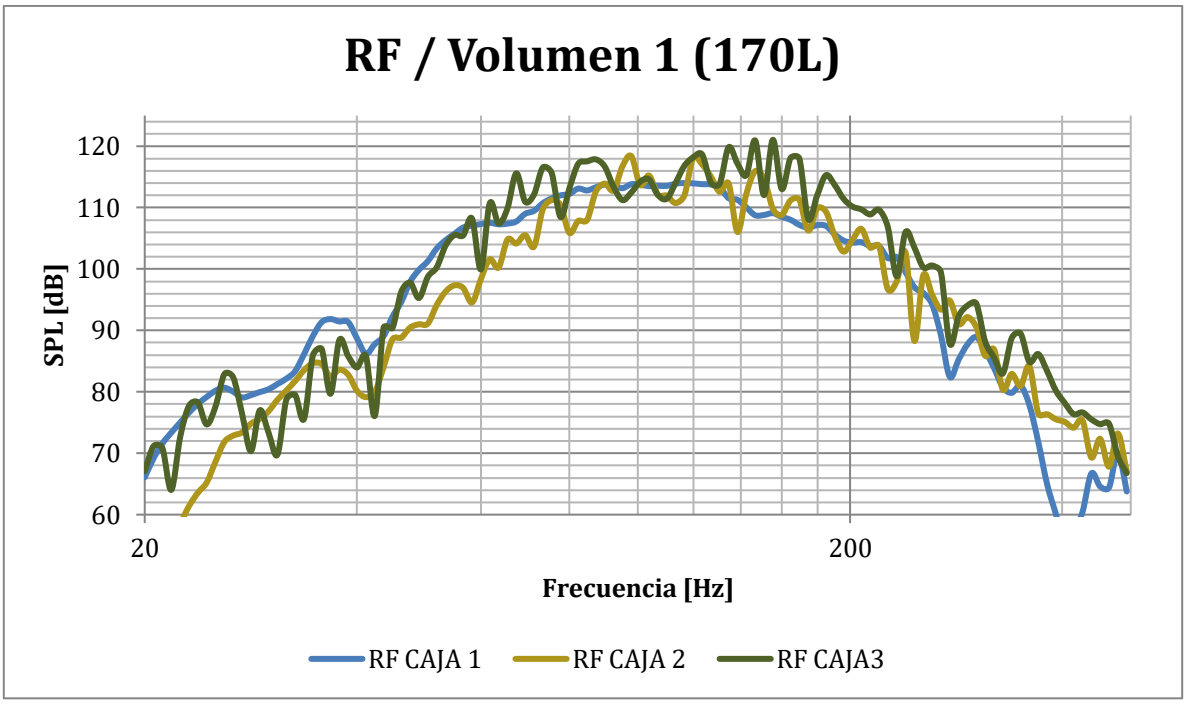
En la gráfica 5-1, se muestran las respuestas en frecuencia de cada bocina en escala logarítmica, y se aclara al lector que a estos resultados se les ha aplicado el ajuste de la RF (ANEXO M, grafico 1, línea de color azul) por medio de la ecuación *J3*. Para poder realizar dicho ajuste, se han extraído los datos del software REW y posteriormente implementado en una hoja del software Excel. Allí, se realizaron los procesos de Promediación y ajuste necesarios para obtener las RF correspondientes.

En la gráfica 5-1 se observa en escala de rojos la RF de las bocinas ajustada a partir de la ecuación *J4* y en escala de verde la respuesta en frecuencia de las bocinas con la influencia del altavoz es decir sin el ajuste. Esta grafica deja en evidencia que la geometría que menos rizado muestra es la 1, lo cual se corrobora con las gráficas 5-2 y 5-3 en donde se separa por volumen las respuestas en frecuencia de las bocinas con el ajuste aplicado. En ambas graficas se presenta en color azul, amarillo y verde las geometrías 1, 2 y 3 respectivamente. A simple vista se observa en las gráficas 5-1, 5-2 y 5-3, que cerca al rango entre 30 Hz y 40 Hz, todas las bocinas demuestran un aumento en el nivel de presión sonora y luego, cerca de la frecuencia de 45 Hz se genera una disminución significativa en este mismo descriptor; sin embargo, para tener certeza de dichos comportamientos los autores buscan caracterizar cada resultado a partir de herramientas estadísticas.

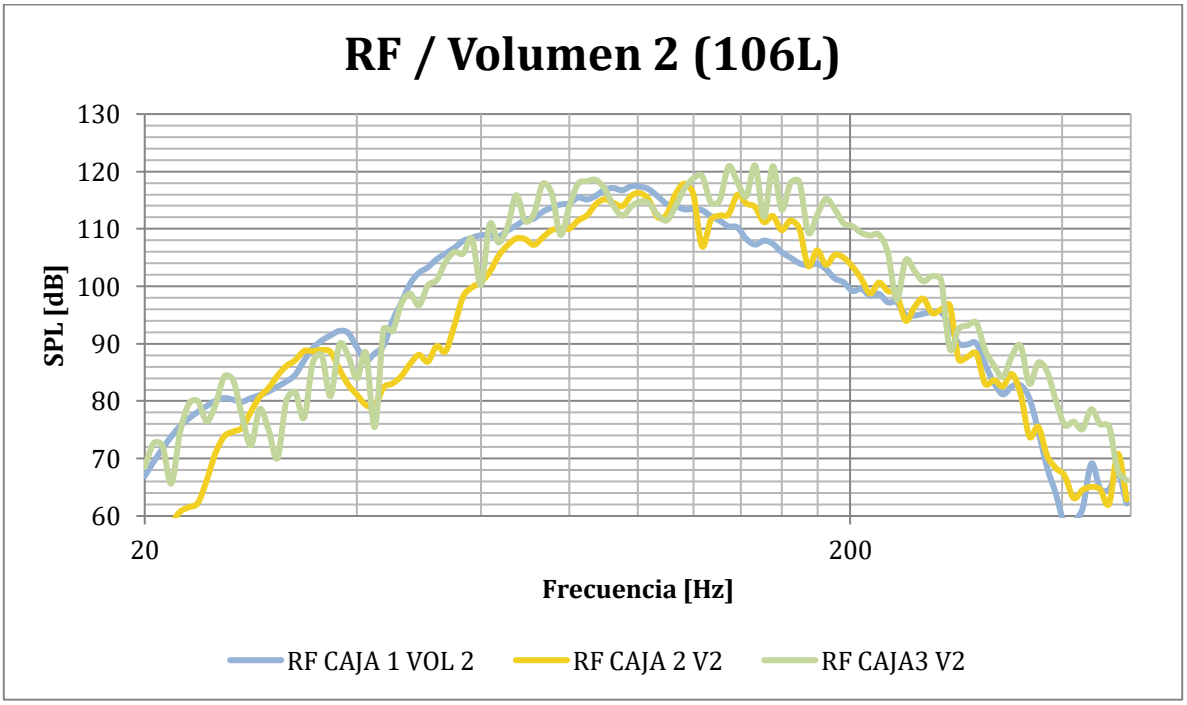


Gráfica 5-1 respuesta en frecuencia para cada geometría y volumen

Haciendo uso de los procesos estadísticos mencionados anteriormente los autores describen las características de las respuestas en frecuencia medidas de cada modelo. Para la caracterización se hizo uso de parámetros como la desviación estándar, el rango, el coeficiente de asimetría y los niveles de presión sonora medios de cada respuesta en frecuencia aplicados sobre todo el rango de operación de la RF. Adicionalmente los autores realizan esta misma observación y caracterización sobre el rango de frecuencias comprendido entre 40 Hz y 315 Hz al que se le ha denominado banda media. Según la tabla 4-3 de la sección 4.4 en donde se presentan los parámetros de diseño de la bocina, la banda de paso está ubicada desde los 6 Hz hasta los 360Hz sin embargo la frecuencia correspondiente a Flc no se encuentra dentro del rango de operación de la bocina, y ciertamente se ubica fuera del rango audible del ser humano, por eso los autores deciden observar el comportamiento de las RF en la banda media desde la zona de anulación de reactancia cercana a los 36 Hz en donde el aumento de SPL comienza a ser significativo hasta la frecuencia de corte superior descrita en los parámetros de diseño. Con ello se despreciarán los valores en los extremos de cada RF que aumentan la variabilidad de los datos, centrando el análisis en la zona en donde el sistema demuestra un comportamiento más significativo. A continuación, se muestra la respuesta en frecuencia de cada volumen implementado en la bocina por separado, con el ajuste realizado a partir de la ecuación *J4*. A partir de los valores en estas graficas se realiza la descripción estadística que se presenta en las siguientes secciones de este apartado.



Gráfica 5-2 Respuesta en frecuencia para cada geometría en volumen 1



Gráfica 5-3 Respuesta en frecuencia para cada geometría en volumen 2

5.1.1 Geometría 1 Acoplada a la Bocina

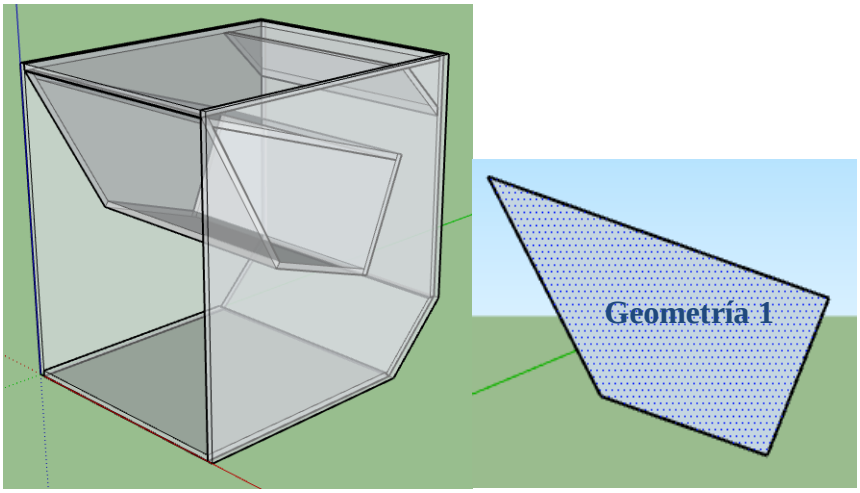


Figura 5-1 geometría 1 acoplada a la bocina

G1	pmid [Pa]	SPLmid [dB]	DE [Pa]	Rango [Pa]	Asimetría
Volumen 1	0,001444274	99,31659433	0,001517015	0,004396518	0,764172181
Volumen 2	0,001586807	100,1340832	0,075135843	0,006548841	1,209045621
Δ	0,000142533	0,817488839	0,073618828	0,002152322	0,44487344

Tabla 5-1 Descriptores estadísticos de las RF de la geometría 1.

Como se muestra en la tabla 5-1 en donde se consignan los valores correspondientes a los descriptores estadísticos discutidos en la sección 2.2.5, la respuesta en frecuencia de la geometría 1 volumen 1, presenta un valor de desviación (***DE***) cercano al valor de presión sonora promedio ($\boldsymbol{P_{mid}}$) de su respuesta en frecuencia. Esto significa que los valores de presión sonora no se alejan tanto del valor de referencia o valor promedio de la presión sonora en ese volumen, lo que en otras palabras quiere decir que la tendencia de dispersión por parte de los valores de presión con respecto al valor medio, favorece la linealidad de esta RF. Así mismo, se observa como esta desviación aumenta al variar el volumen de la cavidad, obteniendo un valor de desviación estándar mucho mayor en comparación al del volumen 1. Esto sugiere que el cambio de volumen ha propiciado que las condiciones acústicas al interior de la cavidad disminuyan la proximidad de los valores de presión sonora con respecto al valor promedio. Lo anterior contrasta con el hecho de que los valores de presión sonora promedio en ambos volúmenes no presentan una variación significativa, pero la desviación estándar en cada caso si revela un cambio notorio por lo

cual se entiende que el volumen dos a generado una linealidad menor en la RF de la geometría.

Como ya se mencionó, resulta interesante ver que el nivel de presión sonora medio no muestra una variación significativa aun cuando lo valores de los descriptores estadísticos si generan un cambio notorio; en cuanto al rango en el que se distribuyen los niveles de presión sonora, se evidencia un aumento de este valor con el cambio de volumen, lo mismo ocurre con el coeficiente de asimetría, lo que significa que con el cambio de volumen, el nivel de significancia de los picos en la respuesta en frecuencia aumentó generando también el aumento del rango. Esto también da un indicio a los autores de que el cambio de volumen ha propiciado la no linealidad en la RF de la bocina. En ambos casos, se evidencia que los máximos valores de presión sonora son alcanzados alrededor de las bandas de frecuencia comprendidas entre 80 Hz y 120 Hz, específicamente en las frecuencias 116 Hz para el primer volumen y 97 Hz para el segundo volumen. En el grafico 5-4 es posible apreciar las principales diferencias en cuanto a la respuesta en frecuencia del volumen 1 y 2 en color rojo y verde respectivamente. En el rango comprendido entre 40 Hz y 100 Hz se puede observar que los niveles de presión sonora emitidos por la bocina con el volumen 2 son mayores a los niveles del volumen 1, luego de este rango se presenta el caso contrario hasta la banda de 315 Hz. Para ambos casos se presenta un bache en la frecuencia cercana a 45 Hz y un aumento significativo del SPL en la frecuencia cercana a 36 Hz.

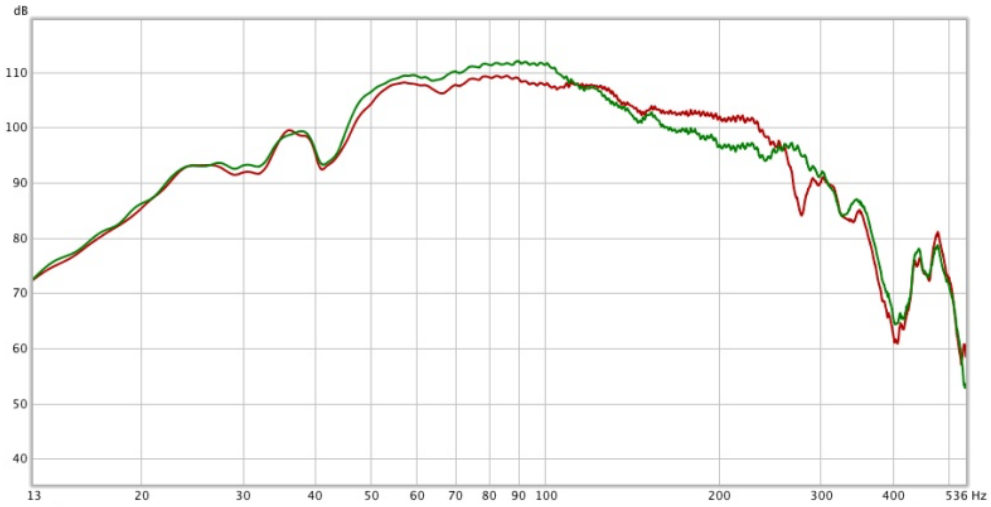
Al realizar la misma observación centrándose en el rango de frecuencias comprendido entre 40 Hz y 315 Hz, tabla 5-2, el estudio revela que hay un aumento en los descriptores correspondientes al valor promedio, la desviación estándar y el rango. Es de tener en cuenta que el aumento del valor promedio de presión sonora en esta sección[4] genera un nuevo punto de referencia en los demás descriptores, la cantidad de frecuencias consideradas para el cálculo es menor, y la variabilidad se estudia únicamente en dicha sección del rango de operación, sin embargo el patrón observado en el rango completo persiste en todos los descriptores, es decir, el volumen 2 sigue demostrando valores en los descriptores mayores a los del volumen 1. A partir de esto, la descripción de esta banda media revela que, en el

[4] Dicho aumento se da debido a que no se consideran los valores extremos del rango de operación completo.

caso del coeficiente de asimetría, los niveles valle y pico de la respuesta en frecuencia en esta sección son más uniformes, pero se mantiene el aumento de este descriptor por parte del volumen 2, reiterando la significancia de los niveles pico en esta RF. Por otro lado, en el caso de la desviación estándar, el comportamiento de la banda media demuestra que los valores de presión sonora del volumen 1 se encuentran dispersos con respecto al punto de referencia, al igual que en el volumen 2, que en comparación con el rango completo de operación, presenta una disminución. Por tanto, se observa que el comportamiento no lineal en las RF de cada volumen de la geometría 1 es similar en la banda media. En cuanto al rango, se presenta un aumento de este valor evaluado en la banda media, lo que podría estar relacionado con el cambio en el valor medio o de referencia.

G1	pmid [Pa]	SPLmid [dB]	DE [Pa]	Rango [Pa]	Asimetria
Volumen 1	0,003916871	107,9823853	0,024045541	0,007620257	0,166217973
Volumen 2	0,0043072	108,8075007	0,031015755	0,011305131	0,687029984
Δ	0,000390329	0,825115328	0,006970214	0,003684874	0,520812011

Tabla 5-2 Descriptores estadísticos de las RF de la geometría 1 en la banda de paso.



Gráfica 5-4 Gráfico de respuesta en frecuencia promediada de la geometría 1, volumen 1 en color rojo y volumen 2 en color verde

5.1.2 Geometría 2 Acoplada a la Bocina

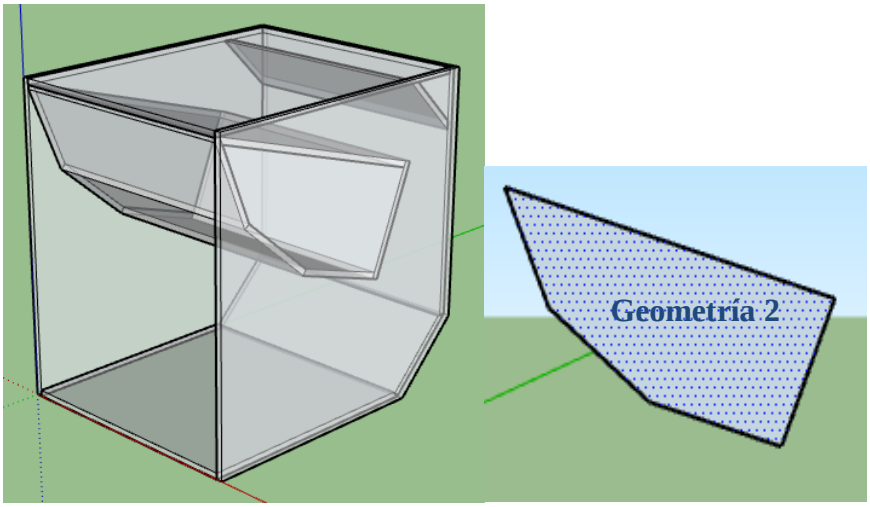


Figura 5-2 geometría 2 acoplada a la bocina

En cuanto a la geometría 2, como se muestra en la tabla 5-3, se evidencia un valor de deviación estándar significativo con respecto al valor promedio de presión sonora. Nuevamente se hace la aclaración de que este indicador sugiere que los valores de presión sonora emitidos por la bocina con la geometría 2 acoplada, varían significativamente con respecto al valor medio de la RF. El rango de operación en Pa de ambos volúmenes es cercano a 0,006 Pa y el coeficiente de asimetría para ambos volúmenes es un valor cercano a 1 positivo; esto significa que existe una tendencia por parte de los valores de presión sonora a ubicarse por encima del valor medio, lo que indica que existe un nivel de significancia mucho mayor por parte de los picos de la RF. En cualquier caso, se demuestra que los valores de presión sonora no se encuentran uniformemente distribuidos con respecto a la presión sonora promedio. En la tabla también se hace evidente que no hay una variación significativa entre los descriptores de la RF de cada volumen acoplado a la bocina, sin embargo, el volumen 2 demuestra una disminución en los valores de cada descriptor a excepción del nivel de presión sonora medio que tuvo un aumento.

G2	pmid [Pa]	SPLmid [dB]	DE [Pa]	Rango [Pa]	Asimetría
Volumen 1	0,001392306	98,99829044	0,018755096	0,007303589	1,455736719
Volumen 2	0,001412846	99,12549616	0,018688109	0,006880982	1,236474532
Δ	2,05405E-05	0,127205719	-6,69876E-05	-0,000422608	-0,219262187

Tabla 5-3 Descriptores estadísticos de las RF de la geometría 2.

Al realizar el análisis de los descriptores en el rango de frecuencias comprendido entre 40 Hz y 315 Hz, se detalla con mayor facilidad que no hay cambios significativos entre las RF de cada volumen, la desviación estándar continúa siendo significativa, lo que se comprueba al aplicar la ecuación 30 tomando como referencia el valor de presión sonora promedio de cada volumen en comparación con el valor de desviación estándar. Al realizar dicha comparación se obtiene el valor de la desviación expresada en dB que corresponde a un valor cercano a 17 dB en ambos casos. El rango para ambos volúmenes presenta un valor cercano a 0,012 Pa y la mayor variación se evidencia en el coeficiente de asimetría, el cual revela que la significancia de los niveles pico de la RF en este rango de frecuencias sigue siendo significativa, pero es más uniforme con respecto al valor de referencia. Los valores descriptores de la RF en la banda media se presentan a continuación en la tabla 5-4.

G2	pmid [Pa]	SPLmid [dB]	DE [Pa]	Rango [Pa]	Asimetria
Volumen 1	0,003802479	107,7249351	0,029733922	0,012852838	0,952005668
Volumen 2	0,003847583	107,8273588	0,029541569	0,012099425	0,65545428
Δ	4,51041E-05	0,102423669	-0,000192353	-0,000753413	-0,296551388

Tabla 5-4 Descriptores estadísticos de las RF de la geometría 2 en la banda de paso.

A partir del grafico 5-5, en donde se muestran las respuestas en frecuencia de los dos volúmenes de la geometría 2, azul y rosado respectivamente, se hace notorio que existe una gran cantidad de picos y valles que definen la RF de la bocina en ambos casos. Al relacionar cada respuesta con los descriptores estadísticos se observa que, en el caso del coeficiente de asimetría describe la predominancia de los picos con respecto a los valores más bajos de presión sonora y, la diferencia entre este coeficiente para cada volumen puede estar relacionada con la disminución de estos picos, tanto positivos como negativos con respecto al valor medio. Nuevamente se ve en la gráfica un aumento en el nivel de presión sonora cercano a la frecuencia de 36 Hz y un bache en la frecuencia de 45 Hz. Los valores máximos de presión sonora emitidos por la bocina se encuentran en las frecuencias 123 Hz y 116 Hz en correspondencia al volumen 1 y volumen 2 respectivamente.

Gráfica 5-5 Grafico de respuesta en frecuencia promediada de la geometría 2, volumen 1 en color azul y volumen 2 en color morado

5.1.3 Geometría 3 Acoplada a la Bocina

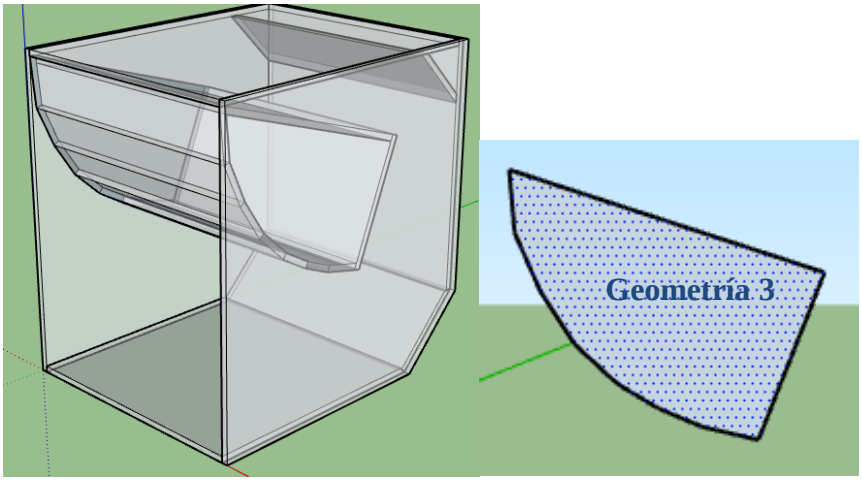


Figura 5-3 geometría 3 acoplada a la bocina

Los valores de los descriptores de la geometría 3 para cada volumen se muestran en la tabla 5-5. Esta geometría muestra los valores de desviación estándar más significativos en comparación con las otras dos geometrías, con lo cual se observa que la dispersión de los datos es mayor en este caso. Al comparar el nivel de desviación estándar con respecto al nivel de presión sonora medio, a partir de la ecuación 30, se hace más clara la interpretación de este descriptor ya que da entender que en cuanto a los niveles de presión sonora registrados, la tendencia de dispersión es de alrededor de 21 dB, es decir que cada frecuencia podría estar variando con respecto al nivel de presión sonora medio, alrededor de este último valor. El coeficiente de asimetría muestra en ambos casos una distribución

positiva de los valores con respecto a el valor de presión sonora medio, el rango en ambos casos es muy similar con un valor de 0,009 y se puede apreciar un pequeño aumento en el nivel de presión sonora medio del volumen 2. La variación de estos descriptores entre los volúmenes no es significativa siendo la geometría que más constante permaneció con respecto a la respuesta en frecuencia.

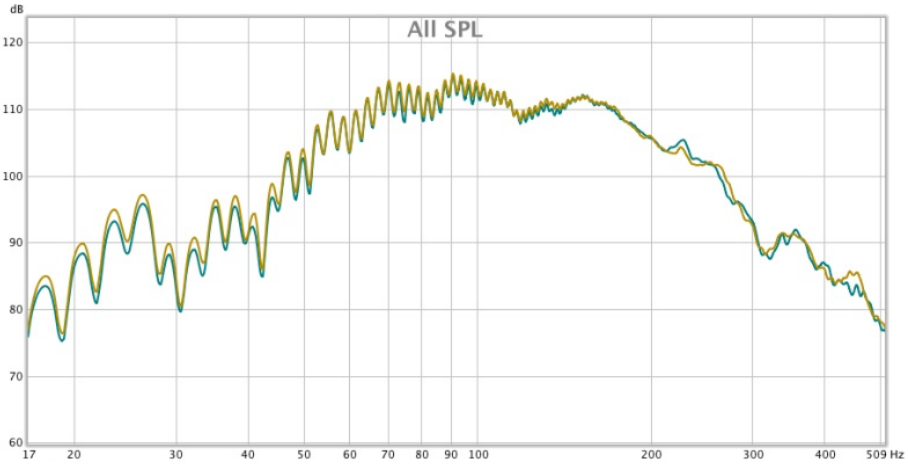
G3	pmid [Pa]	SPLmid [dB]	DE [Pa]	Rango [Pa]	Asimetria
Volumen 1	0,002164985	102,8326965	0,026571626	0,009903533	1,142190145
Volumen 2	0,002268893	103,2398781	0,027944641	0,00988241	1,140618465
Δ	0,000103908	0,407181573	0,001373015	-2,11228E-05	-0,00157168

Tabla 5-5 Descriptores estadísticos de las RF de la geometría 3.

Al centrar la atención en el rango de frecuencias comprendido entre 40 Hz y 315 Hz, es posible corroborar la información ya que la diferencia entre ambos volúmenes sigue siendo despreciable en cada descriptor. La desviación estándar es de alrededor de 16 dB con respecto al nivel de presión sonora medio, el rango es cercano a un valor de 0,01 y el coeficiente de asimetría en ambos casos describe un nivel de significancia positivo con respecto al valor medio de presión sonora, así se muestra en la tabla 5-6.

G3	pmid [Pa]	SPLmid [dB]	DE [Pa]	Rango [Pa]	Asimetria
Volumen 1	0,005922045	111,5730334	0,040941836	0,01753651	0,660935056
Volumen 2	0,006201156	111,9730524	0,043139483	0,017510583	0,645339333
Δ	0,000279111	0,400019012	0,002197647	-2,59278E-05	-0,015595723

Tabla 5-6 Descriptores estadísticos de las RF de la geometría 3 en la banda de paso



Gráfica 5-6 Grafico de respuesta en frecuencia promediada de la geometría 3, volumen 1 en color amarillo y volumen 2 en color verde. A este grafico se le ha aplicado un suavizado de 1/48.

Al referirse al grafico 5-6 es posible observar la actividad modal de la RF y su distribución a lo largo de toda la respuesta en frecuencia, evento que ocurre en ambos volúmenes representados en color verde para el volumen 1 y amarillo para el volumen 2. La respuesta ha sido suavizada (1/48) para lograr diferenciar cada volumen. Nuevamente es notoria una tendencia en el aumento de nivel de presión sonora cerca de la frecuencia de 36 Hz y un bache cercano a 45 Hz. Los niveles en ambas RF son casi iguales lo que confirma la información expuesta por los descriptores.

5.1.4 Variación Volumétrica

A continuación, se exponen las diferencias entre los descriptores estadísticos de la respuesta en frecuencia de cada geometría en comparación. Para estos resultados el volumen permanece constante y se compara cada geometría. El coeficiente de correlación de Pearson entra a demostrar cómo es que la geometría si podría tener afectación sobre las respuestas en frecuencia, debido a que si dicho factor no tuviera una influencia significativa, el valor que asume dicha correlación debe ser mayor a 0,95 (Fernández Fernández , Cordero Sanchez , & Córdoba Lago, 2002) lo que indicaría que a pesar del cambio de geometría, la RF es la misma.

VOL 1	DELTASPL	DIFERENCIA DE DESVIACIÓN ESTANDAR	DIFERENCIA DE RANGO	COEFICIENTE DE CORRELACION DE PEARSON	DIFERENCIA DE COEFICIENTE DE ASIMETRIA
CAJA1 - 2	-0,318303888	0,017238082	4,408549263	0,882907405	0,691564538
CAJA 1 - 3	3,516102151	0,025054612	7,053625397	0,831217684	0,378017964
CAJA 2 - 3	3,834406039	0,00781653	2,645076134	0,817233714	-0,313546574

Tabla 5-7 Diferencias de los descriptores estadísticos comparando cada geometría en para el volumen 1

Teniendo en cuenta las tres geometrías con el volumen 1, es posible apreciar algunas diferencias entre cada respuesta en frecuencia y entre los descriptores estadísticos. En primer lugar, se puede apreciar que la diferencia de nivel de presión sonora medio presenta una variación de 3 dB en la geometría 3. En contraste con el grafico 5-1 esta geometría es la que presenta la RF con los niveles de presión sonora más elevados. También se hace

evidente que esta diferencia no es muy significativa en el caso de la geometría 1 y 2. Respecto a la desviación estándar, se generan las mayores diferencias al comparar la geometría 1 con las otras dos. Estas diferencias son positivas lo que sugiere que la dispersión de los datos aumenta con el cambio de la geometría. La menor diferencia se registra entre la caja 2 y 3 lo que sugiere que la desviación en ambas geometrías es similar; por el contrario la mayor diferencia se presenta en la geometría 1 y 3. La diferencia de rango, expresada en dB para mayor claridad a partir de la ecuación 30, sigue el patrón de la desviación estándar presentando la mayor diferencia de rangos entre la geometría 1 y la geometría 3, esto puede verse relacionado con el aumento de la desviación de los datos con respecto al valor medio que presenta la geometría 3 y 1. Ocurre lo mismo con las otras dos comparaciones, es decir que en ambos casos el rango representó un aumento, lo cual sugiere a los autores que la dispersión de los datos aumento debido al cambio de la geometría.

