

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Diseño de un tubo de impedancia para ensayos de absorción acústica de materiales

INGE-3011

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Mecatrónica

Presentado por:

Steven Omar Almenaba Herrera

Isaac Emilio Segovia Navarrete

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres, hermanos y novia que han sido parte fundamental en mi vida personal y académica. A mis padres, Omar y Miriam, por ser mis primeros educadores, apoyarme siempre en todo momento y aconsejarme a ser mejor cada día sin dejar que el conformismo me gane. A mi novia Nayeli por darme ánimos cuando estaba decaído y estar siempre para mí. A mis hermanos por ayudarme en mis actividades, en especial a Dylan que ha estado conmigo. Y finalmente a mi pequeño angelito Tobias. A todos ustedes, les dedico este trabajo.

Steven Omar Almenaba Herrera

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres, que han estado presentes en todos los logros y gracias a su trabajo como padres, he podido lograr y ser la persona que soy hoy en día, a mi hermana María Belén por el cariño con el que siempre me ha apoyado y porque ha sido el gran ejemplo que he seguido desde pequeño. A mi hermano Fernando y a mi mami Tere por darme su amor y apoyo incondicional, y por ser guía en mi formación personal y profesional. A mi novia Valeria, que siempre me apoya y anima cada vez que el camino se ha puesto difícil a lo largo de mi carrera universitaria. Finalmente, a mis amigos de la universidad y del colegio que siempre están dispuestos a escucharme y aconsejarme cuando lo necesito.

Isaac Emilio Segovia Navarrete

Agradecimientos

Agradezco en primer lugar a Dios por la salud y la vida. También a mi compañero de tesis Isaac por haberme tomado en cuenta para realizar este trabajo juntos. Agradezco también al Ing. Galo Durazno por estar pendiente en cada momento de nuestros avances y guiarnos por el enfoque correcto de desarrollo. Finalmente, al Ing. Jonathan León por su retroalimentación para mejorar este trabajo académico.

Steven Omar Almenaba Herrera

Agradecimientos

Agradezco a Dios por darme salud y la oportunidad de culminar mi carrera universitaria. También a mi compañero Steven por su dedicación y arduo trabajo en el proyecto. Agradezco al Ing. Galo Durazno por darnos la oportunidad de escoger este proyecto y por ser un gran guía y apoyo para lograr culminar con éxito el proyecto. Finalmente, agradezco al Ing. Jonathan León por sus aportes y por resolver cualquier duda presentada a lo largo del proyecto.

Isaac Emilio Segovia Navarrete

Declaración Expresa

Nosotros Steven Omar Almenaba Herrera e Isaac Emilio Segovia Navarrete acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor del proyecto de graduación corresponderá a los autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor de los autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique a los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 23 de octubre del 2025.

Steven Almenaba

Steven Omar Almenaba

Herrera



Isaac Emilio Segovia

Navarrete

Evaluadores

M. Sc. Jonathan Roberto León Torres

Profesor de Materia

M. Sc. Galo Andrés Durazno Palacios

Tutor de proyecto

Resumen

Los tubos de impedancia comerciales son muy costosos y se convierten en obstáculo para el desarrollo de investigación de nuevos materiales, especialmente de aquellos derivados de fibras vegetales. Por eso, se tiene como objetivo diseñar un tubo de impedancia de bajo costo siguiendo normas como la ISO 10534-2 y ASTM E 1050-98. La importancia de este trabajo radica en brindar una opción económica y de calidad a los usuarios. Se estableció el diseño de dos tubos de impedancia, uno para ensayos de bajas frecuencias y otro para altas. Siguiendo la metodología, el sistema general fue dividido en diseño mecánico, electrónico y software. Una vez finalizado los tres diseños se estableció planos de construcción del tubo y electrónicos. Posteriormente se implementó los diseños para realizar la caracterización acústica de muestras de fibras de coco. Se obtuvo que a mayor frecuencia esta fibra aumenta su capacidad de absorción coincidiendo con otros estudios. Además, se realizó un análisis económico donde el costo de implementación es de \$3494.11. Finalmente se concluye que, siguiendo las normas, se puede diseñar un instrumento con buena relación calidad-precio y su implementación es viable y reproducible.

Palabras Clave: impedancia acústica, materiales absorbentes, caracterización acústica, ISO 10534-2, ASTM E 1050-98

Abstract

Commercial impedance tubes are very expensive and hinder the development of research into new materials, especially those derived from plant fibers. Therefore, the objective is to design a low-cost impedance tube following standards such as ISO 10534-2 and ASTM E 1050-98. The importance of this work lies in providing users with an economical and high-quality option. The design of two impedance tubes was established, one for low-frequency testing and the other for high frequencies. Following the methodology, the overall system was divided into mechanical, electronic, and software design. Once the three designs were finalized, construction drawings for the tube and electronics were established. Subsequently, the designs were implemented to perform the acoustic characterization of coconut fiber samples. It was found that the absorption capacity of this fiber increases with increasing frequency, consistent with other studies. Furthermore, an economic analysis was performed, showing an implementation cost of \$3494.11. Finally, it is concluded that by following the standards, an instrument with a good price-quality ratio can be designed, and that its implementation is viable and reproducible.

Keywords: acoustic impedance, sound-absorbing materials; acoustic characterization; ISO 10534-2, ASTM E 1050-98

Índice general

Resumen	I
<i>Abstract</i>	II
Índice general	III
Abreviaturas	VI
Simbología	VII
Índice de figuras	IX
Índice de tablas	X
ÍNDICE DE PLANOS	XI
Capítulo 1	1
1. Introducción	2
1.2 Descripción del Problema	3
1.3 Justificación del Problema	4
1.4 Objetivos	5
1.4.1 Objetivo general	5
1.4.2 Objetivos específicos	5
1.5 Marco Teórico	5
1.5.1. Fundamentos acústicos	5
1.5.2. Absorción acústica de materiales	8
1.5.3. Métodos de medición de la absorción acústica	10
1.5.4. Antecedentes de diseño	12
Capítulo 2	14
2. Metodología	15
2.1. Diseño Conceptual	15
2.1.1. Sistema de generación de ondas sonoras	16
2.1.2. Sistema de propagación sonora	17
2.1.3. Sistema de Adquisición de señales	17

2.1.4. Sistema de medición de condiciones externas.....	18
2.1.5. Sistema de procesamiento y análisis de datos	18
2.2. Metodología de diseño.....	19
2.2.1. Diseño Mecánico	19
2.2.2 Diseño Electrónico	20
2.2.3. Diseño de Software.....	21
2.2.4. Criterios de Diseño	21
2.2.5. Selección de Material	23
2.2.6. Selección de la Configuración de Micrófonos	24
2.2.7. Selección de la Configuración de los Tubos	25
2.3. Diseño Conceptual Final.....	27
Capítulo 3	29
3. Resultados y análisis	30
3.1. Restricciones.....	30
3.2. Diseño Mecánico	30
3.2.1. Material.....	30
3.2.2. Tubo de propagación sonora	31
3.2.3. Gabinete para parlante	34
3.2.4. Muestra	36
3.2.5. Porta-muestra.....	37
3.2.6. Porta micrófonos	38
3.3. Diseño Electrónico.....	39
3.3.1. Generación de ondas sonoras	39
3.3.2. Recepción de señales.....	41
3.3.3. Configuración de micrófonos	42
3.3.4. Medición de condiciones externas del tubo.....	43
3.4. Diseño de Software	44

3.5. Implementación.....	46
3.6. Caracterización Acústica de muestras de Fibra de Coco	52
3.7. Análisis de Costos.....	56
Capítulo 4	58
4.1 Conclusiones y recomendaciones.....	59
4.1.1 Conclusiones	59
4.1.2 Recomendaciones.....	60
Referencias	61
Apéndice.....	63

Abreviaturas

ASTM American Society for Testing and Materials

CDTS Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable

ESPOL Escuela Superior Politécnica del Litoral

ISO International Organization for Standardization

MIPYMES Micro, Pequeñas y Medianas Empresas

Simbología

A_m	Amplitud de la presión sonora.
A	Área en m^2
atm	Atmósfera
α	Coefficiente de absorción
db	Decibeles
ρ	Densidad de un fluido
E	Energía sonora en W/m^2 .
f	Frecuencia en Hz
$^{\circ}C$	Grados centígrados
Hz	Hertz
ρc	Impedancia característica del medio
Z_n	Impedancia superficial de los materiales
I	Intensidad acústica media
kHz	Kilo Hertz
λ	Longitud de onda en metros
m	Metros
m^2	Metros cuadrados
mm	Milímetro
m/s	Metros por segundos
L_p	Nivel de presión sonora en db
k	Número de onda
\bar{p}_0	Presión acústica de referencia
Pa	Presión atmosférica
p_i	Presión de onda incidente

p_r	Presión de onda reflejada
\bar{p}	Presión sonora eficaz
PVC	Policloruro de vinilo
x	Posición en el espacio en una dirección
ω	Pulsación
γ	Relación de calores específicos del fluido a presión y volúmenes constantes
n	Relación entre presión máxima y mínima
s	Segundos
t	Temperatura en °C
W	Trabajo
\bar{p}	Valor eficaz de la presión sonora
v_{in}	Velocidad de las partículas incidentes
v_{rn}	Velocidad de las partículas reflejadas
c	Velocidad del sonido en m/s

Índice de figuras

Figura 1 <i>Método de cámara reverberante</i>	11
Figura 2 <i>Diagrama de diseño conceptual del tubo de impedancia</i>	16
Figura 3 <i>Diseño conceptual de la alternativa ganadora</i>	27
Figura 4 <i>Tubos de propagación sonora para altas y bajas frecuencias</i>	33
Figura 5 <i>Vista seccionada lateral del tubo de impedancia de altas frecuencias</i>	34
Figura 6 <i>Gabinete para la fuente sonora</i>	36
Figura 7 <i>Moldes para las muestras de fibras vegetales</i>	37
Figura 8 <i>Porta muestras para altas y bajas frecuencias</i>	38
Figura 9 <i>Porta micrófonos para ensayos de altas y bajas frecuencias</i>	39
Figura 10 <i>Diagrama esquemático electrónico para la generación de ondas sonoras</i>	40
Figura 11 <i>Diagrama electrónico para la recepción de señales</i>	42
Figura 12 <i>Medición de condiciones externas del tubo de impedancia</i>	44
Figura 13 <i>Implementación gabinete para parlante</i>	46
Figura 14 <i>Implementación del tubo de propagación</i>	47
Figura 15 <i>Reducción del diámetro de propagación para el tubo de altas frecuencias</i>	48
Figura 16 <i>Implementación del porta-muestras</i>	48
Figura 17 <i>Implementación de la medición de condiciones externas</i>	49
Figura 18 <i>Módulo amplificador de potencia</i>	50
Figura 19 <i>Implementación del tubo de impedancia para ensayos de bajas frecuencias</i>	51
Figura 20 <i>Implementación del tubo de impedancia para ensayos de altas frecuencias</i>	51
Figura 21 <i>Caracterización acústica de la muestra de fibra de coco en bajas frecuencias</i>	52
Figura 22 <i>Caracterización acústica de la muestra de fibra de coco en altas frecuencias</i>	53
Figura 23 <i>Distribución del coeficiente de absorción en bajas frecuencias</i>	54
Figura 24 <i>Distribución del coeficiente de absorción en altas frecuencias</i>	54
Figura 25 <i>Coeficiente de absorción acústica de distintas muestras de fibra de coco</i>	55
Figura 26 <i>Parámetros registrados en el software para ensayo a bajas frecuencias</i>	66
Figura 27 <i>Parámetros registrados en el software para ensayo de altas frecuencias</i>	67
Figura 28 <i>Costos de los materiales para implementación de los diseños</i>	70
Figura 29 <i>Interfaz gráfica del software procesador de datos</i>	71
Figura 30 <i>Configuración de dispositivos y calibración</i>	71
Figura 31 <i>Calibración de los micrófonos</i>	72
Figura 32 <i>Diagrama de flujo del software</i>	73

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Criterios de diseño para evaluación de alternativas</i>	22
Tabla 2 <i>Evaluación del material</i>	23
Tabla 3 <i>Evaluación de la configuración de micrófonos</i>	24
Tabla 4 <i>Evaluación de la configuración de tubos</i>	26
Tabla 5 <i>Dimensiones de los tubos de propagación sonora para altas y bajas frecuencias</i>	33
Tabla 6 <i>Costo de la mano de obra para la implementación de los diseños</i>	56
Tabla 7 <i>Condiciones externas en el ensayo de caracterización acústica</i>	66

ÍNDICE DE PLANOS

- PLANO 1 Diagrama esquemático electrónico del sistema
- PLANO 2 Vista explotada del tubo de impedancia para ensayos de bajas frecuencias
- PLANO 3 Vista explotada del tubo de impedancia para ensayos de altas frecuencias
- PLANO 4 Vistas del ensamble del tubo de impedancia para ensayos de bajas frecuencias
- PLANO 5 Vistas del ensamble del tubo de impedancia para ensayos de altas frecuencias

Capítulo 1

1. Introducción

Los materiales naturales como las fibras vegetales se han convertido en uno de los ejes principales de investigación e innovación tecnológica debido al desarrollo de la sostenibilidad por parte de los sectores productivos e industriales [1]. En el área de la acústica, son una alternativa a materiales tradicionales. Además, impulsa el desarrollo de productos más ecológicos para sectores como la construcción, la automoción y la industria manufacturera. Esta transición ecológica es una oportunidad para el Ecuador por su biodiversidad y el potencial en la producción de fibras naturales.

La relevancia del tema no es solo en el área ambiental sino también en lo económico y tecnológico. Realizar la caracterización y validación de las propiedades acústicas de nuevos materiales son factores importantes para su incorporación al mercado. No obstante, esta etapa no es realizada en las mejores condiciones debido al poco acceso a equipos de medición acústica especializados. Los tubos de impedancia, que se usan para esta tarea, tienen costos de importación altos y una complejidad operativa que se transforman en una barrera para investigadores, MIPYMEs y emprendedores, manteniendo la dependencia de tecnologías externas.

Este proyecto de titulación es una respuesta directa a esta problemática. Este trabajo integra y aplica competencias centrales de la formación en ingeniería. Incluye la acústica física, instrumentación, procesamiento de señales digitales y los principios de diseño mecánico. La naturaleza multidisciplinaria del proyecto permite demostrar la capacidad de sintetizar conocimiento de distintas áreas para resolver un problema técnico concreto. El alcance de este trabajo se enfoca en el diseño detallado, modelación y especificación de todos los componentes necesarios para realizar un prototipo funcional de un tubo de impedancia, bajo los estándares de las normas ISO 10534-2 y ASTM E 1050-98.

Inicialmente en este documento se establecen los fundamentos científicos y técnicos que sustentan el proyecto donde se explican los principios de la absorción acústica y el funcionamiento de los tubos de impedancia. Posteriormente, se detalla el plan de trabajo donde se describen las fases, herramientas y criterios que se aplicarán durante el proceso de diseño. Después, se exponen y analizan los resultados obtenidos mediante la presentación e implementación del diseño final y sus características. Finalmente, se exponen las conclusiones más importantes del proyecto y se plantean recomendaciones para futuras investigaciones en esta línea de trabajo.

1.2 Descripción del Problema

El desarrollo de materiales sostenibles como aquellos provenientes de fibras vegetales para aplicaciones de absorción acústica representa una oportunidad importante para el Ecuador [1]. Sin embargo, realizar una caracterización precisa y detallada es limitada por los instrumentos requeridos. Los tubos de impedancia comerciales son herramientas útiles para esta tarea pues están estandarizados por las normas ISO 10534-2 y ASTM E 1050-98. Sin embargo, se requiere una inversión económica considerable y junto con la complejidad técnica representan obstáculos que detienen la investigación y desarrollo de estos nuevos materiales.

Para solucionar este problema, el presente trabajo se enfoca en diseñar un tubo de impedancia para ensayos de absorción acústica. Por lo que, se debe seguir requerimientos tales como el cumplimiento de las normas ISO y ASTM, la capacidad para cuantificar el coeficiente de absorción en un rango de frecuencia y la relación calidad-precio. Las variables de interés son el coeficiente de absorción y la función de transferencia de los micrófonos a utilizar. Es preciso mencionar que el beneficiario de este proyecto es un consultor e investigador acústico. Por tanto, requiere de equipos asequibles para sus ensayos acústicos.

La relevancia en la resolución de este problema radica en que los investigadores y empresas podrán optimizar y validar prototipos sin depender de importaciones que ralentizarían

sus actividades. Por otro lado, la solución de esta problemática se relaciona con la sostenibilidad y la economía circular al facilitar el desarrollo de materiales sostenibles como aquellos derivados de fibras vegetales. Además, contribuye a la valorización y cuidado de los recursos naturales del país, así como la independencia tecnológica al ser una herramienta de calidad, fácil uso y reproducible.

1.3 Justificación del Problema

Estudios demuestran que Ecuador tiene un gran potencial para el desarrollo de materiales acústicos sostenibles a partir de fibras vegetales y compuestos de origen nacional. Pues existe mucha biodiversidad y materiales que abundan tanto en regiones cálidas frías y mixtas [1]. Sin embargo, la falta de equipamiento especializado para la determinación del coeficiente de absorción e impedancia superficial limita su caracterización y provoca un retraso en las validaciones de prototipos. Por lo que se desarrolla dependencia de equipos externos con costos elevados y prolongados tiempos de adquisición. La carencia de instrumentación técnica afecta a la calidad de los resultados y representa una carga financiera en la optimización del diseño que como consecuencia las investigaciones nacionales no tienen una ventaja competitiva frente a estándares internacionales.

Por estos motivos se propone el diseño de un tubo de impedancia de bajo costo, que pueda realizar ensayos que sigan la normativa, de tal manera que se garanticen mediciones comparables y reproducibles. La disponibilidad local de este equipo permitiría que la caracterización acústica sea asequible, reduciría el costo por ensayo y disminuiría los ciclos de prototipado y optimización de materiales. De modo que se genera evidencia técnica para la toma de decisiones con respecto al diseño, compras y certificación interna. En el área industrial, la solución permite que los MIPYMES sean competitivos, puesto que las validaciones serían más rápidas sin depender de laboratorios externos.

Además del impacto técnico de la solución, la validación de estos materiales promueve la sostenibilidad porque se reduce la huella ambiental y favorece la economía circular por medio del uso de fibras y subproductos agrícolas. En el ámbito académico, el proyecto fortalece líneas de investigación con resultados reproducibles que contribuyen a la formación universitaria e impulsa la vinculación con el sector productivo.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Diseñar un tubo de impedancia experimental de bajo costo mediante la guía de normas internacionales, para la realización de ensayos de absorción acústica de materiales.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Definir los parámetros geométricos, materiales y elementos necesarios usando estándares internacionales para el diseño estructural y funcional del tubo de impedancia.
2. Desarrollar un prototipo de generación y adquisición de señales acústicas mediante la integración mecatrónica de componentes para los ensayos de absorción acústica.
3. Elaborar un análisis de factibilidad económica basado en el diseño y construcción del equipo para mostrar las diferencias frente a productos del mercado.

1.5 Marco Teórico

1.5.1. Fundamentos acústicos

En primer lugar, se debe comenzar la explicación de fundamentos acústicos importantes para comprender y aplicar las normas internacionales ISO 10534-2 y ASTM E1050-98. El análisis de estos conceptos permitirá conocer fundamentos del comportamiento del sonido en un medio fluido, así como su generación, transmisión y medición de una onda sonora. Además, la relación entre la velocidad del sonido, longitud de onda y presión acústica en el análisis para el diseño del tubo y el cálculo de coeficientes de absorción e impedancia acústica.

1.5.1.1. Velocidad del sonido

La velocidad a la cual viajan las ondas sonoras depende tanto de la masa como de la elasticidad del medio en el que se transmite, siendo el aire el medio en el que se trabaja, la expresión para el cálculo de la velocidad del sonido es la siguiente [2]:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma Pa}{\rho}} \quad (1.1)$$

En el aire seco la velocidad del sonido a 0°C y 1 atm de presión atmosférica es de 331.45 m/s [5]. Además, la siguiente expresión muestra como depende la velocidad del sonido en función de la temperatura, expresada por:

$$c = 331.45 \cdot \sqrt{1 + \frac{t}{273}} \quad (1.2)$$

1.5.1.2 Longitud de onda del sonido

La longitud de onda se define como a la distancia lineal entre dos frentes de onda que tienen igual fase. Esta magnitud es la misma distancia que viaja la onda sonora en un tiempo de un periodo, siendo este un ciclo completo de vibración[8].

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.3)$$

1.5.1.3 Presión sonora instantánea

Se entiende por presión sonora como el efecto de perturbación de la presión atmosférica en un medio elástico a causa de la vibración de un cuerpo [5].

$$p = A_m \cos(\omega t - kt) \quad (1.4)$$

1.5.1.4 Intensidad acústica media

La intensidad acústica media se define como la cantidad de energía sonora que atraviesa una unidad de área por unidad de tiempo, y se calcula dividiendo el cuadrado de la presión sonora eficaz entre la impedancia característica del medio [5].

$$I = \frac{\bar{p}^2}{\rho c} \quad (1.5)$$

1.5.1.4 Potencia sonora

La potencia sonora se define como la energía generada por una fuente o cuerpo vibrante equivale a la energía que pasa por unidad de tiempo a través de un área determinada [5]. Según la relación mostrada a continuación:

$$W = \frac{E}{t} = \bar{I} A \quad (1.6)$$

1.5.1.5 Nivel de presión sonora

Se define como nivel de presión sonora L_p a la relación logarítmica entre la presión sonora eficaz \bar{p} con respecto a la presión sonora de referencia \bar{p}_0 , mediante la siguiente ecuación:

$$L_p = 20 \log \left(\frac{\bar{p}}{\bar{p}_0} \right) \quad (1.7)$$

1.5.1.7 Tipos de ondas

Existen tres tipos de ondas: esféricas, cilíndricas y planas. Las ondas esféricas son aquellas que se generan por fuentes esféricas. Se caracteriza por que sus frentes de ondas son representadas como capas esféricas, donde se las representa en el espacio como fuentes que emiten energía sonora en todas las direcciones creando una emisión omnidireccional en el espacio donde su potencia se reparte de manera uniforme en todo el frente de onda [5].

Las ondas cilíndricas tienen forma de cilindros coaxiales. Su formación se genera en túneles abovedados o en conductos con forma cilíndrica. Además, las ondas cilíndricas poseen la característica de que la presión sonora instantánea es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la distancia fuente-receptor. Es decir, la intensidad acústica disminuirá con el incremento del radio de separación con la fuente sonora [5].

Las ondas planas son aquellas en las que todos los puntos del medio vibran en la misma dirección y fase en la que se propagaron [5]. Reciben este nombre porque las regiones de máxima compresión forman superficies planas y perpendiculares a la dirección de propagación. Adicionalmente, la amplitud sonora permanece constante a lo largo de su propagación, por lo que su contenido energético es uniforme a lo largo de su trayectoria. Debido a esto, las ondas

planas son independientes de la distancia a la fuente haciendo que no se forme ningún amortiguamiento en su trayectoria.

1.5.2. Absorción acústica de materiales

La absorción acústica es definida como el fenómeno físico en el que un material convierte una fracción de la energía sonora incidente en otro tipo de energía que generalmente suele ser calor. Este proceso depende del tipo material, su estructura interna y las características de la onda sonora. Sin importar el material, unos poseen en mayor o menor medida esta propiedad que puede ser cuantificada por medio del coeficiente de absorción acústica presentada por la letra α . Además, se puede definir como la relación entre la energía absorbida y la energía incidente [2]. Matemáticamente se expresa como:

$$\alpha = \frac{E_{\text{absorbida}}}{E_{\text{incidente}}} \quad (1.9)$$

El valor resultante es adimensional entre 0 y 1. Si el coeficiente de absorción es cercano a cero, se considera que el material es reflectante como lo son las superficies duras y lisas. Por otro lado, aquellos valores aproximados a la unidad tienen una mayor capacidad de absorción tales como los materiales porosos y blandos. El coeficiente varía en función del espectro sonoro de la onda incidente, así como las características del material como su tipo, espesor y condiciones termo higrométricas del ambiente [2].

Entre los materiales absorbentes más comunes existen tres categorías principales de acuerdo con su mecanismo de actuación. Los absorbedores disipativos o fibrosos, que transforman la energía sonora en calor mediante la fricción viscosa del aire dentro de sus poros; los de membrana resonante, que tienen un buen rendimiento a bajas frecuencias debido a su resonancia; y los absorbedores resonantes tipo Helmholtz, que son especialmente útiles para rangos sonoros específicos [2].

1.5.2.1 Absorción acústica en materiales de fibras vegetales.

Los materiales absorbentes disipativos o fibrosos tienen una estructura con poros interconectados y cámaras de aire. Cuando las ondas sonoras inciden sobre estos materiales, atraviesan fácilmente su red de poros, donde se genera fricción por el movimiento del aire contenido. El rozamiento convierte la energía acústica en calor, siempre que la longitud de onda del sonido sea comparable al tamaño de los poros. Sin embargo, en altas frecuencias las longitudes de ondas más cortas favorecen una disipación por viscosidad. Es importante mencionar que mientras la reflexión difusa depende de la capa superficial, la absorción por rozamiento aumenta con el espesor del material que se considera un parámetro relevante en el coeficiente de absorción [2].

Las fibras vegetales constituyen una categoría emergente dentro de este tipo de materiales, mostrando un comportamiento acústico similar al de materiales fibrosos convencionales como la lana de vidrio o la lana de roca. Un ejemplo representativo es la fibra de coco que, por sus características morfológicas, tiene un mecanismo de absorción comparable al de otros materiales porosos comerciales [3]. La investigación con estas fibras ha permitido desarrollar modelos empíricos que describen su comportamiento acústico, siguiendo metodologías similares a las empleadas con materiales sintéticos. Por tanto, no solo valida la eficacia de las fibras vegetales como materiales absorbentes, sino que además establece las bases para su aplicación en desarrollos acústicos sostenibles.

1.5.2.2 Impedancia superficial de los materiales

La impedancia acústica es la relación entre la presión sonora y la velocidad de las partículas en la superficie de un material cuando se excita por una onda sonora en incidencia normal [4]. Esta propiedad hace referencia a la oposición al paso del sonido por parte del material y se define matemáticamente como:

$$Z_n = \frac{p}{v} \quad (1.10)$$

Donde p es la suma de las presiones de la onda incidente y reflejada, mientras que v representa la velocidad total de las partículas en dirección normal a la superficie, es decir incidentes y reflejadas [4]. Por lo que se puede reescribir la fórmula de la siguiente manera:

$$Z_n = \frac{p_i + p_r}{v_{in} + v_{rn}} \quad (1.11)$$

Esta relación es fundamental para caracterizar el comportamiento acústico de cualquier material ante diferentes frecuencias. La impedancia superficial muestra la eficiencia de absorción acústica del material. Cuando una onda sonora incide sobre la superficie, una parte de la energía es reflejada y la otra es transmitida al interior del material donde se disipa. La cantidad de energía reflejada es definida por la diferencia entre la impedancia característica del aire y la impedancia superficial del material [4].

1.5.3. Métodos de medición de la absorción acústica

1.5.3.1 Método de cámara reverberante

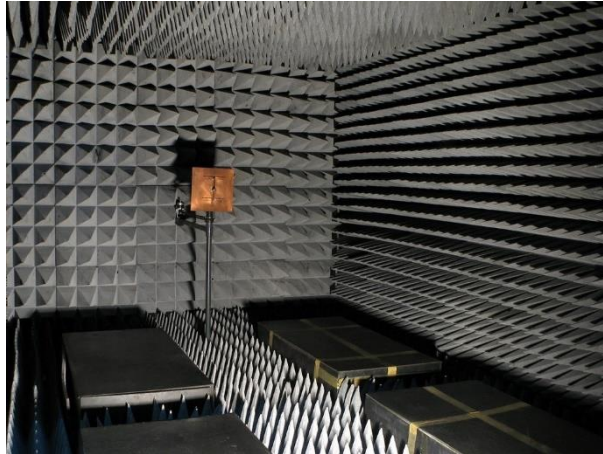
Una cámara reverberante es una habitación de gran tamaño con paredes, techo y piso con alta capacidad de reflexión del sonido. En esta cámara se realiza el método de medición de cámara reverberante, que permite determinar coeficientes de absorción en materiales absorbentes mediante la obtención del valor promedio del coeficiente de absorción para un campo sonoro difuso. El tiempo de reverberación de esta cámara es largo y mientras más largo sea el tiempo de reverberación más precisa es la medición [7]. Este campo difuso se obtiene mediante un conjunto de elementos convexos suspendidos del techo, que poseen una orientación y distribución irregulares, para dispersar uniformemente el sonido dentro del recinto [4].

Para evaluar el comportamiento acústico de una sala es necesario conocer las características de absorción sonora de todas las superficies y objetos interiores. El tiempo de reverberación depende de la absorción del sonido presente en el interior de la cámara, la medida del coeficiente de absorción del material se obtiene mediante la evaluación del cambio del

tiempo de reverberación. Finalmente, este método es usado generalmente para obtener los coeficientes de absorción para muestras de gran tamaño [4]

Figura 1

Método de cámara reverberante



Nota. Método de cámara reverberante para la caracterización acústica de materiales.

1.5.3.2 Método de tubo de impedancias

Por otra parte, también existe como método de medición el interferómetro de Kundt, conocido también como tubo de impedancia, este es utilizado para determinar el coeficiente de absorción para muestras pequeñas de una forma rápida y precisa en comparación con el método de cámara reverberante, donde se debe poseer una gran cantidad de tamaño de la muestra para obtener la medición [4]. Este método es utilizado para materiales absorbentes porosos debido a que no es recomendado para materiales absorbentes que dependan del área para su uso, como paneles vibrantes y absorbentes de listones grandes [7].

El tubo posee una sección transversal circular con paredes rígidas. La muestra por analizar se corta de manera precisa para que se ajuste con el diámetro interno del tubo. Si el uso del material se destina a montarse sobre una superficie sólida, la muestra se coloca sobre una placa de respaldo pesada. En cambio, si el material requiere que tenga una cámara de aire posterior, se deja una distancia entre la placa de respaldo y la muestra. En el otro extremo del

tubo se coloca un altavoz de manera que se encuentre alineado su centro con el eje de simetría del cilindro [7].

