

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Estudio del impacto acústico de los sistemas de climatización en áreas de
estudio y aulas de la FIMCP

INGE-2398

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingenieros en Mecánica

Presentado por:

David Andrés Lince Correa

Felix Ramón Silva Tumbaco

Guayaquil - Ecuador

Año: 2023

Dedicatoria

A mis padres y hermanas, que estuvieron conmigo durante toda esta trayectoria dándome fuerzas para continuar. A mis amigos, por su apoyo y comprensión en cada etapa del proceso académico y a todas aquellas personas que me supieron ayudar para seguir adelante.

David Andrés Lince Correa

A mis padres, hermanas, tíos y abuela presentes toda mi carrera universitaria con su apoyo incondicional. A mi abuelo que fue un padre para mí. A mis amigos que conocí fuera y dentro de la ESPOL. Y a mis profesores que tuve durante toda mi vida estudiantil.

Felix Ramón Silva Tumbaco

Agradecimientos

A Dios por darme la fuerza necesaria para continuar, a mi familia por estar conmigo cuando más lo necesitaba y darme el apoyo necesario para culminar mi carrera universitaria. A los amigos que hice en el proceso académico, quienes me ayudaron a fortalecer mi conocimiento y superarme personalmente, a mi tutor que, gracias a su orientación, culminó el proyecto con éxito.

David Andrés Lince Correa

A Dios por darme la fuerza para superar cualquier obstáculo. A mi familia que siempre me ayudó e impulsó en lo personal y académico. A mis compañeros con los que compartí buenos momentos y contribuyeron con mi formación académica. Al Ing. Galo Durazno, que sin su orientación este proyecto no pudo haberse logrado exitosamente.

Felix Ramón Silva Tumbaco

Declaración Expresa

Nosotros David Andrés Lince Correa y Felix Ramón Silva Tumbaco acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores. La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

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

Guayaquil, 7 de febrero del 2024.


David Andrés Lince Correa


Felix Ramón Silva Tumbaco

Evaluadores

Francis Loayza Paredes, PhD

PROFESOR DE LA MATERIA

Galo Durazno Palacios, MSc

PROFESOR TUTOR

Resumen

Debido a que la comunicación oral es de suma importancia en el ámbito educativo, es crucial mantener los niveles de ruido por debajo de los límites permitidos dentro como fuera de las aulas de clases así manteniendo una experiencia auditiva efectiva y una comprensión oral elevada. La FIMCP presenta niveles elevados de ruido, debido a la inmisión excesiva proveniente del sistema de climatización. Se planteó una metodología para medir ruido con un sonómetro grado 2, basándose en la normativa ecuatoriana para cuantificar la inmisión de ruido y determinar los índices de inteligibilidad de la palabra en aulas. Además, se propuso movilizar los condensadores de cada edificio a sus respectivos techos para disminuir el ruido en los alrededores. Utilizando el programa SketchUp se modeló la movilización de los equipos y la implementación de una barrera acústica, también se utilizó el programa I-SIMPA para simular la acústica de las aulas y obtener el tiempo de reverberación. Con la propuesta de solución se obtuvo una atenuación de ruido de hasta 20dBA por la barrera acústica, teniendo una propagación de ruido menor a 40dBA. Estos cambios teóricos proporcionarán una solución para la inmisión excesiva de ruido asegurando el cumplimiento de la normativa ecuatoriana.

Palabras clave: aulas, ruido, inmisión, climatización, exterior

Abstract

Because oral communication is of utmost importance in the educational field, it is crucial to keep noise levels below the permitted limits inside and outside the classrooms, thus maintaining an effective listening experience and high oral comprehension. The FIMCP presents high noise levels, due to excessive immission from the air conditioning system. A methodology was proposed to measure noise with a grade 2 sound level meter, based on Ecuadorian regulations to quantify noise immission and determine speech intelligibility indices in classrooms. In addition, it was proposed to move the condensers of each building to their respective roofs to reduce noise in the surroundings. Using the SketchUp program, the mobilization of the equipment and the implementation of an acoustic barrier was modeled. The I-SIMPA program was also used to simulate the acoustics of the classrooms and obtain the reverberation time. With the proposed solution, a noise attenuation of up to 20dBA was obtained through the acoustic barrier, having a noise propagation of less than 40dBA. These theoretical changes will provide a solution for excessive noise immission, ensuring compliance with Ecuadorian regulations.

Keywords: *classrooms, noise, immission, air conditioning, outside*

Índice general

Resumen.....	I
Abstract.....	II
Abreviaturas.....	VIII
Simbología.....	IX
Índice de figuras.....	XI
Índice de tablas.....	XIII
Capítulo 1.....	1
1. Introducción.....	2
1.1. Descripción del problema.....	2
1.2. Justificación del problema.....	3
1.3. Objetivos.....	4
1.3.1. Objetivo general.....	4
1.3.2. Objetivos específicos.....	4
1.4. Marco teórico.....	4
1.4.1. Acústica y sonido.....	4
1.4.2. Ruido.....	5
1.4.3. Velocidad de propagación.....	5
1.4.4. Intensidad sonora.....	5
1.4.5. Nivel de presión acústica.....	6
1.4.6. Variables de las ondas sonoras simple.....	7
1.4.7. Tiempo de reverberación.....	8

1.4.8.	Eco	10
1.4.9.	Inteligibilidad de la palabra	10
1.4.10.	La absorción del sonido	11
1.4.11.	Reflexión.....	12
1.4.12.	Equipos de medición.....	13
1.4.13.	Barrera acústica.....	13
1.4.14.	Eficiencia de la pared acústica	14
1.4.15.	Propagación de ruido	16
1.4.16.	Propagación del sonido en espacios abiertos	16
Capítulo 2.....		18
2.	Metodología.....	19
2.1.	Equipo utilizado para medición acústica.....	19
2.2.	Localización de puntos clave para la medición.....	20
2.3.	Medición de ruido	20
2.4.	Medición de ruido de fondo en estancias y aulas.....	21
2.5.	Selección del factor de corrección	21
2.6.	Medición del tiempo de reverberación.....	22
2.7.	Tiempo de reverberación teórico.....	24
2.8.	Modelo 3D de las aulas	24
2.9.	Coefficiente de absorción	25
2.10.	Inteligibilidad de la palabra.....	25

2.11.	Alternativas para disminuir el ruido provocado por los sistemas de climatización ..	26
2.11.1.	Alternativa 1: Cabinas acústicas para los compresores	26
2.11.2.	Alternativa 2: Aire acondicionado centralizado	27
2.11.3.	Alternativa 3: Reubicación de compresores	29
2.12.	Matriz de decisión	31
2.13.	Implementación de la alternativa seleccionada: Reubicación de compresores.....	34
2.13.1.	Identificación del espacio disponible y distribución de compresores.....	34
2.13.2.	Aislamiento térmico para las tuberías.....	36
2.13.3.	Propagación de sonido	38
2.13.4.	Barrera acústica.....	38
2.13.5.	Simulación	38
2.14.	Parámetros de diseño.....	40
Capítulo 3.....		42
3.	Resultados y análisis.....	43
3.1.	Estado actual de las aulas de la facultad	43
3.2.	Insonorización	43
3.2.1.	Medición de ruido en las estancias	43
3.2.2.	Medición de ruido en el interior de las aulas	45
3.2.2.1.	Sistema de climatización apagado	45
3.2.2.2.	Sistema de climatización encendido.....	47
3.3.	Tiempo de reverberación.....	48

3.3.1.	Tiempo de reverberación experimental en el interior de las aulas de clases	48
3.4.	Inteligibilidad de la palabra.....	49
3.4.1.	Coeficiente de absorción.....	50
3.4.2.	Constante del aula	50
3.4.3.	Distancia crítica	50
3.4.4.	Selección de ecuación por usar	50
3.5.	Propuesta de reubicación de los condensadores/compresores	51
3.5.1.	Propagación de ruido	54
3.5.2.	Atenuación por barrera acústica.....	56
3.5.3.	Cálculo teórico de las nuevas mediciones de ruido en el interior de las aulas. .	61
3.5.4.	Simulación del tiempo de reverberación de las aulas	64
3.5.5.	Comparación de resultados de tiempo de reverberación	66
3.6.	Análisis de costos	66
3.7.	Análisis de resultados.....	68
3.7.1.	Disminución del nivel de presión sonora incidente en las áreas de estudio y aulas de la FIMCP.....	68
3.7.2.	Tiempo de reverberación	69
Capítulo 4.....		70
4.	Conclusiones y recomendaciones	71
4.1.	Conclusiones	71
4.2.	Recomendaciones.....	72
Referencias.....		73

Anexos y apéndices.....76

Abreviaturas

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FIMCP	Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción
NC	Noise Criteria
OMS	Organización Mundial de la Salud
ANSI	Instituto Nacional Estadounidense de Estándares
IEC	Comisión Electrotécnica Internacional
REW	Room EQ Wizard
RITE	Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios

Simbología

dB	Decibel
Hz	Hertz
m	Metro
m^2	Metro cuadrado
m^3	Metro cúbico
kg	Kilogramo
in	Pulgada
Log	Logaritmo
P	Presión sonora
v	Velocidad de propagación
I	Intensidad sonora
I_A	Intensidad acústica
λ	Longitud de onda
c	Velocidad del sonido
T	Periodo
f	Frecuencia
RT	Tiempo de reverberación
V	Volumen del aula
A	Área de absorción del aula
α	Coefficiente de absorción del material
S	Área cubierta con material
$\%AlCons$	Porcentaje de pérdida de consonante
r	Distancia entre emisor y receptor

D_c	Distancia crítica
Q	Factor de directividad
R	Constante del aula
IL	Pérdida por inserción
L_p	Presión sonora del receptor
L_w	Presión sonora de la fuente
N	Número de Fresnel
DI	Índice de directividad
NPS	Nivel de presión sonora
2D	Dos dimensiones
3D	Tres dimensiones

Índice de figuras

Figura 1.1 Características de una onda sinusoidal -----	7
Figura 1.2 Tiempo de reverberación. -----	9
Figura 1.3 Diferencia de camino entre la onda difractada por una barrera (A+B) y la diferencia (C).-----	15
Figura 1.4 Zona de sombra de una barrera. -----	15
Figura 2.1 Vista superior del área de interés para la medición del ruido de fondo -----	21
Figura 2.2 Esquema de vista superior del área de interés para la edición del tiempo de reverberación. -----	24
Figura 2.3 Representación en 3D de las aulas del edificio 12H.-----	25
Figura 2.4 Diseño de forma con recubrimiento a los compresores. -----	27
Figura 2.5 Diseño de forma con aire acondicionado centralizado. -----	29
Figura 2.6 Diseño de forma con la reubicación de compresores.-----	31
Figura 2.7 Diagrama de flujo para la propuesta de reubicación de compresores-----	34
Figura 2.8 Distancias para la distribución de los compresores horizontales. -----	35
Figura 2.9 Distancias para la distribución de los compresores verticales. -----	35
Figura 2.10 Ejemplo del modelo 3D con superficies simplificadas. -----	40
Figura 2.11 Simulación del tiempo de reverberación del aula. -----	40
Figura 3.1 Compresores adyacentes que afectan a la medición del ruido de fondo del aula. -----	43
Figura 3.2 Ubicación de los puntos de medición -----	44
Figura 3.3 Curvas NC para el aula A003 del edificio 12C con el sistema de climatización apagado. -----	46
Figura 3.4 Curvas NC para el aula A003 del edificio 12C con el sistema de climatización encendido. -----	47

Figura 3.5 Tiempo de reverberación del aula A003 del edificio 12C usando el software REW. -----	48
Figura 3.6 Ejemplo de la reubicación de los compresores del edificio 12G. -----	53
Figura 3.7 Ejemplo de la reubicación de los compresores del edificio 12J. -----	53
Figura 3.8 Ejemplo de la reubicación de los compresores del edificio 12E. -----	53
Figura 3.9 Ubicación de la barrera acústica en el edificio 12G. -----	60
Figura 3.10 Ubicación de la pared acústica en el edificio 12J. -----	60
Figura 3.11 Ubicación de la pared acústica en el edificio 12E-----	61
Figura 3.12 Captura de pantalla de la simulación del tiempo de reverberación del aula 003 del edificio 12C en el programa I-SIMPA. -----	64
Figura 3.13 Captura de pantalla de la simulación del tiempo de reverberación del aula A001-12H. -----	65

Índice de tablas

Tabla 1.1 <i>Relación entre %ALCons y valores subjetivos del grado de inteligibilidad</i> -----	11
Tabla 2.1 <i>Corrección por nivel de ruido de fondo</i> -----	22
Tabla 2.2 <i>Factores de influencia para la comparación por pares</i> -----	31
Tabla 2.3 <i>Escala de importancia</i> -----	32
Tabla 2.4 <i>Comparación por pares</i> -----	32
Tabla 2.5 <i>Ponderación de factores de influencia</i> -----	33
Tabla 2.6 <i>Matriz de decisión de las alternativas de solución</i> -----	33
Tabla 2.7 <i>Espesores mínimos de aislamiento de tuberías y accesorios que transportan fluidos calientes que discurren por el interior de edificaciones</i> -----	36
Tabla 2.8 <i>Espesores mínimos de aislamiento de tuberías y accesorios que transportan fluidos calientes que discurren por el exterior de edificaciones</i> -----	36
Tabla 2.9 <i>Espesores mínimos de aislamiento de tuberías y accesorios que transportan fluidos fríos que discurren por el interior de edificaciones</i> -----	37
Tabla 2.10 <i>Espesores mínimos de aislamiento de tuberías y accesorios que transportan fluidos fríos que discurren por el exterior de edificaciones</i> -----	37
Tabla 3.1 <i>Mediciones de ruido en puntos cercanos a las fuentes de ruido (compresores)</i> ---	45
Tabla 3.2 <i>Mediciones de ruido en el interior del aula con el sistema de climatización apagado</i> -----	46
Tabla 3.3 <i>Mediciones de ruido en el interior del aula con el sistema de climatización encendido</i> -----	47
Tabla 3.4 <i>Tiempo de reverberación medido en las aulas del edificio 12C</i> -----	49
Tabla 3.5 <i>Tiempo de reverberación en segundos medido en las aulas del edificio 12H</i> -----	49
Tabla 3.6 <i>Porcentaje de AlCons para el aula A003 del edificio 12C</i> -----	51
Tabla 3.7 <i>Distancias entre compresor y punto de interés</i> -----	52

Tabla 3.8 <i>Potencia acústica de los compresores según el fabricante</i> -----	54
Tabla 3.9 <i>Propagación de ruido teórico que provocarían los compresores hacia el edificio 12H según la propuesta de solución</i> -----	55
Tabla 3.10 <i>Nivel de presión sonora teórica que llegaría a las aulas más cercanas de cada edificio</i> -----	56
Tabla 3.11 <i>Valores obtenido del modelo 3D para el cálculo de la atenuación por barrera acústica en el edificio 12G</i> -----	57
Tabla 3.12 <i>Número de Fresnel para el edificio 12G por cada frecuencia</i> -----	58
Tabla 3.13 <i>Pérdidas por inserción teórica por cada longitud de onda para el edificio 12G</i>	59
Tabla 3.14 <i>Atenuación teórica de ruido por cada edificio</i> -----	60
Tabla 3.15 <i>Reducción sonora experimental</i> -----	61
Tabla 3.16 <i>Ruido provocado por el sistema de climatización</i> -----	62
Tabla 3.17 <i>Nuevo ruido de fondo en los exteriores</i> -----	62
Tabla 3.18 <i>Sistema de climatización apagado teórico</i> -----	63
Tabla 3.19 <i>Sistema de climatización encendido teórico</i> -----	64
Tabla 3.20 <i>Tiempo de reverberación obtenido por simulación considerando que las aulas están con estudiantes</i> -----	65
Tabla 3.21 <i>Comparación de los TR en diferentes condiciones</i> -----	66
Tabla 3.22 <i>Estimación del costo total de la solución propuesta</i> -----	67

Capítulo 1

1. Introducción

Dado que la comunicación oral se ha erigido como el medio preeminente en la pedagogía global, resulta pertinente abordar un aspecto de interés en la ponderación de los parámetros acústicos que reside en su influencia sobre la salud y los procesos de enseñanza-aprendizaje (Yang y Bradley, 2009).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) señaló que el ruido en centros educativos interfiere principalmente en la comunicación oral. Asimismo, ha identificado que el ruido dificulta el análisis de la información y afecta la comprensión lectora y la adquisición de la lectura (Zapata et al, 2018). Una acústica inadecuada en el entorno de un aula conlleva una disminución en la inteligibilidad del discurso y la presencia de niveles elevados de ruido ambiental. La insuficiencia acústica en los contextos educativos desencadena una percepción disminuida del lenguaje hablado, lo que a su vez incide negativamente en las competencias de lectura y en la comprensión lectora de los estudiantes (Gheller et al., 2020).