El coeficiente de correlación de Pearson determina la relación lineal entre dos grupos de valores. Para este volumen, la correlación de las RF es muy similar en las tres comparaciones, si este valor tiende a uno significa que existe una correlación muy fuerte de los datos, con lo cual se deduce la linealidad y dependencia entre las variables. En el caso contrario indicaría que las variables son completamente independientes y no se relacionan entre sí. Para el análisis de esta situación, al relacionar las RF, un valor bajo de correlación sugeriría que la respuesta de la bocina es fuertemente afectada por la geometría, ya que, al no correlacionarse ambas RF, se entiende que la influencia de esta variable sobre la RF es suficiente para generar diferencias significativas. Para este caso, cada comparación muestra un valor de 0,8 es decir que están correlacionadas, sin embargo, este valor es suficiente para sugerir a los autores que el cambio de geometría genera cambios en la RF puesto que al realizar el análisis entre el volumen 1 y 2 de cada geometría, los valores de correlación son cercanos a 0,98. Esto significa que al cambiar el volumen en cada geometría, la RF es prácticamente la misma sugiriendo así, que el cambio de volumen no resulta significativo para la RF. Por último, la diferencia de los coeficientes de asimetría muestra que con respecto a la geometría 1 los picos son más significativos en las otras dos geometrías. Comparando la geometría 2 y 3 se deduce que son más significativos los picos de la

geometría 2 lo que revela que esta geometría presenta la distribución menos uniforme entre las tres.

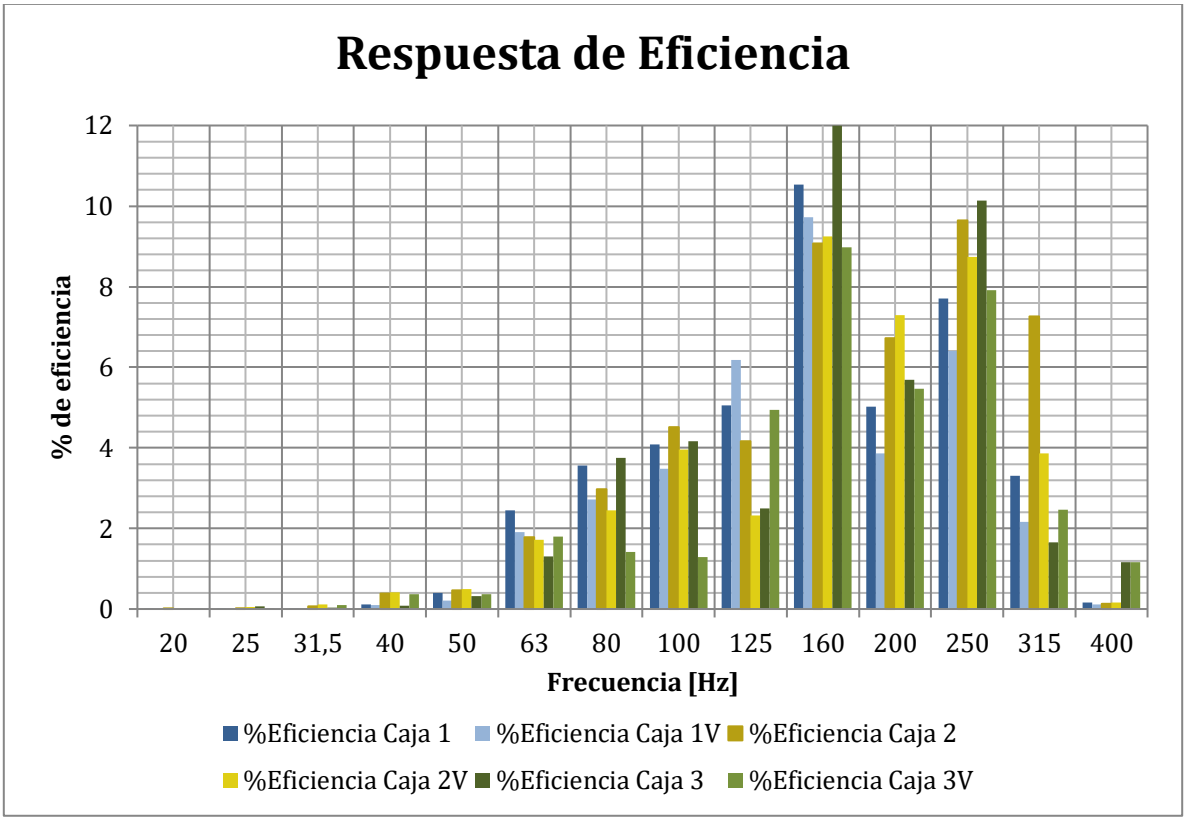
Con respecto al volumen 2, que se aprecia en la tabla 5-8 nuevamente sobresale la geometría 3 en cuanto al nivel de presión sonora medio de su RF en comparación con las otras dos geometrías. En el caso de las cajas 1 y 2 se registra una disminución del SPL en la geometría 2 con respecto a la 1. Por otro lado, a diferencia del volumen 1, la desviación estándar muestra una diminución en la caja 2 y 3 comparadas con la caja 1, lo cual se contrasta en la tabla 5-1 debido a que el valor de desviación aumenta drásticamente con la variación de volumen. Esto indica, que para este volumen existe una mayor dispersión de los datos en la geometría 1, en comparación con las otras dos geometrías. En el caso de la diferencia de rango expresada en dB, para la caja 1 y 2 no existe una diferencia significativa, mientras que la caja 3 revela que el rango en su RF es 3 dB mayor en comparación con las otras dos.

Analizando el coeficiente de correlación de Pearson para este volumen, se hace más evidente lo expuesto anteriormente en el caso de las geometrías 1 y 3, lo que significa que hay una variación notoria entre estas dos RF. En los otros casos este valor se mantiene cercano a 0,8 tal y como ocurre en el volumen 1. La diferencia de coeficientes de asimetría se mantiene baja en los tres casos y la geometría 3 se destaca por presentar los valles más significativos con respecto al valor medio.

VOL 2	DELTASPL	DIFERENCIA DE DESVIACIÓN ESTANDAR	DIFERENCIA DE RANGO	COEFICIENTE DE CORRELACION DE PEARSON	DIFERENCIA DE COEFICIENTE DE ASIMETRIA
CAJA1 - 2	-1,008587007	-0,056447734	0,429719603	0,874188267	0,027428911
CAJA 1 - 3	3,105794886	-0,047191202	3,573969071	0,730707359	-0,068427156
CAJA 2 - 3	4,114381893	0,009256533	3,144249468	0,845389303	-0,095856067

Tabla 5-8 Diferencias de los descriptores estadísticos comparando cada geometría en para el volumen 2

5.2 Descripción del Comportamiento de la Respuesta de Eficiencia



Gráfica 5-7 eficiencia obtenida para cada geometría y volumen

En el grafico 5-7 se muestra los resultados de la eficiencia calculada en las bandas de tercio de octava. La letra 'V' que acompaña algunas de las etiquetas del grafico representa el cambio de volumen de la cavidad es decir el volumen de 106L. De las primeras características notorias de este resultado es el porcentaje de eficiencia de las bandas de 160 Hz y 250 Hz, expuestos en el grafico 5-7, ya que son las bandas que alcanzan los mayores porcentajes cercanos al 10% y 8% respectivamente. Seguidas se encuentran las bandas de 125 Hz y 200 Hz con valores de porcentaje del 5%. A pesar de no ser una respuesta completamente lineal se puede apreciar banda de paso y las frecuencias más favorecidas se encuentran entre el rango de 100 Hz hasta 250 Hz. Para las bandas fuera de este rango también se puede apreciar la eficiencia por debajo del 4% lo cual también es un resultado

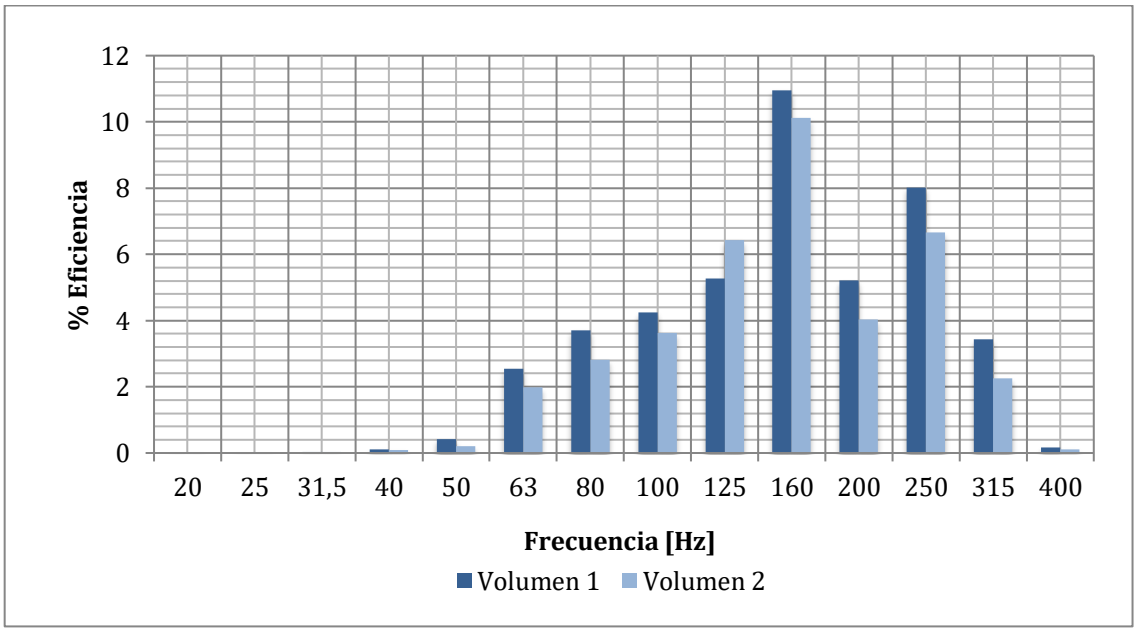
favorable siendo que la eficiencia de estos valores de frecuencia suele estar por debajo del 1% (OLSON, 1940) (D. B. Keele, 1976).

Estas características parecen presentarse en más de una geometría, siendo la frecuencia de 160 Hz la que presenta el porcentaje más alto de eficiencia en todos los casos a excepción de la caja 2 volumen 1 en donde el porcentaje más alto de eficiencia se encuentra en la banda de 250 Hz. Sin embargo, en todos los casos tanto la frecuencia de 160 Hz como la de 250 Hz son las que más resaltan. También es de destacar que en la banda de 200 Hz la eficiencia parece decaer en todos los casos, incluso en la caja 2 volumen 1 que es en donde presenta el porcentaje más alto de eficiencia. Las primeras tres bandas en todos los casos registran los porcentajes de eficiencia más bajos y a partir de la banda de 40 Hz es que se puede apreciar las primeras diferencias entre modelos con respecto a la eficiencia de los mismos. Los casos en los que se presentan lo mayores porcentajes de eficiencia para esta banda son la caja 2 y 3 en ambos volúmenes. La frecuencia de 50 Hz permanece casi constante a excepción de la caja 1 volumen 2 en donde esta banda es casi imperceptible, para 63 Hz la eficiencia permanece por debajo del 2% en las cajas 2 y 3; en la caja 1 es donde se presentan los porcentajes más altos alcanzados por esta banda. La banda de 80 Hz presenta ciertas variaciones en cada caso y estas variaciones no parecen corresponder a alguna dependencia con respecto a la geometría, pero es posible que esta banda haya sido afectada por las variaciones de volumen. La banda de 100 Hz describe un comportamiento similar a la de 80 Hz presentando las mayores variaciones entre los volúmenes. Por último la banda de 400 Hz al igual que las tres primeras bandas, describe valores muy bajos de eficiencia a excepción de la caja 3 en donde se genera un aumento notorio de dicha variable.

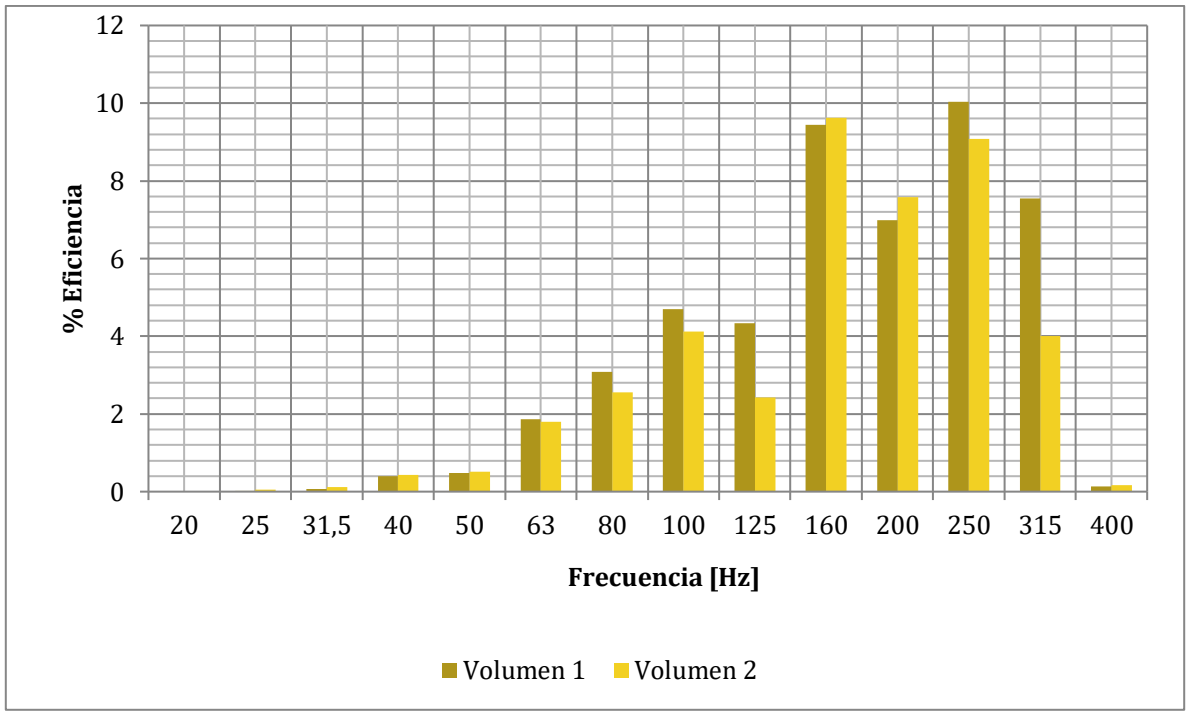
Al realizar el análisis de cada geometría con ambos volúmenes es posible notar que, en las tres geometrías, el cambio de volumen representa una disminución de la eficiencia en todas las bandas. Sin embargo, existen ciertas excepciones en la banda de 125 Hz en las cajas 1 y 3 y en la banda de 315 Hz en la caja 2. Al observar el grafico 5-8.c que corresponde a la eficiencia de la caja 3 volumen 1 y 2, es posible observar los cambios más drásticos de la eficiencia en comparación con las otras dos geometrías. El efecto de variar el volumen en

las geometrías 1 y 2 como ya se mencionó genera una disminución de la eficiencia en la mayoría de las bandas, sin embargo, esta variación se da proporcionalmente en casi todo el rango de frecuencias, a diferencia de la caja 3.

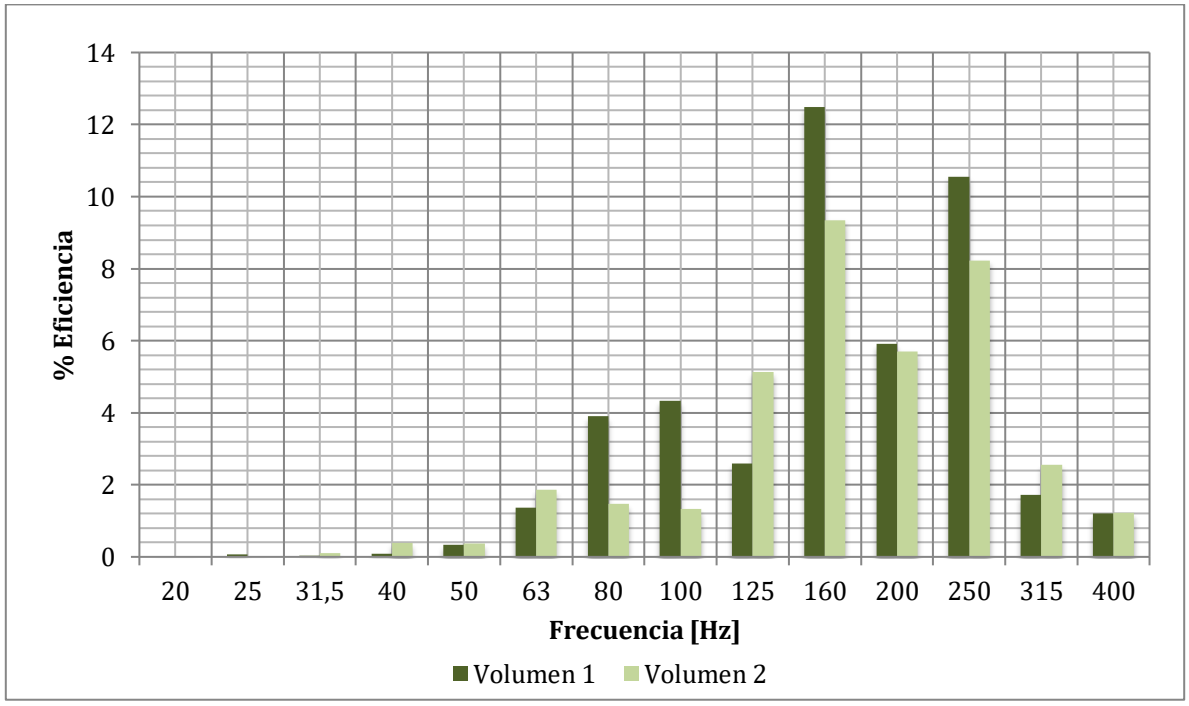
Para apreciar el efecto del volumen sobre el porcentaje de eficiencia se hace uso del grafico 5-8 en donde se relacionan ambos volúmenes de cada geometría. Con ello se reitera el hecho de que el cambio de volumen incurre en una disminución general del porcentaje de eficiencia. También a partir del grafico es posible notar el aumento progresivo del porcentaje de eficiencia en las primeras bandas de frecuencia hasta la banda de 125 Hz, en donde comienzan a presentarse las mayores variaciones, casi conservando la misma forma en las tres geometrías, es decir que las frecuencias protagonistas se comportan de manera similar sin importar el volumen o la geometría.



a)



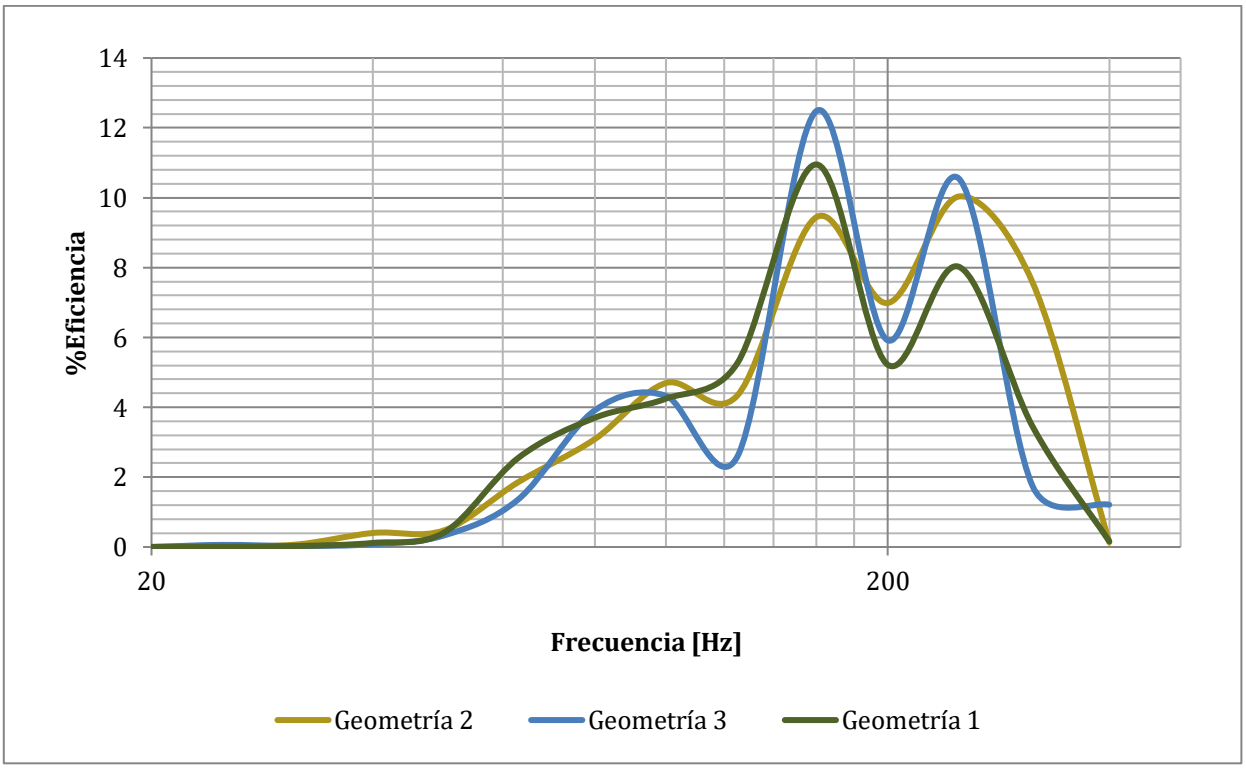
b)



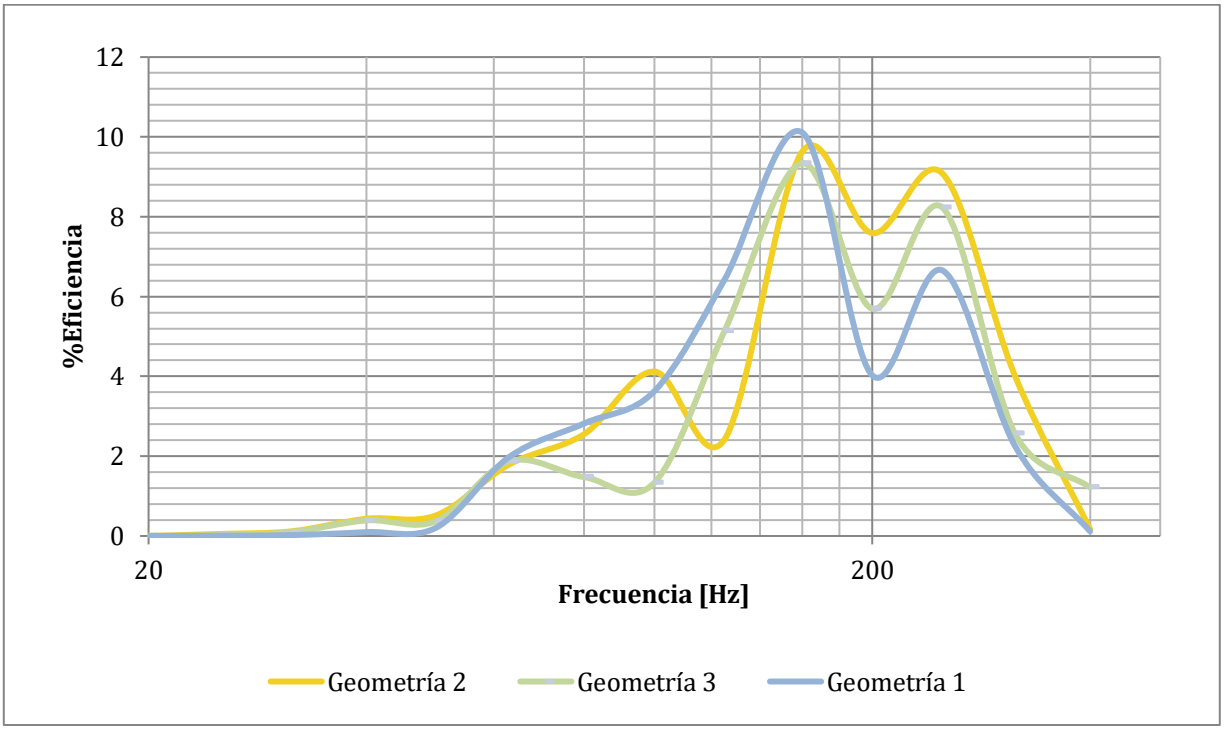
c)

Gráfica 5-8 eficiencia obtenida por cada volumen a)Geometría 1 b)Geometría 2 c)Geometría 3

Haciendo uso de la interpolación generada por el software Excel, con lo cual se presenta una perspectiva alterna que muestra con mayor claridad la variación de la eficiencia para cada geometría; se puede observar en el grafico 5-9 que la distribución de valores entre la geometría 1 y 3 con el volumen 1 es muy similar teniendo en cuenta que los porcentajes no son los mismos. Resulta interesante ver que continúa esta semejanza aun después de variar el volumen, lo cual se evidencia en el grafico 5-9b. A partir de este grafico los autores notan que la variación de volumen podría estar generando cambios en el porcentaje de eficiencia en todas las geometrías, pero no en igual medida en cada una de las bandas, lo que sugiere que la geometría de la caja puede ser determinante al interpretar el cambio de la eficiencia con respecto al volumen. También se evidencia que la geometría también influye en la distribución de los porcentajes de eficiencia en el rango de operación, a pesar de que son las mismas frecuencias las que protagonizan en cada caso, el grafico de interpolación da una idea de que la geometría influye en la eficiencia del dispositivo, siendo que los valores de eficiencia cambian con cada geometría y su distribución también.



a)

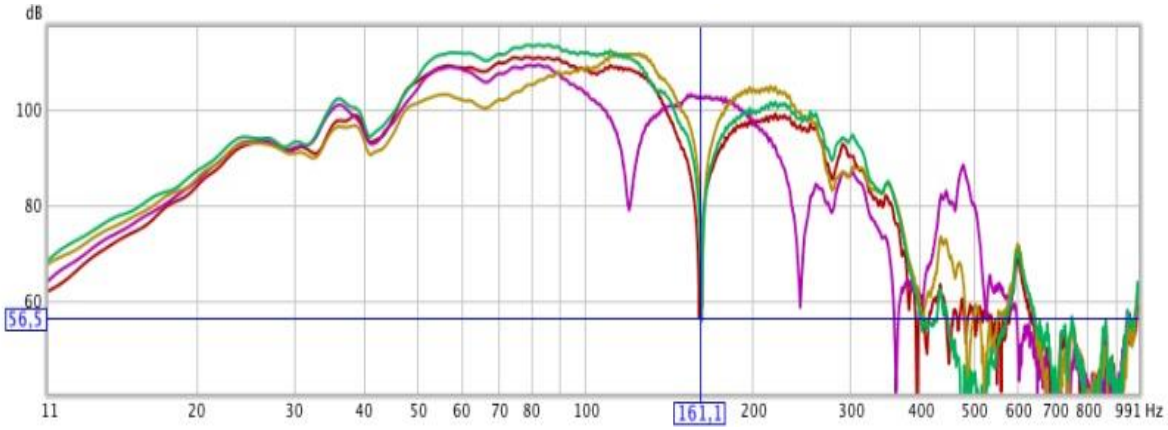


b)

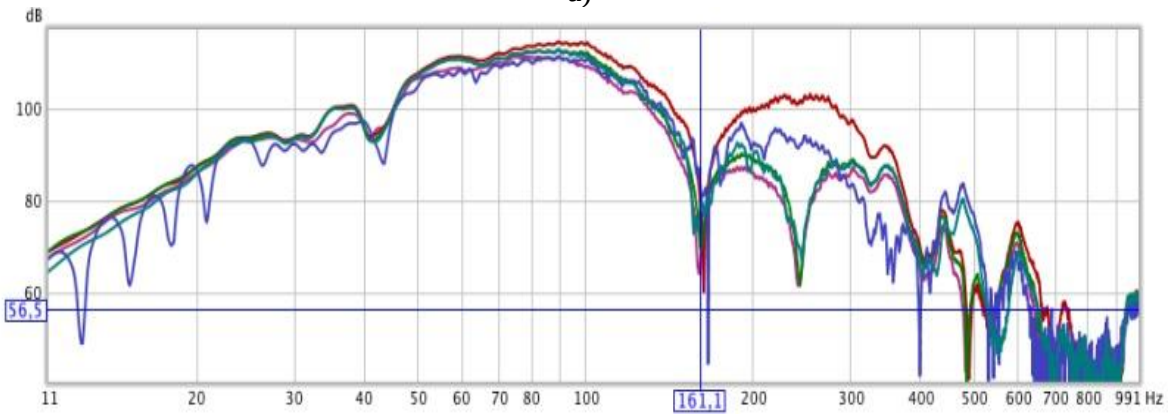
Gráfica 5-9 a y b. Comparación de las tres geometrías para Volumen 1 y 2 respectivamente

5.2.1 Puntos de interés en el análisis grafico de los resultados

En esta sección los autores han querido resaltar algunos puntos sobre el análisis tanto de la eficiencia como de la respuesta en frecuencia en donde se destacan algunos datos que proveen cierta información de interés para los autores. De allí, el nombre que se le ha dado a la sección. A continuación se presenta la respuesta en frecuencia únicamente de la geometría 1, ambos volúmenes, en donde se aprecias ciertas anomalías en comparación con resto de geometrías.



a)

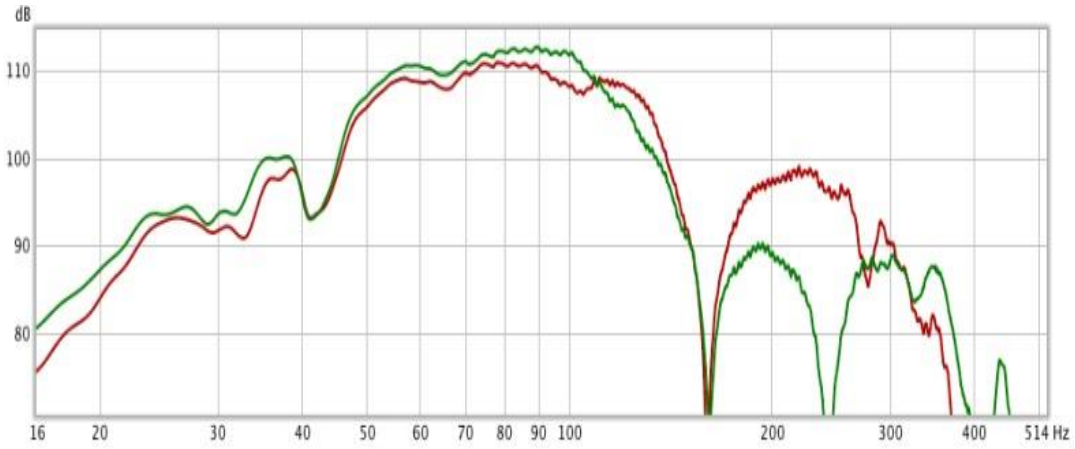


b)