Para el procedimiento, el altavoz se alimenta con señales de tonos puros, estas señales serán ondas planas las cuales serán reflejadas por la muestra y esta reflexión regresa por el tubo en dirección contraria hacia el altavoz, por lo que se crea un esquema de interferencia de ondas estacionarias. Dado a esto, el micrófono que se encuentra acoplado en un lado del tubo medirá el campo sonoro en dirección axial, de manera que obtiene las variaciones de presión en el interior del tubo de impedancias [4].

Para obtener el coeficiente de absorción acústica de la muestra, se compara la relación entre la presión máxima y mínima, de manera que la presión p , será la suma entre la presión sonora incidente y la presión sonora reflejada [4], expresada en la siguiente formula:

$$p = p_i + p_r = A \cos \omega t + B \cos w \left(t - \frac{2d}{c} \right) \quad (1.12)$$

De esta manera la relación entre presiones dado por la siguiente ecuación:

Finalmente, mediante la siguiente formula se puede calcular el coeficiente de absorción acústica [4]:

$$\alpha = \frac{4n}{(n + 1)^2} \quad (1.13)$$

1.5.4. Antecedentes de diseño

Los tubos de impedancia son una solución consolidada para la caracterización acústica de materiales en bajo incidencia normal. A continuación, se muestra el diseño del sistema de Brüel & Kjaer Tipo 4206, certificado bajo las normas ISO 10534-2 y ASTM E1050-98 [9]. Su configuración está basada en el método de la función de transferencia con dos micrófonos. Estos, obtienen unas señales para el posterior cálculo de los coeficientes de absorción e impedancia mediante análisis espectral. Una característica relevante del diseño es el uso de tubos intercambiables con diferentes diámetros para cubrir distintos rangos de frecuencia, desde 50 Hz hasta 6.4 kHz, para optimizar las dimensiones según las longitudes de onda a medir [9].

Figura 2

Kit de tubo de impedancia



Nota. Tubo de impedancia de Bruel & Kjaer con tubos intercambiables distintos rangos de frecuencia [9].

Este sistema comercial tiene mejoras técnicas que son precedentes para cualquier desarrollo similar. Se destacan el montaje flush-mount de los micrófonos para reducir fugas de presión, uso de micrófonos especializados Tipo 4187 para garantizar precisión en altas frecuencias, y la inclusión de soportes de muestras con pistón ajustable para simular diferentes condiciones de montaje. Estos elementos de diseño representan un estándar de funcionalidad que debe ser considerado para desarrollar cualquier tubo de impedancia [9].

Capítulo 2

2. Metodología.

El enfoque metodológico en ese trabajo inicia con la propuesta de un diseño conceptual del sistema general de tubo de impedancia para la caracterización acústica de materiales porosos de fibras vegetales. A partir del diseño conceptual, se realiza el proceso de metodología de diseño y construcción del tubo, dividiendo este proceso en diseño mecánico, electrónico, software y finalmente implementación y análisis de resultados. El diseño debe cumplir con los requerimientos establecidos para el proyecto de manera que finalmente logre la capacidad de determinar el coeficiente de absorción en un rango determinado de frecuencias, facilidad de uso, relación calidad-precio y el cumplimiento de las normas ISO 10534-2 y ASTM E 1050-98 [10,11].

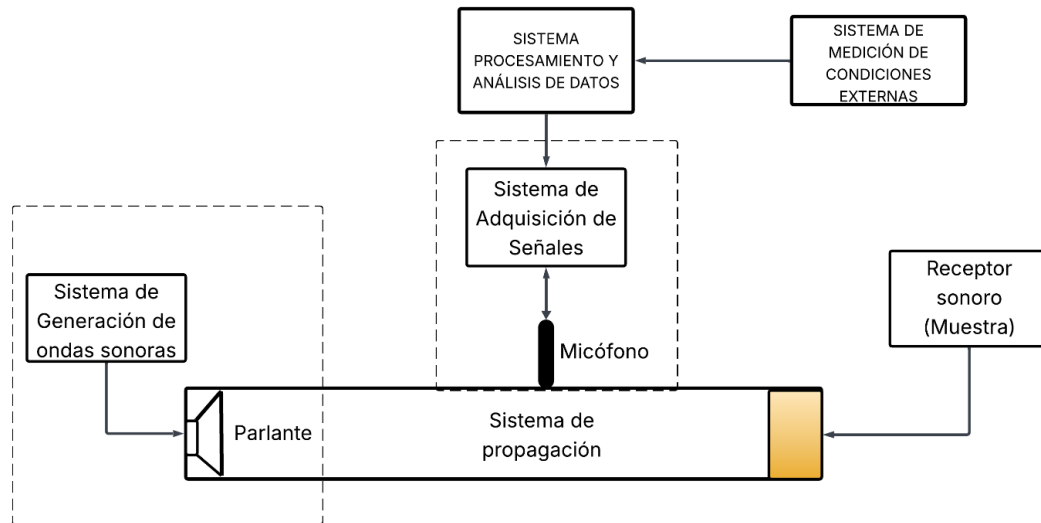
Adicionalmente, se planteó criterios de diseño que sirven para evaluar elecciones o alternativas en los diseños para obtener resultados óptimos sin dejar de cumplir con los requerimientos. Finalmente, una vez escogido las mejores alternativas se prosiguió con el diseño final del tubo de impedancia teniendo en cuenta requerimientos, normas internacionales y restricciones.

2.1. Diseño Conceptual

Previo a la elaboración del diseño final del tubo de impedancia, se comprendió la estructura de este sistema de medición. Por tanto, se propuso la elaboración de un diseño conceptual que se dividió en sistemas regidos por las normas ISO 10534-2 y ASTM E 1050-98 para cumplir con los requerimientos mencionados previamente [10,11] (para evitar repeticiones constantes de los nombres de las normas, serán referidas como “normativa” o “norma” o sus respectivos plurales). A través de estos sistemas se identificaron las características importantes del tubo de impedancia necesarios para su diseño final.

Figura 2

Diagrama de diseño conceptual del tubo de impedancia



Nota. El diagrama representa los distintos sistemas del tubo de impedancia.

En la **Figura 2** se pueden apreciar los distintos sistemas del tubo de impedancia como: sistema de generación de ondas sonoras, medición de condiciones externas, adquisición de señales sonoras, propagación sonora para obtener ondas planas, sistema de procesamiento y análisis de datos. Donde en este último se procesan las señales de audio recopiladas y finalmente se visualizan los resultados obtenidos en el ensayo, obteniendo así el coeficiente de absorción acústico de la muestra.

2.1.1. Sistema de generación de ondas sonoras

Esta sección tiene como objetivo principal de producir ondas planas a través del tubo, las cuales puedan ser regulables y estables, además que sea controlada para el rango de frecuencias del ensayo, es decir, para un rango de 100 a 5000 Hertz. El sistema se compone inicialmente de un generador de funciones sonoras que sea capaz de reproducir ruido rosa, posterior a esta etapa, se necesita un amplificador de potencia para elevar la potencia eléctrica del generador de funciones y finalmente una fuente emisora de sonido, que debe de ser capaz de trabajar en el rango de frecuencias requerido y poseer una respuesta plana.

2.1.2. Sistema de propagación sonora

Este componente es de vital importancia puesto que se encarga de condicionar la propagación de las ondas sonoras. Básicamente, es toda la sección transversal constante por donde la onda se desplaza desde la fuente de sonido hacia la muestra que se somete a ensayos. La longitud de este elemento permite que se desarrollen las ondas planas necesarias para realizar la caracterización acústica de los materiales.

Por otro lado, para cubrir el rango de frecuencias que se utilizarán en los ensayos se puede conceptualizar el uso de uno o múltiples tubos que, a partir de su geometría, diámetro o longitud, estarían optimizados para rangos de frecuencias más específicos.

2.1.3. Sistema de Adquisición de señales

Su funcionamiento consiste en obtener la señal sonora con precisión durante el proceso de ensayo. Para esto, la obtención de las señales de presión sonora se la realiza mediante micrófonos especializados para ensayos de mediciones acústicas. Posteriormente, se encuentra la tarjeta DAC o interfaz de audio, de manera que permita la conversión de las señales de presión sonora análogas a señales digitales.

En este sistema los micrófonos deben de estar calibrados de manera idéntica mediante el uso de un calibrador especializado para micrófonos de medición, para así lograr una misma respuesta en todas las frecuencias del ensayo, en otras palabras, que no existan atenuaciones o que las ondas no se alteren debido a los instrumentos. Finalmente, si en las propuestas se define el uso de más de un micrófono, deben estar calibrados a la perfección puesto que los desfases causarían cálculos erróneos en la función de transferencia.

2.1.4. Sistema de medición de condiciones externas

La funcionalidad de este sistema es medir mediante sensores de temperatura, presión y humedad, las condiciones ambientales del cuarto en el que se está realizando el ensayo de tubo de impedancia. Este sistema está compuesto por sensores y un microcontrolador, el cual recibe las señales medidas, y envía estos valores al computador de procesamiento y análisis de datos de manera que realice los respectivos ajustes en las ecuaciones de procesamiento.

2.1.5. Sistema de procesamiento y análisis de datos

Mediante esta etapa se procesan los datos mediante el método de función de transferencia establecido por las normativas. En este sistema las señales de presión sonora ya han sido medidas por los micrófonos y transformadas en señales digitales, por lo cual pasan a esta etapa para ser procesadas en un computador capaz de ejecutar algoritmos de análisis espectrales, cálculos numéricos e incluso generar interfaces gráficas. Permitiéndole al usuario interactuar con este, de manera que se ejecute el ensayo de medición acústica siguiendo los pasos indicados en la interfaz gráfica. A continuación de la ejecución de los cálculos se visualiza los resultados de coeficientes de absorción en bandas de octavas y tercios de octavas para así realizar los respectivos análisis sobre la muestra, en este caso, para muestras de fibras vegetales.

Además, esta etapa recibe las mediciones de los sensores del sistema de medición de condiciones externas, las cuales proporcionan datos de humedad, presión y temperatura, para los cálculos de velocidad del sonido, densidad del aire e impedancia característica del aire.

2.2. Metodología de diseño

En esta sección se describe de manera organizada el sistema del tubo de impedancia. Este es dividido en los diseños: mecánico, electrónico y de software. Además, se plantea criterios de diseño para evaluar alternativas que pueden mejorar y optimizar el diseño e implementación del tubo de impedancia.

2.2.1. Diseño Mecánico

En el sistema de propagación sonora se destaca el tipo de ondas acústicas que se requieren al interior del tubo de impedancia para realizar la caracterización acústica de un material. Para garantizar esto, las normas tienen en cuenta factores que serán parte del diseño mecánico como: dimensiones del tubo, su material, configuración de micrófonos y porta muestras [10, 11].

Las normas presentan fórmulas que se deben seguir estrictamente para obtener las dimensiones del tubo de impedancia para que se puedan desarrollar las ondas planas. Además, mencionan que el interior de la sección transversal de un tubo de impedancia debe ser uniforme, sin grietas o poros, con un buen acabado en su interior de tal manera que no afecte las ondas acústicas y por consiguiente a los resultados finales [10, 11].

La configuración de micrófonos se basa en el número de estos elementos requeridos para registrar los datos importantes que determinan la caracterización acústica de la muestra. En cuanto al porta muestras, se establece la posibilidad que este sea fijo al tubo o desmontable lo que ayudaría al montaje de la muestra, pero no debe afectar a las condiciones internas [10, 11].

Es importante destacar una característica importante en el diseño mecánico y es la configuración de los tubos. Es decir, cuántos tubos serán usados para la caracterización acústica de una muestra en un determinado rango de frecuencias. Dado que el rango de frecuencias del tubo dependerá de su diámetro, se puede diseñar configuraciones con diversos tubos de distinto

diámetro para lograr resultados en altas, medias y bajas frecuencias. Por lo que es fundamental seleccionar la configuración de tubos que satisfaga a los requerimientos.

2.2.2 Diseño Electrónico

En el diseño electrónico debe cumplir tres funciones específicas: registrar las condiciones externas del ambiente exterior al tubo (temperatura, humedad y presión relativa), generar la excitación acústica dentro en el interior del tubo, captar la presión sonora interna a través de micrófonos de medición, acondicionar estas señales, convertir las señales de presión sonora de análogo a digital y transferirlas al sistema de procesamiento de datos. Debido a la característica de la adquisición de los distintos tipos de señales para el sistema electrónico se diseña un sistema propio para el manejo de señales de tipo sonoras y otro circuito para el manejo del registro de las condiciones ambientales externas.

Para generar las ondas sonoras, en primer lugar, es necesario un generador de funciones sonoras que debe pasar de señales digitales a analógicas para ser amplificadas y dirigidas a un transductor que funcione como fuente de sonido. Una de las características de esta fuente de sonido es que debe ser capaz de emitir ondas sonoras dentro del rango de frecuencias en que se realizará el ensayo de absorción acústica y el cual debe de tener una respuesta plana. Por otro lado, para registrar las señales al interior del tubo de impedancia las normas mencionan el uso de micrófonos. Además, se necesita el uso de un elemento que realice la conversión de las señales analógicas de los micrófonos a digitales como una interfaz de audio y dirigirlas hacia otro elemento que facilite su análisis.

Finalmente, para obtener las condiciones externas en el medio ambiente es necesario utilizar un sensor que ejerza este rol. También el uso de un microcontrolador es fundamental para transmitir los datos del sensor hacia un software que los use para determinar la velocidad del sonido en el aire, un factor imprescindible para realizar la caracterización acústica mediante un tubo de impedancia.

2.2.3. Diseño de Software

Este diseño también debe seguir las normas. Como se explicó anteriormente, por medio de este método se puede obtener el coeficiente de absorción acústica de la muestra, por tanto, el software debe cumplir estrictamente con esto. Por otro lado, el sistema debe permitir el ingreso de las condiciones externas para la estimación de la velocidad del sonido en el aire. Así como el ingreso de las dimensiones del tubo de impedancia necesarios para obtener los resultados finales.

Otra característica del software y muy importante es que pueda mostrar los resultados luego de procesar la función de transferencia. Estos resultados deben ser demostrados en bandas de frecuencias de octavas y tercios de octavas. Además, deben de ser visibles y fáciles de comprender para el usuario. Por esta razón, un software que permita realizar estas configuraciones y personalizaciones es clave para garantizar buenos resultados.

2.2.4. Criterios de Diseño

Hay elementos electrónicos que el beneficiario tiene preferencia para usarlos en el tubo de impedancia. Por lo que no es necesario tener un proceso de selección para determinar las mejores opciones y obtener el mejor rendimiento. En cuanto al software, existe un lenguaje de programación que permite la personalización de interfaz gráfica para mostrar resultado al usuario, además permite análisis espectral y se especializa en el análisis de grandes cantidades de datos. De igual manera, tampoco se necesita un proceso de selección. No obstante, en el diseño mecánico, hay varias alternativas que cumplen con las descripciones y normas.

Por este motivo, se definió criterios de diseño que ayuden a evaluar distintas opciones para el diseño mecánico del tubo de impedancia. Se definieron los siguientes criterios: costo, precisión, facilidad de uso, disponibilidad y portabilidad. Uno de los temas que se destaca en la definición del problema es el costo de los tubos de impedancia. Estos instrumentos tienen un precio elevado en el mercado y como se mencionó son un obstáculo para etapas de investigación y desarrollo. En cuanto a la precisión, es un criterio muy importante porque determina la

confiabilidad de los resultados experimentales para que se garantice que no habrá inconvenientes en su aplicación en medios industriales o científicos.

En lo que se refiere a la disponibilidad, se evaluó que los componentes del tubo de impedancia sean asequibles en el mercado nacional para evitar importaciones para una futura implementación o mantenimiento de este. Con respecto a la facilidad de uso, es vital que el procedimiento para realizar la caracterización acústica sea lo más amigable al usuario para la manipulación de los distintas partes del tubo. Finalmente, la portabilidad se incluye como criterio puesto a que el beneficiario necesita trasladar el equipo a las diferentes áreas de trabajo ya sea para mediciones en el laboratorio, demostraciones académicas o trabajos colaborativos, de esta manera se optimizarán recursos logísticos.

Tabla 1

Criterios de diseño para evaluación de alternativas

Criterios de Diseño	Peso	Ponderación
Costo	5	0,247
Precisión	5	0,247
Facilidad de uso	4	0,188
Disponibilidad	4	0,188
Portabilidad	3	0,129
Total		1

Nota. Los pesos se asignaron en una escala del 1 (mínima importancia) al 5 (máxima importancia).

La **Tabla 1** muestra los pesos asignados a cada uno de los criterios de diseño donde a los pesos se asignaron en una escala ordinal del 1 al 5, donde 5 representa máxima importancia y 1 mínima importancia. El costo y la precisión tienen los mayores pesos. Pues en cuanto al costo, este debe ser menor que el de los tubos de impedancia comerciales y la precisión debe destacarse

porque de ello dependen el análisis de las ondas acústicas. Finalmente, la portabilidad tiene el peso más bajo, ya que no es tan indispensable porque el beneficiario no tiene la necesidad de transportar el tubo de impedancia todo el tiempo y mientras no tenga que salir a realizar demostraciones académicas, tendría el tubo de impedancia en un lugar fijo con condiciones controladas.

2.2.5. Selección de Material

Para esta característica se propone tres materiales distintos para evaluarlos con respecto a cada uno de los criterios de diseño. A continuación, se muestra los resultados para cada material:

Tabla 2

Evaluación del material

Criterios	PVC	Aluminio	Acrílico
Costo	5	3	4
Precisión	5	5	5
Facilidad de uso	4	3	4
Disponibilidad	5	3	2
Portabilidad	4	4	4
Total	4.49	3.69	3.87

Nota. Se empleó una escala ordinal de 1 (peor) a 5 (mejor desempeño).

Al comparar los costos de los materiales para los tubos de las tres alternativas, el PVC es el más barato al ser más común en el mercado y el cual posee forma de tubo a diferencia de las otras opciones. El acrílico es un material de buena calidad que lo vuelve costoso. En cambio, el aluminio no existe en forma de tubo por lo que se debe mecanizarlo para obtener la forma deseada elevando considerablemente su costo. Al tener en cuenta la precisión, las ondas sonoras deben desarrollarse sin inconvenientes al interior del tubo y para que suceda las paredes internas deben ser lisas y el cualquiera de los materiales cumpliría con esto.

Es necesario destacar que los materiales deben estar disponibles para su implementación para replicar el diseño final propuesto en este trabajo. El PVC es el material más disponible en el mercado ecuatoriano y con diferentes tipos de diámetros. El acrílico se encuentra fácilmente en planchas, pero no en tubos. El aluminio solo está disponible como material en bruto y requiere mecanizado, lo que limita su oferta.

En cuanto a la portabilidad las 3 opciones pueden ser trasladados sin ningún problema. Para esta evaluación se puede apreciar en la **Tabla 2** los puntajes recibidos de cada material de acuerdo con los criterios de diseño. Se puede afirmar que un tubo de PVC presenta más ventajas a comparación de uno de aluminio. Sin embargo, el tubo acrílico puede ser considerando un buen material que cumple con los requerimientos y criterios de diseño, pero es difícil de conseguir en distintos diámetros

2.2.6. Selección de la Configuración de Micrófonos

A continuación, se calificará la configuración o el número de micrófonos a utilizar en el sistema. Pues de acuerdo con la norma y con tubos de impedancias comerciales se puede implementar el uso de uno, dos o cuatro micrófonos [10,11].

Tabla 3

Evaluación de la configuración de micrófonos

Criterios	2 micrófonos	1 micrófonos	4 micrófonos
Costo	4	5	2
Precisión	5	2	5
Facilidad de uso	5	2	2
Disponibilidad	4	4	4
Portabilidad	4	5	3
Total	4.431	3.502	3.24

Nota. Se empleó una escala ordinal de 1 (peor) a 5 (mejor desempeño).

En base a la **Tabla 3**, analizando el criterio de costo, la alternativa de un micrófono continúa siendo la opción más económica, ya que solo requiere adquirir una unidad y no habría que adquirir interfaces de audio a comparación con las otras alternativas, que requerirían el uso de interfaces con mayores entradas de audio. Sin embargo, su bajo costo no compensa las limitaciones asociadas a la medición de la función de transferencia, aspecto esencial para el cálculo del coeficiente de absorción acústica según la norma ASTM [10].

En cambio, al calificar la precisión y la facilidad de uso, el diseño con dos micrófonos se convierte en la alternativa más viable, debido a que permite medir de manera directa la función de transferencia entre dos puntos del tubo, facilitando la separación de las ondas incidente y reflejada y reduciendo el procesamiento adicional. El uso de uno o de cuatro micrófonos volvería más complejo el análisis: el primero porque necesitaría mediciones secuenciales y estimaciones no normativas, y el segundo porque dificulta el análisis y también se requieren múltiples calibraciones a los micrófonos.

En cuanto a la disponibilidad y la portabilidad, las tres alternativas son funcionales, ya que los micrófonos utilizados en el diseño del tubo de impedancia se pueden conseguir en el mercado nacional y no se necesita de equipos de gran tamaño ni condiciones especiales de transporte. No obstante, el uso de cuatro micrófonos aumenta el costo y la complejidad logística sin ofrecer ventajas en la portabilidad. Por esto se selecciona a la opción de 2 micrófonos ya que contiene ventajas en precisión y facilidad de uso, y una buena relación de costo en comparación con una configuración de 4 micrófonos.

2.2.7. Selección de la Configuración de los Tubos

Se presentan 2 alternativas como posibles soluciones como lo son la configuración de uno y dos tubos. Estas son las únicas posibles configuraciones de los tubos de impedancia cuando se requiere ensayos con rangos amplios de frecuencias. En la siguiente tabla se muestra la evaluación realizada para las dos configuraciones.

Tabla 4*Evaluación de la configuración de tubos*

Criterios	2 tubos	1 tubo
Costo	4	5
Precisión	5	2
Facilidad de uso	4	5
Disponibilidad	4	4
Portabilidad	3	4
Total	4.11	3.94

Nota. Se empleó una escala ordinal de 1 (peor) a 5 (mejor desempeño).

Al analizar la **Tabla 4**, la configuración de dos tubos es más costosa comparando con la alternativa de un solo tubo, debido a la necesidad de adquirir materiales adicionales para cada tramo del sistema. No obstante, este incremento en costo se justifica mediante el criterio de precisión, gracias a que la configuración de dos tubos permite cubrir un rango de frecuencias más amplio y logra cumplir el requerimiento establecido entre 100 y 5000 Hz, evitando errores asociados al uso de un único diámetro. En contraste, un solo tubo podría presentar limitaciones al operar fuera de su banda óptima, comprometiendo la precisión de la medición.

En cuanto a la facilidad de uso, el diseño con un solo tubo podría resultar más sencillo desde el punto de vista operativo, al no requerir desacoples ni cambios entre tubos durante el ensayo. Sin embargo, el diseño de dos tubos no afecta significativamente la operación, ya que permite realizar mediciones dentro de sus respectivas bandas de frecuencia sin necesidad de ajustes complejos o modificaciones adicionales en el sistema.

Respecto a la portabilidad y disponibilidad, ambas alternativas resultan viables, dado que la portabilidad depende principalmente del material seleccionado y no del número de tubos empleados. Como se determinó previamente, los materiales seleccionados presentan

disponibilidad en el mercado nacional, por lo que tanto el diseño de uno como de dos tubos pueden implementarse sin afectar estos criterios.

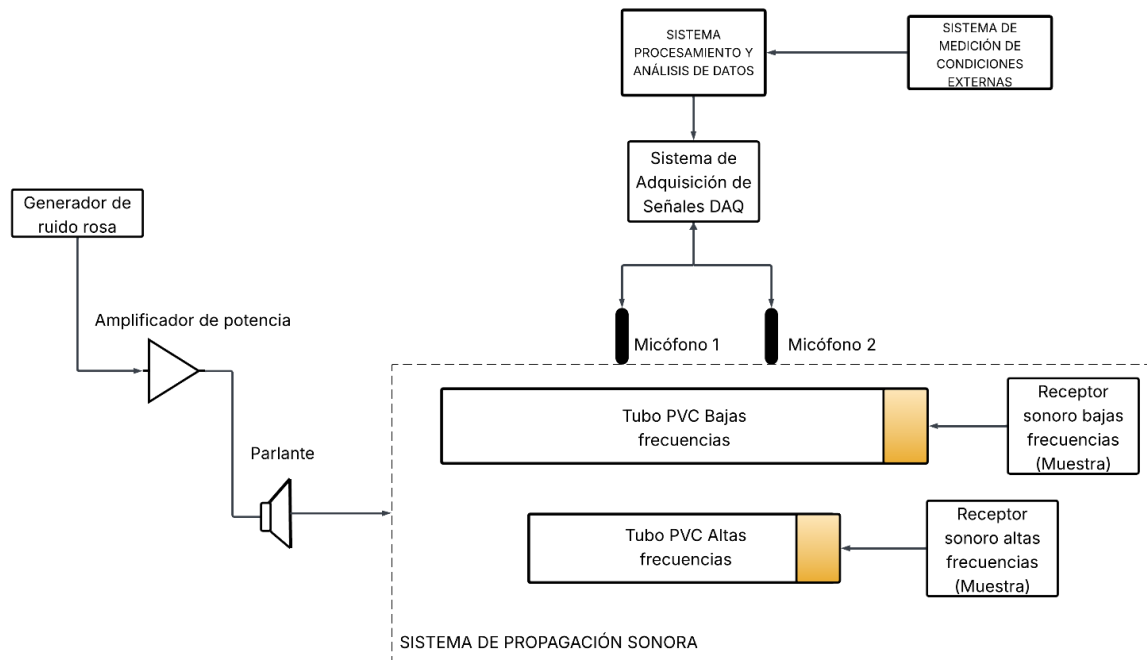
Finalmente, al ponderar todos los criterios considerados en la evaluación (costo, precisión, facilidad de uso, disponibilidad y portabilidad), la configuración de dos tubos obtuvo el mayor puntaje ponderado (4,11), constituyéndose como la alternativa óptima para cumplir con el rango de frecuencias requerido en el diseño del tubo de impedancia.

2.3. Diseño Conceptual Final

Una vez que se obtuvo las calificaciones de las selecciones se propuso un diseño conceptual más detallado del tubo de impedancia a partir de la selección propuesta anteriormente.

Figura 3

Diseño conceptual de la alternativa ganadora.



Nota. En este diseño se integran las alternativas seleccionadas.

En la **Figura 3** se puede apreciar la integración del diseño mecánico, electrónico y software. De acuerdo con la matriz de decisión se escogió dos tubos de impedancia para cubrir el

rango de 100 Hz a 5000 Hz, donde se encuentra un tubo dedicado para las altas frecuencias y un tubo dedicado para las bajas frecuencias. En la selección para el material de los tubos se obtuvo como resultado el PVC, cédula 40, el cual es un tubo comercializado localmente y con gran variedad de medidas de diámetros.

Además, se aprecia que en la adquisición y procesamiento de señales se recibe las señales de presión sonora mediante una configuración de dos micrófonos, los cuales son una opción económica y permiten una mejor precisión para el método de función de transferencia que establece la norma.

Capítulo 3

3. Resultados y análisis

Una vez seleccionadas las mejores alternativas se procedió a realizar el diseño del tubo de impedancia el cual fue dividido en diseño mecánico, electrónico y software. De esta manera se obtuvo un diseño más ordenado y que facilitó su implementación.

3.1. Restricciones

Previo al inicio de cada diseño, es necesario tener en cuentas restricciones que se deben cumplir. La restricción más importante es el seguimiento y cumplimiento de las normas ISO 10534-2 y ASTM E1050-98, pues estas presentan distintos pasos e instrucciones vitales para el diseño del tubo de impedancia mediante el uso de fórmulas y descripción de las características del tubo de impedancia. De este modo se garantiza que los resultados sean fiables.

Otra restricción para tomar en cuenta es el costo. Esta está relacionada al requerimiento de calidad-precio, pues como se ha mencionado previamente los tubos de impedancia comerciales tienen costos elevados y es necesario que, para la implementación del diseño, el costo no sea un obstáculo. Finalmente, el tubo debe cumplir con el requerimiento de trabajo en el rango de frecuencias entre 100 Hz a 5000 Hz.

3.2. Diseño Mecánico

En esta sección se muestra las dimensiones de los tubos de impedancia para altas y bajas frecuencias a partir de las ecuaciones brindadas por las normativas, así como el material de los tubos que es muy importante para que se cumplan las condiciones acústicas necesarias para las mediciones.

3.2.1. Material

Para la selección del material, se tuvo en cuenta las consideraciones de las normas mencionadas con anterioridad. Ambas señalan que el interior del tubo debe ser una sección uniforme, rígido, suave, no poroso y libre de polvo para mantener bajos niveles de atenuación del sonido. Siguiendo estos requisitos, el tubo de PVC, como material para el diseño de este

instrumento de medición acústica cumple cada uno de ellos. Por lo que al revisar estos tubos comerciales se encontró los tubos de PVC de cédula 40, los cuales poseen un mejor espesor en comparación a los tubos destinados al desagüe, ya que estos tubos están diseñados para soportar altas presiones. Los tubos de PVC cédula 40 son encontrados frecuentemente en tiendas de ventas de tuberías para piscina y presentan buenas características para la implementación en el proyecto ya que posee un acabado interno liso y constante en toda su extensión.

3.2.2. Tubo de propagación sonora

Como se mostró en el análisis de la **Tabla 4**, habrá una configuración de dos tubos de impedancia. Esto se debe a que el rango de frecuencias que se usará para realizar la caracterización acústica de los materiales será entre 100 Hz y 5000 Hz. Se diseñó dos tubos, uno para altas frecuencias y otro para bajas. Al seguir las normas, estas indican el proceso para obtener las dimensiones del tubo de impedancia.

De acuerdo con las normas, primero se obtuvo el diámetro de ambos tubos por medio de la siguiente fórmula:

$$f_u \cdot d < 0.58c_0 \quad (3.1)$$

Donde:

- f_u : frecuencia máxima.
- d : diámetro del tubo.
- c_0 : velocidad del sonido.

Es importante destacar que se definió dos rangos para el diseño, de 88 Hz a 1.414 kHz y de 1414 Hz a 5 kHz para bajas y altas frecuencias respectivamente. Se realizó esta separación debido a que se obtendrá los resultados en bandas de octavas. Este análisis de octavas está basado en la división de las frecuencias para realizar un mejor análisis del espectro.

