

**Escuela Superior Politécnica del Litoral**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción**

Diseño del acondicionamiento acústico del auditorio de la FIMCP

**Proyecto Integrador**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Mecánico**

Presentado por:

Luis Bryan Vanegas Cruz

Anthony Steven García Mora

Guayaquil - Ecuador

Año: 2023

## Dedicatoria

---

A mis padres y hermanas por estar conmigo y darme su amor incondicional, amigos y a todos los que me acompañaron y ayudaron en este largo camino.

**Anthony Steven García Mora**

A mis padres y a mi familia, cuyo apoyo constante y confianza en mí han sido el motor que me impulsó a culminar este proyecto. A mis amigos, por su aliento y comprensión en cada etapa de mi recorrido académico. Este logro es un reconocimiento a su respaldo y aliento a lo largo de este emocionante viaje.

**Luis Bryan Vanegas Cruz**

## **Agradecimientos**

---

A Dios que me dio la fortaleza para afrontar las dificultades que tuve, a mi familia por haberme apoyado a lo largo de toda mi carrera universitaria. A los amigos que conocí y me ayudaron en mi crecimiento académico y personal, a mi tutor y al Ing. Pedro Segovia pues su orientación fue vital para este proyecto y a mi compañero de tesis, Luis Vanegas, sin él no hubiera sido posible este proyecto.

**Anthony Steven García Mora**

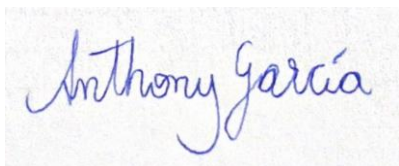
A mis padres, cuyo apoyo incondicional han sido la fuerza que me impulsó a completar este viaje académico. A amigos, cuya compañía y colaboración contribuyeron en gran medida a este logro. También a Pedro Segovia, máster en acústica, cuya orientación fue esencial para el desarrollo de este proyecto.

**Luis Vanegas Cruz**

## Declaración Expresa

---

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Anthony Steven García Mora y Luis Bryan Vanegas Cruz damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Anthony Steven García Mora



Luis Bryan Vanegas Cruz

## **Evaluadores**

---

**Francis R. Loayza, PhD**

Profesor de Materia

---

**Galo Andrés Durazno Palacios, MSc.**

Tutor de proyecto

## Resumen

En el contexto de espacios de conferencias, la calidad del sonido es crucial para una experiencia auditiva efectiva. El auditorio de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción presenta problemas acústicos, como un alto tiempo de reverberación (2,5 segundos), niveles elevados de ruido de fondo y una mala inteligibilidad de la palabra. Para abordar estos desafíos, se creó un modelo acústico del auditorio y se implementaron cambios en base a cálculos y normativas, como el uso de materiales absorbentes y paneles resonadores, además de un rediseño en el sistema de climatización con ductos revestidos de lana de roca para reducir el ruido de fondo. Utilizando el programa I-SIMPA para simulaciones acústicas con el diseño propuesto, se obtuvo como resultado un tiempo de reverberación en un rango de 1 a 1,3 segundos. El rediseño del sistema de climatización podría reducir los niveles de ruido de fondo a valores aceptables para un auditorio. Y como resultado de estos cambios, se calculó que la inteligibilidad de la palabra mejoraría hasta en un 62%. Estos ajustes teóricos proporcionarían una solución integral para las limitaciones acústicas del auditorio, mejorando significativamente la calidad del sonido y la experiencia auditiva en este espacio.

**Palabras Clave:** Auditorio, sonido, reverberación, absorbentes, climatización

## ***Abstract***

*Within the context of conference spaces, sound quality is paramount for an effective auditory experience. The auditorium at the Faculty of Mechanical Engineering and Production Sciences faces acoustic challenges, including a high reverberation time (2.5 seconds), elevated background noise levels, and poor speech intelligibility. To address these challenges, an acoustic model of the auditorium was created, and changes were implemented based on calculations and standards. These changes involved the use of sound-absorbing materials, resonating panels, and a redesign of the air conditioning system with ducts lined with rock wool to reduce background noise. Using I-SIMPA software for acoustic simulations with the proposed design, the result was a reverberation time in the range of 1 to 1.3 seconds. The redesign of the air conditioning system had the potential to reduce background noise levels to acceptable values for an auditorium. As a result of these simulated adjustments, it was calculated that speech intelligibility would improve by up to 62%. These theoretical modifications offer a comprehensive solution to the auditorium's acoustic limitations, significantly enhancing sound quality and the overall auditory experience in this space.*

***Keywords:*** Auditorium, sound, reverberation, absorbers, air conditioning

## Índice general

|  |      |
|--|------|
| Resumen.....   | I    |
| <i>Abstract</i> .....  | II   |
| Índice general.....  | III  |
| Abreviaturas.....  | VII  |
| Simbología.....  | VIII |
| Índice de figuras.....   | X    |
| Índice de gráficas.....  | XIII |
| Índice de tablas.....  | XIV  |
| Capítulo 1.....  | 1    |
| 1. Introducción.....   | 2    |
| 1.1 Descripción del problema.....                                    | 3    |
| 1.2 Justificación del problema.....                                  | 3    |
| 1.3 Objetivos.....   | 5    |
| 1.3.1 Objetivo General.....  | 5    |
| 1.3.2 Objetivos Específicos.....                                     | 5    |
| 1.4 Marco teórico.....   | 6    |
| 1.4.1 Acústica y Sonido.....   | 6    |
| 1.4.2 Conceptos básicos.....   | 6    |
| 1.4.3 Acústica de salas.....   | 10   |
| 1.4.4 Criterio de evaluación de ruido de fondo (Noise Criteria)..... | 10   |
| 1.4.5 Atenuación.....  | 10   |



|                 |   |    |
|-----------------|---|----|
| 1.4.6           | Eco .....   | 11 |
| 1.4.7           | Reverberación .....   | 12 |
| 1.4.8           | Tiempo de reverberación .....   | 12 |
| 1.4.9           | Inteligibilidad de la palabra .....                                   | 13 |
| 1.4.10          | Acondicionamiento y aislamiento acústico (Insonorización).....        | 14 |
| 1.4.11          | Materiales para tratamiento acústico .....                            | 14 |
| 1.4.12          | Modelado de auditorios .....  | 15 |
| 1.4.13          | Software.....   | 16 |
| Capítulo 2..... |   | 17 |
| 2.              | Metodología .....   | 18 |
| 2.1             | Equipos utilizados para mediciones acústicas.....                     | 18 |
| 2.2             | Análisis de insonorización .....                                      | 19 |
| 2.2.1           | Medición de ruido de fondo.....                                       | 19 |
| 2.2.2           | Sistema de climatización .....  | 20 |
| 2.3             | Adecuación acústica: Medición tiempo de reverberación.....            | 25 |
| 2.3.1           | Medición por método del Ruido Interrumpido (Barrido de Tonos Puros) . | 26 |
| 2.4             | Representación en 3D del auditorio .....                              | 27 |
| 2.4.1           | Cálculo del tiempo de reverberación teórico.....                      | 28 |
| 2.4.2           | Comprobación de tiempo de reverberación mediante simulación.....      | 28 |
| 2.5             | Parámetros de diseño.....   | 30 |
| 2.6             | Alternativas de diseño para reducción de tiempo de reverberación..... | 31 |
| 2.6.1           | Alternativa 1: Utilización de materiales absorbentes .....            | 31 |

|                 |  |    |
|-----------------|--|----|
| 2.6.2           | Alternativa 2: Utilización de materiales difusores .....                                     | 33 |
| 2.6.3           | Alternativa 3: Rediseño estructural .....  | 35 |
| 2.7             | Matriz de decisión .....   | 37 |
| 2.8             | Implementación de la alternativa elegida: Utilización de materiales<br>absorbentes           | 39 |
| 2.8.1           | Criterio de selección de materiales .....  | 40 |
| 2.8.2           | Diseño de resonador acústico .....   | 40 |
| 2.8.3           | Distribución geométrica .....  | 41 |
| 2.8.4           | Simulación de solución utilizando el programa I-SIMPA.....                                   | 42 |
| Capítulo 3..... |  | 43 |
| 3.              | Resultados y análisis .....  | 44 |
| 3.1             | Estado actual del auditorio .....  | 44 |
| 3.1.1           | Insonorización .....   | 44 |
| 3.1.2           | Adecuación Acústica .....  | 47 |
| 3.1.3           | Tiempo de reverberación por simulación del auditorio sin<br>acondicionamiento acústico. .... | 49 |
| 3.1.4           | Comparación de resultados del tiempo de reverberación.....                                   | 50 |
| 3.2             | Rediseño del sistema de aire acondicionado .....   | 51 |
| 3.2.1           | Caudal teórico requerido .....   | 51 |
| 3.2.2           | Perfiles y tramos de ductos .....  | 52 |
| 3.2.3           | Nivel de potencia sonora del sistema de climatización .....                                  | 55 |
| 3.2.4           | Nivel de presión sonora debido a la velocidad del aire .....                                 | 57 |

|                  |   |    |
|------------------|---|----|
| 3.2.5            | Atenuación por ductos .....   | 59 |
| 3.2.6            | Nivel de presión sonora total .....                                     | 61 |
| 3.3              | Reducción de tiempo de reverberación .....                              | 65 |
| 3.3.1            | Diseño de resonador acústico .....                                      | 65 |
| 3.3.2            | Selección de paneles para frecuencias medias y altas .....              | 67 |
| 3.3.3            | Redistribución del techo de gypsum y disposición geométrica de paneles  | 68 |
| 3.3.4            | Diseño 3D con el acondicionamiento acústico aplicado .....              | 70 |
| 3.3.5            | Simulación del acondicionamiento acústico del auditorio de la FIMCP.... | 73 |
| 3.3.6            | Inteligibilidad de la palabra .....                                     | 74 |
| 3.4              | Análisis de costos .....  | 77 |
| 3.5              | Análisis de resultados.....   | 79 |
| 3.5.1            | Rediseño del sistema de climatización .....                             | 79 |
| 3.5.2            | Acondicionamiento Acústico .....  | 80 |
| Capítulo 4.....  |   | 83 |
| 4.               | Conclusiones y recomendaciones .....                                    | 84 |
| 4.1              | Conclusiones .....  | 84 |
| 4.2              | Recomendaciones.....  | 86 |
| Referencias..... |   | 87 |
| Apéndices.....   |   | 89 |

## Abreviaturas

|        |  |
|--------|--|
| ESPOL  | Escuela Superior Politécnica del Litoral   |
| FIMCP  | Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción                            |
| ANSI   | Instituto Nacional Estadounidense de Estándares  |
| DIN    | Instituto Alemán de Normalización  |
| ASHRAE | Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire<br>Acondicionado |
| NC     | Noise Criteria   |
| MDF    | Tablero de fibra de densidad media   |

## Simbología

|             |                                   |
|-------------|-----------------------------------|
| $dB$        | Decibel                           |
| $Hz$        | Hertz                             |
| $c/s$       | Ciclos por segundo                |
| $c$         | Velocidad del sonido              |
| $P_o$       | Presión atmosférica estática      |
| $^{\circ}C$ | Grados Celsius                    |
| $m/s$       | Metros sobre segundos             |
| $T$         | Temperatura                       |
| $\lambda$   | Longitud de onda                  |
| $f$         | Frecuencia                        |
| $SPL$       | Nivel de presión sonora           |
| $Log$       | Logaritmo                         |
| $P$         | Presión                           |
| $P_{ref}$   | Presión de referencia             |
| $L_w$       | Presión sonora para un ventilador |
| $Q$         | Caudal                            |
| $IL_d$      | Atenuación sonora                 |
| $d$         | Distancia                         |

|          |                                      |
|----------|--------------------------------------|
| $L$      | Longitud                             |
| $\alpha$ | Coefficiente de absorción            |
| $V$      | Volumen                              |
| $RT$     | Tiempo de reverberación              |
| $\ln$    | Logaritmo natural                    |
| $A$      | Área total                           |
| $3D$     | Tres dimensiones                     |
| $ms$     | Milisegundos                         |
| $s$      | Segundos                             |
| $n$      | Número de renovaciones por hora      |
| $S$      | Área transversal                     |
| $D_e$    | Diámetro equivalente                 |
| $mm$     | Milímetros                           |
| $m$      | Metros                               |
| $M$      | Masa                                 |
| $m^2$    | Metros cuadrados                     |
| $m^3$    | Metros cúbicos                       |
| $RT60$   | Tiempo de reverberación según Sabine |

## Índice de figuras

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1.1</b> Ejemplo de diferentes frecuencias (Isbert, 1998).....   | 6  |
| <b>Figura 2.1</b> Perfil esperado para los ductos de ventilación aislados .....   | 24 |
| <b>Figura 2.2</b> Esquema de vista superior de áreas de interés para medición del tiempo de reverberación.....  | 26 |
| <b>Figura 2.3</b> Foto del escenario del auditorio de FIMCP actual y Representación en 3D del interior del auditorio utilizando del programa SketchUp ..... | 28 |
| <b>Figura 2.4</b> Captura de pantalla del programa I-SIMPA sobre la colocación de fuentes de sonido .....   | 30 |
| <b>Figura 2.5</b> Diseño de forma con materiales absorbentes .....  | 32 |
| <b>Figura 2.6</b> Diseño de forma con materiales difusores .....  | 34 |
| <b>Figura 2.7</b> Diseño de forma rediseñando la geometría .....  | 36 |
| <b>Figura 2.8</b> Diagrama de proceso de la alternativa seleccionada .....  | 40 |
| <b>Figura 3.1</b> Captura de pantalla de simulación de tiempo de reverberación en el programa I-SIMPA .....   | 49 |
| <b>Figura 3.2</b> Esquema de vista superior del auditorio del sistema de ductos de impulsión (color azul) y de retorno (color naranja).....                 | 53 |
| <b>Figura 3.3</b> Esquema de vista lateral en corte del auditorio del sistema de ductos.....  | 54 |
| <b>Figura 3.4</b> Esquema de vista frontal del auditorio del sistema de ductos .....  | 54 |
| <b>Figura 3.5</b> Coeficientes de absorción del resonador con y sin material absorbente en la cavidad (Isbert, 1998) .....                                  | 66 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 3.6</b> Vista superior a pared del resonador acústico diseñado.....   | 66 |
| <b>Figura 3.7</b> Dimensiones generales del resonador de membrana diseñado .....  | 67 |
| <b>Figura 3.8</b> Imagen referencial de lana de vidrio negra .....  | 67 |
| <b>Figura 3.9</b> Disposición lateral de paneles resonadores de membrana, paneles de lana de vidrio negro y techo escalonado de gypsum..... | 69 |
| <b>Figura 3.10</b> Imagen referencial de la vista superior del panel resonador modificado con una inclinación de $4,12^\circ$ .....         | 70 |
| <b>Figura 3.11</b> Vista isométrica interior del auditorio.....   | 71 |
| <b>Figura 3.12</b> Vista en perspectiva del interior del auditorio.....   | 71 |
| <b>Figura 3.13</b> Vista isométrica frontal del auditorio.....  | 72 |
| <b>Figura 3.14</b> Vista en perspectiva desde el escenario .....  | 72 |



## Índice de gráficas

|  |    |
|--|----|
| <b>Gráfica 3.1</b> <i>Curva NC del auditorio sin tratamiento acústico (Con sistema de climatización encendido)</i> .....                     | 44 |
| <b>Gráfica 3.2</b> <i>Curva NC del auditorio sin tratamiento acústico (Con sistema de climatización apagado)</i> .....                       | 45 |
| <b>Gráfica 3.3</b> <i>Comparativa de las curvas medidas en el auditorio y las curvas NC estandarizadas</i> .....                             | 45 |
| <b>Gráfica 3.4</b> <i>Comparación de tiempo de reverberación simulado, teórico y experimental</i> ....                                       | 51 |
| <b>Gráfica 3.5</b> <i>Curva de atenuación de ruido debido a ductos recubiertos internamente con lana de roca</i> .....                       | 60 |
| <b>Gráfica 3.6</b> <i>Nivel de presión sonora teórico del rediseño del sistema de climatización</i> .....                                    | 63 |
| <b>Gráfica 3.7</b> <i>Comparación de curvas NC del auditorio con sistema de climatización encendido con y sin rediseño del sistema</i> ..... | 64 |
| <b>Gráfica 3.8</b> <i>Comparación de curvas NC del auditorio con familia de curvas estandarizadas</i> .....                                  | 64 |
| <b>Gráfica 3.9</b> <i>Comparación de RT60 del auditorio original y con tratamiento acústico propuesto</i> .....                              | 74 |

## Índice de tablas

|                  |   |    |
|------------------|---|----|
| <b>Tabla 1.1</b> | Rangos recomendado para %ALCons (Isbert, 1998) .....  | 14 |
| <b>Tabla 2.1</b> | Velocidades recomendadas para ductos en cámaras silenciosas según ASHRAE 21   |    |
| <b>Tabla 2.2</b> | Coeficientes de absorción acústica de lana de roca para recubrimiento interno de ductos (Arau & Puchades, 1999) ..... | 24 |
| <b>Tabla 2.3</b> | Factores de influencia y su descripción .....   | 37 |
| <b>Tabla 2.4</b> | Escala de importancia .....   | 38 |
| <b>Tabla 2.5</b> | Comparación por pares de factores de influencia .....   | 38 |
| <b>Tabla 2.6</b> | Ponderación de factores de influencia .....   | 38 |
| <b>Tabla 2.7</b> | Matriz de decisión de las alternativas de diseño .....  | 39 |
| <b>Tabla 3.1</b> | Tiempo de reverberación medido .....  | 47 |
| <b>Tabla 3.2</b> | Áreas superficiales junto con su coeficiente de adsorción en bandas de octava ...                                     | 48 |
| <b>Tabla 3.3</b> | Área de fono absorción de todas las superficies por bandas de octavas .....   | 48 |
| <b>Tabla 3.4</b> | Tiempo de reverberación teórico .....   | 49 |
| <b>Tabla 3.5</b> | Tiempo de reverberación obtenido mediante simulación .....  | 50 |
| <b>Tabla 3.6</b> | Comparación de RT60 obtenido por diferentes métodos .....   | 50 |
| <b>Tabla 3.7</b> | Perfiles seleccionados en base a los caudales de cada tramo del sistema de ductos de impulsión.....                   | 55 |
| <b>Tabla 3.8</b> | Perfiles seleccionados en base a los caudales de cada tramo del sistema de ductos de retorno .....                    | 55 |
| <b>Tabla 3.9</b> | Pérdidas de presión estática por longitud de ductos de impulsión.....   | 56 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 3.10</b> Pérdidas de presión estática por longitud de ductos de retorno .....  | 56 |
| <b>Tabla 3.11</b> Niveles de potencia sonora del ventilador corregidos para cada frecuencia .....   | 57 |
| <b>Tabla 3.12</b> Niveles de potencia sonora debido a la velocidad del aire corregidos para cada frecuencia .....   | 58 |
| <b>Tabla 3.13</b> Niveles de potencia sonora hasta antes de las rejillas para el tramo crítico ABCDEGH .....  | 58 |
| <b>Tabla 3.14</b> Atenuación por recubrimiento interno de ductos con lana de roca para el tramo crítico ABCDEGH .....                                     | 60 |
| <b>Tabla 3.15</b> Niveles de potencia sonora del ventilador atenuados para cada frecuencia hasta antes de la rejilla de impulsión.....                    | 60 |
| <b>Tabla 3.16</b> Presión sonora incidente al auditorio desde la rejilla de impulsión crítica.....  | 61 |
| <b>Tabla 3.17</b> Niveles de presión sonora total para el tramo crítico ABCDEGH .....   | 62 |
| <b>Tabla 3.18</b> Coeficientes de fono absorción de resonador de membrana y panel de lana de vidrio.....  | 68 |
| <b>Tabla 3.19</b> RT60 del acondicionamiento acústico simulado en I-SIMPA.....  | 73 |
| <b>Tabla 3.20</b> Comparativa del %ALCons antes y después del tratamiento acústico .....  | 76 |
| <b>Tabla 3.21</b> Costo total del acondicionamiento acústico y rediseño del sistema de climatización (Cámara de la construcción de Guayaquil, 2019) ..... | 77 |

# **Capítulo 1**

## 1. Introducción

En el ámbito de los espacios destinados a eventos y conferencias, como los auditorios, la calidad del sonido es fundamental para garantizar una experiencia auditiva satisfactoria y una adecuada comprensión del mensaje transmitido. Sin embargo, los problemas acústicos pueden afectar negativamente la calidad del sonido, lo que resulta en una experiencia insatisfactoria para los usuarios y una disminución en la retención de la información. (Lindsay, 1965)

El presente proyecto tiene como objetivo diseñar una solución de acondicionamiento acústico que mejore la calidad auditiva del auditorio de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) de la ESPOL. Basándose en la comprensión de los problemas de producción, propagación y recepción de sonido, se utilizará una base teórica sólida para abordar y resolver los desafíos acústicos identificados en este estudio. El diseño propuesto incluirá la selección de materiales y la implementación de técnicas que promuevan una dispersión uniforme del sonido, con el propósito de mejorar el tiempo de reverberación. Además, se proponen cambios en la arquitectura para obtener una mejor insonorización y reducir el ruido de fondo. Estos factores favorecerán a la inteligibilidad de la palabra, mejorando la experiencia acústica del auditorio. En adición, se realizarán simulaciones en software para validar la solución propuesta y se llevará a cabo un análisis de costos que evalúe los materiales y procesos involucrados en el acondicionamiento.

## **1.1 Descripción del problema**

El Auditorio de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) ha sido sometido a mediciones preliminares que revelaron además de una insuficiente insonorización, un tiempo de reverberación que se sitúa en torno a los 2,5 segundos, superando considerablemente el valor esperado de aproximadamente de entre 1 y 1,3 segundos para un auditorio (Long, 2005).

Una alta reverberación es el resultado de la falta de adecuación acústica de un espacio, generando una persistencia sonora inusualmente prolongada que dificulta la comprensión clara del mensaje y distorsiona el sonido original. Este fenómeno conlleva la incapacidad del público para discernir con precisión lo que se está comunicando, lo que resulta en fatiga auditiva, pérdida de interés y disminución en la retención de información. La calidad de la experiencia de los usuarios se ve comprometida de manera significativa debido a esta deficiencia en la acústica del recinto.

## **1.2 Justificación del problema**

El Auditorio de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) enfrenta desafíos significativos en cuanto a su acústica, lo que repercute directamente en la calidad del sonido y la experiencia auditiva que brinda a sus usuarios. Actualmente, se presentan problemas como la intrusión de ruidos externos y del sistema de climatización, sumado a un tiempo de reverberación que supera los valores aceptables. Estos inconvenientes resultan en una comprensión poco clara de los mensajes, distorsión del sonido original y una experiencia auditiva incómoda y fatigante para el público presente en conferencias y eventos.

La alta reverberación en el auditorio se debe a la reflexión excesiva del sonido en las paredes y el techo, según revelaron las mediciones preliminares realizadas. Esta situación afecta negativamente la calidad del sonido y la claridad en la transmisión de mensajes. Para solucionar estos problemas, es necesario abordar la acústica del espacio mediante un diseño de acondicionamiento acústico. Esto implica la selección de materiales y la aplicación de técnicas que permitan una dispersión uniforme del sonido, mejorando así el tiempo de reverberación, reduciendo el ruido de fondo y mejorando la inteligibilidad de la palabra.

La importancia de resolver estos problemas radica en garantizar una experiencia auditiva satisfactoria para el público en el Auditorio de la FIMCP. Al disminuir el tiempo de reverberación, atenuar el efecto de eco y reducir el ruido de fondo, se logrará una mejor comprensión del mensaje transmitido durante eventos y conferencias. Esto no solo promoverá una mayor participación y retención de información debido a las mejoras acústicas, sino que también mejorará la calidad general del auditorio. Como resultado, se asegurará una comunicación efectiva junto con una experiencia agradable además de una mayor satisfacción para todos los involucrados.

## **1.3 Objetivos**

### ***1.3.1 Objetivo General***

Diseñar el acondicionamiento acústico del auditorio de la FIMCP empleando técnicas de adecuación acústica y validación mediante simulación en software, con el propósito de reducir el tiempo de reverberación, disminuir el ruido de fondo y mejorar la inteligibilidad de la palabra.

### ***1.3.2 Objetivos Específicos***

1. Realizar el diagnóstico acústico del auditorio identificando: tiempo de reverberación y puntos críticos de reflexión y absorción.
2. Diseñar la solución para el tratamiento acústico del auditorio utilizando métodos de aislamiento y absorción del sonido.
3. Rediseñar el sistema de climatización para la reducción del ruido de fondo.
4. Realizar la validación de la solución acústica mediante simulación por software.
5. Realizar un análisis de costos de materiales y procesos utilizados en el acondicionamiento.



## 1.4 Marco teórico

### 1.4.1 Acústica y Sonido

La acústica es la ciencia del sonido, abarcando su producción, transmisión y efectos. El término “sonido” se refiere no solo a los fenómenos en el aire que provocan la audición, sino también a otros fenómenos regidos por principios físicos similares.

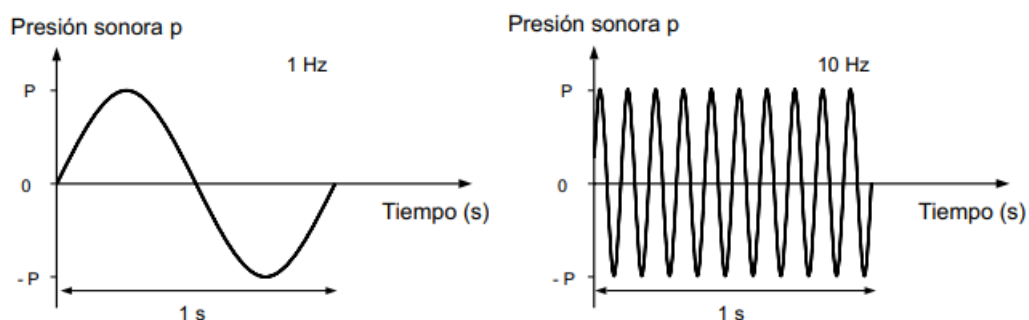
### 1.4.2 Conceptos básicos

**Ruido:** Se define como cualquier tipo de sonido percibido como indeseable. En otras palabras, se caracteriza por ser un sonido que resulta molesto o perjudicial para aquellos que lo experimentan.

**Frecuencia de sonido:** Es el número de oscilaciones por segundo la cual se mide en hertzios ( $Hz$ ) o en ciclos por segundo ( $c/s$ ). En la figura 1.1 se observa cómo se comporta una onda de sonido a diferente frecuencia.

**Figura 1.1**

*Ejemplo de diferentes frecuencias (Isbert, 1998)*



**Velocidad de propagación del sonido (c):** La velocidad de propagación del sonido en un medio está determinada por las propiedades elásticas y la densidad del medio. En el caso del aire, tanto la elasticidad como la densidad dependen de la presión atmosférica

estática ( $P_0$ ) y la temperatura. Bajo condiciones normales, con una presión atmosférica de 1 atmósfera y una temperatura de 22 °C, la velocidad de propagación del sonido en el aire es aproximadamente de  $345 \frac{m}{s}$ . Para calcular la velocidad del aire a una presión constante se usa la siguiente ecuación.

$$c = 331.4 + 0.607T \quad (1.1)$$

Donde:

$c$ : Velocidad del sonido en  $\frac{m}{s}$

$T$ : temperatura en °C

**Longitud de onda ( $\lambda$ ):** Es la distancia física en la cual se repite la forma de la onda.

Y se calcula mediante la ecuación:

$$c = f * \lambda \quad (1.2)$$

Donde:

$c$ : Velocidad del sonido en  $\frac{m}{s}$

$f$ : Frecuencia en Hz

$\lambda$ : Longitud de onda en  $m$

**Nivel de presión sonora (SPL/NPS):** El nivel de presión sonora es una medida que se utiliza para describir la intensidad del sonido. Se mide en decibelios ( $dB$ ) y se utiliza una escala logarítmica debido a la amplia gama de intensidades que el oído humano puede percibir. (Isbert, 1998)

$$NPS = 20 \log \frac{P}{P_{ref}} \quad (1.3)$$

Donde:

$NPS$ : Nivel de presión sonora en  $dB$

$P$ : Presión en  $Pa$

$P_{ref}$ : Presión de referencia en  $Pa$

Como presión de referencia la presión eficaz sonora que se suele tomar es la de  $2 \times 10^{-5}$   $Pa$ , que es la mínima presión que puede ser detectada por una persona en la frecuencia de 1  $kHz$ .

Para el cálculo de nivel de presión sonora aproximado que produce un ventilador de aire acondicionado, se utiliza la siguiente expresión:

$$L_w = 10 \log Q + 20 \log P + 40 \quad (1.4)$$

Donde:

$Q$ : Caudal de aire en  $\frac{m^3}{s}$

$P$ : Presión estática en  $\frac{N}{m^2}$

Dicha expresión presenta correcciones para las diferentes frecuencias, presentadas en el anexo Tabla A1.

Para el cálculo de la potencia sonora generada por la velocidad del aire en ductos de sistemas de climatización se tiene la siguiente ecuación:

$$L_{WA} = 55 \log V + 10 \log S \quad (1.5)$$

Donde:

$V$ : velocidad del aire en  $\frac{m}{s}$

$S$ : área de la sección transversal del conducto  $m^2$

Dicha ecuación presenta correcciones para cada banda de frecuencia presentadas en el anexo Tabla A2.

El nivel de potencia sonora por distancia desde rejilla de impulsión o retorno de sistemas de climatización hasta un punto de recepción de sonido se puede calcular con la ecuación:

$$L_{pd} = L_W + DI - 20 \log r - 11 \quad (1.6)$$

Donde:

$L_W$ : nivel de presión sonora de la fuente en  $dB$

$DI$ :  $10 \log (Q)$  donde  $Q$  es la directividad (Anexo A12)

$r$ : distancia entre rejilla y punto de resección de sonido en  $m$

El nivel de potencia sonora debido al campo reverberante se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$L_{pr} = L_W + 10 \log T - 10 \log V + 14 \quad (1.7)$$

Donde:

$L_W$ : Nivel de presión sonora de la fuente en  $dB$

$T$ : Tiempo de reverberación en  $s$

$V$ : Volumen de la cámara reverberante en  $m^3$

La suma logarítmica de los niveles de presión sonora descritos está dada por:

$$L_{PT} = 10 \log(10^{\frac{L_{pd}}{10}} + 10^{\frac{L_{pr}}{10}}) \quad (1.8)$$

### **1.4.3 Acústica de salas**

Es el estudio del comportamiento de las ondas sonoras en espacios cerrados o parcialmente cerrados. Los detalles arquitectónicos de una habitación influyen en el comportamiento de las ondas sonoras dentro de ella, y los efectos varían según la frecuencia. La reflexión acústica, la difracción y la difusión se pueden combinar para crear fenómenos audibles como modos de sala y ondas estacionarias en frecuencias y ubicaciones específicas, ecos y patrones de reverberación únicos (Kuttruff, 2016).

### **1.4.4 Criterio de evaluación de ruido de fondo (Noise Criteria)**

Definido por la norma ANSI/ASA S12.2, establece niveles de presión sonora específicos para frecuencias que oscilan entre 63 y 8000 Hz, los cuales se agrupan en distintas curvas conocidas como Noise Criteria (NC). Según la clasificación de recintos, el auditorio de la FIMCP se considera un "Assembly Hall" y, por ende, las curvas NC recomendadas son NC-25 y NC-30 (ANSI/ASA, 2019).

### **1.4.5 Atenuación**

La atenuación de sonido, medida en decibelios (dB), se refiere a la reducción de la intensidad o nivel de presión sonora de un sonido a medida que se propaga a través de un medio o atraviesa un material. Es el proceso mediante el cual la energía acústica se disipa o se pierde a medida que el sonido se propaga. (Möser, 2009)

La atenuación en función de la longitud está dada por:

$$IL_d = 20 \log \left( \frac{d_2}{d_1} \right) \quad (1.9)$$

Donde:

$d_1$ : Distancia desde la fuente de sonido hasta la referencia en  $m$

$d_2$ : Distancia desde la referencia hasta el receptor en  $m$

Para el cálculo de la atenuación para ductos en el sistema de aire acondicionado se utiliza la siguiente ecuación (Arau & Puchades, 1999):

$$IL = 1.05L \left( \frac{P}{S} \right) \alpha^{1.4} \quad (1.10)$$

Donde:

$L$ : Longitud considerada en la dirección de propagación en  $m$

$P$ : Longitud del perímetro de la sección del conductor en  $m$

$S$ : Área de la sección transversal del conducto en  $m^2$

$\alpha$ : Coeficiente de absorción de la pared del conducto

#### **1.4.6 Eco**

En acústica, un eco es la repetición de un sonido provocado por el reflejo de las ondas sonoras en una superficie. Los ecos generalmente se escuchan cuando la fuente de sonido y la superficie reflectante están lo suficientemente separadas como para que las ondas de sonido tengan tiempo de viajar a la superficie y regresar antes de que el oyente las escuche. El tiempo que tardan las ondas sonoras en viajar a la superficie y regresar se denomina retraso del eco. (Knudsen, 1963)

### 1.4.7 Reverberación

La reverberación es la persistencia del sonido en una habitación después de que la fuente de sonido original se haya detenido. Es causado por el reflejo de las ondas sonoras de las paredes, el techo y otras superficies de la habitación. La reverberación puede agregar calidez y profundidad a un sonido, pero también puede dificultar la comprensión del habla o la música (Knudsen, 1963).

### 1.4.8 Tiempo de reverberación

Es el tiempo que tarda en disminuir la intensidad del sonido después de que la fuente sonora se ha detenido. Este concepto es relevante para comprender la calidad acústica de un ambiente, ya que afecta la claridad y la inteligibilidad del sonido. (Barron, 2015)

El cálculo del tiempo de reverberación se basa en una ecuación que considera varios factores clave, como el volumen del espacio, su área de superficie y las propiedades absorbentes de los materiales presentes en el ambiente. (Pierce, 2019)

$$T_{60} = 0.161 \frac{V}{\sum_i \alpha_i A_i} \quad (1.11)$$

Donde:

$V$ : Volumen de la habitación en  $m^3$

$\alpha_i$ : Coeficiente de absorción de un área de mismo material

$A_i$ : Área de una superficie de material único en  $m^2$

### 1.4.9 Inteligibilidad de la palabra

La inteligibilidad de la palabra es la capacidad de comprender de manera clara una o un conjunto de palabras por un oyente. Es decir, es la facilidad con la que una palabra o expresión es entendida sin confusión (Isbert, 1998). Un indicador para medir la inteligibilidad de la palabra es el %ALCons que permite identificar la percepción incorrecta de las consonantes, el cual se obtiene con las siguientes ecuaciones:

$$\%ALCons = \frac{200r^2RT^2}{VQ} \quad (\text{para } r \leq 3.16D_c) \quad (1.12)$$

$$\%ALCons = 9RT \quad (\text{para } r > 3.16D_c) \quad (1.13)$$

Donde:

$r$ : Distancia entre el emisor y el receptor en  $m$

$RT$ : Tiempo de reverberación de la sala en  $s$

$V$ : Volumen de la sala en  $m^3$

$D_c$ : Distancia crítica en  $m$

$$D_c = 0.14\sqrt{QR}$$

$Q$ : factor de directividad de la fuente sonora ( $Q = 2$  en el caso de la voz humana por la forma de salida del sonido, véase anexo A12)

$R$ : constante de la sala

El valor de %ALCons va aumentando a medida que el receptor se aleja de la fuente, hasta una distancia:  $r = 3,16 D_c$ . Para distancias  $r > 3,16 D_c$  la inteligibilidad de la palabra ya no empeora. (Isbert, 1998)



$$R = \frac{S_{tot}\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}}$$

$S_{tot}$ : Superficie de la sala en  $m^2$

$\bar{\alpha}$ : Coeficiente medio de absorción de la sala

Cabe destacar que habitualmente, el %ALCons se calcula en la banda de 2kHz, puesto que es la banda que mayor contribución tiene con respecto a la inteligibilidad de la palabra (Isbert, 1998). En la tabla 1.1 se muestran los valores recomendados de %ALCons para una valoración subjetiva de la inteligibilidad.

**Tabla 1.1**

*Rangos recomendado para %ALCons (Isbert, 1998)*

| <b>%ALCons</b> | <b>Valoración Subjetiva</b> |
|----------------|-----------------------------|
| 1,4% - 0%      | Excelente                   |
| 4,8% - 1,6%    | Buena                       |
| 11,4% - 5,3 %  | Aceptable                   |
| 24,2% - 12%    | Pobre                       |
| 46,5% - 27%    | Mala                        |

#### **1.4.10 Acondicionamiento y aislamiento acústico (Insonorización)**

Aunque el acondicionamiento acústico pretende controlar los parámetros de propagación del sonido; el aislamiento acústico pretende contrarrestar el ruido ajeno al espacio interior que interfiere en la confortabilidad de este. Es por eso por lo que, aunque parezcan conceptos similares, no lo son, el aislamiento acústico es un tema de igual o mayor extensión que el acondicionamiento acústico. (Vendrell, 2011)

#### **1.4.11 Materiales para tratamiento acústico**

**Materiales Absorbentes:**

Tienen la capacidad de reducir la reflexión del sonido en un espacio, contribuyendo así a la absorción del sonido incidente. En aplicaciones arquitectónicas se dividen generalmente en tres categorías: absorbentes porosos, absorbentes de paneles y absorbentes resonantes. Estos últimos se diseñan en función de una frecuencia de resonancia para una mejor absorción en dichas frecuencias. (Long, 2005).