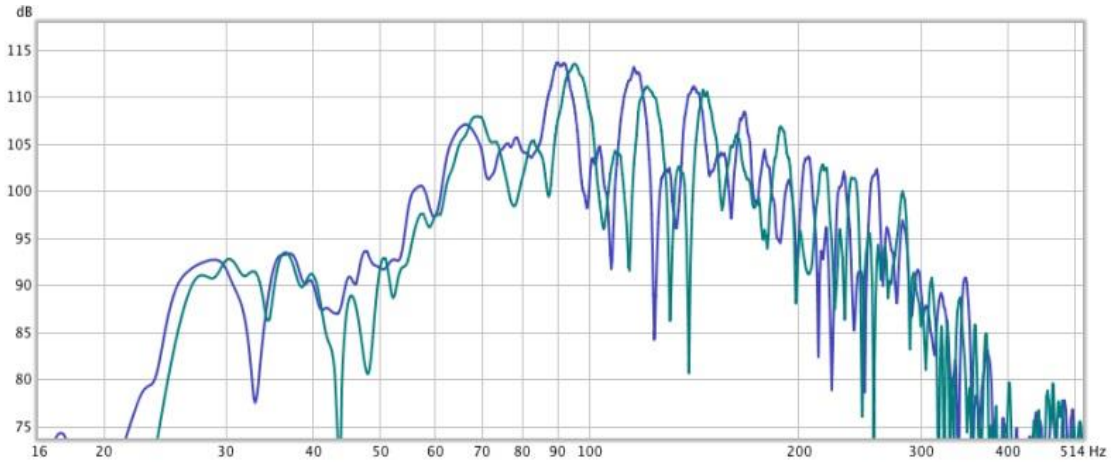
Gráfica 5-10 Respuesta en frecuencia de la caja 1 a) volumen 1 y b) volumen 2 grafica superior e inferior respectivamente, en donde se evidencia una disminución drástica del SPL para la banda de 160 Hz y 250 Hz

Al realizar la observación de los valores de eficiencia y contrastarlos con la respuesta en frecuencia no es del todo claro si es posible relacionar ambas series de datos, al menos gráficamente. Por ejemplo, el protagonismo de la banda de 160 Hz en los gráficos de eficiencia, no se ve representado en la respuesta en frecuencia. Sin embargo, los autores han decidido destacar algunas RF que hicieron parte del proceso de Promediación para obtener las RF usadas durante todo el análisis. Aunque no es preciso afirmar una relación directa si resulta bastante interesante ver como las respuestas en frecuencia que se presentan en el grafico 5-10 muestran ciertas anomalías en frecuencias que podrían estar relacionadas con la respuesta de la eficiencia. En este grafico se muestran las RF de la geometría 1 en donde se puede apreciar en las bandas de 120 Hz, 160 Hz y 250 Hz la disminución drástica del nivel de presión sonora. Al comparar este resultado con los porcentajes de eficiencia de esta misma geometría es posible notar que estas frecuencias, y la forma que adquiere la RF en este rango, coinciden con la respuesta de eficiencia, pero es

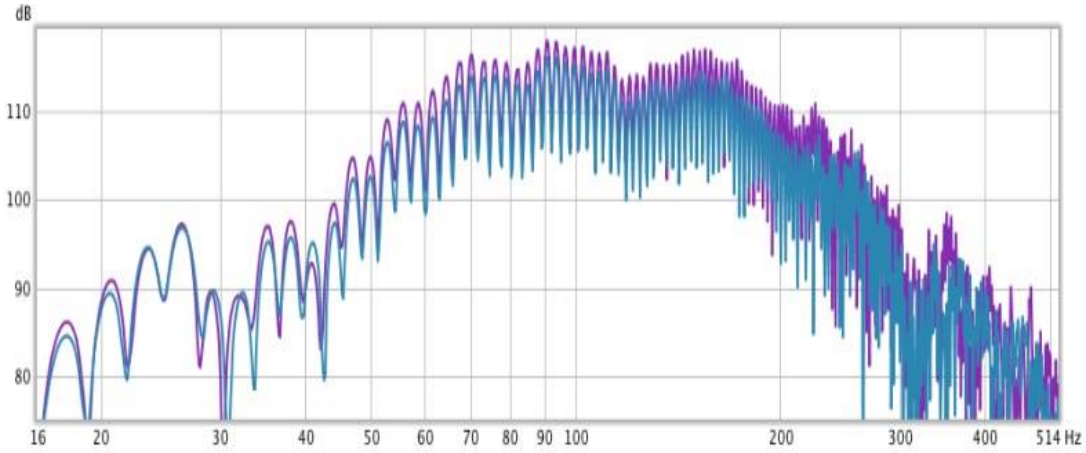
necesario hacer énfasis en que esta correspondencia en las bandas parece mostrar un comportamiento inverso. Esto sugiere a los autores que puede tratarse del comportamiento modal del sistema mostrando variaciones de más de 10 dB en estas bandas de frecuencia. Sin embargo, el estudio realizado por los autores a partir del software ANSYS no muestra un comportamiento modal al menos en la frecuencia de 160 Hz, motivo por el cual este fenómeno puede deberse a la posición del micrófono de medición que dista del altavoz 1m lo que coincide con un medio de la longitud de onda de 160 Hz en donde podría haber un punto mínimo de presión. No obstante, a pesar de que esta distancia se mantuvo constante al cambio de volumen y geometría, es interesante resaltar que dicho comportamiento solo se dio para la geometría 1 en ambos volúmenes. Como se mencionó, estos fueron algunos de los resultados que hicieron parte del promedio de la geometría por lo que debe entenderse que estas anomalías no se presentaron en la totalidad de las mediciones hechas con ambos micrófonos.



a)



b)



c)

Gráfica 5-11 Análisis del cambio de volumen y presencia del material absorbente en a) geometría 1 b) geometría 2 y c) geometría 3

En el grafico 5-11 se puede apreciar las RF de cada geometría comparando ambos volúmenes. Allí se aprecia de manera gráfica la influencia que a tenido el cambio de volumen sobre cada geometría, sin embargo, como se discutió anteriormente, el análisis de los descriptores estadísticos no permite generar alguna relación directa entre la variación del volumen y la RF del sistema. Es interesante observar que en la geometría 1 la RF con el cambio de volumen parece aumentar el nivel de presión sonora general de la respuesta en frecuencia, persiste el bache en la frecuencia de 160 Hz. En la geometría 2 la respuesta en frecuencia parece haberse desplazado hacia la derecha con la variación de volumen, conservando casi los mismos valores pico en ambas RF. En cuanto a la geometría 3, algunos de los rasgos que más llamó la atención fue la distribución modal homogénea a lo largo de todo el rango de frecuencia, lo cual puede estar relacionado con la curvatura de esta geometría. Al minimizar el paralelismo de las superficies se distribuye de una manera diferente la energía al interior de la cavidad lo cual podría explicar el comportamiento de esta RF. Además de esto se aprecia también como el cambio de volumen para esta geometría disminuye el nivel de presión sonora de toda la respuesta.

Otro de los aspectos a tener en cuenta son las frecuencias cercanas a 36 Hz y 45 Hz en donde se evidencia un aumento y disminución respectivamente del nivel de presión sonora. Este rasgo para los autores está relacionado con los parámetros de diseño escogidos y

expuestos en la sección 4.4, además de la teoría allí discutida. Se recuerda al lector que la frecuencia de corte escogida para la bocina fue 36 Hz que coincide con la frecuencia de resonancia que el fabricante del altavoz muestra en las especificaciones. La razón de esto es que se deseaba obtener el rango de operación que más frecuencias bajas abarcara. Según la teoría esta frecuencia procurada por la superficie de la garganta es en donde la parte real de la impedancia de radiación del altavoz se iguala con la parte real de la impedancia de radiación de la bocina dando inicio a la radiación efectiva del rango de operación en frecuencia. Por otro lado, en las frecuencias cercanas a 45 Hz es en donde ocurre la anulación de la reactancia debida al volumen de la cavidad diseñado por los parámetros TS del altavoz. La explicación de esto es que el sistema acoplado usa la reactancia capacitiva generada en conjunto por la suspensión del altavoz y la cavidad trasera para compensar la reactancia inductiva de la masa de la garganta disminuyendo la masa acústica generada en la garganta de la bocina y a su vez propiciando el aumento de la eficiencia en las frecuencias cercanas a la frecuencia de corte de la guía de onda lo que termina de explicar el comportamiento de la RF en esta zona de frecuencia.

También vale la pena resaltar la banda de 200 Hz que en las respuestas de eficiencia representó un bache en todos los resultados obtenidos. Al observar la longitud de onda de esta frecuencia los autores se percatan de que los puntos máximos que recaen sobre ¼ de la longitud corresponden a aproximadamente 40 cm para las frecuencias cercanas a 200 Hz. Una de las dimensiones de la cavidad trasera corresponde a 80 cm, es decir el doble de ¼ de la longitud de onda de la frecuencia de 200 Hz. La interpretación que los autores le dan a este resultado es que por la posición del altavoz dentro de la caja se pudo haber generado una onda estacionaria que generara un modo acústico al interior reduciendo significativamente la eficiencia en todas las frecuencias cercanas a 200 Hz. Se realiza el mismo análisis para la banda de 160 Hz cuyo cuarto de longitud de onda es aproximadamente 50 cm lo que sugiere que podría haber una relación entre las dimensiones de la caja y la longitud de onda asociada a estas frecuencias.

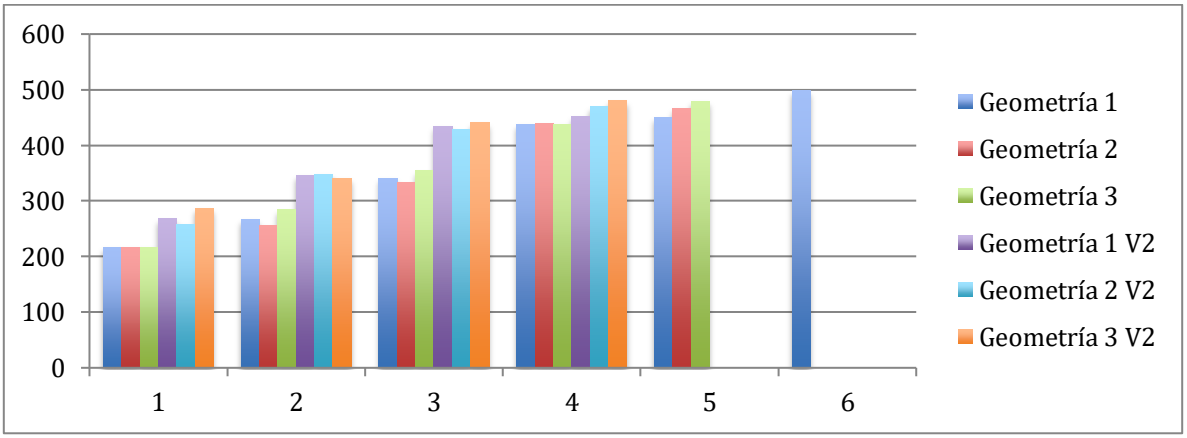
5.3 Análisis Modal

Este análisis revelo que no existe actividad modal para la cavidad interior por debajo de 200 Hz. La simulación muestra la existencia de cinco modos para el volumen 1 en cada geometría y cuatro modos para el volumen 2 en cada geometría. Así se muestra en la tabla 5-9, en la que se relacionan las frecuencias sobre las que se genera dicha actividad modal.

Modo	Volumen 1			Volumen 2			
	Geometría 1	Geometría 2	Geometría 3	Geometría 1	Geometría 2	Geometría 3	
1	216,07	216,36	216,12	268,04	257,27	286,19	Frecuencia [Hz]
2	266,68	255,84	284,14	345,85	346,83	340,63	
3	340,67	332,47	354,38	433,72	427,63	440,69	
4	438,17	438,56	438,32	451,49	469,48	479,85	
5	450,55	467,07	478,49				
6	498,46						

Tabla 5-9 actividad modal

La distribución modal que se muestra en la tabla revela que los primeros tres modos de vibración están distanciados al menos un tercio de octava entre cada uno, y se resalta que estos primeros tres modos se ubica muy cerca de las frecuencias centrales de las bandas de tercio de octava. Allí se ve que la actividad modal por encima de 400 Hz tiene una distribución menos homogénea presentando proximidad entre estos lo cual puede contrastarse con la gráfica 5-12 de distribución modal.



Gráfica 5-12 distribución modal

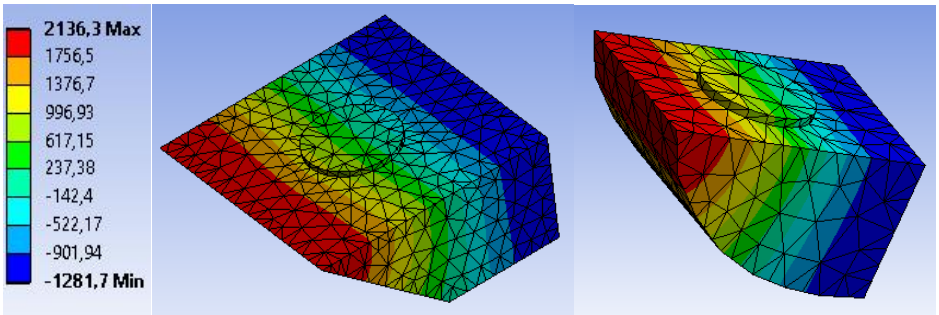


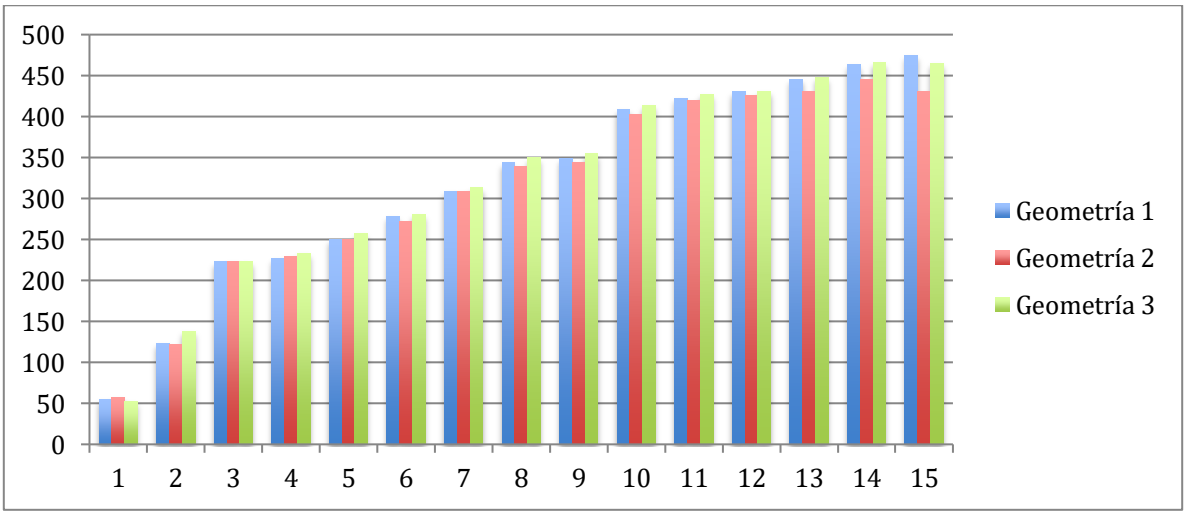
Figura 5-4 simulación de actividad modal en las cavidades

La figura 5-4 aportada por el software de simulación muestra que, para la banda de 250 Hz, en donde todas las geometrías y volúmenes muestran actividad modal, los puntos máximos y mínimos de presión se ubican en los extremos frontal y trasero de la cavidad, sin embargo, cerca de la superficie de radiación la presión sonora no genera variaciones significativas a causa de la actividad modal. Para el caso de la guía de onda, la variación se da únicamente en la geometría ya que el cambio de volumen no altera la forma física de esta, por tanto, en la tabla 5-10 se consigna el resultado de la simulación de modos acústicos.

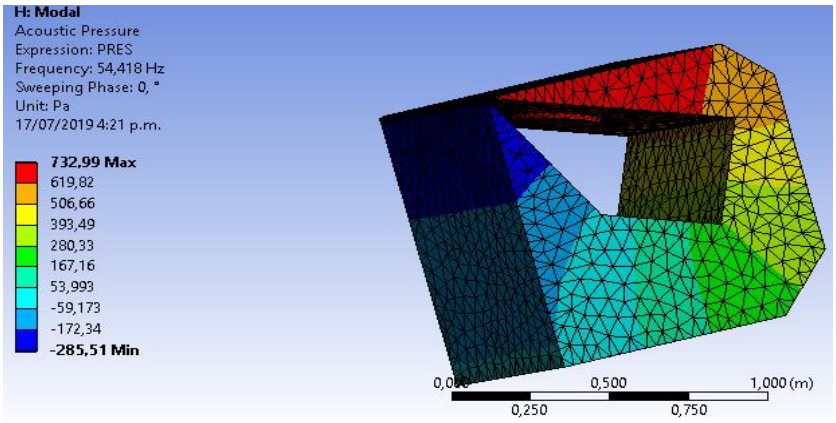
Modo	Geometría 1	Geometría 2	Geometría 3	
1	54,418	57,525	52,635	**Frecuencia [Hz]**
2	122,97	121,69	138,25	
3	222,56	223,35	222,76	
4	226,96	229,15	233,2	
5	249,42	249,79	257,4	
6	278,06	271,64	280,59	
7	308,05	309	313,16	
8	343,63	339,15	349,7	
9	348,71	343,73	354,43	
10	408,73	402,58	413,94	
11	422,64	419,58	427,12	
12	430,47	425,54	431	
13	445,84	430,442	448	
14	463,41	445,7	465,7	
15	474,37	431,08	464,35	

Tabla 5-10 simulación de modos acústicos

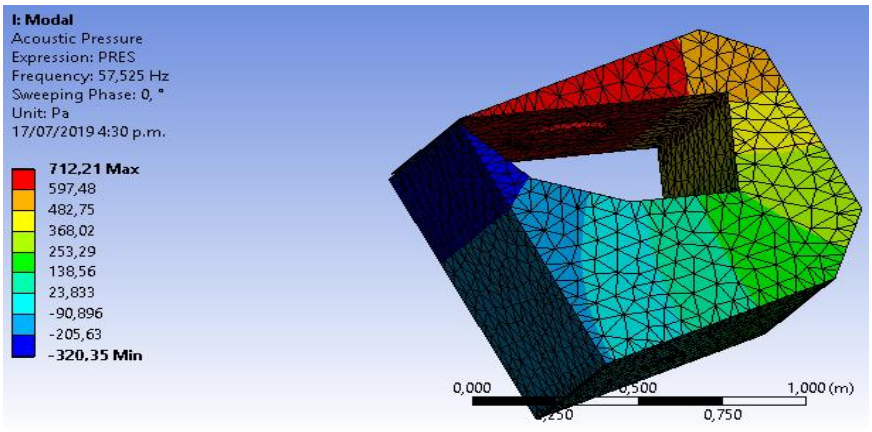
A diferencia de la cavidad trasera, el comportamiento modal no presenta una distribución uniforme. En las bandas de 200 Hz y 250 Hz se podrían presentar problemas modales debido a la proximidad entre las frecuencias sobre las que se ubican los modos. Igualmente ocurre con la banda de 315 Hz, específicamente en las frecuencias cercanas a 340 Hz. En la gráfica 5-13 se observa la distribución modal de las tres geometrías, a partir de la cual los autores observan que el cambio de geometría definitivamente hace variar la distribución de energía al interior de la guía de onda. La geometría tres se destaca por presentar las mayores variaciones entre los modelos dando la impresión de que toda la actividad modal sufrió un aumento en frecuencia de sus modos. Se evidencia un problema modal cerca a la frecuencia de 243 Hz y 220 Hz. En la figura 5-5 se presenta el comportamiento del modo ubicado en 54 Hz. Allí se ve que existe una zona de variación significativa en la garganta.



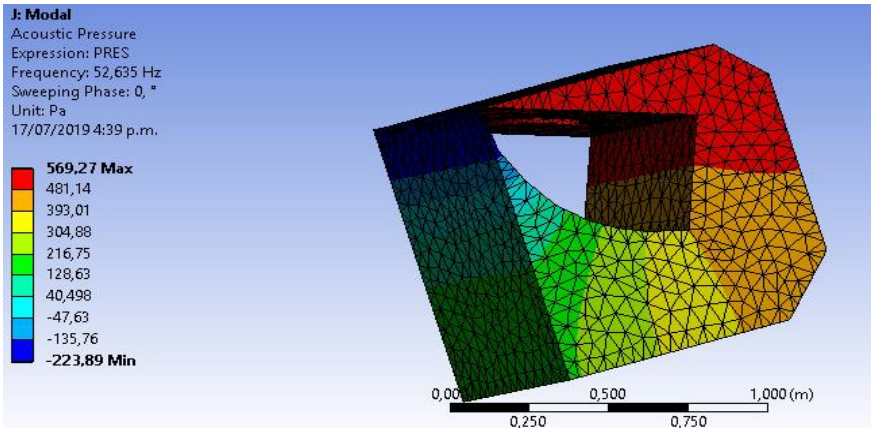
Gráfica 5-13 distribución modal por geometrías



a)



b)



c)

Figura 5-5 comportamiento modal en simulación a) geometría 1 b) geometría 2 y c) geometría 3

A partir del proceso de simulación, los resultados obtenidos revelan que el comportamiento modal varia con respecto a la geometría, sin embargo, no es posible determinar a partir de este proceso, si la influencia de la geometría y el volumen, sobre los modos acústicos, interviene directamente en los resultados obtenidos. Esto se debe a que la variación en el comportamiento modal, tanto en la cavidad trasera como en la guía de onda, no es significativa por lo que la información más relevante que aporta este análisis recae únicamente en los problemas modales que se presentan en la guía de onda cerca de las bandas de 200 Hz, 250 Hz y 315 Hz.

5.4 Factores de Variación y Resultados

A partir de lo expuesto, para los autores existen diferentes indicios generados por todo el proceso de medición y sus resultados, que sugieren una relación entre las variables bajo estudio; las poblaciones de datos para el calculo de el ANOVA en los siguientes casos de análisis se muestran en el Anexo I. En principio la linealidad de las respuestas en frecuencia de cada geometría varió, esta observación se dio a partir de los descriptores estadísticos de la RF. Aun sin contemplar la manera en que afecta la geometría tanto a la RF como a la eficiencia, se observó a partir de los gráficos presentados y el análisis estadístico, la variabilidad de los datos expuestos a cada tratamiento. Gracias al análisis correlacional es posible comprobarlo a partir del análisis de la varianza con un solo factor, también conocido como ANOVA. Este análisis permite establecer si existe o no relación entre agrupaciones de datos que pueden depender de varios factores. Adicionalmente se realiza de forma paralela el test de Levene que termina de comprobar el resultado obtenido a partir del estudio de variabilidad de las respuestas en frecuencia de cada caso. Se presenta en la tabla 5-11 los resultados del ANOVA y test de Levene aplicado a las seis poblaciones de datos que en este caso corresponden a las RF de cada caso bajo estudio.

	FUENTE DE LAS VARIACIONES	SUMA DE CUADRADOS (SC)	GRADOS DE LIBERTAD (gl)	MEDIA DE LOS CUADRADOS (CM)	F	VALOR CRITICO
RF	ENTRE GRUPOS	8,81753E-05	5	1,76351E-05	4,12393589	2,1
	INTRA GRUPOS	0,002822337	660	4,27627E-06		
	TOTAL	0,002910512	665			

LEVENE Estadístico	LEVENE P-Value	LEVENE Valor Critico (Sig 0,05)	LEVENE Grados de Libertad (gl)	
5,193437533	0,000110009	2,227556295	5	**RF**
			666	

Tabla 5-11 Anova de todas las poblaciones bajo estudio. Test de levene aplicado a todas las poblaciones

Como se observa en el ANOVA, el factor F es mayor al valor crítico, por lo cual se rechaza la hipótesis nula que siguiere que todas las muestras son independientes, y se acepta la hipótesis alterna en la que se acepta que existe relación entre los grupos poblacionales y los factores de variabilidad. Sin embargo, es preciso implementar este análisis a cada factor de

variabilidad por separado para así poder determinar su influencia sobre la varianza de los datos. En la tabla 5-12 y 5-13 se presenta el ANOVA de las RF de cada geometría conservando un único volumen. Adicionalmente el test de levene comprueba la homogeneidad de las variaciones y la relación que existe entre estas, esto se interpreta debido a que el Valor-P es menor a el nivel de significancia que para este análisis fue igual a 0,05.

RFV1	FUENTE DE LAS VARIACIONES	SUMA DE CUADRADOS (SC)	GRADOS DE LIBERTAD (gl)	MEDIA DE LOS CUADRADOS (CM)	F	VALOR CRITICO
	ENTRE GRUPOS	4,14088E-05	2	2,07044E-05	5,228215506	3,05
	INTRA GRUPOS	0,001306843	330	3,96013E-06		
	TOTAL	0,001348252	332			

LEVENE Estadistico	LEVENE P-Value	LEVENE Valor Critico (Sig 0,05)	LEVENE Grados de Linertad (gl)	**RFV1**
6,941377912	0,001113124	3,022844822	2	
			333	

Tabla 5-12 Anova de las tres geometrías conservando el volumen 1 . Test de levene aplicado a las tres geometrías volumen1

RFV2	FUENTE DE LAS VARIACIONES	SUMA DE CUADRADOS (SC)	GRADOS DE LIBERTAD (gl)	MEDIA DE LOS CUADRADOS (CM)	F	VALOR CRITICO
	ENTRE GRUPOS	4,54478E-05	2	2,27239E-05	4,948145907	3,05
	INTRA GRUPOS	0,001515494	330	4,59241E-06		
	TOTAL	0,001560942	332			

LEVENE Estadístico	LEVENE P-Value	LEVENE Valor Critico (Sig 0,05)	LEVENE Grados de Libertad (gl)	**RFV2**
5,950840627	0,002888654	3,022844822	2	
			333	

Tabla 5-13 Anova de las tres geometrías conservando el volumen 2 . Test de levene aplicado a las tres geometrías volumen 2

En ambas tablas se puede observar un resultado similar al del análisis realizado sobre las seis RF, es decir que para las tres geometrías se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna que sugiere la relación entre las RF y el factor de varianza que es la geometría. A continuación, se realiza el mismo proceso de análisis, pero esta vez efectuado en cada volumen, siendo este el factor de varianza y conservando la misma geometría, los resultados se registran las tablas 5-14 a 5-16.

RFG1	FUENTE DE LAS VARIACIONES	SUMA DE CUADRADOS (SC)	GRADOS DE LIBERTAD (gl)	MEDIA DE LOS CUADRADOS (CM)	F	VALOR CRITICO
	ENTRE GRUPOS	1,12752E-06	1	1,12752E-06	0,38270819	3,88
	INTRA GRUPOS	0,000648153	220	2,94615E-06		
	TOTAL	0,00064928	221			

Tabla 5-14 ANOVA aplicado a ambos volúmenes de la geometría 1

RFG2	FUENTE DE LAS VARIACIONES	SUMA DE CUADRADOS (SC)	GRADOS DE LIBERTAD (gl)	MEDIA DE LOS CUADRADOS (CM)	F	VALOR CRITICO
	ENTRE GRUPOS	2,34161E-08	1	2,34161E-08	0,007390343	3,88
	INTRA GRUPOS	0,000697064	220	3,16847E-06		
	TOTAL	0,000697088	221			

Tabla 5-15 ANOVA aplicado a ambos volúmenes de la geometría 2

RFG3	FUENTE DE LAS VARIACIONES	SUMA DE CUADRADOS (SC)	GRADOS DE LIBERTAD (gl)	MEDIA DE LOS CUADRADOS (CM)	F	VALOR CRITICO
	ENTRE GRUPOS	5,99224E-07	1	5,99224E-07	0,089247493	3,88
	INTRA GRUPOS	0,001477119	220	6,71418E-06		
	TOTAL	0,001477719	221			

Tabla 5-16 ANOVA aplicado a ambos volúmenes de la geometría 3

A diferencia de los tres casos anteriores en donde el factor de varianza era la geometría, en las tablas 5-14 a 5-16 el factor F es menor que el valor crítico, por tanto se acepta la hipótesis nula lo que se interpreta como la independencia de las variables sobre el grupo poblacional. Esto quiere decir que el factor volumen no tiene la influencia sobre la RF siendo que ambas respuestas en cada geometría con ambos volúmenes no generan una variación significativa.

Hasta ahora el análisis ha revelado que la geometría logra influenciar la respuesta en frecuencia de la bocina y también se evidencio como la respuesta de la eficiencia también presenta cierta variación al cambio de la geometría. Las variaciones de volumen por otro lado han hecho evidentes lo cambios de la respuesta de la eficiencia pero no generan variaciones significativas en la respuesta en frecuencia. El análisis ANOVA no fue aplicado a la respuesta de la eficiencia debido a que la varianza de los datos no es completamente homogénea.

6 Capítulo VII. Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones

- La implementación del diseño de una bocina para baja frecuencia a partir de los parámetros TS del altavoz facilita los cálculos correspondientes al volumen de la cavidad trasera, la superficie de la garganta, frecuencias de corte, banda de paso y eficiencia del dispositivo. Con la implementación de este diseño se evidencia el comportamiento de la respuesta en frecuencia y resaltan las frecuencias que intervienen en los fenómenos electroacústicos como la anulación de las reactancias y la frecuencia de corte del sistema.

- Los descriptores estadísticos usados durante el proyecto permiten identificar las principales diferencias entre las RF de cada geometría y las RF de cada volumen, con lo cual se observo que estas diferencias no generan valores significativos entre volúmenes para cada geometría. Por otro lado, el uso de estas diferencias de cada descriptor entre geometrías reveló cambios notorios entre las RF. La geometría 3 presento los mayores niveles de SPL con una diferencia de aproximadamente 4 dB con respecto a las otras dos geometrías. También se resalta el coeficiente de asimetría en esta geometría presentando la distribución de los valores de presión sonora más favorables. En cuanto al rango de operación en dB, las geometrías 1 y 2 muestran un rango más reducido con respecta a la geometría 3, lo que se interpreta como que la fluctuación de los valores de presión sonora con respecto a el valor medio es más cercana en las cajas 1 y 2.