El objetivo del proyecto es realizar un estudio acústico de los sistemas de climatización para identificar los niveles de emisión de ruido en las áreas de estudio y aulas de la FIMCP. Con este fin, se apoyará en la identificación de las fuentes de sonido y las zonas más impactadas, además de definir la metodología más apropiada para llevar a cabo la investigación. Con ayuda de un mapa de ruido se caracterizará los diferentes lugares en términos de calidad acústica e inteligibilidad de la palabra. Además, se harán simulaciones con los datos obtenidos mediante un sonógrafo de grado 2 para validar las soluciones propuestas y reducir el impacto acústico en las zonas afectadas y analizar costos que permita estimar los materiales y procesos involucrados en el diseño de solución.

1.1. Descripción del problema

El sistema de acondicionamiento de aire en las aulas y áreas de estudio de los alrededores de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción ha sido una

fuentes inagotables de ruido, lo cual provoca un ambiente de estudio inadecuado para el estudiante. Debido al ruido los parámetros necesarios para una buena acústica como, el tiempo de reverberación y la inteligibilidad de la palabra, se ven afectados provocando un déficit en el análisis de información y esfuerzos cognitivos elevados por parte de los estudiantes que diario se reúnen en estas áreas.

La persistencia sonora proveniente del sistema de acondicionamiento de aire provoca una reverberación inadecuada para la correcta comunicación oral entre estudiantes y profesores. Esta situación conlleva una fatiga auditiva, una falta de comprensión precisa de la información y una posible pérdida de interés. Básicamente este problema ocasiona un efecto en cadena que no permite una calidad acústica adecuada para el usuario, afectado significativamente por el ruido.

1.2. Justificación del problema

La contaminación acústica y la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) se han convertido en uno solo. Los estudiantes de la facultad ya no perciben o diferencian el ruido provocado por los condensadores de los aires acondicionados ni por las actividades realizadas por otros estudiantes, afectando directamente a las áreas de estudio. Al no conocer la intensidad de ruido generada por la fuente, se debe realizar un estudio acústico con equipos sonoros para comprobar que tan lejos están los valores del rango permisible.

La importancia de este estudio es garantizar un ambiente donde los estudiantes puedan estudiar y realizar actividades académicas. Así aumentar el nivel de concentración para optimizar el rendimiento del estudiante de la FIMCP.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Realizar un estudio del impacto acústico en las aulas y áreas de estudio de la FIMCP estableciendo una metodología que cumpla con los estándares de medición de ruido con un sonómetro de grado 2, que proponga una solución que disminuya el ruido generado por el sistema de climatización.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Establecer una metodología en donde se utilice un sonómetro de grado 2 para la medida de los niveles de ruido provenientes de los sistemas de climatización en las áreas de estudio y aulas de la FIMCP.
2. Medir los niveles de inmisión de ruido en las áreas de estudio y aulas de la FIMCP.
3. Determinar los índices de inteligibilidad de la palabra en las aulas de la FIMCP.
4. Recomendar una solución que disminuya la inmisión de ruido proveniente de los sistemas de climatización.

1.4. Marco teórico

1.4.1. Acústica y sonido

Acústica

Es la disciplina destinada para el estudio de la propagación de una onda en medios materiales.

Sonido

El fenómeno sonoro puede conceptualizarse como una perturbación que se difunde en la modalidad de una onda sonora en un medio elástico, ocasionando alteraciones en la presión y vibraciones de partículas que resultan perceptibles por el aparato auditivo humano y por dispositivos especializados diseñados para ello.

1.4.2. Ruido

Desde una perspectiva física, es posible definir el ruido de manera análoga al sonido. En términos auditivos, tendemos a referirnos al ruido como aquellos sonidos que no resultan placenteros como ejemplificado por el ruido generado por maquinaria, aeronaves o gritos. No obstante, la definición que goza de reconocimiento internacional en el ámbito de la acústica lo caracteriza como un sonido indeseado (Jaramillo, 2007).

1.4.3. Velocidad de propagación

La velocidad de propagación en el aire está dada por:

$$v = 331.4 + 0.607 \cdot \theta \left[\frac{m}{s} \right] \quad (1.1)$$

Donde θ es la temperatura ambiente en grados centígrados. Para temperaturas superiores a 30°C o inferiores a -30°C. la velocidad el sonido debe determinarse mediante la fórmula siguiente:

$$v = 331.4 \cdot \sqrt{\frac{T}{273}} = 331.4 \cdot \sqrt{1 + \frac{\theta}{273}} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (1.2)$$

1.4.4. Intensidad sonora

También llamada como intensidad acústica. Se trata de la medida media de la energía acústica transmitida por cada unidad de área que es perpendicular a la dirección de la expansión de la onda sonora. La unidad es el $\frac{W}{m^2}$. Para una onda esférica que se propaga libremente en el espacio, la intensidad sonora está dada por:

$$I = \frac{P^2}{\rho_0 v} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (1.3)$$

Se define como la intensidad acústica, expresada en unidades logarítmicas (dB):

$$I_A = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (1.4)$$

I es la intensidad acústica radiada por la fuente y el nivel de referencia. I_0 suele tomarse como $10^{-12} \left[\frac{W}{m^2} \right]$, que corresponde aproximadamente a la presión de referencia de $2 \times 10^{-4} [\mu\text{bar}]$ o $20 [\mu\text{Pa}]$.

En acústica, al emplear el término *nivel*, se refiere a que el valor de la magnitud física está expresada en unidades logarítmicas (*dB*).

1.4.5. Nivel de presión acústica

Es la presión expresada en dB.

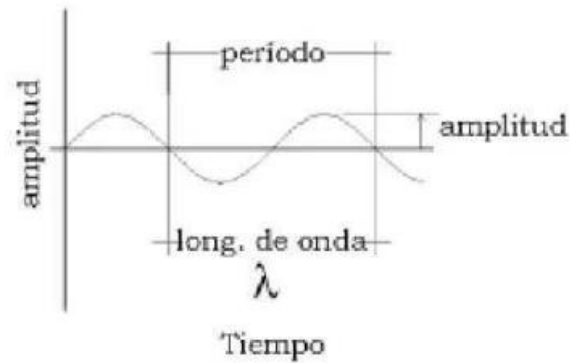
$$P_A = 20 \log \left(\frac{p}{p_0} \right) \quad (1.5)$$

Donde p_0 es la presión de referencia, usualmente de $20 [\mu\text{Pa}]$ para mediciones relacionadas con la audición y niveles sonoros p de ruido en el aire y líquidos. A veces se utiliza como presión de referencia $1 [\mu\text{bar}]$ para calibración de transductores y algunos tipos de medición de niveles sonoros en líquidos. La diferencia entre estos dos niveles de referencia es de 74 dB .

1.4.6. Variables de las ondas sonoras simple

Figura 1.1

Características de una onda sinusoidal



Nota: Onda sinusoidal y sus partes (Jaramillo, 2007)

Longitud de onda (λ): Es la longitud de un ciclo de la onda (comprendido por un valle y una cresta).

Periodo (T): Es la duración en segundos de un ciclo completo de la onda.

Frecuencia (f): Es el número de ciclos u oscilaciones que se repiten en un segundo.

Sus unidades son los Hertzios [Hz]. Esta característica de la onda sonora es la que musicalmente llamamos el tono. Una frecuencia alta equivale a un tono agudo. Una frecuencia baja equivale a un tono grave.

La relación entre la longitud de onda, la velocidad del sonido y la frecuencia está dada por:

$$\lambda = \frac{C}{f} \quad (1.6)$$

1.4.7. Tiempo de reverberación

La reverberación se refiere a la persistencia de la energía sonora en un espacio determinado después de que la fuente de sonido haya cesado su emisión, o bien, tras la llegada de la onda sonora directa. En situaciones vinculadas a áreas extensas, se inicia la percepción de la reverberación aproximadamente 1/5 de segundo después de la recepción del sonido directo.

Este fenómeno surge debido a la suma de múltiples reflexiones y dispersiones generadas por las superficies de las paredes, objetos y mobiliario dentro del recinto. El sonido resultante no se caracteriza por ecos discernibles, sino como una sonoridad constante y caótica, sin procedencia sonora definida. Además, es relevante señalar que los reflejos originados por superficies irregulares o rugosas no siguen patrones regulares, mientras que las superficies lisas funcionan como difusores. Esta difusión contribuye a reducir el tiempo requerido para que los ecos se integren como componentes del sonido reverberante (Jaramillo, 2007).

El tiempo de reverberación se define como el período temporal, expresado en segundos, requerido para que la intensidad acústica promedio disminuya hasta alcanzar una proporción de una millonésima parte de su valor inicial, el cual se establece en 60 dB. Cuando la fuente sonora cese su emisión (Jaramillo, 2007).

$$RT = \frac{0.161xV}{A_{tot}} \quad (1.7)$$

Donde:

V = volumen en m^3

A_{tot} = Absorción total del recinto en Sabines

$$A_{tot} = \sum \alpha_i S_i \quad (1.8)$$

Donde:

α = coeficiente de absorción del material

S = área cubierta con dicho material en m^2

La fórmula para el tiempo de reverberación de Sabine tiene validez sólo en las siguientes condiciones:

- Campo sonoro perfectamente difuso.
- Geometría regular de la sala.
- Coeficiente medio de absorción. α' menor a 0.4.

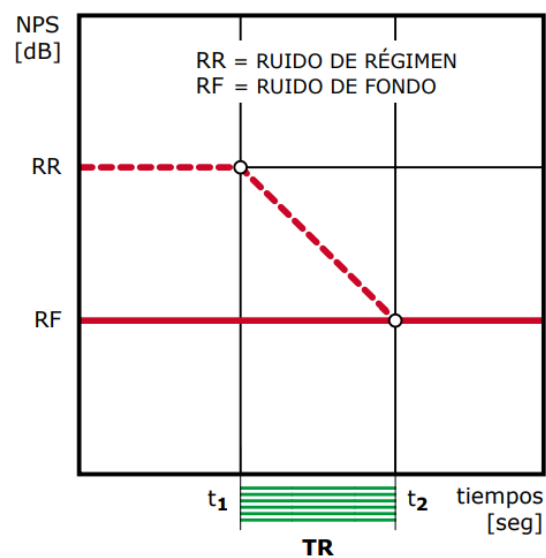
$$\alpha' = \frac{A_{tot}}{S_{tot}} \quad (1.9)$$

Donde:

S_{tot} = superficie total del recinto en m^2

Figura 1.2

Tiempo de reverberación



Nota: Pendiente necesaria para la obtención del tiempo de reverberación (Savioli, 2003)

1.4.8. *Eco*

Es la onda sonora reflejada que arriba al receptor con una amplitud significativa y un retardo temporal lo bastante notorio como para identificarse con respecto al sonido primordial originado por la fuente sonora.

1.4.9. *Inteligibilidad de la palabra*

La comprensión del mensaje oral en un dominio enfocado al discurso resulta fundamental, y dicha aprehensión se encuentra intrínsecamente vinculada a la precisa discriminación de las consonantes. La capacidad de comprender el habla de manera efectiva, además de ser inherente a las particularidades del oyente, se ve influida por factores tales como la intensidad del ruido ambiental, la distancia entre el receptor y la fuente sonora, y la magnitud de la reverberación presente en el entorno acústico (Jaramillo, 2007).

$$\%ALCons = \frac{200 r^2 RT}{VQ} \quad (\text{para: } r \leq 3.16 D_c) \quad (1.10)$$

$$\%ALCons = 9RT \quad (\text{para: } r > 3.16 D_c) \quad (1.11)$$

Donde:

r = distancia ente emisor y receptor (en m)

RT = tiempo de reverberación de la sala (en s)

V = volumen de la sala (en m^3)

DC = distancia crítica = $0.14 \sqrt{QR}$

Q = factor de directividad de la fuente sonora en la dirección considerada ($Q = 2$ en el caso de la voz humana. considerando la dirección frontal del orador)

$R = \frac{S_{tot}\alpha'}{1-\alpha'}$ = constante de la sala (en m^2)

S_{tot} = superficie total de la sala (en m^2)

α' = coeficiente medio de absorción de la sala

Tabla 1.1

Relación entre %ALCons y valores subjetivos del grado de inteligibilidad

%ALCons	Valoración subjetiva
1.4% – 0%	Excelente
4.8% – 1.6%	Buena
11.4% – 5.3%	Aceptable
24.2% – 12%	Pobre
46.5% – 27%	Mala

Nota. Sacado de (Isber, 2004)

1.4.10. La absorción del sonido

Se produce una transformación irreversible de la energía sonora, convirtiéndola en calor o permitiendo su transferencia parcial hacia otro medio, lo que se traduce en la percepción de la absorción del sonido como una disminución en la energía sonora. Por ello, la absorción de sonido se manifiesta sin afectar a la atenuación por la dispersión de las ondas sonoras según se alejan de su fuente. Esta absorción se puede distinguir en dos categorías: absorción dentro del medio y absorción en el entorno circundante (Duque et al, 2021).

Las moléculas constituyentes de un medio exhiben la capacidad de absorber una fracción de la energía transportada por una onda. La cantidad de energía absorbida está condicionada por las propiedades inherentes al medio y a la onda y por su composición espectral. Así, cuando una onda sonora se encuentra con un obstáculo, una parte de esta energía que se propaga en su interior es absorbida por dicho obstáculo (Duque et al, 2021).

En caso de cuantificar que cantidad de energía es absorbida se debe definir:

$$\alpha = \frac{\text{energía absorbida}}{\text{energía incidente}} \quad (1.12)$$

Este valor varía entre 0 y 1, cero cuando no se absorbe nada de la energía incidente y 1 cuando todo el valor de la energía incidente es absorbido.

1.4.11. Reflexión

Frecuentemente, las ondas sonoras se enfrentan con obstáculos físicos durante su proceso de propagación. Cuando una onda sonora no logra alcanzar una superficie continua, se produce una discontinuidad en la interfaz entre dos medios, denominados A y B, que no están debidamente adaptados entre sí. Un ejemplo ilustrativo de esta situación se presenta en la transición entre el aire y el hormigón (Duque et al., 2021). Se da la presencia de un fenómeno físico en que:

Una porción de la energía incidente (E_i), se encuentra reflejada en el medio A (E_r) y la otra parte se encuentra en el medio B (E_a), continuando su propagación a través de estos medios.

Por lo cual tenemos que:

$$E_i = E_r + E_a \quad (1.13)$$

Si se lo divide por E_i :

$$1 = \frac{E_r}{E_i} + \frac{E_a}{E_i} \quad (1.14)$$

Donde:

$$\frac{E_r}{E_i} = r. \text{ índice de reflexión (coeficiente)} \quad (1.15)$$

$$\frac{E_a}{E_i} = a. \text{ índice de absorción (coeficiente)} \quad (1.16)$$

Entonces:

$$r + a = 1$$

$$1 \geq r \geq 0 \wedge 1 \geq a \geq 0$$

Por lo cual se considera que tanto a como r son coeficientes adimensionales:

- La absorción y reflexión son aspectos proporcionados del mismo fenómeno.