Otra dimensión para tener en cuenta es la longitud de los tubos de propagación sonora, sin embargo, esta medida se compone de 3 partes como: espacio entre la fuente y el micrófono

más cercano, espacio entre micrófonos y el espacio entre la muestra y el micrófono. Para la primera parte, se obtiene esta medida mediante esta fórmula:

$$e_{fm} > 3 \cdot d \quad (3.2)$$

Donde:

- e_{fm} : espacio fuente-micrófono más cercano.
- d : diámetro del tubo.

En cuanto al espacio entre micrófonos, se calculó aplicando la siguiente fórmula:

$$s \ll \frac{c}{2f_u} \quad (3.3)$$

Donde:

- s : espacio entre micrófonos.
- c : velocidad del sonido en el aire.
- f_u : frecuencia máxima.

La norma ASTM recomienda que el espacio entre micrófonos sea el 80% del resultado de la fórmula 2.4 para evitar modos que afecten a las mediciones. Finalmente, para obtener el espacio entre la muestra y el micrófono para ambos tubos se usó la fórmula:

$$se_{mm} > \frac{d}{2} \quad (3.4)$$

Donde:

- se_{mm} : espacio muestra – micrófono.
- d : diámetro del tubo.

En las normas se menciona que además del cálculo realizado a partir de la fórmula 2.5 se debe tener en cuenta el tipo de muestra, para este caso se usarán aquellas derivadas de fibras vegetales las cuales son considerados como materiales porosos. Para estas muestras porosas, se recomienda que la distancia entre la muestra y el micrófono sea superior al diámetro del tubo. A partir de los cálculos realizados para cada una de las secciones, se sumó estos valores y se

obtuvo las dimensiones de la longitud de los tubos de baja y alta frecuencia respectivamente. Donde finalmente se usarán tubos de cuatro y una pulgada y media para bajas y altas frecuencias respectivamente. Estos diámetros fueron seleccionados además porque fueron los diámetros comerciales que se encontraron disponibles en el mercado para tuberías cédula 40 que logran cumplir con el diseño propuesto.

Tabla 5

Dimensiones de los tubos de propagación sonora para altas y bajas frecuencias

Tipo de frecuencia	Espacio entre la fuente y el micrófono	Espacio entre micrófonos	Espacio entre el micrófono y la muestra	Longitud de los tubos	Diámetro
Baja	350	90	140	580	103
Alta	441	26	50	517	38

Nota. Las magnitudes de estas mediciones se encuentran en mm.

Posteriormente, se realizó la selección de acoples para las conexiones entre elementos y modelado de inventor donde se obtuvieron los siguientes resultados:

Figura 4

Tubos de propagación sonora para altas y bajas frecuencias.



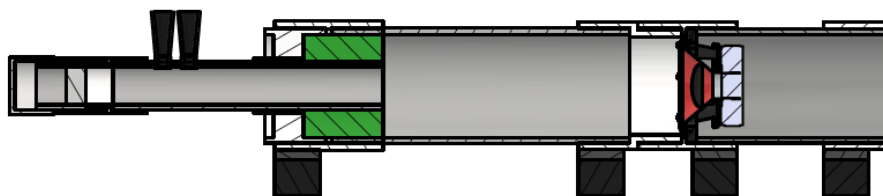
Nota. El tubo de la derecha es el de baja frecuencias y el de la izquierda es el de alta frecuencias.

Se puede observar en la **Figura 4** que se diseñó un tubo de bajas frecuencias con diámetro continuo, mientras que el tubo de altas frecuencias posee un reductor de 4" a 1 ½, esto

es debido a que la fuente sonora seleccionada que cumple con los requerimientos de frecuencia y onda plana es de 4" de diámetro, por lo que se realizó un diseño de acople mediante un tubo de 4", a este tubo se le introduce el tubo de 1 ½" de altas frecuencias. Como es visible en la **Figura 5** entre el interior del tubo de bajas frecuencias y la inserción del tubo de altas frecuencias, se le coloca un anillo de espuma absorbente que atenúa las reflexiones parásitas que se pueden generar entre ambos tubos, además permite que el acople sea gradual y no rompa con las normativas, además este diseño es basado en el tubo de altas frecuencias de Brüel & Kjær type 4206 [9].

Figura 5

Vista seccionada lateral del tubo de impedancia de altas frecuencias.



Nota. Se puede observar en esta vista el interior del tubo de impedancia y la distribución de los elementos.

3.2.3. Gabinete para parlante

Para el diseño del gabinete de la fuente sonora, es fundamental que este se encuentre en un campo acústico estable y no genere resonancias, ya que esto podría generar errores en las mediciones de presión sonora, por lo que se diseñó un gabinete cilíndrico de recinto cerrado. El parlante que se va a contener dentro del gabinete es un parlante de 4" de diámetro, por lo que se necesita dimensionar la longitud necesaria para poder definir el volumen del recinto cerrado en función de parámetros del parlante Dayton Audio RS-100 seleccionado para este proyecto. El cálculo del volumen teórico para una caja cerrada vacía se define como [12]:

$$V_{AB} = \frac{V_{as}}{\left(\frac{Q_{tc}}{Q_{ts}}\right)^2 - 1} \quad (3.5)$$

Donde:

Q_{ts} : Factor de calidad total del parlante.

V_{as} : Volumen equivalente del parlante.

Q_{tc} : Factor de calidad total del parlante en el recinto cerrado.

$$V_{AB} = 1.86 L \quad (3.6)$$

Posteriormente, se realiza el ajuste para un recinto amortiguado, ya que se incluye dentro del gabinete un forro poroso para el parlante, esto se calcula mediante la expresión [12]:

$$V_b = \frac{V_{AB}}{1.2} \quad (3.7)$$

$$V_b = 1.55 L \quad (3.8)$$

Donde la forma el factor 1.2 implica a que los recintos amortiguados se comporten con un 20% mayor de volumen acústicos, luego se obtiene el volumen del recinto amortiguado de manera que no se generen reflexiones internas u ondas estacionarias en comparación con un recinto cerrado sin material absorbente.

Finalmente se necesita la longitud interna del recinto cerrado amortiguado cilíndrico, que se lo obtiene a partir del área y del volumen del recinto:

$$L = \frac{V_b}{A} = 19.12 \text{ cm} \quad (3.9)$$

De esta manera se obtiene que la longitud del recinto cerrado L es equivalente a 19.12 cm, mediante esto se dimensiona el gabinete y se realiza el diseño en inventor. Los componentes que posee el gabinete son: un parlante de 4 pulgadas de diámetro, un anillo de acople entre el parlante y el tubo, forro poroso dentro del recinto, tapas y acoples de tubos de PVC cédula 40, además de puertos de entradas para el parlante, este gabinete se acople tanto para el tubo de altas como para el tubo de bajas frecuencias.

Figura 6

Gabinete para la fuente sonora



Nota. El gabinete es acoplado tanto para el tubo de bajas y altas frecuencias.

3.2.4. Muestra

La muestra que se utilizó en este proyecto es una muestra de fibra vegetal, el cual es la fibra de coco, categorizado como material poroso. La muestra tiene como característica principal que debe de ser del mismo diámetro que tiene el tubo de propagación sonora, por lo que se realizaron muestras de 4" y 1 ½" diámetros, además se debe garantizar que no posea deformaciones, o espacios libres que generen cámaras de aire a través de ella porque puede generar errores en la medición del coeficiente de absorción del material.

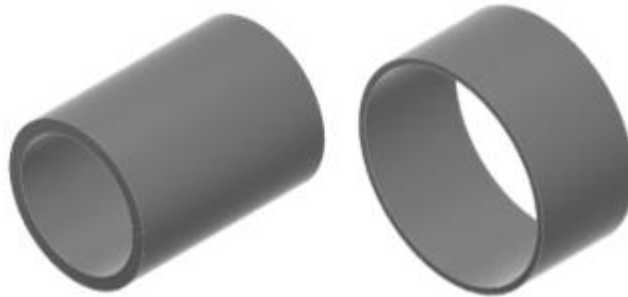
La muestra también posee como característica que debe de ir alineada dentro del porta muestras y a ras, de manera que la distancia entre el micrófono y la muestra no varíe puesto que podría proporcionar errores en los resultados. Además, este tipo de muestras, al ser de materiales porosos, no presentan rigidez y no pueden sujetarse dentro del porta muestras, por lo que se diseñó un elemento para depositarlo y darle forma que permita que esta se encuentre bien sellada dentro del porta-muestras.

Este elemento posee la característica de darle forma y ajuste a las muestras de materiales porosos, que tiene forma cilíndrica y permite que las ondas sonoras atraviesen la muestra y no

produzca errores en la medición. Finalmente, este elemento se lo diseñó para muestras de 4" y 1 ½ " de diámetros.

Figura 7

Moldes para las muestras de fibras vegetales



Nota. El molde de la izquierda es para ensayos de altas frecuencias y el de la derecha para bajas frecuencias.

3.2.5. Porta-muestra

La alternativa seleccionada, presenta una porta-muestra desmontable donde su diseño garantiza que la muestra esté bien sujeta para evitar desplazamientos o vibraciones que provocarían errores y brindar condiciones acústicas necesarias, de manera que no se encuentren fugas sonoras en este sistema. En esta última función, el porta-muestra cuenta con una placa metálica del diámetro de la muestra y de espesor de 20 mm recomendado por las normas, esta tiene como función reflejar las ondas sonoras. De esta manera, se logra calcular con precisión las propiedades de absorción acústica de los materiales mediante las normas [10, 11].

Finalmente se modelaron los diseños para los porta-muestras de 4" y 1 ½ " con su respectiva placa metálica implementado, estos porta-muestras están diseñados para medir muestras de espesor de 2" y de 1", similares a los espesores de muestras comerciales que poseen buenos valores de coeficientes de absorción.

Figura 8

Porta muestras para altas y bajas frecuencias



Nota. El porta muestras de la izquierda es para ensayos de altas frecuencias y el de la derecha para altas.

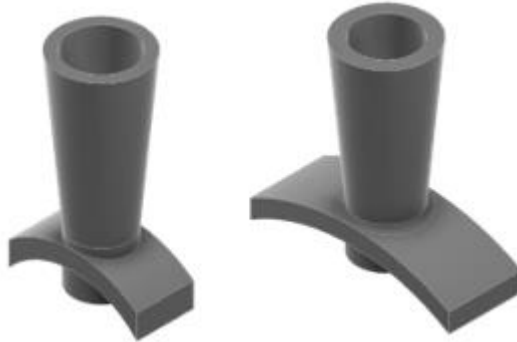
3.2.6. Porta micrófonos

El porta micrófonos están diseñados para ubicar el micrófono de manera axial en un punto en específico del tubo, está ubicado a ras del diámetro interior del tubo, de forma que no genere perturbaciones en el campo acústico. Cuenta con una base que asienta en el tubo, una inserción que permita que el micrófono se ubique a ras y que no se descuadre de su posición en ningún momento, manteniendo firme al micrófono, además cubre con precisión el espacio exterior con el espacio interior del tubo, por lo que evita fugas sonoras.

El porta micrófonos se encuentran sujetos al tubo con silicona para que el micrófono se mantenga firme en todo momento y se evite cualquier fuga al momento de realizar la inserción de la pieza en el tubo. Están diseñados en dos modelos, para tubos de 4" y 1 ½ ", y cumplen con las normativas internacionales ISO y ASTM.

Figura 9

Porta micrófonos para ensayos de altas y bajas frecuencias



Nota. La porta micrófonos de la izquierda es para ensayos de altas frecuencias y el de la derecha para bajas.

3.3. Diseño Electrónico

Anteriormente se explicó que el diseño electrónico iba a estar dividido de acuerdo con las funciones que cumple cada uno de ellos. A continuación, se muestra cada parte que conforma el diseño electrónico junto con sus respectivos diagramas de conexión.

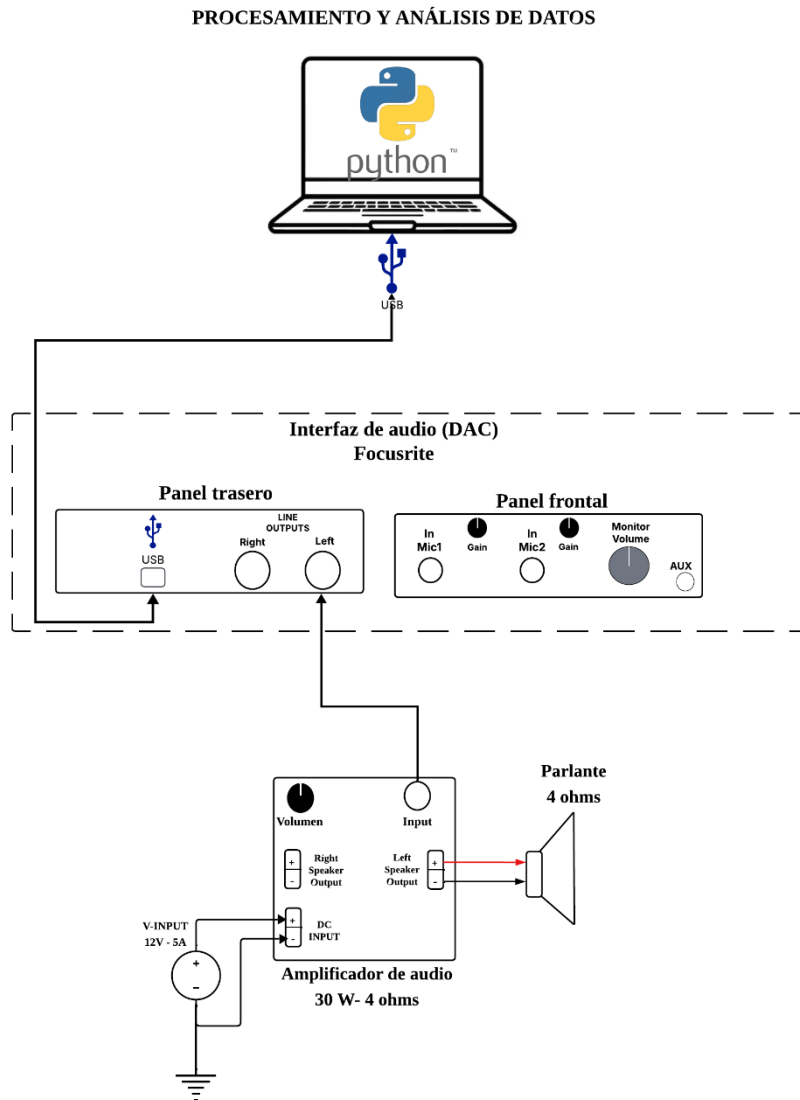
3.3.1. Generación de ondas sonoras

El sistema generador de señales del tubo de impedancia está compuesto por un módulo de potencia, un generador de funciones y un transductor. En primer lugar, un programa generador de funciones produce las señales necesarias a emitirse en la experimentación. La señal es transmitida del generador de funciones a una interfaz de audio DAC para transformar las señales digitales a analógicas. Posteriormente esta es dirigida al módulo amplificador que realiza el trabajo de potencia hacia el transductor.

Esta amplificación brinda la potencia necesaria para excitar el parlante que tendrá el papel de fuente sonora en un extremo del tubo. En el circuito está incluido un control de volumen para el ajuste de la amplitud de las ondas sonoras emitidas. Además, la alimentación externa en DC de 12V-5A permite una operación estable y libre de ruido.

Figura 10

Diagrama esquemático electrónico para la generación de ondas sonoras



Nota. El amplificador debe estar conectado a 12 VDC.

En la **Figura 10** el encargado de generar las funciones será el mismo software procesador de datos, la función de sonido a generar para la experimentación debe ser ruido rosa, y estar filtrado para las frecuencias a analizar. De este modo, no se dependerá de equipos adicionales para realizar esta función. La interfaz de sonido encargada de realizar la transformación de señales es el Scarlett 2i2. El módulo amplificador seleccionado para este caso es el AMP729, el cual permitirá la amplificación de las ondas hacia la fuente de sonido. En la etapa final, el parlante a utilizar es el Speaker RS100-4 debido a que opera en el rango de frecuencias entre 80

y 20 kHz y posee una respuesta plana, este rango es más que suficiente para las frecuencias que se usarán para la caracterización acústica.

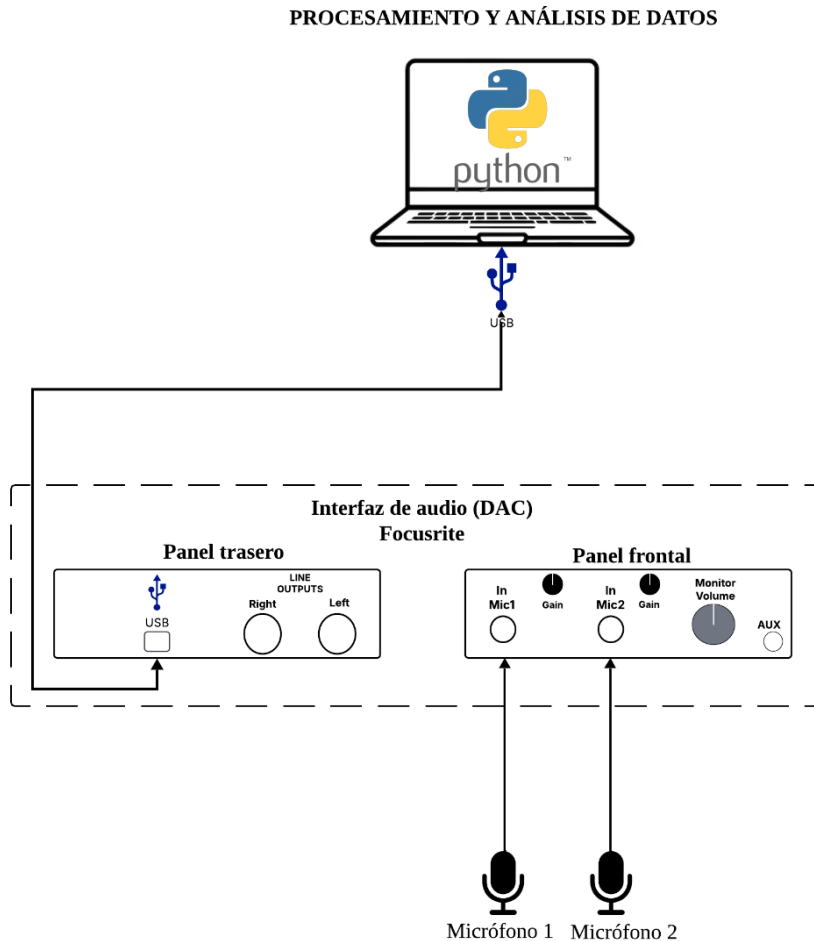
3.3.2. Recepción de señales

El sistema de adquisición de señales acústicas está diseñado de tal manera que se garantice la fidelidad de las mediciones. Dos micrófonos se ubican en sus respectivos espacios designados para obtener las ondas sonoras en los puntos específicos. Las señales acústicas se transforman en señales eléctricas que posteriormente son dirigidos por cables hacia un interfaz de audio. Este elemento cumple con la función de convertir las señales análogas a digitales con una resolución y frecuencias óptimas para el análisis de los espectros.

Cuando se digitalizan las señales de los dos canales son dirigidas hacia el software procesador para el análisis. Este software lleva a cabo el algoritmo del método de la función de transferencia según las normas, que se basa en su cálculo entre las señales de los micrófonos [11]. Finalmente, el sistema determina el coeficiente de reflexión, impedancia acústica y el coeficiente de absorción acústica del material puesto en ensayo. Los resultados son mostrados en el dominio de las frecuencias del rango de operación del tubo, específicamente en octavas y tercios de octava.

Figura 11

Diagrama electrónico para la recepción de señales



Nota. Para fines de comprensión se muestra la parte frontal y trasera de la interfaz de audio.

A partir de la **Figura 11** se puede apreciar que los receptores de las señales del tubo de impedancia son los micrófonos que en este caso serán los ECM PRO de Behringer debido a que son de alta precisión y especializados en análisis de tiempo real. Su señal se dirige al interfaz de audio Scarlett 2i2 que brinda una buena digitalización de las señales. Finalmente se implementa el software usando Python que es un lenguaje de programación especializado para el análisis de datos.

3.3.3. Configuración de micrófonos

Posterior a la selección del material, es importante determinar la configuración de los micrófonos, es decir, si el tubo de impedancia tendrá uno o dos micrófonos para realizar la

caracterización acústica de materiales. Para la alternativa propuesta se escogió la configuración de dos micrófonos porque el proceso de medición es más simple que el otro método y también la fiabilidad de los datos es mejor de tal manera que se garantice la validez de los datos finales.

3.3.4. Medición de condiciones externas del tubo

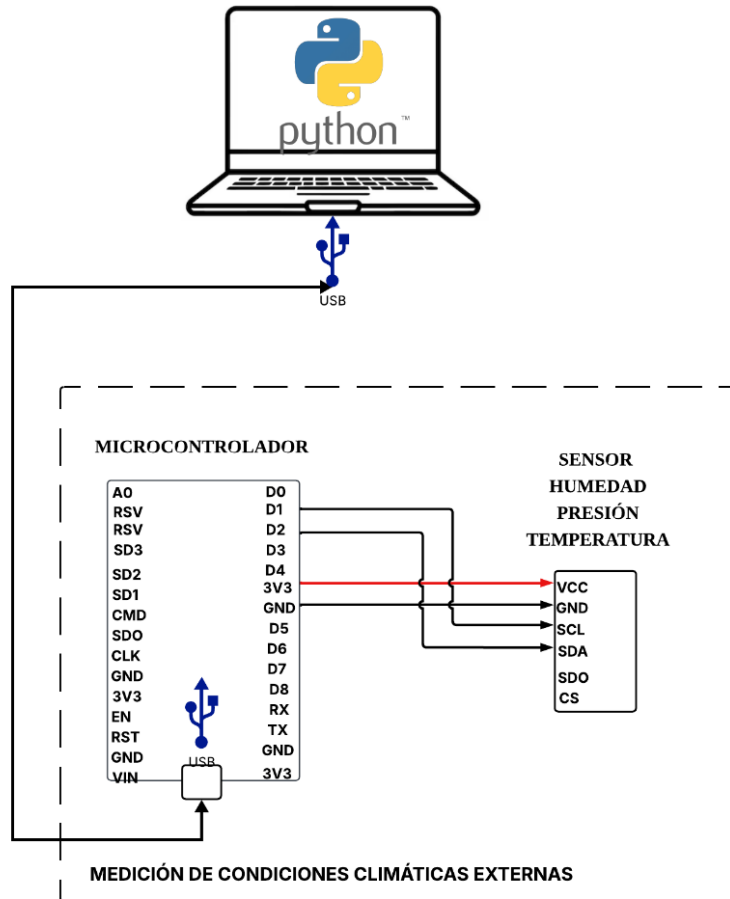
Previo a realizar el ensayo de absorción acústica de cualquier muestra es necesario registrar las condiciones externas ambientales en el lugar que se realizará el ensayo. Pues, existen factores importantes que se utilizan en la función de transferencia para determinar los resultados, los cuales son: la velocidad del sonido en el aire, densidad e impedancia característica del aire, los cuales dependen estrictamente de la temperatura, humedad y presión. Para esto se utiliza un sensor encargado de registrar las variables mencionadas anteriormente.

Una vez obtenidos los datos de parte del módulo, se dirigen a un microcontrolador. Este cumple con dos funciones vitales: recibir las señales del sensor y transmitirlos a una computadora. En esta última se encuentra el software de análisis de datos y que previo a realizar la caracterización acústica de las muestras, requiere las condiciones del aire ya descritas.

Figura 12

Medición de condiciones externas del tubo de impedancia

PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS



Nota. El sistema mide la presión, temperatura y humedad.

En la **Figura 12** el sensor encargado de realizar las mediciones es el BME680 que estará conectado cada uno de sus pines hacia el microcontrolador ESP8266. Donde este último recibirá los datos del sensor y los enviará hacia el software procesador que usará estos datos para determinar la velocidad del sonido en el aire del ambiente donde se realizará el ensayo.

3.4. Diseño de Software

Para el diseño de software, se seleccionó el lenguaje de programación Python, debido a que es gratuito y contiene librerías esenciales para el procesamiento de señales donde se realizó un sistema de procesamiento, análisis y visualización mediante interfaz al usuario, para la

caracterización de coeficientes de absorción mediante el método de tubo de impedancia siguiendo normas ASTM [10].

El software está estructurado en tres clases, Interfaz desarrollada en *Tkinter*, un módulo de procesamiento de señales y un módulo de adquisición de datos. La metodología del módulo de procesamiento de datos se realiza mediante los procedimientos establecidos por las normas, donde a través del método de función de transferencia medida por los micrófonos, relaciona la presión entre los dos micrófonos para poder calcular el coeficiente de absorción.

Las librerías utilizadas fundamentales en el software son *Tkinter*, para realizar interfaz gráfica, *Numpy* y *Scipy*, fundamentales para realizar el procesamiento de señales, cálculos y análisis espectrales, esto mediante la función *welch* que permite realizar el análisis de las densidades espectrales. Otra librería relevante es *SoundDevice* que permite gestionar los dispositivos de audio de la computadora y finalmente la librería *PySerial* permitió obtener mediante comunicación serial las señales de los sensores ambientales.

Del diagrama de flujos de la **Figura 32**, se puede visualizar el diagrama de flujos para el módulo de procesamiento de señales, donde inicia el procedimiento con la adquisición de señales sonoras de la configuración de 2 micrófonos. Posteriormente se realiza la estimación espectral en FFT, aquí se utiliza la función *scipy.signal*, mediante el módulo *scipy.signal.welch* para calcular los auto espectros y espectros cruzados de las señales medidas. Después se realiza la corrección del sistema de medición y los factores de calibración. Luego se calcula el coeficiente de reflexión complejo y finalmente se calcula el coeficiente de absorción sonora, impedancia y reactancia para así poder visualizar estos resultados en diagramas de bandas de tercios y tercios de octavas para su análisis.

3.5. Implementación

Una vez obtenido los resultados de los diseños, mecánicos, electrónicos y de software, se procedió a realizar la implementación del diseño. Primeramente, se realizó la construcción del diseño mecánico que, a partir de los planos de construcción, se logró la construcción del medio de propagación sonora usando tubos de PVC cédula 40 seleccionados y se procedió con la construcción tal como se muestra en la **Figura 13**.

Figura 13

Implementación gabinete para parlante



Nota. Se usó tubos de PVC de 4" de diámetro para su implementación.

Para la implementación se tuvo que realizar la manufactura mediante impresión 3D de partes mecánicas, como lo son: los porta micrófonos, anillo de sujeción de parlante y la caja de alojamiento para el sistema de adquisición de señales sonoras. Teniendo en cuenta los cálculos realizados para determinar las distancias como el espacio entre muestra y micrófono, espacio entre micrófonos, se construyó el tubo de generación sonora como se aprecia en la **Figura 14**.

Figura 14

Implementación del tubo de propagación



Nota. Se mide las distancias necesarias para implementar el tubo de 4" para ensayos de bajas frecuencias.

Para el tubo de altas frecuencias se mencionó que el tubo de 1 ½" se insertaría en otro de 4" para que se puede acoplar al gabinete del parlante. Para lograrlo, se usó un reductor como se observa en la **Figura 15**. Adicionalmente, se aprecia el uso de un anillo de espuma absorbente que evita una posible desviación axial cuando se inserta el tubo de 1 ½" y absorbe ondas parásitas debido a la reducción abrupta de diámetro.

Figura 15

Reducción del diámetro de propagación para el tubo de altas frecuencias



Nota. El uso del reductor es clave para acoplar correctamente del tubo de 4" al de 1 ½".

Para el porta muestras para ambos tubos se utilizan placas metálicas torneadas para obtener los diámetros requeridos respectivamente. Además, se sellaron las juntas de los acoples de manera que se logre evitar cualquier fuga de presión sonora que afecte a las medida y finalmente se acoplaron todas las partes del diseño mecánico tal como muestra la **Figura 16**.

Figura 16

Implementación del porta-muestras



Nota. Este porta-muestras pertenece al tubo de 4" para ensayos de baja frecuencia.

Para el diseño electrónico se utilizaron los componentes facilitados por el beneficiario, como lo son: la interfaz de audio, micrófonos y cables. Se adquirió componentes como la fuente DC 12V-5A, esp32, sensor BME680 y el módulo amplificador de potencia mostrado en la **Figura 17** y **Figura 18** respectivamente. Para las conexiones del amplificador se construyó una caja de alojamiento del amplificador con los puertos de entradas y salidas de audio correspondientes, así como el puerto de alimentación para la fuente de 12V-5A, posteriormente se conectaron las salidas y entradas de audio al interfaz para así probar las conexiones de audio y dirigir la información al software para su posterior procesamiento y análisis.

Figura 17

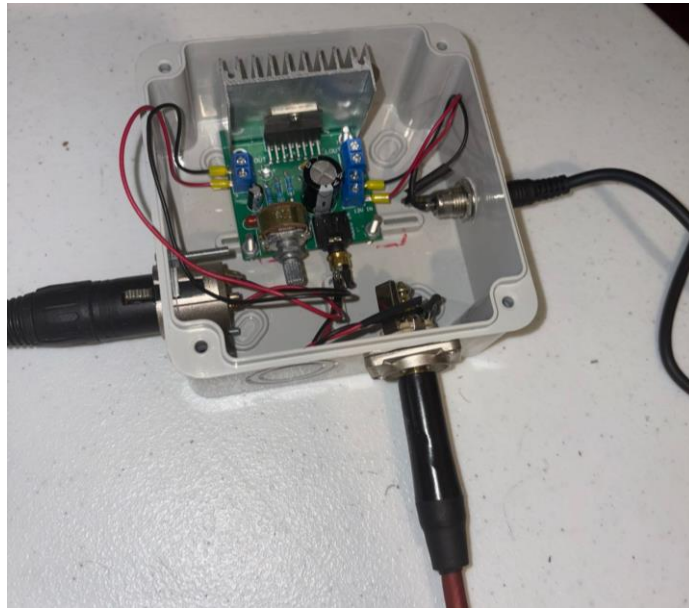
Implementación de la medición de condiciones externas



Nota. A la izquierda se encuentra el sensor, y en la derecha está el microcontrolador.