- En cuanto a la eficiencia, el método de medición y la implementación de la norma para determinar los niveles de potencia acústica fueron efectivos y con ello se logró establecer los porcentajes de eficiencia por bandas de tercio de octava en el rango de

operación. Se registraron valores de eficiencia del 12 % en la banda de 160 Hz que protagonizó las respuestas de la eficiencia en todas las cajas. En el análisis también se resaltan las bandas de 100 y 250 Hz con porcentajes de eficiencia mayores al 6%. Por otro lado, en todos los casos la banda de 200 Hz presenta una disminución de la eficiencia en comparación con la tendencia de las bandas adyacentes, a lo que los autores han llamado bache y relacionado con la actividad modal al interior de la caja. También se hace evidente la banda de paso a pesar del comportamiento no lineal de la respuesta de eficiencia. El cambio de volumen en las geometrías representó una disminución de la eficiencia en la mayoría de bandas estudiadas para todos los casos y la variación de la geometría también genero cambios en la respuesta, sin embargo, a pesar de ser evidente las diferencias de la respuesta de eficiencia de manera gráfica, no se hace evidente la linealidad en la variación de este factor, por lo cual no es posible establecer de forma precisa la influencia de la geometría en los porcentajes de eficiencia de la bocina.

- A partir del análisis de la varianza de un factor se logró determinar que existe una relación entre la geometría de la cavidad interior de la bocina con la respuesta en frecuencia de la misma. Al comparar este resultado con las gráficas de RF se observó el cambio en el comportamiento modal de cada respuesta y diferencias en los niveles de presión sonora registrados por cada geometría. Aplicando el mismo análisis a la variación volumétrica se aceptó la hipótesis nula sugiriendo que no existe relación entre la variación volumétrica y la RF. Al aplicar este análisis y corroborar los resultados con las diferencias de los descriptores de la RF, se confirmó la efectividad del método estadístico y las relaciones existentes en tre los factores de varianza y las RF.

- Las variaciones geométricas demuestran un efecto significativo en la RF de la bocina, mientras que el volumen no. Sin embargo, la variación volumétrica demostró disminuir los porcentajes de eficiencia de la bocina, al igual que la geometría. La interpretación que los autores propones radica en que dicha respuesta es afectada por la combinación de ambos factores lo cual no pudo ser demostrado a

partir del análisis estadístico propuesto en el documento. Estos datos están respaldados por los descriptores estadísticos y la implementación del ANOVA al análisis de resultados, además del uso de gráficos y la teoría estudiada.

6.2 Recomendaciones

- El uso de las herramientas estadísticas es preciso para lograr determinar relaciones y dependencias entre variables bajo estudio. Sin embargo, los métodos usado en este documento no fueron suficientes para determinar la relación entre los factores de varianza y la eficiencia. Por lo cual se recomienda usar una resolución mayor a 1/3 de octava con lo cual el estudio podría extenderse a la evaluación de la linealidad de la eficiencia y obtener una mayor cantidad de datos con los cuales las herramientas estadísticas podrían proveer mayor información..

- Debido a las dimensiones del sistema, la manipulación de los elementos requirió de mucho cuidado y la modularidad del mismo introdujo cierto porcentaje de error que no fue contemplado en el análisis. Para estudios futuros podría escalarse dicho diseño a un rango de operación en frecuencia que permita la creación de varios modelos independientes sin aumentar en gran medida la cantidad de material usado y así mismo su costo. Con ello se evita hacer el sistema modular y se reduce el error introducido por posibles fugas dentro del sistema.

- El elemento usado en el proyecto para realizar el cambio de volumen en cada geometría fue el material absorbente frescasa garantizando el espesor necesario para cumplir con las dimensiones del volumen 2. Sin embargo, puede evaluarse la posibilidad de usar otro material o sistema para variar dicho volumen ya que no se tiene la certeza de si el material usado logro reducir el volumen de aire visto por la baja frecuencia, este factor no hizo parte del estudio y se recomienda el uso de un material que sea más solido en pro de verificar la RF obtenida con la variación del volumen.

- Un nuevo estudio de este mismo sistema podría realizarse a escala conservando el mismo sistema, pero en un rango de frecuencias diferente. Así, el costo del proyecto podría disminuir considerablemente y las variaciones podrían ser aplicadas con mayor facilidad.

7 Bibliografía

White, S. J. (1995). *High-Efficiency Three-way Speaker System.* AES. JOURNAL OF THE AUDIO ENGINEERING SOCIETY.

Daniel , B., Ehrig, L., Betz, L., & Maysenhölder, W. (2013). *Flat loudspeaker enclosures.* Merano: AIA-DAGA.

WILSON, P., & WILSON, G. L. (1975). *HORN THEORY AND THE PHONOGRAPH.* The Pennsylvania State University. Oxford: University Park.

PARAMETERS, P. C.-S. (1979). *John C. Young, Garry Margolis.* Brussels: AES.

D.B. Keele, J. (1977). *LOW-FREQUENCY HORN DESIGN USING THIELE/SWALL DRIVER PARAMETERS.* Los Angeles: AES.

KLIPSCH, P. W. (1979). *A Low-Frequency Horn of Small Dimensions.* Houston: AES.

Bright, A. (2003). *Analysis of a Folded Horn.* Nokia Group. Amsterdam: AES.

Holland, P. N. (2007). *Loudspeakers For Music Recording and Reproduction.* Elsevier Ltd.

Beer, D. (2013). *Flat loudspeaker enclosures.* Fraunhofer Institute for Building Physics IBP.

D. B. Keele, J. (1976). *AN EFFICIENCY CONSTANT COMPARISON BETWEEN LOW-FREQUENCY HORNS AND DIRECT-RADIATORS.* Electro-Voice, Inc.

WILSON, P. (1975). *HORN THEORY AND THE PHONOGRAPH.* The Pennsylvania State University, University Park, Pa. 16802.

JOHN C. YOUNG, G. M. (1979). *A PERSONAL CALCULATOR PROGRAM FOR LOW FREQUENCY HORN DESIGN USING THIELE-SMALL DRIVER PARAMETERS.* 62nd Convention March 13 through 16, 1979 AES.

D.B. Keele, J. (1977). *LOW-FREQUENCY HORN DESIGN USING THIELE/SWALL DRIVER PARAMETERS.* 57th Convention May 10 - 13,1977.

KLIPSCH, P. W. (1979). *A Low-Frequency Horn of Small Dimensions.* JOURNAL OF THE AUDIO ENGINEERING SOCIETY.

E. C. WENTE, A. L. (1978). *A High-Efficiency Receiver for a Horn-Type Loudspeaker of Large Power Capacity.* JOURNAL OF THE AUDIO ENGINEERIN SOCIETY.

Alan Fierstein, R. L. (1980). *STATE-OF-THE-ART DISCOTHEQUE SOI_D SYSTEMS SYSTEM DESIGN & ACOUSTICAL MEASUREMENT.* Journal of the AudIo EngineeringSociety.

D. B. (Don) Keele, J. (1991). *Maximum Efficiency of Direct-Radiator Loudspeakers.* JOURNAL OF THE AUDIO ENGINEERING SOCIETY.

Woszcyk, W. (1993). *A Novel Loudspeaker Enclosure and System.* Journal of the AudioEngineering Society.

DODD, M. A. (1992). *A Wide Dispersion Constant Directivity Dual Concentric Driver.* Journal of the Audio Engineering Society.

HOLLAND, K. (2003). *HORN LOUDSPEAKERS FOR LIVE SOUND.* Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton, UK.

Bright, A. (2003). *Analysis of a Folded Horn.* Journal of the Audio Engineering Society.

ZUCCATTI, C. (2005). *Direct-Radiator Loudspeaker Efficiency at Fundamental Resonance.* J. Audio Eng. Soc.

Rumen Artarski, P. V. (2013). *Multiple Low-Frequency Corner Folded Horn Designs.* AES 134th Convention, Rome, Italy, 2013.

Leckschat, D. (2015). *Suitability of Folded-Ribbon High-Frequency Drivers for High-Power Sound Reinforcement Systems.* AES 59th INTERNATIONAL CONFERENCE.

Buitrago, L. (2008). *DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SUBWOOFER CARDIOIDE.* UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA.

Castro, J. M. (2016). *Diseño y construcción de un altavoz modular.* UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA.

Colorado, L. F. (2018). *Evaluación del efecto, en la respuesta en frecuencia, al implementar material absorbente al interior de bocinas cónicas y exponenciales, desde 500 Hz hasta 5 kHz.* UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA.

Russell, D. A. (1999). *Acoustic monopoles, dipoles, and quadrupoles: An experiment revisited.* American Association of Physics Teachers.

Mesa, A. G. (2005). *Oscilaciones y Ondas.* Universidad Nacional de Colombia.

SINCLAIR, I. R. (1995). *Audio and Hi-Fi Handbook.* BSP Professional Books 1989.

ORTEGA, A. (2011). *ANALISIS DE LA OPTIMIZACION DE LA RADIACION ACUSTICA DE TRANSDUCTORES ELIPTICOS.* Universidad Austral de Chile.

Sampieri. (2010). *Metodología de la INvestigación.*

Brusi, J. (2014). *Directividad de altavoces. Terminología y representaciones.*

CASTILLO, J. (2012). *GUIA DE ONDAS ACÚSTICAS (BOCINAS): GENERALIDADES.* Universidad Tecnológica Nacional.

Pueo, B. (2003). *Electroacústica Altavoces y Micrófonos.* PEARSON EDUCACIÓN.

KINSLER, L. (2000). *FUNDAMENTALS OF ACOUSTICS.*

Barron, R. F. (2003). *Industrial Noise Control and Acoustics.*

OLSON. (1940). *ELEMENTS OF ACOUSTICAL ENGINEERING*.

Ortiz, J. G. (2010). *ACUSTICA Y FUNDAMENTOS DEL SONIDO.*

Alba, J. (2013). *Determinación de la presión sonora radiad por pistones circulares y anillos no planos usando un método numperico simplificado.* Elsevier España.

CARLSON, B. (2002). *COMMUNICAION SYSTEMS.*

DAVIS, G. (1987). *SOUND REINFORCEMENT HANDBOOK.*

Ballow, G. (2002). *Handbook for Sound Engineers*.

Möser, M., & Barros, J. L. (2009). *Ingeniería Acústica.* New York: Springer.

Wilson, J. D., & Bufa, A. J. (2003). *Fisica* (5ª ed.). Mexico: Pearson Education.

Moran, M. J., & Shapiro, H. N. (2004). *Fundamentos de termodinámica técnica.* Barcelona: Reverte.

Beranek, L. L. (2005). *NOISE AND VIBRATION CONTROL ENGINEERING.* JOHN WILEY & SONS, INC.

Beranek, L. L. (1961). *Acústica.* MCGRAW HILL BOOK COMPANY.

Walton, H. F., & Reyes, J. (2005). *Análisis Químico e Instrumental Moderno.* Barcelona: Reverté.

Crawford, Jr, F. S. (2003). *Ondas.* Barcelona: Reverté.

Miguel, P. A. (2014). *Electrotecnia.* Madrid: Paraninfo.

Cifuentes, M. F. *Diseño de Sistemas de Sonido: Filtros Análogos y Altavoz Electrodinamico.* Bogota.
Gutiérrez, J. C. (1998). *Estadistica General Aplicada.* Universidad Eafit.

Fernández Fernández , S., Cordero Sanchez , J. M., & Córdoba Lago, A. (2002). *Estadística Descriptiva.* ESIC.

Sabadías, A. V. (1995). *Estadística Descriptiva e Inferencial.* Castilla: Univ de Castilla La Mancha.

Stanley Wolf, R. F. (1992). *Guía Para Mediciones Electrónicas y Prácticas de Laboratorio.* Pearson Educación.

Alea, V., & Muñoz, C. (2001). *Estadística Descriptiva: Aplicaciones Prácticas.* Barcelona: Universidad de Barcelona.

Díaz, A. (2009). *Diseño Estadístico de Experimentos.* Medellin: Universidad de Antioquia.
González, F. Á. (1997). *Investigación Estadística con BMDP.* Servicio Publicaciones UCA.

Anguera, S. (26 de Febrero de 2013). *Cómo calcular dB(A) de los niveles acústicos de banda de octava.* Recuperado el 6 de Junio de 2019, de Cirrus Research S. L.: https://www.cirrusresearch.es/blog/2013/02/como-calcular-el-nivel-de-dba-de-los-niveles-acusticos-de-banda-de-octava/

Jensen, J. (2011). *A new Method for evaluating Loudspeaker Efficiency in the Frequency Domain.* New York: AES.

Atkinson, J. (1997). *LOUDSPEAKERS: WHAT MEASUREMENTS CAN TELL US AND WHAT THEY CAN'T TELL US!* New Mexico: AES.

GUSTAVO, A. A. (2015). *Medición de los Parámetros Thiele-Small del Altavoz.* Bogotá: Universidad de San Buenaventura.

Millán, A. (02 de Abril de 2011). *Parámetros Thiele Small*. Recuperado el 16 de Junio de 2019, de Diffusion Magazine: http://www.diffusionmagazine.com/index.php/biblioteca/categorias/cientifica/196-parametros-thiele-small

Leyton, G. M. (2010). DISEÑO ELECTROACÚSTICO DE SISTEMA DE ALTAVOCES PARA MEGAFONÍA. Santiago.

Sacerdoti, E. (16 de Noviembre de 2017). *Parámetros Thiele-Small*. Recuperado el 16 de Junio de 2019, de Equaphon University: http://www.equaphon-university.net/parametros-thiele-small/

Sacerdoti, E. (05 de Noviembre de 2014). *¿Eficiencia o Sensibilidad?* Recuperado el 20 de Abril de 2019, de Equaphone University: http://www.equaphon-university.net/eficiencia-o-sensibilidad/
WATKINSON, J. (2003). *REDEFINING THE CRITERIA FOR SOUND REINFORCEMENT LOUDSPEAKERS.* Petersfield: AES.

Rumsey, F. (2015). *Sound reinforcement Engineering and technology* . Montreal: AES.

Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica. (2011). SIMULACIÓN NUMÉRICA. ECUACIÓN DE DIFUSIÓN. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica* .

Cruz, A. N., & Vivero, J. U. (2013). *A novel BEM-BEM formulation for acoustic fluid-structure interaction analysis.* Cartagena: Universidad Tecnológica de Bolívar.

Asmar, I. (1999). *Métodos numéricos: Un primer curso.* Medellín: Universidad Nacional de Colombia.

Lynx Simulations. (2014). *¿Qué es la simulación númerica?* Recuperado el 2019, de Lynx Simulations: https://lynxsimulations.com/es/#cbp=../contenido/es/text_simuNumerica.html

Bondensiek, R., & Barreiro, J. (2010). *Análisis Acústico de un Recinto variando su Geometría, por medio del Método de Elementos Finitos.* Bogotá: Universidad de San Buenaventura.

García, S. H. (2016). *ANÁLISIS DE LA ABSORCIÓN ACÚSTICA EN PANELES DE LANA MINERAL CON DIFERENTES TIPOS DE REVESTIMIENTO.* Portugal: Departamento Técnico URSA Ibérica Aislantes S.A.

Anexos del Documento

A Anexo: Conversión entre los parámetros electromagnéticos y los parámetros Thiele/Small del altavoz

El proceso de conversión de estas ecuaciones se da a partir de las relaciones tenidas en cuenta por Thiele & Small entre los componentes electroacústicos y los parámetros propuestos por estos autores, siendo así se tienen las ecuaciones 1 a 15:

$$f_s = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{M_{MS}C_{MS}}} \qquad \textit{A.Ecuación.1}$$

$$Q_{ES} = \frac{R_E}{B^2 l^2}\sqrt{\frac{M_{MS}}{C_{MS}}} \qquad \textit{A.Ecuación.2}$$

$$Q_{MS} = \frac{1}{2\pi F_s C_{MS} R_{MS}} \qquad \textit{A.Ecuación.3}$$

$$Q_{TS} = \frac{Q_{eS}Q_{mS}}{Q_{eS}+Q_{mS}} \qquad \textit{A.Ecuación.4}$$

Si $Q_{MS} \ll Q_{MS}$ entonces se tiene que $Q_{TS} \approx Q_{ES}$

$$V_{AS} = \rho_0 c S_D^2 C_{MS} \qquad \textit{A.Ecuación.5}$$

$$V_D = S_D x_{max}$$ *A.Ecuación.6*

Estas ecuaciones permiten relacionar los componentes constructivos del altavoz con los parámetros de diseño estándar obteniendo así las siguientes relaciones; para la expresión de la eficiencia máxima en la banda de paso dada por el área de la garganta se tiene que:

$$S_T = \frac{2\pi f_s Q_{TS} V_{AS}}{c}$$ *A.Ecuación.7*

En cuanto a la respuesta en frecuencia, las frecuencias que limitan el rango de operación del altavoz, es decir F_{Ls} y F_{Hs} quedan expresadas como:

$$F_{Hs} = \frac{f_s}{Q_{TS}}$$ *A.Ecuación.8*

$$F_{Ls} = Q_{TS}\, f_s$$ *A.Ecuación.9*

En el rango de operación de baja frecuencia de la guía de onda las frecuencias modelan su comportamiento son:

$$F_{LC} = \frac{F_{Ls}}{2} = Q_{TS}\frac{f_s}{2}$$ *A.Ecuación.10*

$$F_{LBC} = F_{LC}(1+\alpha) = \frac{Q_{TS} f_s}{2}\left(1 + \frac{V_{AS}}{V_B}\right)$$ *A.Ecuación.11*

En la banda media del rango de operación, la relación permanece igual que la descrita en la ecuación de la eficiencia. La zona de alta frecuencia estará dada por las expresiones n a m:

$$F_{HM} = 2F_{Hs} = \frac{2f_s}{Q_{TS}}$$ *A.Ecuación.12*

La ecuación de la frecuencia de corte producida por la inductancia de la bobina permanece igual y la ecuación de la frecuencia de corte debida a la cavidad frontal queda reescrita de la siguiente manera:

$$F_{HC} = \frac{2Q_{TS}f_s\ V_{AS}}{V_{FC}}$$ *A.Ecuación.13*

Para la anulación de la reactancia el volumen de la cavidad se expresa a partir de la siguiente ecuación:

$$V_B = \frac{V_{AS}}{\frac{f_C}{Q_{TS}f_s} - 1}$$ *A.Ecuación.14*

Finalmente la ecuación de la máxima potencia radiada queda expresada a partir de los parámetros TS dando como resultado la ecuación n:

$$P_{AR} \approx (3\pi\rho_0 c^2)\left(\frac{1}{Q_{TS}f_s\ V_{AS}}\right) f_C^2 V_D^2$$ *A.Ecuación.15*

B Anexo: Descripción del Material Acústico

La frescasa es un material de lana mineral de vidrio biosoluble de textura suave y uniforme utilizado como absorbente y aislante acústico que viene en forma de rollos o láminas. Sus cualidades de absorbente acústico fueron razón para utilizar el material en la reducción de volumen necesario para cada una de las cavidades acústicas, su manipulación es sencilla, aunque hay que tener ciertas precauciones (al momento de la instalación se evitó el contacto con la ropa y cogerla con las manos previniendo algún tipo de alergia y/o escozor). Para su instalación dentro de las cavidades acústicas, se cortaron 6 láminas de igual longitud y se ubicaron en los costados laterales dando el volumen requerido.

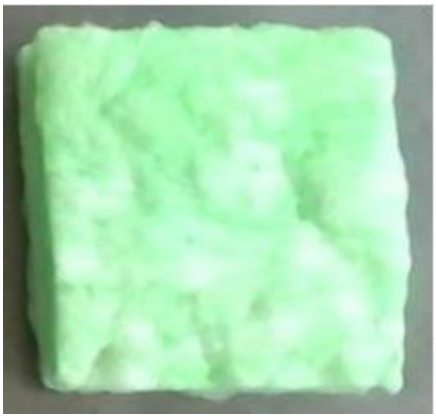


Ilustración. Frescasa Eco

Durante el proyecto, surge la duda de como realizar el cambio de volumen de cada geometría con lo cual los autores exponen aquí las principales razones que los motivo a la elección de este materia. La razón de mas peso fue el comportamiento acústico que tiene el material en todo el rango de frecuencia. A continuación en la tabla B-1 se muestran las especificaciones técnicas entregadas por el fabricante del material. Allí se puede apreciar que el valor NRC, es decir el coeficiente de reducción sonora del material es de aproximadamente 0,8 para un área de 9 m^2. Dicho coeficiente establecido por la norma ISO 11654 (que no es tratada en este documento) indica el coeficiente de absorción del material, ponderado en las bandas de octava comprendidas entre 120 Hz y 4000 Hz. De esta información los autores rescatan principalmente que, a pesar de tener el NRC del material, dicho coeficiente no se refiere expresamente a la zona de baja frecuencia en la que generalmente los coeficientes de absorción de un material fibroso no son muy elevados

CITA. Adicional a esto el fabrícate deja claro en la ficha técnica que el NRC se da para un área aproximada de 13m^2, esto es alrededor de 60 veces el área que se uso para realizar el cambio de volumen, es decir, un área cercana a los 0,2m^2 (revisar Anexo D).

PRODUCTO	LONGITUD m	ANCHO mm	ESPESOR (1) mm	NRC (2) Montaje A/E-405	RESISTENCIA TÉRMICA (3) Hr.ft².F/BTU (R100 m².°C/W)
FRESCASA ECO 600" x 48" x 2.5"	15.24 ± 150mm	1219 + 13mm	63.5 ± 3mm	0.85/0.9	8 (141)
FRESCASA ECO 600" x 48" x 3.5"	15.24 ± 150mm	1219 + 13mm	89 ± 3mm	1.05/1.0	11 (193.7)
FRESCASA ECO 450" x 48" x 6.25"	11.43 ± 150mm	1219 + 13mm	127 ± 3mm	----	21.5 (379.52)

Tabla B-1

Beranek menciona que l área del material es determinante para generar la absorción requerida en las frecuencias bajo tratamiento. Al estar muy por debajo del área que especifica el fabricante, se asume que el material no genera la absorción significativa en el rango de frecuencias de interés del proyecto. Adicionalmente, los autores respaldan esta información a partir de un estudio realizado a 83 muestras de materia fibroso entre las cuales se encuentra la lana de vidrio (principal componente de la frescasa según el fabricante) sometidas a una medicion de absorción con diferentes espesores (García, 2016). En el estudio no se especifica el area usada en el material pero las imagenes que alli muestran revela que se trata de un area relativamente grande. Alli se demuestra entre otras cosas que la combinación de algunos espesores mejora levemente el comportamiento de la absorción acústica en diferentes frecuencias, especialmente en las medias y altas. Sin embargo el comportamiento en baja frecuencia, a pesar de demostrar aumento por parte de las diferentes muestras, sigue mostrando coeficientes de absorción poco significativos aun con espesores cercanos a 120 mm.

Por lo anterior, los autores dan cuenta de que la presencia de dicho material en la cavidad no tendrá mayor significancia en cuanto a la absorción generada en el rango de interes para el proyecto, pero si podra representar el cambio de volumen deseado. Por esta razon la absorción del material no fue un factor determinante en el análisis de los resultados.

La siguiente opción mas adecuada era el uso de laminas del mismo material con el que fue construida la caja en general. Para conseguir esto, se debía procurar por cada geometría la cantidad de laminas necesaria tal que se generara la reducción de volumen requerida para conseguir el volumen 2. Por el espesor del material que corresponde a 19mm la cantidad de laminas es aproximadamente 15 por cada geometría. Esto hubiese incrementado significativamente el costo del proyecto. El uso de menos laminas de las necesarias incurre en la generación de una cavidad entre la lamina adicionada y el borde exterior de la cavidad completa pudiendo generar algún efecto de resonador en ciertas frecuencias lo que no favorecia el objetivo general del proyecto. Por esta razon los autores deciden hacer uso de un unico material que generara el cambio de volumen, se adaptara a todas las geometrías y no tuviese una influencia significativa en los resultados.

C Anexo: Calibración de Elementos y Ruido de Fondo

Figura C-1: Calibración de sonómetro Bruel & Kjaer modelo 2250

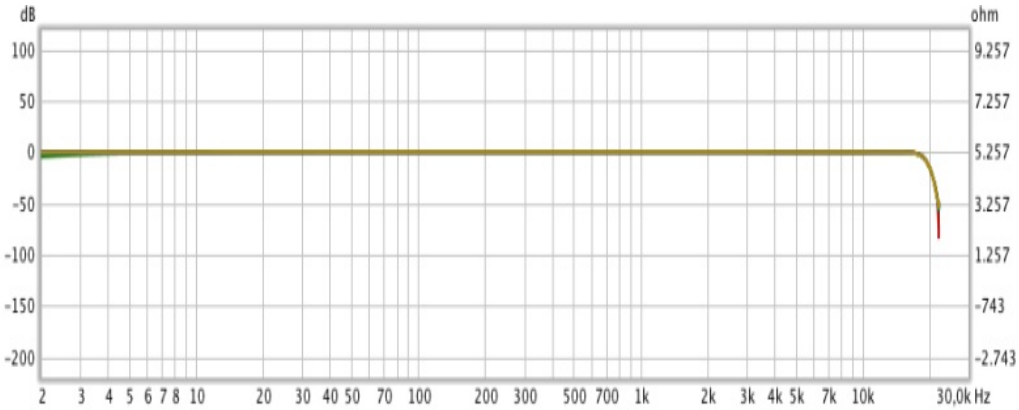


Grafico C-1: Calibración soundcard Alesis Onix Blackjack

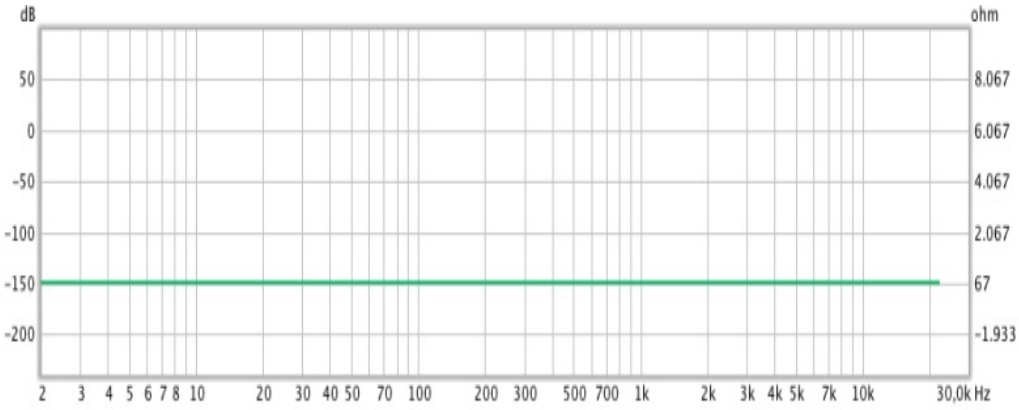
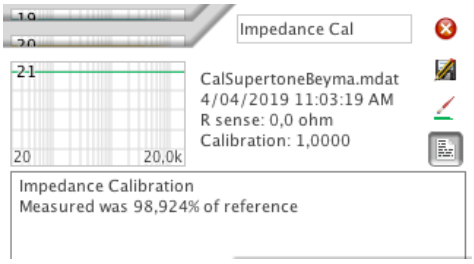


Grafico C-2: Calibración de la medición de impedancia



Frecuencia [Hz]	Prom.pos1 [dB]	Prom.pos2 [dB]	Prom.pos3 [dB]	Prom.pos4 [dB]	Prom.pos5 [dB]	Prom.pos6 [dB]	Prom.pos7 [dB]	Prom.pos8 [dB]	Prom.pos9 [dB]	Prom.pos10 [dB]	Prom.Esp.Total [dB]
20	46,92	45,91	45,45	47,16	44,92	44,9	46,07	43,42	46,49	46,06	45,85
25	47,63	46,02	46,59	46,66	48,32	48,05	47,79	47,59	48,36	48,48	47,62
31	49,8	49,93	49,36	50,65	49,33	49,62	50,93	50,54	50,14	50,32	50,09
40	46,05	43,23	44,58	44,37	44,35	45,8	46,3	46,04	45,51	49,3	45,87
50	43,31	44,55	45,1	43,66	44,88	48,47	44,2	44,91	44,6	60,96	51,87
63	43,1	44,72	46,95	44,26	43,35	47,73	46,03	47,56	45,66	67,06	57,34
80	41,41	42,49	42,07	40,6	39,77	42,02	43,11	48,66	44,6	56,7	48,29
100	40,66	41,33	42,05	43,14	38,72	40,98	38,66	63,15	45,39	51,74	53,70
125	41,82	42,15	41,31	47,32	39,15	42,07	39,5	54,87	42,01	51,21	47,68
160	39,23	39,08	35,37	43,45	35,09	37,54	37,73	47,45	39,99	54,83	46,29
200	33,73	36,3	34,18	38,16	31,2	33,38	32,79	47,66	35,92	51,94	43,80
250	31,48	32,17	31,92	36,79	28,97	31,34	31	39,79	35,05	52,87	43,40
315	33,22	29,39	29,57	32,8	29,24	33,96	28,84	37,84	36,08	46,93	38,41
400	41,32	28,95	27,47	29	28,31	35,48	30,02	39,8	39,06	47,22	39,60

Tabla C-1: Promediación de mediciones de ruido de fondo realizadas durante la medición

D Anexo: Método de Gauss

Para calcular el volumen correspondiente a cada geometría fue necesario determinar el área del polígono que determina la forma geométrica de la cavidad. Para esto se hizo uso de la formula de Gauss o algoritmo de laza, llamado así por la dinámica de operación entre los vértices, en el que a partir de la resolución de determinantes por una matriz compuesta por las coordenadas de los vértices que hacen parte del polígono de forma irregular, se obtiene el área multiplicando el resultado de por un medio.

Para ello se anotan las coordenadas de los vértices y se crea un vector enumerando estas coordenadas de X y Y de cada vértice en sentido contrario de las manecillas del reloj, por lo que todos los puntos vértice que componen el polígono deben estar en un mismo plano. Se calcula el determínate a partir del producto de las diagonales de la matriz que, como ya se menciono, contiene en una de sus columnas las coordenadas x de cada vértice y en la siguiente columna las coordenadas y de cada vértice. Se resta el resultado de ambas diagonales, izquierda y derecha y se divide entre dos obteniendo así el área del polígono. Para hacer uso de este método es necesario ubicar el elemento en un sistema de coordenadas xy y extraer las coordenadas de cada vértice.