- El sonido sigue las mismas reglas de reflexión que la de la luz.
- El rayo incidente, que es la normal a la superficie de reflexión y el rayo reflejado, son encontrados en un mismo plano.
- El ángulo de incidencia es el mismo que el ángulo de reflexión.

1.4.12. Equipos de medición

Las oscilaciones acústicas y fenómenos sonoros presentes en un sitio específico son cuantificados empleando instrumentos de medición. a saber, los sonómetros. Estos dispositivos fundamentales registran el sonido de manera análoga a la percepción auditiva humana evaluando la presión sonora en una ubicación determinada a través de su micrófono y permiten obtener mediciones objetivas y replicables (Fernández, 2016). Para ponderar las mediciones del sonómetro con respecto a la sensibilidad del oído humano, se utilizan filtros de ponderación de frecuencia (el más conocido es el de ponderación *A*, *dBA*).

Los sonómetros integradores llevan un filtro incorporado y son necesarios para que las mediciones obtenidas sean realmente rigurosas.

Dependiendo de la precisión de la medición. existen diferentes tipos de sonómetros:

- Tipo 0: Son sonómetros estándar. Básico y muy preciso. Se utiliza en laboratorios.
- Tipo 1: Son sonómetros de alta precisión. Alta precisión para mediciones de campo.
- Tipo 2: Sonómetros de uso general. Precisión media, para mediciones generales de campo.
- Tipo 3: Son sonómetros de inspección. Baja precisión, utilizada para reconocimiento y mediciones aproximadas.

1.4.13. Barrera acústica

Una barrera acústica se define como un componente de dimensiones específicas de la trayectoria de propagación de una onda sonora, para intervenir en esa propagación y generar

una reducción perceptible en la presión sonora provocada por las fuentes emisoras (Avilés y Perera, 2017).

La eficacia de la barrera está condicionada por factores, como las características del material utilizado, su ubicación en relación con la fuente y el receptor, su altura y el espectro de emisión de la onda sonora que se pretende mitigar. La influencia del espectro se atribuye a que los fenómenos de absorción, reflexión, transmisión y difracción están vinculados a la frecuencia (Avilés y Perera, 2017).

1.4.14. Eficiencia de la pared acústica

La eficiencia de una pantalla acústica se establece generalmente mediante un parámetro conocido como pérdida por inserción, IL (del inglés insertion loss), definido, para una determinada banda de frecuencia, como la diferencia entre los niveles de presión sonora en un punto antes y después de colocar la pantalla (Avilés y Perera, 2017):

$$IL = L_p(\text{antes}) - L_p(\text{después}) \quad (1.17)$$

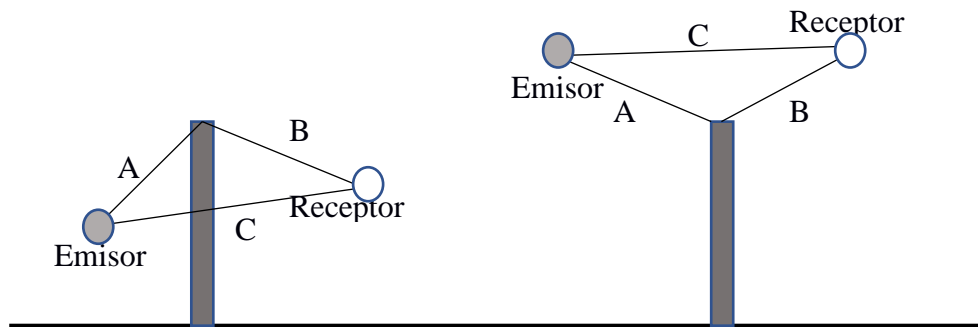
Un parámetro fundamental para calcular la pérdida por inserción es el denominado número de Fresnel (N), que se expresa de la siguiente forma:

$$N = \pm \frac{2}{\lambda} (A + B - C) \quad (1.18)$$

Donde λ es la longitud de onda de la onda incidente y los valores de A , B , y C se los determina de la siguiente forma:

Figura 1.3

Diferencia de camino entre la onda difractada por una barrera ($A+B$) y la diferencia (C)



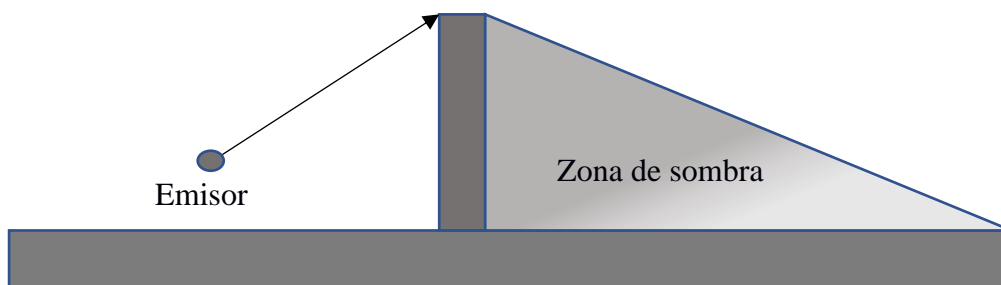
Nota: Caso de número de Fresnel positivo (izquierda) y negativo (derecha) (Avilés y Perera, 2017)

El número de Fresnel puede ser positivo, si el camino directo (C) está por debajo del camino difractado (figura izquierda), o negativa, si está por encima (figura de la derecha).

Los valores negativos se corresponden con receptores que se encuentran fuera de la zona de sombra como se muestra en la figura 1.4.

Figura 1.4

Zona de sombra de una barrera



Nota: El efecto de protección de una barrera acústica es apreciable en la zona de sombra (Avilés y Perera, 2017)

Cuando mayor sea la diferencia de camino, mayor será N . esto se consigue, aumentando la altura de la pantalla, o disminuyendo la distancia de la barrera al emisor o al receptor.

La atenuación introducida por la barrera acústica cuando el receptor se encuentra en la zona de sombra viene dada por la expresión:

$$L_p(\text{despues}) = 20 \log \left(\frac{\sqrt{2\pi N}}{\tanh \sqrt{2\pi N}} \right) + 5 \quad N \geq -0.2 \quad (1.19)$$

1.4.15. Propagación de ruido

Una característica fundamental de las ondas sonoras es que se pueden propagar por cualquier medio elásticos.

La distribución de la energía sonora emitida por una fuente se da en un patrón omnidireccional según se propaga por la atmósfera, pudiendo llegar a áreas distantes de la fuente de origen. El proceso de propagación conlleva una reducción progresiva en el nivel de presión sonora conforme aumenta la distancia (Manual para la formación en medio ambiente, 2008).

1.4.16. Propagación del sonido en espacios abiertos

En un espacio abierto, una fuente puntual con un nivel de potencia sonora L_w produce en un punto situado a una distancia r de la fuente un nivel de presión sonora dado por:

$$L_p = L_w - 20 \log r - 11 + DI - A \quad (1.20)$$

Donde:

A = Exceso de atenuación debido a causas ambientales.

DI = Índice de Direccionalidad definido como $DI = 10 \log Q$

Q = Factor de Direccionalidad

Para fuentes puntuales alineadas:

$$Lp = \sum_{i=1}^n L_{Pi} \quad (1.21)$$

Capítulo 2

2. Metodología

Para el estudio acústico se estableció una metodología basada en la norma técnica para el control de la contaminación acústica del Ecuador (Texto Unificado de Legislación Secundaria Del Medio Ambiente, 2018). Se realizaron mediciones preliminares que proporcionaron los puntos clave en donde se superaban los límites permitidos de ruido en estancias e interiores de aulas. Esto permitió identificar áreas donde la concentración de ruido era excesiva por el funcionamiento simultáneo de los sistemas de climatización de aire de distintas áreas de la facultad, identificando las aulas con problema de reverberación excesiva y condensadores con excesiva vibración.

En base a las mediciones se planteó tres posibles alternativas de solución que disminuiría el ruido provocado por los sistemas de climatización cumpliendo los requerimientos de diseño.

2.1. Equipo utilizado para medición acústica

- **Sonómetro Piccolo II Professional Clase 2:** Este medidor de ruido entre sus características cumple con IEC 61672 y ANSI S1.4 teniendo un rango de frecuencia de 20 Hz a 16 kHz. Mide rangos bajos de 30 *dB*A a 110 *dBzPk* y rangos altos de 40 *dB*A a 130 *dBzPk*.

- **Flus Mt-915:** Este equipo mide la rapidez del aire entre 0.4 y 30 *m/s* con una precisión de ± 3 *m/s*. además, admite medición de temperatura de -20 a 70°C con una precisión de $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$.

- **Tripode Monopod KingJoy G55+G0:** Tiene una altura máxima de 165.5 *cm* y una altura mínima de 41.5 *cm*. está fabricado en aleación de aluminio.

El sonómetro se situó a una distancia de 1.20 *m* del suelo. para techos y paredes también estuvo a una distancia de al menos 1.20 *m*. y a 1.50 *m* de cualquier puerta o ventana.

2.2. Localización de puntos clave para la medición

En esta sección se realizó el análisis del ruido en las estancias y aulas de la FIMCP, enfocado en identificar las fuentes de ruido que impiden una buena acústica en el área. Se efectuaron mediciones precisas y se localizaron las fuentes de ruido externas en los alrededores. Los puntos clave en el exterior se localizaron en las cercanías de las fuentes de ruido. Se utilizó el filtro de banda de porcentaje constante de 1/3 de octava debido a que sigue de mejor forma el comportamiento del sistema auditivo humano (Domingo, 2013).

2.3. Medición de ruido

La medición de ruido externo y ruido de fondo se realizó utilizando los equipos descritos en la sección 2.2.

- Condiciones ambientales: Las mediciones fueron realizadas sin condiciones adversas como lluvia, truenos, etc. Además, se aseguró que la velocidad del viento en el lugar de la medición no sea superior a 5 *m/s*.

- Preparación del aula o estancia: se aseguró que los sistemas de climatización estén funcionando y que no haya ruido proveniente de otras fuentes.

- Posicionamiento del sonómetro: El sonómetro se colocó sobre un trípode cuya altura fue de 1.50 *m* desde el suelo, direccionando el micrófono en dirección a la fuente de ruido con una inclinación de 45° sobre el plano horizontal. Durante este proceso todas las personas involucradas permanecieron a 1 *m* de distancia del sonómetro.

- Captura y registro de las mediciones: La medición del ruido en ambiente se efectuó mediante un sonómetro integrador tipo 2, previamente calibrado, con sus selectores en el filtro de ponderación A y en respuesta lenta (slow).

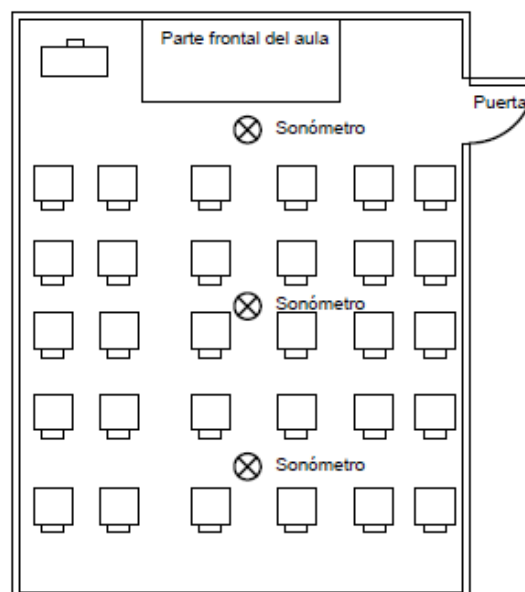
2.4. Medición de ruido de fondo en estancias y aulas

La medición del ruido de fondo se realizó con el mismo proceso descrito antes para el ruido exterior con la diferencia que la fuente de ruido, en este caso el sistema de climatización esté apagado.

Se realizó la medición del ruido en las 10 aulas del edificio 12C y las aulas A002, A002, A101, A102, A103, A104, A105, A201, A202 del edificio 12H.

Figura 2.1

Vista superior del área de interés para la medición del ruido de fondo



2.5. Selección del factor de corrección

El factor de corrección se obtuvo al realizar una diferencia aritmética entre los valores de presión sonora equivalente y los valores de ruido de fondo. En algunos casos la diferencia

fue mayor o igual a 10 *dB*A por lo que al comparar con los valores de la Tabla 2.1 el factor que se restó a la presión sonora equivalente es 0, así con todas las diferencias aritméticas.

Este factor se requirió para eliminar otras fuentes de ruido, en especial para las tomas de mediciones que se realizó en exterior por los diferentes ruidos que hay en el ambiente. De igual manera se utilizó la norma técnica para el control de la contaminación acústica del Ecuador:

Tabla 2.1

Corrección por nivel de ruido de fondo

Diferencia aritmética entre el nivel de presión sonora equivalente y el ruido de fondo	Corrección
10 o mayor	0
De 6 a 9	-1
De 4 a 5	-2
3	-3
Menor a 3	Medición nula

Nota: Esta tabla de corrección se aplica para eliminar posibles ruidos ajenos a la medición deseada (Texto unificado legislación secundaria del medio ambiente, 2018)

2.6. Medición del tiempo de reverberación

Se aplicó la metodología de TR_{20} ya que en ciertas frecuencias el nivel de presión sonora no alcanza a decaer 60 *dB* debido a que antes se alcanza el nivel de ruido ambiente. Dicha dificultad se resuelve usando el tiempo requerido para bajar 20 *dB* en lugar de 60 *dB*.

Para la medición del tiempo de reverberación se utilizó los equipos descritos en la sección 2.2.

Condiciones de las aulas: En las aulas que se hicieron mediciones se mantuvo las puertas y ventanas cerradas. el sistema de acondicionamiento de aire apagado manteniendo

todos los objetos del aula en su posición habitual y un máximo de 4 personas las cuales hicieron el mayor silencio posible para no interrumpir las mediciones.

Ubicación del equipo de sonido: El sistema de audio, por el cual se emitiría la señal de muestreo, se ubicó en la parte frontal del aula de forma equidistante a las paredes laterales. Esto debido a que es la posición habitual que los profesores o estudiantes realizan sus clases o exposiciones.

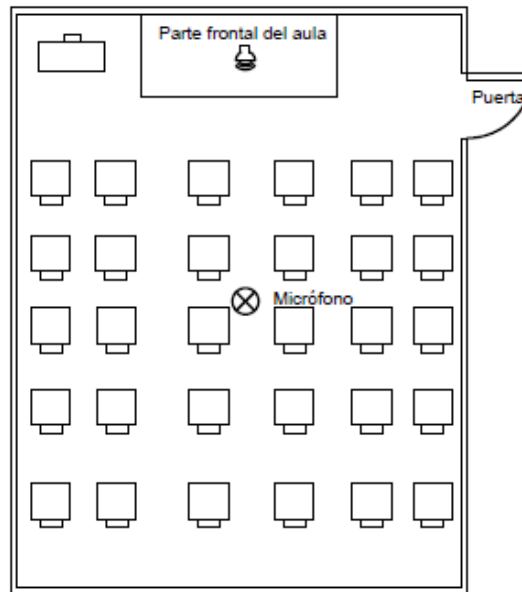
Ubicación del equipo de medición: Tanto el sonómetro como el micrófono se ubicaron en el centro del aula apuntando hacia el parlante. cada uno sobre su respectivo trípode a una altura de 1.5 m y una inclinación de 45° . El micrófono y el parlante se conectaron a una interfaz de audio conectada a un ordenador portátil con la aplicación REW.

Calibración de los equipos: Usando el sonómetro, se realizó la calibración del micrófono de mediciones lo que nos permitió mantener una equivalencia con los valores reales. De esta forma nos aseguramos de que los datos obtenidos eran fiables para así proceder a registrarlos en el programa REW.