Figura 18

Módulo amplificador de potencia

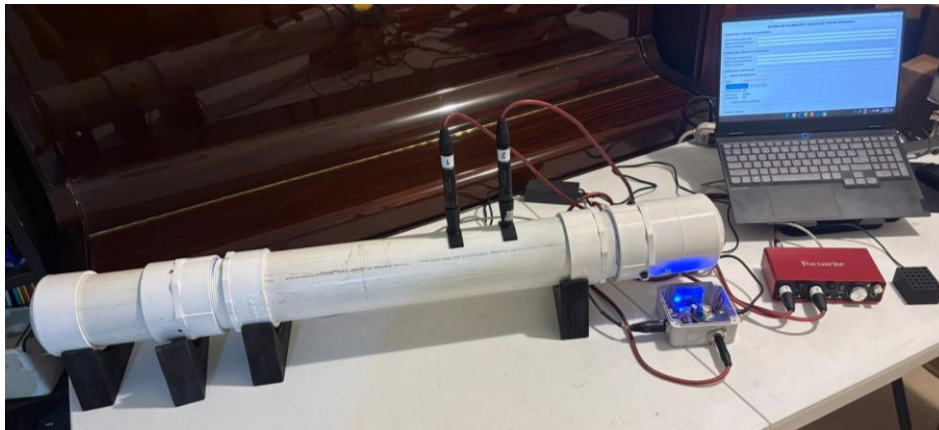


Nota. Se utiliza el módulo AMP729 para la amplificación de la potencia sonora.

Finalmente se probaron las conexiones y mediante el software se realizaron pruebas de conexión y ensayos preliminares para corregir errores, ya sean en la implementación del software, en el diseño mecánico o en el diseño electrónico, donde principalmente se presentaron errores del diseño del software que procedieron a corregirse. Una vez corregido todo tipo de error en los distintos sistemas de tubo de impedancia y realizado múltiples ensayos preliminares, se obtuvo como resultado el sistema de tubo de impedancia funcional cumpliendo con los requerimientos establecidos.

Figura 19

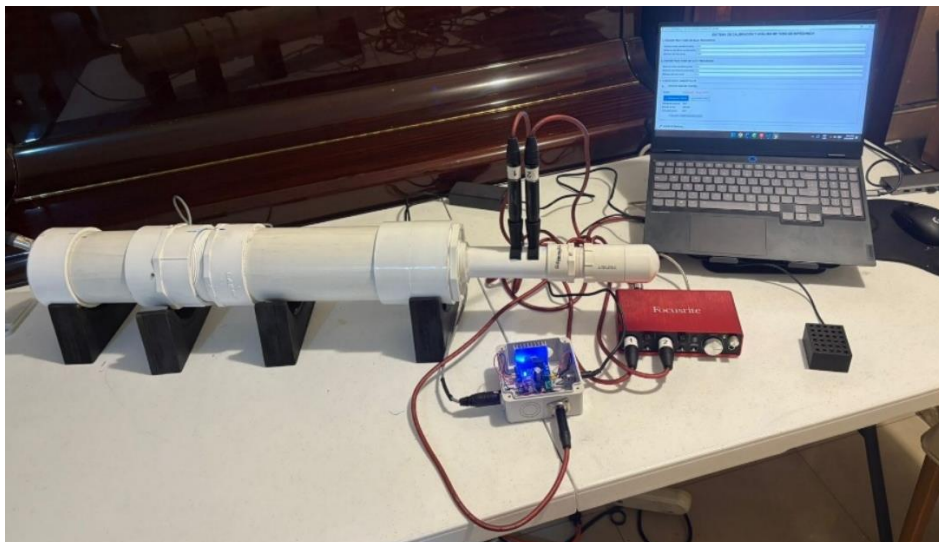
Implementación del tubo de impedancia para ensayos de bajas frecuencias



Nota. Se implementó los diseños mecánicos, electrónicos y de software.

Figura 20

Implementación del tubo de impedancia para ensayos de altas frecuencias



Nota. Se comparte el mismo gabinete de fuente sonora del tubo de bajas frecuencias.

En las **Figuras 19** y **Figura 20** se pueden observar los tubos impedancias de altas y bajas frecuencias, los cuales se construyeron siguiendo los planos de construcción mediante el proceso de diseño mecánico, electrónico y programación. Los tubos en la imagen se encuentran funcionales y listos para realizar mediciones de coeficientes de absorción, por lo que se procede a realizar el análisis de la caracterización acústica de muestras de fibras de coco en el sistema de

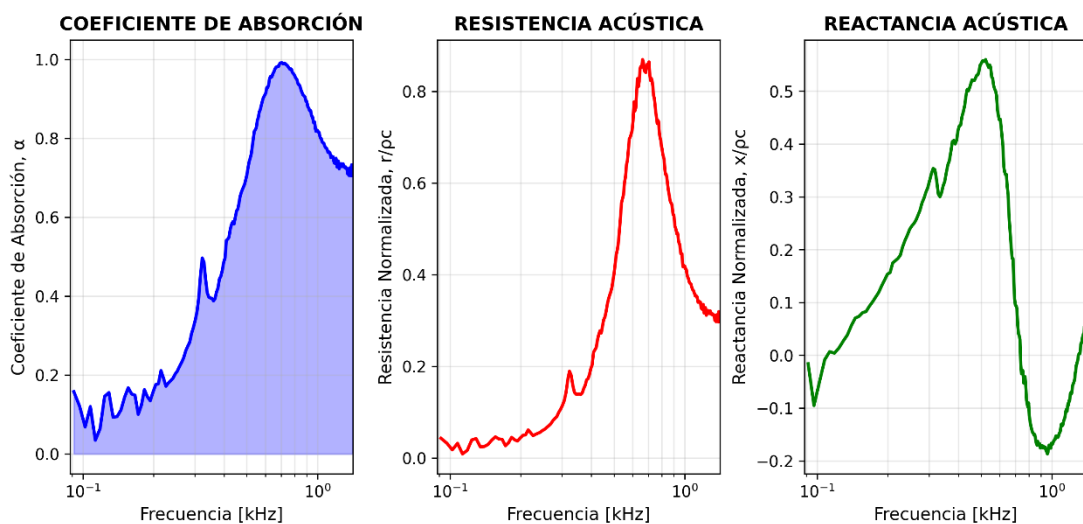
tubo de impedancias ya implementado para así analizar los datos y validar la implementación del tubo de impedancias construido.

3.6. Caracterización Acústica de muestras de Fibra de Coco

Una vez implementado los dos tubos de impedancia siguiendo los diseños expuestos anteriormente, se realizó la caracterización acústica de una muestra de fibra de coco. Esta muestra fue dividida en dos, una para el tubo de bajas frecuencias y otra para el de altas, es decir que sus diámetros serán de 4” y 1.5” respectivamente. No obstante, ambas tuvieron un mismo espesor de 2 pulgadas y una densidad de 73 kg/m^3 .

Figura 21

Caracterización acústica de la muestra de fibra de coco en bajas frecuencias



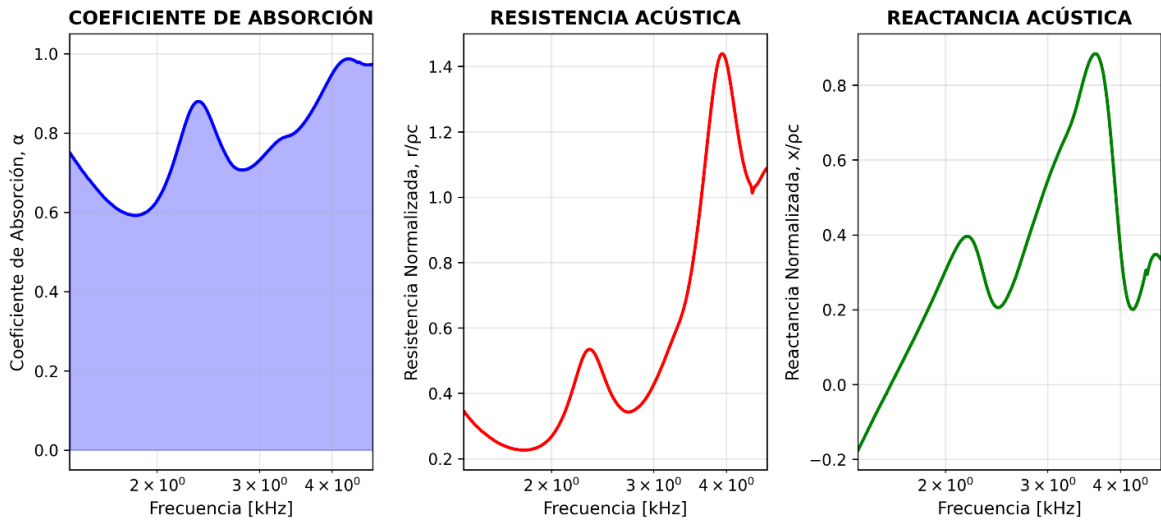
Nota. Se obtuvo los resultados de las principales características acústicas de un material hasta una frecuencia máxima de 1400 Hz aproximadamente.

Como se puede observar en la **Figura 21** la fibra de coco tiene poca capacidad de absorción cuando es sometido a ondas planas de baja frecuencias. Sin embargo, conforme aumenta la frecuencia su coeficiente absorción aumenta exponencialmente. Por otro lado, la resistencia acústica tiene un comportamiento muy similar al del coeficiente de absorción lo cual tiene sentido puesto que estos están directamente relacionados. En cuanto a la reactancia, cuando

el coeficiente de absorción llega al máximo, su valor se vuelve mínimo lo que verifica que la reactancia y el coeficiente de absorción están inversamente relacionados.

Figura 22

Caracterización acústica de la muestra de fibra de coco en altas frecuencias

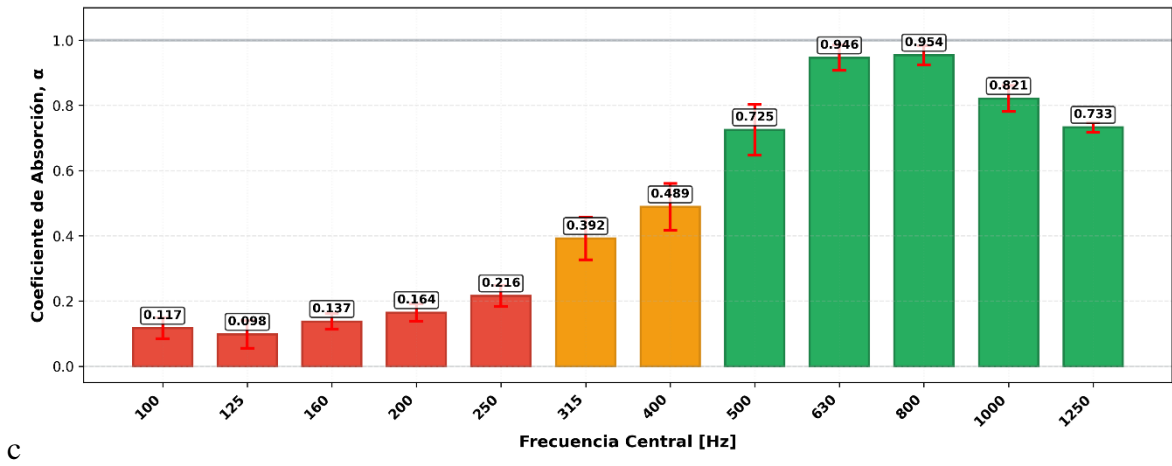


Nota. Se obtuvo los resultados de las principales características acústicas de un material hasta en un rango de 1400 Hz a 5000 Hz aproximadamente.

La **Figura 22** muestra que la fibra de coco tiene una gran capacidad de absorción de ondas planas de altas frecuencias. Mientras aumenta la frecuencia su coeficiente de absorción también lo hace. Por otro lado, la resistencia acústica también aumenta mostrando la relación directa que existe entre estas dos características. Por otra parte, se puede apreciar que en los sectores donde el coeficiente de absorción disminuye, este aumenta y viceversa. Confirmando la relación indirecta entre ellos.

Figura 23

Distribución del coeficiente de absorción en bajas frecuencias

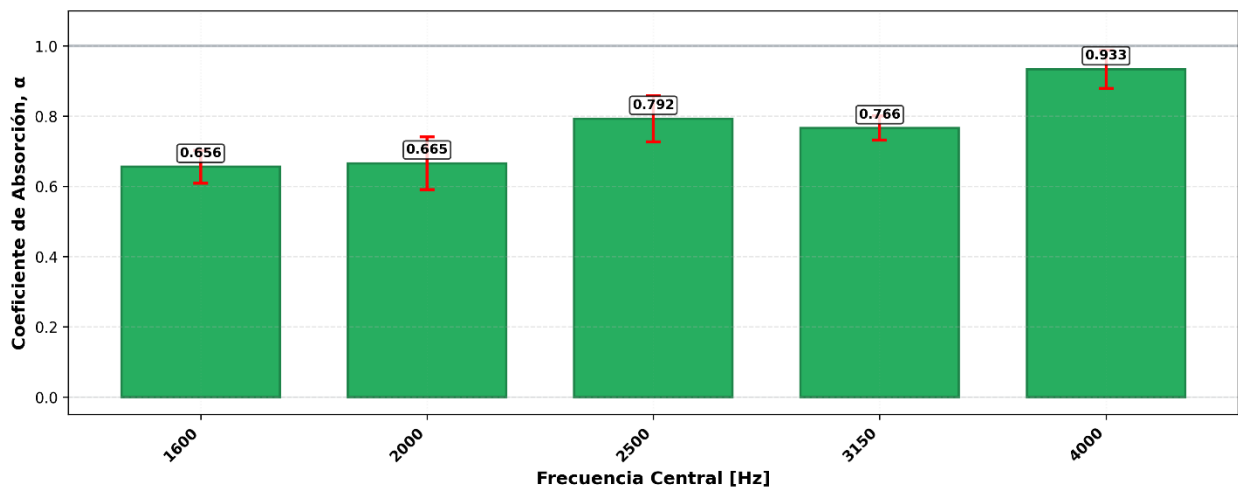


Nota. La distribución de la frecuencia se realiza por tercios de octava sometiendo la muestra a bajas frecuencias.

A partir de la **Figura 23** se puede observar de una mejor manera el coeficiente de absorción acústica a través de la distribución en octavas de la frecuencia. Se observa que, a menor frecuencia, menor coeficiente de absorción y mientras la frecuencia aumenta, la muestra tiene mayor capacidad de absorber el sonido.

Figura 24

Distribución del coeficiente de absorción en altas frecuencias



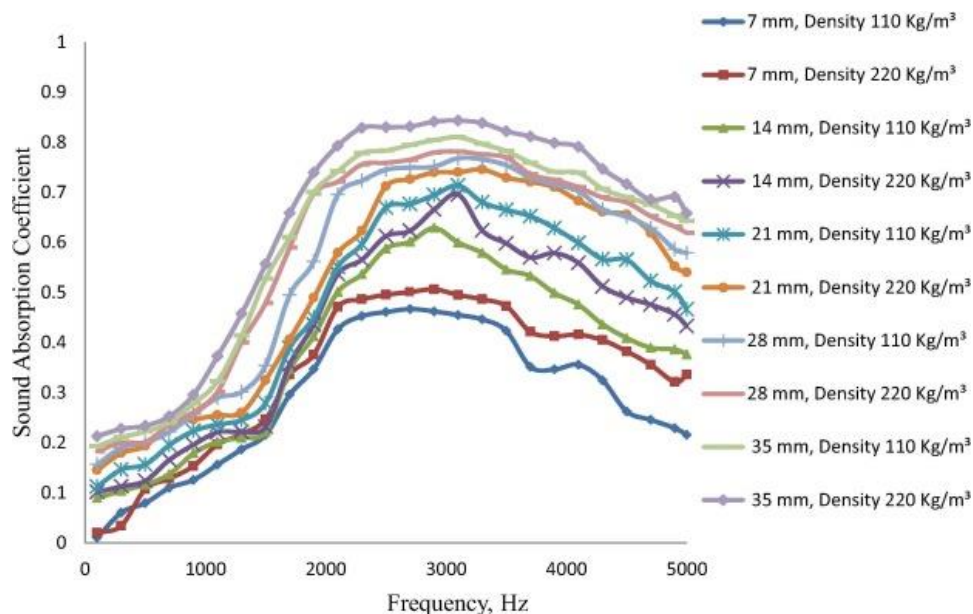
Nota. La distribución de la frecuencia se realiza por tercios de octava sometiendo la muestra a altas frecuencias.

En la distribución de tercios de octava mostrado en la **Figura 24**, se observa que desde los 1600 Hz el coeficiente de absorción acústica supera el valor de 0.6 lo que significa que el material es capaz de absorber ondas acústicas a altas frecuencias. Y a medida que aumenta la frecuencia de ensayo, el coeficiente de absorción acústica también lo hace. De las figuras analizadas anteriormente se puede concluir que una muestra de fibra de coco tiene mayor capacidad de absorción acústica si está sometida a ondas planas de altas frecuencias.

Para verificar que tan certeros son los datos que se obtuvo en el ensayo de las dos muestras, se tuvo como referencia dos trabajos que han determinado el coeficiente de absorción acústica de la fibra de coco.

Figura 25

Coeficiente de absorción acústica de distintas muestras de fibra de coco



Nota. La grafica a tomar en cuenta es de la muestra de 35 mm y densidad de 220 kg/m³ [13].

En el estudio se utilizó muestras de fibra de coco de un espesor de 35 mm y una densidad de 220 kg/m³ utilizando un tubo de impedancia bajo las normas ISO 10534-2 y ASTM E1050-98. A pesar de tener mayor densidad y menor espesor los datos que presentan a altas frecuencias tienen mucha similitud con la Figura. No obstante, al comparar con los resultados obtenidos a

bajas frecuencias en la **Figura 25** tal, únicamente se puede ver que tienen en común el aumento exponencial del coeficiente de absorción acústica.

3.7. Análisis de Costos

Una vez que se comprobó el funcionamiento de los tubos de impedancia, se debe determinar si se cumple el requerimiento de calidad-precio. Por tanto, se realizó un análisis de costos basado en las especificaciones técnicas de la implementación del diseño. De esta manera se cuantifica la ventaja económica que representa esta propuesta frente a los productos comerciales.

De acuerdo con la **Figura 28** en la sección de apéndices, se calculó que el costo total de los materiales necesarios para implementar los tubos de impedancia es de \$884.11.

En esta figura se puede ver que, en el diseño de software el programa no tiene costo debido a que es un software libre. Adicionalmente, se debe tener en cuenta la mano de obra que se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 6

Costo de la mano de obra para la implementación de los diseños

Descripción	Duración	Valor por día	Costo
Proceso de diseño	40 días	\$45	\$1800
Manufactura y ensamblaje	8 días	\$45	\$360
Implementación del software	10 días	\$45	\$450
Total			\$2610

Nota. Los valores por día es promedio del sueldo mensual de un ingeniero Jr en Ecuador [14].

De la **Tabla 6** se obtiene que el total de mano de obra para implementar el diseño de los tubos de impedancia es de \$2610. En este valor se incluye todo el proceso de diseño para obtener el resultado final que tuvo una duración de 40 días. También, se toma en cuenta el proceso de

manufactura de ciertas piezas y el ensamblaje final de todo el instrumento de medición. Por otro lado, a pesar de que el lenguaje de programación a utilizar es libre, la implementación del software es el que tiene el cargo económico. Como resultado, al sumar el costo de los materiales y el de la mano de obra, el costo total del tubo de impedancia es de \$3494.11

Al investigar los precios de los tubos de impedancia estos rondan desde los \$9549.72, que solo incluye el tubo sin ningún otro instrumento, hasta los \$31750 que incluye el kit completo. Estos precios elevados se deben a que los materiales con los materiales y elementos utilizados son de la más alta calidad y especializados para la caracterización acústica. Comparando los valores máximos y mínimos encontrados en el mercado se tiene que el costo de la implementación del diseño es el 37% y 11% respectivamente de los precios comerciales. Por tanto, este diseño es factible y viable económicamente y ayudaría a desarrollar la investigación acústica de materiales [15, 16, 17].

Capítulo 4

4.1 Conclusiones y recomendaciones

4.1.1 Conclusiones

- Mediante el uso de las normas ISO 10534-2 y ASTM E1050-98 se definió que el material a utilizar para los tubos de impedancia es el PVC cedula 40 debido a que no son porosos y su acabado interior no posee discontinuidades. Además, a través de las ecuaciones propuestas por las normas se calculó las dimensiones de los tubos y la ubicación de elementos tales como muestra, fuente de sonido y micrófonos. Finalmente se escogió la configuración de dos micrófonos recomendadas por las normas.
- Se desarrolló el sistema de generación de ondas sonoras aplicando conceptos y fórmulas para realizar un gabinete que brinde un campo acústico estable y que no genere resonancias. Además, se escogió componentes electrónicos de calidad y bajo costo que cumplan la función de generar las ondas acústicas. Además, mediante la integración de micrófonos y una interfaz de audio se registró las señales durante los ensayos de absorción acústica que fueron analizados por un software procesador que a su vez mostró por medio de gráficos los resultados de la caracterización acústica. Finalmente, se logró implementar los diseños y realizar validaciones prácticas, demostrando el correcto funcionamiento del tubo de impedancia diseñado en este proyecto.
- Por medio de un análisis de factibilidad económica se obtuvo el costo de implementar el diseño de los tubos de impedancia donde se tomó en cuenta los materiales, proceso de diseño y mano de obra que como resultado final el costo de implementación es de \$3494.11. Que en comparación con los tubos de impedancia comerciales equivale entre el 11% y 37% de ellos. Por tanto, es viable invertir en la implementación de este diseño de tubos de impedancia.

4.1.2 Recomendaciones

- El diseño del porta muestras desmontable es ideal para poder realizar ensayos para muestras de diámetro de 1 a 2 pulgadas, pero posee la limitación de no poder albergar muestras de mayor espesor, viéndose limitado a solo realizar comparaciones entre estos espesores. Por lo cual se recomienda realizar la implementación de un porta muestras de pistón, de manera que permitiría analizar muestras de mayores espesores e incluso lograr ensayos con simulación de cámaras de aire tras la muestra.
- Se recomienda la implementación al tubo de impedancia la capacidad de realizar pruebas por el método de pérdidas por transmisión, logrando que el tubo sea no solo capaz de medir el coeficiente de absorción, si no que pueda obtener el coeficiente de pérdidas por transmisión y analizar la caracterización acústica de los materiales de fibras vegetales frente a este coeficiente.
- Una adición significativa a la interfaz gráfica del sistema de procesamiento y análisis de datos es adicionar una función que permita al usuario introducir información detallada sobre la muestra y sobre el ensayo que se está realizando, de manera que se pueda tener una bitácora sobre las experimentaciones realizadas y además se pueda generar de manera automática informes de ensayos que sean validados por las normas internacionales ISO y ASTM
- Se recomienda seguir explorando el análisis de los materiales porosos de fibras vegetales, ya que se ha demostrado que poseen buenas características de absorción en frecuencias medias y altas, siendo Ecuador un país con gran biodiversidad y producción agrícola, se puede realizar la caracterización de materiales como lo son el bagazo de banano y el bagazo de caña de azúcar

Referencias

- [1] E. A. Pulloquina Cevallos, "Caracterización de propiedades físicas y acústicas de fibras vegetales para evaluar su potencial uso en la construcción," Tesis de titulación, Fac. Ing. y Cs. Aplicadas, Univ. de las Américas, Quito, Ecuador, 2019.
- [2] P. Flores Pereita, "Distribución espacial del sonido," en Manual de acústica, ruido y vibraciones. Barcelona, España: Ediciones GYC, 1989.
- [3] J. Ramis et al., "A model for acoustic absorbent materials derived from coconut fiber", Mat. De Constr., vol 64, Ene 2014.
- [4] H. Arau Puchades, "ABC de la Acústica", Tomo II.
- [5] H. Arau Puchades, "ABC de la Acústica", Tomo I.
- [6] A. Carrión Isbert, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, Primera. Edicions UPC, 1998
- [7] F. Alton Everest, The Master Handbook of Acoustics, 4a ed. 2001.
- [8] Manuel. Recuero López, "Acústica arquitectónica aplicada". Paraninfo, 1999.
- [9] Bruel & Kjaer, "Impedance Tube Kit Type 4206, Type 4206-A and Type 4206-T". Dinamarca, 2019.
- [10] ASTM, "Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using A Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System". United States, 1998.
- [11] ISO, "Acoustics. Determination of acoustic properties in impedance tubes. Part 2: Two-microphone technique for normal sound absorption coefficient and normal surface impedance (ISO 10534-2:2023, Corrected version 2025-8)". Spain, 2025.

[12] C. García Puertas, “Diseño de Cajas Acústicas”, Esc. Sup. Ing. Bilbao, Univ. País Vasco, Bilbao, España.

[13] N. H. Bhingare and S. Prakash, “An experimental and theoretical investigation of coconut coir material for sound absorption characteristics,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 43, pp. 1545–1551, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.401>

[14] “Salario de Ingeniero/a”, *Computrabajao.com*, 2026.
<https://ec.computrabajo.com/salarios/ingenieroa>

[15] Holmarc, “Acoustic Impedance tube”, *Ophtho-Mechatronics LTD*.
https://www.holmarc.com/acoustic_impedance_tube.php

[16] ROGA Instruments, “Impedance Tube for Sound Absorption and Transmission Loss Measurement”, *roga-instruments.com*, 2024. <https://roga-instruments.com/impedance-tubes/>

[17] Norsonic AS, “Nor1527 Impedance Tube,” *Norsonic Products*, 2025. [Online]. Available: <https://www.norsonic.com/products/test-systems/nor1527-impedance-tube/>. [Accessed: Feb. 10, 2026]

Apéndice

Cálculos del Diseño Mecánico

Para el tubo de bajas frecuencias (88.39 Hz – 1.414 kHz)

Diámetro

$$f_u \cdot d < 0.58c_0$$

$$d < \frac{0.58c_0}{f_u}$$

$$d < \frac{0.58 \cdot 343}{1414}$$

$$d < 0.1407 [m]$$

De acuerdo con tubos de pvc comerciales, el diámetro interior será:

$$d = 103 [mm]$$

Espacio entre la fuente y el micrófono más cercano

$$e_{fm} > 3 \cdot d$$

$$e_{fm} > 3 \cdot 103$$

$$e_{fm} > 309 [mm]$$

$$e_{fm} = 350 [mm]$$

Espacio entre micrófonos

$$s \ll \frac{c}{2f_u}$$

$$s \ll \frac{343}{2 \cdot 1414}$$

$$s \ll 0.121 m$$

$$s \ll 0.121 \cdot 0.8$$

$$s \ll 0.097 m$$

$$s = 90 mm$$

La norma ASTM menciona que el resultado de la ecuación se le debe obtener el 80% y luego escoger un valor mucho menor.

Espacio entre muestra y micrófono

$$e_{mm} \geq d$$

$$e_{mm} \geq 103 \text{ mm}$$

$$e_{mm} = 140 \text{ [mm]}$$

Longitud total del tubo de PVC para bajas frecuencias:

$$e_{fm} + s + e_{mm}$$

$$350 + 90 + 140 = 580 \text{ [mm]}$$

Para el tubo de altas frecuencias (1414 Hz – 5000 kHz)

Diámetro

$$f_u \cdot d < 0.58c_0$$

$$d < \frac{0.58c_0}{f_u}$$

$$d < \frac{0.58 \cdot 343}{5000}$$

$$d < 0.039 \text{ [m]}$$

$$d < 38 \text{ [mm]}$$

De acuerdo con los tubos de PVC comerciales, el diámetro es:

$$d = 38 \text{ mm}$$

Espacio entre la fuente y el micrófono más cercano

$$e_{fm} > 3 \cdot d$$

$$e_{fm} > 3 \cdot 38$$

$$e_{fm} > 114 \text{ [mm]}$$

Claramente este espacio debe ser mayor a 114 mm, sin embargo, en el diseño de este tubo para altas frecuencias se sigue diseños de tubos de impedancia comerciales que utilizan secciones de otros tubos de baja frecuencia para combinarlas con partes del tubo de alta frecuencia. Por este motivo, al unir todos los componentes, la distancia final entre la fuente de sonido y el micrófono más cercano es:

$$e_{fm} = 441 [mm]$$

Espacio entre micrófonos

$$s \ll \frac{c}{2f_u}$$

$$s \ll \frac{343}{2 \cdot 5000}$$

$$s \ll 0.0343 [m]$$

$$s \ll 0.0343 * 0.8$$

$$s \ll 0.027 [m]$$

$$s = 26 [mm]$$

Espacio entre muestra y micrófono

$$e_{mm} > d$$

$$e_{mm} > 38$$

$$e_{mm} > 38 [mm]$$

$$e_{mm} = 50 [mm]$$

Longitud efectiva del tubo y componentes de PVC para altas frecuencias

$$e_{fm} + s + e_{mm}$$

$$441 + 26 + 50 = 517 [mm]$$

Parámetros utilizados para ensayos de caracterización acústica de muestras de fibras de coco.

Tabla 7

Condiciones externas en el ensayo de caracterización acústica

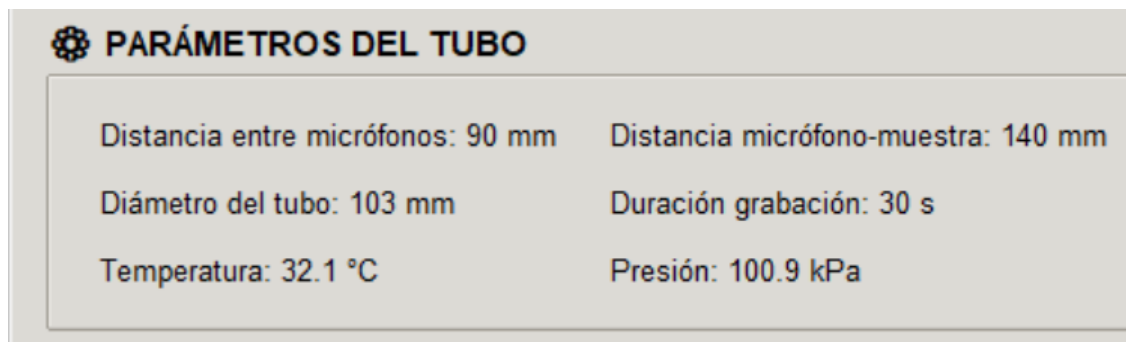
Parámetro	Valor
Temperatura	32.2 [°C]
Presión Atmosférica	100.9 [kPa]
Humedad Relativa	63.1 [%]

Nota. Parámetros de temperatura, presión atmosférica y humedad registrados por el sensor.

Estos parámetros son necesarios para que se pueda ejecutar el método de función de transferencia para obtener el coeficiente de absorción acústica en una muestra.