Área de Polígonos Irregulares (Método Prático)

Coordenadas	X	Y	Produto Diagonal de X	Produto Diagonal de Y
A	20	120	1660	6960
B	58	83	4814	8051
C	97	83	11446	8300
D	100	118	12000	2360
E	20	120	2400	2400
F	20	120	2400	2400
G	20	120	2400	2400
H	20	120	2400	2400
I	20	120	2400	2400
J	20	120	2400	2400
K	20	120	2400	2400
L	20	120	2400	2400
A	20	120	Área total	2124,5

OBSERVAÇÕES:

* Editar as coordenadas do polígono nas células em AMARELO

* Não é necessário apagar as linhas caso o polígono tenha menos pontos que os inseridos na tabela. É só preencher com as coordenadas XY do último ponto.

https://www.linkedin.com/pulse/%C3%A1rea-de-pol%C3%ADgonos-irregulares-m%C3%A9todo-gauss-do-c%C3%A1lculo-rodrigo

A-D	A-B			
1	4	B-C		
		3	C-D	
			2	

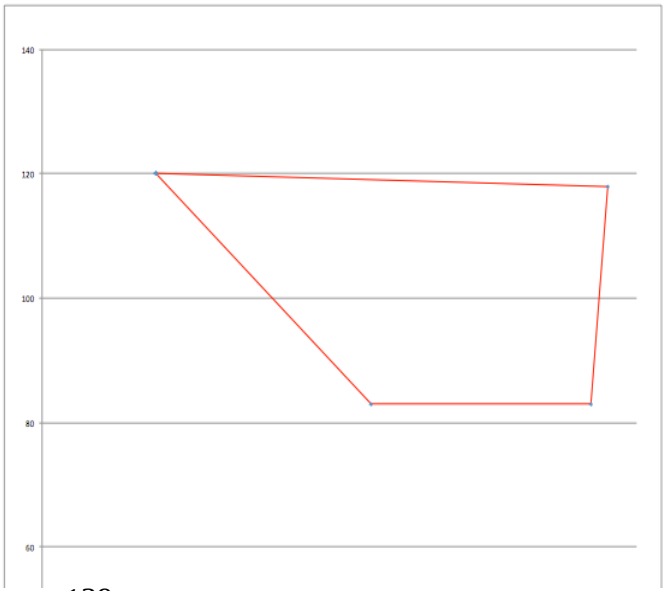
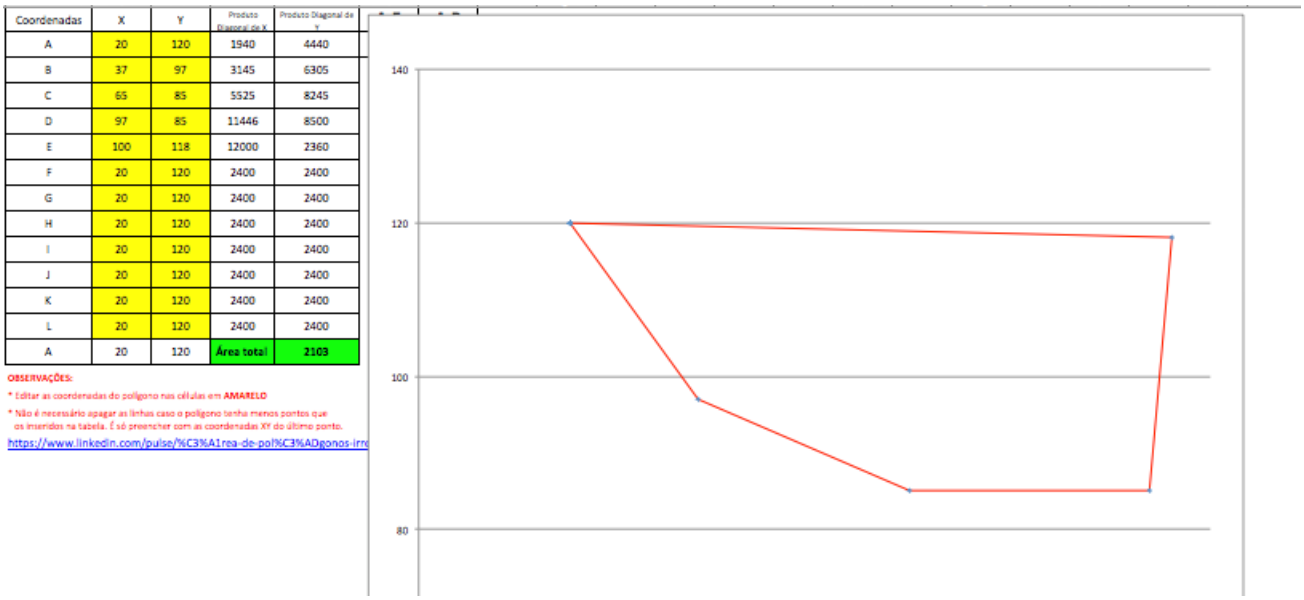


Grafico D-1: Algoritmo de lazar aplicado a la geometría 1



Coordenadas	X	Y	Produto Diagonal de X	Produto Diagonal de Y
A	20	120	1940	4440
B	37	97	3145	6305
C	65	85	5525	8245
D	97	85	11446	8500
E	100	118	12000	2360
F	20	120	2400	2400
G	20	120	2400	2400
H	20	120	2400	2400
I	20	120	2400	2400
J	20	120	2400	2400
K	20	120	2400	2400
L	20	120	2400	2400
A	20	120	Área total	2103

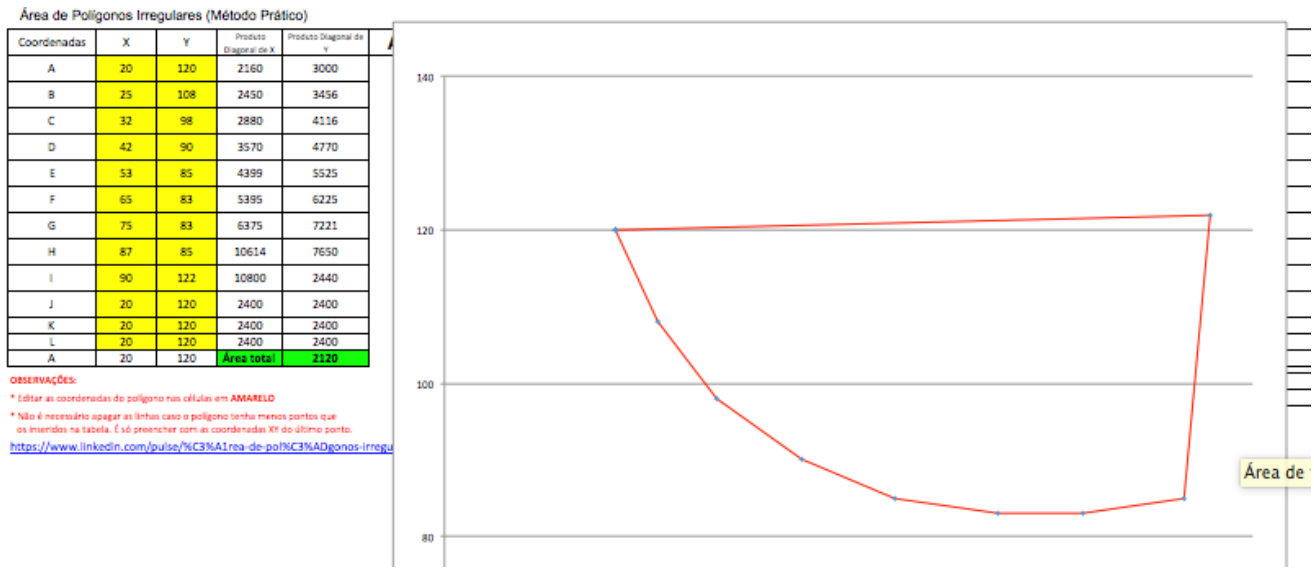
OBSERVAÇÕES:

* Editar as coordenadas do polígono nas células em AMARELO

* Não é necessário apagar as linhas caso o polígono tenha menos pontos que os inseridos na tabela. É só preencher com as coordenadas XY do último ponto.

https://www.linkedin.com/pulse/%C3%A1rea-de-pol%C3%ADgonos-irr

Grafico D-2: Algoritmo de lazar aplicado a la geometría 2



Área de Polígonos Irregulares (Método Prático)

Coordenadas	X	Y	Produto Diagonal de X	Produto Diagonal de Y
A	20	120	2160	3000
B	25	108	2450	3456
C	32	98	2880	4116
D	42	90	3570	4770
E	53	85	4399	5525
F	65	83	5395	6225
G	75	83	6375	7221
H	87	85	10614	7650
I	90	122	10800	2440
J	20	120	2400	2400
K	20	120	2400	2400
L	20	120	2400	2400
A	20	120	Área total	2120

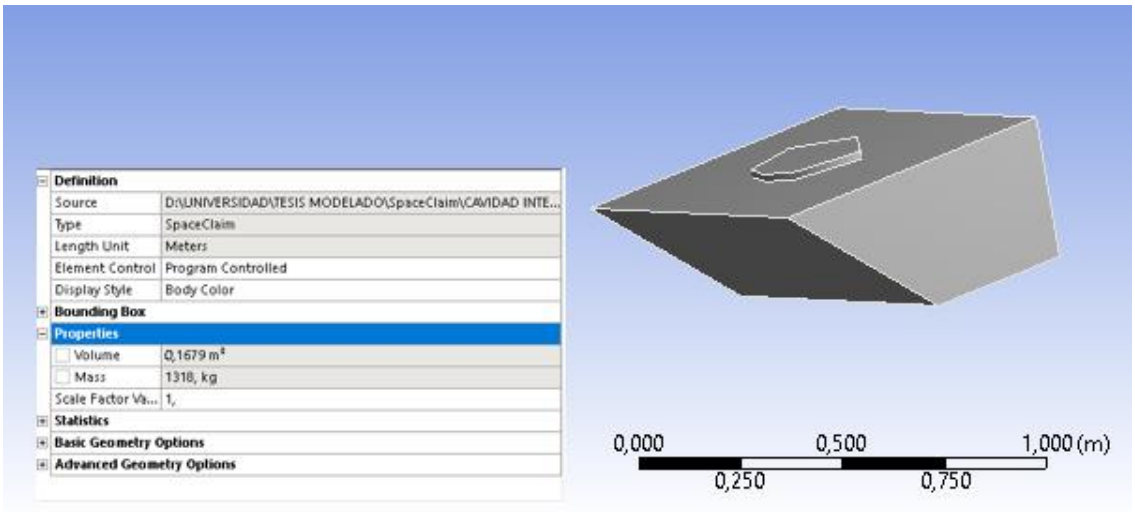
OBSERVAÇÕES:

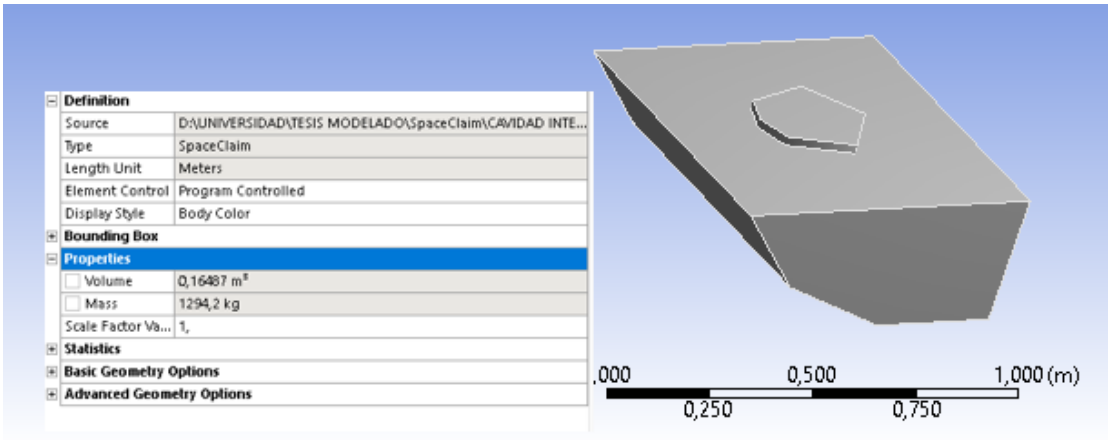
* Editar as coordenadas do polígono nas células em AMARELO

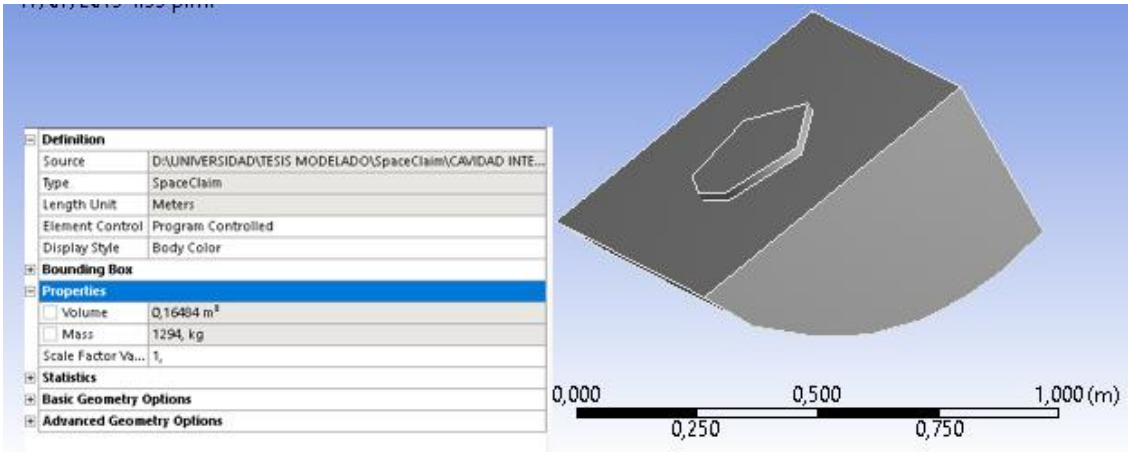
* Não é necessário apagar as linhas caso o polígono tenha menos pontos que os inseridos na tabela. É só preencher com as coordenadas XY do último ponto.

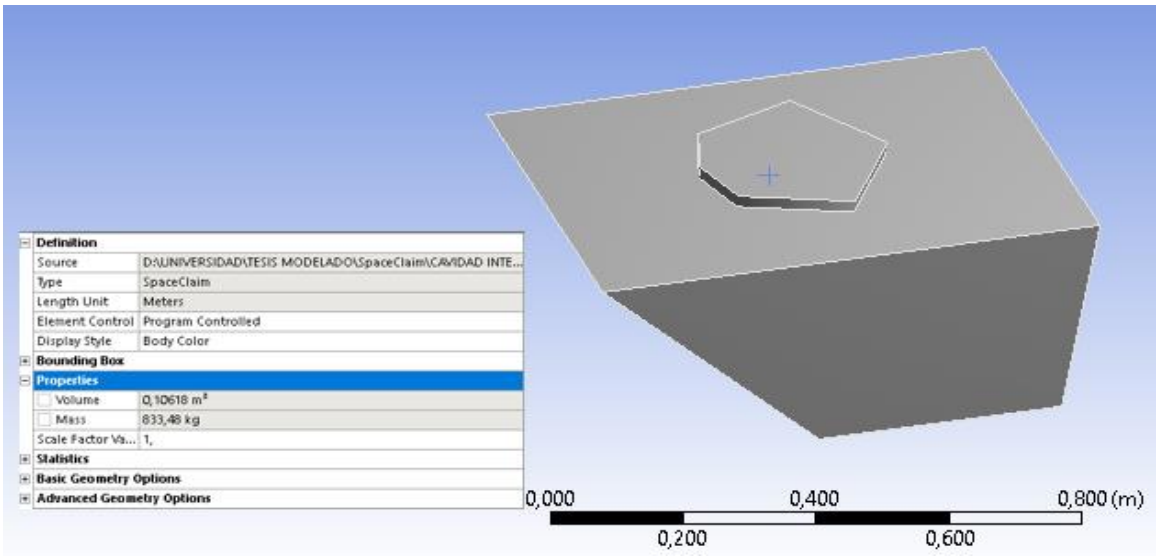
https://www.linkedin.com/pulse/%C3%A1rea-de-pol%C3%ADgonos-irregu

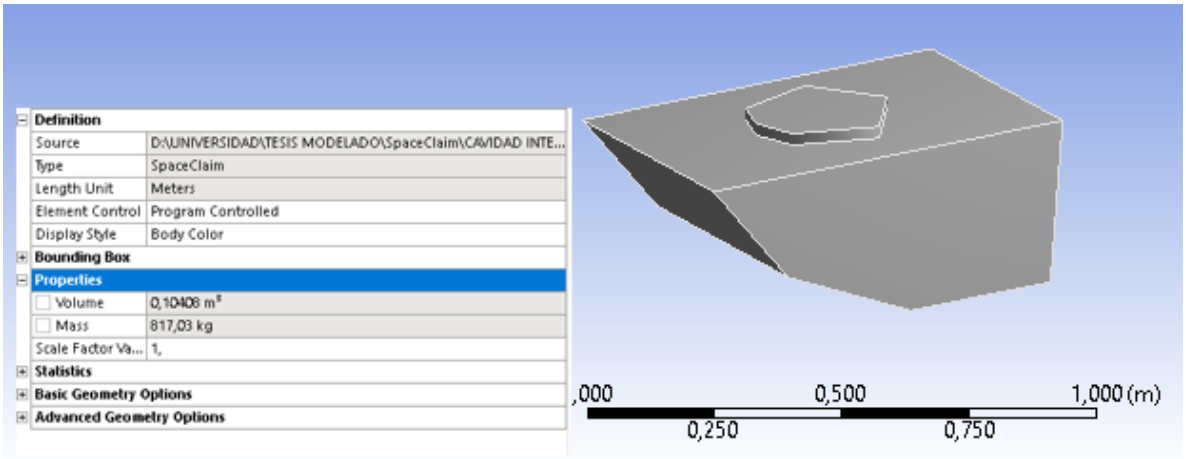
Grafico D-3: Algoritmo de lazar aplicado a la geometría 3

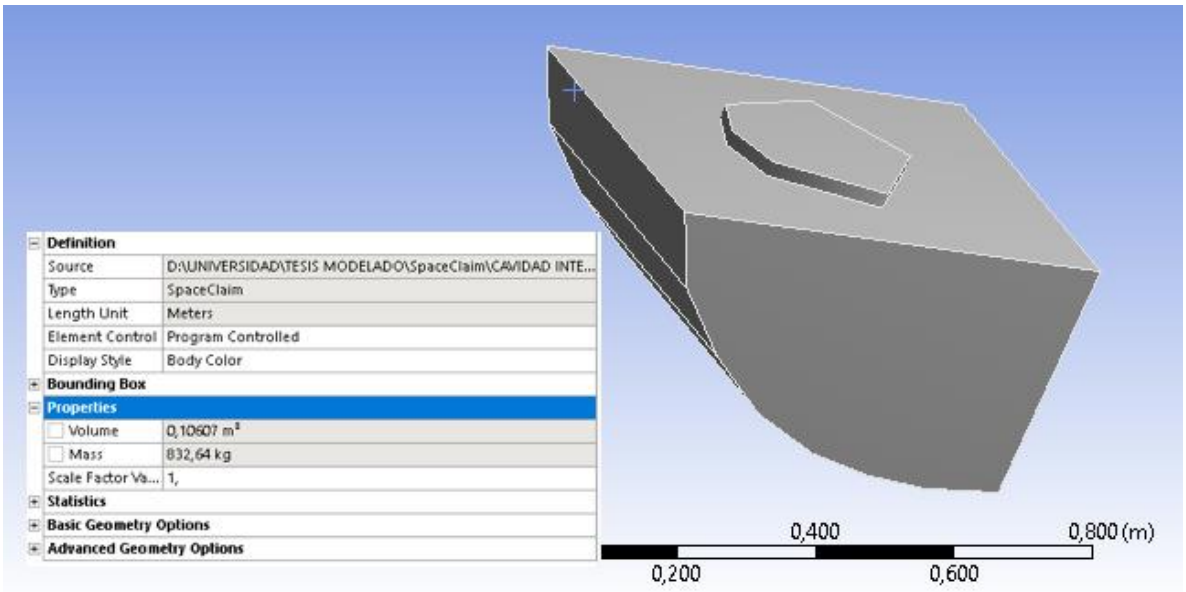

Definition
Source D:\UNIVERSIDAD\TESIS MODELADO\SpaceClaim\CAVIDAD INTE...
Type SpaceClaim
Length Unit Meters
Element Control Program Controlled
Display Style Body Color
Bounding Box
Properties
Volume 0,1679 m³
Mass 1318, kg
Scale Factor Va... 1,
Statistics
Basic Geometry Options
Advanced Geometry Options
0,000
0,500
1,000 (m)
0,250
0,750


Definition
Source D:\UNIVERSIDAD\TESIS MODELADO\SpaceClaim\CAVIDAD INTE...
Type SpaceClaim
Length Unit Meters
Element Control Program Controlled
Display Style Body Color
Bounding Box
Properties
Volume 0,16487 m³
Mass 1294,2 kg
Scale Factor Va... 1,
Statistics
Basic Geometry Options
Advanced Geometry Options
,000
0,500
1,000 (m)
0,250
0,750

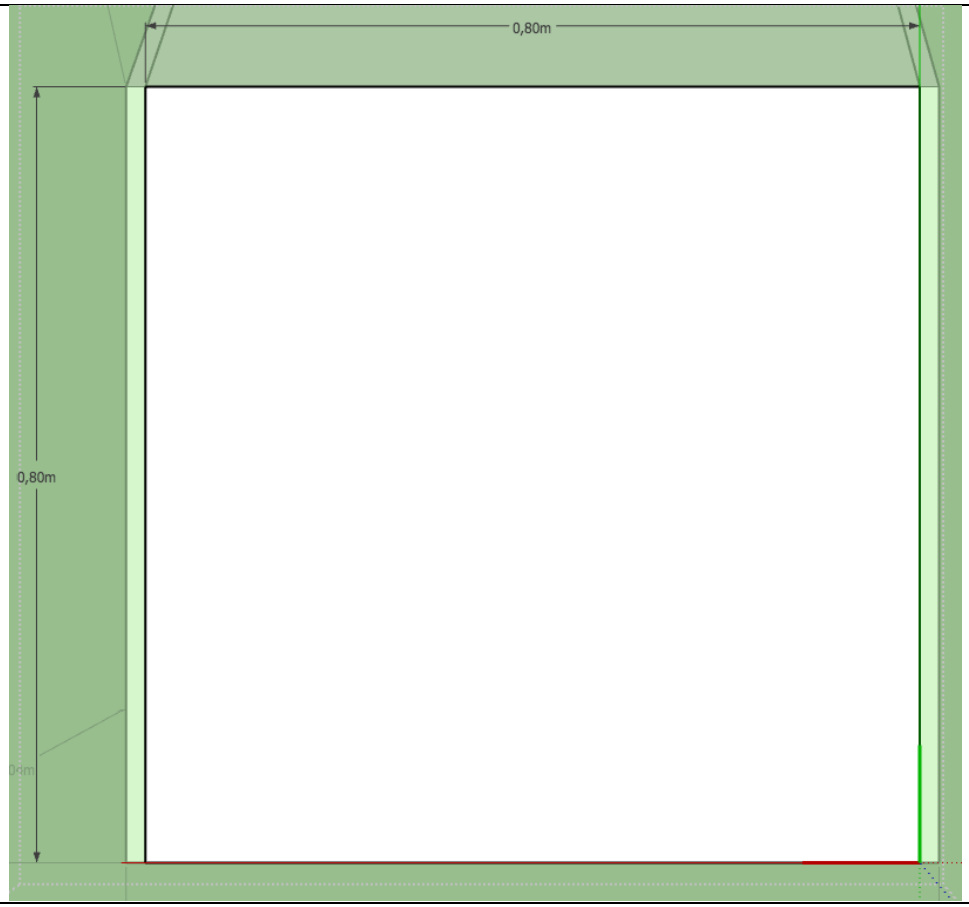
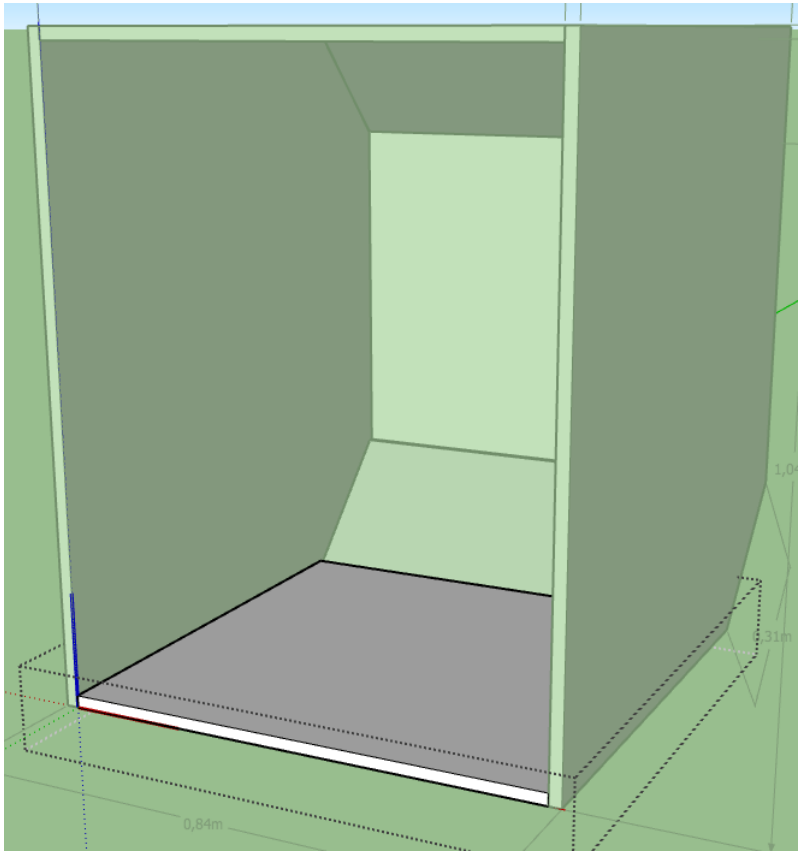

Definition
Source D:\UNIVERSIDAD\TESIS MODELADO\SpaceClaim\CAVIDAD INTE...
Type SpaceClaim
Length Unit Meters
Element Control Program Controlled
Display Style Body Color
Bounding Box
Properties
Volume 0,16484 m³
Mass 1294, kg
Scale Factor Va... 1,
Statistics
Basic Geometry Options
Advanced Geometry Options
0,000
0,500
1,000 (m)
0,250
0,750


Definition
Source D:\UNIVERSIDAD\TESIS MODELADO\SpaceClaim\CAVIDAD INTE...
Type SpaceClaim
Length Unit Meters
Element Control Program Controlled
Display Style Body Color
Bounding Box
Properties
Volume 0,10618 m³
Mass 833,48 kg
Scale Factor Va... 1,
Statistics
Basic Geometry Options
Advanced Geometry Options
0,000
0,400
0,800 (m)
0,200
0,600

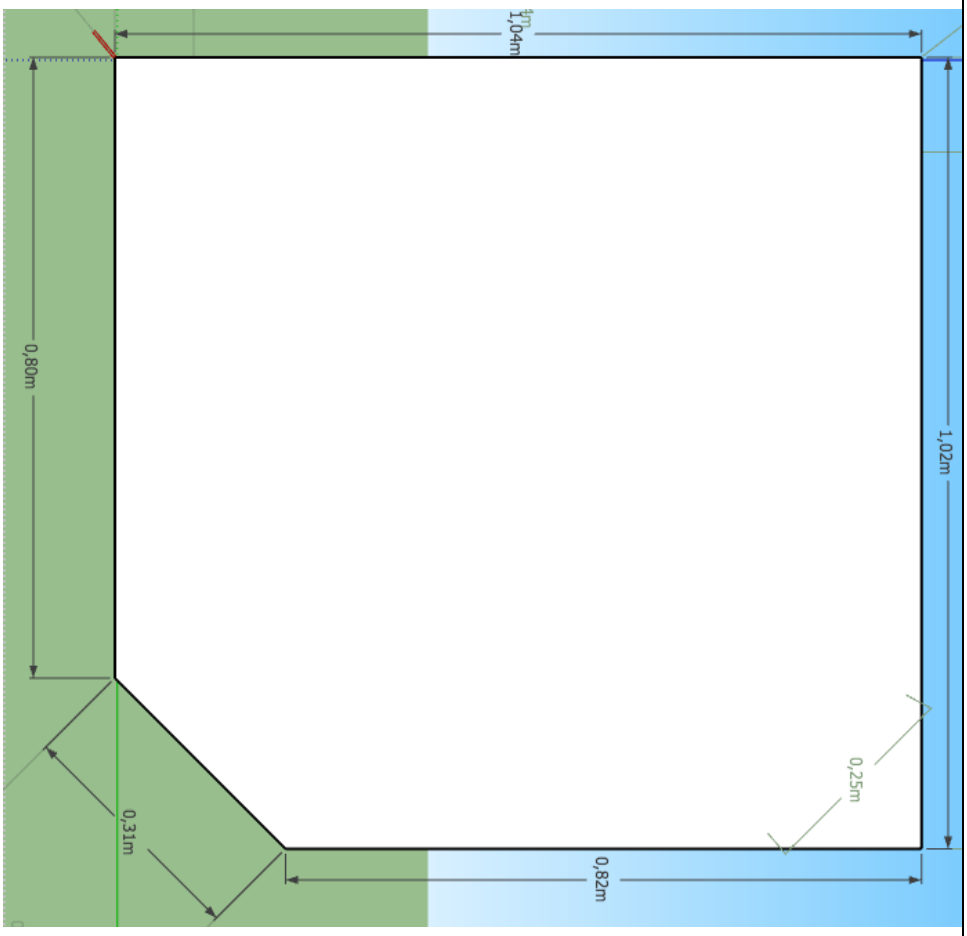

Definition
Source D:\UNIVERSIDAD\TESIS MODELADO\SpaceClaim\CAVIDAD INTE...
Type SpaceClaim
Length Unit Meters
Element Control Program Controlled
Display Style Body Color
Bounding Box
Properties
Volume 0,10408 m³
Mass 817,03 kg
Scale Factor Va... 1,
Statistics
Basic Geometry Options
Advanced Geometry Options
,000
0,500
1,000 (m)
0,250
0,750