### **Materiales Reflejantes:**

A diferencia de los materiales absorbentes, son materiales que reflejan las ondas sonoras en la dirección de reflexión especular dada su superficie lisa. Se pueden usar para reducir los niveles de ruido al reflejar las ondas de sonido lejos de una fuente. (Isbert, 1998)

### **Materiales Difusores:**

Los materiales difusores son superficies diseñadas específicamente para reflejar el sonido incidente en varias direcciones en lugar de hacerlo principalmente en una sola dirección. (Long, 2005).

#### ***1.4.12 Modelado de auditorios***

La modelización acústica ha evolucionado desde su uso poco común en escalas grandes antes de la década de 1960, enfrentando desafíos con la absorción del aire. Con el avance del procesamiento digital, se han mejorado las pruebas objetivas y subjetivas, y se han adoptado escalas más pequeñas, como 1:50, para la modelización objetiva, reduciendo costos y espacio. La modelización por computadora, a pesar de su bajo costo y rápida implementación, debe garantizar la representación precisa del comportamiento acústico real y es valiosa para la investigación, incluyendo la ubicación óptima para el tratamiento de dispersión en auditorios. (Barron, 2015)

### ***1.4.13 Software***

#### **REW:**

REW es un software gratuito para medición acústica de salas, medición de altavoces y medición de dispositivos de audio. Sus características ayudan a optimizar la acústica de cualquier sala. Incluye herramientas para generar señales de prueba, medir SPL e impedancia, analizar respuestas de frecuencia e impulsos, calcular tiempos de reverberación, modalidades y parámetros Thiele-Small, y ajustar ecualizadores para lograr curvas objetivo. (REW)

#### **SketchUp:**

Es un software de diseño y modelado en 3D ampliamente utilizado en la industria arquitectónica, de ingeniería y diseño. Ofrece una interfaz intuitiva y herramientas versátiles que permiten a los usuarios crear modelos tridimensionales de edificios o espacios interiores. Con sus funciones de dibujo precisas, capacidad de generar visualizaciones realistas y capacidad de trabajar en colaboración con otros programas de diseño.

#### **I-SIMPA:**

Es un software de código abierto dedicado al modelado de la propagación del sonido en dominios complejos 3D. Esta es una herramienta perfecta para efectuar simulaciones en proyectos de acústica en diferentes tipos de espacios, permitiendo visualizar las áreas donde el sonido se concentra en una habitación, además de calcular el tiempo de reverberación del espacio utilizando la ecuación de Sabine ponderada por reflexiones debido al proceso de trazado de rayos para la simulación de partículas sonoras.

## **Capítulo 2**

## **2. Metodología**

Para el acondicionamiento acústico, se realizaron mediciones y ensayos de diferentes parámetros para verificar el estado actual del auditorio y determinar las principales falencias. Esto permitió identificar áreas con problemas de reverberación excesiva, falta de absorción en determinadas frecuencias o deficiencias en la distribución uniforme del sonido, además de fuentes de ruido no deseadas provocadas por el sistema de aire acondicionado.

En base a estas mediciones y a los requerimientos de diseño se plantearon tres alternativas de solución que permitieron seleccionar la opción más adecuada para la reducción en el tiempo de reverberación del auditorio.

### **2.1 Equipos utilizados para mediciones acústicas**

Para las mediciones acústicas, se utilizaron los siguientes equipos:

- Micrófono de mediciones behringerB ECM 8000: Posee una respuesta de frecuencia desde los 15 Hz hasta los 20 kHz y un patrón de captación omnidireccional que permite obtener una representación precisa del sonido en todas las direcciones.
- Interfaz de audio M-audio Air 192 6: Posee una respuesta de frecuencia de entre 20 Hz y 20kHz y un rango dinámico de hasta 104 dB que permite establecer límites para la captación de audio.
- Sonómetro marca EXTECH Modelo 40768: Posee una amplitud de banda de frecuencia de 31.5 Hz a 8kHz, escala de medición de 30 a 130dB y un tiempo de respuesta entre 125 ms y 1s.

## **2.2 Análisis de insonorización**

En esta sección, se presenta el análisis de insonorización realizado en el auditorio, enfocado en identificar y abordar las fuentes de ruido que afectan su calidad acústica. Se llevaron a cabo mediciones precisas y caracterizaciones detalladas de las fuentes de ruido internas y externas, permitiendo identificar las principales causas del problema acústico. Además, se utilizó el criterio de curvas NC para evaluar los niveles de ruido en diferentes frecuencias y proporcionar una clasificación objetiva de la calidad acústica del auditorio.

### **2.2.1 *Medición de ruido de fondo***

La medición de ruido de fondo se realizó utilizando los equipos previamente descritos en la sección 2.1.

1. Preparación de auditorio: Se establecieron las condiciones básicas para la medición de ruido de fondo lo cual consistía en cerrando puertas, ventanas y activación del sistema de aire acondicionado.
2. Calibración del equipo: Con ayuda de un sonómetro, se realizó la calibración del micrófono de mediciones para no diferir de las mediciones reales. De este modo se aseguró la fiabilidad de los datos para registrarlos y procesarlos con el programa REW.
3. Posicionamiento del micrófono: El micrófono se ubicó en un punto central del auditorio para la captación uniforme del ruido del entorno, considerando ruidos externos e internos.

4. Captura y registro de las mediciones: Se capturaron las señales acústicas resultantes utilizando el micrófono de mediciones, y se registraron en el software REW para su posterior análisis y comparación con las curvas NC de la norma ANSI/ASA S12.2.

### **2.2.2 Sistema de climatización**

Para la reducción del ruido ocasionado por el sistema de climatización en el auditorio, se planteó el diseño de un nuevo sistema que cumpla con las recomendaciones y normas para lograr un bajo nivel de ruido. Se consideró cuidadosamente la ubicación del equipo principal para minimizar la transmisión de ruido al interior del auditorio. Además, se prestará especial atención a la velocidad del aire en los ductos y a la disposición de las salidas de las rejillas, con el fin de evitar la generación de ruido. De esta manera, se garantizará un entorno acústico adecuado para las actividades que se llevan a cabo en el auditorio.

#### **2.2.2.1 Caudal**

El caudal es calculado utilizando la fórmula:

$$Q = V * n \quad (2.1)$$

Donde:

$V$ : Volumen de la habitación en  $m^3$

$n$ : Número de renovaciones por hora en  $\frac{1}{h}$

Según la norma DIN 1946, el número de renovaciones por hora para auditorios debe estar entre 6 y 8, para este caso, se elegirá 6 al representar menos velocidad, y, en consecuencia, menos nivel de ruido (DIN, 1946).

### 2.2.2.2 Selección de perfiles y tramos de ductos

Para la selección de ductos, se consideraron velocidades recomendadas por “ASHRAE Handbook – HVAC Applications 2015 / Section 48 Noise and vibration control / Table-8”

**Tabla 2.1**

*Velocidades recomendadas para ductos en cámaras silenciosas según ASHRAE*

| Ductos                  | Velocidad<br>[m/s] |
|-------------------------|--------------------|
| Principales             | 8,6                |
| Ramales                 | 6,9                |
| Próximos a derivación   | 4,3                |
| Difusores de suministro | 1,8                |
| Rejillas de retorno     | 2,2                |

Con estas velocidades y el caudal proporcionado por el sistema de climatización, se realizó un cálculo de secciones transversales para cada tramo diferente de ductos en el auditorio haciendo uso de la fórmula de caudal y despejando la variable de área:

$$S = \frac{Q}{v} \quad (2.2)$$

Donde:

$Q$ : Caudal del aire en el interior del ducto en  $\frac{m^3}{s}$

$v$ : Velocidad del aire en el interior del ducto en  $\frac{m}{s}$

Una vez obtenida la sección transversal, se calcula un diámetro equivalente considerando que se trata de una sección circular para luego, con el uso de la fórmula y tablas



de Huebscher obtener un perfil rectangular que finalmente cumpla con las condiciones de sonido y espacio disponible en el auditorio.

$$D_e = \frac{1,30 * (ab)^{0,625}}{(a + b)^{0,25}} \quad (2.3)$$

Donde:

*a*: Lado 1 del perfil de ducto rectangular esperado en *mm*

*b*: Lado 2 del perfil ducto rectangular esperado en *mm*

Además de la selección de perfiles, se consideró la reubicación de los ductos, reduciendo la altura de las rejillas de impulsión de modo que se pueda tratar acústicamente techo, además de alargar más la distancia entre unidad de enfriamiento y rejillas.

### 2.2.2.3 Potencia sonora del ventilador

Con los tramos y perfiles de ductos diseñados, se calcula la potencia sonora del ventilador, la cual depende de del caudal y de la presión estática según la ecuación 1.4.

La presión estática por unidad de longitud se selecciona por el anexo A5 de pérdidas por fricción para ductos circulares de diámetro equivalente a los perfiles seleccionados. Las longitudes de los tramos se multiplicarán por un factor de 1.5, valor utilizado por frecuencia en este tipo de análisis para considerar las pérdidas por los accesorios y cambios de sección. Además, para la presión estática y nivel de ruido en las rejillas tanto de impulsión como de retorno, se hace uso de los catálogos de selección rápida para rejillas de impulsión y retorno de los Anexos A10 y A11.

El valor de potencia sonora del ventilador debe ser corregido para cada frecuencia en bandas de octava que se encuentran en el Anexo A1. De esta manera se tiene una estimación

para cada frecuencia del ruido que se transmite por los ductos desde la unidad de enfriamiento.

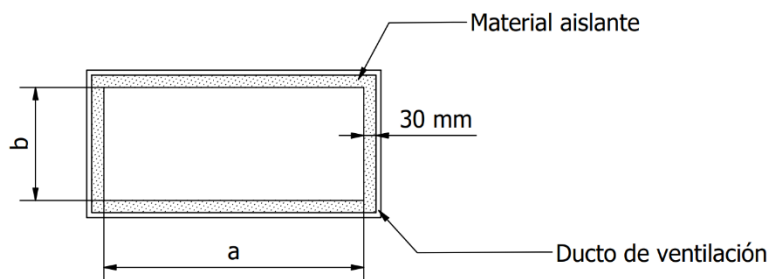
#### **2.2.2.4 Potencia sonora debido a la velocidad del aire**

La velocidad del aire genera ruido al pasar por los ductos, este valor, según la ecuación 1.5 depende además de la velocidad del aire, del área de la sección de los ductos. Para los cálculos consiguientes, se selecciona un tramo crítico, es decir, el tramo que represente el mayor ingreso de ruido desde la unidad de enfriamiento hasta la rejilla más cercana con la finalidad de analizar el caso donde existe el mayor ruido y evitar cálculos redundantes.

La potencia sonora debido a la velocidad el aire también tiene una corrección dada por la tabla A2 de la sección de anexos. Donde para cada frecuencia en bandas de octava se suma o resta aritméticamente las correcciones de niveles de potencia sonora.

#### **2.2.2.5 Atenuación en ductos**

Se hace uso de la ecuación 1.10 de atenuación acústica en ductos considerando el uso de aislamiento para el interior de los ductos de lana de vidrio con un espesor de 30 mm, de esta manera se puede reducir el ruido al pasar a través de estos ductos. La Figura 2.1 muestra el diseño de perfil de ducto que se espera obtener para cada tramo de ductos de ventilación del sistema de aire acondicionado, donde los valores a y b corresponden a los de la ecuación 2.3 de Pubescer para equivalencia entre perfiles rectangulares y circulares.

**Figura 2.1***Perfil esperado para los ductos de ventilación aislados*

Se seleccionó lana de roca al ser un material comercial y bastante usado para recubrimientos no sólo acústico, si no térmico. En la tabla 2.2 se muestran los valores de los coeficientes de absorción acústica de lana de roca, valores que serán utilizados en la fórmula de atenuación debido a ductos.

**Tabla 2.2**

*Coefficientes de absorción acústica de lana de roca para recubrimiento interno de ductos (Arau & Puchades, 1999)*

|                               | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |
|-------------------------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| <b>Lana de roca<br/>30 mm</b> | 0,1    | 0,32   | 0,55   | 0,66    | 0,79    | 0,77    |

Los valores de atenuación calculados para cada banda de frecuencia se deben restar a los niveles de potencia sonora debido a la velocidad del aire y de la fuente (Que se deben sumar logarítmicamente) para obtener el nivel de ruido que llega hasta antes de las rejillas. Este nivel de ruido también se debe sumar logarítmicamente al valor de ruido generado en las rejillas por el paso de aire que se obtiene del catálogo de rejillas de los anexos A10 y A11 para finalmente obtener el nivel de presión sonora incidente al auditorio por la rejilla crítica.

### **2.2.2.6 Nivel de presión sonora total**

Finalmente, para obtener el nivel de presión sonora total, generado por el sistema de climatización aparte del ruido incidente en la rejilla crítica, se debe considerar el ruido debido a la distancia dado por la ecuación 1.6 y el ruido debido al campo reverberante dado por la ecuación 1.7. En la ecuación 1.6 existe un factor DI que es igual a 10 veces el logaritmo del coeficiente de directividad que se puede encontrar en el anexo A12 que, para rejillas de este tipo es igual a 2.

Los valores de nivel de presión sonora total para el tramo crítico se vieron limitados por la falta de mediciones reales que pudieran considerar otros factores como temperatura, presión o falta insonorización por las entradas. Por esta razón se considera sumar logarítmicamente estos valores con mediciones reales del auditorio sin acondicionar con el sistema de climatización apagado de modo que se obtenga una aproximación a los niveles de ruido esperados con el rediseño del sistema de climatización.

## **2.3 Adecuación acústica: Medición tiempo de reverberación**

En esta sección, se describe el procedimiento utilizado para realizar las mediciones de tiempo de reverberación en el auditorio y así determinar las posibles soluciones para reducirlo a un valor que permita una mejor inteligibilidad y calidad acústica en este espacio.

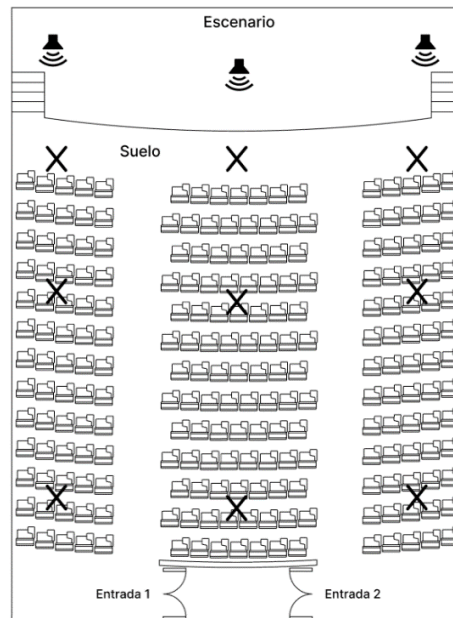
Se empleó el Método del Ruido Interrumpido (Barrido de Tonos Puros) el cual permite obtener información precisa sobre el comportamiento acústico del espacio y que es ampliamente utilizado en el campo de la acústica arquitectónica.

En la Figura 2.2 se muestra un esquema de la vista superior del auditorio de la FIMCP, en el cual se marcan con “X” las posiciones estratégicas en donde se ubicó el

micrófono de mediciones para las 2 pruebas mencionadas, además de un ícono de bocina las posiciones de las fuentes de sonido en el escenario (izquierda, central y derecha).

**Figura 2.2**

*Esquema de vista superior de áreas de interés para medición del tiempo de reverberación*



**2.3.1 Medición por método del Ruido Interrumpido (Barrido de Tonos Puros)**

Este método se basa en la generación de un ruido blanco en el espacio acústico a analizar para captar la respuesta en diferentes puntos del entorno. Para llevar a cabo esta medición, se siguieron los siguientes pasos:

1. Preparación de equipos: Se utilizó un parlante conectado mediante una interfaz de audio a un ordenador portátil que contenía el programa REW con el cual se emitiría la señal de muestreo, también se usó un micrófono especializado para mediciones acústicas conectado a la misma interfaz, el cual se ajustó en un trípode con una inclinación de  $45^\circ$  y se posicionó en las ubicaciones estratégicas anteriormente mencionadas.

2. Calibración del equipo: Con ayuda de un sonómetro, se realizó la calibración del micrófono de mediciones para no diferir de las mediciones reales. De este modo se aseguró la fiabilidad de los datos para registrarlos y procesarlos con el programa REW.
3. Posicionamiento del micrófono y la fuente sonora: Se ubico el parlante en el área del escenario ya que es el punto donde se emitiría el sonido al momento de realizar una conferencia. Con lo que respecta al micrófono este se colocó en puntos estratégicos ya antes mencionados y graficados en la Figura 2.2, con el objetivo de obtener mediciones representativas de diferentes áreas y puntos de escucha.
4. Generación del ruido: Se inició el barrido de tonos puros en un rango de frecuencias predefinido (20 a 20000 Hz), generando así un ruido interrumpido con características específicas. El cual debía ser captado por el micrófono sin ningún ruido externo que perjudique la medición. Por lo que se tuvieron que apagar los equipos de aire acondicionado además de realizar el menor ruido por parte de las personas que conformaban el equipo de mediciones.
5. Captura y registro de las mediciones: Se capturaron las señales acústicas resultantes en cada una de las posiciones señaladas utilizando el micrófono de mediciones, registrándose en el software REW para su posterior análisis.

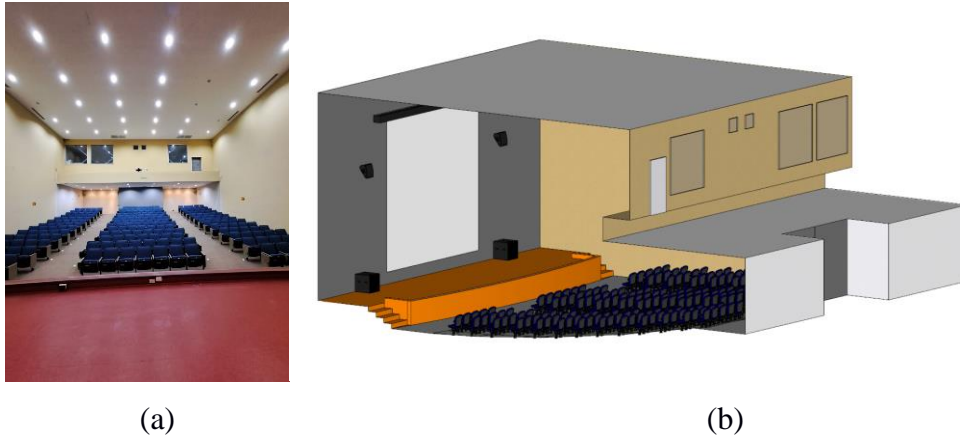
## **2.4 Representación en 3D del auditorio**

Para poder representar y simular de una manera precisa el auditorio de la FIMCP aprovechando el poder computacional, se decidió modelar en 3D el interior de este con ayuda de SketchUp, un programa de enfoque arquitectónico que permite detallar la geometría de

espacios interiores y exportar el archivo 3D en formato 3DS, el más adecuado para utilizarlo en el programa I-SIMPA para simulaciones acústicas.

### **Figura 2.3**

*Foto del escenario del auditorio de FIMCP actual y Representación en 3D del interior del auditorio utilizando del programa SketchUp*



*Nota:* La figura a se muestra una foto actual del auditorio, la figura b muestra la representación en SketchUp.

#### **2.4.1 Cálculo del tiempo de reverberación teórico.**

Para el cálculo teórico del tiempo de reverberación, se realizó el cálculo del volumen del auditorio. Posteriormente, se calculó el área de absorción para cada superficie del auditorio, lo que incluye paredes, piso, techo, butacas, escenarios, etc. Para este procedimiento se utilizaron los coeficientes de fono absorción propios del material del que están fabricados dichos elementos, con el fin de multiplicar dicha área con los respectivos coeficientes de absorción en las distintas frecuencias como lo dicta la ecuación 1.11.

#### **2.4.2 Comprobación de tiempo de reverberación mediante simulación**

Se diseñó un modelo en 3D del espacio acústico, para su exportación a I-SIMPA, que es un programa de código abierto para simulaciones acústicas. Este programa permite a los

usuarios simular un espacio acústico y analizar su comportamiento frente a diferentes frecuencias, por lo que su función en este proyecto fue la recrear la respuesta de frecuencia medida con los diferentes métodos ya mencionados, y de esta manera simular la solución planteada y verificar que se mejore la acústica del lugar.

Procedimiento:

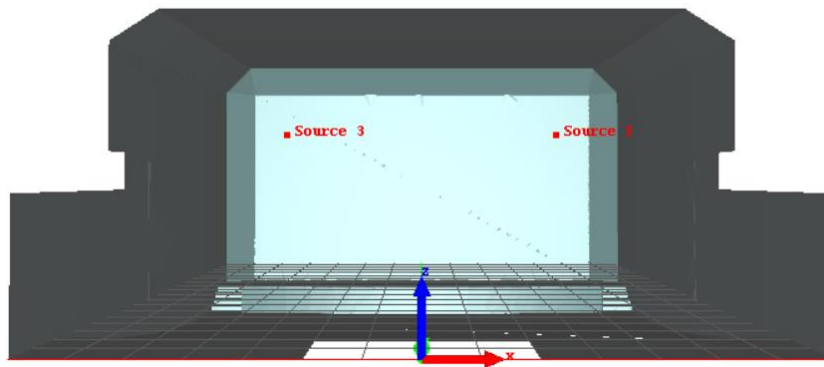
- Se realizó un modelo 3D del interior del auditorio utilizando el programa SketchUp, debido a su fácil manejo y compatibilidad al momento de exportar el modelo al programa I-SIMPA, asegurándose de que tuviera las mismas dimensiones que el espacio físico.
- Una vez completado el modelo, se exportó en formato .3ds para su posterior importación al programa I-SIMPA.
- Tras la importación, se procedió a realizar el mallado del modelo, corrigiendo la geometría en caso de ser necesario.
- Se agruparon las superficies por secciones, como paredes, piso, techo, escenario, entre otras, con el fin de asignar a cada una su correspondiente coeficiente de absorción acústica.
- El coeficiente de absorción fue añadido en la carpeta de materiales que se encuentra en la pestaña *Database*. Cada material fue añadido en esta carpeta, y se colocó su respectivo coeficiente de fono absorción en bandas de octava.
- Se colocaron las fuentes de sonido en sus ubicaciones correspondientes, además de especificar la potencia sonora de cada una, con la ayuda de la pestaña *Sound Sources* como se puede observar en la figura 2.4.
- Además, se debe colocar el área de escucha en el apartado de *Surface receivers*, donde se seleccionó en este caso el área del piso que es donde estará el público.



- Después de configurar el espacio, se ejecutó la simulación para calcular los parámetros acústicos.
- Por último, se verificó el tiempo de reverberación en cada frecuencia y se comparó con los resultados obtenidos en las mediciones preliminares.

#### Figura 2.4

*Captura de pantalla del programa I-SIMPA sobre la colocación de fuentes de sonido*



#### 2.5 Parámetros de diseño

Los parámetros para el diseño del acondicionamiento del auditorio de la FIMCP están dados por los requerimientos del cliente en base a las mediciones y análisis previo del auditorio.

- Tiempo de reverberación menor o igual a 1.5 segundos para el rango de frecuencias audible de 20 a 20000 Hz
- Reducción de ecos generados debido a paralelismos en la arquitectura del auditorio.
- Rediseño del sistema de aire acondicionado del auditorio (Disminución de ruido de fondo)
- Utilización de materiales de tratamiento acústico disponibles en el mercado nacional.

## **2.6 Alternativas de diseño para reducción de tiempo de reverberación**

Para este proyecto de diseño, al existir una amplia gama de posibles combinaciones de materiales de tratamiento acústico y de posiciones en el espacio a tratar, se han generalizado 3 alternativas de diseño que consideran el uso de materiales diferentes y cambio de estructura.

### **2.6.1 Alternativa 1: Utilización de materiales absorbentes**

Mejorar la acústica mediante materiales absorbentes implica instalar estratégicamente materiales diseñados para absorber el sonido en superficies problemáticas como paredes, techos y suelos. Estos materiales incluyen paneles acústicos, espumas absorbentes, cortinas pesadas y alfombras. Su colocación reduce la energía acústica reflejada, disminuyendo la reverberación y mejorando la calidad del sonido en el entorno. Esto resulta en mayor claridad, menor distorsión y mejor inteligibilidad del sonido, además de controlar los tiempos de reverberación, minimizar ecos y mejorar la calidad acústica general del entorno.

#### **Fortalezas:**

- Efectividad: Los materiales absorbentes acústicos son altamente efectivos para reducir la reverberación y mejorar la calidad del sonido en un auditorio.
- Flexibilidad: Existen una amplia gama de opciones de materiales absorbentes en función de costos o calidad, lo que permite adaptarse a las necesidades específicas del auditorio.
- Estética: Existe una diversidad de diseños de materiales absorbentes que pueden adaptarse o mejorar la estética actual del auditorio.

#### **Debilidades:**

- Costo: Algunos materiales absorbentes acústicos de alta calidad pueden tener un costo elevado.

- **Mantenimiento:** Algunos materiales pueden requerir un mantenimiento periódico para asegurar su rendimiento a lo largo del tiempo.

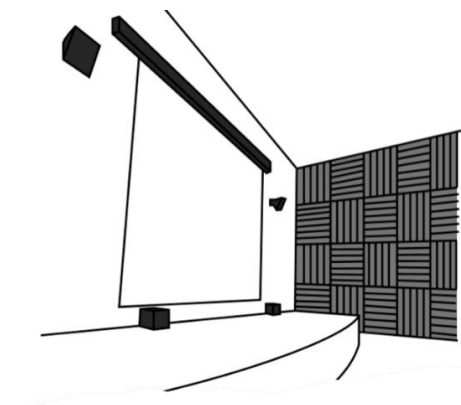
### **Aspectos para considerar.**

- **Salud Pública:** La incorporación de materiales absorbentes acústicos puede mejorar la experiencia de los usuarios del auditorio al reducir el ruido excesivo y la fatiga auditiva.
- **Seguridad y Bienestar:** Al mejorar la calidad del sonido, se crea un ambiente confortable para los asistentes a los eventos en el auditorio. Además, la incorporación de estos materiales no representa ningún riesgo para el público en general, ya que no interactúan directamente con ellos.
- **Aspectos Culturales y Sociales:** Mejora la experiencia de los espectadores, permitiéndoles disfrutar plenamente de eventos como conferencias o presentaciones.
- **Aspectos Ambientales:** Actualmente existen paneles acústicos elaborados con material reciclable, además de que el material desechado puede ser reciclado.
- **Aspectos Económicos:** El costo inicial de los materiales absorbentes puede ser una consideración, pero una mejor calidad acústica puede aumentar el valor percibido del auditorio y atraer a más eventos y espectadores.

### **Diseño de forma**

#### **Figura 2.5**

*Diseño de forma con materiales absorbentes*



### **2.6.2 Alternativa 2: Utilización de materiales difusores**

El uso de materiales difusores implica instalar elementos diseñados para dispersar el sonido de manera uniforme en el espacio, rompiendo las ondas sonoras reflejadas y difundiéndolas en múltiples direcciones. Esto ayuda a controlar la distribución del sonido, reducir la acumulación de energía acústica en áreas específicas y mejorar la calidad del sonido al eliminar puntos de enfoque y reducir la coloración sonora. La instalación estratégica de estos materiales en paredes, techos o columnas logra una experiencia auditiva más envolvente y una mejor inteligibilidad en el entorno.

#### **Fortalezas:**

- Distribución espacial: Los difusores acústicos ayudan a dispersar el sonido de manera uniforme, mejorando la experiencia auditiva en todo el auditorio.
- Flexibilidad: Existen diversos tipos de difusores acústicos disponibles, lo que permite adaptarse a diferentes necesidades y diseños de auditorios.

#### **Debilidades:**

- Requiere diseño personalizado: La selección y ubicación estratégica de los difusores acústicos requiere un análisis detallado y una planificación cuidadosa.
- Limitaciones en la absorción: Los difusores acústicos no ofrecen una absorción significativa del sonido, por lo que pueden no ser suficientes para reducir el tiempo de reverberación por sí solos.

#### **Aspectos para considerar.**

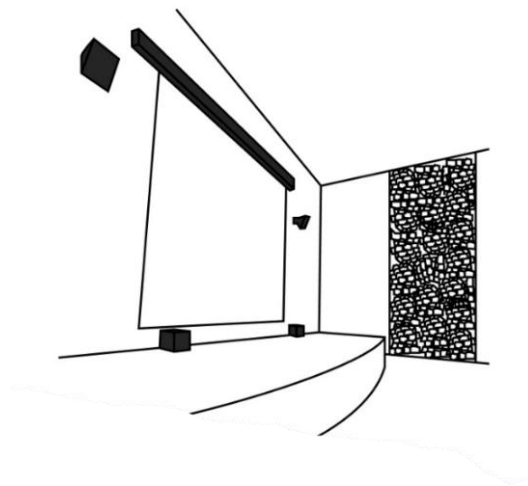
- Salud Pública: Los difusores acústicos pueden contribuir a una mejor calidad del sonido y reducir la fatiga auditiva, promoviendo la salud auditiva en los usuarios del auditorio.

- Seguridad y Bienestar: Mejora la experiencia de los asistentes al proporcionar una distribución más uniforme del sonido y evitar la acumulación de sonido directo. Además, la incorporación de estos accesorios no representa ningún riesgo para el público en general, ya que no interactúan directamente con ellos.
- Aspectos Culturales y Sociales: Mejora la calidad de la experiencia en eventos y promueve la apreciación del mensaje que se esté exponiendo.
- Aspectos Ambientales: No tiene un impacto significativo en los aspectos ambientales, ya que no afecta directamente al entorno externo.
- Aspectos Económicos: Puede tener un costo inicial moderado, pero puede aumentar el valor percibido del auditorio y atraer a más eventos y espectadores.

### **Diseño de forma**

#### **Figura 2.6**

*Diseño de forma con materiales difusores*



### **2.6.3 Alternativa 3: Rediseño estructural**

Uno de los principales problemas de la acústica del auditorio es el paralelismo que existe en las paredes laterales, esto no permite que el sonido se disperse a otras direcciones en caso de rebotes perpendiculares a las paredes. Cambiar la geometría de este espacio implica realizar modificaciones estructurales con el objetivo de controlar la propagación del sonido y mejorar sus características acústicas. Esto conlleva a alterar la forma, tamaño, orientación y disposición de las superficies del espacio para influir en la reflexión, difusión y absorción del sonido.

#### **Fortalezas:**

- Diseño personalizado: Permite adaptar la geometría del auditorio para lograr una acústica óptima y reducir la reverberación de manera integral.
- Potencial para mejoras significativas: Al realizar cambios en la geometría, se pueden lograr mejoras notables en la calidad del sonido y en el tiempo de reverberación.

#### **Debilidades:**

- Costo y complejidad: Los cambios en la geometría del auditorio pueden requerir modificaciones estructurales significativas y tener un costo elevado.
- Restricciones espaciales: En algunos casos, la disponibilidad de espacio puede limitar la viabilidad de cambios en la geometría del auditorio.

#### **Aspectos para considerar**

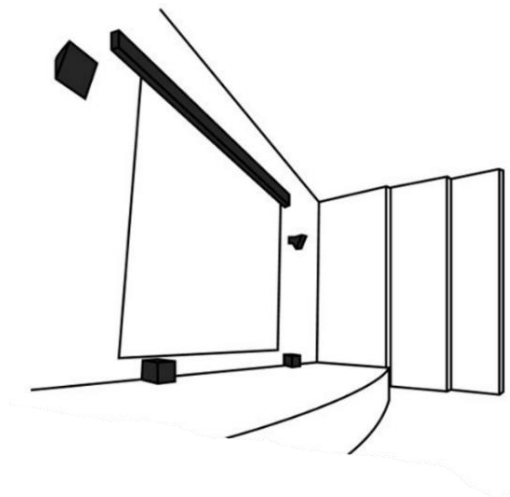
- Salud Pública: El cambio en la geometría puede mejorar la calidad del sonido y reducir la fatiga auditiva de los usuarios del auditorio.

- Seguridad y Bienestar: Mejora la experiencia de los asistentes al proporcionar una acústica más adecuada y un ambiente más agradable. Además que la reestructuración no presentaría riesgo para los asistentes.
- Aspectos Culturales y Sociales: Permite la creación de espacios adecuados para la apreciación de eventos culturales y musicales.
- Aspectos Ambientales: Mejorar la acústica del auditorio puede contribuir a reducir el ruido en el entorno cercano. Por otra parte los desechos de construcción tienen un impacto negativo en el medio ambiente si estos no son tratados para su correcto reciclaje.
- Aspectos Económicos: El cambio de geometría puede tener un costo significativo, pero puede aumentar el valor y la versatilidad del auditorio a largo plazo.

### **Diseño de forma**

#### **Figura 2.7**

*Diseño de forma rediseñando la geometría*



## 2.7 Matriz de decisión

Se utilizó el Método de Comparación de Pares para comparar y evaluar la importancia relativa entre los factores de influencia seleccionados.

**Tabla 2.3**

*Factores de influencia y su descripción*

| <b>Factor de influencia</b>  | <b>Descripción</b>   |
|------------------------------|--|
| <b>Efectividad</b>           | Medida de la capacidad de la solución para lograr una reducción significativa del tiempo de reverberación y minimizar los ecos no deseados en el auditorio.  |
| <b>Costo</b>                 | Evaluación de los gastos totales, incluyendo adquisición e instalación, asociados a cada alternativa de solución. Se busca una opción que presente un menor costo en comparación con las demás alternativas. |
| <b>Estética</b>              | Consideración del aspecto visual y la capacidad de mantener un ambiente agradable y estéticamente adecuado para los espectadores del auditorio.  |
| <b>Impacto en el espacio</b> | Se busca una alternativa que tenga un menor impacto en términos de ocupación o alteración del espacio disponible.  |
| <b>Instalación</b>           | Se busca una solución que sea fácil de instalar y que requiera el menor número de recursos posibles.   |
| <b>Mantenimiento</b>         | La alternativa debe ser de fácil mantenimiento y de fácil adquisición y reemplazo de componentes.  |
| <b>Vida útil</b>             | Se busca una opción que presente una vida útil prolongada, lo que implica una menor necesidad de reemplazo a corto plazo.  |



**Tabla 2.4**  
*Escala de importancia*

| Valor   | 1               | 2               | 3                   | 4          | 5              |
|---------|-----------------|-----------------|---------------------|------------|----------------|
| Detalle | Nada importante | Poco importante | Igual de importante | Importante | Muy importante |

**Tabla 2.5**  
*Comparación por pares de factores de influencia*

|                                 | A. Efectividad | B. Costo | C. Estética | D. Impacto en el espacio | E. Instalación | F. Mantenimiento | G. Vida útil |
|---------------------------------|----------------|----------|-------------|--------------------------|----------------|------------------|--------------|
| <b>A. Efectividad</b>           |                | B/3      | A/3         | A/3                      | A/2            | A/3              | A/2          |
| <b>B. Costo</b>                 |                |          | B/1         | B/1                      | B/1            | F/2              | G/3          |
| <b>C. Estética</b>              |                |          |             | C/2                      | C/2            | C/2              | G/2          |
| <b>D. Impacto en el espacio</b> |                |          |             |                          | D/1            | D/2              | D/2          |
| <b>E. Instalación</b>           |                |          |             |                          |                | E/1              | E/2          |
| <b>F. Mantenimiento</b>         |                |          |             |                          |                |                  | G/2          |
| <b>G. Vida útil</b>             |                |          |             |                          |                |                  |              |

**Tabla 2.6**  
*Ponderación de factores de influencia*

|                                 | Puntuación | Porcentaje |
|---------------------------------|------------|------------|
| <b>A. Efectividad</b>           | 13         | 30,95%     |
| <b>B. Costo</b>                 | 6          | 14,29%     |
| <b>C. Estética</b>              | 6          | 14,29%     |
| <b>D. Impacto en el espacio</b> | 5          | 11,90%     |
| <b>E. Instalación</b>           | 3          | 7,14%      |
| <b>F. Mantenimiento</b>         | 2          | 4,76%      |
| <b>G. Vida útil</b>             | 7          | 16,67%     |
| <b>Total</b>                    | 42         | 100%       |

**Tabla 2.7**  
*Matriz de decisión de las alternativas de diseño*

|                                       | Colocación de materiales absorbentes |           | Colocación de materiales difusores |           | Rediseño estructural |           |
|---------------------------------------|--------------------------------------|-----------|------------------------------------|-----------|----------------------|-----------|
|                                       | Escala                               | Resultado | Escala                             | Resultado | Escala               | Resultado |
| <b>Efectividad (30,95%)</b>           | 4                                    | 1,24      | 3                                  | 0,93      | 3                    | 0,93      |
| <b>Costo (14,29%)</b>                 | 4                                    | 0,57      | 3                                  | 0,43      | 1                    | 0,14      |
| <b>Estética (14,29%)</b>              | 3                                    | 0,43      | 2                                  | 0,29      | 4                    | 0,57      |
| <b>Impacto en el espacio (11,90%)</b> | 3                                    | 0,36      | 4                                  | 0,48      | 2                    | 0,24      |
| <b>Instalación (7,14%)</b>            | 3                                    | 0,21      | 4                                  | 0,29      | 1                    | 0,07      |
| <b>Mantenimiento (4,76%)</b>          | 3                                    | 0,14      | 3                                  | 0,14      | 4                    | 0,19      |
| <b>Vida útil (16,67%)</b>             | 4                                    | 0,67      | 4                                  | 0,67      | 5                    | 0,83      |
| <b>Total</b>                          |                                      | 3,62      |                                    | 3,21      |                      | 2,98      |

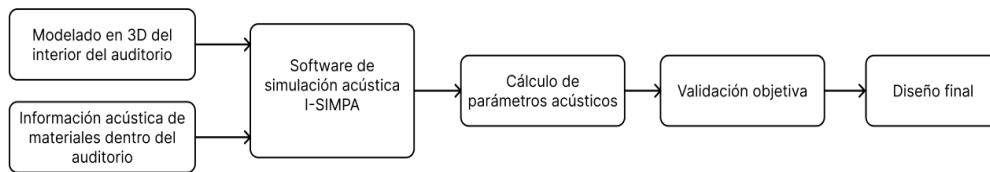
## 2.8 Implementación de la alternativa elegida: Utilización de materiales absorbentes

Para llevar a cabo una distribución adecuada de los materiales absorbentes en el auditorio, se realizó un análisis utilizando los datos obtenidos mediante la simulación del entorno sin tratamiento acústico. El propósito de este análisis fue identificar las zonas del auditorio con tiempos de reverberación más prolongados, lo cual indica una mayor reflexión del sonido.:

El procedimiento por seguir para la implementación de la alternativa propuesta se encuentra representado en el siguiente diagrama de proceso.