Figura 26

Parámetros registrados en el software para ensayo a bajas frecuencias



The image shows a screenshot of a software interface titled "PARÁMETROS DEL TUBO". It displays six parameters in two columns:

PARÁMETROS DEL TUBO	
Distancia entre micrófonos: 90 mm	Distancia micrófono-muestra: 140 mm
Diámetro del tubo: 103 mm	Duración grabación: 30 s
Temperatura: 32.1 °C	Presión: 100.9 kPa

Nota. Estos parámetros fueron registrados para efectuar el ensayo de absorción acústica de una muestra a bajas frecuencias.

En la **Figura 26** se observa que se registró las condiciones externas obtenidas por el sensor además de las dimensiones del tubo de impedancia para bajas frecuencias.

Figura 27

Parámetros registrados en el software para ensayo de altas frecuencias



The image shows a software interface window titled "PARÁMETROS DEL TUBO". It contains a table of recorded parameters for a high-frequency test. The parameters are arranged in two columns and three rows.

PARÁMETROS DEL TUBO	
Distancia entre micrófonos: 26 mm	Distancia micrófono-muestra: 50 mm
Diámetro del tubo: 38 mm	Duración grabación: 30 s
Temperatura: 32.2 °C	Presión: 100.9 kPa

Nota. Estos parámetros fueron registrados para efectuar el ensayo de absorción acústica de una muestra a altas frecuencias.

En la **Figura 27** se observa que se registró las condiciones externas obtenidas por el sensor además de las dimensiones del tubo de impedancia para bajas frecuencias.

Descripción Técnica de Componentes

Interfaz de Audio Scarlett 2i2 4th gen:

Entradas de micrófono

- Respuesta de frecuencia: 20Hz - 20kHz $\pm 0,06$ dB
- Intervalo dinámico (ponderación A) : 116dB
- Distorsión armónica total + ruido: -100dB (-1dBFS @ 8dB Gain)
- Ruido EIN (ponderación A): -127dBu
- Nivel de entrada máximo (a ganancia mínima); +16dBu
- Intervalo de ganancia: 69dB
- Impedancia de entrada: 3k Ω

Salidas de línea (equilibradas)

- Respuesta de frecuencia: 20Hz - 20kHz \pm 0.02dB
- Intervalo dinámico (ponderación A): 120dB
- Distorsión armónica total + ruido: -109dB
- Nivel de salida máximo: +16dBu
- Impedancia de salida: 100 Ω

Behringer ECM PRO:

- Tipo de cápsula: Condensador electret trasero
- Directividad: Omnidireccional
- Tipo de cápsula: Condensador electret trasero
- Impedancia: 600 Ω \pm 20% @ 1 kHz
- Respuesta en frecuencia: 40 Hz a 30 kHz
- Sensibilidad: -39,5 dB \pm 3 dB (1 dB=1 V/Pa a 1 kHz)
- Tensión de trabajo: P48
- SPL de entrada máx.: 132 dB
- Conector: XLR3M

Dayton audio rs100-4:

- Speaker Type: Full-Range
- Nominal Diameter: 4"
- Power Handling (RMS); 30 watts
- Power Handling (max); 60 watts
- Impedance; 4 ohms
- Sensitivity; 87.5 dB @ 2.83V/1m
- Frequency Response: 80 - 20,000 Hz

ESP8266:

- *Core: 1*
- *Architecture: 32 bits*
- *Clock: Xtensa LX106 80-160MHz*
- *WiFi: IEEE802.11 b/g/n support for WPA and WPA2*
- *Bluetooth: No*
- *RAM: 160KB - 64KB Instruction - 96KB Data*
- *Flash: Extern QSPI - 512KB A 4MB*

BME680:

- *Voltaje de alimentación: 3.3-5 VDC*
- *Interfaz de comunicación: I2C o SPI (3.3V)*
- *I2C-Dirección: 0x76/0x77*
- *Rango de Presión: 300-1100 hPa*
- *Resolución Presión: 0.18 Pa*
- *Precisión presión: +-0.12 hPa (aprox. +-1m)*
- *Rango de Temperatura: -40°C a 85°C*
- *Resolución de temperatura: 0.01°C*
- *Precisión Temperatura: +-1°C*
- *Rango de Humedad Relativa: 0-100% RH*

Costos de producción

Figura 28

Costos de los materiales para implementación de los diseños

Sección de Diseño	Descripción	Cantidad	Precio unitario (Dólares)	Subtotal (Dólares)
DISEÑO MECÁNICO	Tapa PVC cd40 - 4 "	2	6.60	13.20
	Tubo PVC cd40 - 4 " (m)	1.1	15.000	16.50
	Acople hembra PVC cd40 - 4 "	2	6.000	12.00
	Soporte parlante impreso en 3d	1	4.000	4.00
	Acople macho PVC cd40 - 4 "	3	5.710	17.13
	Porta micrófono 3D tubo 4"	2	2.000	4.00
	Placa metálica 4"	1	30.000	30.00
	Pernos Hexagonales M6	3	0.500	1.50
	Bases de soporte de madera	4	10.000	40.00
	Plancha de esponja	1	4.000	4.00
	Unión tubo PVC cd40 - 4 "	1	4.830	4.83
	Reductor PVC-cd 40 - 4" a 1.5"	1	7.570	7.57
	Tubo PVC cd40 - 1.5" (m)	0.32	2.000	0.64
	Porta micrófono 3D 1.5"	2	1.500	3.00
	Acople macho PVC cd40- 1.5"	1	0.800	0.80
	Acople hembra PVC cd40 - 1.5"	1	0.800	0.80
	Tapa PVC cd40 - 1.5"	1	0.680	0.68
	Placa metálica 1.5"	1	15.000	15.00
	Anillo sujetador de muestras	2	2.000	4.00
	Caucho espesor 2cm, 2 metros	1	1.200	1.20
DISEÑO ELECTRÓNICO	Interfaz Scarlett 2i2 4th generation	1	250.000	250.00
	Calibrador AZ8930B	1	120.000	120.00
	Micrófonos Behringer ECM-P PRO	2	75.000	150.00
	Módulo EVL-MOD-AMP72	1	6.000	6.00
	Fuente 12V-5A	1	7.000	7.00
	ESP32	1	10.000	10.00
	Sensor BME680	1	11.300	11.30
	Parlante Dayton Audio	1	70.960	70.96
	Cables de extension de micrófono	2	15.000	30.00
	Cable de señal a nivel de línea	1	5.000	5.00
	Cable de parlante	1	15.000	15.00
	Cable usb a micro usb	1	5.000	5.00
	Gabinete de alojamiento de amplificador	1	4.000	4.00
	Gabinete de alojamiento de sensor	1	4.000	4.00
	Conectores para gabinete de amplificador	3	5.000	15.00
DISEÑO DE SOFTWARE	Lenguaje de programación (Python)	0	0.000	0.00
TOTAL				884.11

Nota. Los precios están descritos en dólares.

Interfaz del software

Figura 29

Interfaz gráfica del software procesador de datos

The screenshot shows a software window titled "SISTEMA DE CALIBRACIÓN Y ANÁLISIS DE TUBO DE IMPEDANCIA". It is divided into three main sections:

- 1. PARÁMETROS TUBO DE BAJA FRECUENCIA**: Contains three input fields with values: "Distancia entre micrófonos [mm]: 70.0", "Distancia micrófono-muestra [mm]: 65.0", and "Diámetro del tubo [mm]: 100.0".
- 2. PARÁMETROS TUBO DE ALTA FRECUENCIA**: Contains three input fields with values: "Distancia entre micrófonos [mm]: 30.0", "Distancia micrófono-muestra [mm]: 30.0", and "Diámetro del tubo [mm]: 50.0".
- 3. CONDICIONES AMBIENTALES**: Features a sub-section for "SENSOR BME680 (ESP32)". The status is "Desconectado". It includes a "Conectar Sensor" button, an "Actualizar Lectura" button, and displays current values: "Temperatura actual: 20.0", "Presión actual: 101.325", and "Humedad actual: 50.0". There is also a checkbox for "Actualizar variables automáticamente".

Nota. En esta sección del software se ingresan condiciones externas y dimensiones del tubo previo a los ensayos de caracterización acústica.

Figura 30

Configuración de dispositivos y calibración

The screenshot shows a software window titled "INGRESO MANUAL". It is divided into three main sections:

- INGRESO MANUAL**: Contains three input fields with values: "Temperatura [°C]: 20.0", "Presión atmosférica [kPa]: 101.325", and "Humedad relativa [%]: 50.0".
- 4. CONFIGURACIÓN DE DISPOSITIVOS DE AUDIO**: Features two dropdown menus. The first is "Dispositivo de Salida" with the value "Atravoces (EPSON Projector QW A (Solido...))". The second is "Dispositivo de Entrada" with the value "0: Asignador de sonido Microsoft - Input (Entradas: 2)". Below these are two buttons: "Probar Dispositivos" and "Actualizar Lista".
- 5. CALIBRACIÓN**: Contains an input field for "Duración de grabación [s]: 5". Below this are two large green buttons: "EMPEZAR CALIBRACIÓN TUBO DE BAJA FRECUENCIA" and "EMPEZAR CALIBRACIÓN TUBO DE ALTA FRECUENCIA". At the bottom are two smaller buttons: "LIMPIAR TODO" and "AYUDA".

At the very bottom of the window, a status bar reads: "Sistema listo - Configure dispositivos y seleccione modo de calibración".

Nota. En esta sección del software se muestra la configuración de los dispositivos detectados en el ordenador y la calibración de los micrófonos a utilizar.

Figura 31

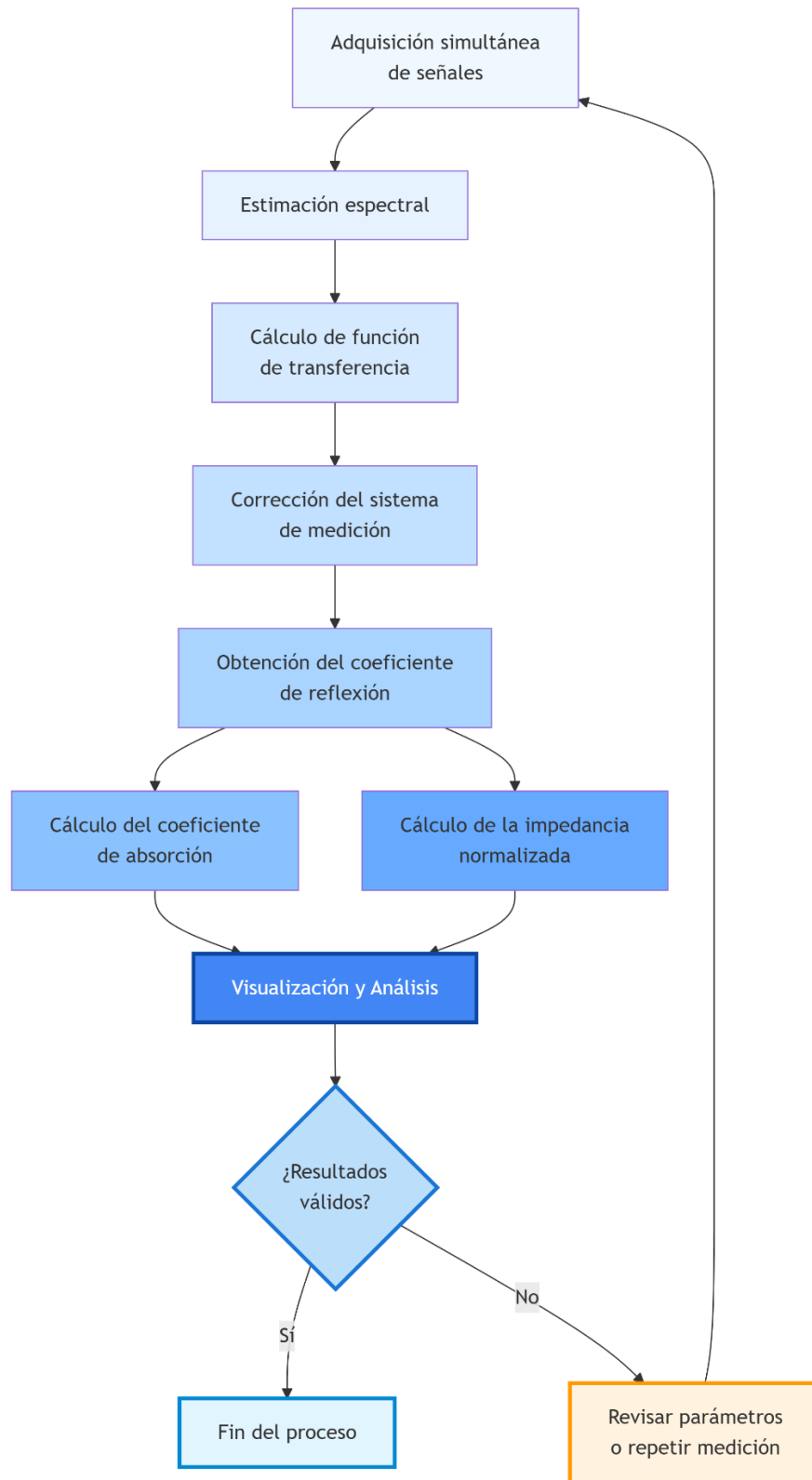
Calibración de los micrófonos



Nota. En esta sección del interfaz se indican las instrucciones de este proceso y las grabaciones que se necesita.

Figura 32

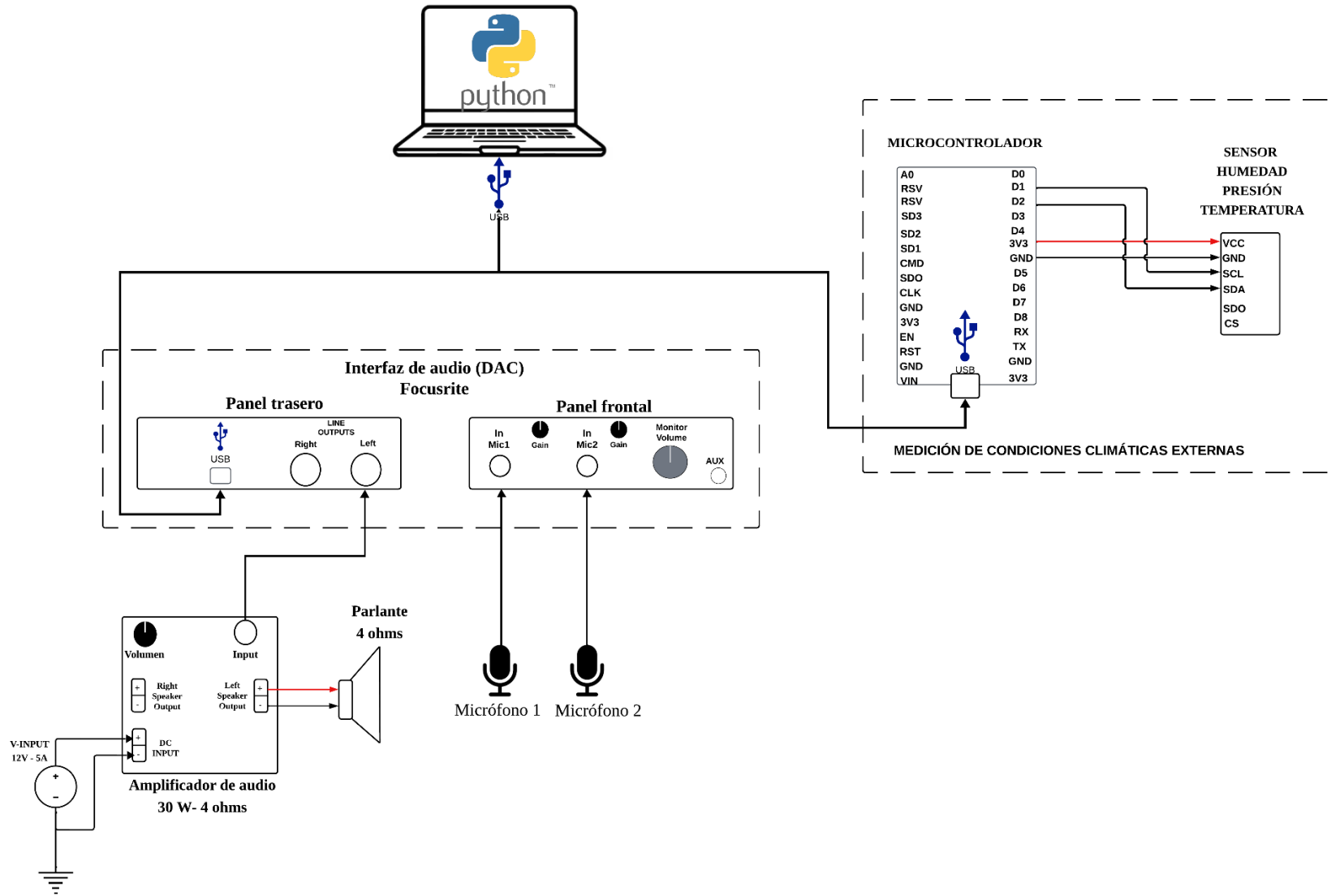
Diagrama de flujo del software



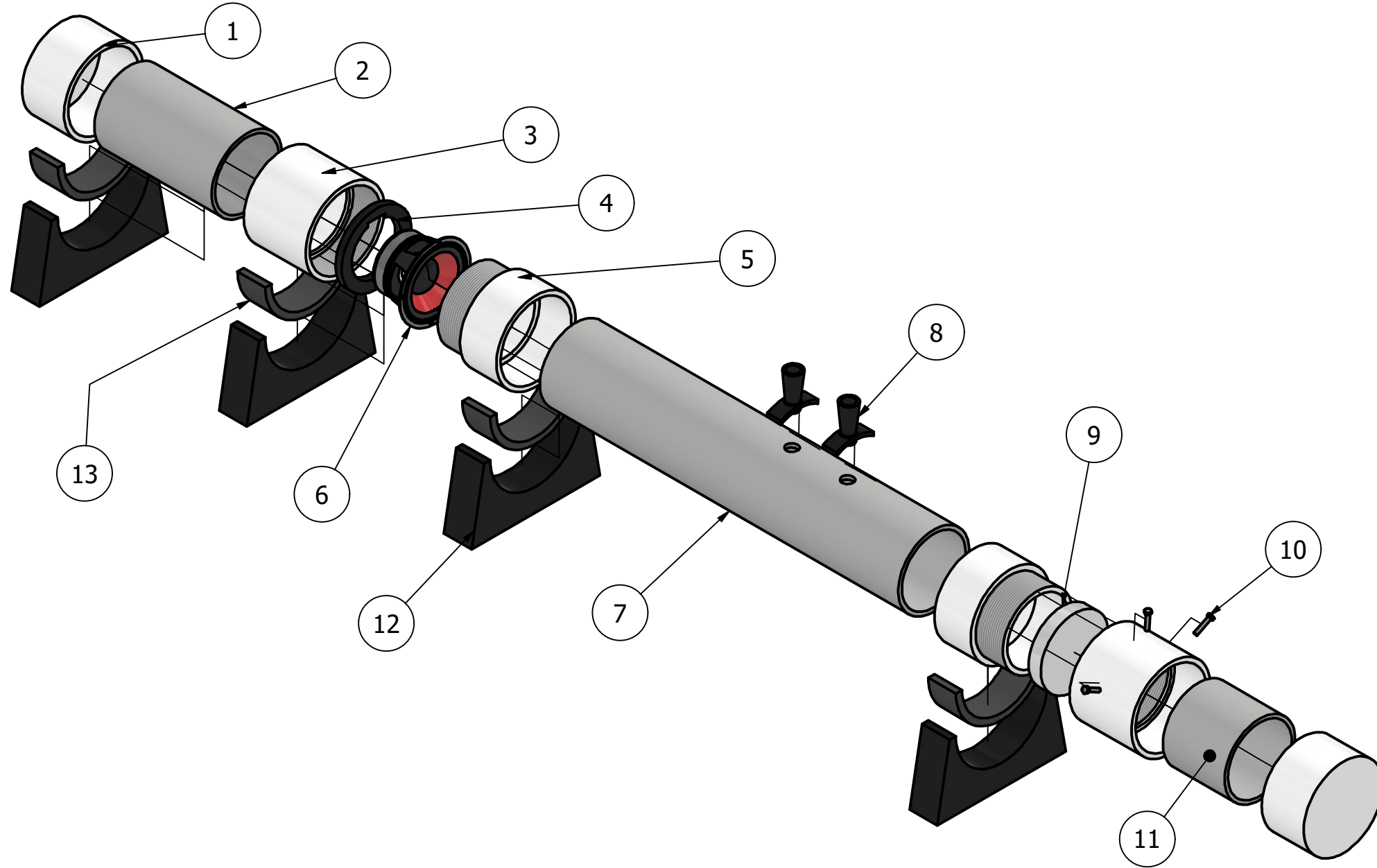
Nota. El diagrama de flujo está basado en el diseño propuesto para el software.

Plano Electrónico


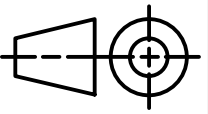
PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

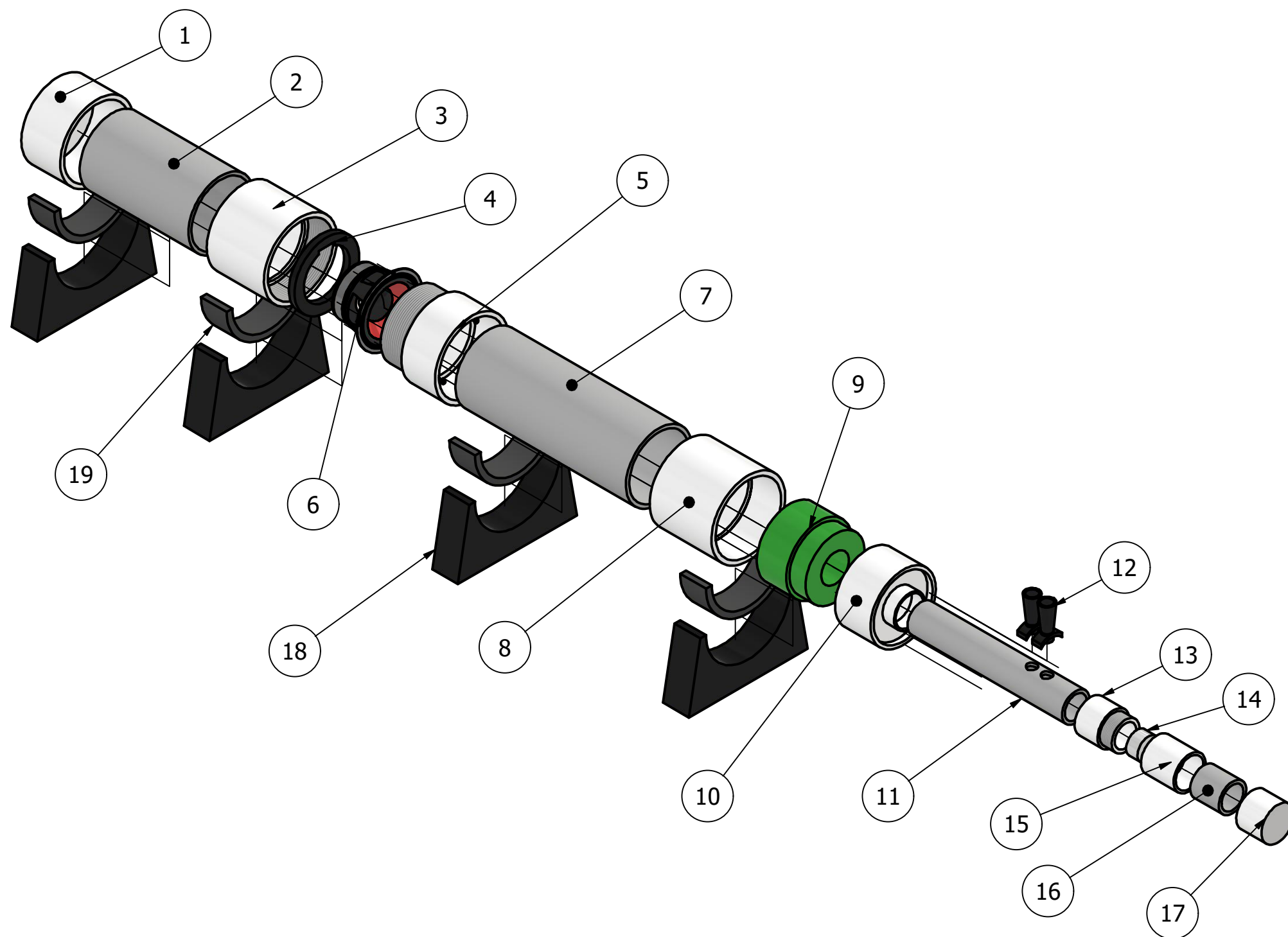


Planos del tubo de impedancia


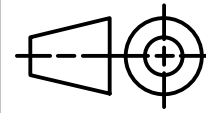


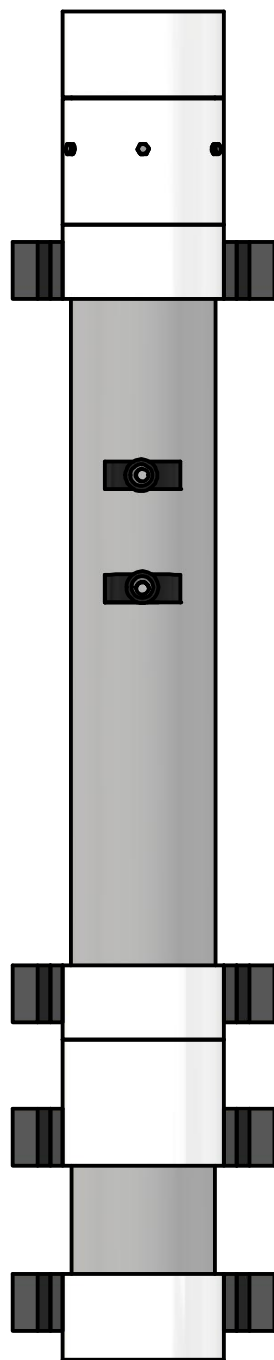
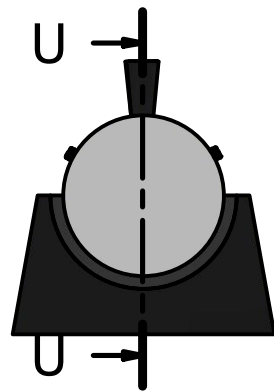
LISTA DE PIEZAS		
N DE PIEZA	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN
1	2	TAPA DE 4"
2	1	TUBO DE UNIÓN DE 4" PARA FUENTE SONORA
3	2	ACOPLE HEMBRA DE 4"
4	1	ANILLO DE 4"
5	2	ACOPLE MACHO DE 4"
6	1	PARLANTE DE 4"
7	1	TUBO PRINCIPAL DE 4"
8	2	PORTA MICRÓFONOS PARA TUBO DE 4"
9	1	PLACA METÁLICA PARA TUBO DE 4"
10	3	PERNO DE CABEZA HEXAGONAL
11	1	TUBO DE UNIÓN DE 4" PARA PORTA MUESTRA
12	4	BASE
13	4	CAUCHO

		FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN			
PROYECTO: MATERIA INTEGRADORA		TÍTULO: VISTA EXPLOTADA DEL TUBO DE IMPEDAPANCIA PARA BAJAS FRECUENCIAS		HOJA: A3	
FECHA: 17/01/2026		REVISADO POR: ING. GALO DURAZNO APROBADO POR: ING. JONATHAN LEÓN		AUTORES: STEVEN ALMENABA ISAAC SEGOVIA	
				UNIDAD: mm	
				ESCALA: 1 : 6	
				PÁG: 1 DE 26	

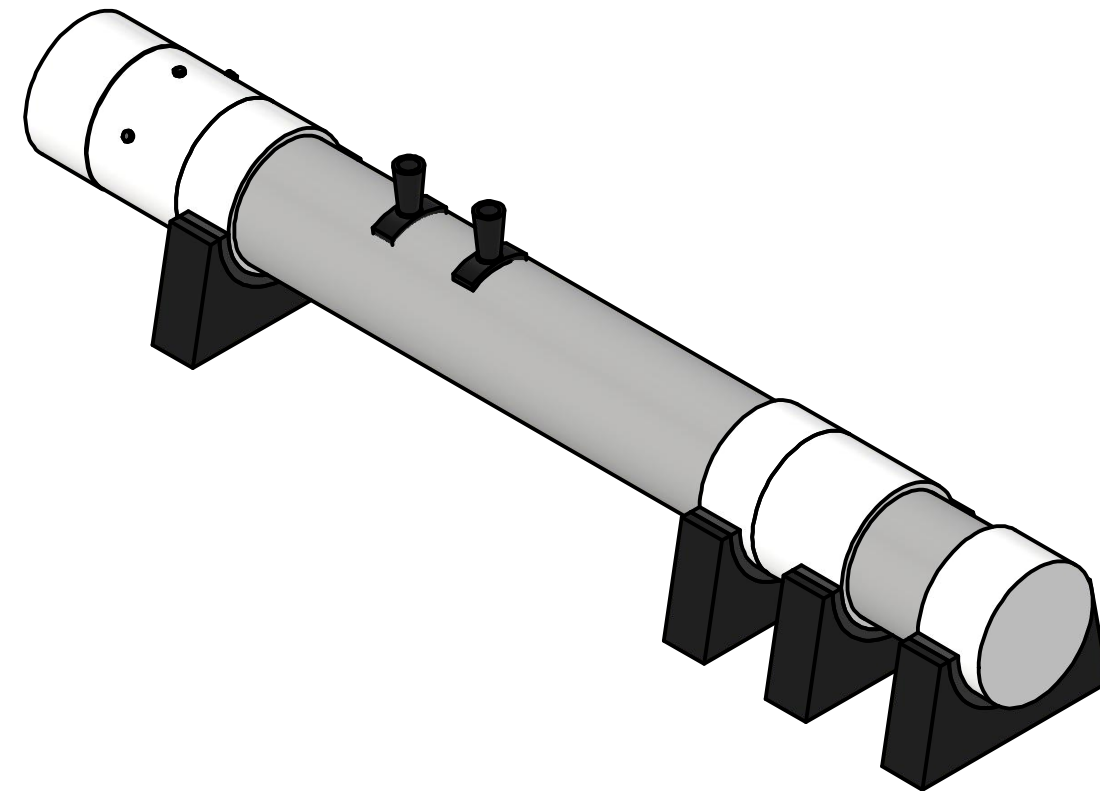
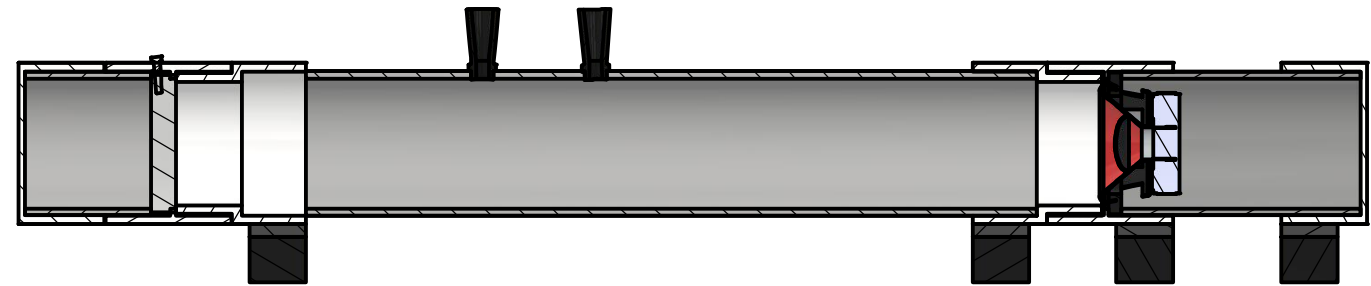