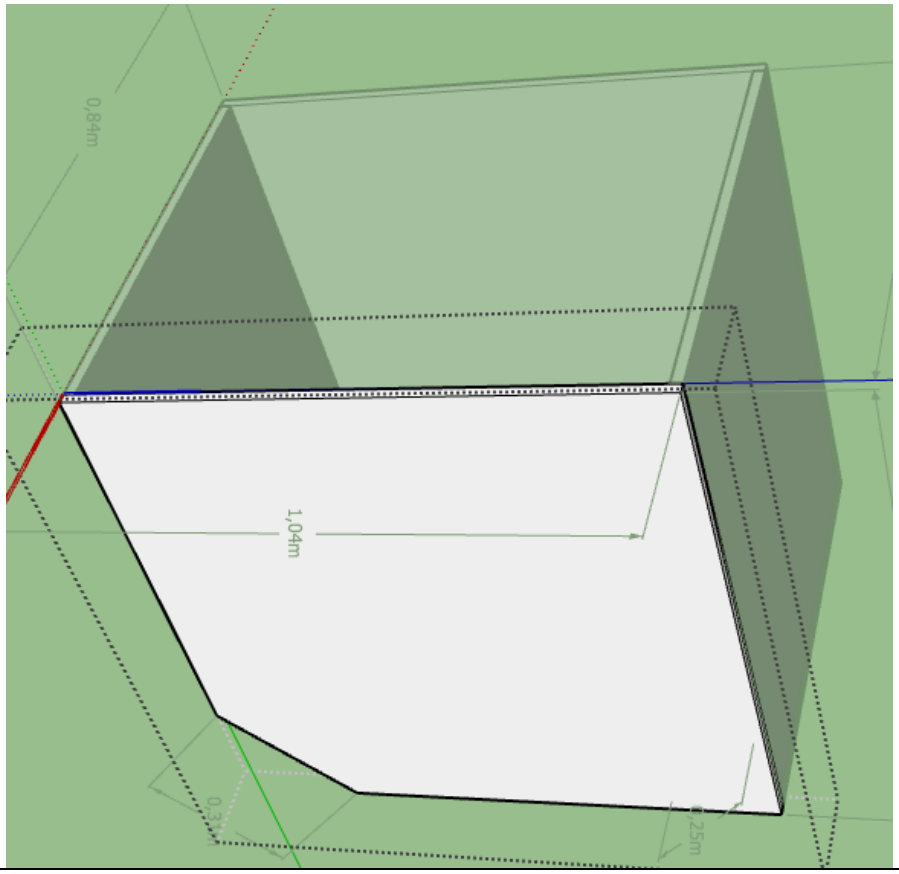

Definition
Source D:\UNIVERSIDAD\TESIS MODELADO\SpaceClaim\CAVIDAD INTE...
Type SpaceClaim
Length Unit Meters
Element Control Program Controlled
Display Style Body Color
Bounding Box
Properties
Volume 0,10607 m³
Mass 832,64 kg
Scale Factor Va... 1,
Statistics
Basic Geometry Options
Advanced Geometry Options
0,400
0,800 (m)
0,200
0,600

E Anexo: Medidas de Material de Construcción (Lamina de MDF)

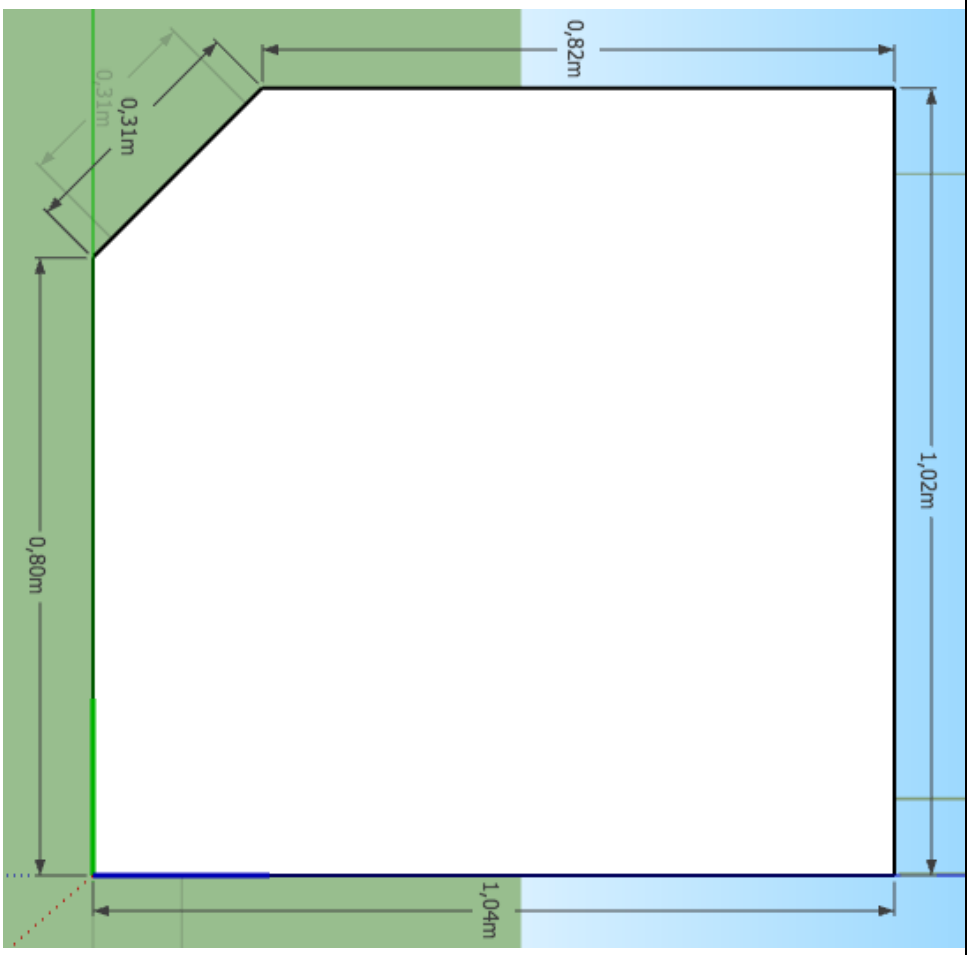
PIEZA	Dimensión	POSICIÓN
PLACA BASE 1 LAMINA 0,8mX 0,8m		

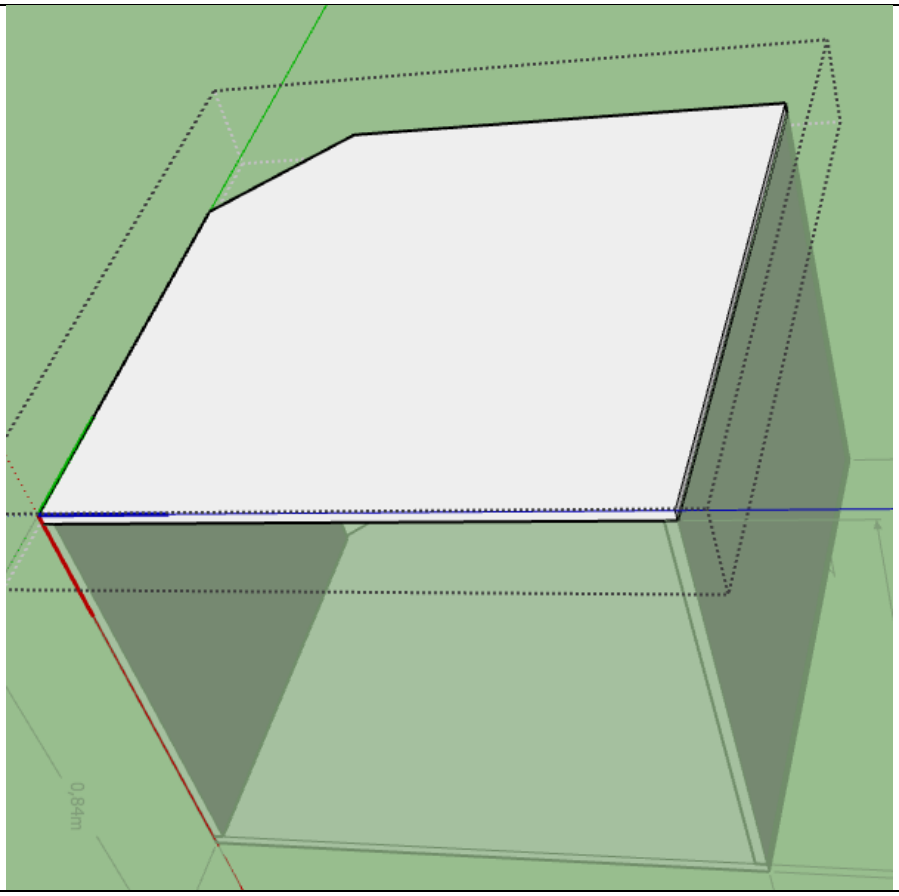
PLACA LATERAL DER 1 LAMINA 1,04m X 1,02m



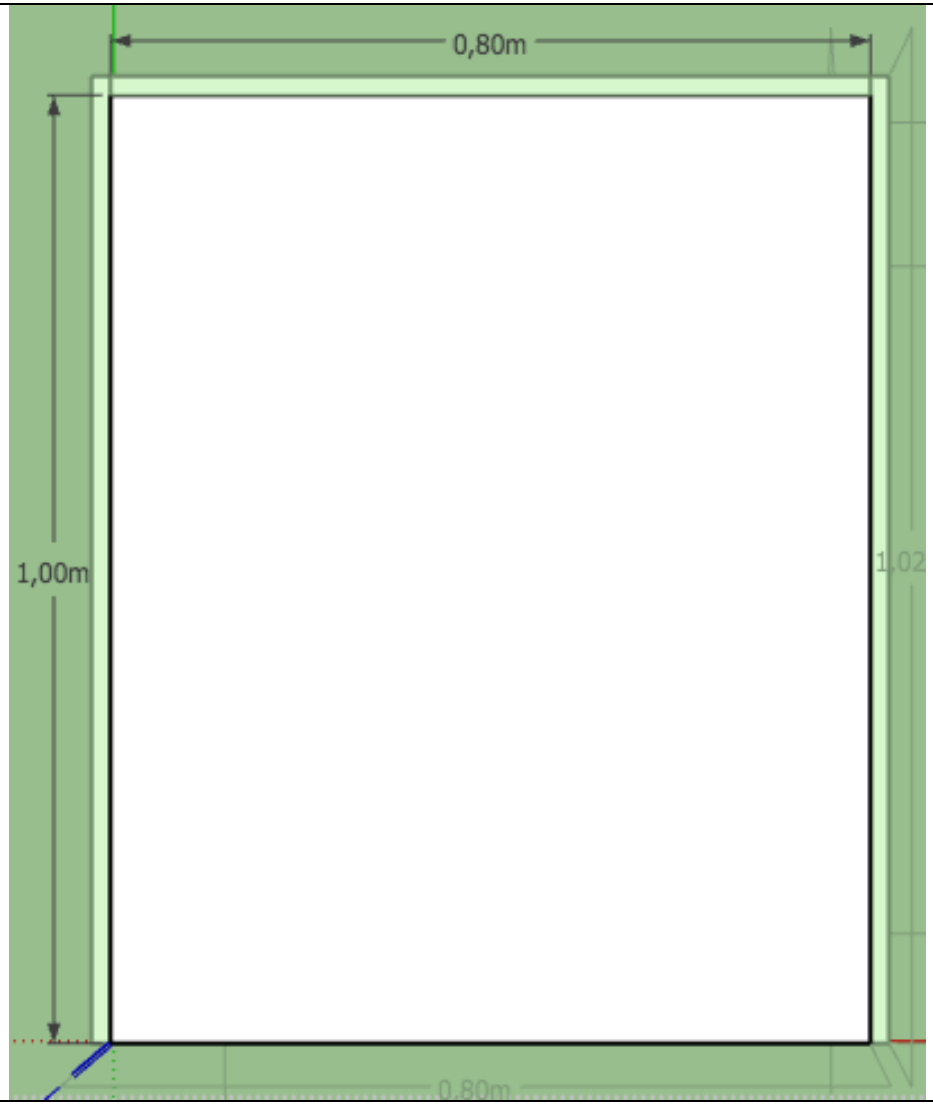


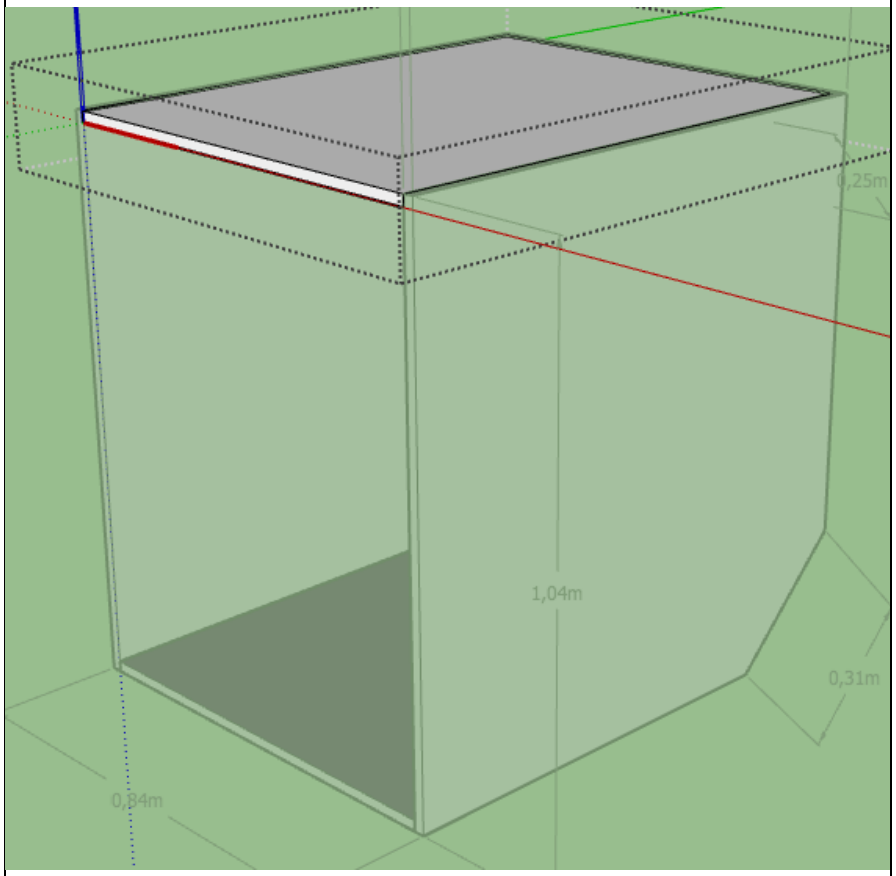
PLACA LATERAL IZQ 1 LAMINA 1,04m X 1,02m



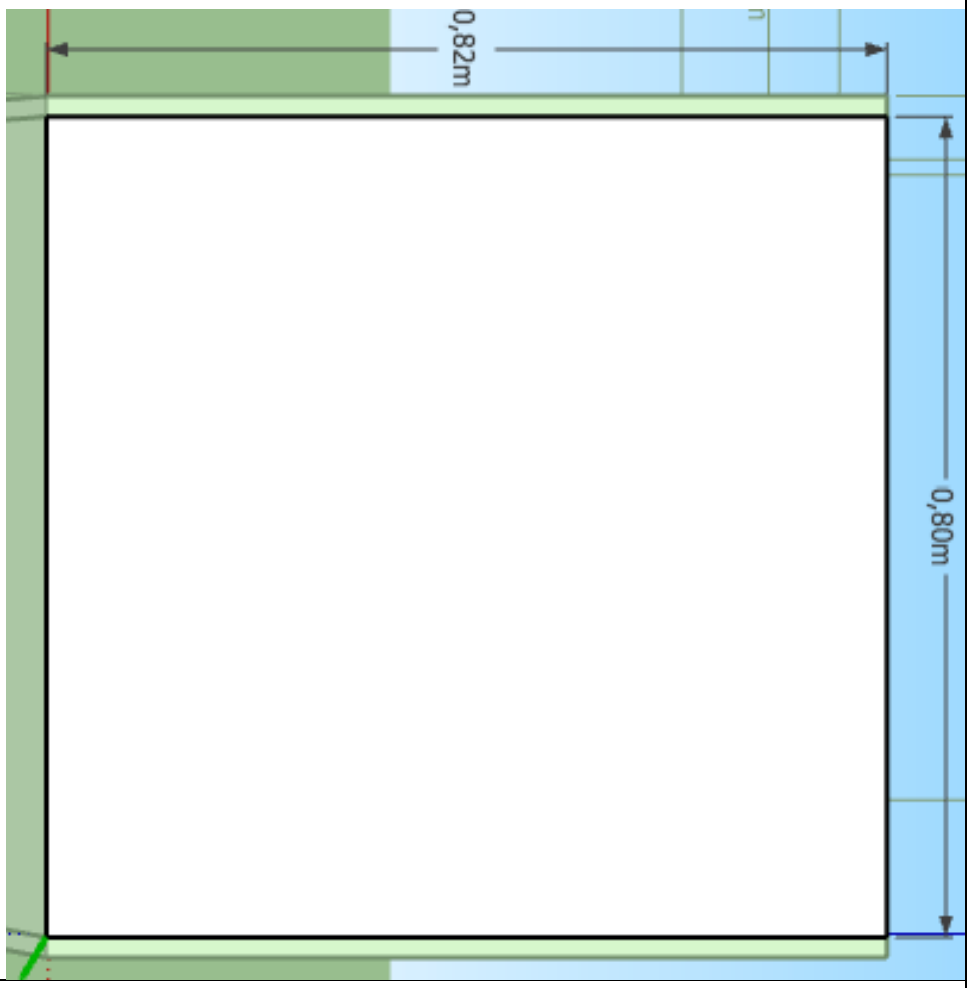


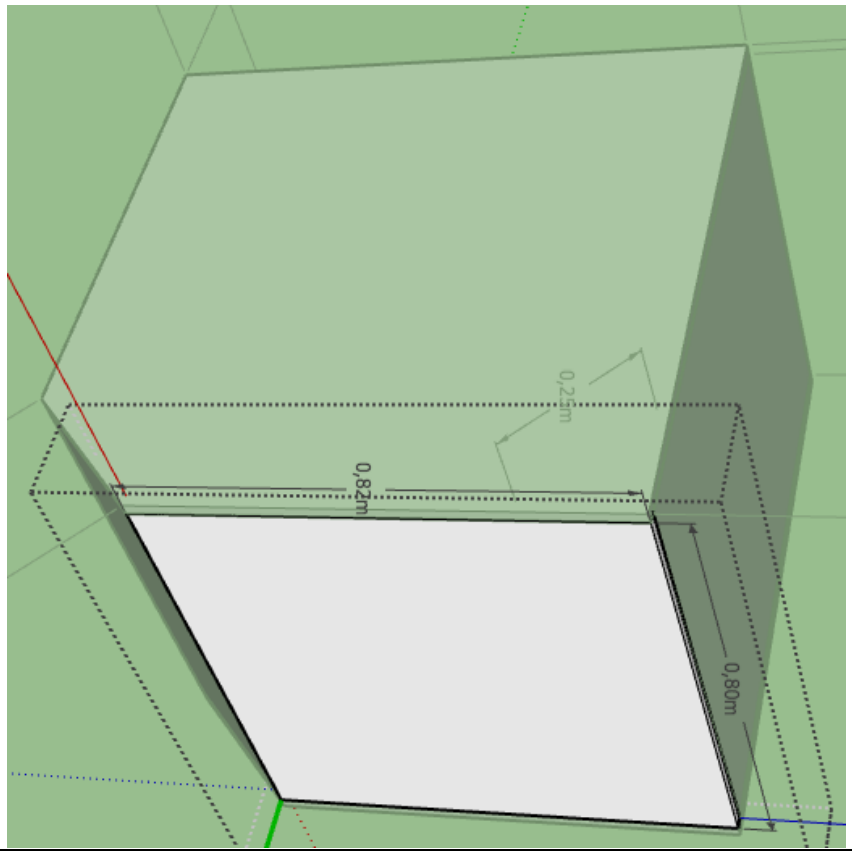
PLACA SUPERIOR 1 LAMINA 1,00m X 0,8m

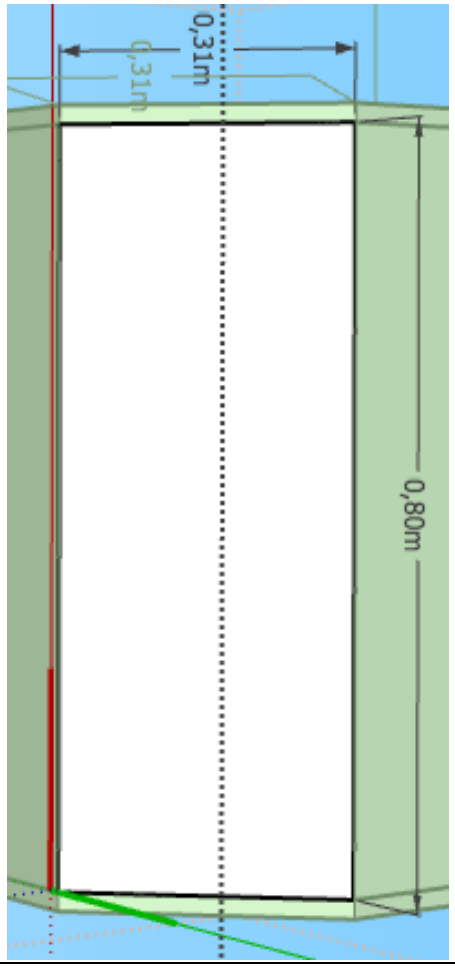
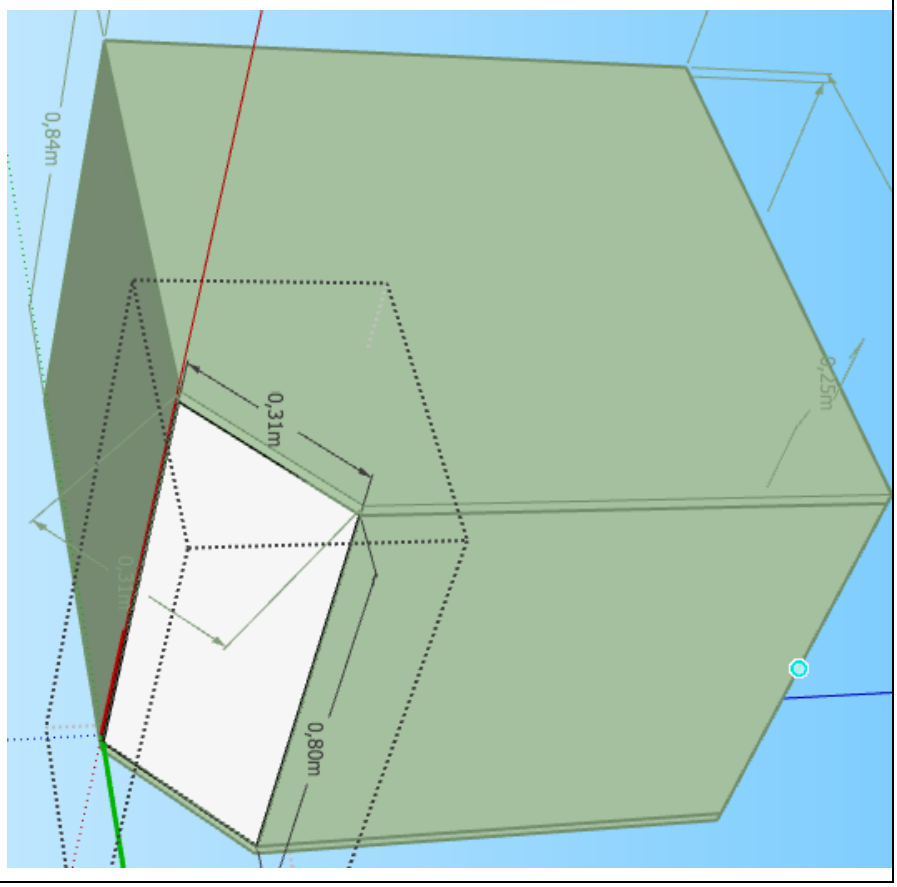




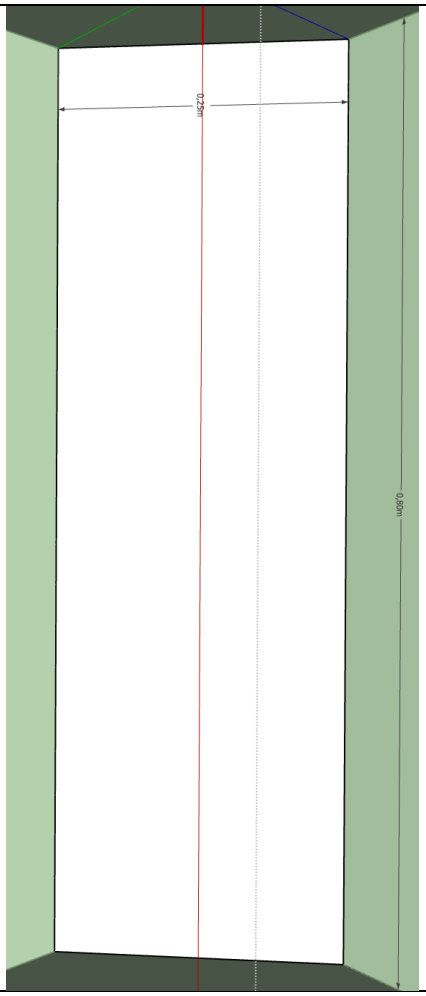
PLACA POSTERIOR 1 LAMINA 0,82mX 0,8m

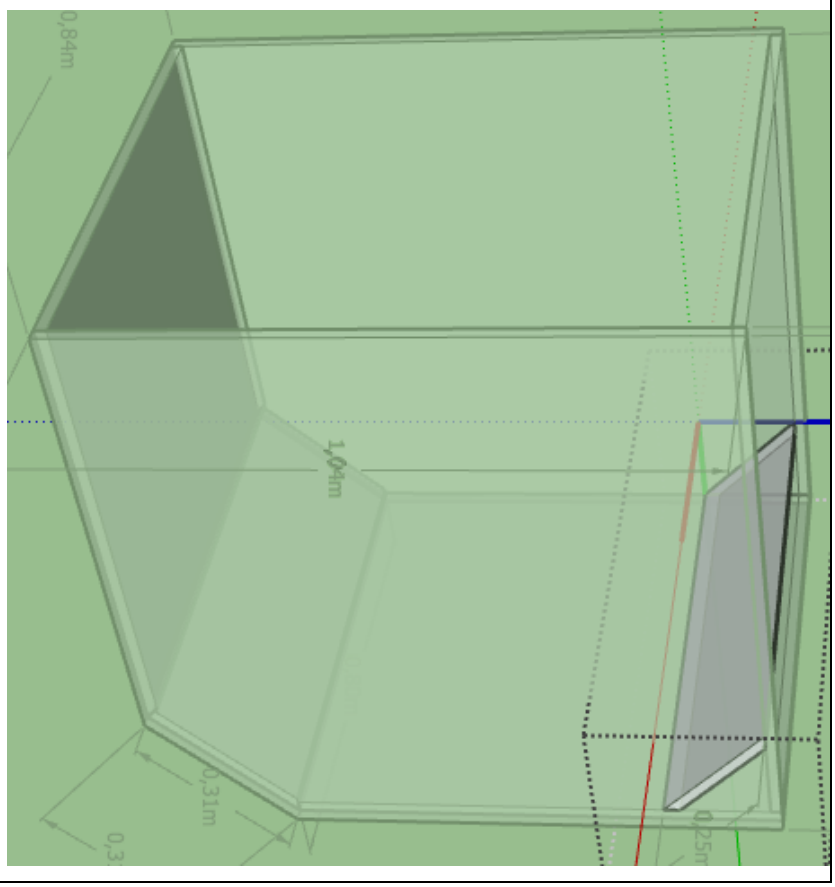




ANGULO INFERIOR 1 LAMINA 0,8mX 0,31m



ANGULO SUPERIOR 1 LAMINA 0,25mX 0,8m





F Anexo: Graficas Complementarias

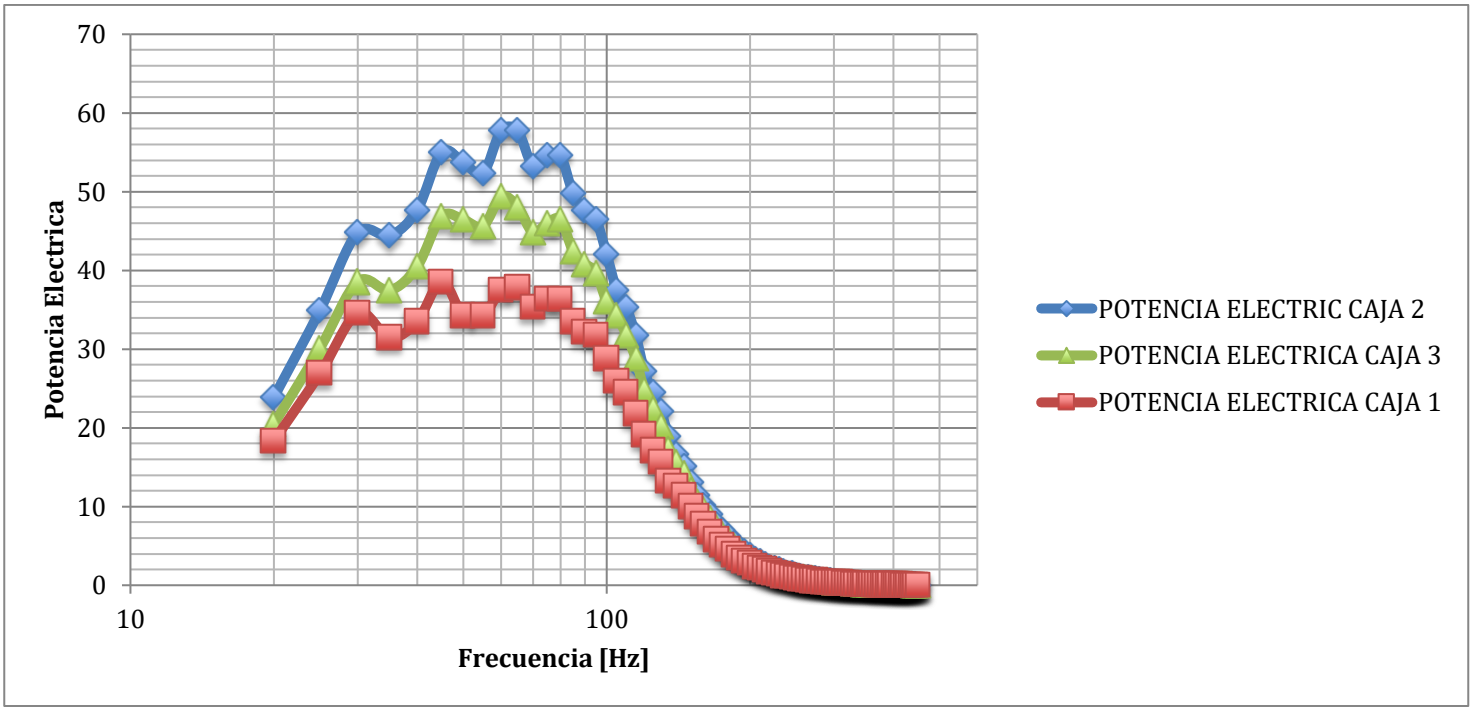


Grafico F-1: Potencia eléctrica de entrada al altavoz para cada geometría. La diferencia entre cada volumen es despreciable para esta grafica por lo que se muestra solo 3 resultados.