**Figura 2.8**

*Diagrama de proceso de la alternativa seleccionada*



### 2.8.1 Criterio de selección de materiales

Considerando la adquisición de materiales a nivel local, teniendo a disposición sólo trampas de bajos, lana de roca, lana de vidrio, madera MDF, contrachapado, gypsum, entre otras opciones limitadas para acondicionamiento acústico en Ecuador, se optó por el diseño de un resonador acústico que es capaz de utilizar 2 materiales acústicos en combinación para ofrecer una mejor absorción de sonido para frecuencias específicas. Además, para una mejor absorción en frecuencias diferentes a las afectadas por el resonador de membrana, se optó por distribuir otros materiales absorbentes como lana de vidrio y gypsum en paredes y techo.

### 2.8.2 Diseño de resonador acústico

En la creación de un resonador de membrana, se parte de la idea de que debe estar hecho de un material flexible y sin poros, como la madera. Este material se coloca a cierta distancia de una superficie rígida, con el propósito de crear un espacio de aire cerrado entre las dos superficies.

Para lograr el diseño efectivo de este resonador y que cumpla con la función de absorber la energía sonora se utiliza la siguiente ecuación:

$$f_0 = \frac{600}{\sqrt{Md}} \text{ (Hz)} \quad (2.4)$$

Donde:

M: masa por unidad de superficie del panel (en  $\text{Kg/m}^2$ )

d: distancia del panel a la pared rígida (en cm)

Esta ecuación proporcionó un valor inicial para determinar la distancia entre la membrana y la pared después de haber seleccionado la masa por unidad de área y la frecuencia de operación. Además de diseñar este resonador, se optó por añadir lana de vidrio con el fin de mejorar su capacidad de absorción.

### **2.8.3 Distribución geométrica**

La distribución de paneles se pensó para abarcar la mayor cantidad de superficie de las paredes posible con la finalidad de disponer de una distribución de absorción uniforme en todo el entorno del auditorio. Se consideró además la parte estética con distribución en columnas y con desfases verticales dando continuidad al nivel de suelo variable que tiene el auditorio.

Una vez establecida la superficie a ocupar por los paneles absorbentes, se estimó la inclinación de estos para la ruptura del paralelismo que existe en el auditorio, distribución que contribuye a la generación de ecos no deseados que afectan la calidad acústica.

Para el techo de gypsum, se decidió establecer una ruptura de paralelismos verticales con inclinaciones de largas planchas de gypsum que aportan a una mejor distribución del sonido hacia los espectadores.

#### **2.8.4 Simulación de solución utilizando el programa I-SIMPA**

- Se llevó a cabo la elección de los paneles apropiados con el propósito de reducir el exceso de tiempo de reverberación en las frecuencias que mostraban reflexiones excesivas o desafíos de resonancia. En este proyecto particular, se optó por utilizar paneles de lana de vidrio en tonalidad negra, así como también paneles resonadores. Estos paneles se consideran ideales para abordar el tratamiento de frecuencias altas, medias y bajas.
- Se efectuó un estudio de la superficie disponible en el auditorio donde serían dispuestos los diversos paneles acústicos. En este análisis, se determinó la cantidad de área que requería ser cubierta con material absorbente, utilizando la ecuación de Sabine para calcular la superficie necesaria para la absorción acústica.
- Se llevó a cabo una modificación en el modelo tridimensional del auditorio, incorporando los diversos paneles acústicos seleccionados a lo largo de las paredes. La mayoría de estos paneles pertenecía a la categoría de resonadores, ya que estaban específicamente diseñados para abordar las frecuencias bajas.
- Una vez completado el diseño tridimensional, se procedió a exportarlo en formato .3Ds para su posterior importación en I-SIMPA. Esta plataforma sería utilizada para llevar a cabo la simulación correspondiente.
- Después de importar el modelo, se efectuó la creación de la malla correspondiente, en la que se agruparon las diversas superficies a analizar junto con sus respectivos coeficientes de absorción acústica. Estos coeficientes tuvieron que ser ingresados manualmente en el programa.
- Para concluir, se validó mediante simulaciones en el programa I-SIMPA que las acciones emprendidas se alineaban con el propósito de mejorar la acústica de la sala.

## **Capítulo 3**

### 3. Resultados y análisis

#### 3.1 Estado actual del auditorio

En esta sección se presentan las mediciones experimentales y el análisis para el estado actual del auditorio, es decir, sin ningún tratamiento acústico para poder determinar las principales falencias y diseñar el acondicionamiento acústico.

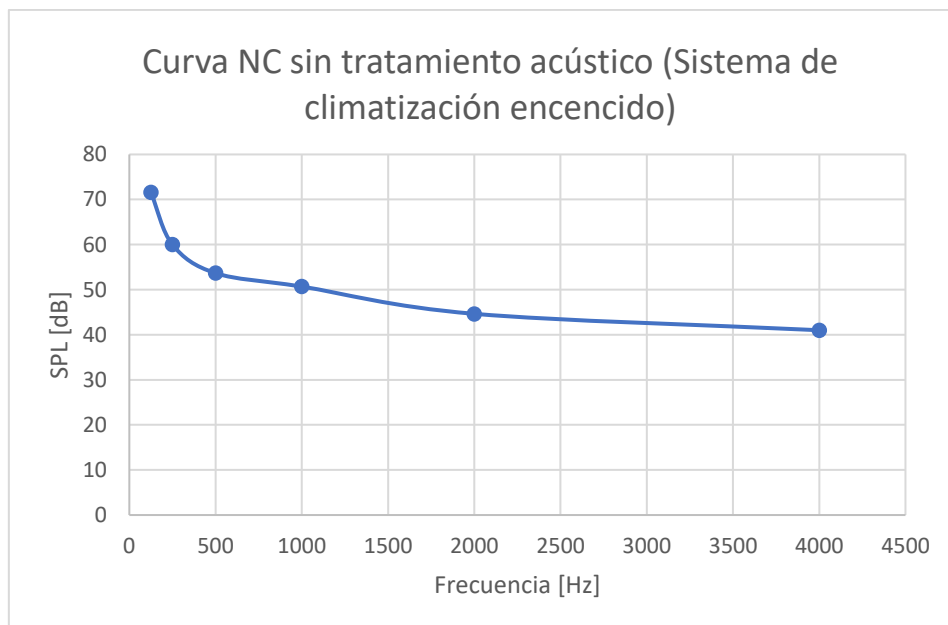
##### 3.1.1 Insonorización

###### 3.1.1.1 Mediciones de ruido de fondo experimentales

Las mediciones del ruido de fondo se realizaron tanto con el sistema de climatización encendido como apagado, esto dio como resultado las curvas de ruido que se pueden observar en las gráficas 3.1 y 3.2.

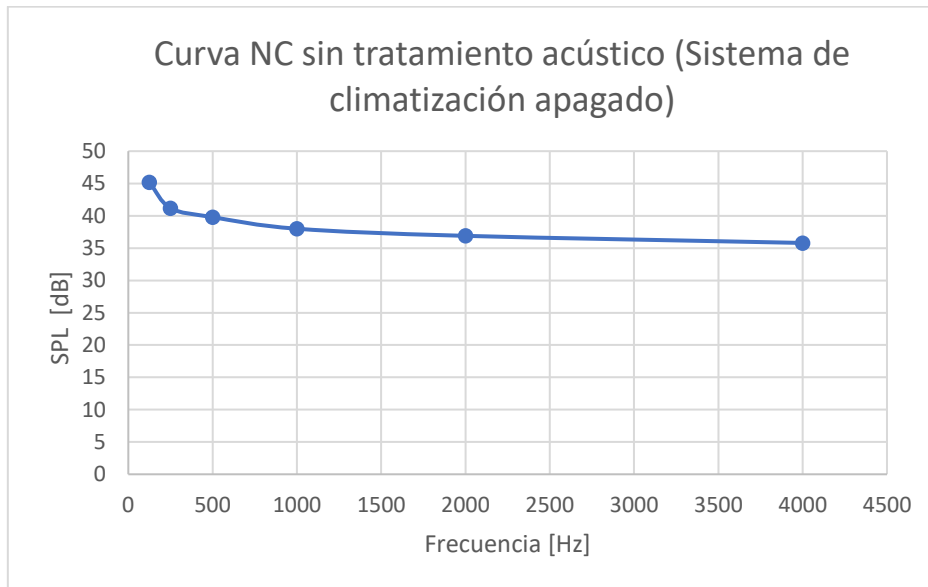
#### Gráfica 3.1

*Curva NC del auditorio sin tratamiento acústico (Con sistema de climatización encendido)*



### Gráfica 3.2

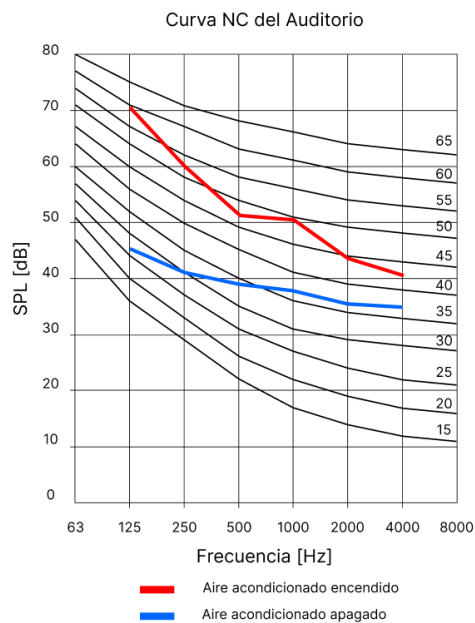
Curva NC del auditorio sin tratamiento acústico (Con sistema de climatización apagado)



En la gráfica 3.3 se observa la comparación con el resto de las curvas NC para ambas mediciones:

### Gráfica 3.3

Comparativa de las curvas medidas en el auditorio y las curvas NC estandarizadas





La curva de ruido de fondo del auditorio con el sistema de climatización encendido podría asemejarse a una curva NC estandarizada NC-60, excediendo las curvas esperadas como N-20 o NC-30 para este tipo de espacios como lo indica el Anexo A3.

El problema principal radica en el ruido generado por el sistema de aire acondicionado, el cual se escucha con bastante facilidad para ser un espacio que requiere niveles de ruido bastante bajos, por esta razón se planteó rediseñar el sistema de ductos con perfiles que permitan una disminución de ruido, además de recubrimiento interior para una mayor atenuación.

### **3.1.1.2 Otras deficiencias en insonorización**

Otras observaciones realizadas respecto a la insonorización del auditorio de la FIMCP que pudieran afectar el ruido de fondo existente son:

- Entrada principal del auditorio con diseño acústico incorrecto, permitiendo la entrada directa de ruido exterior a las 2 puertas laterales principales.
- Salida de emergencia con conexión muy directa al exterior, puerta de metal sin tratamiento acústico, el ruido exterior ingresa por esta zona con mayor facilidad.
- Paredes paralelas que ocasionan rebotes continuos de sonido, generando un efecto de eco bastante notorio, por lo que el ruido de fondo también tarda en disiparse.

### 3.1.2 Adecuación Acústica

#### 3.1.2.1 Tiempo de reverberación experimental del auditorio sin acondicionamiento acústico.

Siguiendo el proceso detallado en el capítulo 2, se registraron los valores de tiempo de reverberación mediante las mediciones realizadas en el auditorio de manera experimental. En la tabla 3.1 se presentan los valores registrados en función de cada banda de frecuencia.

**Tabla 3.1**  
*Tiempo de reverberación medido*

| <b>Frecuencia<br/>[Hz]</b> | <b>RT60<br/>[s]</b> |
|----------------------------|---------------------|
| 125                        | 2,47                |
| 250                        | 2,27                |
| 500                        | 2,28                |
| 1000                       | 2,15                |
| 2000                       | 1,96                |
| 4000                       | 1,8                 |

#### 3.1.2.2 Tiempo de reverberación teórico del auditorio sin acondicionamiento acústico.

En la Tabla 3.2 se exponen los coeficientes de absorción sonora correspondientes a cada superficie presente en el recinto auditorio, acompañados de la respectiva área que cada una abarca. Estos datos se emplearon en el cálculo del área de absorción sonora, el cual se utilizará para la determinación del tiempo de reverberación del auditorio en su estado original.

**Tabla 3.2***Áreas superficiales junto con su coeficiente de adsorción en bandas de octava*

| Superficies               | Áreas<br>[m <sup>2</sup> ] | Coeficiente de fono absorción |        |        |         |         |         |
|---------------------------|----------------------------|-------------------------------|--------|--------|---------|---------|---------|
|                           |                            | 125 Hz                        | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |
| <b>Techo escayola</b>     | 188,3                      | 0,20                          | 0,15   | 0,10   | 0,05    | 0,05    | 0,05    |
| <b>Paredes enlucidas</b>  | 539,15                     | 0,01                          | 0,01   | 0,02   | 0,03    | 0,04    | 0,05    |
| <b>Piso de alfombra</b>   | 191                        | 0,03                          | 0,05   | 0,09   | 0,23    | 0,38    | 0,54    |
| <b>Escenario (madera)</b> | 63,39                      | 0,09                          | 0,11   | 0,10   | 0,10    | 0,08    | 0,08    |
| <b>Butacas</b>            | 219,16                     | 0,3                           | 0,32   | 0,3    | 0,27    | 0,15    | 0,15    |

En la tabla 3.3 se observa el área de fono absorción calculada a partir de los datos de área superficial y coeficiente de absorción acústica.

**Tabla 3.3***Área de fono absorción de todas las superficies por bandas de octavas*

|  | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |
|--|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| <b>Área de absorción [m<sup>2</sup>]</b> | 109,03 | 110,33 | 116,08 | 109,85  | 128,05  | 159,48  |

Con los datos obtenidos, se efectúa el cálculo de RT60 utilizando la ecuación de Sabine para tiempo de reverberación (Ecuación 1.11) como se ilustra en el siguiente ejemplo:

$$T_{60}(125 \text{ Hz}) = 0.161 \frac{V}{\sum_i \alpha_i A_i}$$

$$T_{60}(125 \text{ Hz}) = 0.161 \frac{1648}{109.3}$$

$$T_{60}(125 \text{ Hz}) = 2.21 \text{ s}$$

En la Tabla 3.4 se presentan los valores del tiempo de reverberación teórico para el resto de las frecuencias en bandas de octava.

**Tabla 3.4**

*Tiempo de reverberación teórico*

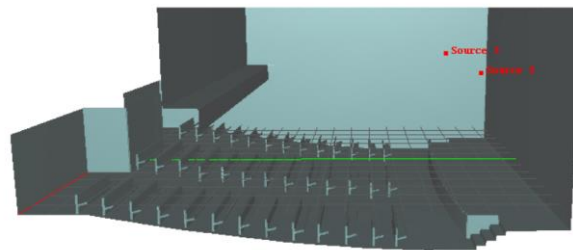
| Frecuencia<br>[Hz] | RT60<br>Teórico<br>[s] |
|--------------------|------------------------|
| 125                | 2,21                   |
| 250                | 2,21                   |
| 500                | 2,23                   |
| 1000               | 1,97                   |
| 2000               | 1,88                   |
| 4000               | 1,50                   |

### 3.1.3 Tiempo de reverberación por simulación del auditorio sin acondicionamiento acústico.

Siguiendo la metodología expuesta en el capítulo 2, se realizaron las simulaciones acústicas con el programa I-SIMPA.

**Figura 3.1**

*Captura de pantalla de simulación de tiempo de reverberación en el programa I-SIMPA*



En la Tabla 3.5 se muestran los valores de tiempo de reverberación mediante la simulación, en la cual se sigue el mismo comportamiento de valores altos en frecuencias bajas.

**Tabla 3.5**

*Tiempo de reverberación obtenido mediante simulación*

| <b>Frecuencia<br/>[Hz]</b> | <b>RT60<br/>[s]</b> |
|----------------------------|---------------------|
| 125                        | 2,44                |
| 250                        | 2,37                |
| 500                        | 2,23                |
| 1000                       | 1,88                |
| 2000                       | 1,73                |
| 4000                       | 1,22                |

### 3.1.4 Comparación de resultados del tiempo de reverberación

En la tabla 3.6 y la gráfica 3.4 se presenta la comparativa de los 3 métodos de obtención de RT60 para una mejor comprensión de los resultados.

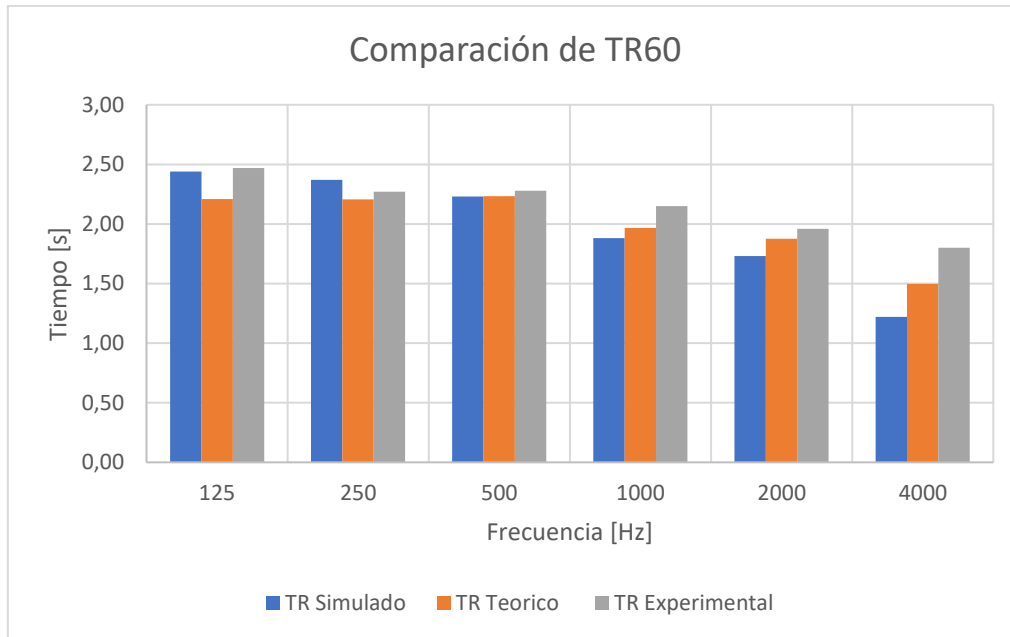
**Tabla 3.6**

*Comparación de RT60 obtenido por diferentes métodos*

| <b>Frecuencia<br/>[Hz]</b> | <b>TR60<br/>Simulado<br/>[s]</b> | <b>TR60<br/>Teórico<br/>[s]</b> | <b>TR60<br/>Experimental<br/>[s]</b> |
|----------------------------|----------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| 125                        | 2,44                             | 2,21                            | 2,47                                 |
| 250                        | 2,37                             | 2,21                            | 2,27                                 |
| 500                        | 2,23                             | 2,23                            | 2,28                                 |
| 1000                       | 1,88                             | 1,97                            | 2,15                                 |
| 2000                       | 1,73                             | 1,88                            | 1,96                                 |
| 4000                       | 1,22                             | 1,50                            | 1,8                                  |

### Gráfica 3.4

Comparación de tiempo de reverberación simulado, teórico y experimental



## 3.2 Rediseño del sistema de aire acondicionado

### 3.2.1 Caudal teórico requerido

Considerando 6 renovaciones por hora para el sistema de aire acondicionado que se divide en 2 sistemas de distribución simétrica y el volumen de aire establecido con anterioridad:

$$Q = \frac{V \cdot n}{2}$$

$$Q = 1642,60 [m^3] \cdot \frac{6}{2} \left[ \frac{rev}{h} \right] * \left[ \frac{1 h}{3600 s} \right]$$

$$Q = 1,368 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

El caudal para cada lado del auditorio es de 1,368 metros cúbicos por segundo.

### 3.2.2 Perfiles y tramos de ductos

#### Cálculo de referencia para ductos de suministro:

Se espera una velocidad de salida de aire de alrededor de 1,8 m/s según la tabla 2.1 acorde al criterio NC. Conservando la misma cantidad de salidas que existen actualmente en el auditorio por lado (5 difusores), se calcula el área de la sección del ducto utilizando la ecuación 2.2.

$$Q = S \cdot v$$

$$S = \frac{Q}{v}$$

$$S = \frac{1,368 \left[ \frac{m^3}{s} \right]}{5 \cdot 1,8 \left[ \frac{m}{s} \right]}$$

$$S = 0,152 [m^2]$$

Ahora, para obtener el diámetro nominal, se utiliza la fórmula de área de un círculo, despejando el diámetro y tomando el área obtenida previamente de 0,152 m<sup>2</sup>:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,152 \text{ m}^2}{\pi}}$$

$$D = 0,439 \text{ m} = 439 \text{ mm}$$

Utilizando la ecuación 2.3 de Huebscher, se selecciona el perfil más adecuado para el conducto, resultando en:

$$a = 800 \text{ mm}$$

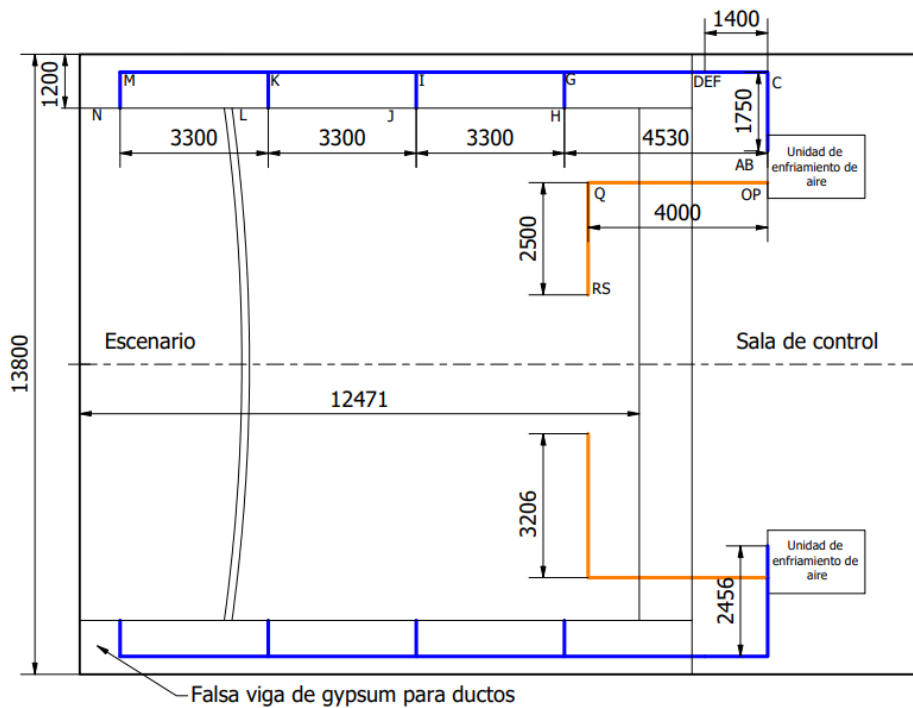
$$b = 250 \text{ mm}$$

$$D_{nom} = 470 \text{ mm}$$

En las figuras 3.2, 3.3 y 3.4 se muestra el rediseño del sistema de ductos en las vistas superior, lateral y frontal del auditorio con las longitudes de los tramos en los que se dividen los ductos destinados desde la fuente hasta las rejillas de impulsión o de retorno.

### Figura 3.2

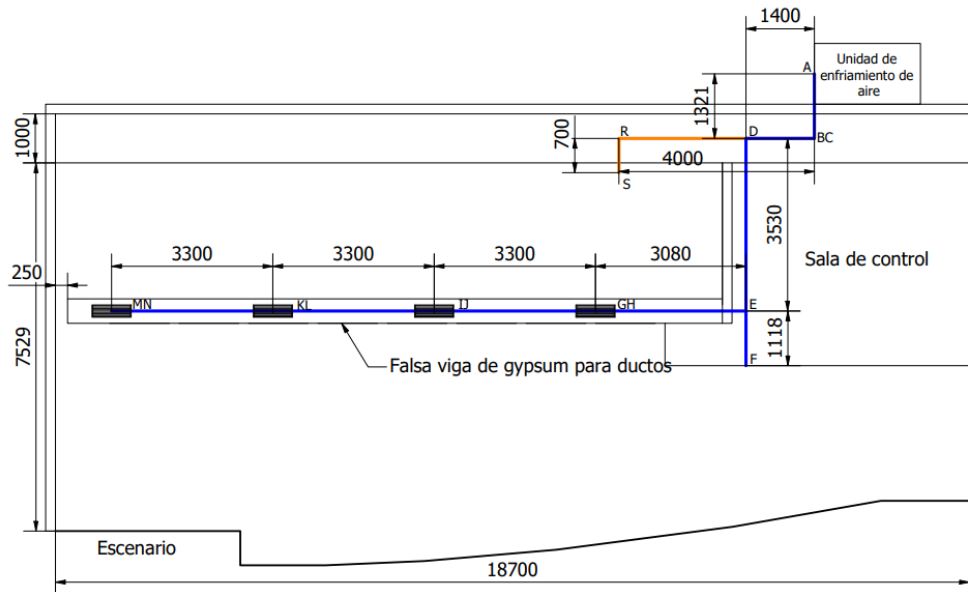
Esquema de vista superior del auditorio del sistema de ductos de impulsión (color azul) y de retorno (color naranja)





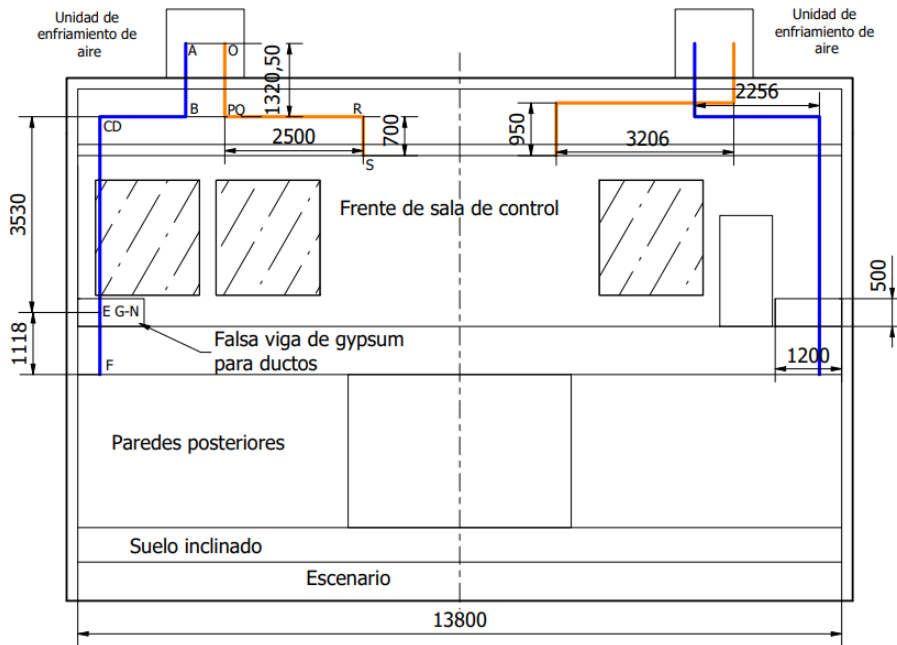
**Figura 3.3**

*Esquema de vista lateral en corte del auditorio del sistema de ductos*



**Figura 3.4**

*Esquema de vista frontal del auditorio del sistema de ductos*



Con los tramos elegidos, se obtienen los caudales respectivos para su posterior cálculo de sección, tomando en cuenta las velocidades recomendadas para espacios silenciosos mencionadas en el capítulo 2. A continuación se muestra una tabla con los perfiles seleccionados para los diferentes tramos con sus respectivos caudales calculados.

**Tabla 3.7**

*Perfiles seleccionados en base a los caudales de cada tramo del sistema de ductos de impulsión*

| <b>Impulsión</b>               | <b>Velocidad<br/>[m/s]</b> | <b>Caudal<br/>[m<sup>3</sup>/s]</b> | <b>Sección<br/>[m<sup>2</sup>]</b> | <b>Diámetro<br/>equivalente<br/>[mm]</b> | <b>Perfil<br/>Seleccionado<br/>[mm x mm]</b> |
|--------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|--|--|
| <b>Ductos principales</b>      | 8,6                        | 1,368                               | 0,159                              | 450                                      | 900 x 250                                    |
|                                |                            | 1,094                               | 0,159                              | 449                                      | 800 x 250                                    |
| <b>Ductos ramales</b>          | 6,9                        | 0,821                               | 0,119                              | 389                                      | 700 x 250                                    |
|                                |                            | 0,547                               | 0,079                              | 318                                      | 500 x 250                                    |
|                                |                            | 0,273                               | 0,040                              | 224                                      | 250 x 250                                    |
|                                |                            | 0,273                               | 0,040                              | 224                                      | 250 x 250                                    |
| <b>De derivación</b>           | 4,3                        | 0,273                               | 0,063                              | 284                                      | 500 x 250                                    |
| <b>Difusores de suministro</b> | 1,8                        | 0,273                               | 0,152                              | 439                                      | 800 x 250                                    |

**Tabla 3.8**

*Perfiles seleccionados en base a los caudales de cada tramo del sistema de ductos de retorno*

| <b>Retorno</b>      | <b>Velocidad<br/>[m/s]</b> | <b>Caudal<br/>[m<sup>3</sup>/s]</b> | <b>Sección<br/>[m<sup>2</sup>]</b> | <b>Diámetro<br/>equivalente<br/>[mm]</b> | <b>Perfil<br/>Seleccionado<br/>[mm x mm]</b> |
|---------------------|----------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|--|--|
| Ductos principales  | 8,6                        | 1,368                               | 0,159                              | 450                                      | 600 x 300                                    |
| Ductos ramales      | 6,9                        | 1,368                               | 0,198                              | 502                                      | 300 x 750                                    |
| Rejillas de retorno | 2,2                        | 1,368                               | 0,622                              | 890                                      | 900 x 750                                    |

### 3.2.3 Nivel de potencia sonora del sistema de climatización

Las tablas 3.9 y 3.10 presentan las pérdidas totales por fricción de todos los tramos tanto de impulsión como de retorno para el sistema de climatización.

**Tabla 3.9***Pérdidas de presión estática por longitud de ductos de impulsión*

| Impulsión                    | Velocidad [m/s] | Caudal [m <sup>3</sup> /s] | Diámetro equivalente [mm] | Tramos                          | Longitud [m] | Longitud Equivalente [m] | Pérdidas por fricción [Pa/m] | Pérdidas totales [Pa] |
|------------------------------|-----------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------------|--------------|--------------------------|------------------------------|-----------------------|
| <b>Ductos principales</b>    | 8,6             | 1,368                      | 450                       | ABCDE                           | 8,00         | 12,00                    | 1,5                          | 18,00                 |
| <b>Ductos ramales</b>        | 6,9             | 1,094                      | 449                       | EG                              | 4,20         | 6,30                     | 1                            | 6,30                  |
|                              |                 | 0,821                      | 389                       | GI                              | 3,08         | 4,62                     | 1,5                          | 6,93                  |
|                              |                 | 0,547                      | 318                       | IK                              | 3,08         | 4,62                     | 1,7                          | 7,85                  |
|                              |                 | 0,273                      | 224                       | KM                              | 3,08         | 4,62                     | 2,5                          | 11,55                 |
| <b>De derivación</b>         | 4,3             | 0,273                      | 284                       | GH – IJ<br>– KL –<br>MN –<br>EF | 4            | 6                        | 0,8                          | 4,8                   |
| <b>Rejillas de impulsión</b> | 1,8             | 0,273                      | 439                       | -                               | -            | -                        | 8 x 5                        | 40                    |
| <b>Total</b>                 |                 |                            |                           |                                 |              |                          |                              | 95,43                 |

**Tabla 3.10***Pérdidas de presión estática por longitud de ductos de retorno*

| Retorno                    | Velocidad [m/s] | Caudal [m <sup>3</sup> /s] | Diámetro equivalente [mm] | Tramos | Longitud | Longitud Equivalente | Pérdidas por fricción [Pa/m] | Pérdidas totales [Pa] |
|----------------------------|-----------------|----------------------------|---------------------------|--------|----------|----------------------|------------------------------|-----------------------|
| <b>Ductos principales</b>  | 8,6             | 1,368                      | 450                       | OPQ    | 5,32     | 7,98                 | 1,5                          | 7,47                  |
| <b>Ductos ramales</b>      | 6,9             | 1,368                      | 502                       | QRS    | 3,2      | 4,8                  | 0,8                          | 3,6                   |
| <b>Rejillas de retorno</b> | 2,2             | 1,368                      | 890                       | -      | -        | -                    | 17 x 1                       | 17                    |
| <b>Total</b>               |                 |                            |                           |        |          |                      |                              | 32,81                 |

Sumando las pérdidas de los ductos de difusión y retorno, se obtiene un valor de 128,24 Pa, valor que será usado en la Ecuación 1.4 para el cálculo de nivel de potencia sonora del ventilador. También se utilizará el caudal calculado anteriormente de 1,368 m<sup>3</sup>/s.

$$L_w = 10\text{Log}(1,368) + 20\text{Log}(128,24) + 40$$

$$L_w = 83,52 \text{ dB}$$

Este valor se puede comparar con el ofrecido por la unidad de aire acondicionado tipo paquete utilizada en el auditorio (LG LK-C120BC00, véase información en Anexos A5 y A6), el cual es de 8,5 bells, equivalentes a 85 dB, pero este es un valor funcional a máxima capacidad de 4000 cfm o  $1,88 \text{ m}^3/\text{s}$ , mientras que el caudal necesario es de  $1,368 \text{ m}^3/\text{s}$ .

En la tabla 3.11 se presentan los niveles de potencia sonora por cada banda de frecuencia:

**Tabla 3.11**

*Niveles de potencia sonora del ventilador corregidos para cada frecuencia*

|                                      | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| <b>Nivel de potencia sonora [dB]</b> | 76,52  | 71,52  | 66,52  | 61,52   | 56,52   | 51,52   |

### 3.2.4 Nivel de presión sonora debido a la velocidad del aire

El tramo crítico elegido para los cálculos, tomando las figuras 3.2 y 3.3 es el ABCDEGH, el cual cuenta con un ducto principal de 8 metros, ramificación de 3,08 metros y derivación de 0,8 metros.

$$L_{WA}(ABCDE) = 55 \log(8,6) + 10 \log 0,159$$

$$L_{WA}(ABCDE) = 43,41 \text{ dB}$$

Tramo EG (Velocidad de 6,9 m/s y sección de  $0,159 \text{ m}^2$ ):

$$L_{WA}(EG) = 55 \log(6,9) + 10 \log 0,159$$

$$L_{WA}(EG) = 38,15 \text{ dB}$$

Tramo GH (Velocidad de 4,3 m/s y sección de 0,063 m<sup>2</sup>):

$$L_{WA}(GH) = 55 \log(4,3) + 10 \log 0,063$$

$$L_{WA}(GH) = 22,83 \text{ dB}$$

Suma logarítmica:

$$L_{WA}(ABCDEFGH) = 10 \log\left(10^{\frac{43,41}{10}} + 10^{\frac{38,15}{10}} + 10^{\frac{22,83}{10}}\right)$$

$$L_{WA}(ABCDEFGH) = 44,82 \text{ dB}$$

**Tabla 3.12**

*Niveles de potencia sonora debido a la velocidad del aire corregidos para cada frecuencia*

|                                      | <b>125 Hz</b> | <b>250 Hz</b> | <b>500 Hz</b> | <b>1000 Hz</b> | <b>2000 Hz</b> | <b>4000 Hz</b> |
|--------------------------------------|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>Nivel de potencia sonora [dB]</b> | 40,82         | 38,82         | 36,82         | 31,82          | 26,82          | 21,82          |

Ahora, se puede calcular el nivel de potencia sonora hasta antes de la rejilla, el cual resulta de la suma logarítmica del nivel de potencia sonora del ventilador y de la velocidad del aire, estos valores se representan en la tabla 3.13.