Captura y registro: Se capturaron 2 señales acústicas en la parte central de las aulas, utilizando el micrófono de mediciones y registrando estas señales en el programa REW para su posterior análisis.

Figura 2.2

Esquema de vista superior del área de interés para la edición del tiempo de reverberación



2.7. Tiempo de reverberación teórico

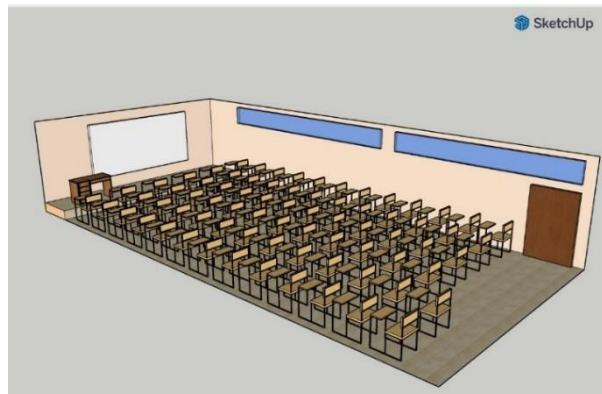
Para el cálculo del tiempo de reverberación se obtuvo el volumen promedio de las aulas de la FIMCP. Luego se calculó el área de absorción para cada superficie dentro del aula, incluyendo paredes, techo, piso, pupitres, pizarra, etc. Para calcular se utilizó el coeficiente de absorción de cada elemento nombrado y así utilizar estos valores en la Ecuación 1.7.

2.8. Modelo 3D de las aulas

Con el afán de representar y simular de manera óptima y precisa las aulas de la facultad se aprovechó las capacidades computacionales y la herramienta virtual llamada SketchUp, herramienta enfocada en el modelado arquitectónico que permitió precisar las geometrías interiores de las aulas. Esta herramienta permitió exportar el modelo 3D a formato 3DS, ideal para usar en el programa I-SIMPA para simulaciones acústicas.

Figura 2.3

Representación en 3D de las aulas del edificio 12H



2.9. Coeficiente de absorción

Se usó la fórmula de Sabine aplicando TR_{60} para despejar el coeficiente de absorción por cada frecuencia de análisis: 125, 250, 500, 1k, 2k y 4kHz.

$$\bar{\alpha} = \frac{0.161V}{TR_{60} \cdot S_{total}} \quad (2.1)$$

2.10. Inteligibilidad de la palabra

Debido a que dentro de un aula de clases la comprensión oral es fundamental, fue necesario calcular la inteligibilidad de la palabra, esto se llevó a cabo mediante el uso de la Ecuación 1.10 la cual necesita diferentes variables, tales como, la distancia entre emisor y receptor, tiempo de reverberación, volumen del aula, la distancia crítica, etc.

Se pudo caracterizar el grado de comprensión oral que existe en las aulas y con ayuda de la Tabla 1.1 se pudo dar una valoración subjetiva a la inteligibilidad de la palabra.

2.11. Alternativas para disminuir el ruido provocado por los sistemas de climatización

2.11.1. Alternativa 1: Cabinas acústicas para los compresores

Para disminuir el ruido provocado por los compresores de los acondicionadores de aire mediante cabinas acústicas, se debe instalar una caja para cada compresor o conjunto de compresores. La caja debe diseñarse con material que aíslen el sonido y contar con material absorbente en las paredes, además de ventilación para evitar problemas con el compresor y deben ser impermeables ya que los compresores están al aire libre. Esto resultara en una menor filtración de ruido a las aulas y una atenuación del ruido que se acumula en las áreas de estudio.

Fortalezas:

- El uso de material aislante y absorbente reducirá en gran porcentaje el ruido provocado por los compresores.
- Tienen un bajo costo de fabricación
- Efectividad: Los materiales absorbentes acústicos son muy efectivos para disminuir la filtración de ruido y la reverberación en las aulas.
- Estética: Hay varios modelos y materiales que pueden utilizarse para presentar mejor a los lugares donde están los condensadores de aire.

Debilidades:

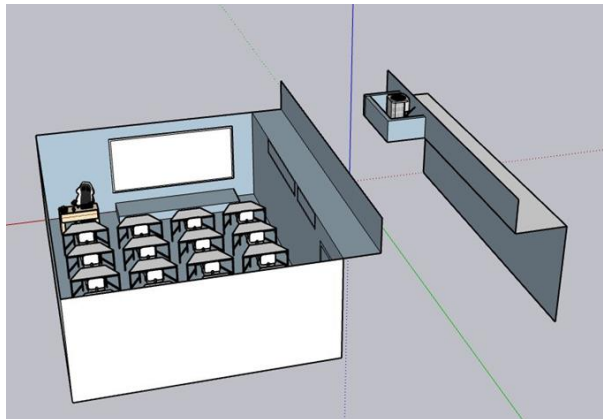
- La personalización de diseño por los diferentes tamaños de compresores.
- El sistema de ventilación debe ser el adecuado para evitar problemas con la salida de calor.
- Al estar al aire libre se necesitarían materiales impermeables y resistentes a la luz solar.

Aspectos por considerar:

- Aspectos sociales: Mejora la experiencia de los usuarios de las áreas de estudio y aulas de la facultad.
- Aspectos ambientales: La disminución del ruido filtrado a las aulas fomenta un ambiente saludable y propio para la concentración de los estudiantes.
- Salud pública: Los difusores acústicos pueden disminuir la emisión de ruido por lo tanto disminuir la fatiga auditiva, promoviendo la salud auditiva de los estudiantes.
- Seguridad y bienestar: La implementación de estos accesorios no representa peligro alguno para los estudiantes que utilizan las áreas de estudio o aulas.
- Aspectos económicos: Los costos de los materiales absorbentes pueden ser considerables. pero el mejorar la acústica en las aulas conlleva una mejor concentración y retención de información en los estudiantes.

Figura 2.4

Diseño de forma con recubrimiento a los compresores



2.11.2. Alternativa 2: Aire acondicionado centralizado

Uno de los problemas del sistema de climatización es que algunos compresores son muy antiguos y presentan mucha vibración lo cual provoca mucho ruido, esto sumado a que en un espacio relativamente pequeño existen varios compresores por lo que, la acumulación

de ruido cuando están en funcionamiento es excesiva, debido a esto se puede optar por adquirir un sistema centralizado de acondicionamiento de aire, lo cual disminuiría la cantidad de compresores dispersos por la facultad y sería una forma más eficiente de climatizar la facultad de mecánica ya que estos sistemas están diseñados para grandes áreas de climatización.

Fortalezas:

- Estética: Al optar por un sistema centralizado de aire acondicionado los compresores que ahora reparte la facultad desaparecerían, lo que disminuiría la carga visual en los pasillos ya que estos equipos pueden ubicarse en el techo de los edificios.
- Variedad: Existen distintos tipos de sistemas centralizados de aire acondicionado por lo que esto permite adaptarse a las necesidades de la facultad.

Debilidades:

- Costos: Los sistemas centralizados de aire acondicionados usualmente tienen un costo elevado, esto sumado al costo de instalación de los equipos y la adecuación de los ductos de aire.
- Requiere diseño personalizado: Para adquirir un sistema centralizado de aire acondicionado hay que calcular la carga energética que el sistema disipará, además del diseño de los ductos que transportaran el aire frío y caliente.

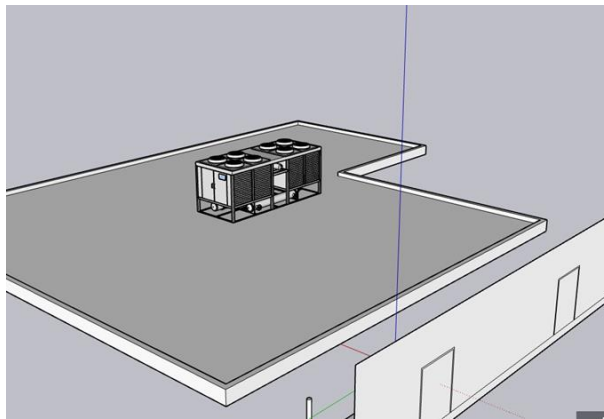
Aspectos por considerar:

- Salud pública: El cambio de sistema de acondicionamiento de aire puede reducir la emisión de ruido y disminuir la fatiga auditiva de los estudiantes.
- Seguridad y bienestar: El nuevo sistema de climatización no presenta riesgos para los estudiantes.
- Aspectos sociales: Permite que los estudiantes realicen sus actividades en un entorno cómodo libre de ruido.

- Aspectos ambientales: El uso de un sistema centralizado puede disminuir el ruido en las estancias. Por otra parte, los gases utilizados en estos sistemas pueden tener un impacto negativo en el ambiente si estos no son tratados de forma adecuada.
- Aspecto económico: El cambio de sistema de climatización puede tener un costo significativo, pero este puede verse recuperado con el tiempo debido al aumento en la eficiencia del sistema de climatización.

Figura 2.5

Diseño de forma con aire acondicionado centralizado



2.11.3. Alternativa 3: Reubicación de compresores

El principal problema de la acústica en la facultad es la ubicación de los compresores de aire, debido a que se encuentran muy cercanos a las aulas y espacios de estudios. Una solución a este problema es reubicar los compresores al techo de los diferentes edificios de la facultad aprovechando la infraestructura y el espacio.

Fortalezas:

- Costo: El costo de reubicación de los equipos es menor al costo de adquisición de nuevos equipos y su instalación.
- Restricciones de espacio: En el techo de los edificios de la facultad no hay equipos u objetos suficientes que interfieran para la reubicación de los equipos de climatización.

Debilidades:

- Colindancia: El segundo piso del edificio 12H queda justo al lado del techo del edificio de la biblioteca, por lo que, al reubicar los compresores de aire será necesario diseñar paredes de aislamiento de acústico que impida que el ruido se filtre a las aulas colindantes.
- Accesibilidad: No existe una forma adecuada para acceder al techo de algunos edificios, lo que complicaría la reubicación y los procesos de mantenimiento.
- Aumento de tuberías: Debido a que el sistema se ubicara en la parte superior del edificio, las tuberías que llevan el líquido refrigerante deberán aumentar su longitud lo que conllevara un cálculo para evitar pérdidas de calor y el cálculo del espesor del material aislante térmico.
- Costo: El costo aumenta debido al requerimiento de tubos de cobre más largos.

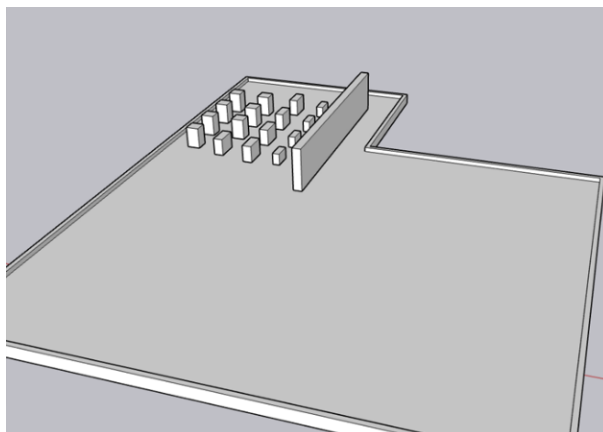
Aspectos por considerar:

- Salud pública: La reubicación de los compresores puede contribuir a la disminución del ruido acumulado en las áreas de estudio. promoviendo la salud auditiva de los estudiantes que frecuentan estas áreas.
- Seguridad y bienestar: La reubicación de los equipos no representa un riesgo para los estudiantes, siempre y cuando se realicen las actividades de movilización en horarios ajenos a los horarios de clase.
- Aspectos ambientales: La reubicación de los compresores no representa un impacto ambiental considerable, pero hay que considerar que los gases dentro de estos dispositivos deben tratarse como las normas internacionales lo dispongan.
- Aspectos económicos: Esta actividad no representa un gasto elevado para la universidad en cuestión de adquisición de equipos o materiales, pero el recurso humano puede generar un valor agregado considerable.

- Aspectos sociales: Mejorar la experiencia acústica en las aulas de clases puede promover un alza en la concentración de los estudiantes y aumentar el afán por estudiar.

Figura 2.6

Diseño de forma con la reubicación de compresores



2.12. Matriz de decisión

Se evaluó usando los siguientes factores de influencia:

Tabla 2.2

Factores de influencia para la comparación por pares

Factor de influencia	Descripción
Eficiencia	Se evalúa la capacidad de reducir el ruido provocado por los sistemas de climatización.
Costo	Gasto total que incluye la construcción/adquisición e instalación.
Instalación	La instalación debe ser fácil y sencilla teniendo en cuenta los recursos que conlleva.
Espacio	Evaluación del espacio requerido con el espacio disponible.
Estética	La apariencia de la solución debe ser agradable para la vista y adecuado para el entorno de la facultad.
Ventilación	La capacidad de ventilación para evitar un sobrecalentamiento de los equipos.
Mantenimiento	Fácil mantenimiento con adquisición y reemplazo con repuestos accesibles.

Tabla 2.3*Escala de importancia*

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

Tabla 2.4*Comparación por pares*

	Eficiencia	Costo	Instalación	Espacio	Estética	Ventilación	Mantenimiento	Vida útil
Eficiencia		4	3	3	4	4	5	4
Costo	2		5	3	2	2	3	3
Instalación	4	1		4	2	3	3	2
Espacio	3	3	2		4	4	3	2
Estética	2	4	4	2		2	1	1
Ventilación	2	4	3	2	4		3	3
Mantenimiento	1	3	3	3	5	3		2
Vida útil	2	3	4	4	5	3	4	

Tabla 2.5*Ponderación de factores de influencia*

Factores	Puntuación	Porcentaje (%)
Eficiencia	27	15.98
Costo	20	11.83
Instalación	19	11.24
Espacio	21	12.43
Estética	16	9.47
Ventilación	21	12.43
Mantenimiento	20	11.83
Vida útil	25	14.79
Total	169	100

Tabla 2.6*Matriz de decisión de las alternativas de solución*

Factores	Cabinas acústicas		Aire acondicionado centralizado		Reubicación de compresores	
	Escala	Resultado	Escala	Resultado	Escala	Resultado
Eficiencia (15.98%)	3	0.48	4	0.64	4	0.64
Costo (11.83%)	4	0.47	1	0.12	2	0.24
Instalación (11.24%)	2	0.22	1	0.11	3	0.34
Espacio (12.43%)	3	0.37	2	0.25	5	0.62
Estética (9.47%)	1	0.09	3	0.28	4	0.38
Ventilación (12.43%)	2	0.25	4	0.5	5	0.62
Mantenimiento (11.83%)	2	0.24	3	0.35	3	0.35
Vida útil (14.79%)	2	0.3	4	0.59	4	0.59
Total		2.42		2.84		3.78

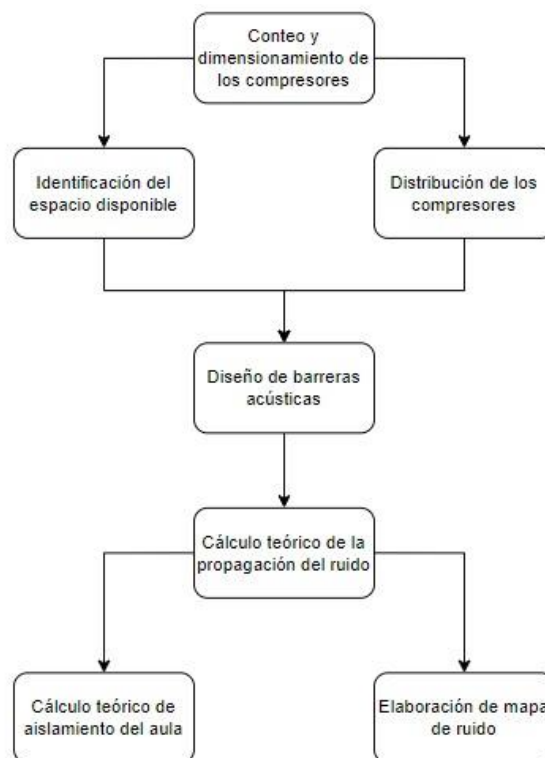
2.13. Implementación de la alternativa seleccionada: Reubicación de compresores

El procedimiento por seguir para la reubicación de los compresores repartidos por la facultad consiste en analizar el espacio y ubicación en donde se pueden trasladar, ya que en algunos casos será necesario diseñar paneles acústicos para evitar la filtración de ruido a aulas cercanas. El objetivo de este análisis es evitar el traslado del ruido a otro lugar y por ende el problema.