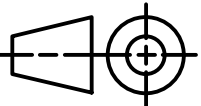
LISTA DE PIEZAS		
N DE PIEZA	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN
1	1	TAPA DE 4"
2	1	TUBO DE UNIÓN PARA FUENTE SONORA DE 4"
3	1	ACOPLE HEMBRA DE 4"
4	1	ANILLO DE 4"
5	1	ACOPLE MACHO DE 4"
6	1	PARLANTE DE 4"
7	1	TUBO DE EXTENSIÓN DE 4"
8	1	ACOPLE DE UNIÓN DE 4"
9	1	ESPONJA
10	1	REDUCTOR DE 4" A 1.5"
11	1	TUBO PRINCIPAL DE 1.5"
12	2	PORTA MICRÓFONOS PARA TUBO DE 1.5"
13	1	ACOPLE MACHO DE 1.5"
14	1	PLACA METÁLICA PARA TUBO DE 1.5"
15	1	ACOPLE HEMBRA DE 1.5"
16	1	TUBO DE UNIÓN DE 1.5" PARA PORTA MUESTRA
17	1	TAPA DE 1.5"
18	4	BASE
19	4	CAUCHO

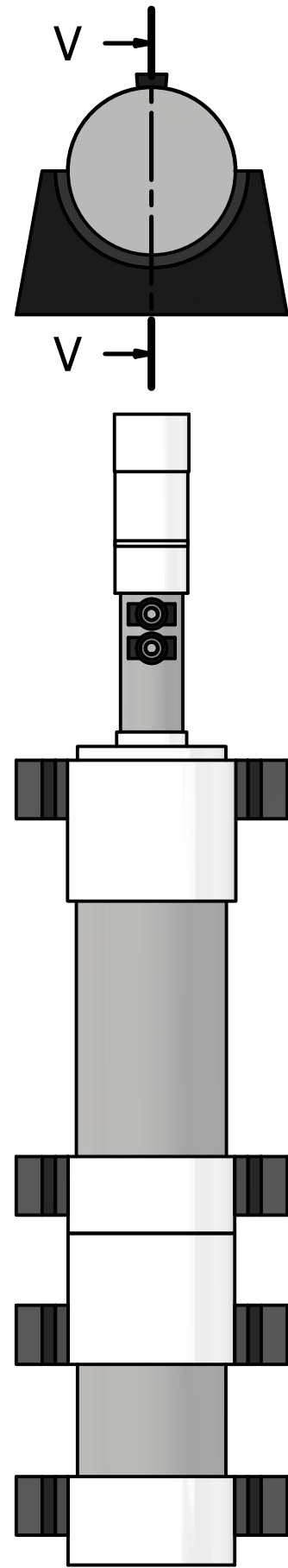
		FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN			
PROYECTO: MATERIA INTEGRADORA		TÍTULO: VISTA EXPLOTADA DEL TUBO DE IMPEDANCIA PARA ALTAS FRECUENCIAS		HOJA: A3	
FECHA: 17/01/2026		REVISADO POR: ING. GALO DURAZNO APROBADO POR: ING. JONATHAN LEÓN		AUTORES: STEVEN ALMENABA ISAAC SEGOVIA	
				UNIDAD: mm	
				ESCALA: 1 : 6	
				PÁG: 2 DE 26	



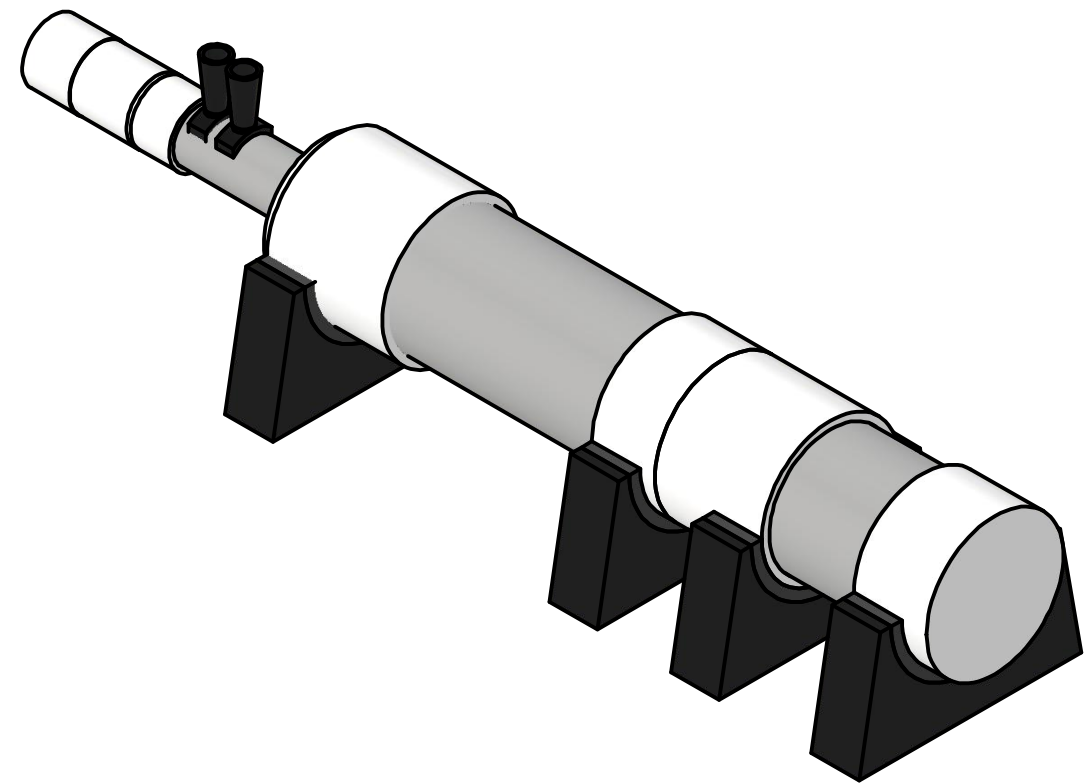
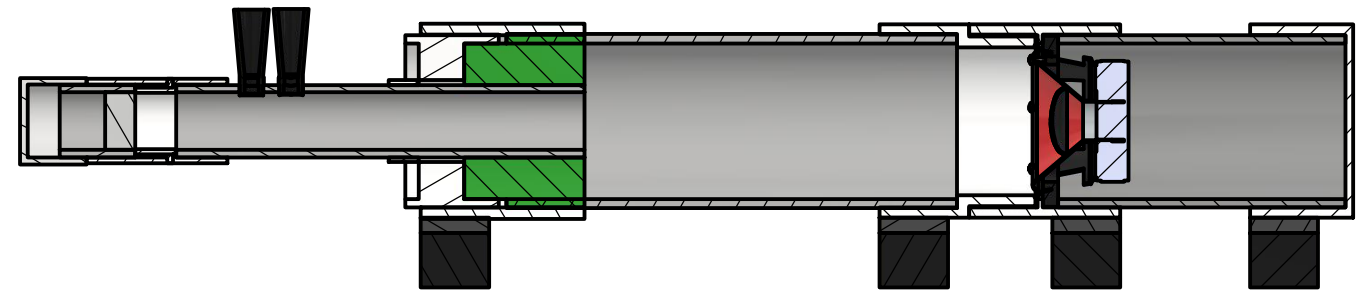
U-U (1 : 6)


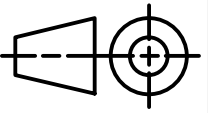


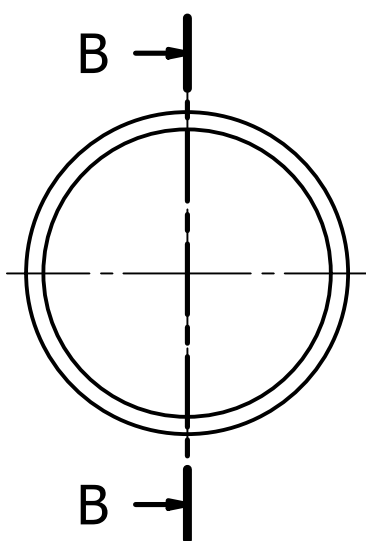
		FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN		
PROYECTO: MATERIA INTEGRADORA		TÍTULO: VISTAS DEL TUBO DE IMPEDANCIA DE BAJAS FRECUENCIAS		HOJA: A3
FECHA: 17/01/2026		REVISADO POR: ING. GALO DURAZNO APROBADO POR: ING. JONATHAN LEÓN		UNIDAD: mm
		AUTORES: STEVEN ALMENABA ISAAC SEGOVIA		ESCALA: 1 : 6
				PÁG: 3 DE 26



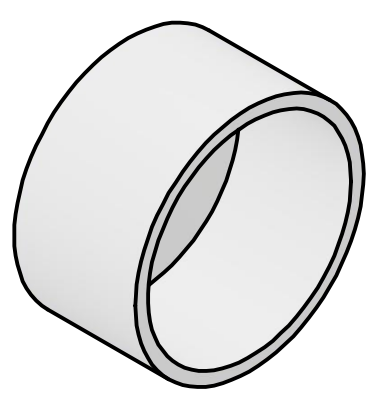
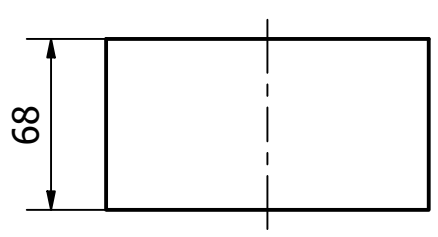
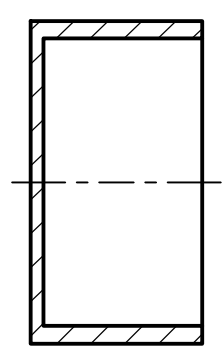
V-V (1 : 5)


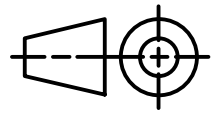


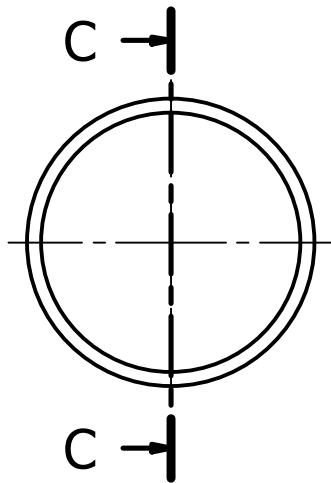
		FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN	
PROYECTO: MATERIA INTEGRADORA		TÍTULO: VISTAS DEL TUBO DE IMPEDANCIA PARA ALTAS FRECUENCIAS	HOJA: A3
FECHA: 17/01/2026	REVISADO POR: ING. GALO DURAZNO	AUTORES: STEVEN ALMENABA ISAAC SEGOVIA	UNIDAD: mm
	APROBADO POR: ING. JONATHAN LEÓN		ESCALA: 1 : 5
			PÁG: 4 DE 26



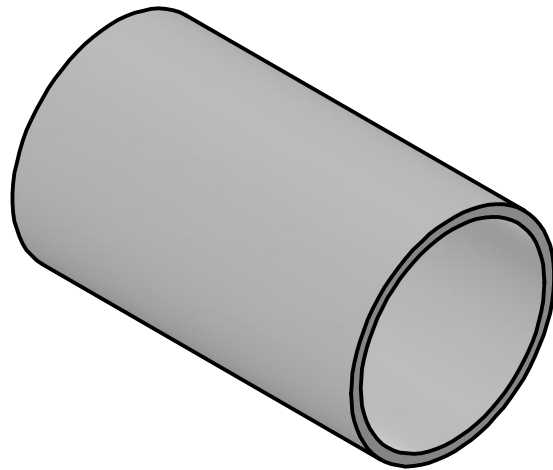
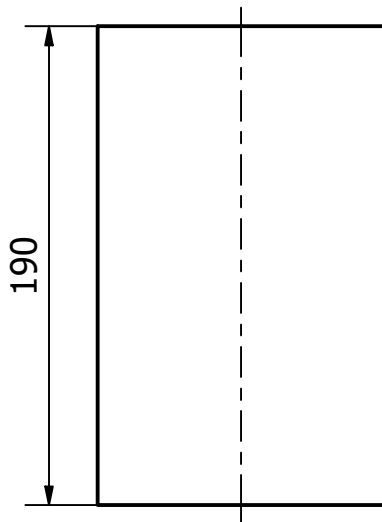
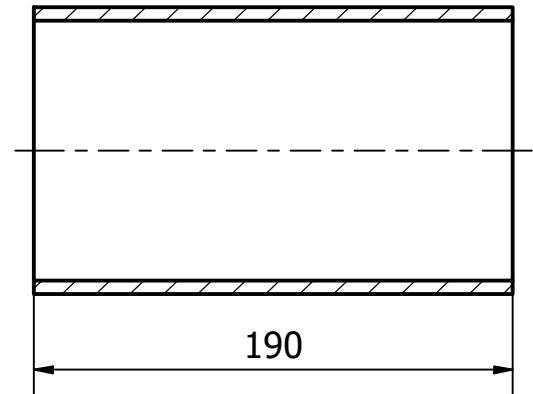
B-B (1 : 3)



		FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN			
PROYECTO: MATERIA INTEGRADORA		TÍTULO: TAPA DE 4" DE PVC CÉDULA 40		HOJA: A4	
FECHA: 17/01/2026		REVISADO POR: ING. GALO DURAZNO APROBADO POR: ING. JONATHAN LEÓN		AUTORES: STEVEN ALMENABA ISAAC SEGOVIA	
				UNIDAD: mm	
				ESCALA: 1 : 3	
				PÁG: 5 DE 26	

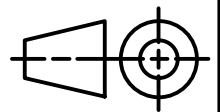


C-C (1 : 3)



espol

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN



PROYECTO:
MATERIA INTEGRADORA

TÍTULO:
TUBO DE UNIÓN DE 4" PARA FUENTE SONORA
DE PVC CÉDULA 40

HOJA:
A4

UNIDAD:
mm

FECHA:
17/01/2026

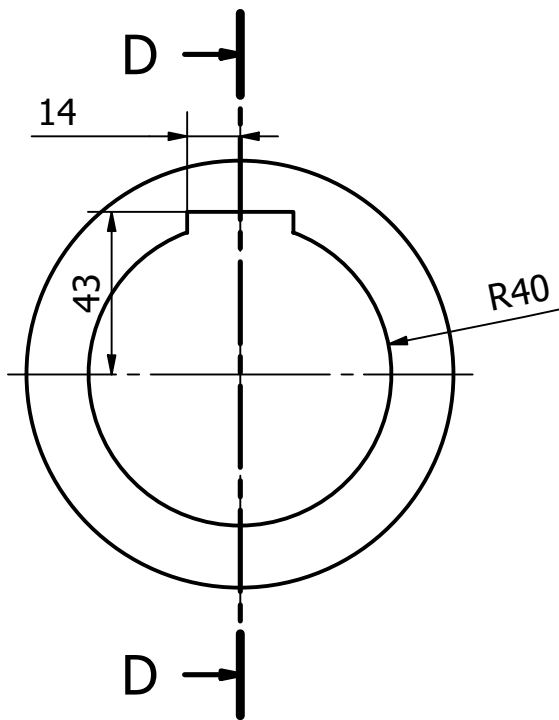
REVISADO POR:
ING. GALO DURAZNO

APROBADO POR:
ING. JONATHAN LEÓN

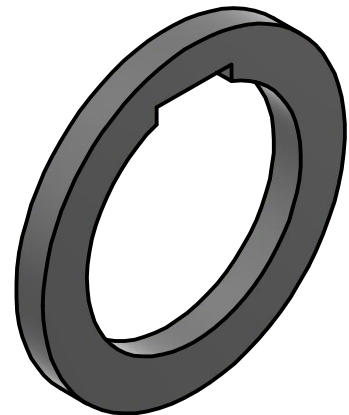
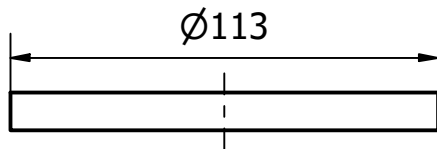
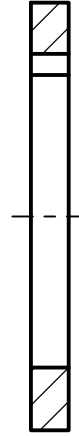
AUTORES:
STEVEN ALMENABA
ISAAC SEGOVIA

ESCALA:
1 : 3

PÁG:
6 DE 26

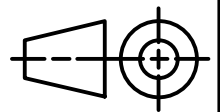


D-D (1 : 2)



espol

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN



PROYECTO:

MATERIA INTEGRADORA

TÍTULO:

ANILLO DE 4"

HOJA:

A4

UNIDAD:

mm

FECHA:

17/01/2026

REVISADO POR:

ING. GALO DURAZNO

APROBADO POR:

ING. JONATHAN LEÓN

AUTORES:

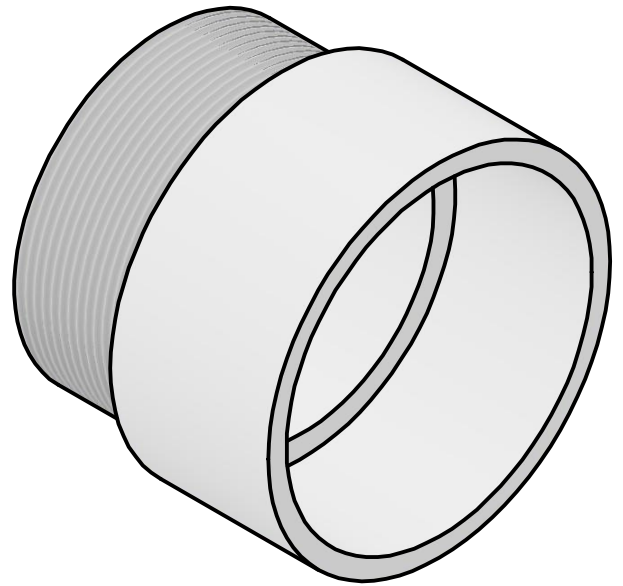
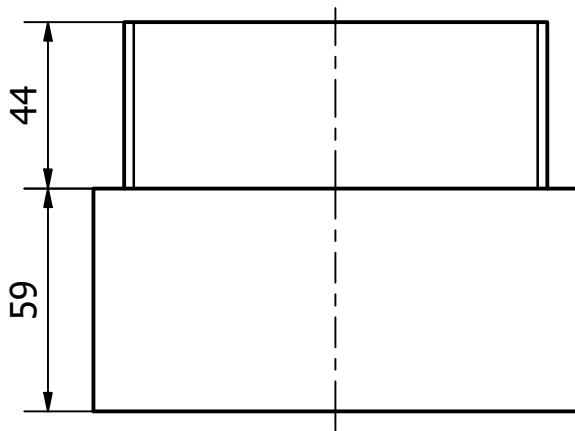
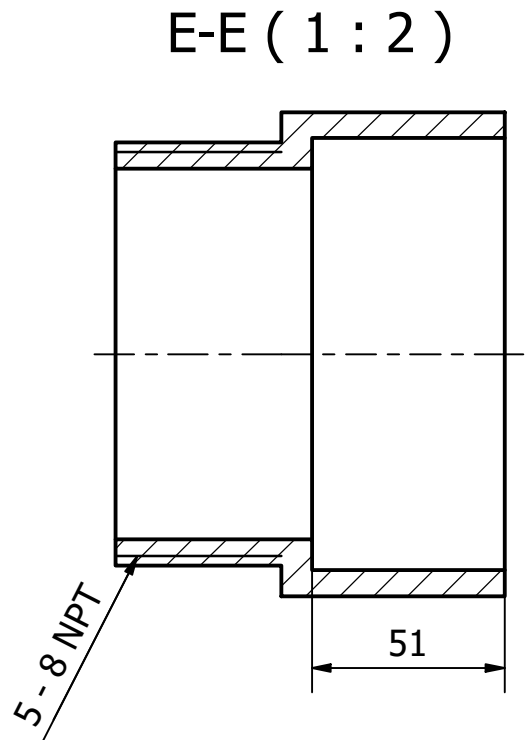
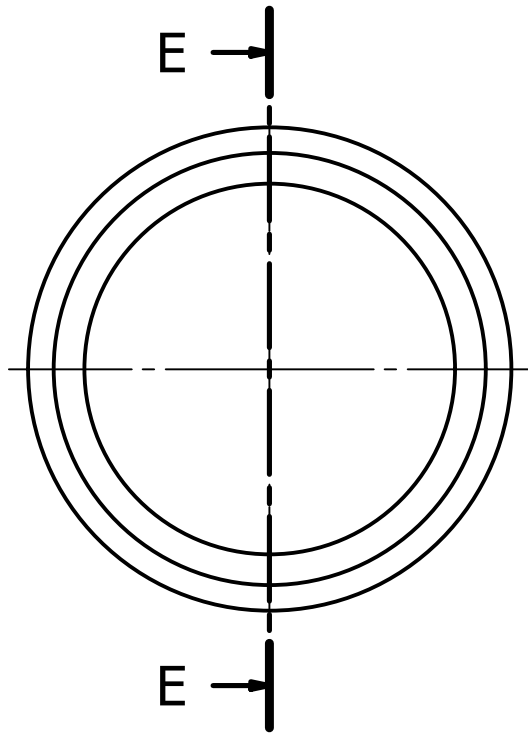
STEVEN ALMENABA
ISAAC SEGOVIA

ESCALA:

1 : 2

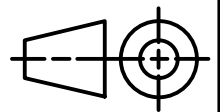
PÁG:

7 DE 26



espol

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN



PROYECTO:
MATERIA INTEGRADORA

TÍTULO:
ACOPLE MACHO DE 4" DE PVC CÉDULA 40

HOJA:
A4

UNIDAD:
mm

FECHA:
17/01/2026

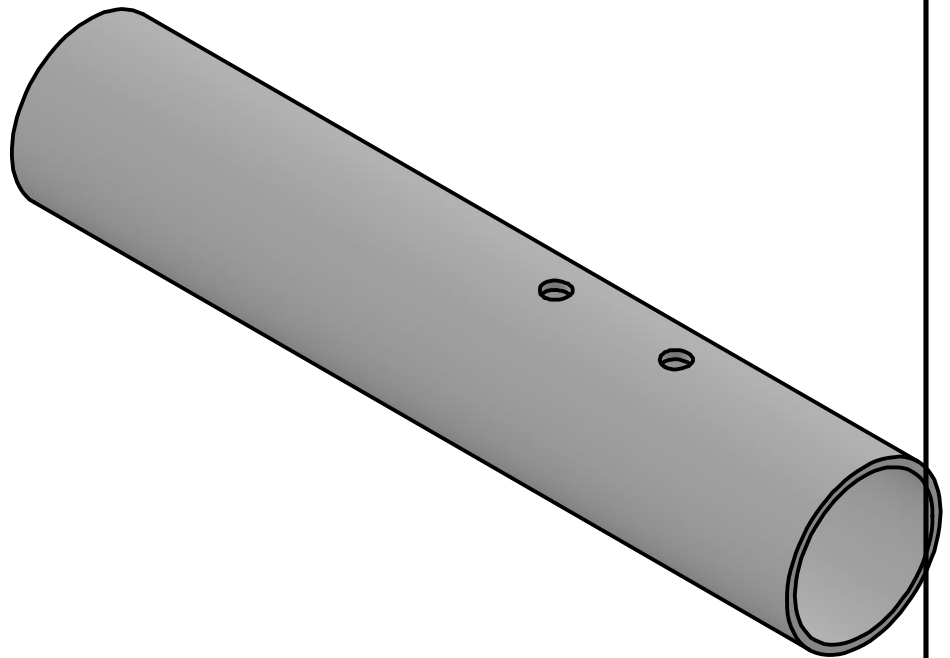
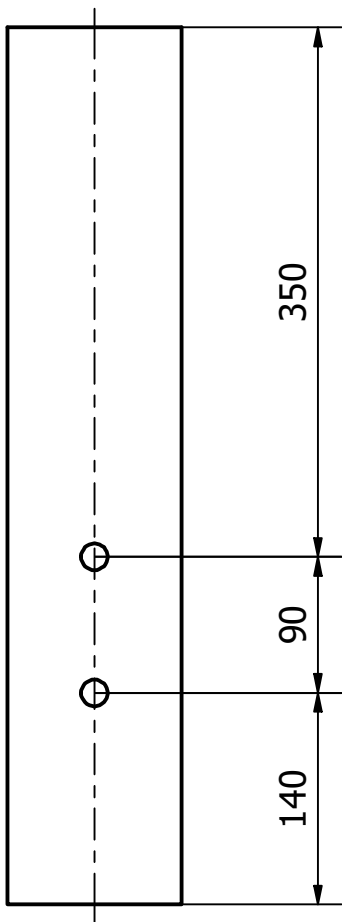
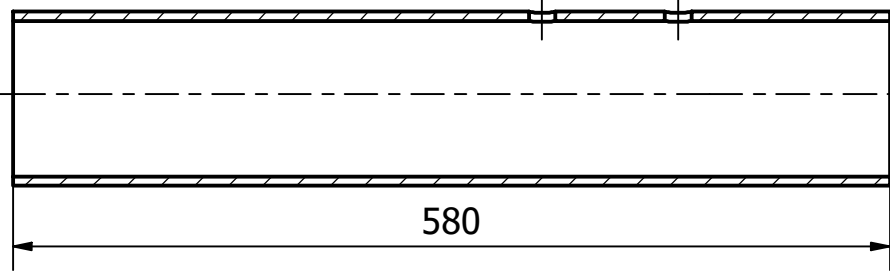
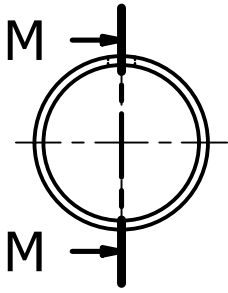
REVISADO POR:
ING. GALO DURAZNO
APROBADO POR:
ING. JONATHAN LEÓN

AUTORES:
STEVEN ALMENABA
ISAAC SEGOVIA

ESCALA:
1 : 2

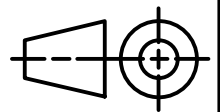
PÁG:
8 DE 26

M-M (1 : 5)



espol

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN



PROYECTO:
MATERIA INTEGRADORA

TÍTULO:
TUBO PRINCIPAL DE 4" DE PVC CÉDULA 40

HOJA:
A4

UNIDAD:
mm

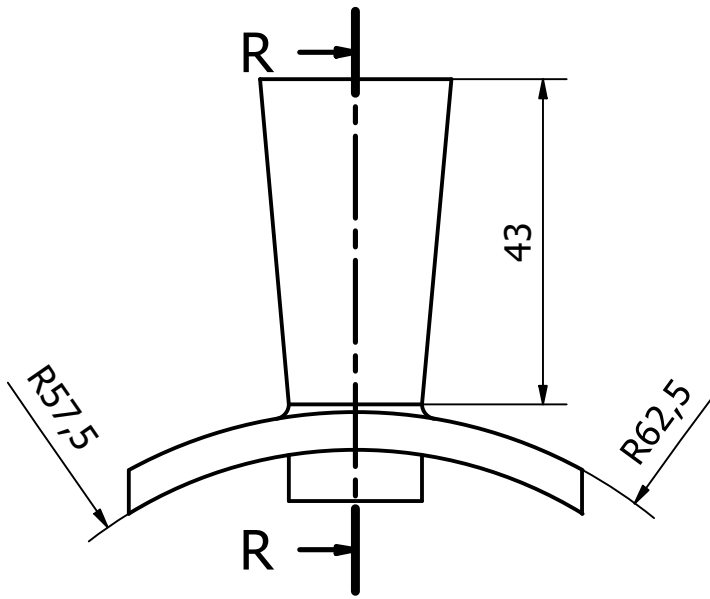
FECHA:
17/01/2026

REVISADO POR:
ING. GALO DURAZNO
APROBADO POR:
ING. JONATHAN LEÓN

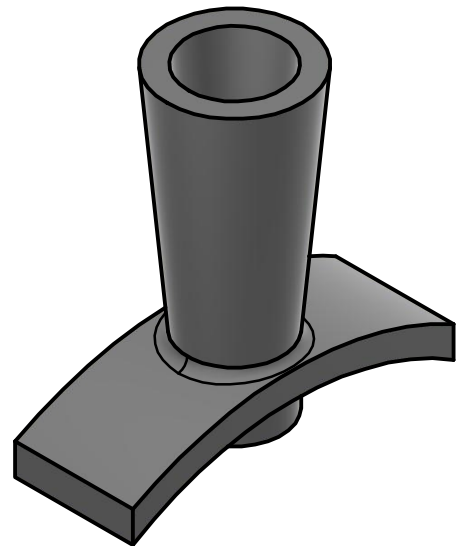
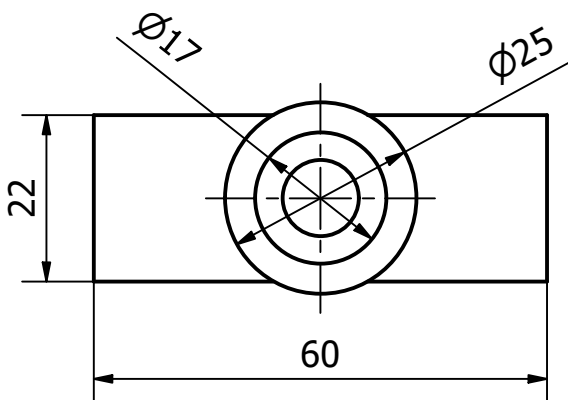
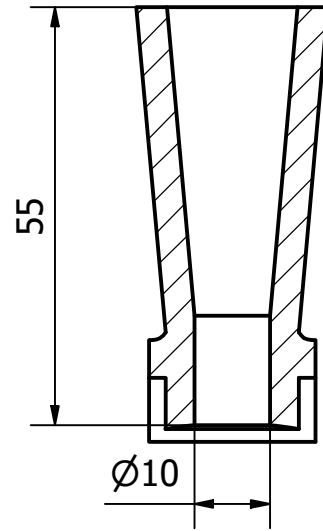
AUTORES:
STEVEN ALMENABA
ISAAC SEGOVIA