**Tabla 3.13**

*Niveles de potencia sonora hasta antes de las rejillas para el tramo crítico ABCDEGH*

|                                      | <b>125 Hz</b> | <b>250 Hz</b> | <b>500 Hz</b> | <b>1000 Hz</b> | <b>2000 Hz</b> | <b>4000 Hz</b> |
|--------------------------------------|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>Nivel de potencia sonora [dB]</b> | 76,82         | 76,82         | 75,82         | 74,82          | 72,82          | 69,82          |

Con la potencia sonora conocida, es necesaria una atenuación del ruido para poder aproximar la curva NC del auditorio actual a una recomendada para este tipo de espacios.

### 3.2.5 Atenuación por ductos

A continuación, se proporciona un cálculo de prueba de atenuación por ductos para el tramo crítico ABCDEGH definido en la sección anterior, el cual inicia desde la unidad de enfriamiento hasta una rejilla de impulsión. El cálculo se lo realizará para una frecuencia de 1000 Hz.

Tramo ABCDE:

$$IL(ABCDE) = 1,05(8,001) \left( \frac{2,3 \text{ m}}{0,225 \text{ m}^2} \right) 0,66^{1.4}$$

$$IL(ABCDE) = 47,99 \text{ dB}$$

Tramo EG:

$$IL(EG) = 1,05(3,08) \left( \frac{1,85 \text{ m}}{0,2 \text{ m}^2} \right) 0,66^{1.4}$$

$$IL(CF) = 16,72 \text{ dB}$$

Tramo GH:

$$IL(GH) = 1,05(0,8) \left( \frac{1,85 \text{ m}}{0,2 \text{ m}^2} \right) 0,66^{1.4}$$

$$IL(GH) = 4,34 \text{ dB}$$

La atenuación total debido al recubrimiento interno de lana de roca calculada es de 69,06 dB para la frecuencia de 1000 Hz. En la tabla 3.14 se muestran los valores para el resto de las frecuencias en bandas de octava.

**Tabla 3.14**

*Atenuación por recubrimiento interno de ductos con lana de roca para el tramo crítico ABCDEGH*

|                        | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |
|------------------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| <b>Atenuación [dB]</b> | 4,92   | 25,07  | 53,50  | 69,06   | 88,83   | 85,70   |

En la Tabla 3.15 y gráfica 3.5 se muestran los niveles de potencia sonora atenuados hasta antes de la rejilla de impulsión.

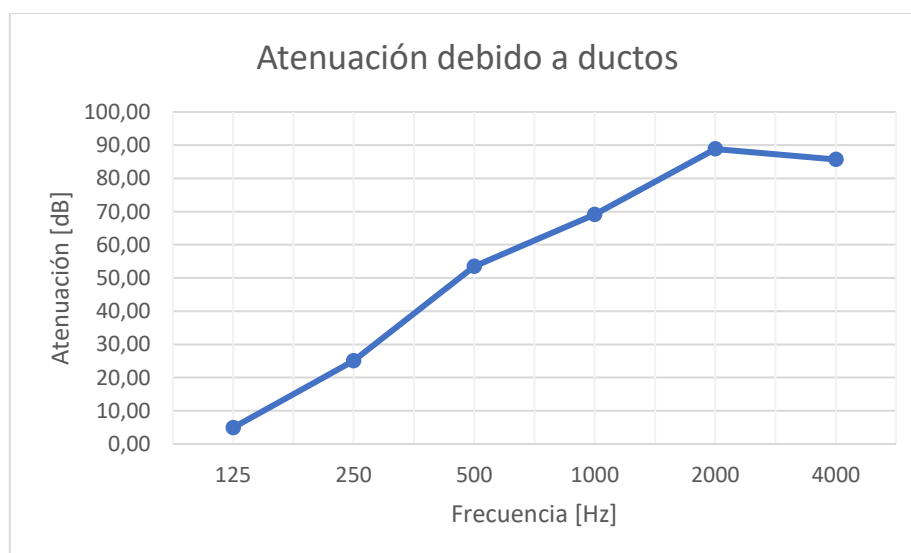
**Tabla 3.15**

*Niveles de potencia sonora del ventilador atenuados para cada frecuencia hasta antes de la rejilla de impulsión*

|   | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |
|---|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| <b>Nivel de potencia sonora [dB]</b>          | 76,82  | 76,82  | 75,82  | 74,82   | 72,82   | 69,82   |
| <b>Atenuación por ductos [dB]</b>             | 4,92   | 25,07  | 53,50  | 69,06   | 88,83   | 85,70   |
| <b>Nivel de potencia sonora atenuado [dB]</b> | 71,90  | 51,75  | 22,32  | 5,76    | -16,01  | -15,88  |

**Gráfica 3.5**

*Curva de atenuación de ruido debido a ductos recubiertos internamente con lana de roca*



### 3.2.6 Nivel de presión sonora total

El nivel de presión sonora en la rejilla viene dado por el catálogo del anexo A10, de donde se obtiene que son 22 dB que se generan por el paso de aire en la rejilla de impulsión para la sección elegida. En la tabla 3.16 se muestran los valores de presión sonora incidentes al auditorio desde la rejilla crítica calculados por suma logarítmica:

**Tabla 3.16**

*Presión sonora incidente al auditorio desde la rejilla de impulsión crítica*

|   | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |
|---|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| <b>Nivel de potencia sonora atenuado [dB]</b>           | 71,90  | 51,75  | 22,32  | 5,76    | -16,01  | -15,88  |
| <b>Nivel de presión sonora debido a la rejilla [dB]</b> | 22     | 22     | 22     | 22      | 22      | 22      |
| <b>Nivel de presión sonora incidente [dB]</b>           | 71,90  | 51,76  | 25,17  | 22,10   | 22,00   | 22,00   |

A continuación, se presenta un cálculo de ejemplo del nivel de presión sonora total para la frecuencia de 1000 Hz del tramo crítico ABCDEGH:

Para el nivel de presión sonora debido a la distancia, se considera que de la rejilla hasta el punto de recepción de ruido hay una distancia de 3,5 metros, valor correspondiente a la distancia más corta de la rejilla a la altura de los espectadores:

$$L_{pd}(1000 \text{ Hz}) = 22,10 + 10 \log(2) - 20 \log 3,5 - 11$$

$$L_{pd}(1000 \text{ Hz}) = 3,23 \text{ dB}$$

Para el nivel de presión sonora debido al campo reverberante, se utilizará el volumen del auditorio correspondiente a  $1632,48 \text{ m}^3$  y un tiempo de reverberación medio de 1,31 segundos, valor calculado en la sección 3.3 de este documento.

$$L_{pr}(1000 \text{ Hz}) = 22,10 + 10 \log(1,31) - 10 \log(1632,48) + 14$$



$$L_{pr}(1000 \text{ Hz}) = 5,14 \text{ dB}$$

Finalmente, el nivel de presión sonora total está dado por la suma logarítmica de los 2 valores calculados anteriormente:

$$L_T(1000 \text{ Hz}) = 10 \log(10^{\frac{3,23}{10}} + 10^{\frac{5,14}{10}})$$

$$L_T(1000 \text{ Hz}) = 7,30 \text{ dB}$$

En la tabla 3.17 se presentan los valores de presión sonora total para el resto de las frecuencias de bandas de octava, calculados con el procedimiento anteriormente mostrado:

**Tabla 3.17**

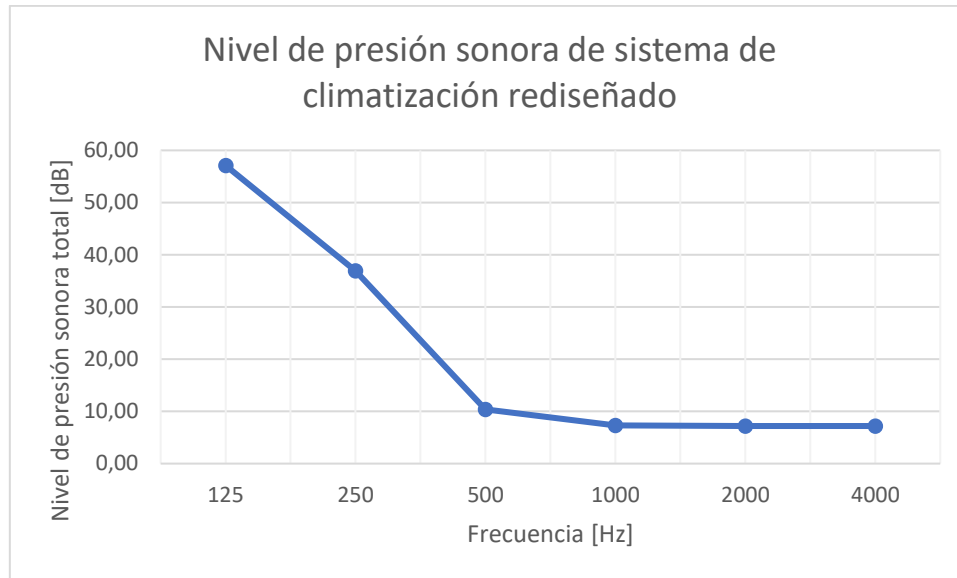
*Niveles de presión sonora total para el tramo crítico ABCDEGH*

|  | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |
|--|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| <b>Nivel de presión sonora incidente [dB]</b>                    | 71,90  | 51,76  | 25,17  | 22,10   | 22,00   | 22,00   |
| <b>Nivel de presión sonora debido a la distancia [dB]</b>        | 53,03  | 32,89  | 6,30   | 3,23    | 3,13    | 3,13    |
| <b>Nivel de presión sonora debido al campo reverberante [dB]</b> | 54,95  | 34,80  | 8,22   | 5,15    | 5,04    | 5,04    |
| <b>Nivel de presión sonora total [dB]</b>                        | 57,10  | 36,96  | 10,37  | 7,30    | 7,20    | 7,20    |

En la gráfica 3.6 se muestran los valores de presión sonora total calculados anteriormente en función de las frecuencias para una mejor visualización de los cambios.

**Gráfica 3.6**

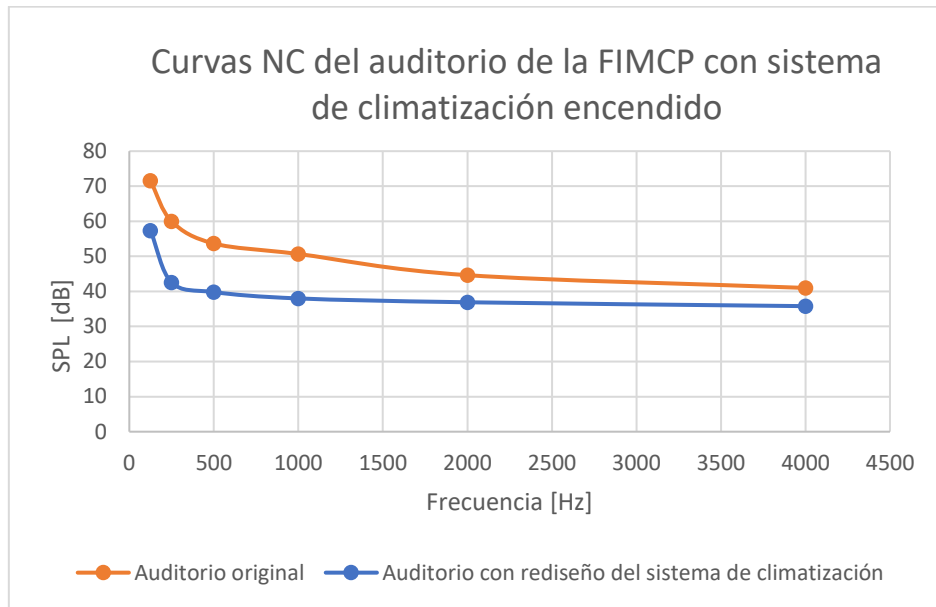
*Nivel de presión sonora teórico del rediseño del sistema de climatización*



Dado que esta curva representa únicamente la presión sonora por el sistema de climatización en el auditorio, se puede sumar logarítmicamente a la gráfica 3.6 de la curva NC medida con el sistema de climatización apagado del auditorio sin acondicionar para obtener una aproximación a la curva NC final con el auditorio rediseñado, sin embargo esta curva no considera la reducción de ruido por la adecuación acústica establecida en la siguiente sección para reducción del tiempo de reverberación, ni la reducción ocasionada por la insonorización de entradas que se discutió en la sección 3.1. Las gráficas 3.7 y 3.8 muestran la comparativa de las curvas NC antes y después del rediseño de sistema de climatización

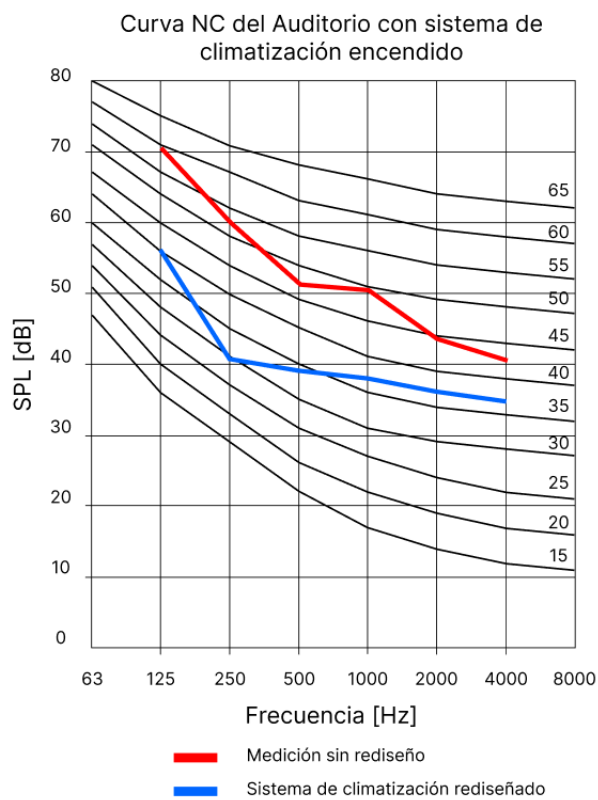
### Gráfica 3.7

Comparación de curvas NC del auditorio con sistema de climatización encendido con y sin rediseño del sistema



### Gráfica 3.8

Comparación de curvas NC del auditorio con familia de curvas estandarizadas



En la comparativa realizada en la gráfica 3.8 se puede estimar que la curva NC estandarizada semejante a los resultados es la curva NC-35, la cual se recomienda para teatros, salas de conferencia o aulas polivalentes.

### 3.3 Reducción de tiempo de reverberación

#### 3.3.1 Diseño de resonador acústico

Para el diseño del resonador acústico de membrana, se consideró la utilización de contrachapado, también conocido como plywood para desempeñar el papel de la membrana. Se utilizó una lámina de contrachapado con un espesor de 3 mm y una masa por unidad de área de  $1.8 \text{ kg/m}^2$ . Se tuvo en cuenta una distancia de 5 cm entre pared y resonador para evitar la redistribución de las sillas por la cercanía con las paredes laterales.

Se utilizó la fórmula de frecuencia de resonancia de la ecuación 2.4:

$$f_0 = \frac{600}{\sqrt{Md}} \text{ (Hz)}$$

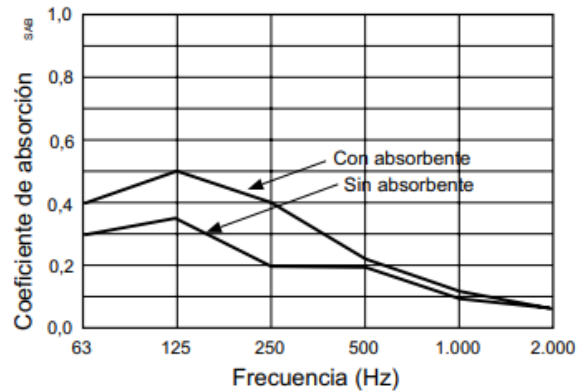
$$f_0 = \frac{600}{\sqrt{\frac{1.8 \text{ kg}}{\text{m}^2} * 5 \text{ cm}}} \text{ (Hz)}$$

$$f_0 = 200 \text{ (Hz)}$$

El cálculo teórico muestra una frecuencia de resonancia de 200 Hz. Sin embargo, con el propósito de confirmar la precisión de estos resultados, se recurrió a la literatura disponible. De acuerdo con experimentos previos que emplearon datos similares, se sugiere una separación de 4.4 cm entre la membrana y la pared, ya que esta distancia exhibe una respuesta de absorción óptima para una frecuencia de 125 Hz, la cual está apegada al objetivo de enfocarse en las frecuencias bajas.

**Figura 3.5**

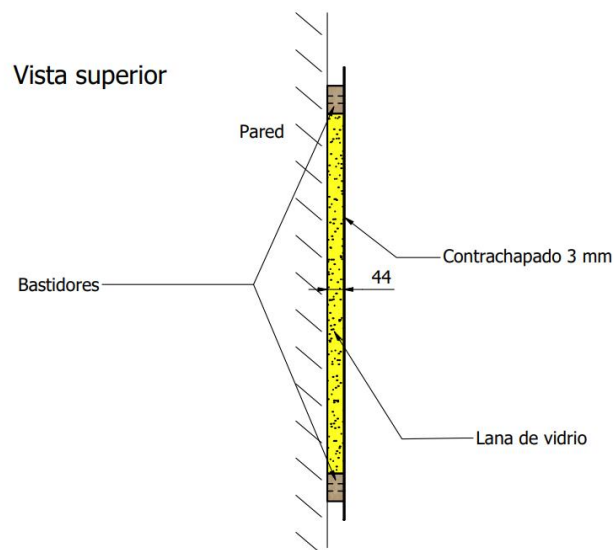
*Coefficientes de absorción del resonador con y sin material absorbente en la cavidad (Isbert, 1998)*



La literatura revisada señala que, con el fin de lograr una mejor absorción, es recomendable incorporar material absorbente en la cavidad. Se contempló el uso de lana de vidrio que, como se muestra en la figura 3.5, existe una mayor absorción de frecuencias bajas en comparación con el resonador sin lana de vidrio.

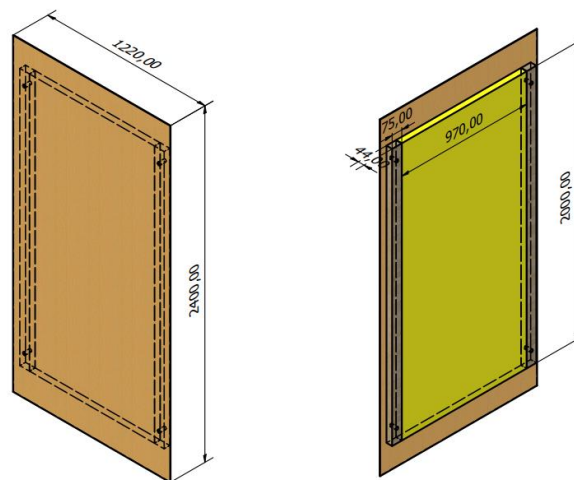
**Figura 3.6**

*Vista superior a pared del resonador acústico diseñado*



Las dimensiones del resonador están dadas por las dimensiones comerciales del contrachapado o plywood, las cuales suelen ser de 2400 mm x 1220 mm en espesores distintos que, para el caso es de 3 mm.

**Figura 3.7**  
*Dimensiones generales del resonador de membrana diseñado*



### 3.3.2 Selección de paneles para frecuencias medias y altas

Se eligieron paneles de lana de vidrio negro de 50 milímetros de espesor destinados a la absorción de las frecuencias medias y altas. La selección de estos paneles se fundamentó en sus propiedades acústicas.

**Figura 3.8**  
*Imagen referencial de lana de vidrio negra*



En la Tabla 3.18 se presenta la tabulación del coeficiente de fono absorción en diferentes bandas de octava para los dos tipos de materiales incorporados.

**Tabla 3.18**

*Coefficientes de fono absorción de resonador de membrana y panel de lana de vidrio*

|                                      | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| <b>Panel resonador de membrana</b>   | 0,5    | 0,4    | 0,22   | 0,12    | 0,05    | 0,05    |
| <b>Panel de lana de vidrio negra</b> | 0,18   | 0,71   | 1,00   | 1,00    | 1,00    | 1,00    |

### 3.3.3 *Redistribución del techo de gypsum y disposición geométrica de paneles*

El auditorio actualmente cuenta con un techo de gypsum plano, el cual aportan a la generación de ecos debido a la forma. Se estableció redistribuir el techo de forma escalonada con una inclinación de aproximadamente 5°, con longitudes de planchas que cubran el ancho total del auditorio avanzando 2 metros y cayendo 20 centímetros para lograr esta inclinación.

Además, al contar con un espacio disponible en las paredes laterales de cerca de 240 metros cuadrados se estableció el uso de paneles absorbentes en cerca de 150 metros cuadrados, suficientes para acercar el tiempo de reverberación a valores recomendados en las frecuencias bajas. La distribución se realizó en columnas separadas 20 cm a los costados y con una forma de escaleras que disminuyen 20 cm a medida que se avanza al escenario, siguiendo la tendencia del suelo del auditorio.

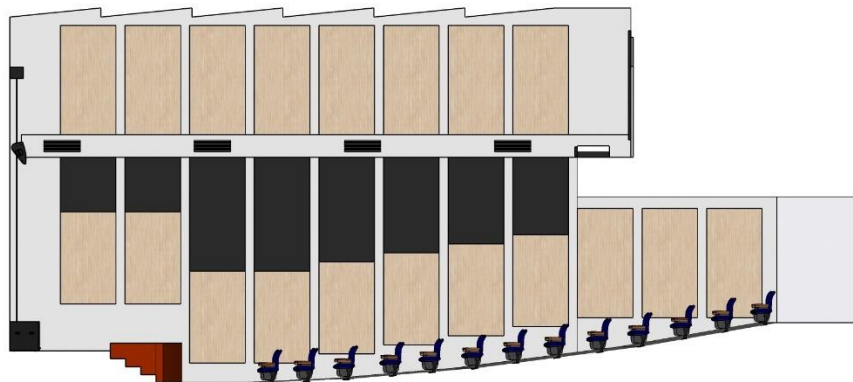
En cuanto a la relación entre resonadores y paneles de lana de vidrio se optó por mantener la construcción establecida para el panel resonador, por lo que para formar las columnas de paneles en los 2 extremos se colocaron los resonadores de membrana completos,

y en el centro se ubican a los paneles de lana de vidrio que se pueden manipular para el largo deseado.

En la figura 3.9 se muestra el techo escalonado de gypsum además de la distribución de los paneles en el modelo 3D en las paredes laterales del auditorio, los paneles color cartón son representativos de los resonadores de membrana, mientras que los paneles oscuros indican a los paneles de lana de roca negros.

**Figura 3.9**

*Disposición lateral de paneles resonadores de membrana, paneles de lana de vidrio negro y techo escalonado de gypsum*



Además, para resolver la falta de inclinación en las paredes del auditorio que proporcionan un aumento de ecos debido a los rebotes, es posible la colocación de los resonadores de forma inclinada hacia adentro del auditorio, logrando que el sonido ya no rebote de manera perpendicular a las paredes.

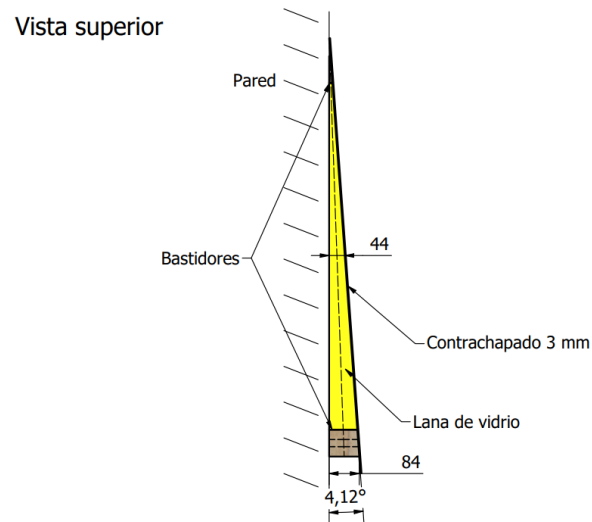
Para obtener el ángulo de inclinación, se tomó en consideración el panel de membrana diseñado previamente, el cual debe tener una separación a la pared de 44 mm para su óptimo



funcionamiento, es por ello por lo que la inclinación máxima para que permita una distancia media de 44 mm a la pared es de  $4,12^\circ$ .

**Figura 3.10**

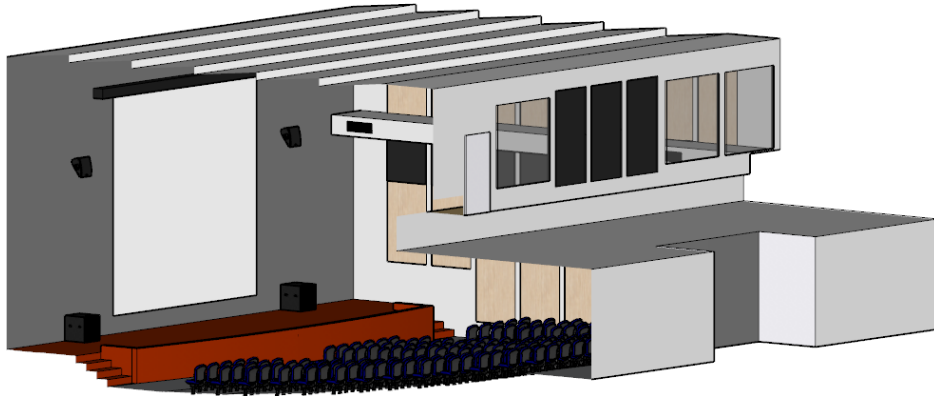
*Imagen referencial de la vista superior del panel resonador modificado con una inclinación de  $4,12^\circ$*



**3.3.4 Diseño 3D con el acondicionamiento acústico aplicado**

En las figuras 3.11 – 3.12 – 3.13 – 3.14 se muestran imágenes del interior del auditorio acondicionado acústicamente con la aplicación de paneles acústicos de resonadores de membrana y de lana de vidrio negra además del techo de gypsum escalonado y la falsa viga que recubre a los ductos del sistema de aire acondicionado rediseñado.

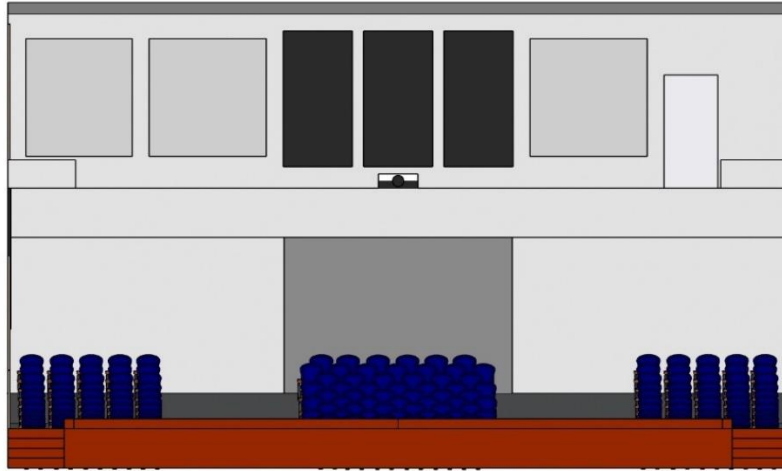
**Figura 3.11**  
*Vista isométrica interior del auditorio*



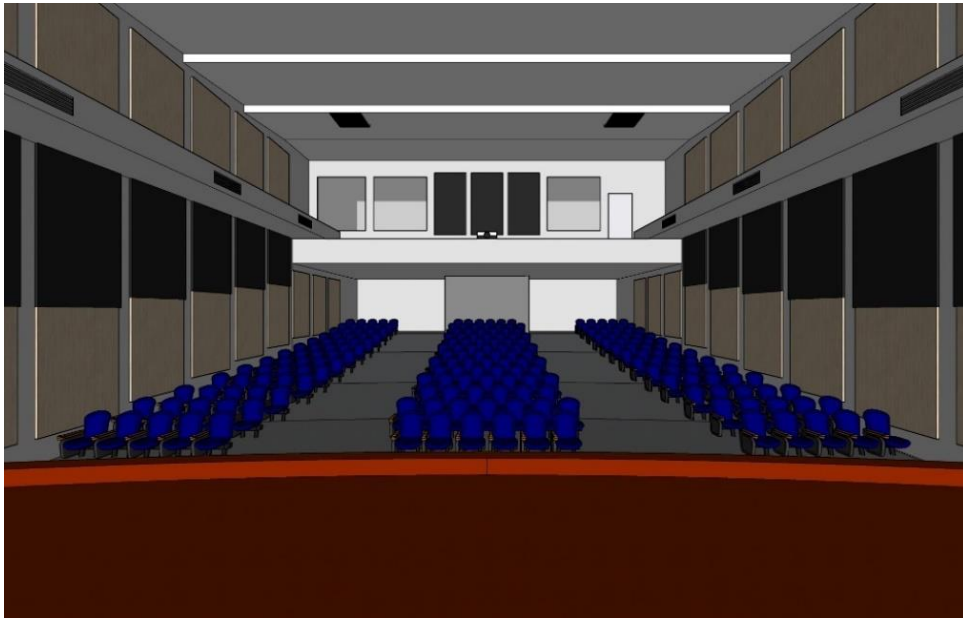
**Figura 3.12**  
*Vista en perspectiva del interior del auditorio*



**Figura 3.13**  
*Vista isométrica frontal del auditorio*



**Figura 3.14**  
*Vista en perspectiva desde el escenario*



### 3.3.5 Simulación del acondicionamiento acústico del auditorio de la FIMCP

Para la validación de la efectividad del acondicionamiento acústico propuesto, se efectuó la simulación de la solución propuesta en el programa I-SIMPA donde los resultados obtenidos se encuentran en la tabla 3.19 para su mayor comprensión.

**Tabla 3.19**

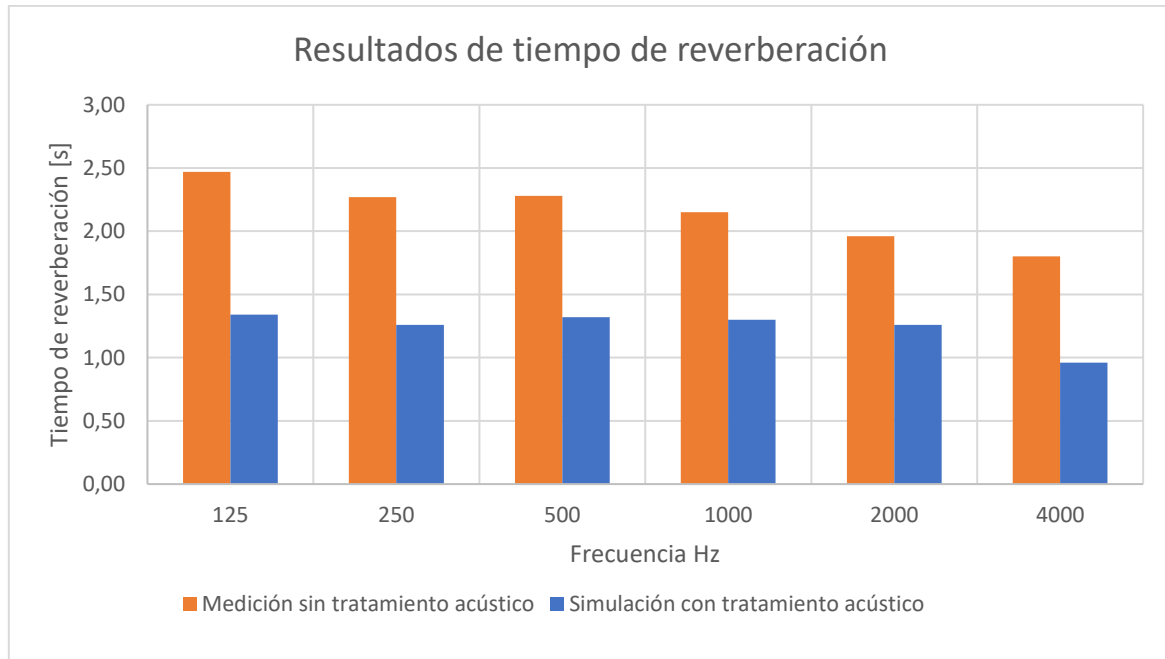
*RT60 del acondicionamiento acústico simulado en I-SIMPA*

| <b>Frecuencia<br/>[Hz]</b> | <b>TR60 Teórico<br/>tratado<br/>[s]</b> |
|----------------------------|---|
| 125                        | 1,34                                    |
| 250                        | 1,26                                    |
| 500                        | 1,32                                    |
| 1000                       | 1,3                                     |
| 2000                       | 1,26                                    |
| 4000                       | 0,96                                    |

La Gráfica 3.9 representa la comparación entre los resultados de la simulación con el tratamiento acústico implementado y las mediciones experimentales del tiempo de reverberación.

**Gráfica 3.9**

*Comparación de RT60 del auditorio original y con tratamiento acústico propuesto*

**3.3.6 Inteligibilidad de la palabra**

Para el análisis de inteligibilidad se utilizan los datos del tiempo de reverberación y las dimensiones del auditorio, además se establece un factor de directividad de 2, debido a la forma de dirección del sonido de un hablante, como se indica en el Anexo A12.

**Cálculo de inteligibilidad del auditorio sin acondicionamiento acústico**

$$R = \frac{S_{tot}\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}}$$

$$R = \frac{1201 * 0,12}{1 - 0,12} = 160,40 \text{ m}^2$$

$$D_c = 0,14\sqrt{QR}$$

$$D_c = 0,14\sqrt{2 * 160,4} = 2,5 \text{ m}$$

Se calcula  $3.16D_c$ :

$$3,16D_c = 7,92 \text{ m}$$

Cálculo para parte delantera del auditorio

$$\%ALCons = 9RT \text{ (para } r > 3,16D_c)$$

$$\%ALCons = 9 * 1,96$$

$$\%ALCons = 17,64 \%$$

**Cálculo de inteligibilidad del auditorio con acondicionamiento acústico propuesto**

$$R = \frac{S_{tot}\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}}$$

$$R = \frac{1304,84 * 0,15}{1 - 0,15} = 227,41 \text{ m}^2$$

$$D_c = 0,14\sqrt{QR}$$

$$D_c = 0,14 * \sqrt{2 * 227,41} = 2,98 \text{ m}$$

Se calcula  $3,16D_c$ :

$$3,16D_c = 9,43 \text{ m}$$

Cálculo para parte delantera del auditorio

Considerando que la distancia  $r$  del parlante a la primera fila de asientos es de 8,3 metros.

$$\%ALCons = \frac{200r^2RT^2}{VQ} \text{ (para } r \leq 3,16D_c)$$

$$\%ALCons = \frac{200 * 8,3^2 * 1,26^2}{1632,59 * 2}$$

$$\%ALCons = 6,69\%$$

Cálculo para la parte del centro y posterior del auditorio:

$$\%ALCons = 9RT \text{ (para } r > 3,16D_c)$$

$$\%ALCons = 9 * 1,26$$

$$\%ALCons = 11,34 \%$$

La tabla 3.20 muestra la comparativa del índice de inteligibilidad de la palabra de %ALCons para el auditorio original y con el tratamiento acústico propuesto.