Los pasos por seguir para implementar la solución escogida están representados en el siguiente diagrama de flujo:

Figura 2.7

Diagrama de flujo para la propuesta de reubicación de compresores



2.13.1. Identificación del espacio disponible y distribución de compresores

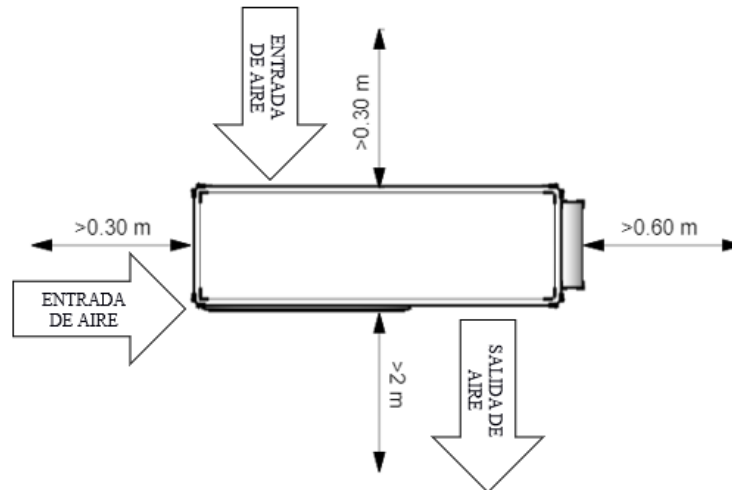
Se consideró el número y tamaño de los compresores para determinar el espacio requerido y compararlo con el espacio disponible. Este espacio disponible se lo determinó conociendo las dimensiones del techo de cada edificio en toda la FIMCP.

Para la distribución de los compresores se tomó en cuenta que hay dos tipos de compresores en toda la FIMCP:

- Descarga tipo horizontal

Figura 2.8

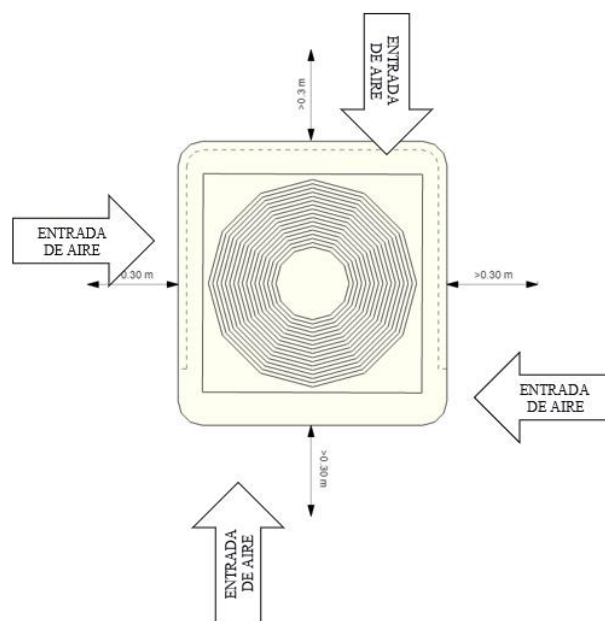
Distancias para la distribución de los compresores horizontales



- Descarga tipo vertical

Figura 2.9

Distancias para la distribución de los compresores verticales



2.13.2. Aislamiento térmico para las tuberías

Se usó el procedimiento simplificado propuesto por el Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios (RITE) y recomendado por Norma Ecuatoriana de la Construcción.

Este procedimiento demuestra el espesor mínimo en *mm* para el aislamiento térmico, en función del diámetro exterior de la tubería sin aislar y para un material de conductividad térmica de referencia a 10°C de $0.040 \text{ W/m} \cdot \text{K}$.

Tabla 2.7

Espesores mínimos de aislamiento de tuberías y accesorios que transportan fluidos calientes que discurren por el interior de edificaciones

Diámetro exterior (<i>D</i>)	Temperatura máxima del fluido		
	40°C a 60°C	> 60°C a 100°C	> 100°C a 180°C
<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>
$D \leq 35$	25	25	30
$35 < D \leq 90$	30	30	40
$90 < D \leq 140$	30	40	50
$D > 140$	35	40	50

Tabla 2.8

Espesores mínimos de aislamiento de tuberías y accesorios que transportan fluidos calientes que discurren por el exterior de edificaciones

Diámetro exterior (<i>D</i>)	Temperatura máxima del fluido		
	40°C a 60°C	> 60°C a 100°C	> 100°C a 180°C
<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>
$D \leq 35$	35	35	40
$35 < D \leq 90$	40	40	50
$90 < D \leq 140$	40	50	60
$D > 140$	45	50	60

Tabla 2.9

Espesores mínimos de aislamiento de tuberías y accesorios que transportan fluidos fríos que discurren por el interior de edificaciones

Diámetro exterior (<i>D</i>)	Temperatura máxima del fluido		
	> -10°C a 0°C	> 0°C a 10°C	> 10°C
<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>
$D \leq 35$	30	25	20
$35 < D \leq 60$	40	30	20
$60 < D \leq 90$	40	30	30
$90 < D \leq 140$	50	40	30
$D > 140$	50	40	30

Tabla 2.10

Espesores mínimos de aislamiento de tuberías y accesorios que transportan fluidos fríos que discurren por el exterior de edificaciones

Diámetro exterior (<i>D</i>)	Temperatura máxima del fluido		
	> -10°C a 0°C	> 0°C a 10°C	> 10°C
<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>
$D \leq 35$	50	40	40
$35 < D \leq 60$	63	50	40
$60 < D \leq 90$	63	50	50
$90 < D \leq 140$	75	63	50
$D > 140$	75	63	50

Materiales de conductividad térmica diferente de $0.040 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ a 10°C . se aplica la siguiente ecuación para determinar el espesor mínimo:

$$d = \frac{D}{2} \left[e^{\left(\frac{\lambda}{\lambda_{ref}} \right) \ln \frac{D+2d_{ref}}{D}} - 1 \right] \quad (2.2)$$

Donde:

d_{ref} : espesor mínimo de referencia. en *mm*.

d : espesor mínimo de material empleado. en *mm*.

D : diámetro interior del material aislante. coincidente con el diámetro exterior de la tubería.
en mm .

λ_{ref} : conductividad térmica de referencia. igual a $0.040 W/m \cdot K$ a $10^\circ C$.

λ : conductividad térmica del material empleado. en $W/m \cdot K$.

2.13.3. Propagación de sonido

Para asegurar que la propuesta de solución sea eficiente, se calculó el nivel de presión sonora teórico que llegará a las afueras de las aulas más cercanas. Se utilizó la ecuación 1.21 donde el valor de A será igual a 0 por las condiciones atmosféricas, mientras que el valor de DI se obtendrá según el tipo de fuente del Anexo Figura A4.

2.13.4. Barrera acústica

Para obtener una atenuación de ruido considerable fue necesario colocar una barrera acústica entre el emisor (conjunto de compresores) y el receptor (aulas o áreas de estudio cercanas) para así tener un nivel de presión sonora por debajo de 40 dBA. Para este fin se utilizó la ecuación 1.18 asumiendo que la altura de la barrera será de 3m y que el receptor está en la zona de sombra. Al obtener un resultado de $N \geq -0.2$ se procedió a utilizar la ecuación 1.19, la cual entregó el nivel de presión sonora después de la atenuación por la barrera.

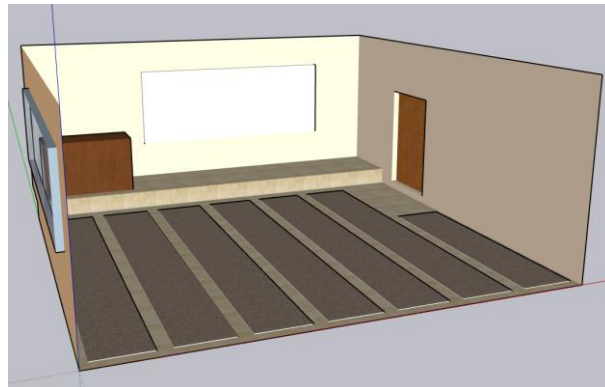
2.13.5. Simulación

- **Modelo 3D:** Utilizando el programa SketchUp, se modeló las aulas de clase de modo que el área que corresponde a la audiencia ocupando pupitres fue simplificada de forma que en el modelado será un área equivalente tal como se muestra en la figura 2.10. Esto se realizó para facilitar la selección de la superficie, ya que el mallado contaba con muchos elementos y complicaba la selección correcta del área.

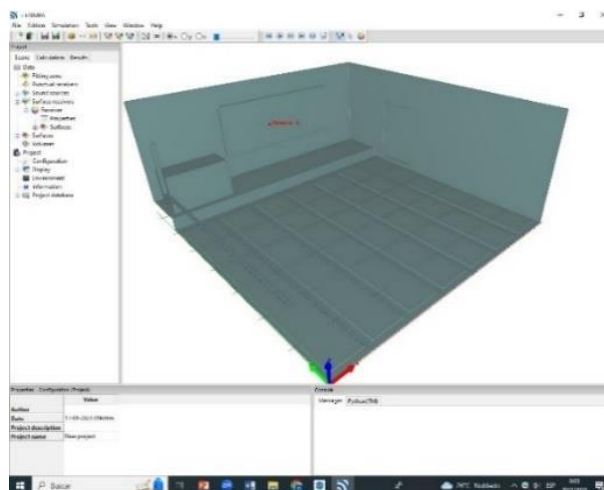
- Importar modelo: Cuando el modelo 3D se completó, se importó el archivo en formato 3ds para luego llevarlo al programa I-SIMPA.
- Selección de superficies: La simulación requirió identificar cuáles son las superficies del piso, techo, paredes, ventanas, puerta, pizarra y los pupitres con persona.
- Fuentes de ruido: La simulación en I-SIMPA nos permitió crear una fuente de ruido puntual la cual correspondería a una persona dando una cátedra dentro del aula. Se colocó la potencia sonora de la fuente, de 70dBA para una persona común, además la fuente se ubicó en la parte frontal del aula modelada como se muestra en la figura 2.11.
- Receptores: Fue necesario identificar la superficie de los receptores en la pestaña *Surface receivers*, en este caso fue la audiencia ocupando los pupitres y el pido.
- Coeficientes de absorción acústica: Se colocó los coeficientes de absorción obtenidos del Anexo A6 para cada superficie dentro de la pestaña *Database*. El coeficiente de absorción fue añadido por cada frecuencia.
- Compilación: Luego de colocar todos los datos nos dirigimos a la pestaña *cálculos* damos clic derecho a la pestaña de *classical theory of reverberation* y ejecutamos la simulación.
- Resultados: Para finalizar se verificó el tiempo de reverberación en cada frecuencia y se comparó con los resultados obtenidos en las mediciones preliminares.

Figura 2.10

Ejemplo del modelo 3D con superficies simplificadas

**Figura 2.11**

Simulación del tiempo de reverberación del aula



2.14. Parámetros de diseño

Los parámetros de diseño de la solución para el ruido excesivo provenientes del sistema de climatización de la FIMCP están dados por los requerimientos del cliente basado en mediciones y análisis previos del ruido en los alrededores.

- Nivel de presión sonora en el exterior de las aulas menor a 40dBA.
- La solución no debe afectar el buen funcionamiento de los equipos.

- Utilizar materiales destinados para el estudio acústico que estén disponibles en el mercado ecuatoriano.
- Permitir un fácil acceso a los dispositivos para posteriores mantenimientos.

Capítulo 3

3. Resultados y análisis

3.1. Estado actual de las aulas de la facultad

En esta sección se presentan las mediciones de ruido realizadas en los alrededores y en el interior de las aulas. Además del análisis del estado actual de las aulas afectadas por el ruido de los compresores en los exteriores.

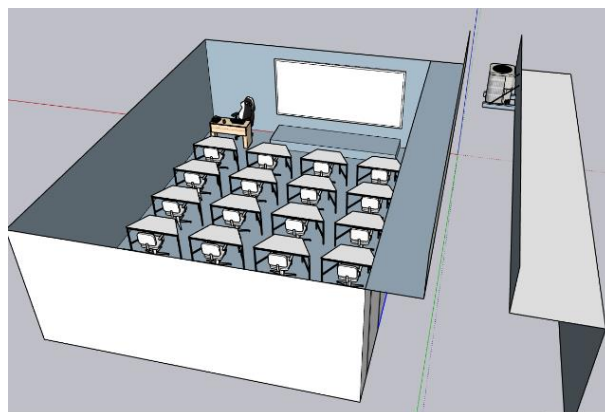
3.2. Insonorización

3.2.1. Medición de ruido en las estancias

Las mediciones de ruido se realizaron en puntos cercanos a las fuentes de ruido con los sistemas de climatización encendidos. Estas mediciones se tomaron en los edificios 12C, 12H y 12G de la FIMCP, teniendo en cuenta que las aulas de clases se ubican en los primeros dos edificios, mientras que en el edificio 12G se encuentra la biblioteca de la facultad. Además, es un edificio cercano al 12H, por lo que el ruido de los compresores afecta directamente a las aulas.

Figura 3.1

Compresores adyacentes que afectan a la medición del ruido de fondo del aula

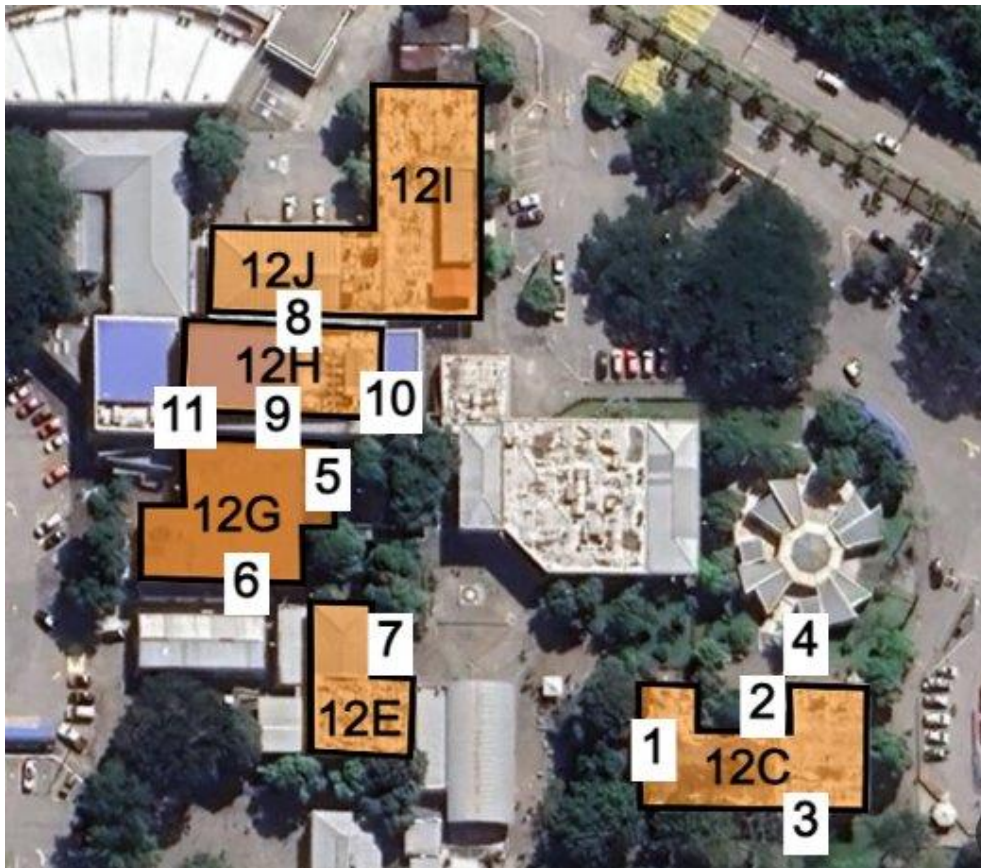


En la Tabla 3.1 se observa el nivel de presión sonora de cada ubicación escogida estratégicamente entre los 3 edificios previamente mencionados. La Figura 3.2 muestra la

ubicación de cada punto donde se realizó mediciones alrededor de toda la facultad en el mapa según su numeración.