ESCALA:
1 : 5

PÁG: 9 DE 26

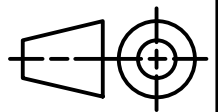


R-R (1 : 1)



espol

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN



PROYECTO:
MATERIA INTEGRADORA

TÍTULO:
PORTA MICRÓFONOS PARA TUBO DE 4"

HOJA:
A4

UNIDAD:
mm

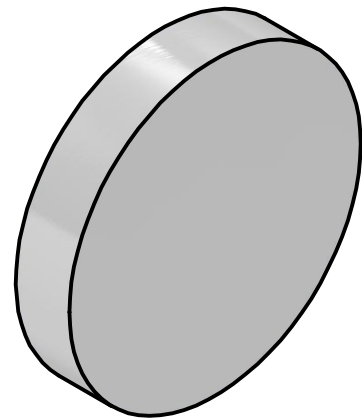
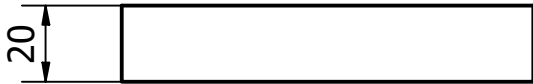
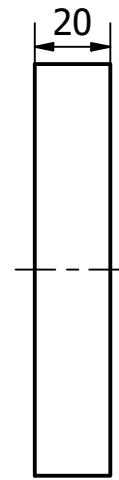
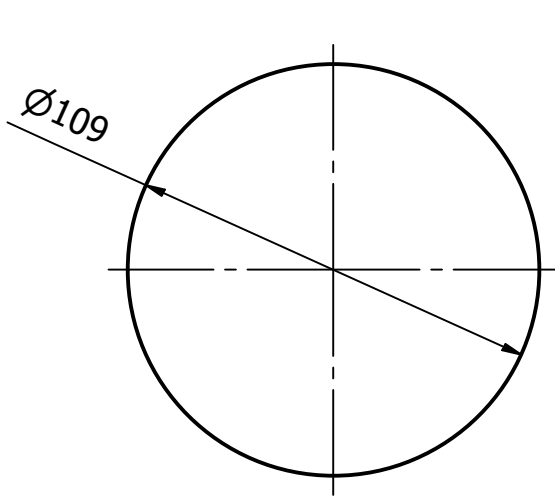
FECHA:
17/01/2026


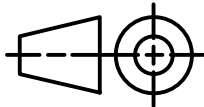
REVISADO POR:
ING. GALO DURAZNO
APROBADO POR:
ING. JONATHAN LEÓN

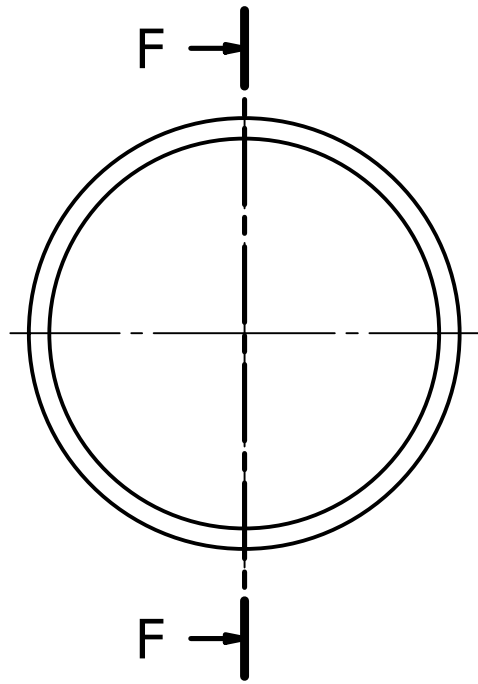
AUTORES:
STEVEN ALMENABA
ISAAC SEGOVIA

ESCALA:
1 : 1

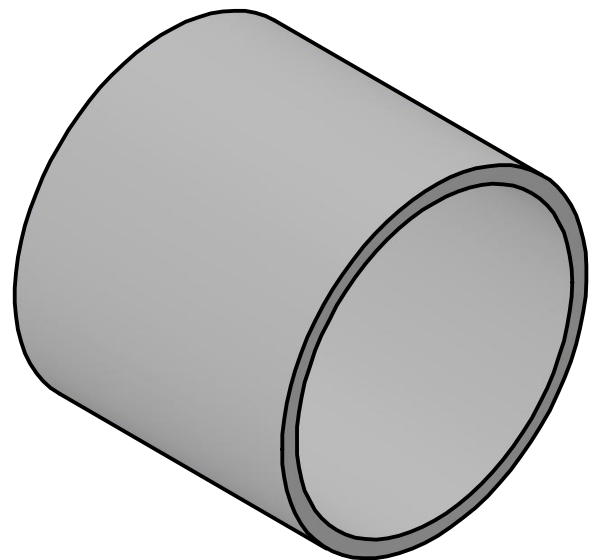
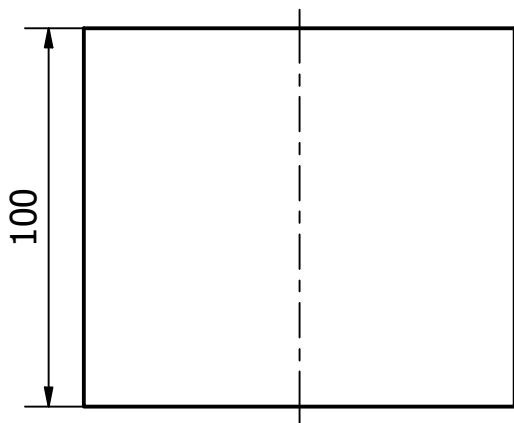
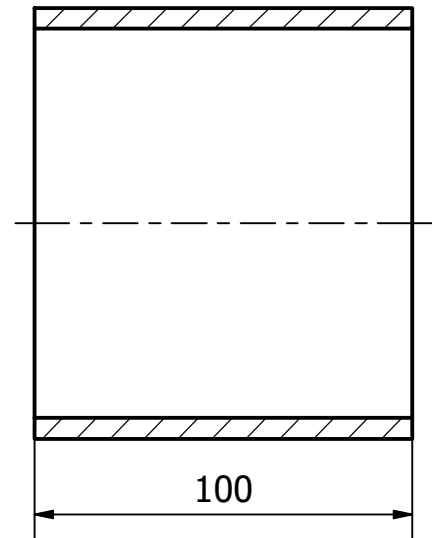
PÁG:
10 DE 26



		FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN			
PROYECTO: MATERIA INTEGRADORA		TÍTULO: PLACA METÁLICA PARA TUBO DE 4"		HOJA: A4	
FECHA: 17/01/2026		REVISADO POR: ING. GALO DURAZNO		AUTORES: STEVEN ALMENABA ISAAC SEGOVIA	
APROBADO POR: ING. JONATHAN LEÓN				ESCALA: 1 : 2	
				PÁG: 11 DE 26	

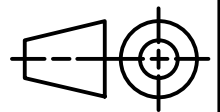


F-F (1 : 2)



espol

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN



PROYECTO:
MATERIA INTEGRADORA

TÍTULO:
TUBO DE UNIÓN DE 4" DE PVC CÉDULA 40
PARA PORTA MUESTRA

HOJA:
A4

UNIDAD:
mm

FECHA:
17/01/2026

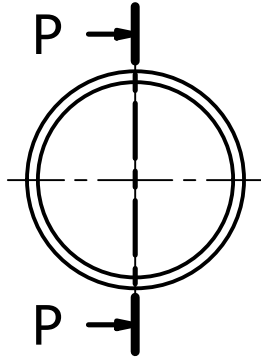
REVISADO POR:
ING. GALO DURAZNO

APROBADO POR:
ING. JONATHAN LEÓN

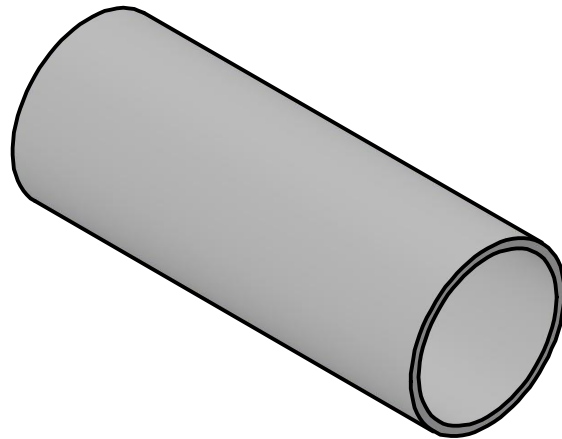
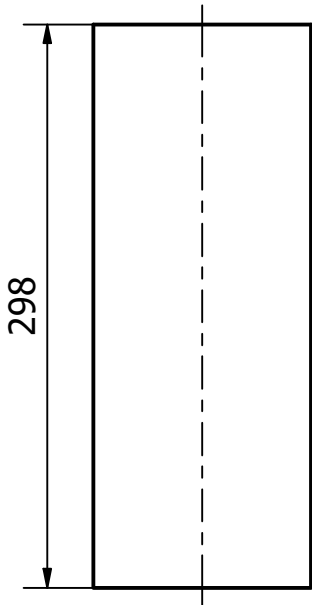
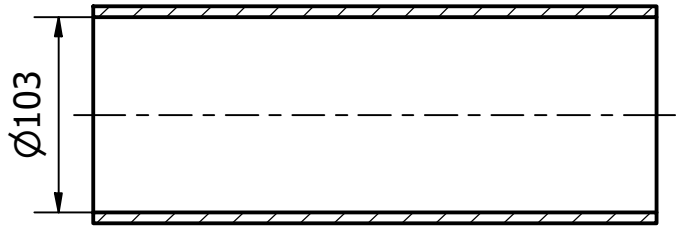
AUTORES:
STEVEN ALMENABA
ISAAC SEGOVIA

ESCALA:
1 : 2

PÁG:
12 DE 26

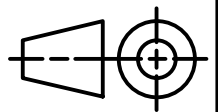


P-P (1 : 4)



espol

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN



PROYECTO:

MATERIA INTEGRADORA

TÍTULO:

TUBO DE EXTENSIÓN DE 4" DE PVC CÉDULA
40

HOJA:

A4

UNIDAD:

mm

FECHA:

17/01/2026

REVISADO POR:

ING. GALO DURAZNO

APROBADO POR:

ING. JONATHAN LEÓN

AUTORES:

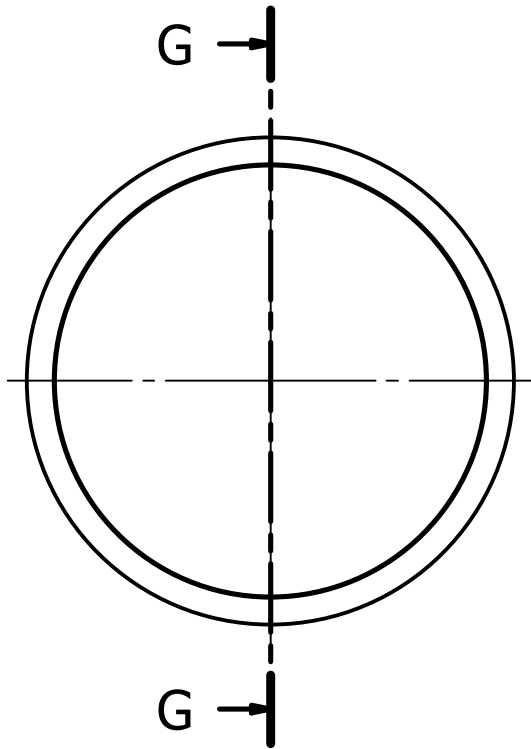
STEVEN ALMENABA
ISAAC SEGOVIA

ESCALA:

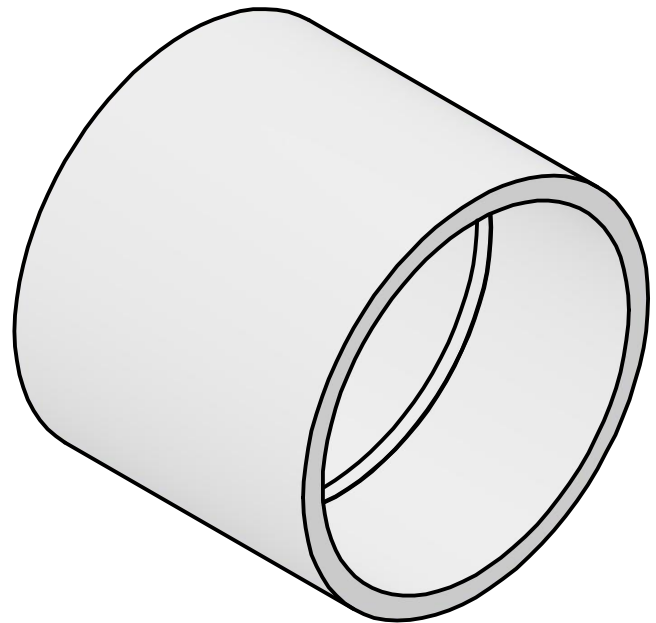
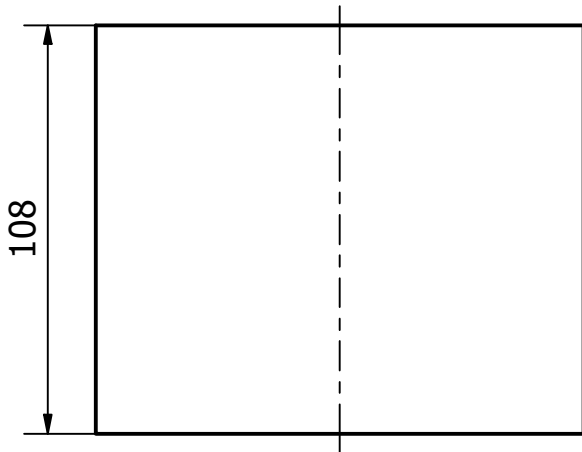
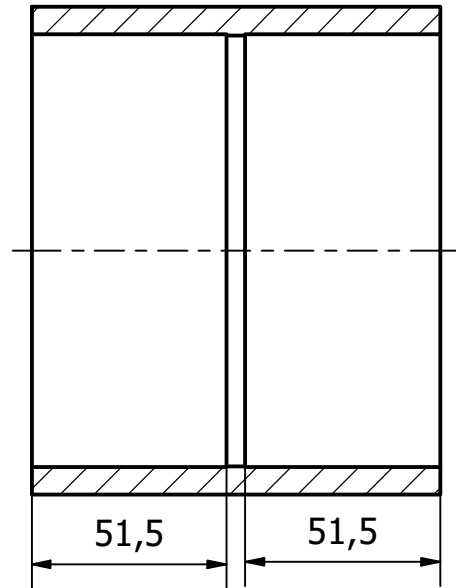
1 : 4

PÁG:

13 DE 26

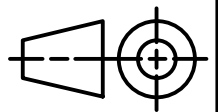


G-G (1 : 2)



espol

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN



PROYECTO:
MATERIA INTEGRADORA

TÍTULO:
ACOPLE DE UNIÓN DE 4" DE PVC CÉDULA 40

HOJA:
A4

UNIDAD:
mm

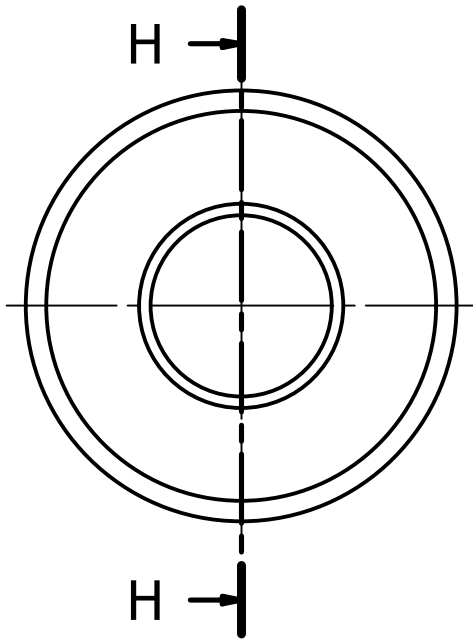
FECHA:
17/01/2026

REVISADO POR:
ING. GALO DURAZNO
APROBADO POR:
ING. JONATHAN LEÓN

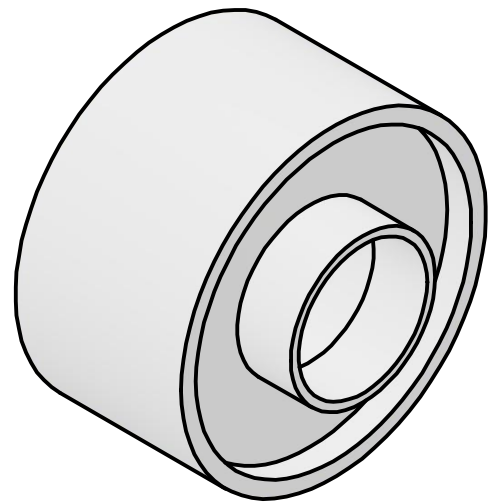
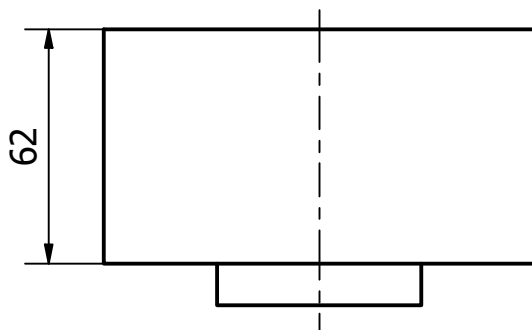
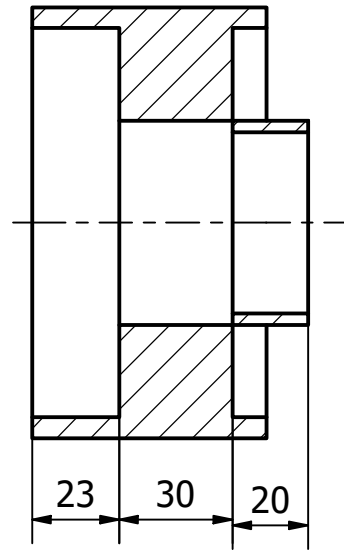
AUTORES:
STEVEN ALMENABA
ISAAC SEGOVIA

ESCALA:
1 : 2

PÁG:
14 DE 26

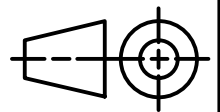


H-H (1 : 2)



espol

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN



PROYECTO:
MATERIA INTEGRADORA

TÍTULO:
REDUCTOR DE 4" A 1.5" DE PVC CÉDULA 40

HOJA:
A4

UNIDAD:
mm

FECHA:
17/01/2026

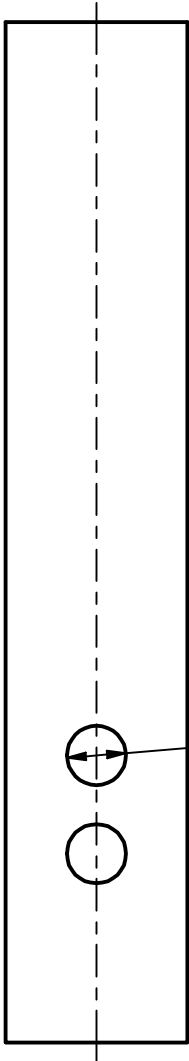
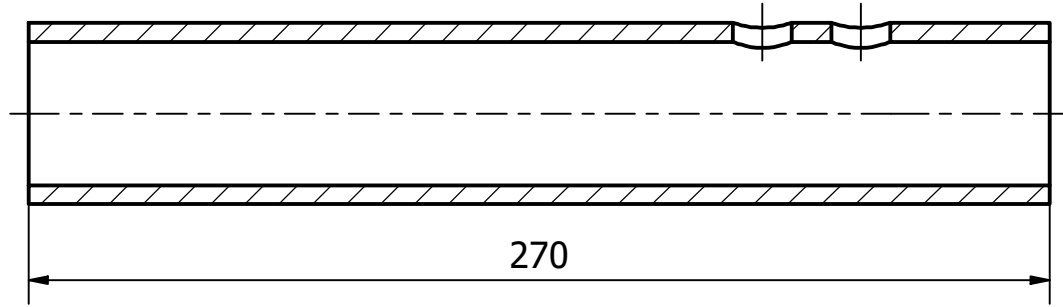
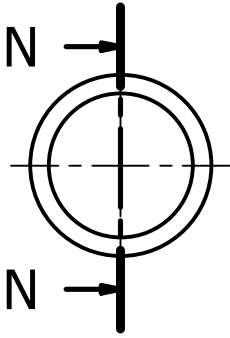
REVISADO POR:
ING. GALO DURAZNO
APROBADO POR:
ING. JONATHAN LEÓN

AUTORES:
STEVEN ALMENABA
ISAAC SEGOVIA

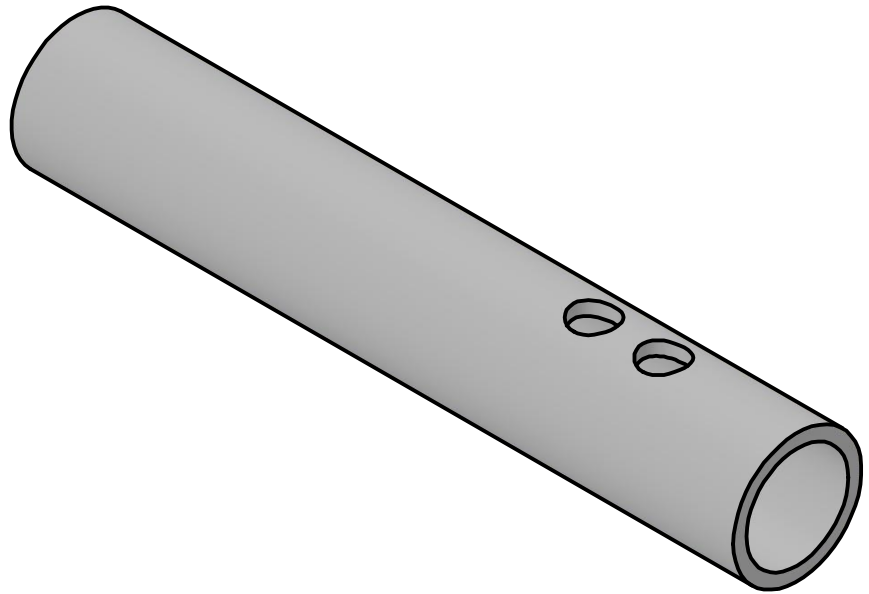
ESCALA:
1 : 2

PÁG:
15 DE 26

N-N (1 : 2)

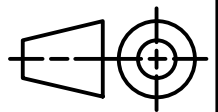


Ø15,60



espol

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN



PROYECTO:
MATERIA INTEGRADORA

TÍTULO:
TUBO PRINCIPAL DE 1.5" DE PVC CÉDULA 40

HOJA:
A4

UNIDAD:
mm

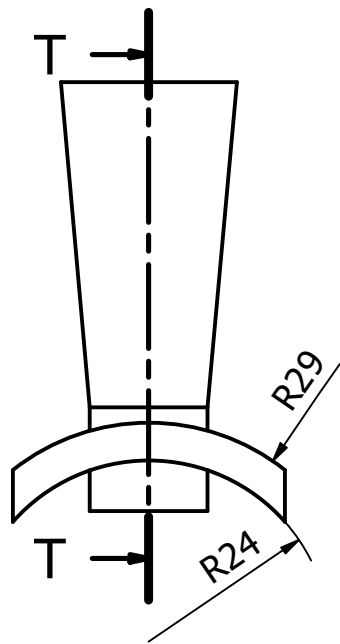
FECHA:
17/01/2026

REVISADO POR:
ING. GALO DURAZNO
APROBADO POR:
ING. JONATHAN LEÓN

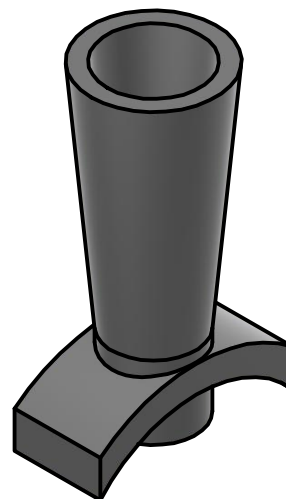
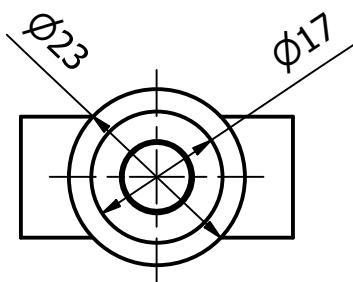
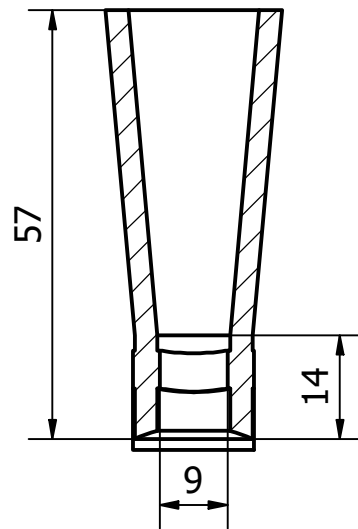
AUTORES:
STEVEN ALMENABA
ISAAC SEGOVIA


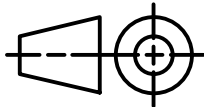
ESCALA:
1 : 2

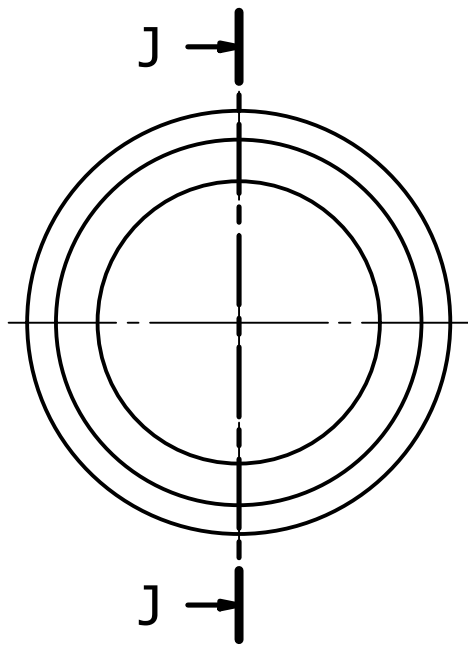
PÁG:
16 DE 26



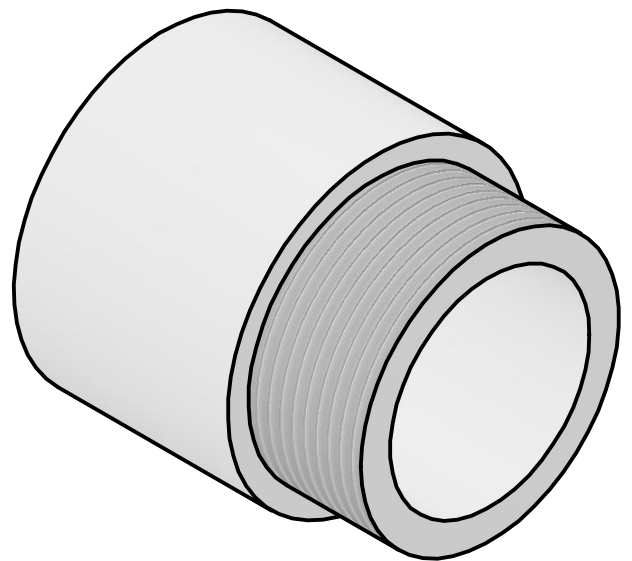
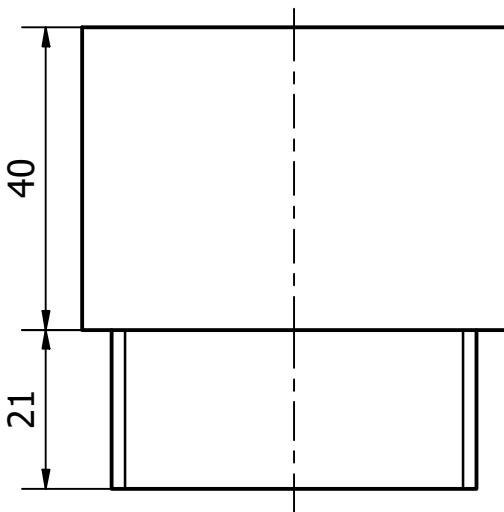
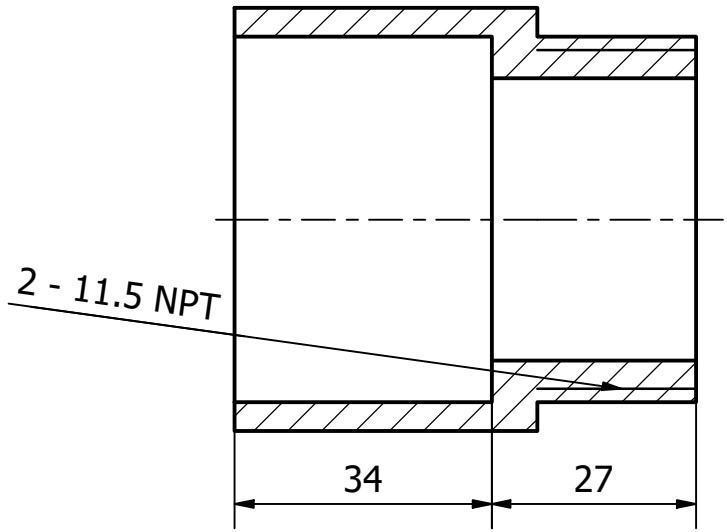
T-T (1 : 1)



		FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN		
PROYECTO: MATERIA INTEGRADORA		TÍTULO: PORTA MICRÓFONOS PARA TUBO DE ALTAS FRECUENCIAS		HOJA: A4
FECHA: 17/01/2026		REVISADO POR: ING. GALO DURAZNO	AUTORES: STEVEN ALMENABA ISAAC SEGOVIA	UNIDAD: mm
		APROBADO POR: ING. JONATHAN LEÓN		ESCALA: 1 : 1
				PÁG: 17 DE 26

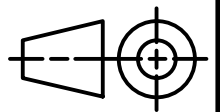


J-J (1 : 1)



espol

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN



PROYECTO:

MATERIA INTEGRADORA

TÍTULO:

ACOPLE MACHO DE 1.5" DE PVC CÉDULA 40

HOJA:

A4

UNIDAD:

mm

FECHA:

17/01/2026

REVISADO POR:

ING. GALO DURAZNO

APROBADO POR:

ING. JONATHAN LEÓN

AUTORES:

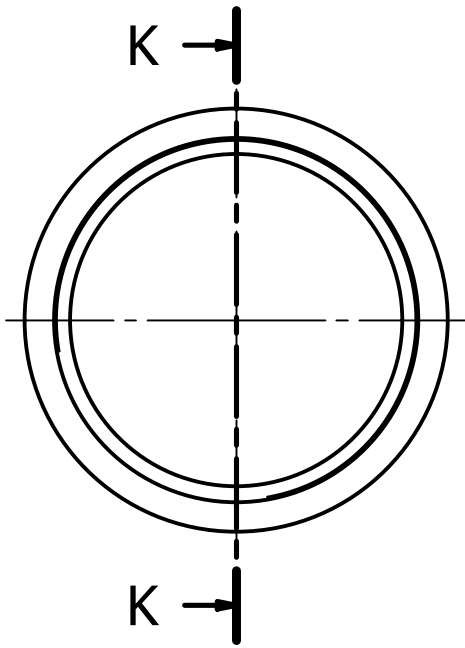
STEVEN ALMENABA
ISAAC SEGOVIA

ESCALA:

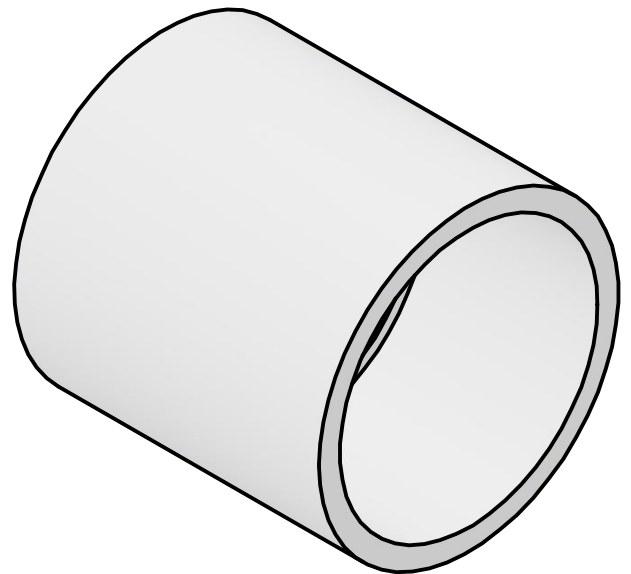
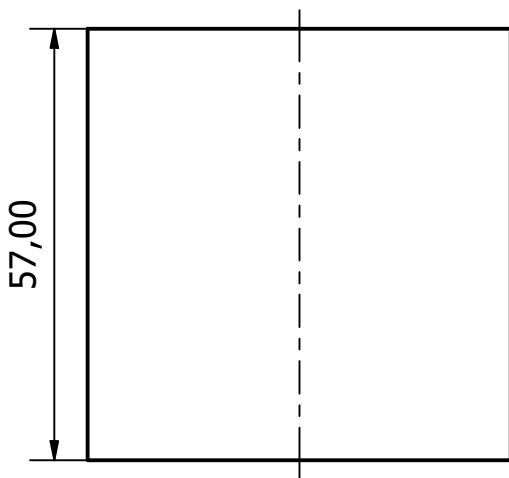
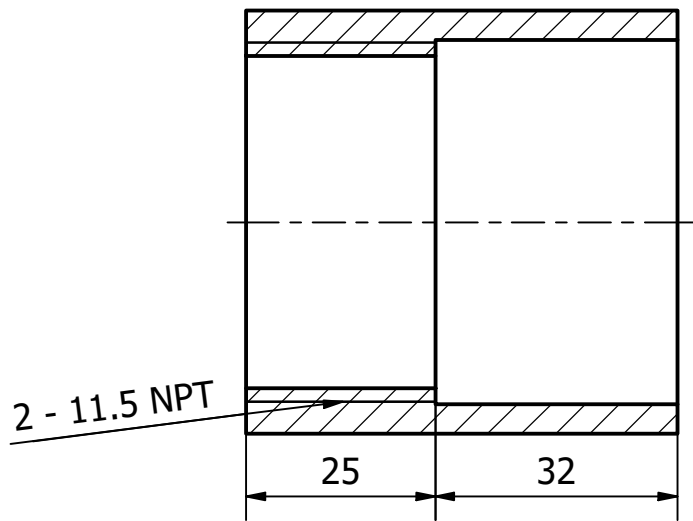
1 : 1

PÁG:

18 DE 26

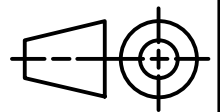


K-K (1 : 1)



espol

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN



PROYECTO:
MATERIA INTEGRADORA

TÍTULO:
ACOPLE HEMBRA DE 1.5" DE PVC CÉDULA 40

HOJA:
A4

UNIDAD:
mm

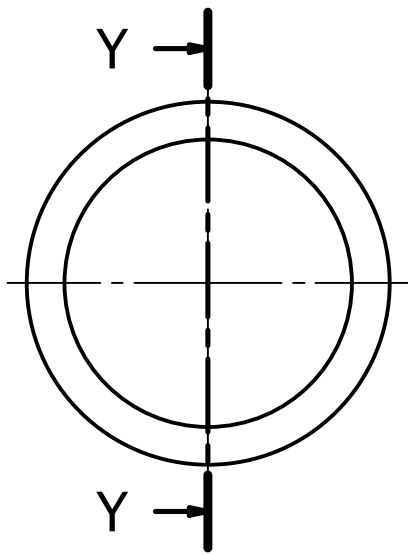
FECHA:
17/01/2026

REVISADO POR:
ING. GALO DURAZNO
APROBADO POR:
ING. JONATHAN LEÓN

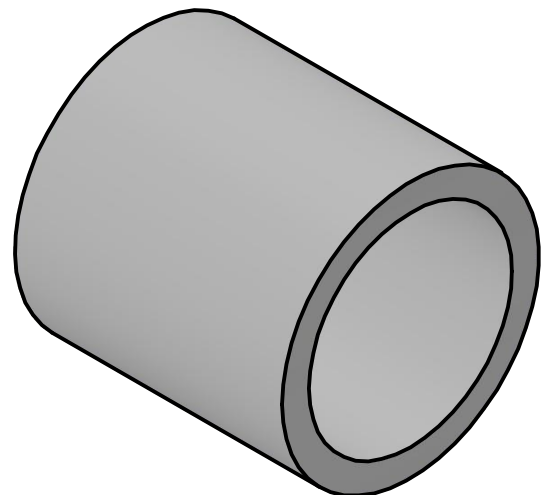
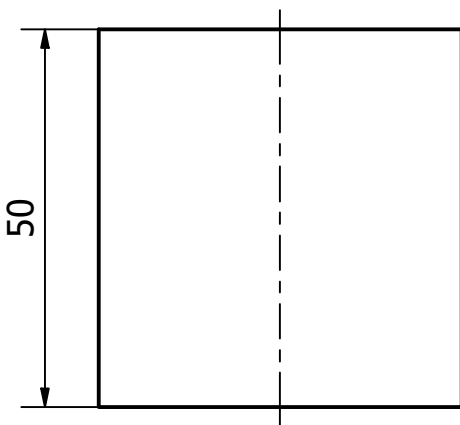
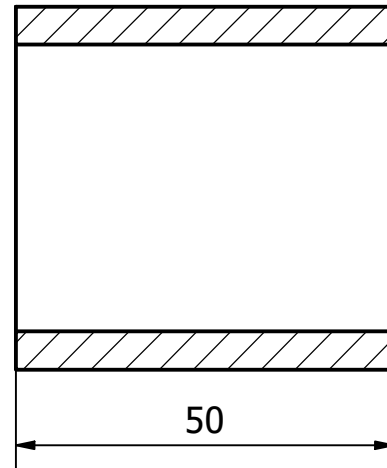
AUTORES:
STEVEN ALMENABA
ISAAC SEGOVIA

ESCALA:
1 : 1

PÁG:
19 DE 26

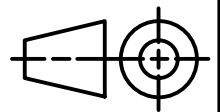


Y-Y (1 : 1)



espol

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN



PROYECTO:
MATERIA INTEGRADORA

TÍTULO:
TUBO DE UNIÓN DE 1.5" DE CÉDULA 40 PARA
PORTA MUESTRA

HOJA:
A4

UNIDAD:
mm

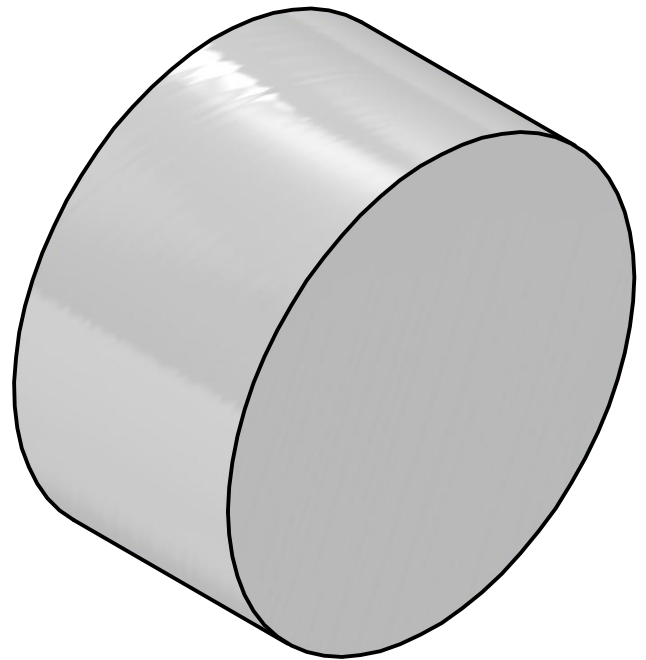
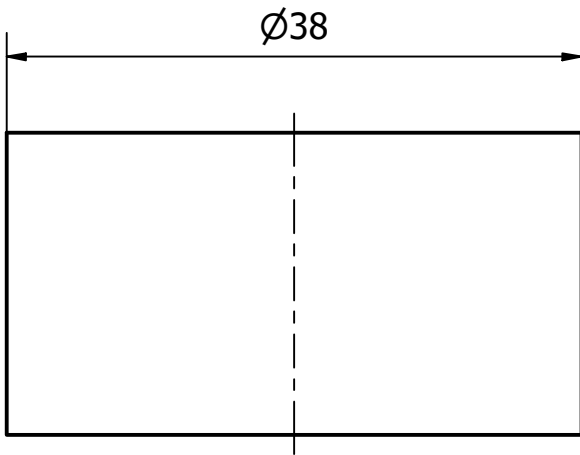
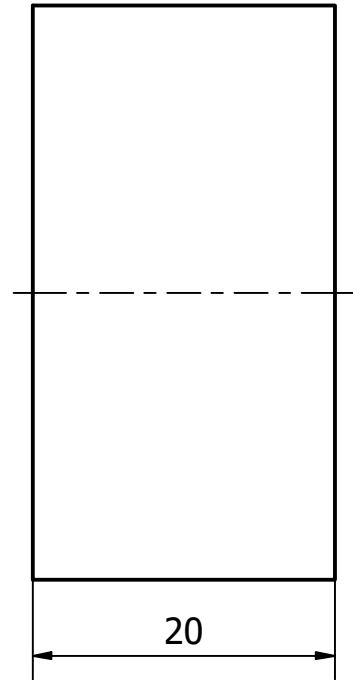
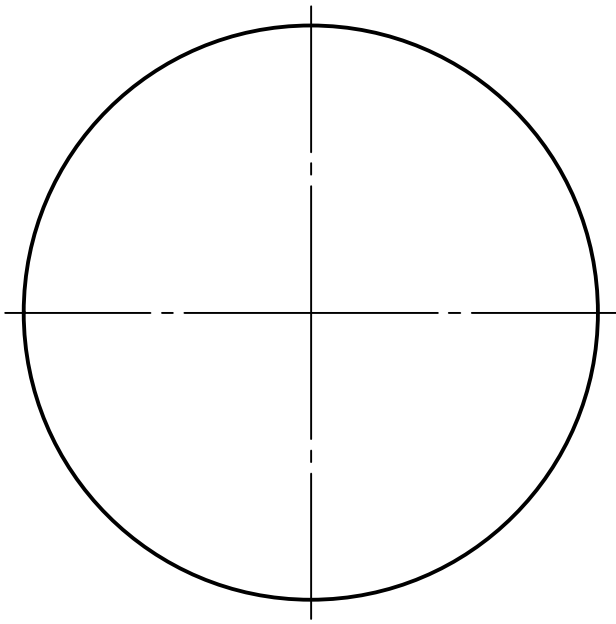
FECHA:
17/01/2026

REVISADO POR:
ING. GALO DURAZNO
APROBADO POR:
ING. JONATHAN LEÓN

AUTORES:
STEVEN ALMENABA
ISAAC SEGOVIA

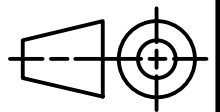
ESCALA:
1 : 1

PÁG:
20 DE 26



espol

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN



PROYECTO:

MATERIA INTEGRADORA

TÍTULO:

PLACA METÁLICA DE 1.5"

HOJA:

A4

UNIDAD:

mm

FECHA:

17/01/2026

REVISADO POR:

ING. GALO DURAZNO

AUTORES:

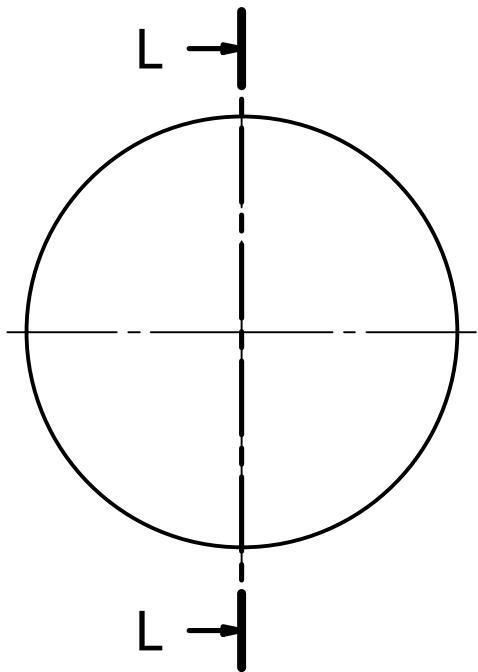
STEVEN ALMENABA
ISAAC SEGOVIA

ESCALA:

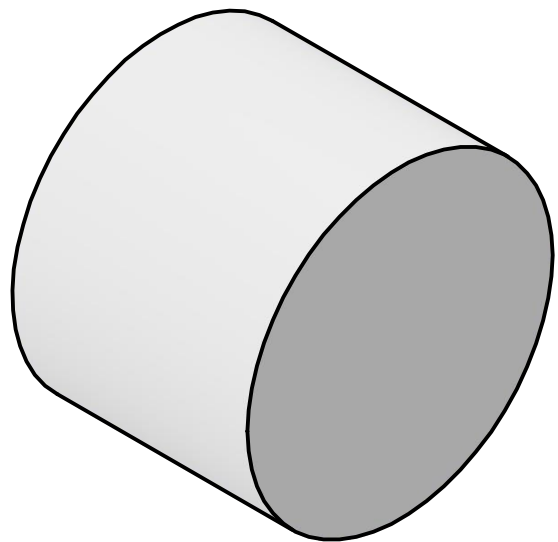
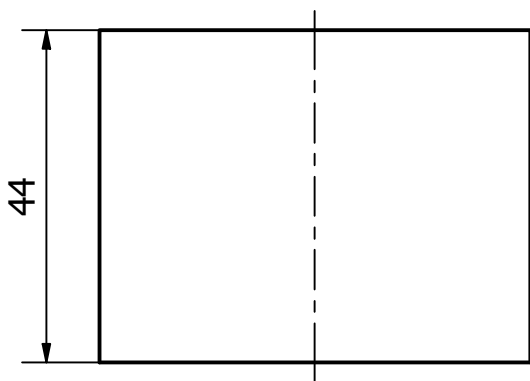
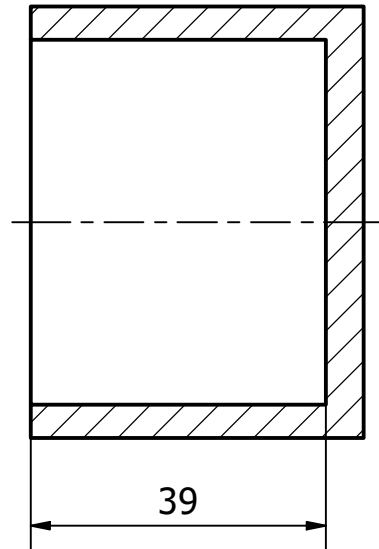
2 : 1

PÁG:

21 DE 26

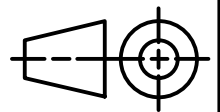


L-L (1 : 1)



espol

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN



PROYECTO:
MATERIA INTEGRADORA

TÍTULO:
TAPA DE 1.5" DE PVC CÉDULA 40

HOJA:
A4

UNIDAD:
mm

FECHA:
17/01/2026

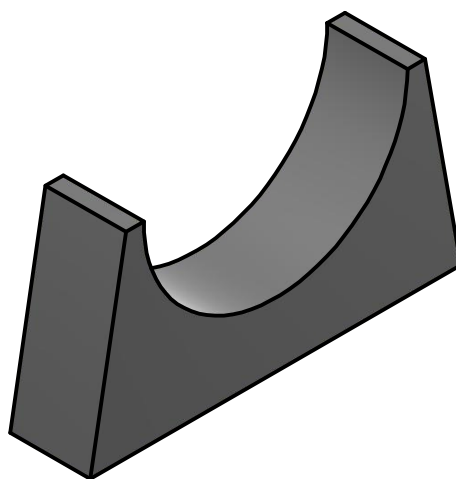
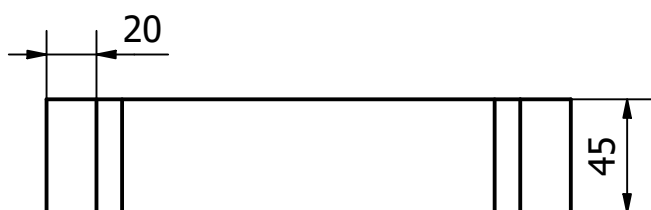
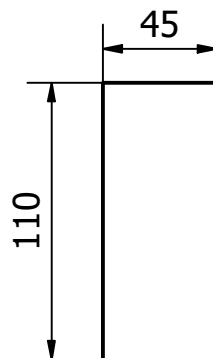
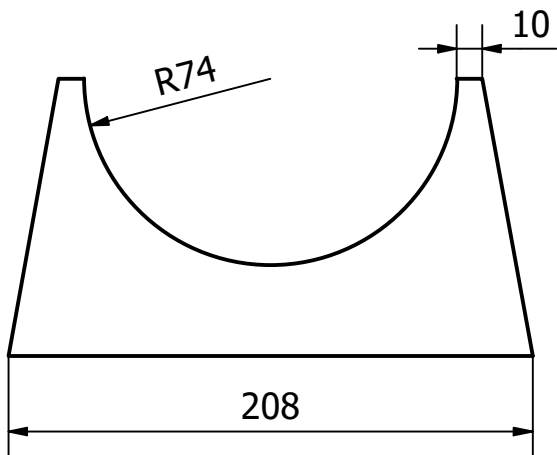
REVISADO POR:
ING. GALO DURAZNO


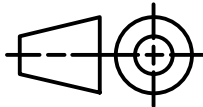
APROBADO POR:
ING. JONATHAN LEÓN

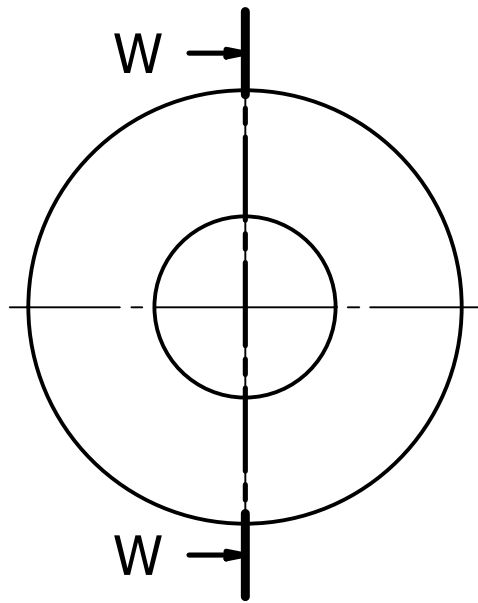
AUTORES:
STEVEN ALMENABA
ISAAC SEGOVIA

ESCALA:
1 : 1

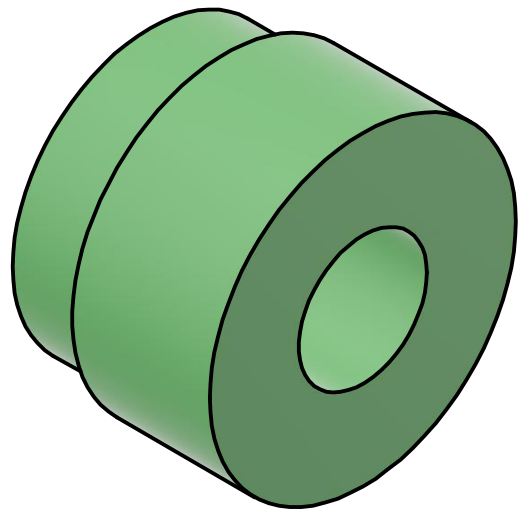
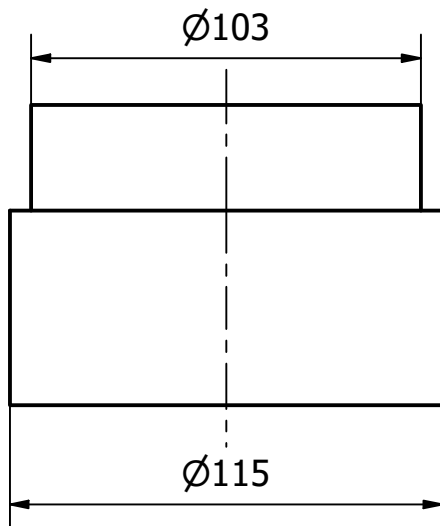
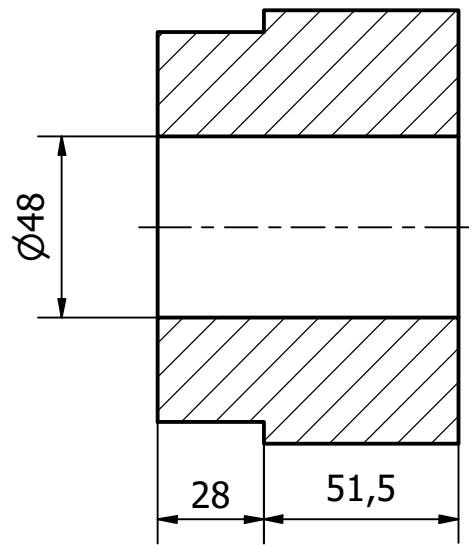
PÁG:
22 DE 26


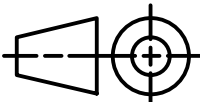


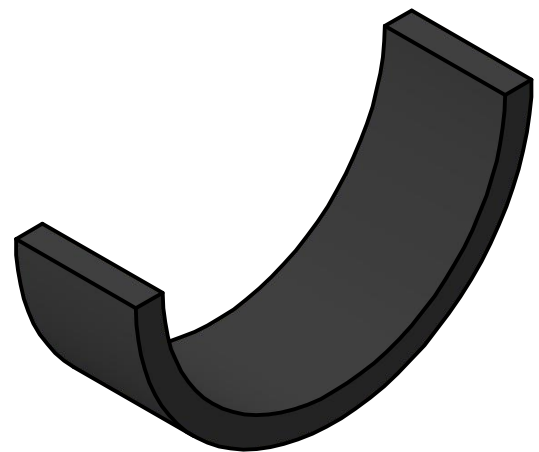
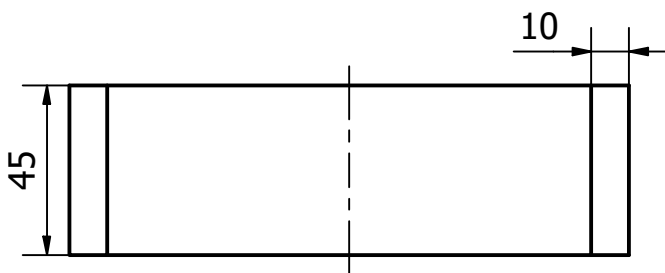
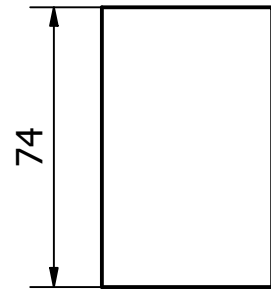
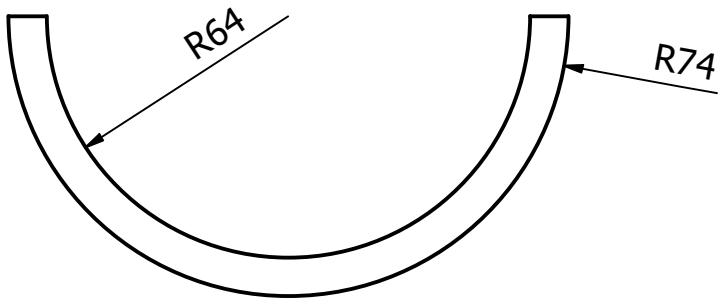
		FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN			
PROYECTO: MATERIA INTEGRADORA		TÍTULO: BASE		HOJA: A4	
FECHA: 17/01/2026		REVISADO POR: ING. GALO DURAZNO APROBADO POR: ING. JONATHAN LEÓN		AUTORES: STEVEN ALMENABA ISAAC SEGOVIA	
				ESCALA: 1 : 3 PÁG: 23 DE 26	



W-W (1 : 2)

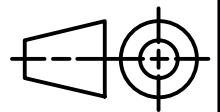


		FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN			
PROYECTO: MATERIA INTEGRADORA		TÍTULO: ANILLO DE ESPONJA		HOJA: A4	
FECHA: 17/01/2026		REVISADO POR: ING. GALO DURAZNO		UNIDAD: mm	
APROBADO POR: ING. JONATHAN LEÓN		AUTORES: STEVEN ALMENABA ISAAC SEGOVIA		ESCALA: 1 : 2	
				PÁG: 24 DE 26	



espol

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN



PROYECTO:
MATERIA INTEGRADORA

TÍTULO:
CAUCHO

HOJA:
A4

UNIDAD:
mm

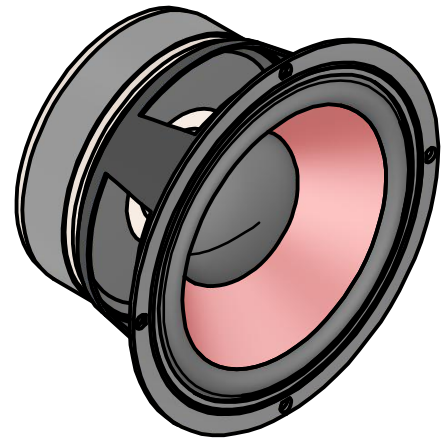
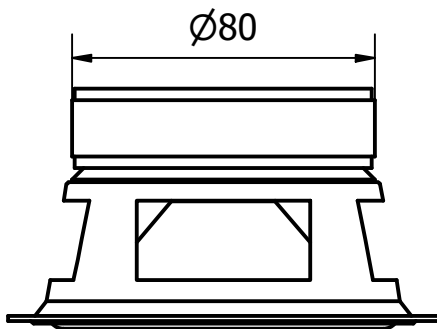
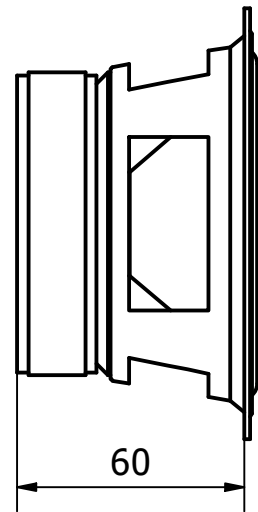
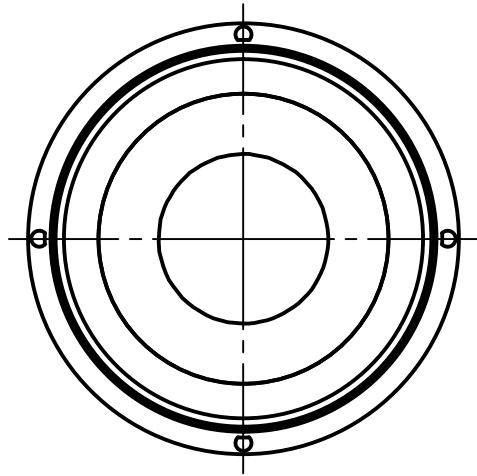
FECHA:
17/01/2026

REVISADO POR:
ING. GALO DURAZNO
APROBADO POR:
ING. JONATHAN LEÓN

AUTORES:
STEVEN ALMENABA
ISAAC SEGOVIA

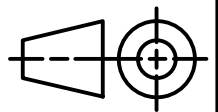
ESCALA:
1 : 2

PÁG:
25 DE 26



espol

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN



PROYECTO:
MATERIA INTEGRADORA

TÍTULO:
PARLANTE DE 4"

HOJA:
A4

UNIDAD:
mm

FECHA:
17/01/2026

REVISADO POR:
ING. GALO DURAZNO

APROBADO POR:
ING. JONATHAN LEÓN

AUTORES:
STEVEN ALMENABA
ISAAC SEGOVIA

ESCALA:
1 : 2

PÁG:
26 DE 26