**Tabla 3.20**

*Comparativa del %ALCons antes y después del tratamiento acústico*

|   | <b>Auditorio original</b> | <b>Auditorio con tratamiento acústico propuesto</b> |
|---|---------------------------|---|
| <b>Constante de la sala R [m<sup>2</sup>]</b> | 160,40                    | 227,41  |
| <b>Distancia crítica [m]</b>                  | 2,5                       | 2,98  |
| <b>Distancia límite de pérdidas [m]</b>       | 7,92                      | 9,43  |
| <b>%ALCons en primeras filas [%]</b>          | 17,64                     | 6,69  |
| <b>%ALCons en filas posteriores [%]</b>       | 17,64                     | 11,34   |

### 3.4 Análisis de costos

La tabla 3.21 muestra una estimación de los costos de instalación y fabricación de los paneles acústicos, junto con la colocación del techo de gypsum para el auditorio de la FIMCP. Los valores de materiales y construcción son referenciales y están sujetos a cambios del mercado. (Cámara de la construcción de Guayaquil, 2019)

**Tabla 3.21**

*Costo total del acondicionamiento acústico y rediseño del sistema de climatización (Cámara de la construcción de Guayaquil, 2019)*

| Rubro | Descripción                                       | Unidad         | Cantidad | Costos   |              |                    | Subtotal | Total   |
|-------|---|----------------|----------|----------|--------------|--------------------|----------|---------|
|       |   |                |          | Material | Mano de obra | Equipos utilizados |          |         |
| 1     | <b>Resonadores de membrana</b>                    |                |          |          |              |                    |          |         |
|       | Bastidores  | u              | 76       | 2,50     | 0,20         | 0,05               | 2,75     | 209,00  |
|       | Placa de contrachapado                            | u              | 38       | 20,00    | -            | -                  | 20,00    | 760,00  |
|       | Lana de vidrio de relleno                         | m              | 76       | 6,00     | -            | -                  | 6,00     | 456,00  |
|       | Ensamble de resonador                             | u              | 38       | -        | 7,20         | 0,50               | 7,70     | 292,60  |
|       | Trazado y perforación de puntos de anclaje        | u              | 38       | -        | 0,90         | 0,20               | 1,10     | 41,80   |
|       | Instalación de resonadores                        | u              | 38       | -        | 1,80         | 2,50               | 4,30     | 163,40  |
| 2     | <b>Paneles de lana de vidrio negra</b>            |                |          |          |              |                    |          |         |
|       | Panel de lana de vidrio negra                     | u              | 56       | 15,15    | -            | -                  | 15,15    | 848,40  |
|       | Instalación de lana de vidrio negra               | u              | 56       | -        | 1,20         | 1,70               | 2,90     | 162,40  |
| 3     | <b>Techo acústico escalonado de gypsum</b>        |                |          |          |              |                    |          |         |
|       | Desmontaje del techo anterior                     | m <sup>2</sup> | 188,30   | -        | 4,10         | 3,10               | 7,20     | 1355,76 |
|       | Instalación de Gypsum                             | m <sup>2</sup> | 202,93   | 12,50    | 4,10         | 3,65               | 20,25    | 4109,33 |
| 4     | <b>Sistema de climatización</b>                   |                |          |          |              |                    |          |         |
|       | Desmontaje de ductos anteriores                   | m              | 68       | -        | 4,60         | 4,50               | 9,10     | 618,8   |
|       | Ductos rectangulares de acero galvanizado 0,7 mm  | m              | 74       | 4,00     | 4,60         | 1,55               | 10,15    | 751,10  |
|       | Recubrimiento interno de lana de roca para ductos | m <sup>2</sup> | 127,00   | 14,04    | 1,20         | 0,50               | 15,74    | 1998,98 |



|   |  |                      |       |       |      |      |       |          |
|---|--|----------------------|-------|-------|------|------|-------|----------|
|   | <b>Rejillas de retorno e impulsión</b> | <i>u</i>             | 12    | 65,00 | -    | -    | 65,00 | 780,00   |
|   | <b>Instalación de ductos</b>           | <i>m</i>             | 74    | -     | 4,60 | 4,50 | 9,10  | 673,40   |
| 5 | <b>Falsa viga de gypsum</b>            |                      |       |       |      |      |       |          |
|   | <b>Estructura interior</b>             | <i>kg</i>            | 61,69 | 2,00  | 1,20 | 3,65 | 6,85  | 422,58   |
|   | <b>Instalación de Gypsum</b>           | <i>m<sup>2</sup></i> | 72,91 | 12,50 | 4,10 | 3,65 | 20,25 | 1476,43  |
|   | <b>Total</b>                           |                      |       |       |      |      |       | 15119,98 |

El total estimado para el rediseño acústico es de 15119,98 USD. Esta cifra comprende un detallado desglose que contempla tanto la inversión en mano de obra como en materiales esenciales para la ejecución del proyecto, reflejando así el compromiso financiero necesario para la materialización de mejoras sustanciales en la calidad acústica del auditorio.

Aunque se reconoce que el ideal habría sido integrar el acondicionamiento acústico desde las etapas iniciales de la construcción del auditorio, este valor agregado tiene el potencial de transformar la experiencia de los eventos y conferencias que se lleven a cabo en el espacio. La inversión realizada refleja el compromiso con la excelencia acústica y responde a la necesidad de proporcionar un ambiente sonoro que permita una comunicación clara y enriquecedora.

### 3.5 Análisis de resultados

En esta sección se presenta el análisis de los resultados obtenidos en el presente trabajo, tanto cálculos teóricos como validación a través de simulación, donde se discutirá la eficacia de estos, si cumplieron con el objetivo deseado, además de validar la calidad de estos. A continuación, se segmentan los resultados en dos partes:

#### 3.5.1 Rediseño del sistema de climatización

El rediseño de los perfiles de ductos se basó en la consideración de velocidades de aire recomendadas para espacios silenciosos (ASHRAE, 2021), buscando optimizar la atenuación teórica del ruido originado por los ventiladores del sistema de aire acondicionado. Los resultados indican una reducción significativa en los niveles de ruido generados por los ventiladores, lo que contribuye a mejorar la calidad acústica del entorno.

Según los valores representados en la tabla 3.15 de atenuación de sonido en ductos hasta antes de la rejilla, a pesar de que no se logró una reducción representativa en las frecuencias bajas con niveles de 76,82 dB a 71,9 dB para 125 Hz y de 75,82 dB a 51,75 dB para 250 Hz, en el caso de frecuencias medias y altas, la atenuación fue prácticamente total, lo que resalta la eficacia del rediseño en la mitigación de estas componentes sonoras y la dificultad para absorber frecuencias bajas debido a la longitud de onda más amplia. Sin embargo, los espectadores son menos sensibles a estas frecuencias por lo que no representaría una preocupación mayor el hecho de que no se atenúe tanto el sonido para estas frecuencias.

La velocidad del aire a través de las rejillas genera aproximadamente 22 dB de ruido según estudios realizados para las rejillas seleccionadas (TROX España, 2018). Este valor se incorporó mediante una suma logarítmica, tal como se presenta en la tabla 3.16, para determinar la presión sonora incidente al auditorio desde la rejilla crítica. Es importante

señalar que este análisis no considera otras fuentes de ruido presentes en el auditorio, lo que indica un enfoque conservador en la evaluación de los niveles de ruido resultantes.

Para aproximar más los resultados del nivel de presión sonora total calculado, se optó por sumarlos logarítmicamente a los resultados medidos del auditorio con el sistema de climatización apagado de la gráfica 3.2, obteniendo una curva NC que podemos aproximar a la curva NC 35, ideal para teatros, salas de conferencia y otros espacios similares (ANSI/ASA, 2019).

Es fundamental tener presente que aún no se ha podido llevar a cabo una medición del ruido de fondo que refleje la implementación real del acondicionamiento acústico propuesto, el cual incluye paneles absorbentes, resonadores y ligeros cambios geométricos. Debido a la ausencia de dicho tratamiento concreto, es plausible que la curva NC resultante muestre niveles de ruido más reducidos. Este hecho sería altamente beneficioso para la calidad acústica general del auditorio, añadiendo una perspectiva positiva y prometedora en términos de su ambiente sonoro.

### **3.5.2 Acondicionamiento Acústico**

Las mediciones preliminares del tiempo de reverberación revelaron que el estado actual del auditorio exhibe un RT60 promedio de 2,3 segundos como se pudo constatar en la tabla 3.1. Este valor excede los límites permitidos para salas de conferencia y auditorios, donde se establece que el promedio debería situarse entre 1 y 1,5 segundos (Isbert, 1998). Estos datos refuerzan la premisa de una distribución deficiente del sonido en dicho recinto y subrayan la imperante necesidad de realizar un tratamiento acústico. Basados en esta información, se puede afirmar que la mayoría de los problemas de reverberación se concentran en el rango de frecuencias entre 125 Hz y 1000 Hz, que corresponde a las frecuencias bajas y medias.

La Gráfica 3.4 ilustra que la representación del auditorio generada por el programa I-SIMPA concuerda con el resultado teórico del RT60, aunque se observa una ligera variación de 0.5 segundos en el intervalo de frecuencias de 2000 Hz a 4000 Hz cuando se compara con los resultados In-situ obtenidos en el auditorio. Esta desviación se atribuye a factores como la insuficiente insonorización en las entradas y salidas del auditorio, además del deterioro parcial del techo gypsum. Tales circunstancias provocan discrepancias entre los resultados teóricos y las mediciones reales. Estos factores lamentablemente no pueden ser replicados en su totalidad debido a las limitaciones del programa I-SIMPA. No obstante, se trabajó en acercar los resultados de la simulación con la mayor fidelidad a la realidad.

Tal como se desprende de la Tabla 3.20, una vez que se ha llevado a cabo la simulación del tratamiento acústico del auditorio, se observa una significativa disminución en el tiempo de reverberación en todas las bandas de frecuencia. El valor promedio del tiempo de reverberación se reduce a un promedio de 1.30 segundos. Esta transformación es apreciable en la Gráfica 3.9, en la cual el RT60 se reduce de manera sustancial en las frecuencias bajas, una región donde previamente se experimentaba una mayor acumulación de energía sonora. Cabe destacar que el valor obtenido de RT60 promedio, se encuentra en el rango aceptable para una sala de conferencias de este tipo, cumpliendo así con la sugerencia de tener un tiempo de reverberación entre 1 y 1.5 segundos. (Isbert, 1998)

La simulación de tiempo de reverberación demuestra que la modificación en la disposición del techo, en la cual se reduce su altura en 20 cm cada 2 metros, provoca que cada franja de gypsum tenga una inclinación de  $5^\circ$  con respecto a la horizontal sumado a la inclinación de  $4.12^\circ$  de los paneles resonadores y de  $5^\circ$  para la lana de vidrio, se logra el propósito de reducir las reflexiones sonoras. Con la inclinación de los paneles, los rebotes tienden a dirigirse hacia la parte posterior de los espectadores, lo que evita la acumulación de rebotes cercanos al escenario, evitando la propagación de ecos. El ángulo en el que se

desfasan los rebotes es el mismo ángulo de inclinación del panel, es decir  $4,12^\circ$  esto indica que un rebote en dirección perpendicular hacia la pared se redirigirá a  $85,88^\circ$ , rompiendo con el paralelismo que implicaría un rebote de  $90^\circ$ . Esta alteración en la geometría no solo optimiza la experiencia auditiva, sino que también mantiene la estética del auditorio intacta, un aspecto crucial para tener en cuenta para un recinto destinado a conferencias.

En la comparación realizada para el índice de inteligibilidad de la palabra en la tabla 3.20 se muestra una mejora en el porcentaje de pérdida de articulación de consonantes partiendo de un valor de %AICons de 17.64% para el estado actual, lo cual sugiere una inteligibilidad deficiente según la tabla 1.1, y para que sea considerada aceptable, debería ser inferior al 12% de pérdida. En cuanto a la inteligibilidad en el auditorio con el acondicionamiento acústico propuesto, se estima una reducción del %AICons, a un valor de 6.69% en las primeras filas cercanas al escenario y 11.34% en la parte posterior. Estos valores indican una mejora significativa en la inteligibilidad de la palabra, ya que se sitúan dentro del rango aceptable de valoración subjetiva del habla.

## **Capítulo 4**

## 4. Conclusiones y recomendaciones

### 4.1 Conclusiones

El auditorio ubicado en la FIMCP presenta notables deficiencias en términos acústicos, derivadas de aspectos insuficientes en su diseño y construcción. Estas deficiencias se manifiestan en la carencia de un tiempo de reverberación adecuado, sumado a una mala insonorización o aislamiento acústico tanto por las entradas de sonido exterior como por el ruido generado por el sistema de climatización.

El enfoque de diseño propuesto, que contempla la implementación de paneles resonadores junto con lana de vidrio negra además del techo escalonado de gypsum, tiene el potencial de significativamente reducir el tiempo de reverberación del auditorio. Esta solución podría llevar el tiempo de reverberación a un promedio de 1,3 segundos, un valor que satisface los estándares recomendados para auditorios.

La inteligibilidad de la palabra podría mejorar considerablemente, ya que inicialmente, al contar con un ALCons del 17,64%, el auditorio recibía una valoración pobre en este parámetro. Con el acondicionamiento propuesto, este porcentaje se reduce a un valor del 6,69% en la parte delantera del auditorio y un 11,34% en la parte posterior, lo que indica una valoración aceptable de la inteligibilidad, tal como se muestra en la tabla 1.1.

El rediseño de los perfiles de ductos ha demostrado ser una estrategia efectiva para atenuar el ruido generado por los ventiladores del sistema de aire acondicionado en el entorno del auditorio. La optimización de la velocidad del aire y la atenuación con material absorbente podrían contribuir a una mejora sustancial en la calidad sonora, con implicaciones positivas para el confort acústico y la experiencia de los usuarios en el espacio.

A pesar de los desafíos y limitaciones encontrados en este proyecto, como la falta de mediciones concretas del acondicionamiento acústico aplicado, los resultados obtenidos

sugieren un panorama alentador en la búsqueda de un ambiente acústico óptimo en el auditorio. La aproximación lograda hacia una curva NC 35 y el potencial de reducciones adicionales mediante tratamientos acústicos futuros subrayan la relevancia de este estudio en la planificación y diseño de espacios acústicamente confortables.

El costo total de 15119,98 USD calculado para el acondicionamiento acústico propuesto refleja no solo la inversión financiera, sino también la inversión en la calidad acústica y la experiencia del usuario en el auditorio. Aunque retrospectivamente se habría preferido una consideración temprana del acondicionamiento acústico, esta inversión estratégica se alinea con la visión de un espacio versátil y acústicamente óptimo para el disfrute de diversos eventos y actividades.



## 4.2 Recomendaciones

Para una propuesta más sólida en la implementación de resonadores y materiales acústicos, se sugiere llevar a cabo pruebas y ensayos en cámaras reverberantes, siguiendo normativas específicas para obtener coeficientes de absorción más precisos de los materiales presentados en el proyecto y de posibles mejoras. Esto, combinado con simulaciones acústicas utilizando hardware con mejores capacidades, potenciaría la exactitud de las soluciones propuestas en un entorno bien concebido.

Además de la estrategia de rediseño del sistema de aire acondicionado, se recomienda rediseñar la arquitectura de la ruta de acceso al auditorio en la FIMCP. La disposición actual, en proximidad a las entradas laterales, favorece la propagación directa de ruido ambiental al interior. Un ajuste en esta disposición podría contrarrestar la intrusión de ruido no deseado, aportando a una mejor insonorización y enriqueciendo aún más el entorno acústico del auditorio.

Se recomienda que, en base a este proyecto se puedan llevar a cabo análisis acústicos en los diversos auditorios y aulas de esta institución (ESPOL). Esto permitirá identificar áreas en las que se puedan implementar acondicionamientos acústicos con el objetivo de mejorar la experiencia auditiva en la mayoría de los espacios destinados a la palabra.

## Referencias

- Barron, M. (1982). *Auditorium Acoustic Modelling Now*. Cambridge: Department of Architecture, University of Cambridge.
- Barron, M. (2015). *The Search for Excellence in Auditorium Acoustics*. Australia: Australian Acoustical Society.
- Córdova, J. L. (2014). *Materiales de Aislamiento Acústico Sostenible*. Cuenca: Universidad de Cuenca.
- GONZÁLEZ, I. G. (2007). *Técnicas y procesos en las instalaciones singulares en los edificios*. Ediciones Paraninfo, S.A.
- Isbert, A. C. (1998). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica.
- Lindsay, R. B. (1966). *The story of acoustics*. Providence.
- Pierce, A. D. (2019). *Acoustics*. MA, USA: Springer.
- Vendrell, J. S. (2011). *Acústica Arquitectónica y Urbanística*. Valencia: Universitat Politècnica de Valencia.
- ANSI/ASA. (2019, julio 23). ANSI/ASA S12.2-2019: Criteria For Evaluating Room Noise. *The ANSI Blog*. <https://blog.ansi.org/2019/07/ansi-asa-s12-2-2019-criteria-room-noise/>
- Arau, H., & Puchades, H. A. (1999). *ABC de la acústica arquitectónica*. Grupo Planeta (GBS).
- ASHRAE. (2013). *GUIA DE BOLSILLO DE ASHRAE*.

ASHRAE. (2021). *Duct systems Design Guide*. [www.ashrae.org](http://www.ashrae.org)

Barron, M. (2015). The Search for Excellence in Auditorium Acoustics. *Acoustics Australia*, 43(1), 25-31. <https://doi.org/10.1007/s40857-015-0012-9>

Bermejo, N. (2016). *Modelización Acústica en Instalaciones de Climatización*.  
[https://www.arauacustica.com/files/noticias/pdf\\_esp\\_621.pdf](https://www.arauacustica.com/files/noticias/pdf_esp_621.pdf)

*Black Theater* ®. (2018, agosto 2). <https://www.isover.com.co/productos/black-theater-r>

Camara de la construccion de Guayaquil. (2019). *Precios de materiales de construcción*.  
[https://www.cconstruccion.net/precios\\_files/materialesprecios.pdf](https://www.cconstruccion.net/precios_files/materialesprecios.pdf)

DIN. (1946). *DIN 1946-2:1994-01 | Normas AENOR Ventilation and air-conditioning*.

Knudsen, V. O. (1963). Architectural Acoustics. *Scientific American*, 209(5), 78-95.

LG Electronics Inc. (2014). *Single Packaged Air Conditioner SERVICE MANUAL*.

Lindsay, B. (1965). *The Story of Acoustics*. the Acoustical Society of America.

Long, M. (2005). *Architectural Acoustics*. Elsevier.

TROX España. (2018). *Tablas de Selección Rápida*. <http://www.trox.es/>

## **Apéndices**

## Apéndice A. Gráficas y tablas de selección

**Figura A1**

*Coefficientes de absorción de diferentes superficies (Pierce, 2019)*

| Material                                | Absorption coefficient $\alpha$ |        |        |         |         |         |
|---|---------------------------------|--------|--------|---------|---------|---------|
|   | 125 Hz                          | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |
| Brick, unglazed                         | 0.03                            | 0.03   | 0.03   | 0.04    | 0.05    | 0.07    |
| Plaster, gypsum, or lime, on brick      | 0.01                            | 0.02   | 0.02   | 0.03    | 0.04    | 0.05    |
| On concrete block                       | 0.12                            | 0.09   | 0.07   | 0.05    | 0.05    | 0.04    |
| Concrete block, coarse                  | 0.36                            | 0.44   | 0.31   | 0.29    | 0.39    | 0.25    |
| Painted                                 | 0.10                            | 0.05   | 0.06   | 0.07    | 0.09    | 0.08    |
| Plywood, 1-cm-thick paneling            | 0.28                            | 0.22   | 0.17   | 0.09    | 0.10    | 0.11    |
| Cork, 2.5 cm thick with airspace behind | 0.14                            | 0.25   | 0.40   | 0.25    | 0.34    | 0.21    |
| Glass, typical window                   | 0.35                            | 0.25   | 0.18   | 0.12    | 0.07    | 0.04    |
| Drapery, lightweight, flat on wall      | 0.03                            | 0.04   | 0.11   | 0.17    | 0.24    | 0.35    |
| Heavyweight, draped to half area        | 0.14                            | 0.35   | 0.55   | 0.72    | 0.70    | 0.65    |
| Floor, concrete                         | 0.01                            | 0.01   | 0.02   | 0.02    | 0.02    | 0.02    |
| Linoleum on                             | 0.02                            | 0.03   | 0.03   | 0.03    | 0.03    | 0.02    |
| Heavy carpet on                         | 0.02                            | 0.06   | 0.14   | 0.37    | 0.66    | 0.65    |
| Wood                                    | 0.15                            | 0.11   | 0.10   | 0.07    | 0.06    | 0.07    |
| Ceiling, gypsum board                   | 0.29                            | 0.10   | 0.05   | 0.04    | 0.07    | 0.09    |
| Plastered                               | 0.14                            | 0.10   | 0.06   | 0.05    | 0.04    | 0.03    |
| Plywood, 1 cm thick                     | 0.28                            | 0.22   | 0.17   | 0.09    | 0.10    | 0.11    |
| Suspended acoustical tile, 2 cm thick   | 0.76                            | 0.93   | 0.83   | 0.99    | 0.99    | 0.94    |
| Gravel, loose, and moist, 10 cm thick   | 0.25                            | 0.60   | 0.65   | 0.70    | 0.75    | 0.80    |
| Grass, 5 cm high                        | 0.11                            | 0.26   | 0.60   | 0.69    | 0.92    | 0.99    |
| Rough soil                              | 0.15                            | 0.25   | 0.40   | 0.55    | 0.60    | 0.60    |
| Water surface, as in a pool             | 0.01                            | 0.01   | 0.01   | 0.02    | 0.02    | 0.03    |

Source: M. D. Egan, *Concepts in Architectural Acoustics*, McGraw-Hill, 1972, pp. 32–34

## Figura A2

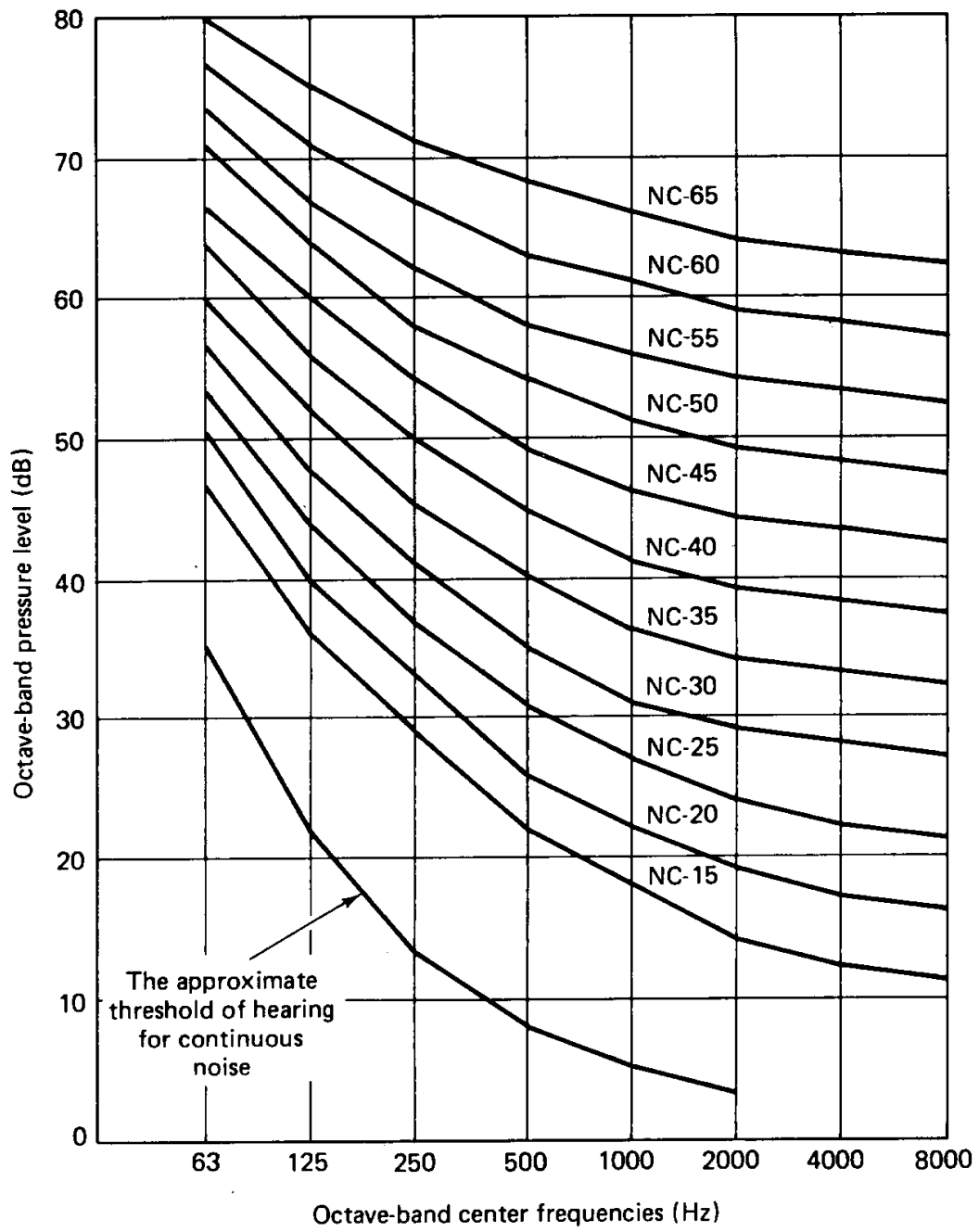
*Curvas NC recomendadas y niveles de ruido de fondo equivalentes (Isbert, 1998)*

| TIPOS DE RECINTOS                   | CURVA NC RECOMENDADA | EQUIVALENCIA EN dBA |
|-------------------------------------|----------------------|---------------------|
| Estudios de grabación               | 15                   | 28                  |
| Salas de conciertos y teatros       | 15-25                | 28-38               |
| Hoteles (habitaciones individuales) | 20-30                | 33-42               |
| Salas de conferencias / Aulas       | 20-30                | 33-42               |
| Despachos de oficinas / Bibliotecas | 30-35                | 42-46               |
| Hoteles (vestibulos y pasillos)     | 35-40                | 46-50               |
| Restaurantes                        | 35-40                | 46-50               |
| Salas de ordenadores                | 35-45                | 46-55               |
| Cafeterías                          | 40-45                | 50-55               |
| Polideportivos                      | 40-50                | 50-60               |
| Talleres (maquinaria ligera)        | 45-55                | 55-65               |
| Talleres (maquinaria pesada)        | 50-65                | 60-75               |

Tabla 1.3 Curvas NC recomendadas y niveles de ruido de fondo equivalentes (en dBA)

**Figura A3**

*Curvas NC Noise Criteria (ANSI/ASA, 2019)*



## Figura A4

*Perfiles rectangulares equivalentes a conductos redondos (ASHRAE, 2013)*

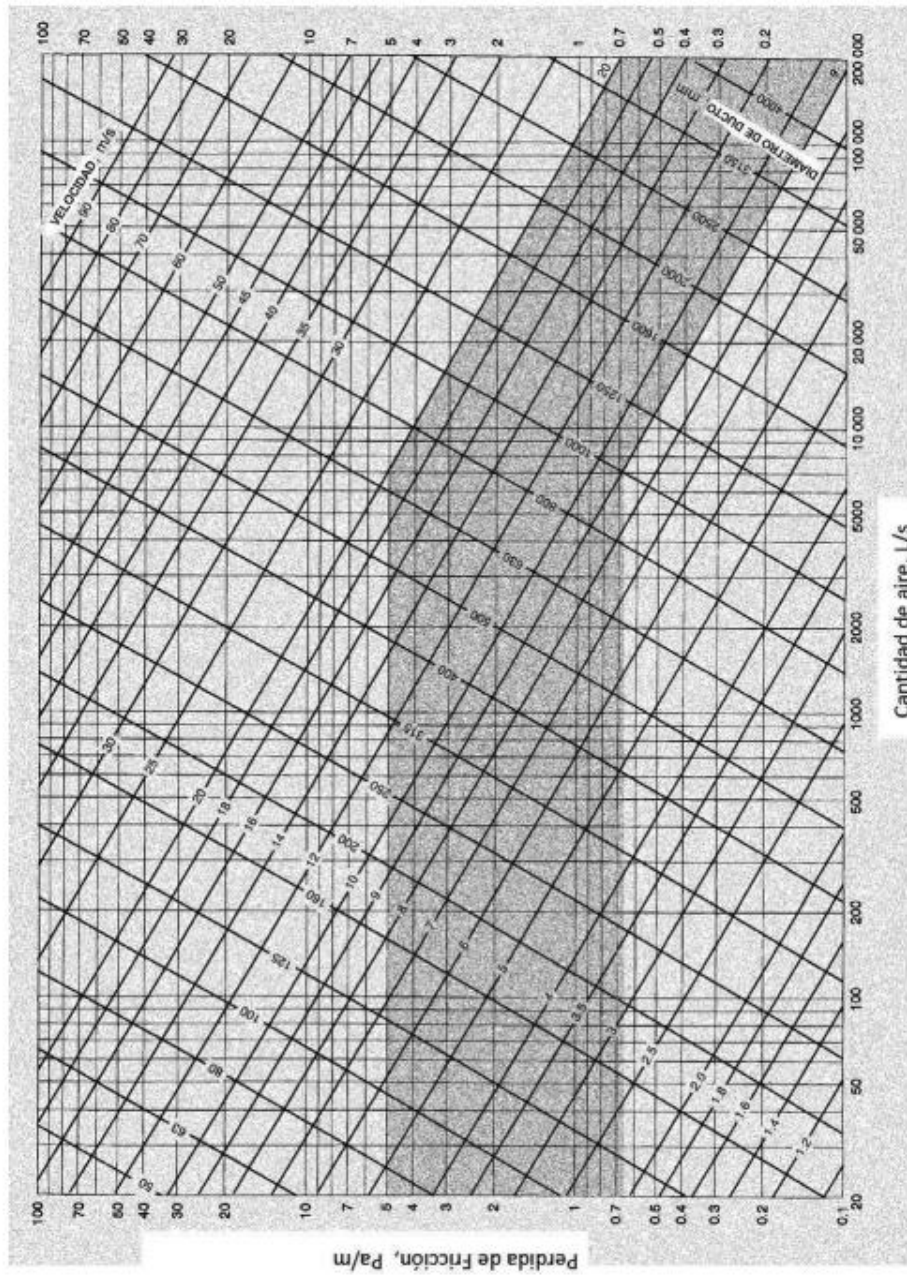
**Tabla 1.7 (SI) Equivalentes Circulares de Conducto Rectangular para Friccion Igual y Capacidad<sup>a</sup>**

| Largo<br>Ady <sup>b</sup> | Longitud de un lado del Conducto Rectangular (a), mm. |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
|---------------------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|
|                           | 100   | 125 | 150 | 175 | 200 | 225 | 250 | 275 | 300 | 350 | 400  | 450  | 500  | 550  | 600  | 650  | 700  | 750  | 800  | 900  |  |
| 100                       | 109   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
| 150                       | 133   | 150 | 164 |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
| 200                       | 152   | 172 | 189 | 204 | 219 |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
| 250                       | 169   | 190 | 210 | 228 | 244 | 259 | 273 |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
| 300                       | 183   | 207 | 229 | 248 | 266 | 283 | 299 | 314 | 328 |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
| 400                       | 207   | 235 | 260 | 283 | 305 | 325 | 343 | 361 | 378 | 409 | 437  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
| 500                       | 227   | 258 | 287 | 313 | 337 | 360 | 381 | 401 | 420 | 455 | 488  | 518  | 547  |      |      |      |      |      |      |      |  |
| 600                       | 245   | 279 | 310 | 339 | 365 | 390 | 414 | 436 | 457 | 496 | 533  | 567  | 598  | 628  | 656  |      |      |      |      |      |  |
| 700                       | 261   | 298 | 331 | 362 | 391 | 418 | 443 | 467 | 490 | 533 | 573  | 610  | 644  | 677  | 708  | 737  | 765  |      |      |      |  |
| 800                       | 275   | 314 | 350 | 383 | 414 | 442 | 470 | 496 | 520 | 567 | 609  | 649  | 687  | 722  | 755  | 787  | 818  | 847  | 875  |      |  |
| 900                       | 289   | 330 | 367 | 402 | 435 | 465 | 494 | 522 | 548 | 597 | 643  | 686  | 726  | 763  | 799  | 833  | 866  | 897  | 927  | 984  |  |
| 1000                      | 301   | 344 | 384 | 420 | 454 | 486 | 517 | 546 | 574 | 626 | 674  | 719  | 762  | 802  | 840  | 876  | 911  | 944  | 976  | 1037 |  |
| 1200                      | 324   | 370 | 413 | 453 | 490 | 525 | 558 | 590 | 620 | 677 | 731  | 780  | 827  | 872  | 914  | 954  | 993  | 1030 | 1066 | 1133 |  |
| 1400                      | 344   | 394 | 439 | 482 | 522 | 559 | 595 | 629 | 662 | 724 | 781  | 835  | 886  | 934  | 980  | 1024 | 1066 | 1107 | 1146 | 1220 |  |
| 1600                      | 362   | 415 | 463 | 508 | 551 | 591 | 629 | 665 | 700 | 766 | 827  | 885  | 939  | 991  | 1041 | 1088 | 1133 | 1177 | 1219 | 1298 |  |
| 1800                      | 379   | 434 | 485 | 533 | 577 | 619 | 660 | 698 | 735 | 804 | 869  | 930  | 988  | 1043 | 1096 | 1146 | 1195 | 1241 | 1286 | 1371 |  |
| 2000                      | 395   | 453 | 506 | 555 | 602 | 646 | 688 | 728 | 767 | 840 | 908  | 973  | 1034 | 1092 | 1147 | 1200 | 1252 | 1301 | 1348 | 1438 |  |
| 2200                      | 410   | 470 | 525 | 577 | 625 | 671 | 715 | 757 | 797 | 874 | 945  | 1013 | 1076 | 1137 | 1195 | 1251 | 1305 | 1356 | 1406 | 1501 |  |
| 2400                      | 424   | 486 | 543 | 597 | 647 | 695 | 740 | 784 | 826 | 905 | 980  | 1050 | 1116 | 1180 | 1241 | 1299 | 1355 | 1409 | 1461 | 1561 |  |
| 2600                      | 437   | 501 | 560 | 616 | 668 | 717 | 764 | 810 | 853 | 935 | 1012 | 1085 | 1154 | 1220 | 1283 | 1344 | 1402 | 1459 | 1513 | 1617 |  |
| 2800                      | 450   | 516 | 577 | 634 | 688 | 738 | 787 | 834 | 879 | 964 | 1043 | 1119 | 1190 | 1259 | 1324 | 1387 | 1447 | 1506 | 1562 | 1670 |  |



**Figura A5**

*Perdidas por fricción de conductos redondos(ASHRAE, 2013)*



**Figura 1.1 (SI) Gráfico de Fricción para Conducto Redondo ( $\rho = 1.20 \text{ kg/m}^3$  y  $\epsilon = 0.09 \text{ mm}$ )**  
[2013F, Ch21, Fig 10]

**Figura A6**

*Ficha técnica de la unidad manejadora de aire LG LK-C120BC00 (LG Electronics Inc., 2014)*

| General Data               |                                       |                         |                             |                        |        |
|----------------------------|---------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|------------------------|--------|
| Nominal ton                | (Ton)                                 | 10                      |                             |                        |        |
| Models                     |                                       | LK-C1209C00 LK-C120BC00 |                             |                        |        |
| Electrical Data            | ARI Net Cooling Capacity              | (BTU/hr)                | 118,000                     | 118,000                |        |
|                            |                                       | (W)                     | 34,582                      | 34,582                 |        |
|                            |                                       | (Kcal/h)                | 29,736                      | 29,736                 |        |
|                            | Voltage                               | (V,PH)                  | 380V,3Ø                     | 220V,3Ø                |        |
|                            | M.C.A.(with standard motor)           | Cooling                 | (Amps)                      | 33.2                   | 50.2   |
| Performance                | Power Input                           | Cooling                 | (Watt)                      | 13,300                 | 13,300 |
|                            |                                       | Air Circulation         | Nominal CFM                 | CFM                    | 4,000  |
|                            | EER                                   | Cooling                 | (BTU/hr.W)                  | 8.9                    | 8.9    |
|                            | Sound Rating                          | Cooling                 | bell                        | 8.5                    | 8.5    |
| Features                   | Wired Remote Controller               |                         | O(Accessory)                |                        |        |
|                            | Time Delay Safety Function            |                         | O                           |                        |        |
|                            | Cooling Operation Mode                |                         | O                           |                        |        |
|                            | Heating Operation Mode(with E/Heater) |                         | O                           |                        |        |
|                            | Soft Dry Operation                    |                         | O                           |                        |        |
|                            | Timer Setting (24-Hour on/off)        |                         | O                           |                        |        |
|                            | Auto restart mode                     |                         | O                           |                        |        |
|                            | Humidifier function                   |                         | O                           |                        |        |
|                            | Test function                         |                         | O                           |                        |        |
|                            | Defrost                               |                         | -                           |                        |        |
|                            | Hot Start                             |                         | -                           |                        |        |
|                            | Self-Diagnosis Function               |                         | O                           |                        |        |
|                            | Phase reversal error sensing          |                         | O                           |                        |        |
|                            | Phase loss sensing                    |                         | O                           |                        |        |
|                            | Compressor                            | Filter type             |                             | washable & Anti-fungus |        |
| Type                       |                                       | Scroll                  |                             |                        |        |
| Quantity                   |                                       | 2                       |                             |                        |        |
| Outdoor Coil               | Type                                  |                         | High efficiency             |                        |        |
|                            | Tube size(O.D)                        | (inch)                  | 0.375                       |                        |        |
|                            |                                       | (mm)                    | 9.52                        |                        |        |
|                            | Row/FPI                               |                         | 2R/16FPI                    |                        |        |
|                            | Lengh                                 | (inch)                  | 39.37                       |                        |        |
|                            |                                       | (mm)                    | 1,000                       |                        |        |
| Face area                  | (sq.ft)                               | 17.55                   |                             |                        |        |
|                            | (m <sup>2</sup> )                     | 1.63                    |                             |                        |        |
| Indoor Coil                | Type                                  |                         | High efficiency             |                        |        |
|                            | Tube size(O.D)                        | (inch)                  | 0.375                       |                        |        |
|                            |                                       | (mm)                    | 9.52                        |                        |        |
|                            | Row/FPI                               |                         | 3R/16FPI                    |                        |        |
|                            | Lengh                                 | (inch)                  | 27.6                        |                        |        |
|                            |                                       | (mm)                    | 700                         |                        |        |
| Face area                  | (sq.ft)                               | 8.4                     |                             |                        |        |
|                            | (m <sup>2</sup> )                     | 0.78                    |                             |                        |        |
| Outdoor Fan                | Type                                  |                         | Propeller                   |                        |        |
|                            | No. Used/Diameter(in.)                |                         | 2EA/22"                     |                        |        |
|                            | Drive Type                            |                         | Direct                      |                        |        |
|                            | CFM                                   |                         | 7,000                       |                        |        |
|                            | No. Motor/Motor output(Hp)            |                         | 2/0.4                       |                        |        |
|                            | Motor RPM                             |                         | 1,050                       |                        |        |
| Indoor Fan                 | Type                                  |                         | centrifugal blower fan      |                        |        |
|                            | No. Used                              |                         | 1EA                         |                        |        |
|                            | Diameter/Width(in.)                   |                         | 15"/11"                     |                        |        |
|                            | Drive Type/Motor Step                 |                         | Belt/1                      |                        |        |
|                            | No.motors                             |                         | 1EA                         |                        |        |
|                            | Motor output(standard/oversized)      |                         | 3.0/5.0Hp                   |                        |        |
|                            | Motor rpm(Standard/oversized)         |                         | 1720/1750                   |                        |        |
| Drain Connection Size(in.) |                                       | 1                       |                             |                        |        |
| Dimensions                 | Unit (WxHxD)                          | (inch)                  | 85 3/4" x 48 5/8" x 55 1/2" |                        |        |
|                            |                                       | (mm)                    | 2,170 x 1,241 x 1,460       |                        |        |
| Weight                     | net                                   | (kg)                    | 350                         |                        |        |
|                            |                                       | (lbs)                   | 771.6                       |                        |        |

- 1) Test Condition of ARI Rated Cooling Capacity :  
Ambient:95°F , Air entering temperature : 80°F DB and 67°F WB
- 2) ARI standard  
210/240 or 360 for EER  
270 for Sound
- 3) Filters are standard supply.