Figura 3.2

Ubicación de los puntos de medición



Nota: Imagen satelital de la FIMCP obtenida de Google Earth

Tabla 3.1

Mediciones de ruido en puntos cercanos a las fuentes de ruido (compresores)

Edificio	Punto	Referencia donde fue tomada la medición	Nivel de presión sonora obtenida [dBA]
12C	1	Entre las aulas A003 y A004	60.8
	2	Al inicio de las escaleras	63.3
	3	Detrás del edificio cerca de la estación de buses	67.7
	4	Entre el edificio y los clubes de la facultad	63
12G	5	Mesotas	64.4
	6	Afuera del Centro de Investigación de Nanotecnología	63
	7	Afuera de LEMAT	62.4
	8	Detrás de CAMPRO	64.9
12H	9	A lado de mesotas	66.3
	10	Afuera de las aulas	71.6
	11	Afuera del laboratorio de Sólidos	66.4

3.2.2. Medición de ruido en el interior de las aulas

En esta sección se debe considerar que el sistema de climatización mencionado se encuentra en el interior de las aulas de los edificios 12C y 12H.

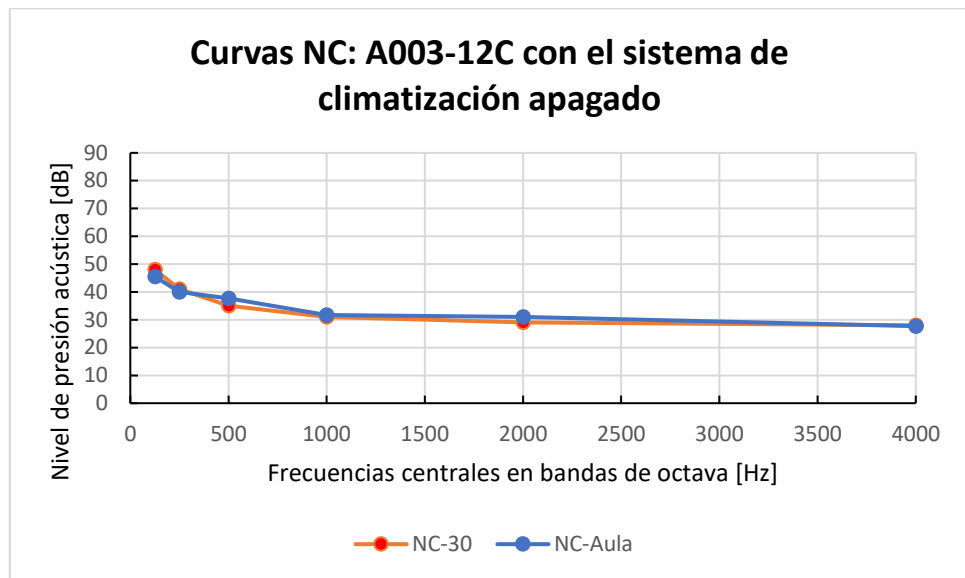
En la Figura 3.1, hay compresores muy cercanos a las aulas lo que afectó las mediciones, provocando un ruido adicional que aumentó el ruido de fondo del interior del aula.

3.2.2.1. Sistema de climatización apagado

Como ejemplo se tiene las mediciones de ruido que se realizó en al aula A003 del edificio 12C. En la Figura 3.3 se ve la curva NC-30 de color naranja y la curva NC del aula de color azul.

Figura 3.3

Curvas NC para el aula A003 del edificio 12C con el sistema de climatización apagado



En la Tabla 3.2 están las mediciones de ruido por banda de frecuencia que se tomaron en las aulas entre los dos edificios, cada aula tiene su número y el edificio.

Tabla 3.2

Mediciones de ruido en el interior del aula con el sistema de climatización apagado

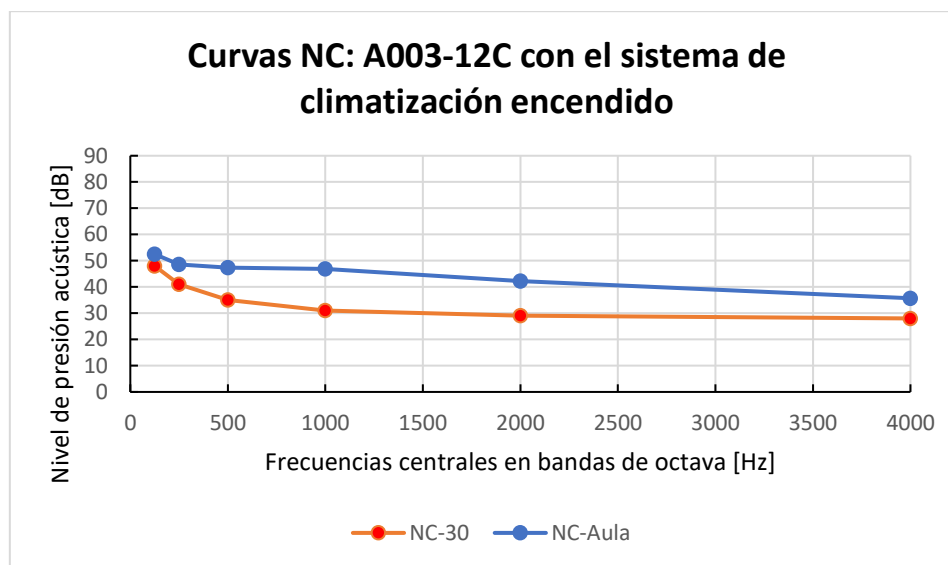
Sistema de climatización apagado							
Aula		Banda de frecuencia [Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000
Valor [dB]	A001-12C	36.9	32.6	30.7	29.8	27.5	27.8
	A003-12C	45.5	40	37.7	31.7	31	27.7
	A002-12H	44.8	38.6	34	31.5	29.8	24.8
	A101-12H	45.2	40.2	36.8	36.6	33.5	27.5
	A102-12H	45.3	41.2	39.7	39.1	36.5	29.2
	A103-12H	45.9	40.9	37.9	36.8	33.3	28.7
	A104-12H	45.8	40.5	38.3	33.9	31.4	25.5
	A105-12H	44	38.7	35.4	33.1	30.9	24.9
	A201-12H	46.2	44.9	41.6	36.2	28.1	23.5
A202-12H	50.4	46	42.5	34.2	27.8	23.8	

3.2.2.2. Sistema de climatización encendido

De igual manera, se tomó como ejemplo en la Figura 3.4 el aula A003 del edificio 12C, pero con el sistema de climatización encendido.

Figura 3.4

Curvas NC para el aula A003 del edificio 12C con el sistema de climatización encendido



En la Tabla 3.3 están las mediciones de ruido por banda de frecuencia.

Tabla 3.3

Mediciones de ruido en el interior del aula con el sistema de climatización encendido

Sistema de climatización encendido							
Aula		Banda de frecuencia [Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000
Valor [dB]	A001-12C	60.4	57.2	51.3	45.3	39.5	34.8
	A003-12C	52.5	48.6	47.3	46.9	42.2	35.7
	A002-12H	55.1	51.4	46.2	43.2	36.7	30.4
	A101-12H	51.4	47.6	44.1	40.9	35.9	30
	A102-12H	53.5	51.1	49.5	45.5	40	33.5
	A103-12H	51	48.6	47.7	46.9	40.7	33.8
	A104-12H	51.6	48	46.9	42.5	35.4	27.2
	A105-12H	54.7	49.4	46.1	42.8	37.2	29.5
	A201-12H	54.3	50.1	46.7	42.7	37.4	30.1
	A202-12H	55.1	51.7	48.6	44.3	42	32.7

3.3. Tiempo de reverberación

3.3.1. Tiempo de reverberación experimental en el interior de las aulas de clases

En la Figura 3.5 se puede observar el tiempo de reverberación para cada banda de frecuencia del aula A003 del edificio 12C.

Figura 3.5

Tiempo de reverberación del aula A003 del edificio 12C usando el software REW



En la Tabla 3.4 y Tabla 3.5 están los tiempos de reverberación en segundos para cada aula por banda de frecuencia. En la primera tabla además de las aulas se tienen datos de salas de computación.

Tabla 3.4*Tiempo de reverberación medido en las aulas del edificio 12C*

Medición por aula		Banda de frecuencia [Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000
TR [s]	A001	1.187	0.978	0.927	0.795	0.796	0.793
	A002	1.469	1.191	1.158	0.951	1.02	0.889
	A003	1.856	1.236	1.041	0.859	0.907	0.888
	A004	1.816	1.1	1.079	0.854	0.878	0.847
	A005	1.577	1.24	1.034	0.874	0.884	0.878
	A101	1.032	0.994	0.91	0.734	0.77	0.797
	A102	1.323	1.157	0.967	0.774	0.757	0.754
	A103	0.995	1.056	1.071	0.82	0.845	0.879
	A104	1.108	1.006	0.961	0.762	0.769	0.763
	A105	1.136	0.933	0.978	0.866	0.895	0.911

Tabla 3.5*Tiempo de reverberación en segundos medido en las aulas del edificio 12H*

Medición por aula		Banda de frecuencia [Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000
TR [s]	A001	2.101	1.647	1.314	1.14	1.199	1.109
	A102	1.196	1.149	1.016	0.905	0.885	0.872
	A104	1.41	1.067	1.078	0.906	0.831	0.835
	A201	1.593	1.539	1.229	1.015	1.027	0.964

3.4. Inteligibilidad de la palabra

Para el análisis de inteligibilidad se utilizaron los datos del tiempo de reverberación y las dimensiones de cada aula. Además, se estableció un factor de directividad de 4, debido a la forma de dirección del sonido de un hablante. Como ejemplo de cálculo se tomó el aula A003 del edificio 12C y siguiendo la metodología que se explicó en el anterior capítulo usando los datos obtenidos a 250 Hz.

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

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

3.4.1. Coeficiente de absorción

$$\bar{\alpha} = \frac{0.161V}{TR \cdot S_{tot}}$$

$$\bar{\alpha} = \frac{0.161 \cdot 150.02}{2.605 \cdot 184.91}$$

$$\bar{\alpha} = 0.11$$

3.4.2. Constante del aula

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

$$R = \frac{184.91 \cdot 0.11}{1 - 0.11}$$

$$R = 22.85$$

3.4.3. Distancia crítica

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

$$D_c = 0.14\sqrt{4 \cdot 22.85}$$

$$D_c = 1.34$$

3.4.4. Selección de ecuación por usar

$$r \leq 3.16D_c$$

$$r \leq 3.16 \cdot 1.34$$

$$r \leq 4.23$$

Para saber que ecuación escoger se debe ver que la distancia entre el emisor y receptor r , el cual fue de 4 m, debe cumplir con las condiciones. En este caso al ser mayor que $3.16D_c$ se usa la segunda ecuación.

En la Tabla 3.6 se tiene un resumen de los resultados obtenidos, donde se subrayó con color rojo aquellos valores que no cumplen con un rango aceptable del %AICons.

Tabla 3.6

Porcentaje de AICons para el aula A003 del edificio 12C

A003-12C							
Frecuencias [Hz]	Tiempo de reverberación [s]	Coefficiente de absorción	Volumen [m ³]	Área [m ²]	Constante del aula [m ²]	Distancia crítica [m]	%AICons
125	1,856	0,07	150,02	184,91	13,92	1,04	16,7
250	1,236	0,11	150,02	184,91	22,85	1,34	6,59
500	1,041	0,13	150,02	184,91	27,63	1,47	5,55
1000	0,859	0,15	150,02	184,91	32,63	1,6	4,58
2000	0,907	0,14	150,02	184,91	30,1	1,54	4,84
4000	0,888	0,15	150,02	184,91	32,63	1,6	4,74

3.5. Propuesta de reubicación de los condensadores/compresores

En la Tabla 3.7 se encuentran las distancias entre los compresores y las aulas más cercanas según el modelo 3D realizado con anterioridad. Esta distancia teórica fue de la propuesta de solución, teniendo en cuenta que mientras más alejado estén, menor inmisión de ruido.

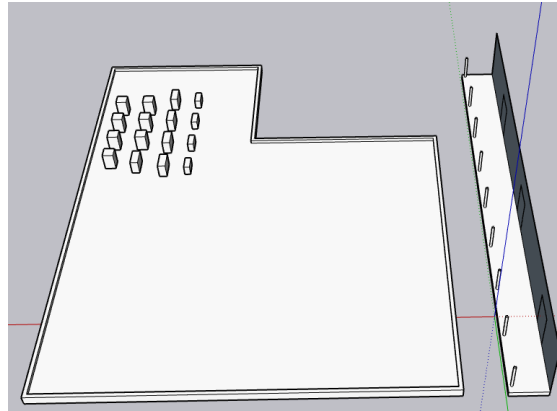
Tabla 3.7*Distancias entre compresor y punto de interés*

#Compresores	12G	12J	12E
	R(m)		
1	18.65	11.63	28.23
2	18.65	11.63	28.23
3	18.65	11.63	28.23
4	18.65	11.63	28.23
5	17.05	13.03	26.83
6	17.05	13.03	26.83
7	17.05	13.03	26.83
8	17.05	13.03	26.83
9	15.65	14.74	25.47
10	15.65	14.74	25.47
11	15.65	14.74	25.47
12	15.65	14.74	25.47
13	14.3	-	24.7
14	14.3	-	-
15	14.3	-	-
16	14.3	-	-

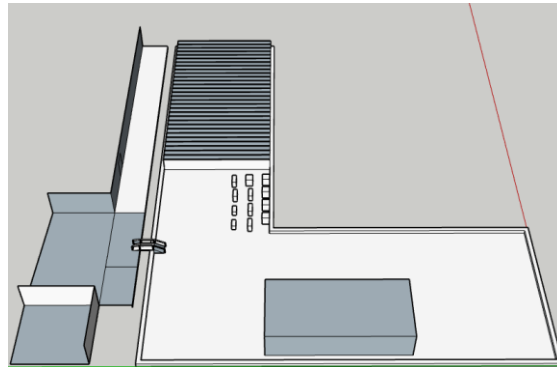
En las figuras 3.6, 3.7 y 3.8 se muestran los modelos 3D de los techos de los edificios 12G, 12J y 12E. En estas imágenes se puede apreciar en donde estarían ubicados los compresores según la propuesta de reubicación.

Figura 3.6

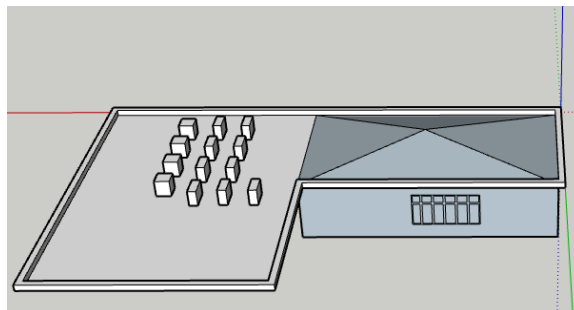
Ejemplo de la reubicación de los compresores del edificio 12G

**Figura 3.7**

Ejemplo de la reubicación de los compresores del edificio 12J

**Figura 3.8**

Ejemplo de la reubicación de los compresores del edificio 12E



3.5.1. Propagación de ruido

Se estimó teóricamente el nivel de presión sonora promedio que llegaría a los sectores aledaños a los tejados donde según la propuesta de solución se ubicarían los compresores.