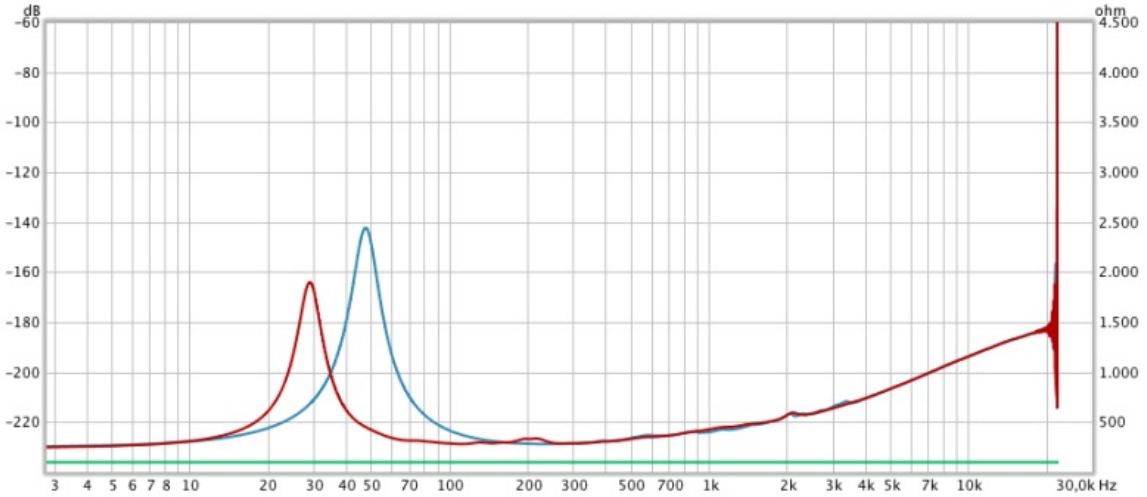


Grafico F-2: Medicion de impedancia con y sin masa (rojo y azul) del altavoz Beyma 15WR400

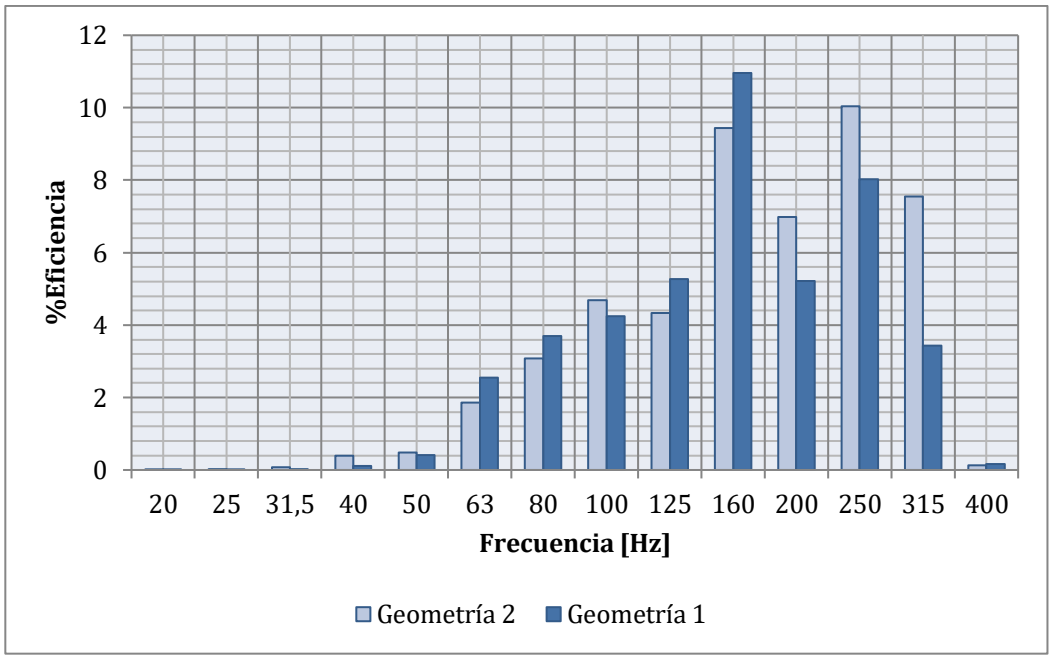


Grafico F-3: Comparación de eficiencia del volumen 1 geometría 1 y 2

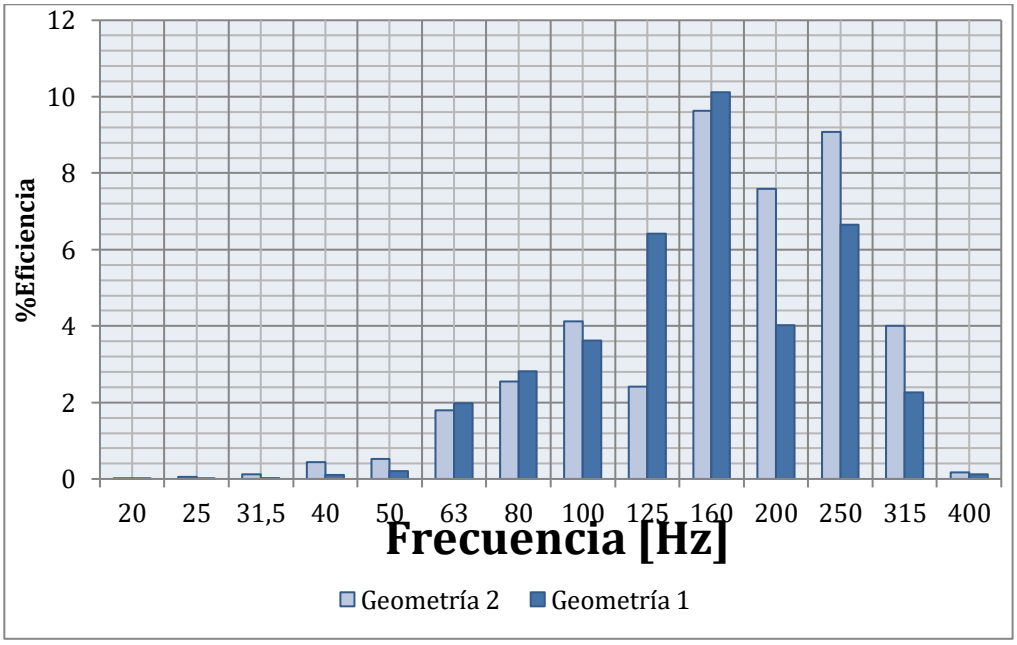


Grafico F-4: Comparación de eficiencia del volumen 2 geometría 1 y 2

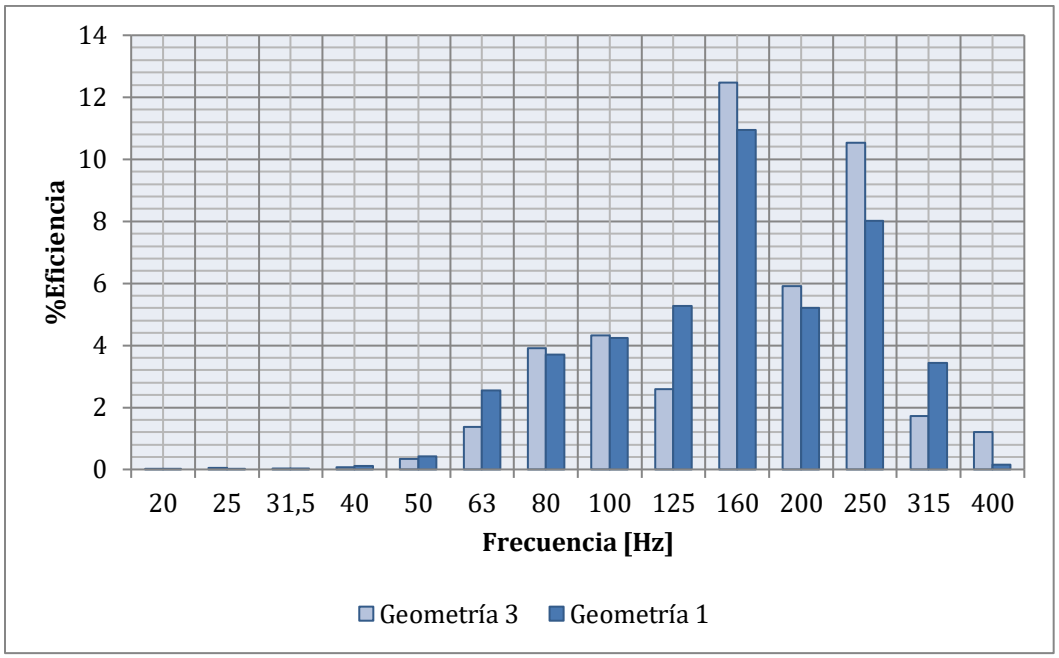


Grafico F-5: Comparación de eficiencia del volumen 1 geometría 1 y 3

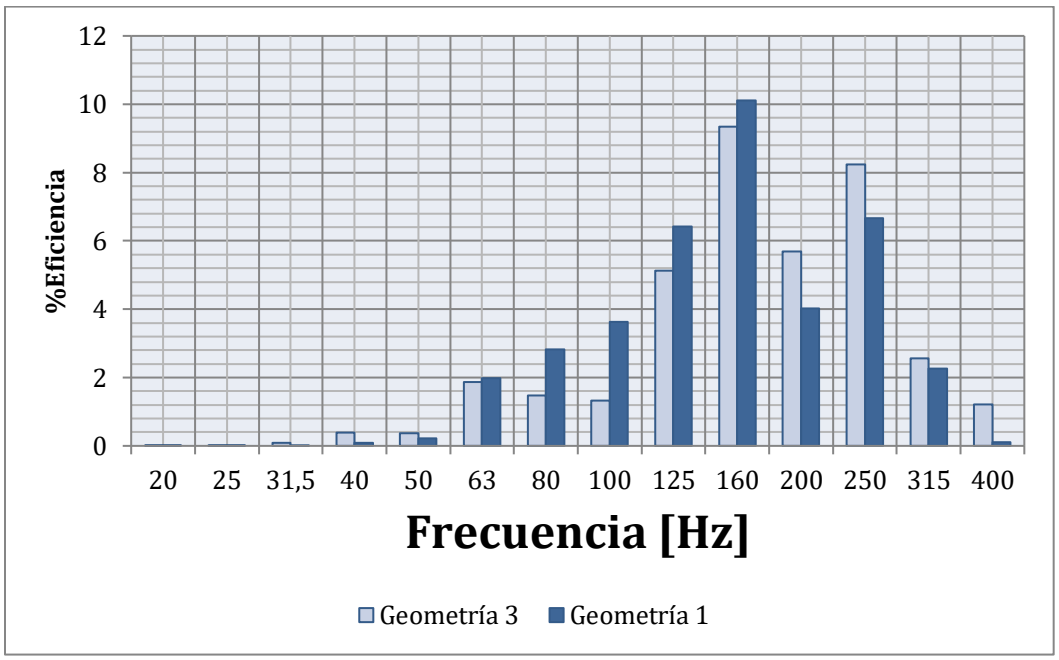


Grafico F-6: Comparación de eficiencia del volumen 2 geometría 1 y 3

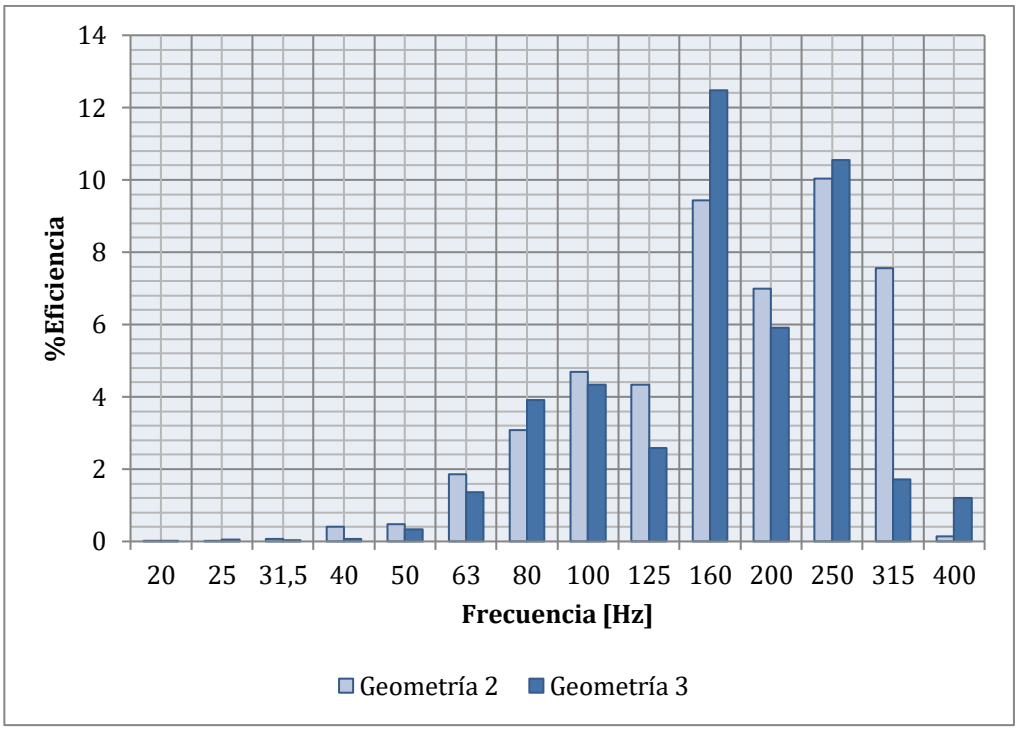


Grafico F-7: Comparación de eficiencia del volumen 1 geometría 2 y 3

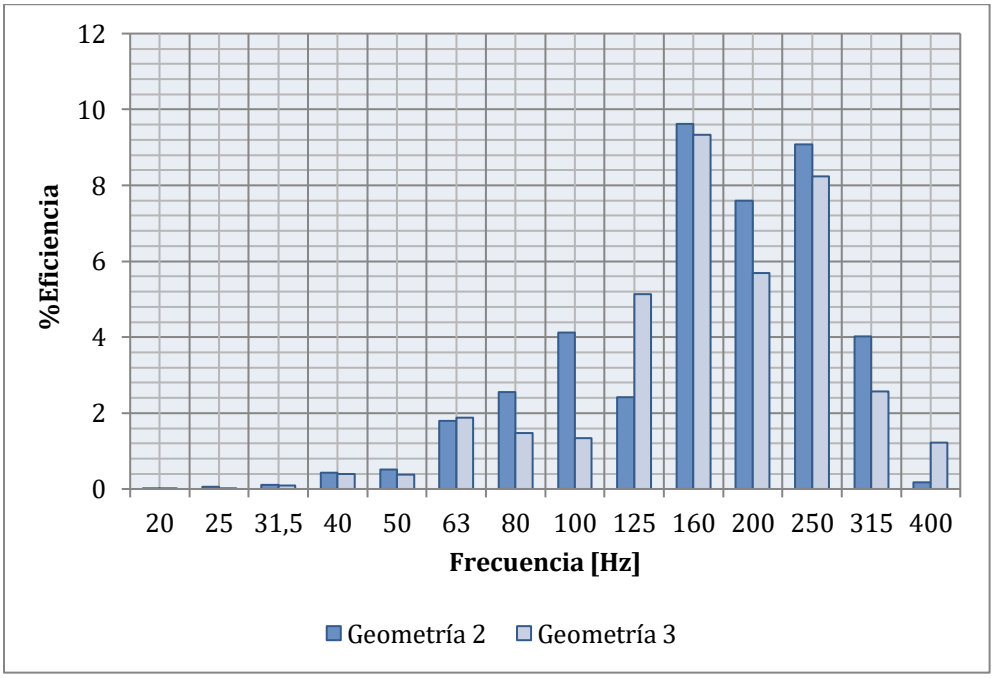


Grafico F-8: Comparación de eficiencia del volumen 2 geometría 2 y 3

G Anexo: Convergencia de Malla

El estudio de convergencia de malla para el análisis modal realizado sobre las cavidades acústicas bajo estudio, revelo que después de los 8 elementos por longitud de onda las frecuencias sobre las cuales se presenta la actividad modal para las cavidades, no presentan variaciones significativas. Los autores deciden entonces realizar el estudio con 12 elementos por longitud de onda ya que a pesar de ser despreciable la diferencia la carga computacional no representa ningún sacrificio para el proceso de simulación por este motivo se decidió hacer uso de una cantidad mayor de elementos por longitud de onda en virtud de la precisión de los resultados. La forma en que fueron calculados los tamaños de los elementos se da a partir de la ecuación H-1.

$$Tamao\ del\ elemento = \frac{c[m/s]}{\lambda_{max}[m] * \#elentos}$$

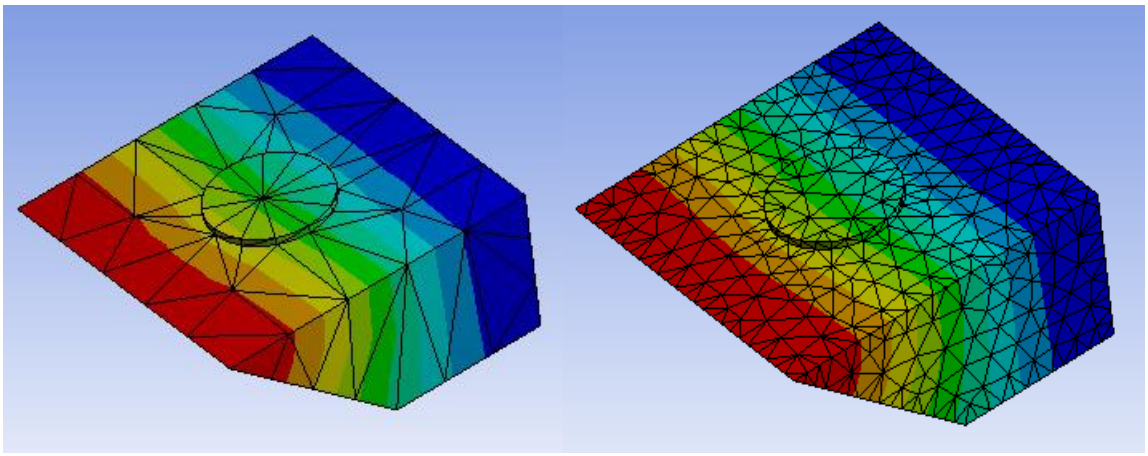
Donde c, es la velocidad del sonido, λ_{max} representa la longitud de onda de la máxima frecuencia a simular en el modelo, multiplicada por la cantidad de elementos deseados en la longitud de onda. Los resultados del estudio se presentan a partir de las tablas H-1 y H-2 para la cavidad trasera y la guía de onda respectivamente.

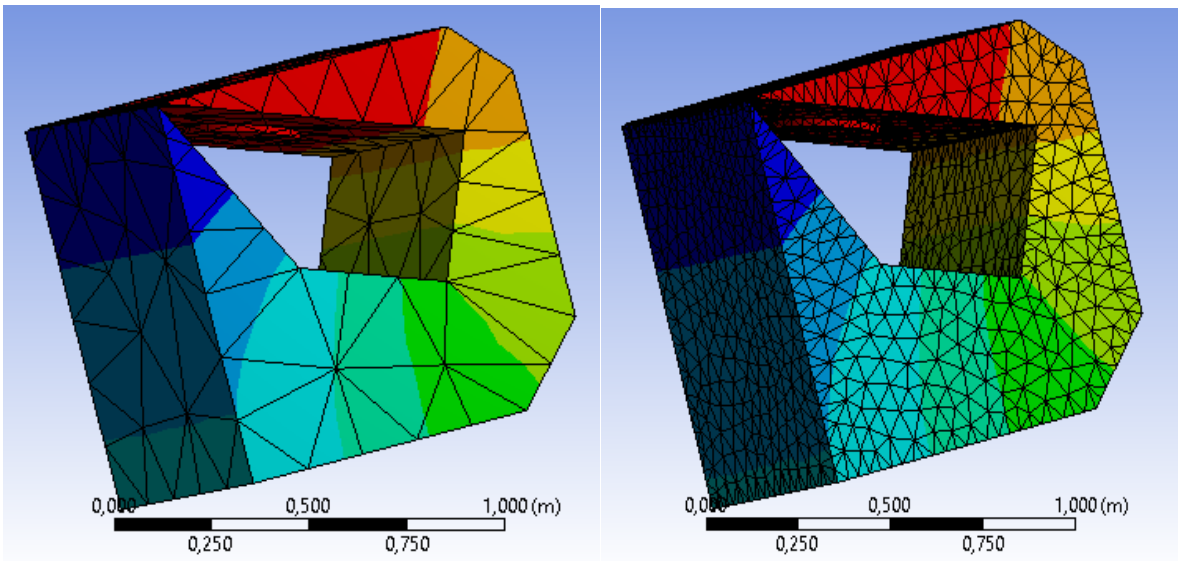
Modo	# de elementos - cavidad trasera						
	4 elementos	6 elementos	8 elementos	10 elementos	12 elementos	14 elementos	
1	216,12	216,1	216,08	216,08	216,07	216,06	Frecuencia [Hz]
2	266,88	266,79	266,72	266,69	266,68	266,67	
3	341,07	340,86	340,73	340,69	340,67	340,64	
4	439,02	438,4	438,39	438,23	438,17	438,16	
5	452,29	451,11	450,76	450,62	450,55	450,46	
6	--	499,35	498,77	498,56	498,46	498,36	

Tabla H-1

Modo	# de elementos - cavidad trasera						
	4 elementos	6 elementos	8 elementos	10 elementos	12 elementos	14 elementos	
1	54,621	54,581	54,486	54,481	54,453	54,441	**Frecuencia [Hz]**
2	123,59	123,36	123,19	123,17	123,1	123,05	
3	22,77	222,65	222,6	222,61	22,59	222,58	
4	227,24	227,17	227,01	227,05	227,01	226,99	
5	249,93	249,7	249,55	249,57	249,51	249,47	
6	279,63	279,49	278,68	278,61	278,38	278,24	
7	308,86	308,51	308,23	308,23	308,14	308,11	
8	345,14	344,48	343,99	343,92	343,81	343,75	
9	350,68	349,61	349,23	349,14	349	348,87	
10	120,52	409,91	409,23	409,2	409,02	408,9	
11	411,2	423,58	423,01	423,01	422,9	422,77	
12	424,95	431,22	430,72	430,71	430,58	430,54	
13	434,15	446,97	446,23	446,2	446,05	445,99	
14	449,66	464,81	464,23	464,25	463,76	463,57	
15	465,82	465,677	474,81	474,79	474,62	474,5	

Tabla H-2




0,000
0,500
1,000 (m)
0,250
0,750
0,000
0,500
1,000 (m)
0,250
0,750

H Anexo: Procedimiento para el análisis ANOVA.

RF	FUENTE DE LAS VARIACIONES	SUMA DE CUADRADOS (SC)	GRADOS DE LIBERTAD (gl)	MEDIA DE LOS CUADRADOS (CM)	F	VALOR CRITICO
	ENTRE GRUPOS	8,81753E-05	5	1,76351E-05	4,12393589	2,1
	INTRA GRUPOS	0,002822337	660	4,27627E-06		
	TOTAL	0,002910512	665			

Tabla H-1. Ejemplo tomado de los cálculos del ANOVA aplicado a las 6 iteraciones

En la tabla H-1 se aprecian seis columnas correspondientes a la fuente de las variaciones, que denomina las comparaciones realizadas entre los grupos de variación, la suma de cuadrados que representa la variabilidad de los resultados, los grados de libertad que se asumen a partir de la cantidad de grupos de población y la cantidad de datos en cada grupo, seguido a esto está la columna que representa el promedio de la variabilidad. Posteriormente se encuentra la columna F que representa el factor de variabilidad al que se desea llegar para compararlo con el valor critico que se encuentra en la última columna de la tabla.

El proceso algebraico al que recurre el análisis para determinar dichos valores parte de denominar los grupos de variación que en este caso corresponden a las respuestas en frecuencia de cada iteración a evaluar. Como se verá a lo largo del proyecto, son seis iteraciones que corresponden a la respuesta en frecuencia de la bocina cuyos factores de variación corresponden a la geometría y el volumen de la caja acústica o cavidad trasera del altavoz, a saber, tres geometrías y dos volúmenes por cada geometría. Partiendo de esto las muestras corresponden a los valores de presión sonora por cada frecuencia en el rango de interés del proyecto. Para obtener la suma de cuadrados entre grupos y la suma de cuadrados total se aplican las ecuaciones 1 a 4 que se muestran a continuación:

$$SC\ Entre\ Grupos = \sum G_n - \frac{(\sum g_n)^2}{\#total\ de\ mustras\ de\ la\ poblacion} \qquad H.Ecuación.1$$

donde G_n se expone a partir de la ecuación 2 y representa el promedio de la suma de cuadrados en cada grupo poblacional, que para el ejemplo corresponde a la suma de los cuadrados de los valores de presión sonora de la RF en cada iteración.

$$G_n = \frac{\sum m_i^2}{\#demustras\ del\ grupo} \qquad H.Ecuación.2$$

donde m_n es la muestra o valor de presión sonora de la frecuencia i; y el número de muestras del grupo es la cantidad de frecuencias que hicieron parte del análisis que para el ejemplo corresponde a 111. De la ecuación 1, g_n representa el promedio aritmético de los valores de presión sonora en cada grupo n, donde n representa cada iteración, así se muestra en la ecuación 3. Por último el número total de muestras de la población corresponde a la cantidad de muestras totales que hicieron parte del análisis. Son seis grupos poblacionales o RF que hacen parte de este ejemplo, cada uno con 111 datos para un total 666 muestras totales.

$$g_n = \frac{\sum m_i}{\#demustras\ del\ grupo} \qquad H.Ecuación.3$$

En cuanto a la suma de cuadrados totales se calculó a partir de la ecuación 4 en donde la denominación de cada variable es la misma que en las ecuación 1.

$$SC\ total = \sum g_n - \frac{(\sum g_n)^2}{\#total\ de\ mustras\ de\ la\ poblacion} \qquad H.Ecuación.4$$

La suma de cuadrados intra grupo corresponde a la resta lineal de SC entre grupos y SC total.

$$SC\ intra\ grupos = SC\ total - SC\ Entre\ Grupos$$

Los grados de libertad se establecen a partir de la cantidad de grupos y de muestras que hicieron parte del análisis.

$$gl\ entre\ grupos = \#de\ grpos - 1;$$
$$gl\ total = \ \#total\ de\ mustras\ de\ la\ poblacion - 1;$$
$$gl\ intra\ grupos = \ gl\ total - \ gl\ entre\ grupos$$

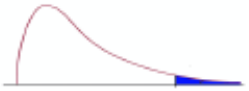
La media de los cuadrados en cada caso se da a partir de:

$$CM\ entre\ grupos = \ SC\ entre\ Grupos/gl\ entre\ grupos$$
$$CM\ intra\ grupos = \ SC\ intra\ Grupos/gl\ intra\ grupos$$

El factor F corresponde la división entre las medias de los cuadrados y el valor critico se establece a partir de las tablas de significancia, la cual se presenta en la tabla H-2, para un valor de significancia igual al 5% o 0,05.

La forma en que se identifica el valor critico se da a partir de la división de los grados de libertad entre grupos (numerador) e intra grupos (denominador). El numerador es la posición de las columnas y el denominador es la posición de cada fila.

Distribución F 0.05



En las columnas se encuentran los valores F que corresponden al área 0.05 a la derecha
En las columnas se encuentran los grados de libertad del numerador
En los renglones se encuentran los grados de libertad del denominador.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	15	20	24	30	40	60	120
1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9	243.0	243.9	245.9	248.0	249.1	250.1	251.1	252.2	253.3
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.40	19.41	19.43	19.45	19.45	19.46	19.47	19.48	19.49
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.76	8.74	8.70	8.66	8.64	8.62	8.59	8.57	8.55
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.94	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.70	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.03	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.60	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.31	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.10	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2.79	2.75
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.94	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.82	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53	2.49	2.45
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.72	2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.43	2.38	2.34
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.63	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.57	2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27	2.22	2.18
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.51	2.48	2.40	2.33	2.29	2.25	2.20	2.16	2.11
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.46	2.42	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15	2.11	2.06
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.41	2.38	2.31	2.23	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.37	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.02	1.97
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.34	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.31	2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99	1.95	1.90
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.28	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.26	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.24	2.20	2.13	2.05	2.01	1.96	1.91	1.86	1.81
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.22	2.18	2.11	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.79
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.20	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.18	2.15	2.07	1.99	1.95	1.90	1.85	1.80	1.75
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.17	2.13	2.06	1.97	1.93	1.88	1.84	1.79	1.73
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.15	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77	1.71
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.14	2.10	2.03	1.94	1.90	1.85	1.81	1.75	1.70
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.13	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.04	2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.95	1.92	1.84	1.75	1.70	1.65	1.59	1.53	1.47
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.18	2.09	2.02	1.96	1.91	1.87	1.83	1.75	1.66	1.61	1.55	1.50	1.43	1.35

Para calcular el valor F en excel, se utiliza la función de la distribución F inversa

=distr.f.inv(0.05; gl num; gl den)

© Ing. Jesús Alberto Mellado Bosque

Tabla H-1. Distribución F con nivel de significancia 0.05

J ANEXO. Linealización de la Respuesta en Frecuencia

Este proceso consiste en la obtención de los valores de presión sonora a partir de los niveles logarítmicos de la misma en la respuesta en frecuencia, ecuación 1.

$$p_i = p^{\frac{SPL}{20}} * p_{ref}\ [Pa] \qquad \textit{J.Ecuación1}$$

Luego de haber obtenido la presión sonora generada en cada frecuencia se hace una Promediación aritmética a partir de la ecuación 2

$$\bar{p} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} p_i \quad [Pa] \qquad \textit{J.Ecuación2}$$

Por último se obtiene el valor SPL de la presión sonora promediada aritméticamente y con este valor se realizan los ajustes a la RF obtenida del driver de manera tal que esta última se ajuste al nivel promedio, esta relación se consigue a partir de las ecuaciones 3 y 4.

$$SPL_{adj,i} = SPL_i - \overline{SPL} \quad [dB] \qquad \textit{J.Ecuación 3}$$

$$SPL_{RF,i} = SPL_{rf,i} - SPL_{adj,i} \qquad \textit{J.Ecuación 4}$$

Con ello se obtiene el SPL ajustado del driver y posteriormente se obtiene la RF de las bocinas sin fluctuaciones producto del driver. Seguido a este procedimiento se calcula el coeficiente de variación *Cv* que permite identificar la dispersión de la presión sonora a partir de las mediciones hechas por ambos micrófonos en instantes de tiempo diferentes. Esto se logró a partir del cálculo de la desviación estándar de la presión sonora, por lo cual fue necesario usar nuevamente los valores de presión sonora lineales (Colorado, 2018). Se

siguió entonces la ecuación 5 para el cálculo de la desviación estándar típica de presión sonora.

$$DE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(p_i - \bar{p})^2} \quad [Pa]$$

J.Ecuación 5

Posterior a este cálculo se determinó el coeficiente de variación a partir de la ecuación 6

$$C_v = \left(\frac{S}{\bar{p}}\right) * 100 \quad [Pa]$$

J.Ecuación 6

K ANEXO. Norma ISO 3744

Para esto la normativa exige ciertas condiciones de medición que disminuyen la probabilidad de error en la medición y generan la fidelidad requerida en los datos, estas condiciones se muestran a continuación:

- El nivel de presión sonora del ruido de fondo debe ser de al menos 6 dB, y preferiblemente más de 15 dB, por debajo del nivel de presión sonora de la fuente bajo estudio. Para las mediciones en bandas de frecuencia, este requisito se debe cumplir en cada banda de frecuencia dentro del rango de frecuencia de interés. Si se cumple este requisito, se cumplen los criterios de ruido de fondo de la Norma Internacional.