## Figura A7

Dimensiones de la unidad manejadora de aire LG LK-C120BC00

### Dimensions

#### LK-C1209C00/BC00

##### UNIT Dimensions (Figure 1A)

Unit: inch(mm)

|       |                                       |
|-------|---------------------------------------|
| UNITS | 10RT                                  |
| H     | 48 <sup>6</sup> / <sub>7</sub> (1241) |
| I     | 55 <sup>1</sup> / <sub>3</sub> (1406) |
| J     | 85 <sup>3</sup> / <sub>7</sub> (2170) |
| K     | 7 <sup>3</sup> / <sub>32</sub> (180)  |
| L     | 28 <sup>1</sup> / <sub>4</sub> (724)  |
| M     | 4 (100)                               |

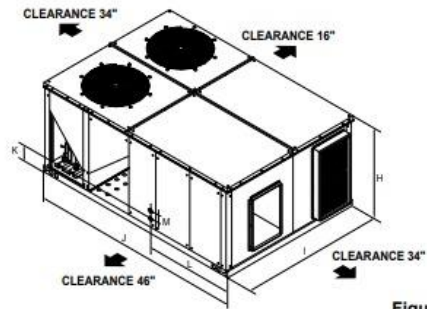


Figure 1A

##### HORIZONTAL FLOW APPLICATION (Figure 1B)

Unit: inch(mm)

|       |  |
|-------|--|
| UNITS | 10RT                                   |
| A     | 18 <sup>5</sup> / <sub>8</sub> (473)   |
| B     | 12 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> (316.5) |
| C     | 15 <sup>1</sup> / <sub>3</sub> (390)   |
| D     | 2 (53)                                 |
| E     | 4 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> (115)    |
| F     | 35 <sup>3</sup> / <sub>7</sub> (900)   |
| G     | 4 (100)                                |
| H     | 30 <sup>5</sup> / <sub>7</sub> (780)   |

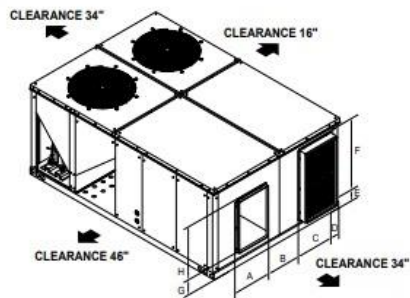


Figure 1B

##### DOWN FLOW APPLICATION (Figure 1C)

Unit: inch(mm)

|       |  |
|-------|--|
| UNITS | 10RT                                   |
| A     | 15 <sup>1</sup> / <sub>3</sub> (390)   |
| B     | 12 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> (316.5) |
| C     | 18 <sup>5</sup> / <sub>8</sub> (473)   |
| D     | 6 <sup>1</sup> / <sub>9</sub> (155)    |
| E     | 3 <sup>2</sup> / <sub>3</sub> (68)     |
| F     | 35 <sup>3</sup> / <sub>7</sub> (900)   |
| G     | 2 <sup>2</sup> / <sub>3</sub> (68)     |
| H     | 30 <sup>5</sup> / <sub>7</sub> (780)   |

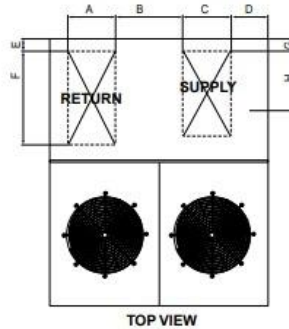


Figure 1C


**Figura A8**

*Propiedades absorbentes de la lana de vidrio en diferentes espesores (Black Theater® , 2018)*

| DESEMPEÑO ACÚSTICO              |          |                   |                                     |      |      |      |      |      |      |   |
|---------------------------------|----------|-------------------|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|---|
| PRODUCTO Y ESPESOR (A Mounting) | DENSIDAD |                   | FRECUENCIAS POR BANDA DE OCTAVA, Hz |      |      |      |      |      |      | RESISTENCIA TERMICA R-VALUE (1) (hr.ft <sup>2</sup> F /BTU) (R100 m <sup>2</sup> .°C/W) |
|                                 | pcf      | kg/m <sup>3</sup> | 125                                 | 250  | 500  | 1000 | 2000 | 4000 | NRC  |   |
| 1"                              | 3.0      | 48                | 0.06                                | 0.25 | 0.62 | 0.91 | 0.99 | 0.98 | 0.70 | 4.30 (77.59)  |
| 2"                              | 3.0      | 48                | 0.18                                | 0.71 | 1.12 | 1.12 | 1.03 | 1.00 | 1.00 | 8.60 (155.19)   |
| 1"                              | 6.0      | 96                | 0.30                                | 0.34 | 0.68 | 0.87 | 0.97 | 1.06 | 0.70 | 4.30 (77.59)  |
| 2"                              | 6.0      | 96                | 0.39                                | 0.63 | 1.06 | 1.13 | 1.09 | 1.10 | 1.00 | 8.60 (155.19)   |
| 4"                              | 2.0      | 32                | 0.61                                | 1.27 | 1.18 | 1.06 | 1.03 | 1.02 | 1.15 | 17.4 (306.3)  |

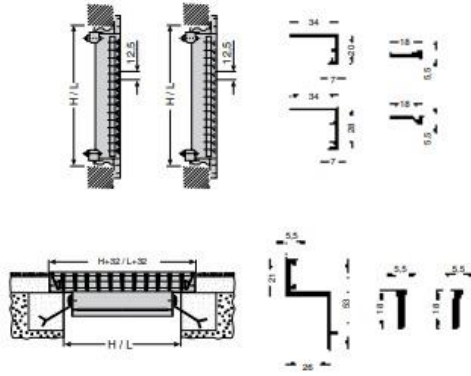
**Figura A9**

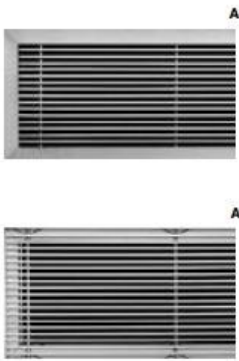
*Tabla de selección rápida rejillas de impulsión y de retorno (TROX España, 2018)*



**REJILLAS DE VENTILACIÓN**  
Rejillas de impulsión y retorno de lamas fijas a 0/15°

**AH · AF**





**AH**

**AF**

**+** Descripción

**◊** Ejecuciones

**✖ ✖** Secciones efectivas

**AH** Rejilla para techo o pared de lamas horizontales fijas, para impulsión 0° (Serie AH-0) ó 15° (Serie AH-15)

**AF** Rejilla para suelo de lamas horizontales fijas, para impulsión 0° (Serie AF-0) ó 15° (Serie AF-15)

**AH-A AF-A** Rejilla simple deflexión vertical sin compuerta de regulación

**AH-A-EF AF-A-EF** Rejilla simple deflexión vertical con filtro

**AH-AG AF-AG** Rejilla simple deflexión vertical con compuerta de regulación

**AH-D AF-D** Rejilla doble deflexión 1ª lama vertical sin compuerta de regulación

**AH-DG AF-DG** Rejilla doble deflexión 1ª lama vertical con compuerta de regulación

**Rejillas impulsión**

| H   | L     |       |       |       |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|     | 225   | 325   | 425   | 525   | 625   | 825   | 1.025 | 1.225 |
| 75  | 0,006 | 0,009 | 0,011 | 0,014 | 0,017 | 0,022 | 0,028 | 0,034 |
| 125 | 0,011 | 0,017 | 0,022 | 0,028 | 0,034 | 0,044 | 0,055 | 0,066 |
| 165 | 0,014 | 0,022 | 0,028 | 0,034 | 0,044 | 0,055 | 0,066 | 0,087 |
| 225 | 0,022 | 0,034 | 0,044 | 0,055 | 0,066 | 0,087 | 0,108 | 0,129 |
| 325 | -     | 0,055 | 0,066 | 0,081 | 0,096 | 0,129 | 0,169 | 0,193 |
| 425 | -     | -     | 0,087 | 0,108 | 0,129 | 0,169 | 0,214 | 0,256 |
| 525 | -     | -     | -     | 0,129 | 0,169 | 0,214 | 0,251 | 0,299 |

\* Los valores de las secciones efectivas están dados en m²

**Rejillas retorno**

| H   | L     |       |       |       |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|     | 225   | 325   | 425   | 525   | 625   | 825   | 1.025 | 1.225 |
| 75  | 0,004 | 0,006 | 0,009 | 0,011 | 0,013 | 0,017 | 0,021 | 0,026 |
| 125 | 0,009 | 0,013 | 0,017 | 0,021 | 0,026 | 0,033 | 0,041 | 0,049 |
| 165 | 0,011 | 0,017 | 0,021 | 0,026 | 0,033 | 0,041 | 0,049 | 0,066 |
| 225 | -     | 0,026 | 0,033 | 0,041 | 0,049 | 0,066 | 0,082 | 0,090 |
| 325 | -     | -     | 0,049 | 0,060 | 0,072 | 0,095 | 0,120 | 0,140 |
| 425 | -     | -     | -     | -     | 0,095 | 0,122 | 0,155 | 0,185 |
| 525 | -     | -     | -     | -     | -     | -     | 0,195 | 0,240 |

\* Los valores de las secciones efectivas están dados en m²

**H** en mm: Altura nominal de la rejilla

**L** en mm: Longitud nominal de la rejilla

**H** Detalles de montaje

Las dimensiones nominales L y H que figuran en las tablas corresponden al hueco que debe dejarse en obra cuando se utiliza marco de montaje. Para montaje directamente con tornillos vistos sin marco de montaje, el hueco sería L-14 mm y H-14 mm.

En el caso específico de las rejillas de suelo AF, la abertura responde a H+32 / L+32.

**TROX**

55

# Figura A10


Datos técnicos de impulsión con regulación abierta para caudales de 100 a 2000 m<sup>3</sup>/h  
(TROX España, 2018)

| UNIDADES TERMINALES DE AIRE |                 | AH · AF   |      | REJILLAS DE VENTILACIÓN |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |      |      | TABLAS DE SELECCIÓN RÁPIDA |      |      |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
|-----------------------------|-----------------|---|------|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|----------------------------|------|------|-------|-------|-----|-----|-----|-------|-------|-----|-------|-------|
|                             |                 | Rejillas de impulsión y retorno de lamas fijas a 0/15°                        |      |                         |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |      |      |                            |      |      |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
|                             |                 | Datos técnicos impulsión con regulación abierta                               |      |                         |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |      |      |                            |      |      |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
|                             |                 | Series AH · AF (Rango de caudales de impulsión 100 a 2.000 m <sup>3</sup> /h) |      |                         |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |      |      |                            |      |      |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
| Caudal m <sup>3</sup> /h    | H               |   |      |                         |      |      |      |      |      | L    |      |      |      |       |       |      |      |                            |      |      |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
|                             | 525             | 425   | 325  | 225                     | 165  | 125  | 75   | 225  | 325  | 425  | 525  | 625  | 825  | 1.025 | 1.225 | 325  | 425  | 525                        | 625  | 825  | 1.025 | 1.225 | 525 | 625 | 825 | 1.025 | 1.225 | 825 | 1.025 | 1.225 |
| 100                         | V <sub>er</sub> | 4,6   | 3,1  | 2,5                     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |      |      |                            |      |      |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
|                             | Δp              | 17  | 7    | 5                       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |      |      |                            |      |      |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
|                             | dB(A)           | 21  | <15  | <15                     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |      |      |                            |      |      |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
|                             | ALC             | 4,6   | 3,8  | 3,4                     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |      |      |                            |      |      |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
| 200                         | V <sub>er</sub> | 9,3   | 6,2  | 5,1                     | 4,0  | 3,3  | 2,5  |      |      |      |      |      |      |       |       |      |      |                            |      |      |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
|                             | Δp              | 66  | 29   | 20                      | 12   | 8    | 5    |      |      |      |      |      |      |       |       |      |      |                            |      |      |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
|                             | dB(A)           | 39  | 30   | 25                      | 20   | 15   | <15  |      |      |      |      |      |      |       |       |      |      |                            |      |      |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
|                             | ALC             | 9,2   | 7,5  | 6,8                     | 6,0  | 5,5  | 4,8  |      |      |      |      |      |      |       |       |      |      |                            |      |      |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
| 300                         | V <sub>er</sub> | 9,3   | 7,6  | 6,0                     | 4,9  | 3,8  | 3,0  | 2,5  |      |      |      |      |      |       |       |      |      |                            |      |      |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
|                             | Δp              | 66  | 44   | 27                      | 19   | 11   | 7,0  | 5,0  |      |      |      |      |      |       |       |      |      |                            |      |      |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
|                             | dB(A)           | 40  | 36   | 31                      | 27   | 20   | 15   | <15  |      |      |      |      |      |       |       |      |      |                            |      |      |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
|                             | ALC             | 11,3  | 10,2 | 9,1                     | 8,2  | 7,2  | 6,4  | 5,8  |      |      |      |      |      |       |       |      |      |                            |      |      |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
| 400                         | V <sub>er</sub> |   |      |                         | 7,9  | 6,5  | 5,1  | 4,0  | 3,3  | 2,5  |      |      |      |       |       |      |      |                            |      |      |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
|                             | Δp              |   |      |                         | 49   | 33   | 20   | 12   | 8    | 5,0  |      |      |      |       |       |      |      |                            |      |      |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
|                             | dB(A)           |   |      |                         | 38   | 34   | 28   | 23   | 17   | <15  |      |      |      |       |       |      |      |                            |      |      |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
|                             | ALC             |   |      |                         | 12,1 | 11,0 | 9,6  | 8,5  | 7,8  | 6,8  |      |      |      |       |       |      |      |                            |      |      |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
| 500                         | V <sub>er</sub> |   |      |                         |      | 8,2  | 6,3  | 5,0  | 4,1  | 3,2  | 2,5  |      |      |       |       |      |      |                            |      |      |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
|                             | Δp              |   |      |                         |      | 52   | 31   | 19   | 13   | 8    | 5,0  |      |      |       |       |      |      |                            |      |      |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
|                             | dB(A)           |   |      |                         |      | 40   | 34   | 29   | 23   | 18   | <15  |      |      |       |       |      |      |                            |      |      |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
|                             | ALC             |   |      |                         |      | 13,7 | 12,1 | 10,7 | 9,7  | 8,5  | 7,6  |      |      |       |       |      |      |                            |      |      |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
| 600                         | V <sub>er</sub> |   |      |                         |      |      | 7,6  | 6,0  | 4,9  | 3,8  | 3,0  | 2,5  |      |       |       |      |      |                            |      |      |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
|                             | Δp              |   |      |                         |      |      | 44   | 27   | 19   | 11   | 7    | 5    |      |       |       |      |      |                            |      |      |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
|                             | dB(A)           |   |      |                         |      |      | 39   | 34   | 29   | 22   | 17   | <15  |      |       |       |      |      |                            |      |      |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
|                             | ALC             |   |      |                         |      |      | 14,5 | 12,8 | 11,6 | 10,2 | 9,1  | 8,3  |      |       |       |      |      |                            |      |      |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
| 800                         | V <sub>er</sub> |   |      |                         |      |      |      | 7,9  | 6,5  | 5,1  | 4,0  | 3,4  | 2,7  | 2,6   | 2,3   |      |      |                            |      |      |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
|                             | Δp              |   |      |                         |      |      |      | 49   | 33   | 20   | 13   | 9    | 6    | 5     | 4     |      |      |                            |      |      |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
|                             | dB(A)           |   |      |                         |      |      |      | 41   | 36   | 30   | 25   | 21   | 16   | 16    | 15    |      |      |                            |      |      |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
|                             | ALC             |   |      |                         |      |      |      | 17,1 | 15,5 | 13,6 | 12,2 | 11,1 | 10,0 | 9,7   | 9,2   |      |      |                            |      |      |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
| 1.000                       | V <sub>er</sub> |   |      |                         |      |      |      |      | 8,2  | 6,3  | 5,1  | 4,2  | 3,4  | 3,2   | 2,9   | 2,6  |      |                            |      |      |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
|                             | Δp              |   |      |                         |      |      |      |      | 52   | 31   | 20   | 14   | 9    | 8     | 6     | 5    |      |                            |      |      |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
|                             | dB(A)           |   |      |                         |      |      |      |      | 42   | 36   | 31   | 27   | 22   | 22    | 20    | 17   |      |                            |      |      |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
|                             | ALC             |   |      |                         |      |      |      |      | 19,4 | 17,0 | 15,2 | 13,9 | 12,6 | 12,1  | 11,5  | 10,9 |      |                            |      |      |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
| 1.250                       | V <sub>er</sub> |   |      |                         |      |      |      |      |      | 7,9  | 6,3  | 5,3  | 4,3  | 4,0   | 3,6   | 3,2  | 2,7  |                            |      |      |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
|                             | Δp              |   |      |                         |      |      |      |      |      | 48   | 31   | 21   | 14   | 12    | 10    | 8    | 6    |                            |      |      |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
|                             | dB(A)           |   |      |                         |      |      |      |      |      | 42   | 37   | 34   | 29   | 28    | 26    | 23   | 19   |                            |      |      |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
|                             | ALC             |   |      |                         |      |      |      |      |      | 21,3 | 19,1 | 17,4 | 15,7 | 15,1  | 14,4  | 13,6 | 12,4 |                            |      |      |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
| 1.500                       | V <sub>er</sub> |   |      |                         |      |      |      |      |      |      | 9,5  | 7,6  | 6,3  | 5,1   | 4,8   | 4,3  | 3,9  | 3,2                        | 2,5  | 2,2  |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
|                             | Δp              |   |      |                         |      |      |      |      |      |      | 69   | 44   | 31   | 20    | 18    | 15   | 12   | 8                          | 5    | 4    |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
|                             | dB(A)           |   |      |                         |      |      |      |      |      |      | 47   | 42   | 38   | 33    | 33    | 31   | 28   | 24                         | 18   | 17   |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
|                             | ALC             |   |      |                         |      |      |      |      |      |      | 25,6 | 22,9 | 20,9 | 18,8  | 18,2  | 17,3 | 16,3 | 14,9                       | 13,0 | 12,2 |       |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
| 1.750                       | V <sub>er</sub> |   |      |                         |      |      |      |      |      |      |      | 8,8  | 7,4  | 6,0   | 5,6   | 5,1  | 4,5  | 3,8                        | 2,9  | 2,5  | 2,3   |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
|                             | Δp              |   |      |                         |      |      |      |      |      |      |      | 60   | 42   | 28    | 24    | 20   | 16   | 11                         | 6    | 5    | 4     |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
|                             | dB(A)           |   |      |                         |      |      |      |      |      |      |      | 46   | 42   | 38    | 37    | 35   | 32   | 28                         | 22   | 19   | 18    |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
|                             | ALC             |   |      |                         |      |      |      |      |      |      |      | 26,7 | 24,4 | 22,0  | 21,2  | 20,2 | 19,0 | 17,4                       | 15,2 | 14,2 | 13,5  |       |     |     |     |       |       |     |       |       |
| 2.000                       | V <sub>er</sub> |   |      |                         |      |      |      |      |      |      |      |      | 8,4  | 6,9   | 6,4   | 5,8  | 5,1  | 4,3                        | 3,3  | 2,9  | 2,6   | 2,2   |     |     |     |       |       |     |       |       |
|                             | Δp              |   |      |                         |      |      |      |      |      |      |      |      | 55   | 36    | 32    | 26   | 20   | 14                         | 8    | 6    | 5     | 4     |     |     |     |       |       |     |       |       |
|                             | dB(A)           |   |      |                         |      |      |      |      |      |      |      |      | 45   | 42    | 41    | 39   | 35   | 32                         | 25   | 23   | 20    | 18    |     |     |     |       |       |     |       |       |
|                             | ALC             |   |      |                         |      |      |      |      |      |      |      |      | 27,8 | 25,1  | 24,2  | 23,1 | 21,8 | 19,9                       | 17,4 | 16,3 | 15,5  | 14,3  |     |     |     |       |       |     |       |       |

H en mm: Altura nominal de la rejilla  
L en mm: Longitud nominal de la rejilla  
V<sub>er</sub> en m/s: Velocidad efectiva de salida  
dB(A): Nivel de potencia sonora  
Δp en Pa: Pérdida de carga  
ALC en m: Alcance de la vena de aire a una velocidad residual de 0.5 m/s con lamas a 0° y efecto techo

Figura A11

Datos técnicos de impulsión con regulación abierta y efecto techo para caudales de 2250 a 6000 m<sup>3</sup>/h (TROX España, 2018)

| TABLAS DE ELECCIÓN RÁPIDA  |                 | REJILLAS DE VENTILACIÓN                                 |      |      |      |      |      |      |       |       |      | AH · AF                     |       |       |
|--|-----------------|---|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|-----------------------------|-------|-------|
|  |                 | Rejillas de impulsión y retorno de lamas fijas a 0°/15° |      |      |      |      |      |      |       |       |      |                             |       |       |
|  <b>Datos técnicos impulsión con regulación abierta y efecto techo</b><br>Series AH · AF (Rango de caudales de impulsión 2.250 a 6.000 m <sup>3</sup> /h) |                 |   |      |      |      |      |      |      |       |       |      | UNIDADES TERMINALES DE AIRE |       |       |
| Caudal m <sup>3</sup> /h   | H               |   | L    |      |      |      |      |      |       |       |      |                             |       |       |
|  | 525             | 425   | 525  | 425  | 625  | 525  | 625  | 825  | 1.025 | 1.225 | 825  | 1.025                       | 1.225 | 1.225 |
| 2.250  | V <sub>ef</sub> | 9,5   | 7,7  | 7,2  | 6,5  | 5,8  | 4,8  | 3,7  | 3,2   | 2,9   | 2,5  |                             |       |       |
|  | Δp              | 69  | 46   | 40   | 33   | 26   | 18   | 11   | 8     | 7     | 5    |                             |       |       |
|  | dB(A)           | 49  | 44   | 44   | 42   | 39   | 35   | 29   | 26    | 23    | 20   |                             |       |       |
|  | ALC             | 31,3  | 28,3 | 27,3 | 26,0 | 24,5 | 22,4 | 19,6 | 18,3  | 17,4  | 16,1 |                             |       |       |
| 2.500  | V <sub>ef</sub> |   | 8,6  | 8,0  | 7,2  | 6,4  | 5,4  | 4,1  | 3,6   | 3,2   | 2,8  | 2,3                         |       |       |
|  | Δp              |   | 57   | 49   | 40   | 32   | 22   | 13   | 10    | 8     | 6    | 4                           |       |       |
|  | dB(A)           |   | 47   | 46   | 45   | 42   | 38   | 31   | 29    | 26    | 23   | 19                          |       |       |
|  | ALC             |   | 31,4 | 30,3 | 28,8 | 27,2 | 24,9 | 21,7 | 20,3  | 19,3  | 17,8 | 16,3                        |       |       |
| 2.750  | V <sub>ef</sub> |   | 9,4  | 8,8  | 8,0  | 7,1  | 5,9  | 4,5  | 4,0   | 3,6   | 3,0  | 2,6                         |       |       |
|  | Δp              |   | 69   | 60   | 49   | 39   | 27   | 16   | 12    | 10    | 7    | 5                           |       |       |
|  | dB(A)           |   | 50   | 49   | 47   | 44   | 40   | 34   | 32    | 29    | 25   | 21                          |       |       |
|  | ALC             |   | 34,5 | 33,3 | 31,7 | 29,9 | 27,4 | 23,9 | 22,4  | 21,3  | 19,6 | 18,0                        |       |       |
| 3.000  | V <sub>ef</sub> |   |      |      | 8,7  | 7,7  | 6,5  | 4,9  | 4,3   | 3,9   | 3,3  | 2,8                         |       |       |
|  | Δp              |   |      |      | 58   | 46   | 32   | 19   | 14    | 12    | 9    | 6                           |       |       |
|  | dB(A)           |   |      |      | 49   | 46   | 43   | 37   | 34    | 31    | 27   | 23                          |       |       |
|  | ALC             |   |      |      | 34,6 | 32,6 | 29,9 | 26,1 | 24,4  | 23,2  | 21,4 | 19,6                        |       |       |
| 3.250  | V <sub>ef</sub> |   |      |      |      | 8,4  | 7,0  | 5,3  | 4,7   | 4,2   | 3,6  | 3,0                         |       |       |
|  | Δp              |   |      |      |      | 54   | 38   | 22   | 17    | 14    | 10   | 7                           |       |       |
|  | dB(A)           |   |      |      |      | 48   | 45   | 39   | 37    | 33    | 30   | 25                          |       |       |
|  | ALC             |   |      |      |      | 35,4 | 32,3 | 28,3 | 26,4  | 25,1  | 23,2 | 21,2                        |       |       |
| 3.500  | V <sub>ef</sub> |   |      |      |      | 9,0  | 7,5  | 5,8  | 5,0   | 4,5   | 3,9  | 3,3                         |       |       |
|  | Δp              |   |      |      |      | 63   | 44   | 26   | 20    | 16    | 12   | 8                           |       |       |
|  | dB(A)           |   |      |      |      | 50   | 47   | 41   | 38    | 35    | 32   | 27                          |       |       |
|  | ALC             |   |      |      |      | 38,1 | 34,8 | 30,4 | 28,5  | 27,0  | 25,0 | 22,9                        |       |       |
| 3.750  | V <sub>ef</sub> |   |      |      |      |      | 8,1  | 6,2  | 5,4   | 4,9   | 4,2  | 3,5                         |       |       |
|  | Δp              |   |      |      |      |      | 50   | 29   | 23    | 18    | 13   | 9                           |       |       |
|  | dB(A)           |   |      |      |      |      | 49   | 43   | 40    | 38    | 34   | 29                          |       |       |
|  | ALC             |   |      |      |      |      | 37,3 | 32,6 | 30,5  | 29,0  | 26,8 | 24,5                        |       |       |
| 4.000  | V <sub>ef</sub> |   |      |      |      |      | 8,6  | 6,6  | 5,8   | 5,2   | 4,4  | 3,7                         |       |       |
|  | Δp              |   |      |      |      |      | 57   | 33   | 26    | 21    | 15   | 11                          |       |       |
|  | dB(A)           |   |      |      |      |      | 50   | 44   | 42    | 39    | 36   | 31                          |       |       |
|  | ALC             |   |      |      |      |      | 39,8 | 34,8 | 32,5  | 30,9  | 28,5 | 26,2                        |       |       |
| 4.500  | V <sub>ef</sub> |   |      |      |      |      |      | 7,4  | 6,5   | 5,8   | 5,0  | 4,2                         |       |       |
|  | Δp              |   |      |      |      |      |      | 42   | 32    | 26    | 19   | 14                          |       |       |
|  | dB(A)           |   |      |      |      |      |      | 47   | 45    | 42    | 39   | 34                          |       |       |
|  | ALC             |   |      |      |      |      |      | 39,1 | 36,6  | 34,8  | 32,1 | 29,4                        |       |       |
| 5.000  | V <sub>ef</sub> |   |      |      |      |      |      |      | 8,2   | 7,2   | 6,5  | 5,5                         | 4,6   |       |
|  | Δp              |   |      |      |      |      |      |      | 52    | 40    | 33   | 24                          | 17    |       |
|  | dB(A)           |   |      |      |      |      |      |      | 50    | 48    | 45   | 42                          | 37    |       |
|  | ALC             |   |      |      |      |      |      |      | 43,5  | 40,7  | 38,6 | 35,7                        | 32,7  |       |
| 5.500  | V <sub>ef</sub> |   |      |      |      |      |      |      |       | 7,9   | 7,1  | 6,1                         | 5,1   |       |
|  | Δp              |   |      |      |      |      |      |      |       | 48    | 39   | 29                          | 20    |       |
|  | dB(A)           |   |      |      |      |      |      |      |       | 50    | 47   | 44                          | 39    |       |
|  | ALC             |   |      |      |      |      |      |      |       | 44,8  | 42,5 | 39,2                        | 36,0  |       |
| 6.000  | V <sub>ef</sub> |   |      |      |      |      |      |      |       |       | 7,8  | 6,6                         | 5,6   |       |
|  | Δp              |   |      |      |      |      |      |      |       |       | 47   | 34                          | 24    |       |
|  | dB(A)           |   |      |      |      |      |      |      |       |       | 50   | 46                          | 42    |       |
|  | ALC             |   |      |      |      |      |      |      |       |       | 46,4 | 42,8                        | 39,2  |       |

**H** en mm  
Altura nominal de la rejilla

**L** en mm  
Longitud nominal de la rejilla

**V<sub>ef</sub>** en m/s  
Velocidad efectiva de salida

**dB(A)**  
Nivel de potencia sonora

**Δp** en Pa  
Pérdida de carga

**ALC** en m  
Alcance de la vena de aire a una velocidad residual de 0,5 m/s con lamas a 0° y efecto techo

**Tabla A1**

*Correcciones del espectro sobre Lw para ventiladores (Arau & Puchades, 1999)*

| Correcciones del espectro sobre Lw |    |     |     |     |      |      |      |    |    |
|------------------------------------|----|-----|-----|-----|------|------|------|----|----|
| Tipo ventilador                    | 63 | 125 | 250 | 300 | 1000 | 2000 | 4000 | Hz |    |
| Ventilador axial                   | -5 | -5  | -6  | -7  | -8   | -10  | -13  |    | dB |
| Ventilador centrifugo              | -2 | -7  | -12 | -17 | -22  | -27  | -32  |    | dB |

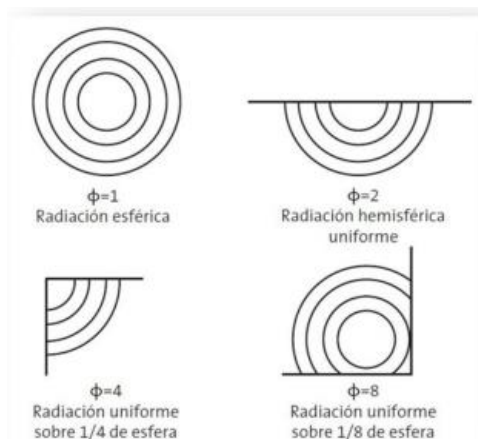
**Tabla A2**

*Correcciones de nivel de potencia sonora generada por la velocidad del aire en ductos (Arau & Puchades, 1999)*

|                 | 63 Hz | 125 Hz | 250 Hz | 300 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |
|-----------------|-------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| Corrección [dB] | -5    | -5     | -6     | -7     | -8      | -10     | -13     |

**Figura A12**

*Valor del factor de directividad de una fuente sonora (Bermejo, 2016)*





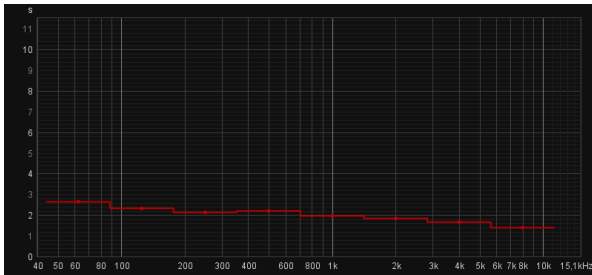
## Apéndice B. Tiempo de reverberación medido en el auditorio

### Figura B1a

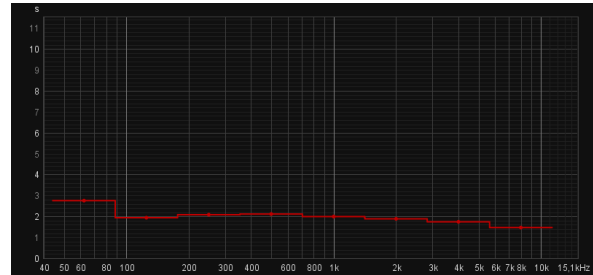
*Registro del tiempo de reverberación en la zona frontal izquierda del auditorio.*

### Figura B1b

*Registro del tiempo de reverberación en la zona frontal derecha del auditorio.*



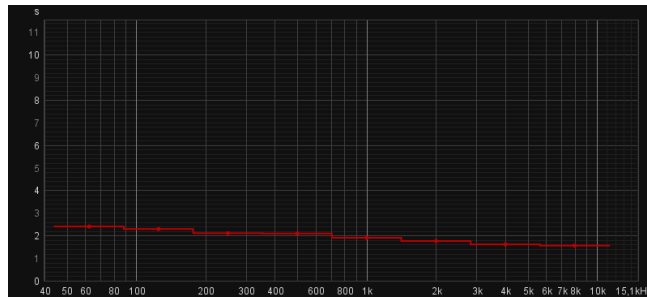
(a)



(b)

### Figura B2

*Registro del tiempo de reverberación en la zona central del auditorio.*

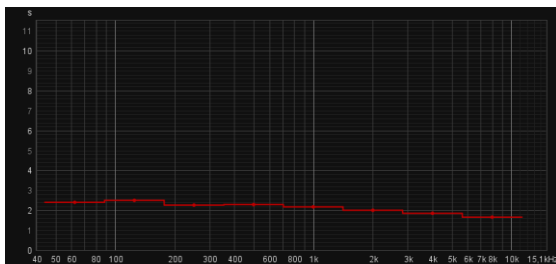


### Figura B3a

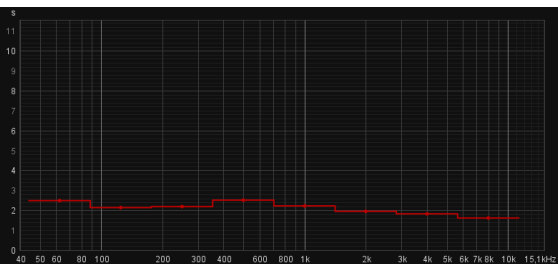
*Registro del tiempo de reverberación en la zona posterior izquierda del auditorio.*

### Figura B3b

*Registro del tiempo de reverberación en la zona posterior derecha del auditorio.*



(a)

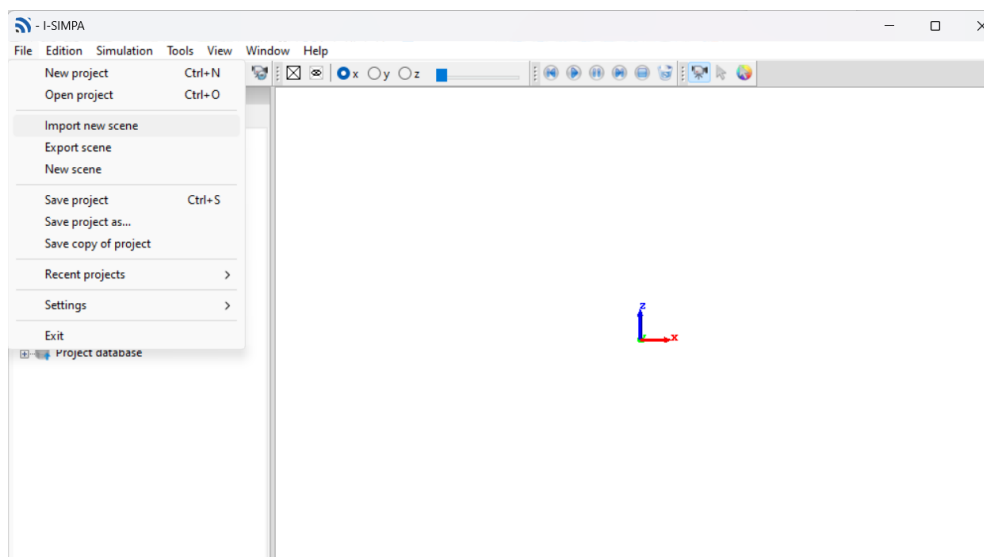


(b)

## Apéndice C. Proceso de simulación de tiempo de reverberación

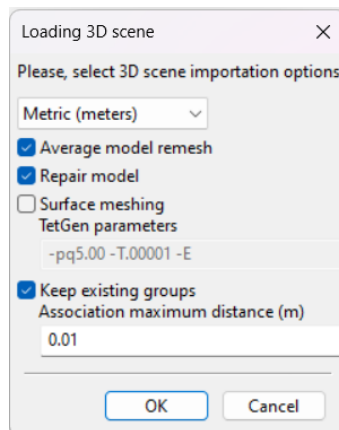
Para la obtención del cálculo de tiempo de reverberación se utilizó el programa I-SIMPA donde el proceso a seguir para el modelamiento de la zona o recinto a analizar es el siguiente.