Al no tener los equipos necesarios para medir la potencia sonora proveniente de los compresores, se utilizaron los valores que el fabricante coloca en la hoja de datos del condensador. Estos valores se encuentran tabulados en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8

Potencia acústica de los compresores según el fabricante

Potencia sonora según su frecuencia [dB]						
125[Hz]	250[Hz]	500[Hz]	1000[Hz]	2000[Hz]	4000[Hz]	8000[Hz]
73.5	75	74	72.5	67.5	62.5	56.5

Para obtener la propagación de ruido en el edificio 12G primero se corrigió los valores de potencia de la Tabla 3.9 con los valores del Anexo Figura A3 por cada frecuencia:

$$NWS = W + CPB$$

$$NWS = 73.5 + (-16.1) = 57.4[dBA]$$

Con esto se pudo calcular la presión sonora por cada frecuencia utilizando la ecuación:

$$NPS = NWS + 3 - 20 \log(R) - 11$$

$$NPS = 57.4[dBA] + 3 - 20 \log(18.65) - 11$$

$$NPS = 22.49[dBA]$$

Con todos los valores de frecuencia y por cada compresor se obtuvieron los valores de presión sonora de la Tabla 3.9.

Tabla 3.9

Propagación de ruido teórico que provocarían los compresores hacia el edificio 12H según la propuesta de solución

Presión sonora según su frecuencia [dBA]							NPS
125[Hz]	250[Hz]	500[Hz]	1000[Hz]	2[Hz]	4[Hz]	8[Hz]	
22.49	31.49	35.89	37.59	33.79	28.59	20.49	41,6
22.49	31.49	35.89	37.59	33.79	28.59	20.49	41,6
22.49	31.49	35.89	37.59	33.79	28.59	20.49	41,6
22.49	31.49	35.89	37.59	33.79	28.59	20.49	41,6
23.14	32.14	36.54	38.24	34.44	29.24	21.14	42,2
23.14	32.14	36.54	38.24	34.44	29.24	21.14	42,2
23.14	32.14	36.54	38.24	34.44	29.24	21.14	42,2
23.14	32.14	36.54	38.24	34.44	29.24	21.14	42,2
23.76	32.76	37.16	38.86	35.06	29.86	21.76	42,9
23.76	32.76	37.16	38.86	35.06	29.86	21.76	42,9
23.76	32.76	37.16	38.86	35.06	29.86	21.76	42,9
23.76	32.76	37.16	38.86	35.06	29.86	21.76	42,9
24.39	33.39	37.79	39.49	35.69	30.49	22.39	43,5
24.39	33.39	37.79	39.49	35.69	30.49	22.39	43,5
24.39	33.39	37.79	39.49	35.69	30.49	22.39	43,5
24.39	33.39	37.79	39.49	35.69	30.49	22.39	43,5

Para obtener la presión sonora promedio que se propagaría hacia las aulas se aplicó la siguiente ecuación:

$$NPS (promedio) = 10 \log \left(\sum 10^{\frac{NPS}{10}} \right)$$

$$NPS (promedio) = 10 \log \left(10^{\frac{22.49}{10}} + 10^{\frac{23.14}{10}} + \dots + = 54.65 [dBA] \right)$$

Aplicando el mismo procedimiento se obtuvo los valores mostrados en la tabla 3.10 por cada edificio.

Tabla 3.10

Nivel de presión sonora teórica que llegaría a las aulas más cercanas de cada edificio

NPS promedio [dBA]	
12G	54.65
12J	57
12E	51.15

3.5.2. Atenuación por barrera acústica

Según la propuesta de solución, los equipos se ubicarán en los techos de sus edificios, pero al tener la propagación teórica del ruido superior a 50dBA, se necesitó una barrera acústica teórica que servirá para atenuar la presión sonora que llegaría a las aulas cercanas. Se asume que la barrera tendrá una altura de 3m y estará fabricada de madera y lana de vidrio de 2” con las propiedades que se muestran en el Anexo A5.

En la Tabla 3.11 se muestran los valores requeridos para el cálculo de pérdida por inserción los cuales fueron obtenidos mediante un modelo 3D del techo del edificio junto al grupo de compresores y la barrera acústica. El cálculo de la pérdida por inserción (IL) de la barrera se muestra a continuación.

Tabla 3.11

Valores obtenidos del modelo 3D para el cálculo de la atenuación por barrera acústica en el edificio 12G

C(m)	A(m)	B(m)
22.15	5.95	17.49
22.15	5.95	17.49
22.15	5.95	17.49
22.15	5.95	17.49
20.55	4.59	17.49
20.55	4.59	17.49
20.55	4.59	17.49
20.55	4.59	17.49
19.15	3.08	17.49
19.15	3.08	17.49
19.15	3.08	17.49
19.15	3.08	17.49
17.8	2.09	17.49
17.8	2.09	17.49
17.8	2.09	17.49
17.8	2.09	17.49

Para el cálculo del número de Fresnel se utilizó la ecuación 1.18:

$$N = \frac{2}{\lambda} (A + B - C)$$

$$N = \frac{2}{125} (22.15 + 5.95 - 17.49) = 0.02$$

En la tabla 3.12 se encuentran los valores adimensionales de N teórico para el edificio 12G.

Tabla 3.12

Número de Fresnal para el edificio 12G por cada frecuencia

Longitud de onda [m]						
2.744	1.372	0.686	0.343	0.1715	0.08575	0.04288
N						
0.94	1.88	3.76	7.52	15.04	30.09	60.17
0.94	1.88	3.76	7.52	15.04	30.09	60.17
0.94	1.88	3.76	7.52	15.04	30.09	60.17
0.94	1.88	3.76	7.52	15.04	30.09	60.17
1.12	2.23	4.46	8.92	17.84	35.69	71.37
1.12	2.23	4.46	8.92	17.84	35.69	71.37
1.12	2.23	4.46	8.92	17.84	35.69	71.37
1.12	2.23	4.46	8.92	17.84	35.69	71.37
1.03	2.07	4.14	8.28	16.56	33.12	66.24
1.03	2.07	4.14	8.28	16.56	33.12	66.24
1.03	2.07	4.14	8.28	16.56	33.12	66.24
1.03	2.07	4.14	8.28	16.56	33.12	66.24
1.30	2.59	5.19	10.38	20.76	41.52	83.03
1.30	2.59	5.19	10.38	20.76	41.52	83.03
1.30	2.59	5.19	10.38	20.76	41.52	83.03
1.30	2.59	5.19	10.38	20.76	41.52	83.03

Como se obtuvo un $N > -0.2$ se procedió a calcular el valor de la pérdida por inserción de la siguiente manera:

$$IL = 20 \log \frac{\sqrt{2\pi N}}{\tanh(2\pi N)}$$

$$IL = 20 \log \frac{\sqrt{2\pi 0.9402}}{\tanh \sqrt{2\pi 0.9402}} + 5 = 12.85$$

Los valores por cada longitud de onda se encuentran en la tabla 3.13.

Tabla 3.13

Pérdidas por inserción teórica por cada longitud de onda para el edificio 12G

Longitud de onda [m]						
2.744	1.372	0.686	0.343	0.1715	0.08575	0.042875
IL[dBA]						
12.849	15.742	18.736	21.745	24.755	27.766	30.776
12.849	15.742	18.736	21.745	24.755	27.766	30.776
12.849	15.742	18.736	21.745	24.755	27.766	30.776
12.849	15.742	18.736	21.745	24.755	27.766	30.776
13.542	16.475	19.476	22.486	25.496	28.507	31.517
13.542	16.475	19.476	22.486	25.496	28.507	31.517
13.542	16.475	19.476	22.486	25.496	28.507	31.517
13.542	16.475	19.476	22.486	25.496	28.507	31.517
13.237	16.154	19.152	22.162	25.172	28.183	31.193
13.237	16.154	19.152	22.162	25.172	28.183	31.193
13.237	16.154	19.152	22.162	25.172	28.183	31.193
13.237	16.154	19.152	22.162	25.172	28.183	31.193
14.170	17.128	20.133	23.143	26.154	29.164	32.174
14.170	17.128	20.133	23.143	26.154	29.164	32.174
14.170	17.128	20.133	23.143	26.154	29.164	32.174
14.170	17.128	20.133	23.143	26.154	29.164	32.174

El nivel de presión sonora teórico que llegaría a las aulas según la solución propuesta será:

$$NPS (\text{promedio}) = 10 \log \left(\sum 10^{\frac{NPS-IL}{10}} \right)$$

$$NPS (\text{promedio}) = 10 \log \left(10^{\frac{22.49-12.84}{10}} + 10^{\frac{23.14-13.24}{10}} + \dots \right) = 34 [dBA]$$

La pérdida por inserción global (IL_{global}) se calculó de la siguiente manera:

$$IL_{global} = NPS_{promedio} - NPS_{atenuado}$$

$$IL_{global} = 54.64[dBA] - 34[dBA] = 20.6[dBA]$$

Tabla 3.14

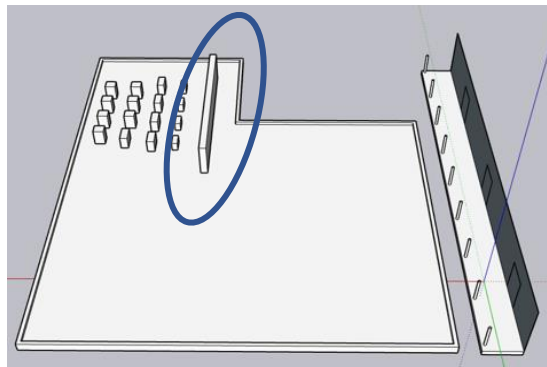
Atenuación teórica de ruido por cada edificio

Edificio	12G	12J	12E
NPS sin barrera acústica [dBA]	54,64	57	51,15
NPS con barrera acústica [dBA]	34,0	38,6	33,5
IL Global [dBA]	20,6	18,4	17,6

En las figuras 3.9, 3.10 y 3.11 se muestran las simulaciones las barreras acústicas para cada lote de compresores por cada edificio analizado.

Figura 3.9

Ubicación de la barrera acústica en el edificio 12G

**Figura 3.10**

Ubicación de la pared acústica en el edificio 12J

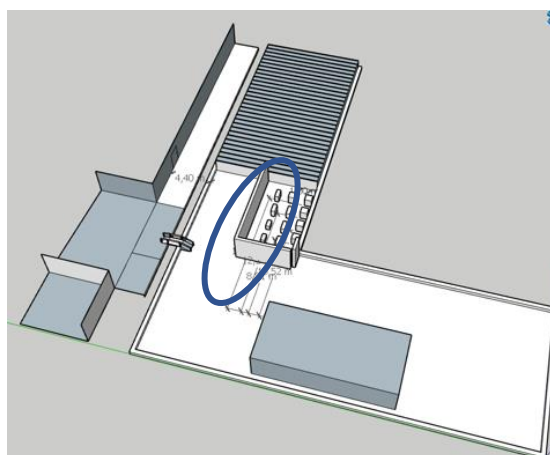
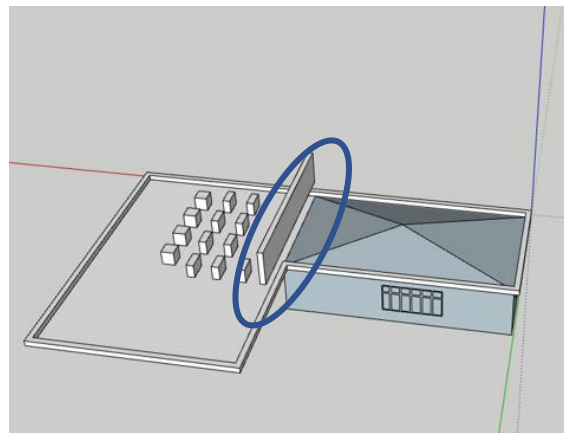


Figura 3.11

Ubicación de la pared acústica en el edificio 12E



3.5.3. Cálculo teórico de las nuevas mediciones de ruido en el interior de las aulas.

Se calculó la reducción sonora experimental con las mediciones obtenidas previamente del ruido exterior e interior de las aulas. En la Tabla 3.15 se puede observar la reducción sonora proveniente de una resta directa entre el ruido exterior con las fuentes de ruido e interior del aula con el sistema de climatización apagado.

Tabla 3.15

Reducción sonora experimental

Reducción sonora experimental								
Aula		Banda de frecuencia [Hz]						NPS
		125	250	500	1000	2000	4000	
Valor [dB]	A001-12C	46.9	39.8	36.8	33.7	29.9	28.7	39.86
	A003-12C	38.3	32.4	29.8	31.8	26.4	28.8	36.06
	A002-12H	33.6	29.6	32.4	31.2	27.2	27.2	35.85
	A101-12H	36.9	38.1	32.3	30.8	29.4	32.3	38.18
	A102-12H	36.8	37.1	29.4	28.3	26.4	30.6	36.1
	A103-12H	36.2	37.4	31.2	30.6	29.6	31.1	37.59
	A104-12H	36.3	37.8	30.8	33.5	31.5	34.3	39.75
	A105-12H	38.1	39.6	33.7	34.3	32	34.9	40.68
	A201-12H	35.9	33.4	27.5	31.2	34.8	36.3	40.88
A202-12H	31.7	32.3	26.6	33.2	35.1	36	41.09	

La Tabla 3.16 muestra el ruido provocado únicamente por el sistema de climatización en el interior del aula. Estos valores se calcularon con una resta logarítmica entre el ruido de fondo del aula con el sistema de climatización encendido y apagado.

Tabla 3.16

Ruido provocado por el sistema de climatización

Ruido provocado por el sistema de climatización								
Aula		Banda de frecuencia [Hz]						NPS
		125	250	500	1000	2000	4000	
Valor [dB]	A001-12C	60.38	57.18	51.26	45.18	39.22	33.83	62.53
	A003-12C	51.53	47.95	46.8	46.77	41.86	34.95	55.03
	A002-12H	54.67	51.17	45.93	42.9	35.71	29	56.88
	A101-12H	50.21	46.73	43.21	38.88	32.18	26.41	52.62
	A102-12H	52.79	50.63	49.02	44.37	37.43	31.48	56.23
	A103-12H	49.39	47.79	47.22	46.45	39.83	32.19	54.07
	A104-12H	50.27	47.15	46.25	41.85	33.2	22.3	53.39
	A105-12H	54.31	49.01	45.71	42.31	36.04	27.65	56.11
	A201-12H	53.57	48.54	45.09	41.6	36.86	29.03	55.46
A202-12H	53.3	50.34	47.38	43.85	41.83	32.1	56.21	

La propuesta de solución disminuirá el ruido de fondo en los alrededores de los edificios. La Tabla 3.17 muestra el mayor ruido de fondo teórico que se tendrá en los alrededores de los edificios de la FIMCP. Se despreció eventos realizados durante el semestre, porque son situaciones ocasionales.

Tabla 3.17

Nuevo ruido de fondo en los exteriores

Nuevo ruido de fondo en los exteriores [dB]						
Banda de frecuencia [Hz]						NPS
125	250	500	1000	2000	4000	
55.9	53.2	47.1	44.3	40.6	31.2	58.38

La Tabla 3.18 muestra los valores teóricos del ruido de fondo con el sistema de climatización apagado de cada aula en los edificios 12C y 12H. Estos valores teóricos se obtuvieron de una resta directa entre el nuevo ruido de fondo en los exteriores y la medición de ruido anteriormente realizada en el interior de cada aula con el sistema de climatización apagado.