- Antes y después de cada serie de mediciones, se realiza la calibración del micrófono para verificar todo el sistema de medición. La diferencia entre las lecturas realizadas antes y después de cada serie de mediciones debe ser menor o igual a 0,5 dB. Si se excede este valor, se descartarán los resultados de la serie de mediciones.

- La fuente debe instalarse con respecto al plano o los planos reflejantes, como si estuvieran en uso normal, además debe ubicarse a una distancia suficiente de cualquier pared o techo reflectante o cualquier objeto que genere reflexiones.

- Se debe delinear una caja de referencia hipotética definida por las dimensiones externas que encierran la fuente bajo prueba.

- Las posiciones del micrófono en las que se miden los niveles de presión sonora se encuentran en la superficie de medición, una superficie hipotética del área S que envuelve la caja de referencia y termina en el plano reflejante.

- El micrófono debe estar orientado de modo que la dirección de referencia del micrófono sea normal a la superficie de medición.

- Para la fuente de ruido bajo prueba adyacente a un plano reflectante, en este caso el suelo, los micrófonos se ubicarán en 10 posiciones numeradas del 1 al 10, cuyas coordenadas se proporcionan en la Tabla 4-2 y se ilustran en la Figura 4-8. Adicionalmente el diagrama de las posiciones se consigna en el Anexo G de este documento.

A continuación se expone el cálculo de la caja de referencia y cálculo de las posiciones de micrófono a partir de las ecuaciones expuestas por la norma ISO 3744.

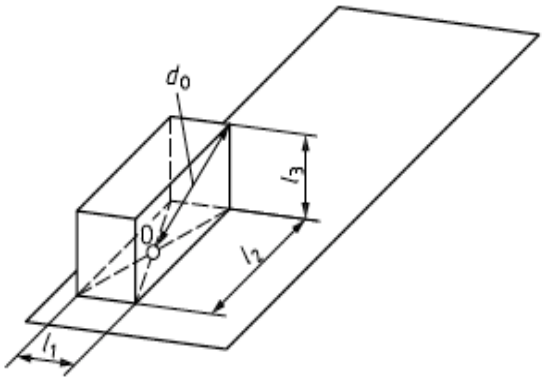


Figura K-0-1 Caja de referencia Imágenes tomadas del documento

Caja de Referencia

$$d_0 = \sqrt{\left(\frac{l_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{l_2}{2}\right)^2 + l_3^2}$$

$$d_0 = \sqrt{\left(\frac{0{,}84m}{2}\right)^2 + \left(\frac{1{,}02m}{2}\right)^2 + 1{,}04^2 m}$$

$$d_0 = \sqrt{1{,}5181} = 1.232m$$

$$r = 2d_0 = 2 * 1.232 = 2.46$$

Posición	x/r	y/r	z/r	X [m]	Y [m]	Z [m]
1	0,16	-0,96	0,22	0,392	-2,352	0,539
2	0,78	-0,60	0,20	1,911	-1,47	0,49
3	0,78	0,55	0,31	1,911	1,3475	0,7595
4	0,16	0,90	0,41	0,392	2,205	1,0045
5	-0,83	0,32	0,45	-2,0335	0,784	1,1025
6	-0,83	-0,40	0,38	-2,0335	-0,98	0,931
7	-0,26	-0,65	0,71	-0,637	-1,5925	1,7395
8	0,74	-0,07	0,67	1,813	-0,1715	1,6415
9	-0,26	0,50	0,83	-0,637	1,225	2,0335
10	0,10	-0,10	0,99	0,245	-0,245	2,4255

Tabla K-1 Coordenadas y posiciones de micrófono según norma ISO 3744

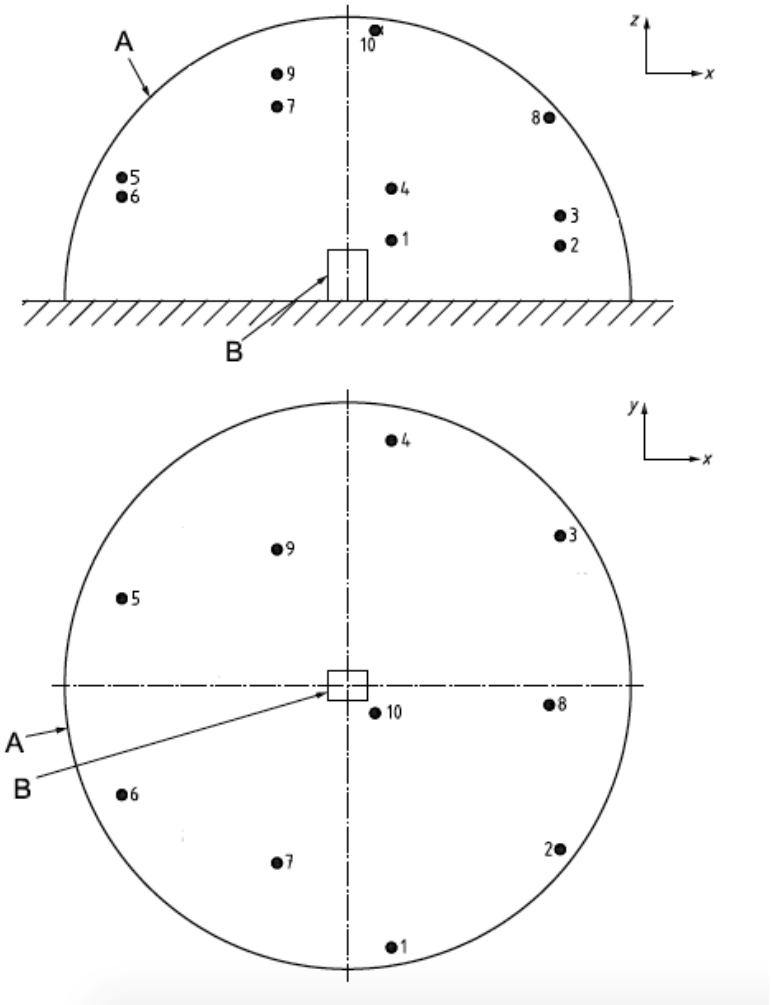


Figura K-0-2 Coordenadas y posiciones de micrófono según norma ISO 3744

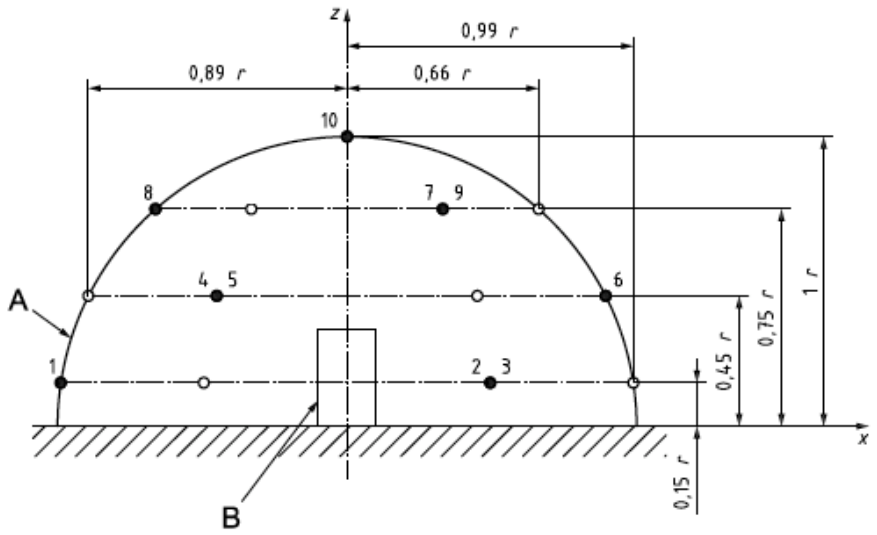


Figura K-0-3 Coordenadas y posiciones de micrófono según norma ISO 3744

- Posiciones de Micrófono

A Superficie de Medición

B Caja de Referencia

En la tabla 4-2 se muestran las coordenadas de las posiciones consignadas en las tres primeras columnas [x/r],[y/r] y [z/r], teniendo como punto cero o de origen la caja de referencia sobre la cual se hace la medición. Las tres columnas siguientes en la misma tabla representan las posiciones de micrófono enumeradas de 1 a 10 como lo propone la norma. Para obtener estos valores se multiplica el radio de la superficie de medición r por la coordenada correspondiente al eje y la posición. De allí se entiende que el nombre de las tres primeras columnas de la tabla 4-2 sea el proceso contrario, es decir que la coordenada corresponde a la división entre la posición del micrófono y el radio de la superficie de medición.

L ANEXO. Materiales Disponibles de Construcción

Para suplir la necesidad de la variación de las cavidades acústicas al interior del sistema y por facilidades y practicidad al momento de la construcción del mismo, se optó por construir una guías de onda en las cuales se ubicaron y se intercambiaron cada una de las seis cavidades mencionadas. Por tanto, el costo de adquisición de material terminó siendo más alto de lo que en un principio se tenía presupuestado. Teniendo en cuenta lo anterior, existió una limitante en cuanto a la elección del material para el ensamble del sistema, sin embargo, todas las opciones de la tabla fueron contempladas.

Material	Precio por lámina	Precio por 4 láminas
MDF crudo 18 mm 244 x 183 – 740	$98.500 COP	$394.000 COP
MDF Melamina 18mm 183x244cm Ranurado	$143.440 COP	$573.760 COP
MDF Melamina Hr 183X250Cm 15Mm Fresno Humo	$209.200 COP	$836.800 COP
MDP Melamina 183X250 18 mm Roble	$211.650 COP	$846.600 COP
Aglomerado crudo 18 mm 244 x 183	$79.830 COP	$319.320 COP
Aglomerado Melamina 15mm 183x250 Cedro	$142.405 COP	$569.620 COP
Tríplex Fenólico 18mm 122x244	$109.240 COP	$436.960 COP

Tabla L-1 Cotización de materiales para la construcción del sistema

Al observar las tablas de propiedades, se puede notar que son materiales que presentan varias similitudes, sin embargo, se produjo una decantación hacia el MDF por presentar una mayor maleabilidad, lo cual era indispensable pues una de las cavidades acústicas presenta una curvatura la cual es más factible realizarla en este tipo de material, también presenta una mayor resistencia a la flexión por lo que se consideró un punto a favor. Además, entre las recomendaciones que se dan al momento de adquirir el aglomerado se menciona no hacer uso del material en exteriores, y teniendo en cuenta que las mediciones efectuadas al

sistema se realizaron al aire libre para tener mejores condiciones acústicas se concluyó que este material no era viable.

- **Propiedades físico-mecánicas del MDF**

PROPIEDADES	MÉTODO DE REFERENCIA	UNIDAD	VALORES		TOLERANCIA
Espesor		mm	15	18	± 0,20
Densidad	EN 323	[kg/m^3]	740	730	± 20
Flexión	EN 310	[N/mm^2]	30	30	± 5
Tracción	EN 319	[N/mm^2]	0,75	0,75	± 0,10
Extracción tornillo canto	EN 320	[N]	Min. 1000	Min. 1000	-
Hinchamiento 24 horas	EN 317	[%]	Max.12	Max.12	-
Humedad	EN 322	[%]	8	8	± 3
Formato		mm	1520 x 2440		

Tabla L-2 propiedades fisicomecánicas del MDF

- **Propiedades físico-mecánicas del aglomerado**

ESPESOR	[mm]	9	12	15	18	24	32
DENSIDAD	[Kg/m^3]	660 ± 20	640 ± 20	620 ± 20	610 ± 20	590 ± 20	570 ± 20
FLEXION	[N/mm^2]	16 ± 1,5	16 ± 1,5	15 ± 1,5	15 ± 1,5	15 ± 1,5	13 ± 1,5
TRACCION Perpendicular	[N/mm^2]	0,50 ± 0,12	0,50 ± 0,12	0,50 ± 0,15	0,50 ± 0,15	0,45 ± 0,15	0,40 ± 0,15
TORNILLO PERPENDICULAR	[N]	---	---	min. 900	min. 900	min. 900	min. 900
TORNILLO PARALELO	[N]	---	---	min. 700	min. 700	min. 700	min. 700
HINCHAM. 24 HORAS	[%]	Max. 25	Max. 25	Max. 25	Max. 25	Max. 25	Max. 25
HUMEDAD	[%]	8 ± 3	8 ± 3	8 ± 3	8 ± 3	8 ± 3	8 ± 3
TEST TOLUENO	mm	min. 160	min. 160	min. 160	min. 160	min. 160	min. 160

Tabla L-3 propiedades fisicomecánicas del aglomerado

Table 1. Sound Absorption coefficient of fibre boards of different densities.

Sample No	Density	Thickness	FREQUENCY (Hz)											NRC
	kg/m^3	mm	0	125	250	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	
1	810	19	0	0.01	0.05	0.08	0.11	0.13	0.22	0.22	0.3	0.25	0.22	0.12
2	770	19	0	0.01	0.06	0.09	0.11	0.13	0.22	0.24	0.26	0.27	0.27	0.12
3	670	18	0	0.04	0.09	0.11	0.15	0.21	0.25	0.28	0.31	0.32	0.31	0.16
4	550	22	0	0.01	0.11	0.12	0.18	0.29	0.32	0.33	0.32	0.36	0.39	0.20
5	520	22	0	0.1	0.11	0.14	0.19	0.34	0.35	0.36	0.41	0.41	0.43	0.2
6	480	18	0	0.01	0.11	0.14	0.21	0.28	0.34	0.35	0.35	0.4	0.42	0.22
7	380	25	0	0.11	0.16	0.17	0.31	0.33	0.33	0.32	0.34	0.45	0.42	0.24
8	300	18	0	0.13	0.14	0.13	0.21	0.41	0.39	0.53	0.43	0.45	0.54	0.22
9	260	25	0	0.16	0.17	0.2	0.2	0.5	0.45	0.46	0.5	0.54	0.56	0.26
10	240	18	0	0.14	0.16	0.2	0.3	0.4	0.4	0.41	0.44	0.46	0.47	0.25
11	210	22	0	0.16	0.17	0.2	0.25	0.4	0.45	0.46	0.5	0.51	0.66	0.27
*	-	-	0	0.1	0.2	0.3	0.3	-	0.5	-	-	-	0.5	-
**	-	-	0	0.05	0.1	0.2	0.3	-	0.5	-	-	-	-	-

Tabla L-4 coeficiente de absorción en diferentes densidades

La tabla anterior muestra como densidades menores del material poseen un mayor coeficiente de absorción, sin embargo, el uso de material con alta densidad obedece a lograr tener una estructura mucho más sólida y rígida (teniendo en cuenta que se compone de partes acopladas) previendo las resonancias que pueda generar la baja frecuencia cuando se emplean niveles altos de potencia. No obstante evitar ondas estacionarias dentro del sistema también fue un punto a considerar por lo que el grosor utilizado fue considerado como compensación a la decisión tomada anteriormente.

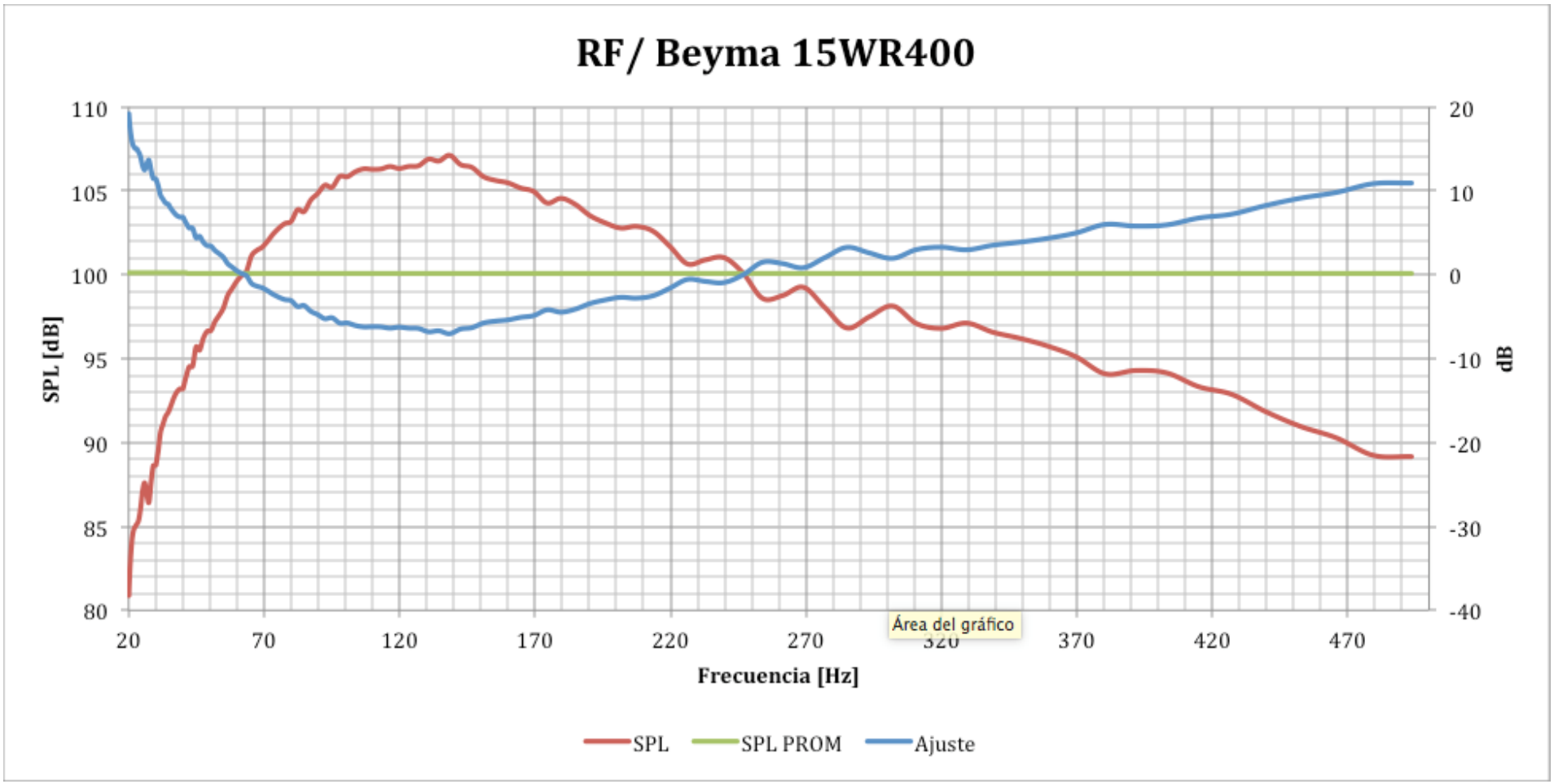
M ANEXO. Respuesta en Frecuencia del Altavoz 15WR400

El resultado que se desea exponer al lector es la respuesta en frecuencia del altavoz Beyma 15WR400 radiando libremente sin ningún tipo de sistema acústico acoplado, es decir la respuesta propia del altavoz. En el grafico 1 se muestra en color rojo la RF del altavoz en escala lineal, en color azul el ajuste necesario para linealizar la respuesta en frecuencia y en color verde se observa el SPL promedio de la respuesta en frecuencia obtenida (Colorado, 2018). El SPL promedio se obtiene a partir de la ecuación *J1* y *J2*, con el cual se logra el ajuste de la RF a partir de la ecuación *J3*. Posteriormente para analizar únicamente la respuesta en frecuencia de la bocina se hace uso del ajuste de la RF (línea de color azul) a partir de la ecuación *J4*. Nuevamente se aclara que este proceso se realiza para poder analizar el comportamiento de la bocina únicamente, extrayendo la influencia que tiene el altavoz sobre dicho sistema acústico. A partir de este gráfico se evidencia que el comportamiento de la respuesta en frecuencia no presenta variaciones significativas sobre el rango de operación. Dicha apreciación se da basándose únicamente en el análisis grafico de la respuesta en frecuencia. Posterior a la banda de 200 Hz el altavoz presenta un rizado a medida que disminuye el SPL emitido por el dispositivo. Con el ajuste calculado se espera disminuir la influencia de este rizado sobre la respuesta de la bocina, por lo cual será posible evidenciar si existe rizado por parte de la bocina y la influencia que esta podría tener sobre la RF del sistema acoplado.

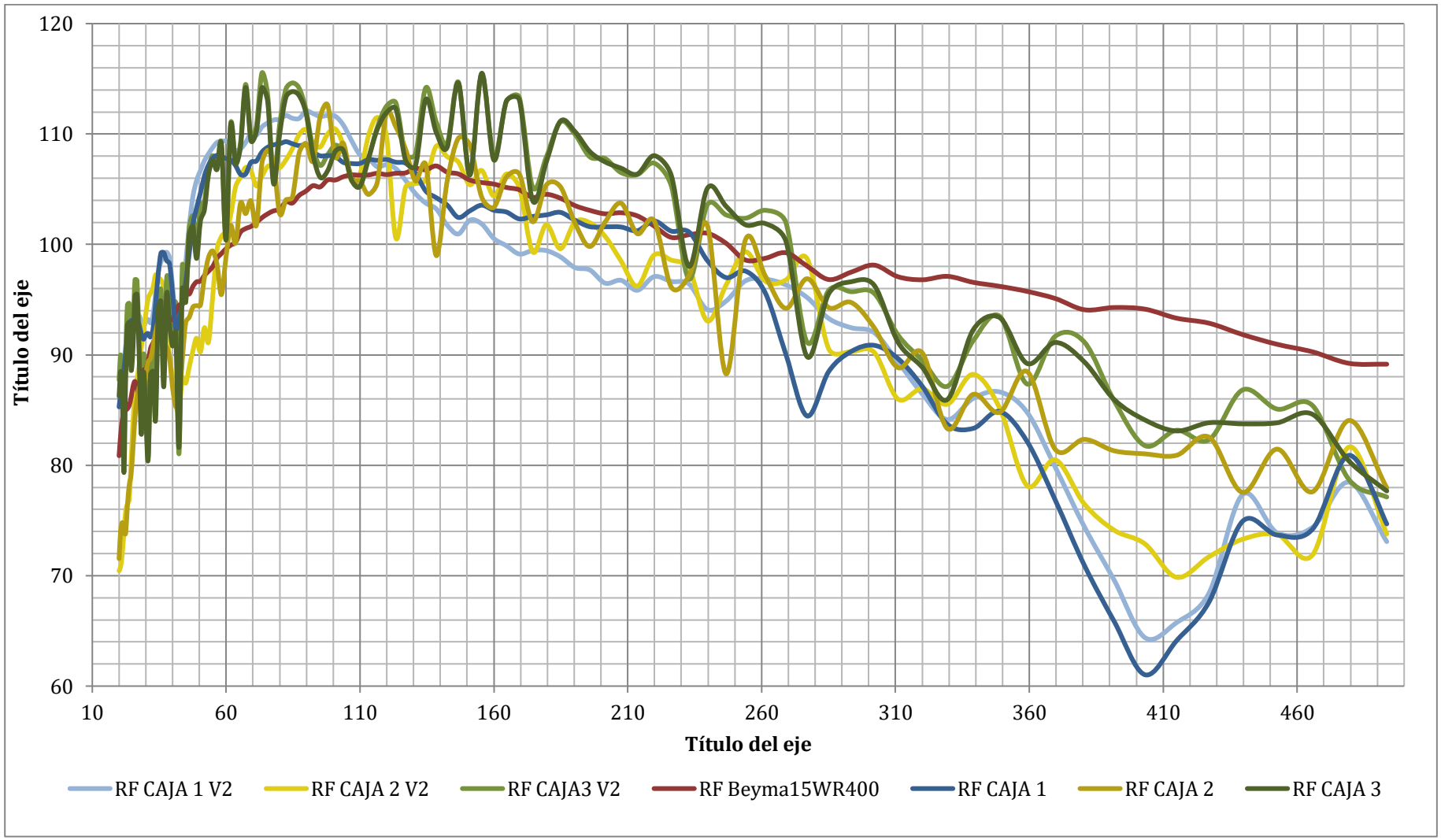
En el grafico 2 se muestra la respuesta en frecuencia de cada geometría y cada volumen en contraste con la respuesta en frecuencia del altavoz radiando al aire libre (línea de color rojo). En este análisis la RF de la bocina NO se ha ajustado, por lo que en el resultado que allí se muestra, se analiza la influencia que ha tenido todo el sistema acoplado sobre el altavoz. Los autores resaltan de este grafico que el nivel de presión sonora de cada bocina, en el rango de frecuencias entre 60 Hz a 130 Hz aproximadamente, es mayor al del altavoz por sí solo, lo que sugiere que en esta sección la presencia de la bocina podría estar influenciando el nivel de presión sonora del dispositivo. Entre 150 Hz y 270 Hz protagoniza la respuesta en frecuencia de la geometría 3 volumen 1 y 2 (líneas de color

verde oscuro y claro respectivamente), en donde ambas RF se mantienen por encima del SPL registrado por el altavoz radiando libremente. En este mismo rango, el comportamiento de las otras dos geometrías demuestra un nivel de presión sonora menor en comparación con el del altavoz. Cabe resaltar que la geometría 2 volumen 1 (color amarillo oscuro) presenta un nivel de presión sonora muy próximo al del altavoz radiando libremente, junto con algunas fluctuaciones a lo largo del espectro. Luego de 270 Hz todas las respuestas en frecuencia se mantienen por debajo del SPL registrado únicamente por el altavoz. Por su parte, la geometría 1 volumen 1 y 2 (línea de color azul oscuro y claro respectivamente), registra niveles de presión sonora inferiores al del altavoz a partir de 130 Hz, con una pequeña excepción para el volumen 1 de esta geometría en un rango cercano a los 220 Hz y 230 Hz en donde demuestra igualar la RF del altavoz. Por último se evidencia el rizado en las RF de las geometrías 1 y 2 en comparación con el del altavoz únicamente. Esto sugiere que la presencia de la bocina en cada caso aumenta los niveles picos y valle del sistema acoplado, sin embargo, este no parece ser el caso de la geometría 1 la cual no genera tantas fluctuaciones en comparación con las otras dos geometrías.

Los resultados de cada respuesta en frecuencia, incluyendo los de los gráficos 5-1 y 5-2 fueron obtenidos a partir de un barrido de frecuencias desde 20 Hz hasta 500 Hz, generado por el software de licencia libre REW. El diagrama de conexión al igual que la configuración del software se muestran en la sección 4.2.1 del apartado cuarto. El micrófono fue situado a 1 m del altavoz para cada RF mostrada en el documento, procurando seguir las recomendaciones hechas por la norma IEC 60268-5 expuestas en la sección 2.3.2 del marco normativo de este documento.



Gráfica M-1 respuesta en frecuencia beyma



Gráfica M-2 respuesta en frecuencia para cada geometría y volumen

N ANEXO. Cálculo de Eficiencia

Para obtener el porcentaje de eficiencia es necesario calcular previamente la potencia eléctrica de entrada al altavoz, a partir de la ecuación 48 y la potencia acústica emitida por el sistema, por medio del proceso expuesto por la norma ISO 3744 cuyas ecuaciones de cálculo en este documento corresponden a las ecuaciones 49 a 51. A continuación se muestra un ejemplo de cálculo para la banda de frecuencia de 100 Hz.

$$P_{ein} = \frac{17{,}35V^2}{2 * 5{,}5} = 27{,}4\ watts$$

El valor del voltaje corresponde al promedio de los valores de voltaje de entrada al altavoz que conforman la banda de 100 Hz. Por otro lado, se expresa el valor del SPL promediado espacialmente según el procedimiento de la norma. En la ecuación del nivel de potencia acústica se observa los literales s, que corresponden a la superficie de referencia que según la norma corresponde a $2\pi r^2$, en donde r es aproximadamente 2,5m, la obtencion de este valor se expone en el Anexo G; y s_0 como superficie de referencia establecida por la norma como 1m

$$\overline{L_p} = 103{,}88dB$$

$$L_W = \overline{L_p} + 10 * Log_{10}\left(\frac{s}{s_0}\right) \quad [dB]$$

$$L_W = 103{,}88dB + 10 * Log_{10}\left(\frac{39{,}2}{1m}\right) = \ 119{,}81\ [dB]$$

Posteriormente se obtiene el valor de potencia acústica y finalmente se genera la relación de potencias que corresponde al porcentaje de eficiencia.

$$P_A = 10^{-12} * 10^{\frac{L_W}{10}}$$

$$P_{Aout} = 10^{-12} * 10^{\frac{119{,}81}{10}} = 0{,}96\ watts$$

$$\%Eff = \frac{P_{Aout}}{P_{ein}} * 100$$

$$\%Eff = \frac{0{,}96\ watts}{27{,}4\ watts} * 100 \approx 3{,}5\%$$

El valor de potencia eléctrica obtenido en la geometría 1 es de 27,4 watts y el valor de potencia acústica obtenida para esta misma banda es de 0,96 watts. A partir de la relación porcentual de estos dos valores se obtiene el valor de la eficiencia, que para el caso de la banda de 100 Hz de la geometría 1 volumen 1es de 3,5%. Este mismo procedimiento se efectúa sobre todas las bandas de tercio de octava obteniendo así la respuesta de eficiencia que se muestra en la gráfica 7. En la tabla N-1 se observa los valores obtenidos del proceso anteriormente descrito aplicado a las bandas de tercio de octava de la geometría 1 volumen 1, en el resto de casos debe entenderse que el procedimiento fue el mismo.

Frecuencia [Hz]	Vin	Pein[w]	Lp(prom.esp) [dB]	Lw[dB]	Paout [w]	%Eficiencia
20	14,2	18,33090909	61,72837665	77,66123732	5,83611E-05	0,000318376
25	17,2	26,89454545	76,18476851	92,11762918	0,001628407	0,006054785
31,5	19,05	33,00954545	82,44375129	98,37661196	0,006881153	0,020845948
40	19,46	34,51393939	89,12383782	105,0566985	0,032038328	0,092827214
50	19,8	35,66909091	92,70641199	108,6392727	0,073101665	0,204944008
63	20,13	36,85878788	102,5258658	118,4587264	0,701249625	1,902530347
80	19,5	34,59272727	103,7891853	119,722046	0,938003798	2,711563591
100	17,35	27,49681818	103,8853883	119,818249	0,959013886	3,487726761
125	13,87	17,71961039	104,4570914	120,389952	1,093944283	6,173636211
160	9	7,530497727	102,71248	118,6453407	0,732038743	9,720987497
200	6,056	3,08649798	94,83900934	110,77187	0,119450233	3,870089461
250	3,46	1,032799174	92,26797361	108,2008343	0,066082038	6,398343418
315	1,92	0,322204545	82,5112492	98,44410987	0,006988935	2,169098752
400	0,99	0,088969134	64,02480697	79,95766764	9,903E-05	0,111308262

Tabla N-1 valores de eficiencia por banda de tercio de octava