1. Una vez exportado el modelo en formato .3ds desde SketchUp se procede a abrir la aplicación I-SIMPA y se importa el archivo haciendo clic en la pestaña *File*, y posteriormente dando clic a *Import new scene*.



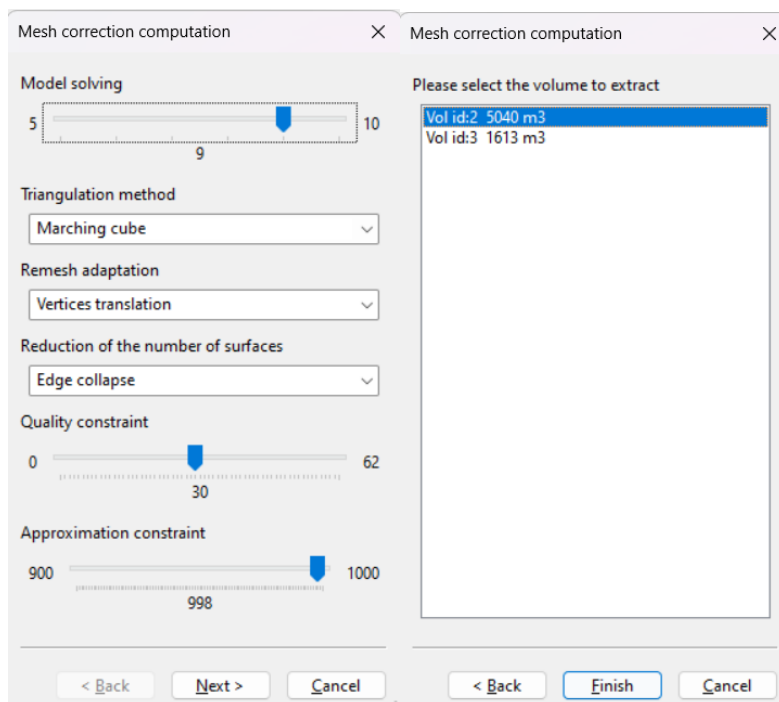
**Figura C1 Importación de modelo de auditorio al programa I-SIMPA**

2. Se procede a abrir el archivo .3ds en I-SIMPA para posteriormente abrirse la siguiente ventana, donde se deberá escoger las opciones de *Average model remesh* y *repair model*, esto con la finalidad de que el programa repare y cierre el modelo importado, para que así no ocurra ningún error en la simulación.



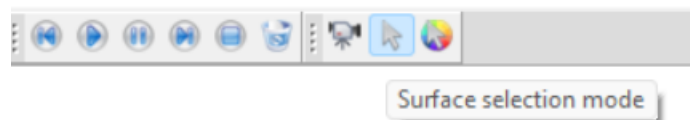
**Figura C2 Configuración del mallado y reparación del modelo**

3. Luego de dar clic en *ok*, aparecerá una ventana que indicará que tan preciso se construirá el mallado y reparación del modelo en cuestión. En este caso se escoge un valor de 9 en el apartado *Model solving*, con la finalidad de no exceder los recursos computacionales y se procede a aceptar el mallado dando clic en *Next* y posteriormente en *Finish*.



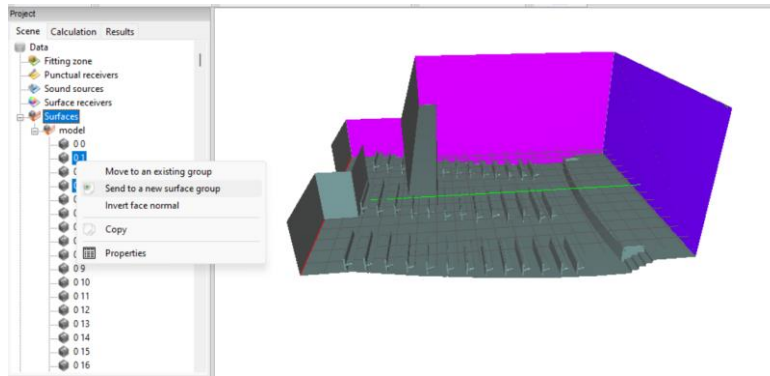
**Figura C3 Configuración de parámetros del mallado**

- Finalizado el mallado del recinto se procede a seleccionar y separar las áreas superficiales del modelo del auditorio dependiendo del material del que están constituidas, utilizando la opción *Surface selection mode* ubicada en la parte superior derecha del programa.



**Figura C4 Cinta de opciones y herramientas**

- Para seleccionar una superficie se procede a realizar doble clic izquierdo sobre la misma o si se desea seleccionar múltiples caras, se deberá mantener presionada la tecla Ctrl + clic izquierdo. Una vez seleccionada la cara se agrupará dicha sección en una carpeta diferente en el apartado de *Surface*, ubicado en el lado izquierdo del programa, haciendo clic izquierdo sobre el número de cara sombreado y escogiendo la opción *Send to a new Surface group*. Esta separación se realiza con el fin de colocar a cada parte del auditorio su respectivo coeficiente de fono absorción.



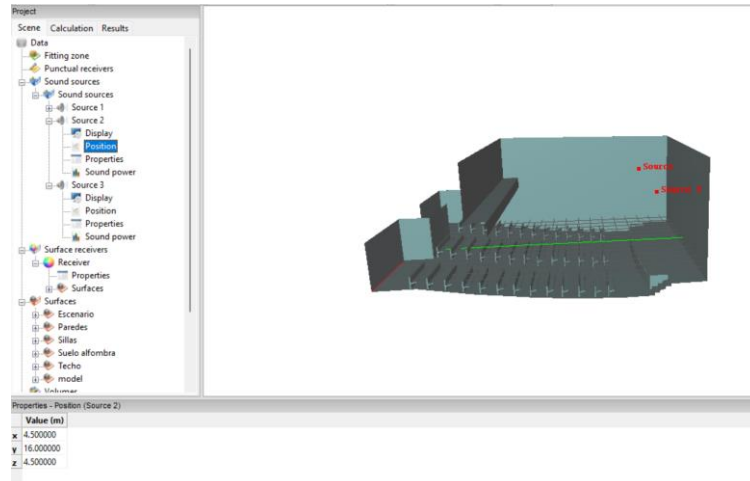
**Figura C5 Selección y agrupación de áreas superficiales**

6. Se procede a colocar las fuentes de sonido, haciendo clic en el apartado *de Sound sources*. Haciendo clic derecho agregamos una nueva fuente de sonido donde se le agregará una potencia sonora haciendo clic en *Sound power* y en la parte inferior del programa, en la pestaña propiedades se colocará la potencia sonora en este caso 100 dB.



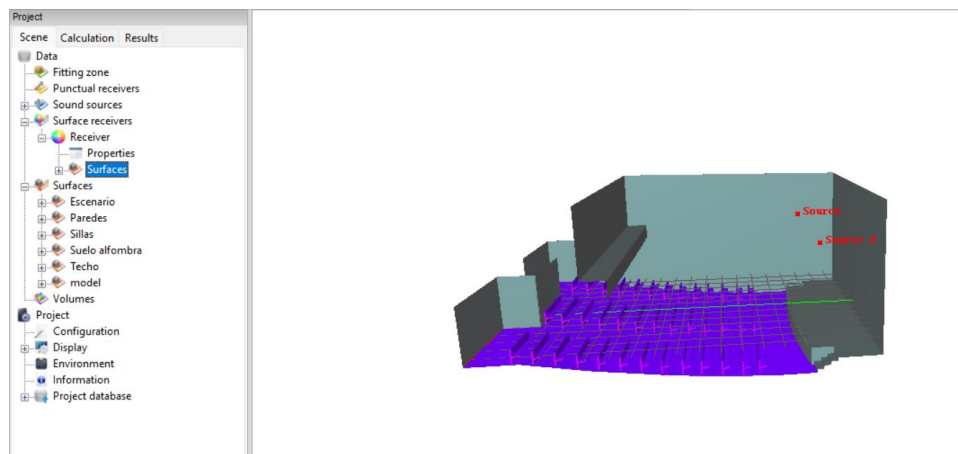
**Figura C6 Colocación de fuente de sonido y potencia sonora**

7. Una vez agregadas las fuentes de sonido se procede a ubicarlas de manera que asemeje su posición a como están distribuidos los parlantes en el auditorio, esto se consigue en el apartado de *Position* y en la parte inferior se colocan las coordenadas de cada fuente.



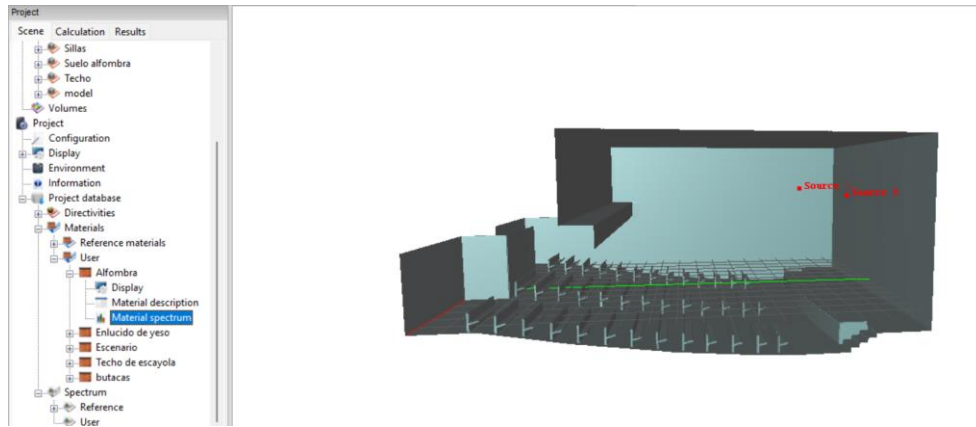
**Figura C7 Posicionamiento de fuentes de sonido**

8. Para finalizar con el modelamiento del auditorio, se escoge el área de escucha en el apartado de *Surface receiver*, haciendo clic derecho y escogiendo la opción *New scene receiver*. Donde se seleccionarán las áreas del piso y las butacas, que es donde estará el público del auditorio.



**Figura C8 Selección de área de escucha**

9. En el apartado de *project database*, se hace clic en la carpeta *Materials*. Una vez abierta esta carpeta se hace clic derecho y se agrega un nuevo material al cual se le agregara el coeficiente de absorción haciendo clic en el apartado de *Material spectrum*.

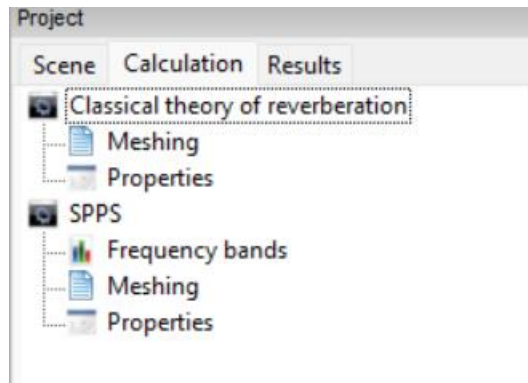


**Figura C9** Añadido de materiales que componen el auditorio

| Properties - Material spectrum (Alfombra) |            |           |                          |           |               |
|---|------------|-----------|--------------------------|-----------|---------------|
|   | Absorption | Diffusion | Transmission             | Loss (dB) | Diffusion law |
| 50 Hz                                     | 0.00       | 0.00      | <input type="checkbox"/> | 0.0       | Specular      |
| 63 Hz                                     | 0.00       | 0.00      | <input type="checkbox"/> | 0.0       | Specular      |
| 80 Hz                                     | 0.00       | 0.00      | <input type="checkbox"/> | 0.0       | Specular      |
| 100 Hz                                    | 0.00       | 0.00      | <input type="checkbox"/> | 0.0       | Specular      |
| 125 Hz                                    | 0.03       | 0.00      | <input type="checkbox"/> | 0.0       | Specular      |
| 160 Hz                                    | 0.00       | 0.00      | <input type="checkbox"/> | 0.0       | Specular      |
| 200 Hz                                    | 0.00       | 0.00      | <input type="checkbox"/> | 0.0       | Specular      |
| 250 Hz                                    | 0.05       | 0.00      | <input type="checkbox"/> | 0.0       | Specular      |
| 315 Hz                                    | 0.00       | 0.00      | <input type="checkbox"/> | 0.0       | Specular      |
| 400 Hz                                    | 0.00       | 0.00      | <input type="checkbox"/> | 0.0       | Specular      |
| 500 Hz                                    | 0.09       | 0.00      | <input type="checkbox"/> | 0.0       | Specular      |

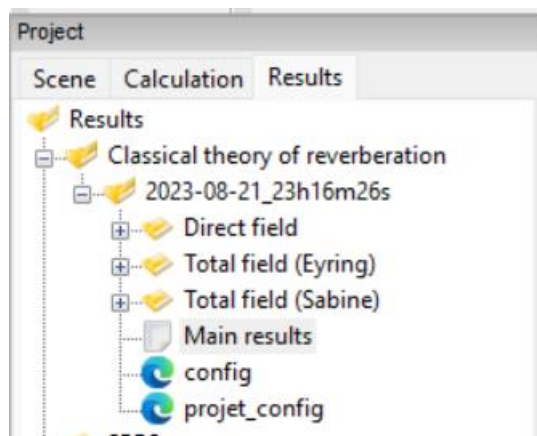
**Figura C10** Configuración de coeficiente de fono absorción para cada material añadido

10. Completados todos los datos para la simulación, en el apartado de proyecto damos clic a la pestaña *Calculation, classical theory of reverberation* y damos clic derecho y seleccionamos la opción *Run simulation*.



**Figura C11 Puesta en marcha de la simulación**

11. Hacemos clic en la pestaña *Results* y abrimos la carpeta con la fecha y hora de ejecución de la simulación. Se realiza doble clic izquierdo sobre el apartado de *Main results* y se desplegará una ventana que mostrará el tiempo de reverberación en las diferentes frecuencias antes añadidas.



**Figura C12 Pestaña de resultados de la simulación**



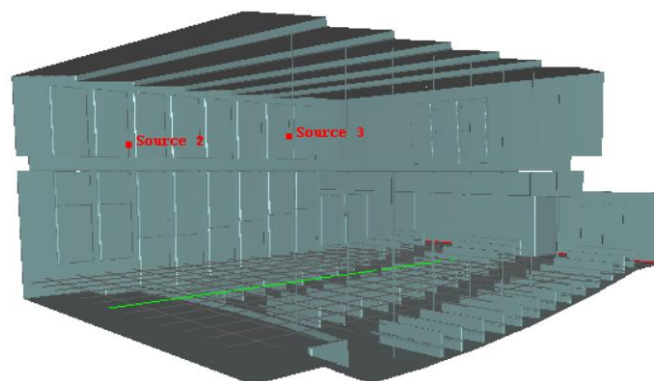
Spreadsheet - ..lassical theory of reverberation\2023-08-21\_23h16m26s\Main results.gabe

Main results X

|          | A_Sabine<br>mÁ² | TR_Sabine<br>s | L_Sabine<br>dB | A_Eyring<br>mÁ² | TR_Eyring<br>s | L_Eyring<br>dB |
|----------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|
| 50 Hz    | 0.00            | 2266.42        | 85.6           | -0.00           | 2266.42        | 85.6           |
| 63 Hz    | 0.00            | 1445.19        | 84.6           | -0.00           | 1445.19        | 84.6           |
| 80 Hz    | 0.00            | 914.29         | 83.6           | -0.00           | 914.29         | 83.6           |
| 100 Hz   | 0.00            | 602.20         | 82.8           | -0.00           | 602.20         | 82.8           |
| 125 Hz   | 109.03          | 2.44           | 59.9           | 114.25          | 2.33           | 59.7           |
| 160 Hz   | 0.00            | 263.84         | 81.2           | -0.00           | 263.84         | 81.2           |
| 200 Hz   | 0.00            | 185.52         | 80.7           | -0.00           | 185.52         | 80.7           |
| 250 Hz   | 110.97          | 2.37           | 62.8           | 116.39          | 2.27           | 62.6           |
| 315 Hz   | 0.00            | 101.49         | 80.1           | -0.00           | 101.49         | 80.1           |
| 400 Hz   | 0.00            | 79.04          | 80.0           | -0.00           | 79.04          | 80.0           |
| 500 Hz   | 115.94          | 2.23           | 65.5           | 121.88          | 2.13           | 65.3           |
| 630 Hz   | 0.00            | 54.15          | 80.4           | -0.00           | 54.15          | 80.4           |
| 800 Hz   | 0.00            | 45.29          | 80.6           | -0.00           | 45.29          | 80.6           |
| 1000 Hz  | 135.36          | 1.88           | 67.8           | 143.53          | 1.78           | 67.5           |
| 1250 Hz  | 0.00            | 30.98          | 80.9           | -0.00           | 30.98          | 80.9           |
| 1600 Hz  | 0.00            | 23.75          | 80.8           | -0.00           | 23.75          | 80.8           |
| 2000 Hz  | 140.06          | 1.73           | 70.4           | 148.85          | 1.64           | 70.2           |
| 2500 Hz  | 0.00            | 12.97          | 80.2           | -0.00           | 12.97          | 80.2           |
| 3150 Hz  | 0.00            | 8.98           | 79.6           | -0.00           | 8.98           | 79.6           |
| 4000 Hz  | 174.25          | 1.22           | 71.9           | 188.14          | 1.15           | 71.6           |
| 5000 Hz  | 0.00            | 4.00           | 78.0           | -0.00           | 4.00           | 78.0           |
| 6300 Hz  | 0.00            | 2.62           | 77.2           | -0.00           | 2.62           | 77.2           |
| 8000 Hz  | 0.00            | 1.68           | 76.3           | -0.00           | 1.68           | 76.3           |
| 10000 Hz | 0.00            | 1.11           | 75.5           | -0.00           | 1.11           | 75.5           |
| 12500 Hz | 0.00            | 0.74           | 74.7           | -0.00           | 0.74           | 74.7           |
| 16000 Hz | 0.00            | 0.49           | 73.9           | -0.00           | 0.49           | 73.9           |
| 20000 Hz | 0.00            | 0.34           | 73.3           | -0.00           | 0.34           | 73.3           |
| Global   | NaN             | NaN            | 94.0           | NaN             | NaN            | 94.0           |

**Figura C13 Resultados de la simulación**

12. Para el análisis de la situación planteada, se siguieron los pasos anteriores aplicados al modelo solución.



**Figura C14 Análisis de la solución en I-SIMPA**

Spreadsheet - ..lassical theory of reverberation\2023-08-27\_02h16m46s\Main results.gabe

Main results ×

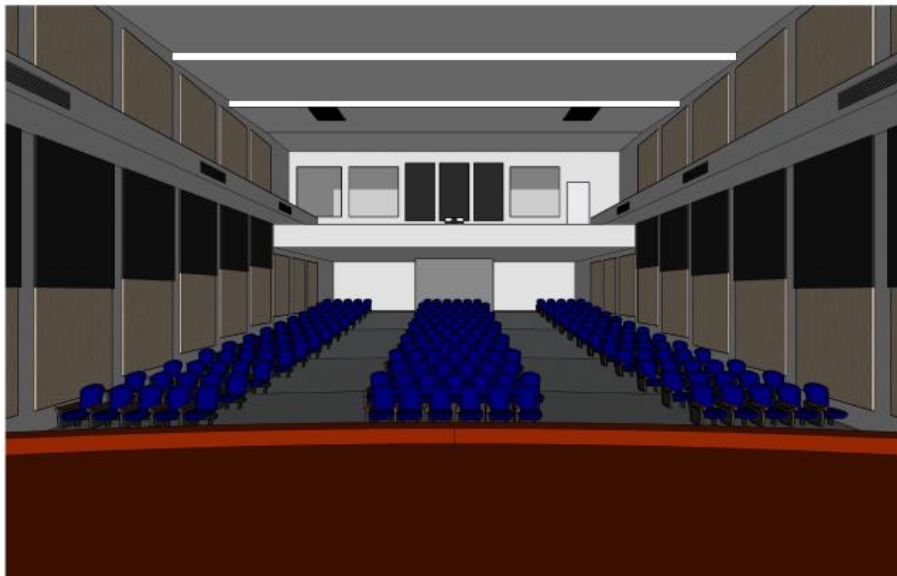
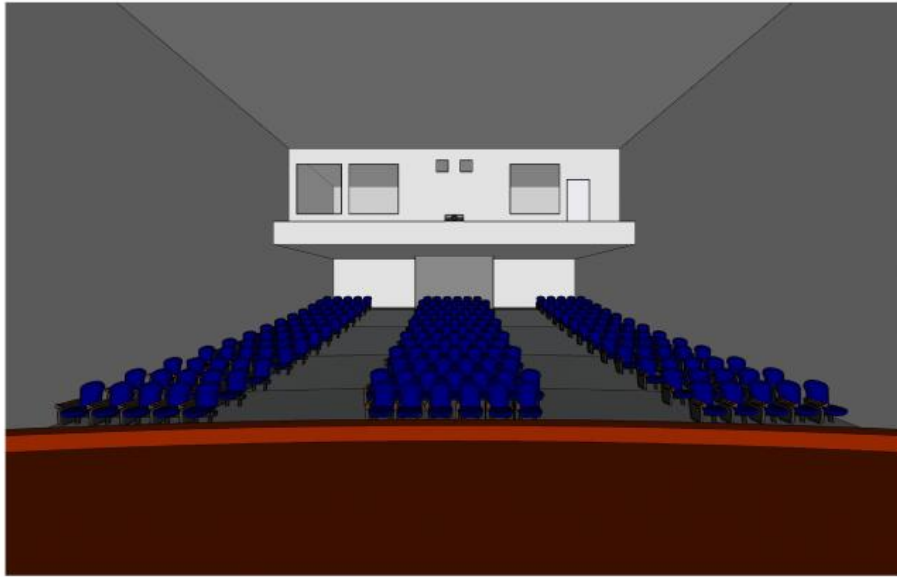
|          | A_Sabine<br>m <sup>2</sup> | TR_Sabine<br>s | L_Sabine<br>dB | A_Eyring<br>m <sup>2</sup> | TR_Eyring<br>s | L_Eyring<br>dB |
|----------|----------------------------|----------------|----------------|----------------------------|----------------|----------------|
| 50 Hz    | 0.00                       | 2266.42        | 85.7           | -0.00                      | 2266.42        | 85.7           |
| 63 Hz    | 0.00                       | 1445.19        | 84.7           | -0.00                      | 1445.19        | 84.7           |
| 80 Hz    | 0.00                       | 914.29         | 83.8           | -0.00                      | 914.29         | 83.8           |
| 100 Hz   | 0.00                       | 602.20         | 82.9           | -0.00                      | 602.20         | 82.9           |
| 125 Hz   | 194.30                     | 1.34           | 57.4           | 210.54                     | 1.24           | 57.1           |
| 160 Hz   | 0.00                       | 263.84         | 81.4           | -0.00                      | 263.84         | 81.4           |
| 200 Hz   | 0.00                       | 185.52         | 80.8           | -0.00                      | 185.52         | 80.8           |
| 250 Hz   | 204.98                     | 1.26           | 60.2           | 223.17                     | 1.16           | 59.8           |
| 315 Hz   | 0.00                       | 101.49         | 80.2           | -0.00                      | 101.49         | 80.2           |
| 400 Hz   | 0.00                       | 79.04          | 80.1           | -0.00                      | 79.04          | 80.1           |
| 500 Hz   | 193.48                     | 1.32           | 63.4           | 209.58                     | 1.22           | 63.0           |
| 630 Hz   | 0.00                       | 54.15          | 80.5           | -0.00                      | 54.15          | 80.5           |
| 800 Hz   | 0.00                       | 45.29          | 80.7           | -0.00                      | 45.29          | 80.7           |
| 1000 Hz  | 194.04                     | 1.30           | 66.3           | 210.24                     | 1.20           | 65.9           |
| 1250 Hz  | 0.00                       | 30.98          | 81.1           | -0.00                      | 30.98          | 81.1           |
| 1600 Hz  | 0.00                       | 23.75          | 80.9           | -0.00                      | 23.75          | 80.9           |
| 2000 Hz  | 192.02                     | 1.26           | 69.2           | 207.89                     | 1.17           | 68.8           |
| 2500 Hz  | 0.00                       | 12.97          | 80.3           | -0.00                      | 12.97          | 80.3           |
| 3150 Hz  | 0.00                       | 8.98           | 79.7           | -0.00                      | 8.98           | 79.7           |
| 4000 Hz  | 226.62                     | 0.96           | 71.0           | 249.15                     | 0.89           | 70.6           |
| 5000 Hz  | 0.00                       | 4.00           | 78.2           | -0.00                      | 4.00           | 78.2           |
| 6300 Hz  | 0.00                       | 2.62           | 77.3           | -0.00                      | 2.62           | 77.3           |
| 8000 Hz  | 0.00                       | 1.68           | 76.4           | -0.00                      | 1.68           | 76.4           |
| 10000 Hz | 0.00                       | 1.11           | 75.6           | -0.00                      | 1.11           | 75.6           |
| 12500 Hz | 0.00                       | 0.74           | 74.9           | -0.00                      | 0.74           | 74.9           |
| 16000 Hz | 0.00                       | 0.49           | 74.0           | -0.00                      | 0.49           | 74.0           |
| 20000 Hz | 0.00                       | 0.34           | 73.4           | -0.00                      | 0.34           | 73.4           |
| Global   | NaN                        | NaN            | 94.1           | NaN                        | NaN            | 94.1           |

Figura C15 Resultados de la alternativa de diseño

## Apéndice D. Diseños del interior del auditorio en 3D

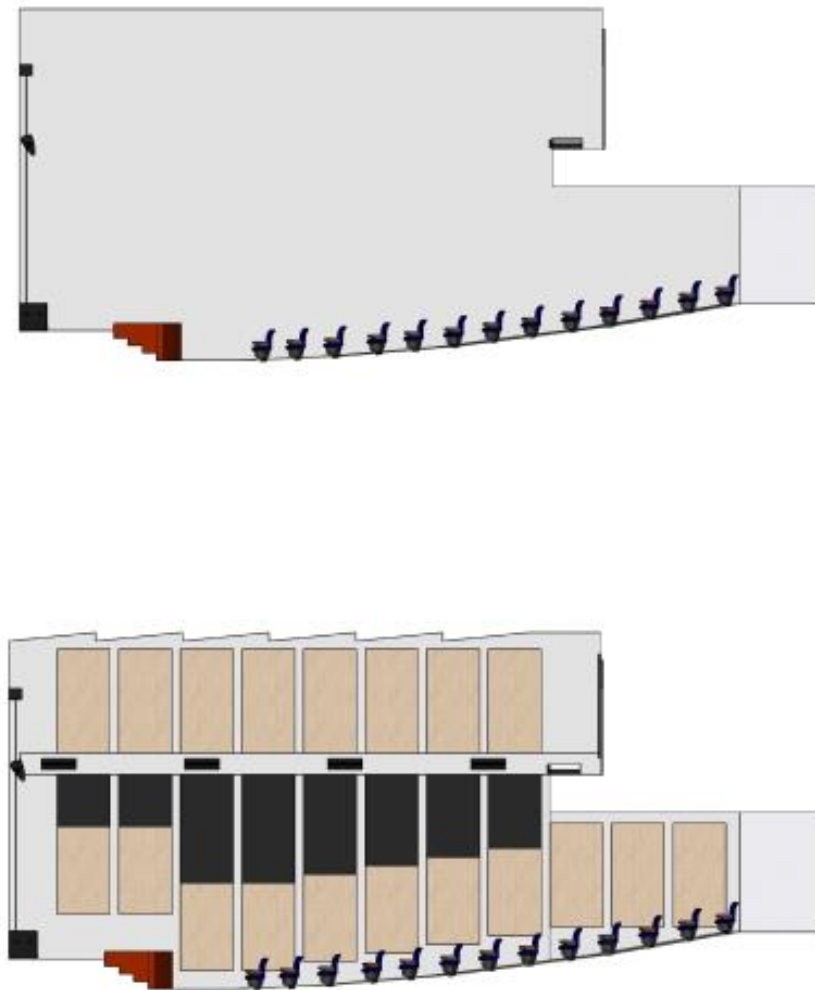
**Figura D1**

*Comparación de vista en perspectiva del modelado en 3D del auditorio antes y después del acondicionamiento acústico desde el escenario*



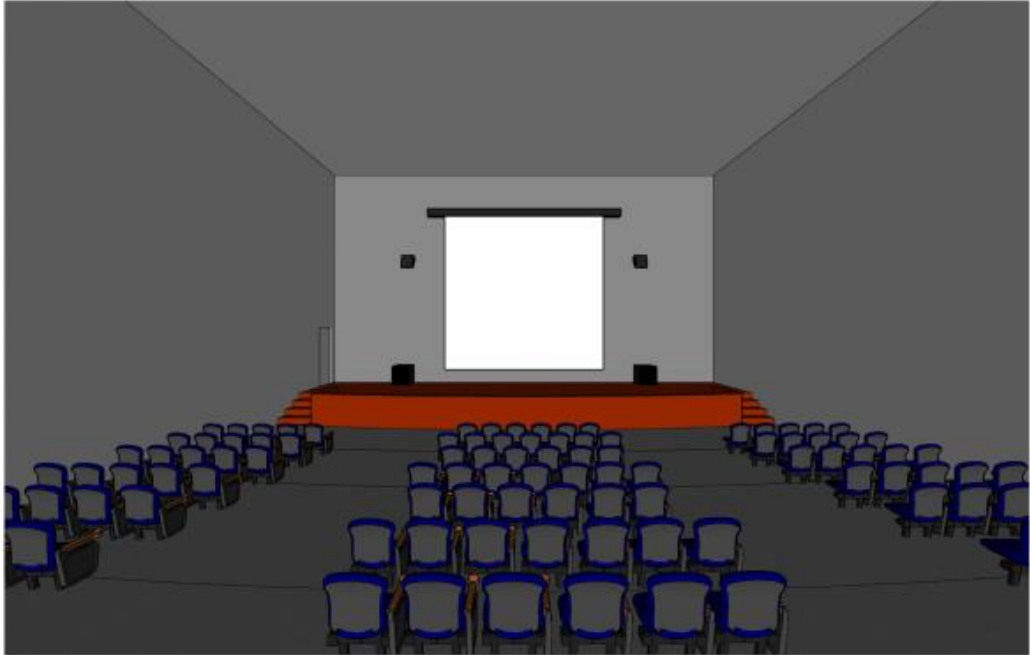
## Figura D2

*Comparativa de vista isométrica lateral del modelado 3D del antes y después del acondicionamiento acústico*



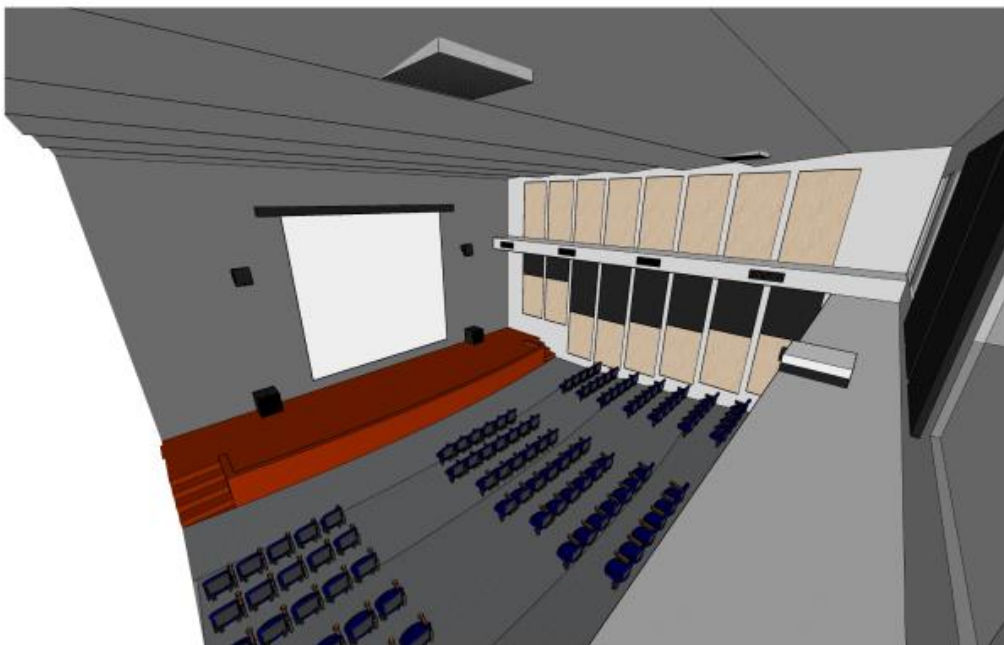
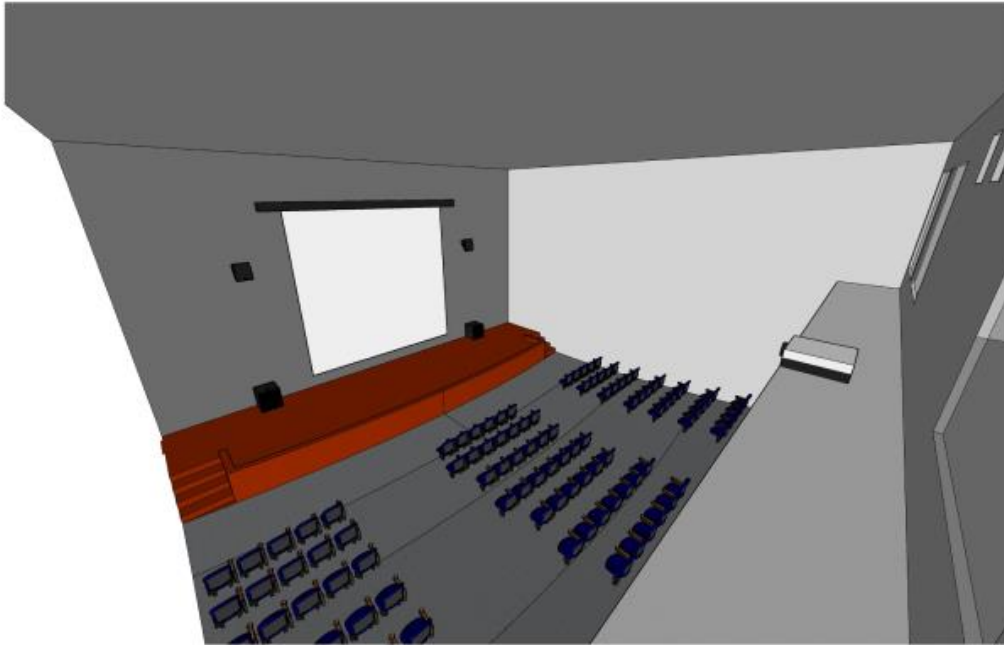
### Figura D3

*Comparación de vista en perspectiva del modelado en 3D del auditorio antes y después del acondicionamiento acústico desde butacas*



## Figura D4

*Comparación de vista en perspectiva del modelado en 3D del auditorio antes y después del acondicionamiento acústico desde esquina superior*



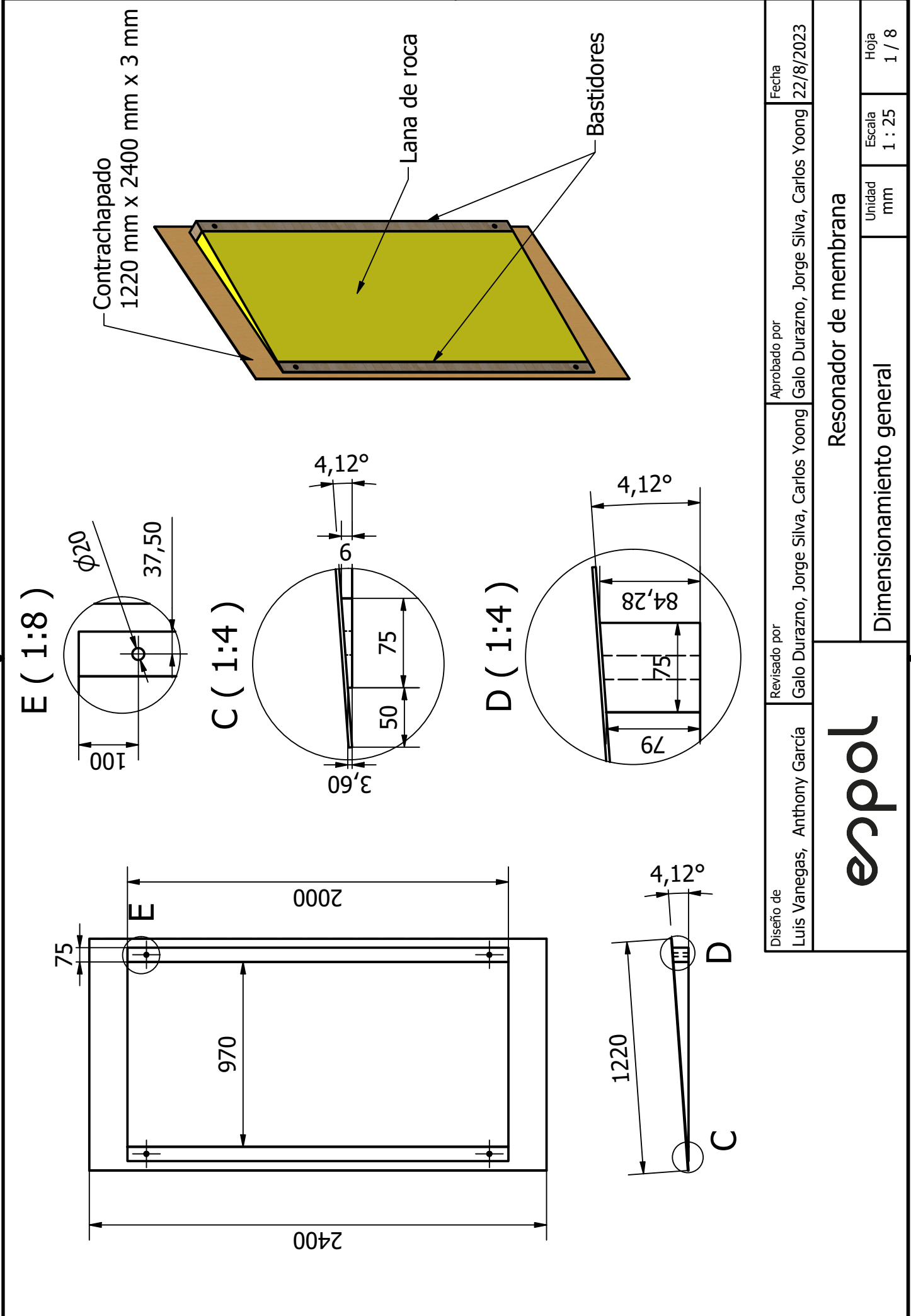
**Figura D5**

*Renderizado estilo fotorrealista del auditorio*

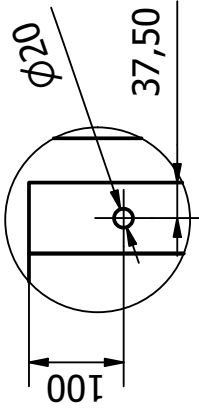


## **Anexo E. Planos**

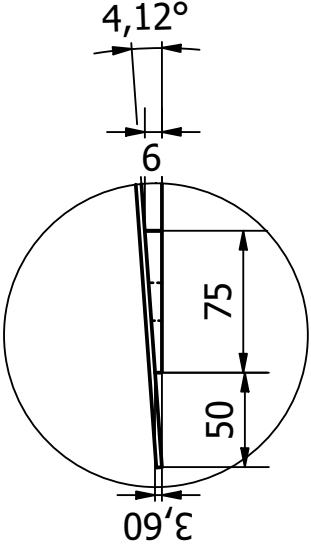




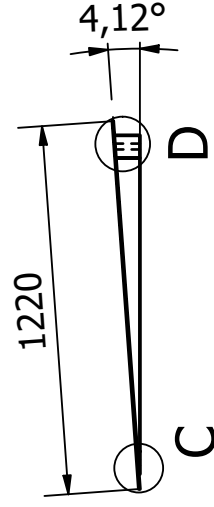
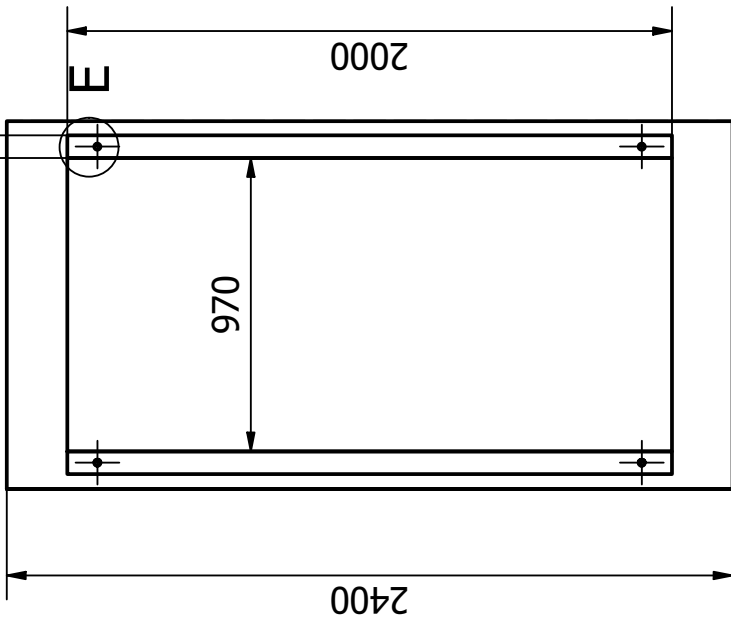
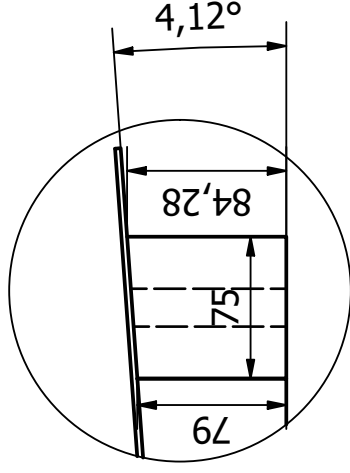
E ( 1:8 )



C ( 1:4 )



D ( 1:4 )



Contrachapado  
1220 mm x 2400 mm x 3 mm

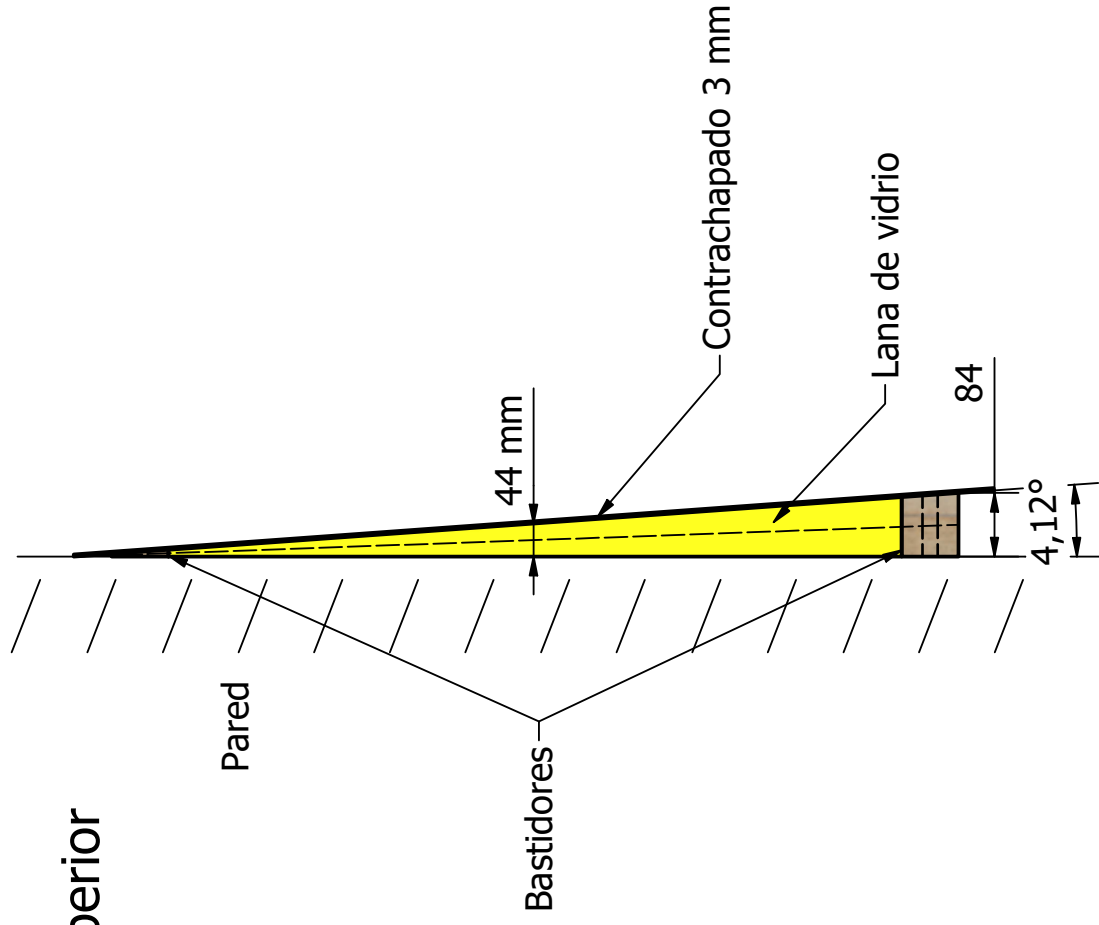
Lana de roca

Bastidores

|   |   |   |                    |
|---|---|---|--------------------|
| Diseño de<br>Luis Vanegas, Anthony García | Revisado por<br>Galo Durazno, Jorge Silva, Carlos Yoong | Aprobado por<br>Galo Durazno, Jorge Silva, Carlos Yoong | Fecha<br>22/8/2023 |
| <b>Resonador de membrana</b>              |   | Unidad<br>mm  | Hoja<br>1 / 8      |
|   |   | Dimensionamiento general                                |                    |

**espol**

# Vista superior



Diseño de

Luis Vanegas, Anthony García

Revisado por

Galo Durazno, Jorge Silva, Carlos Yoong

Aprobado por

Galo Durazno, Jorge Silva, Carlos Yoong

Fecha

22/8/2023

# espól

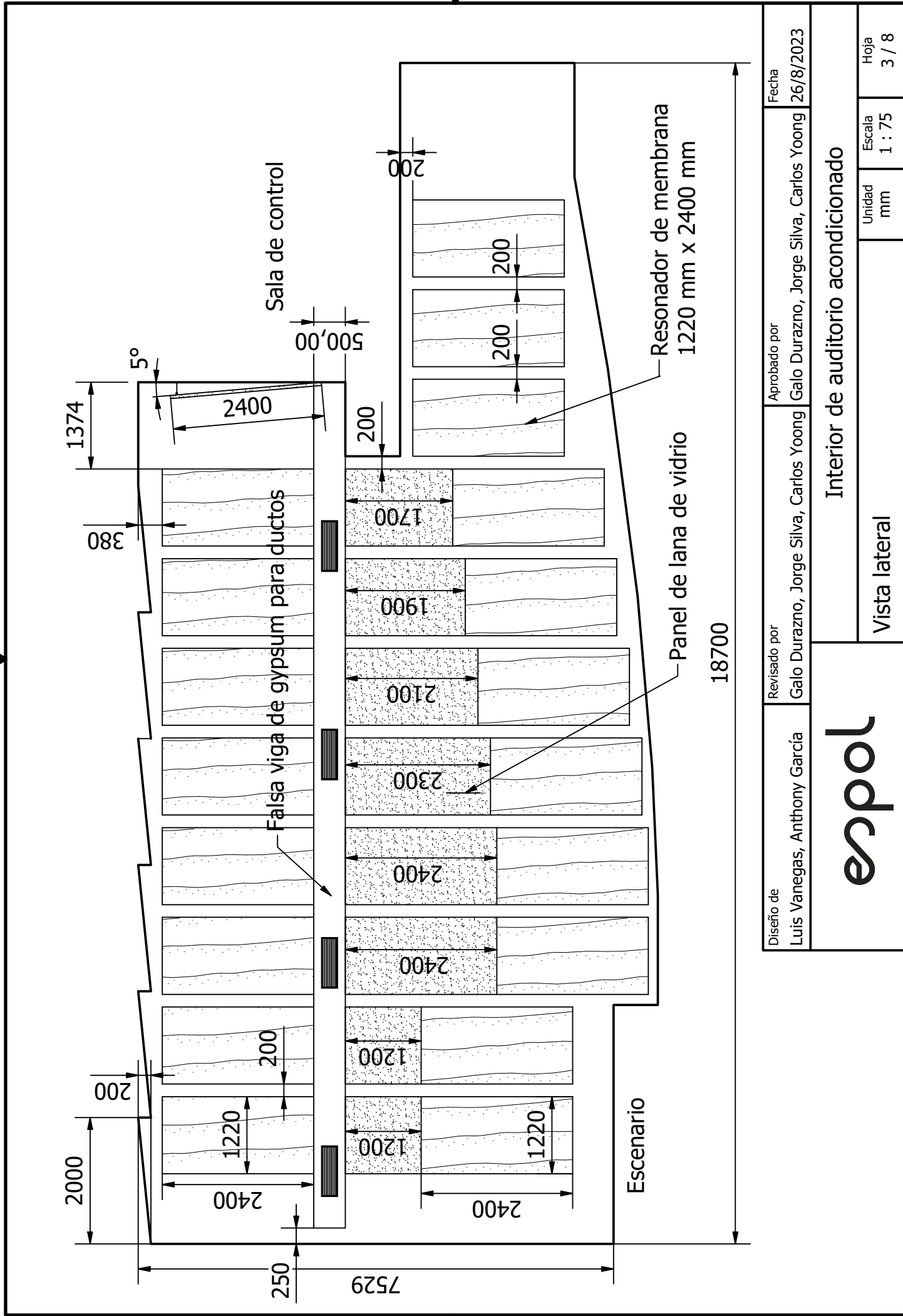
## Resonador de membrana

Vista Superior anclado a pared

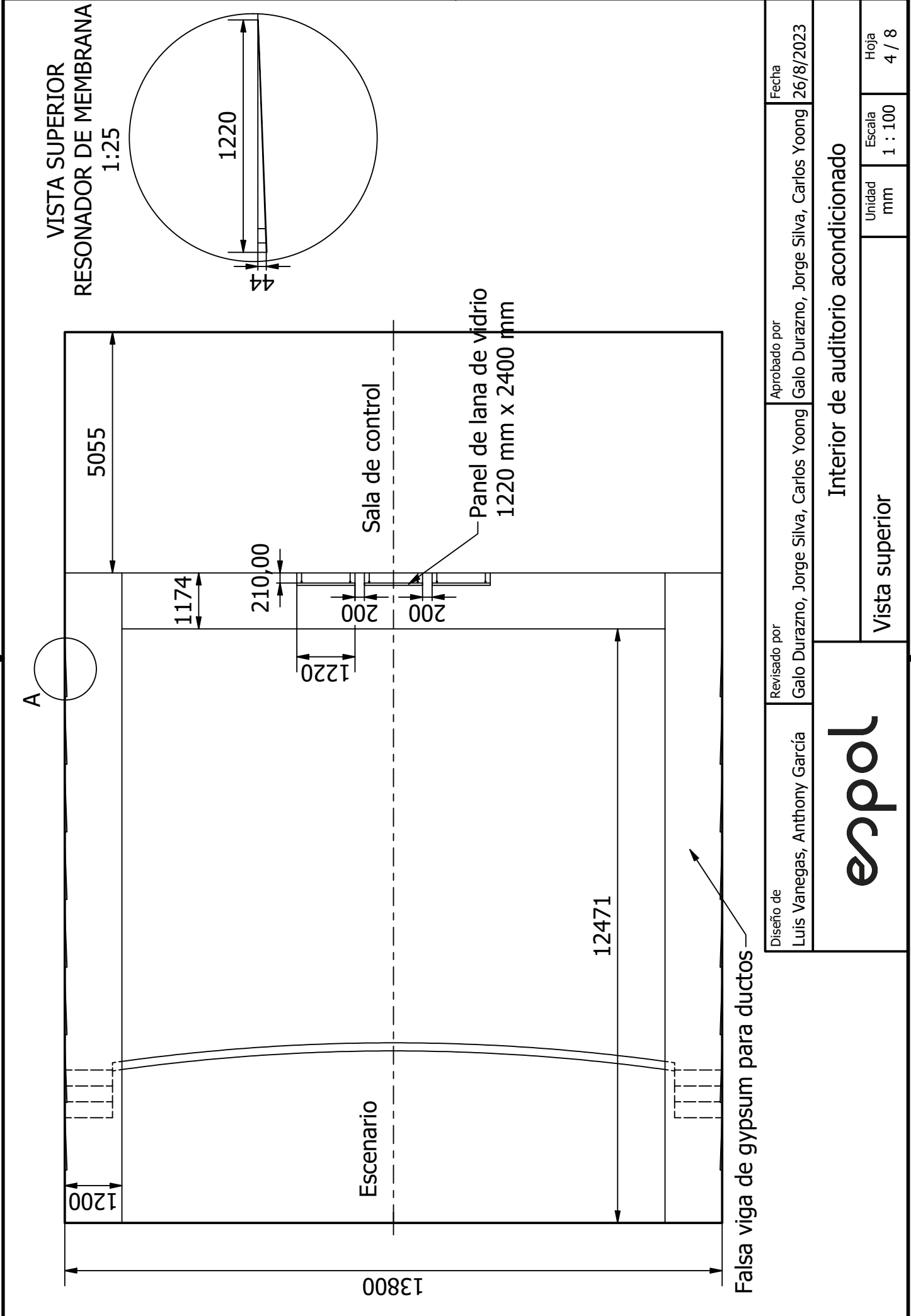
Unidad  
mm

Escala  
1 : 10

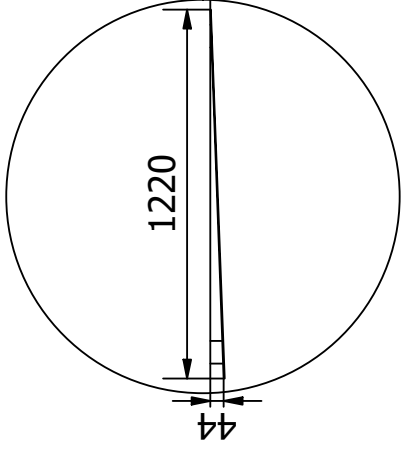
Hoja  
2 / 8



|   |   |   |                    |
|---|---|---|--------------------|
| Diseño de<br>Luis Vanegas, Anthony García | Revisado por<br>Galo Durazno, Jorge Silva, Carlos Yoong | Aprobado por<br>Galo Durazno, Jorge Silva, Carlos Yoong | Fecha<br>26/8/2023 |
| <b>espol</b>                              |   | <b>Interior de auditorio acondicionado</b>              |                    |
|   |   | Vista lateral   | Unidad<br>mm       |
|   |   | Escala<br>1 : 75  | Hoja<br>3 / 8      |

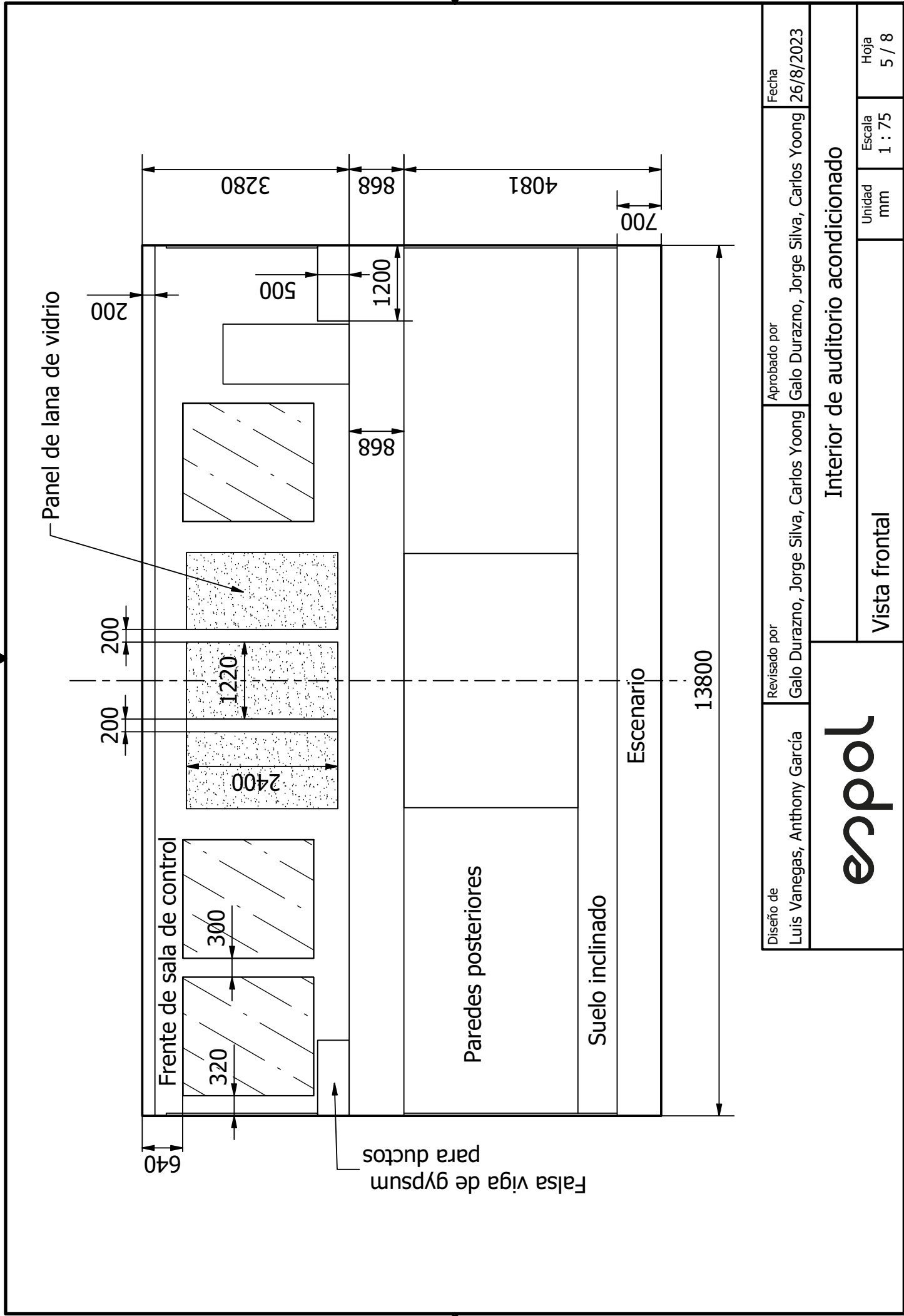



VISTA SUPERIOR  
RESONADOR DE MEMBRANA  
1:25

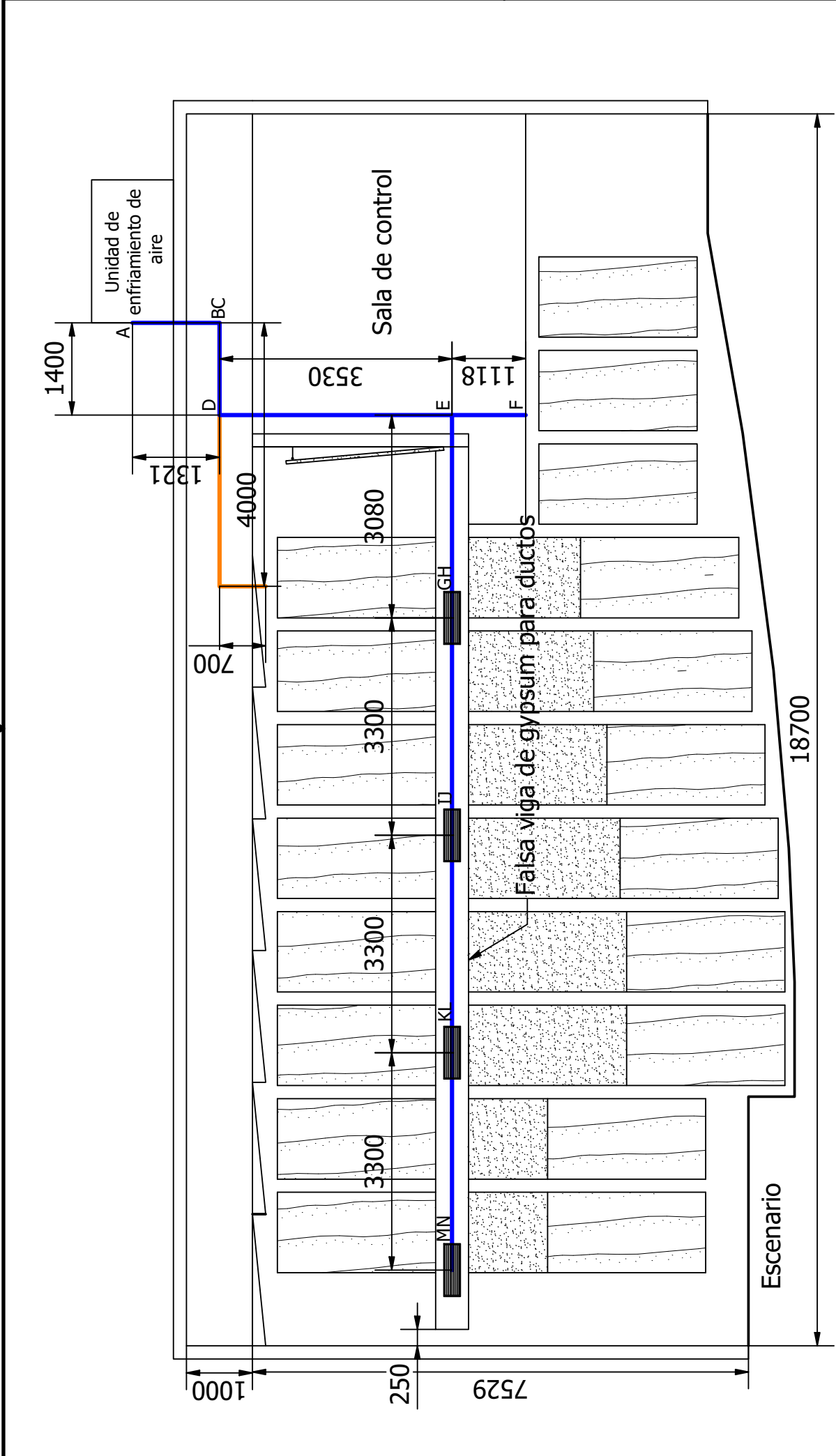


|   |   |   |                    |
|---|---|---|--------------------|
| Diseño de<br>Luis Vanegas, Anthony García | Revisado por<br>Galo Durazno, Jorge Silva, Carlos Yoong | Aprobado por<br>Galo Durazno, Jorge Silva, Carlos Yoong | Fecha<br>26/8/2023 |
| <b>espol</b>                              |   | Interior de auditorio acondicionado                     |                    |
|   |   | Vista superior  | Unidad<br>mm       |
|   |   | Escala<br>1 : 100                                       | Hoja<br>4 / 8      |

Falsa viga de gypsum para ductos

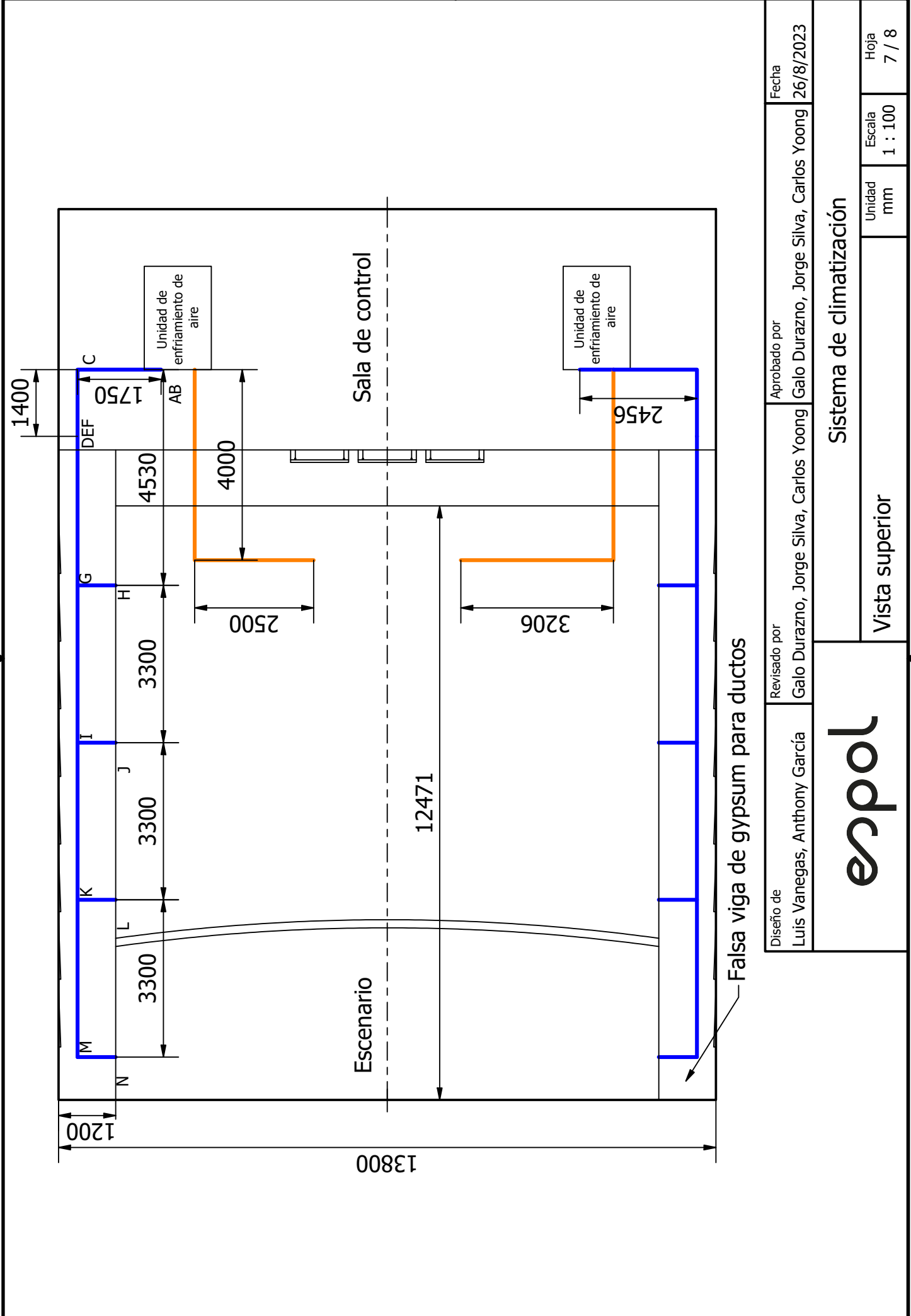



|   |   |   |   |
|---|---|---|---|
| Diseño de<br>Luis Vanegas, Anthony García   | Revisado por<br>Galo Durazno, Jorge Silva, Carlos Yoong | Aprobado por<br>Galo Durazno, Jorge Silva, Carlos Yoong | Fecha<br>26/8/2023                                |
|  |   | Interior de auditorio acondicionado                     |   |
|   |   | Vista frontal   | Unidad<br>mm<br>Escala<br>1 : 75<br>Hoja<br>5 / 8 |

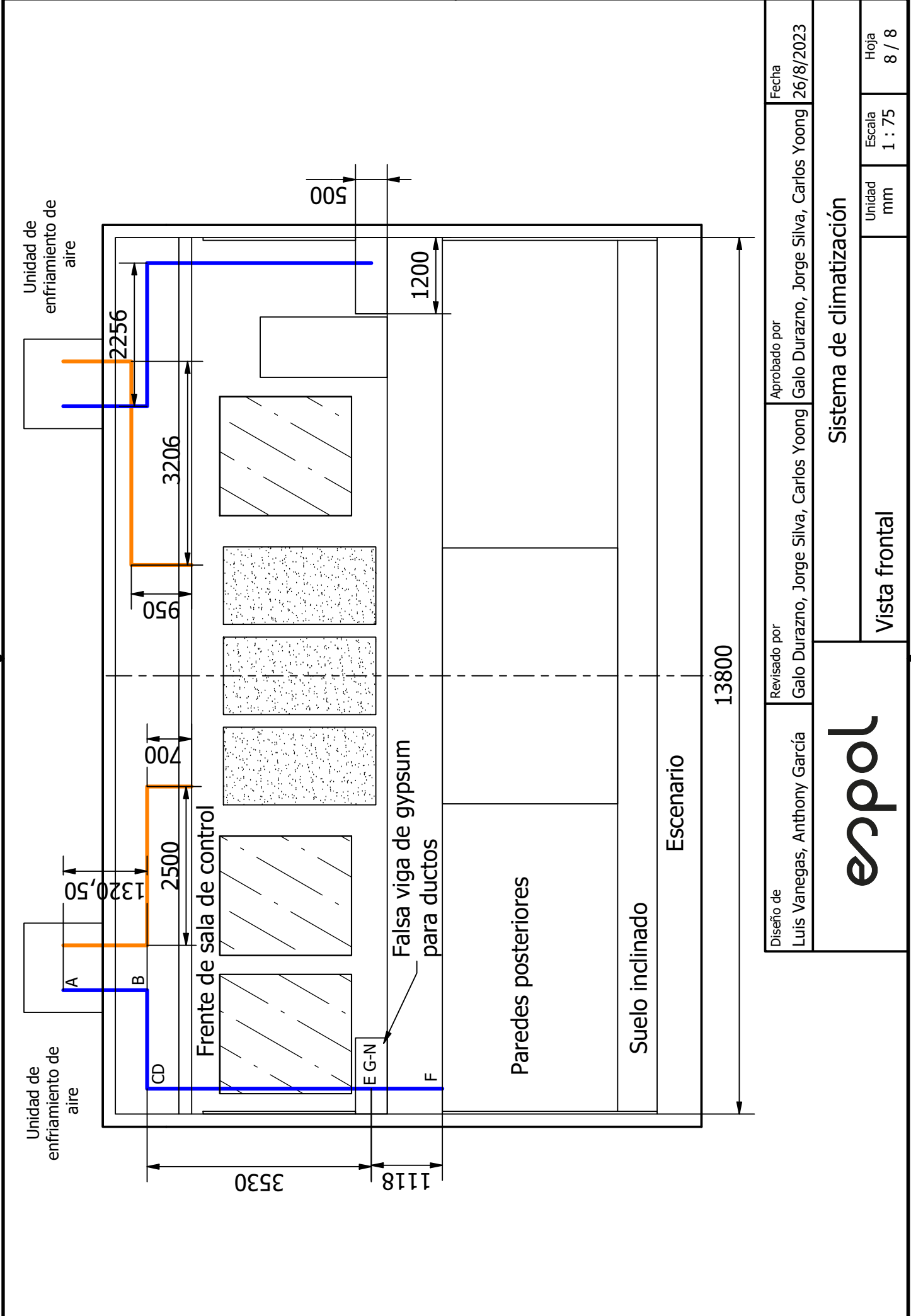


|   |   |   |                    |
|---|---|---|--------------------|
| Diseño de<br>Luis Vanegas, Anthony García | Revisado por<br>Galo Durazno, Jorge Silva, Carlos Yoong | Aprobado por<br>Galo Durazno, Jorge Silva, Carlos Yoong | Fecha<br>26/8/2023 |
| <b>espol</b>                              |   | <b>Sistema de climatización</b>                         |                    |
|   |   | Vista lateral   | Hoja<br>6 / 8      |

|                  |              |
|------------------|--------------|
| Escala<br>1 : 80 | Unidad<br>mm |
|------------------|--------------|



|   |   |   |  |
|---|---|---|--|
| Diseño de<br>Luis Vanegas, Anthony García   | Revisado por<br>Galo Durazno, Jorge Silva, Carlos Yoong | Aprobado por<br>Galo Durazno, Jorge Silva, Carlos Yoong | Fecha<br>26/8/2023                                 |
|  |   | Sistema de climatización                                |  |
|   |   | Vista superior  | Hoja<br>7 / 8<br>Escala<br>1 : 100<br>Unidad<br>mm |



|   |   |   |                    |
|---|---|---|--------------------|
| Diseño de<br>Luis Vanegas, Anthony García | Revisado por<br>Galo Durazno, Jorge Silva, Carlos Yoong | Aprobado por<br>Galo Durazno, Jorge Silva, Carlos Yoong | Fecha<br>26/8/2023 |
| <b>espol</b>                              |   | <b>Sistema de climatización</b>                         |                    |
|   |   | Vista frontal   | Unidad<br>mm       |
|   |   | Escala<br>1 : 75  | Hoja<br>8 / 8      |