Tabla 3.18

Sistema de climatización apagado teórico

Sistema de climatización apagado teórico								
Aula		Banda de frecuencia [Hz]						NPS
		125	250	500	1000	2000	4000	
Valor [dB]	A001-12C	9	13.4	10.3	10.6	10.7	2.5	18.17
	A003-12C	17.6	20.8	17.3	12.5	14.2	2.4	24.43
	A002-12H	22.3	23.6	14.7	13.1	13.4	4	26.75
	A101-12H	19	15.1	14.8	13.5	11.2	0	22.52
	A102-12H	19.1	16.1	17.7	16	14.2	0.6	23.95
	A103-12H	19.7	15.8	15.9	13.7	11	0.1	23.17
	A104-12H	19.6	15.4	16.3	10.8	9.1	0	22.78
	A105-12H	17.8	13.6	13.4	10	8.6	0	20.91
	A201-12H	20	19.8	19.6	13.1	5.8	0	24.94
	A202-12H	24.2	20.9	20.5	11.1	5.5	0	27.12

La Tabla 3.19 muestra los valores teóricos del ruido de fondo con el sistema de climatización encendido de cada aula en los edificios 12C y 12H. Estos valores teóricos se obtuvieron con una suma logarítmica entre el ruido de fondo teórico con el sistema de climatización apagado y el ruido provocado por el sistema de climatización de cada aula.

Tabla 3.19

Sistema de climatización encendido teórico

Sistema de climatización encendido teórico								
Aula		Banda de frecuencia [Hz]						NPS
		125	250	500	1000	2000	4000	
Valor [dB]	A001-12C	60.38	57.18	51.26	45.18	39.23	33.83	62.53
	A003-12C	51.53	47.96	46.8	46.77	41.87	34.95	55.03
	A002-12H	54.67	51.18	45.93	42.9	35.74	29.01	56.88
	A101-12H	50.21	46.73	43.22	38.89	32.21	26.42	52.62
	A102-12H	52.79	50.63	49.02	44.38	37.45	31.48	56.23
	A103-12H	49.39	47.79	47.22	46.45	39.84	32.19	54.07
	A104-12H	50.27	47.15	46.25	41.85	33.22	22.33	53.39
	A105-12H	54.31	49.01	45.71	42.31	36.05	27.66	56.11
	A201-12H	53.57	48.55	45.1	41.61	36.86	29.04	55.46
	A202-12H	53.31	50.34	47.39	43.85	41.83	32.1	56.22

3.5.4. Simulación del tiempo de reverberación de las aulas

Siguiendo la metodología expuesta en el capítulo 2. Se realizó la simulación en el programa I-SIMPA.

Figura 3.12

Captura de pantalla de la simulación del tiempo de reverberación del aula 003 del edificio 12C en el programa I-SIMPA

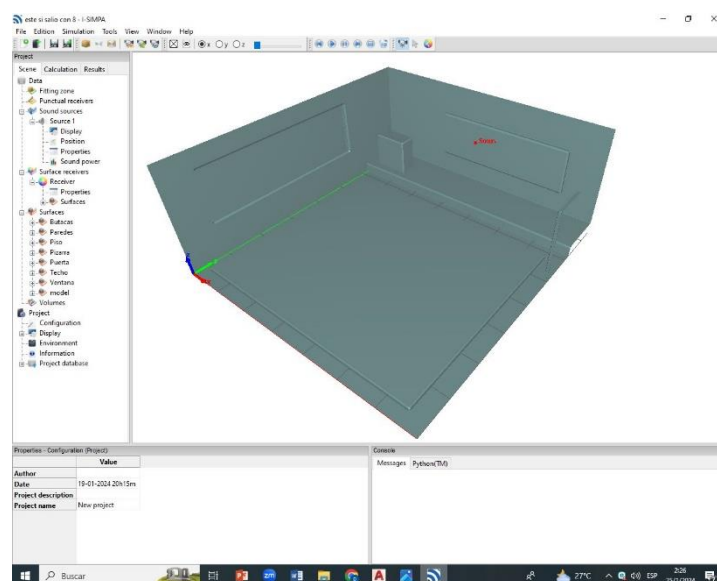
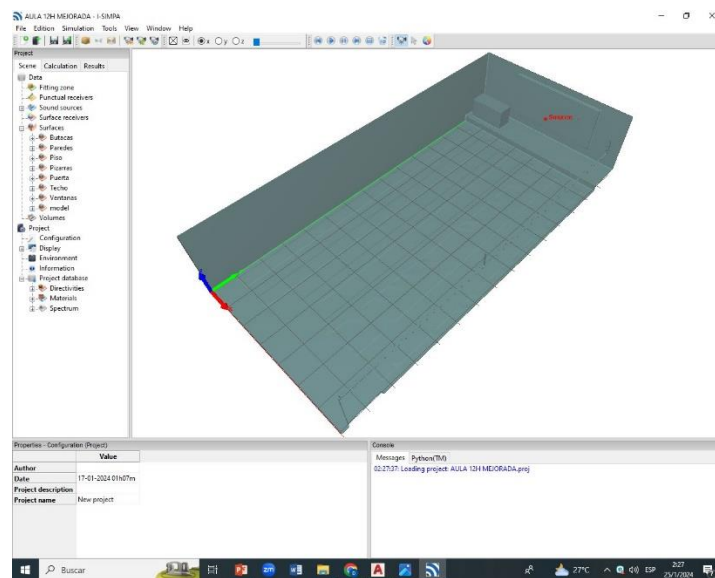


Figura 3.13

Captura de pantalla de la simulación del tiempo de reverberación del aula A001-12H



La Tabla 3.20 muestra los tiempos de reverberación obtenidos con la simulación en I-Simpa, donde se aprecia que el comportamiento del tiempo de reverberación ha disminuido.

Tabla 3.20

Tiempo de reverberación obtenido por simulación considerando que las aulas están con estudiantes

Aula 003-12C	
Frecuencia [Hz]	TR [s]
125	0,78
250	0,71
500	0,69
1000	0,57
2000	0,58
4000	0,59

Aula 001-12H	
Frecuencia [Hz]	TR [s]
125	1,16
250	1,11
500	1,0 ⁵
1000	0, ⁹⁵
2000	0, ⁹⁶
4000	0,94

3.5.5. Comparación de resultados de tiempo de reverberación

La Tabla 3.21 muestra el tiempo de reverberación que se midió considerando las fuentes de ruido externas y el TR simulado sin considerar las fuentes y con el aula llena de personas, esto para apreciar de mejor forma el cambio considerable en este parámetro.

Tabla 3.21

Comparación de los TR en diferentes condiciones

Frecuencia [Hz]	Aula 003-12C		Aula 001-12H	
	TR simulado [s]	TR medido [s]	TR simulado [s]	TR medido [s]
125	0.22	1.856	0.41	2.101
250	0.18	1.236	0.34	1.647
500	0.15	1.041	0.28	1.314
1000	0.13	0.859	0.24	1.14
2000	0.13	0.907	0.25	1.199
4000	0.14	0.888	0.26	1.109

3.6. Análisis de costos

La Tabla 3.22 muestra la estimación del costo total para la reubicación de los compresores con barreras acústicas en los tejados de los edificios 12C, 12E, 12G y 12H. Al ser una estimación el costo poder variar por el mercado.

Tabla 3.22*Estimación del costo total de la solución propuesta*

Descripción	Cantidad	Precio	Subtotal
Tubería de cobre flexible 1/4" de 15 metros	32	\$19,52	\$624,73
Tubería de cobre flexible 3/8" de 15 metros	38	\$30,33	\$1.152,43
Tubería de cobre flexible 5/8" de 15 metros	32	\$67,29	\$2.153,18
Tubería de cobre flexible 3/4" de 15 metros	38	\$90,51	\$3.439,22
Rubatex aislante de 1/4" de 2 metros	448	\$1,06	\$473,09
Rubatex aislante de 3/8" de 2 metros	532	\$1,10	\$586,37
Rubatex aislante de 5/8" de 2 metros	448	\$1,42	\$635,71
Rubatex aislante de 3/4" de 2 metros	532	\$1,64	\$870,78
Codo 90° de cobre 1/4"	84	\$0,18	\$14,97
Codo 90° de cobre 3/8"	112	\$0,45	\$50,27
Codo 90° de cobre 5/8"	84	\$0,34	\$28,27
Codo 90° de cobre 3/4"	112	\$0,84	\$93,88
Unión de cobre 1/4"	24	\$0,09	\$2,06
Unión de cobre 3/8"	48	\$0,22	\$10,45
Unión de cobre 5/8"	24	\$0,50	\$12,04
Unión de cobre 3/4"	48	\$0,55	\$26,61
Soporte para el condensador	53	\$66,00	\$3.498,00
Instalación del condensador+tuberías	53	\$60,00	\$3.180,00
Tablas de madera 0.3 metros x 6 metros	33	\$10,00	\$330,00
Correa de madera 6 metros	15	\$8,00	\$120,00
Funda de clavos 2"	3	\$2,00	\$6,00
Lana de vidrio 1.2 metros x 15 metros	12	\$120,00	\$1.440,00
Construcción + instalación de la pared acústica	4	\$100,00	\$400,00
		Total+IVA	\$21.445,83

La estimación total fue de 21445.83 USD. Este valor comprende desde la mano de obra hasta los accesorios, tuberías, aislantes térmicos, y materiales necesarios para la fabricación de la barrera acústica. Aunque se pueden reutilizar ciertos accesorios o tuberías, se prefirió cotizar todo lo que implica la reubicación para conocer el mercado actual.

Una reubicación de compresores con barrera acústica es más económica y eficiente que otras soluciones, como comprar y reemplazar los 53 condensadores que se encuentran

alrededor de la FIMCP. Aplicar solo barreras acústicas como carcasa al condensador se estaría afectando la ventilación del equipo y concentrando el ruido para en las áreas cercanas.

Con esta inversión se asegura que la inmisión de ruido provocado por equipos exteriores de los sistemas de climatización va a disminuir a NPS menores de 45dBA, mejorando notablemente la acústica dentro y fuera de las aulas y zonas de estudio de la FIMCP.

3.7. Análisis de resultados

3.7.1. Disminución del nivel de presión sonora incidente en las áreas de estudio y aulas de la FIMCP

La disminución del nivel de presión sonora se basó en la consideración de los niveles máximos de ruido que puede acumularse en las áreas de estudio, buscando reducir la inmisión de ruido proveniente de los equipos de climatización. Los resultados teóricos obtenidos, mostraron una notable disminución en los niveles sonoros en las cercanías de las aulas y áreas de estudio, lo que aporta una mejora de la calidad acústica del entorno.

Según los valores observados en la Tabla 3.14, la reducción del ruido emitido a las aulas cercanas a los conjuntos de compresores reubicados se disminuye considerablemente en valores cercanos e iguales a 20dBA lo que indica que la reducción en la inmisión de ruido fue exitosa debido a que en áreas como en el edificio 12G que tenían una presión sonora de 54.64dBA se disminuyó a 34dBA lo que está por debajo del límite permisible para una zona de estudio en el exterior.

Cada compresor aporta con aproximadamente 43dBA tal como se muestra en la Tabla 3.9. Para el edificio 12G, estos valores son incorporados mediante una suma logarítmica que permite obtener el NPS que llegará hasta la pared del aula más cercana.

Para obtener la reducción óptima de ruido por parte de la pared acústica mediante el método de Fresnel se asegura que el punto de recepción este en el área denominada “zona de

sombra”, debido que la atenuación de ruido en esta zona está en un rango de 5 a 20 *dB*A, asegurando estar en el límite permisible de ruido en exteriores. Los puntos de interés por debajo del punto receptor asignado cumplirán con la atenuación requerida. Al movilizar las fuentes de ruido a la parte más alta, nos aseguramos de que las aulas por debajo del punto de análisis también cumplan.

Debido a la falta de datos reales cabe la posibilidad que la atenuación de ruido sea menor a lo calculado, debido que el límite empírico de atenuación por pared acústica es de 20*dB*A. Aun así, debido a lo conservador del análisis y del método utilizado permite asegurar que el nivel de ruido proveniente de los compresores estará por debajo de 60*dB*A.

3.7.2. Tiempo de reverberación

La medición del tiempo de reverberación en las aulas de los edificios 12H y 12C revelaron que estas áreas tienen este parámetro muy elevado, más para las bajas frecuencias llegando a tener valores de 2 segundos tal como se puede observar en las Tabla 3.4 y 3.5. Estos datos sugieren que el problema acústico dentro de las aulas puede ser provocado por condiciones internas, por lo que se necesitó analizar y descartar estas premisas. Mediante el uso del simulador I-SIMPA se procedió a analizar el tiempo de reverberación de las aulas con mayor problema, pero quitando el factor del ruido externo provocado por los compresores.

Así se comprobó que el motivo por el cual el TR y la inteligibilidad de la palabra sean elevados es por el ruido que se puede filtrar del exterior como se refleja en la Tabla 3.21 ya que los valores de TR medidos son muy superiores a los simulados.

Capítulo 4

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1. Conclusiones

La metodología aplicada para la medición de ruido en exterior e interior proveniente de los sistemas de climatización fue la recomendada por la normativa ecuatoriana.

Permitiendo realizar mediciones más confiables con un sonómetro de grado 2, cumpliendo con las distancias mínimas de 1.5 metros de paredes y suelo para evitar que reciba algún rebote por el reflejo del ruido en superficies. La misma posición del sonómetro se usó en el micrófono para medir el tiempo de reverberación en interior de las aulas.

La inteligibilidad de la palabra en las aulas del edificio 12H estuvo en una valoración subjetiva aceptable, por debajo del 11.4% de AICons. Por otro lado, las aulas A003, A004 y A005 del 12C a una frecuencia de 125Hz se encontraron en un rango pobre superando el 12% de AICons. Sin embargo, al simular el aula con mayor porcentaje (A003) y añadir el coeficiente de absorción de estudiantes ocupando pupitres, el %AICons disminuyó considerablemente, ubicándolo en un rango aceptable.

La reducción de ruido de cada aula está dentro de un rango aceptable. El cálculo experimental demuestra que las paredes de cada aula reducen aproximadamente 40dBA. Sin embargo, el ruido exterior afecta al ruido de fondo del interior de las aulas, debido al alto nivel de presión sonora provocado por los compresores de los sistemas de climatización.

El ruido exterior de la facultad provocado por los sistemas de climatización es muy alto sobrepasando el nivel permisible de 60 dBA. Se localizó como principal fuente de ruido al compresor de cada sistema. Los compresores del edificio 12G propagaban 71.6 dBA de ruido al aula más cerca del 12H. Mientras que, "mesotas" ubicado en el 12G se tenía un nivel de presión sonora de 64.4 dBA provocado por los compresores del 12E y del mismo 12G.

Una reubicación de condensadores con barrera acústica disminuiría la inmisión de ruido considerablemente en toda la facultad. En base a los cálculos teóricos de la solución

propuesta, se estima que se tendrá niveles menores a los 40 dbA, disminuyendo como mínimo 31 dBA de inmisión en las aulas y zonas de estudio. La barrera acústica es fundamental, debido a que sin barreras se tendría niveles aproximados a 55dBA.

La solución propuesta tiene un costo aproximado de \$22000 USD. Esta inversión es necesaria para mejorar la acústica alrededor de la facultad. Dejando teóricamente al ruido de fondo en el interior de cada aula con valores menores a los 25dBA. Con esa disminución de ruido, las curvas NC de cada aula entran debajo de la curva NC-35 e incluso dentro de la NC-30. Sin embargo, con el sistema de climatización del aula encendido, estos valores incrementan entre un rango de 46 y 53dBA.

4.2. Recomendaciones

Para una mejor insonorización se sugiere reemplazar las ventanas con perforaciones para la entrada y salida de tubería del evaporador. Estas tuberías pueden pasar por la pared haciendo pequeños orificios y usando un aislador para dejar sellada las perforaciones del aula. De esta manera, se disminuiría el tiempo de reverberación en las aulas del edificio 12C.

En los ductos de los sistemas de climatización se puede aislar con lana de vidrio para mejorar la acústica dentro del aula cuando estos equipos estén encendidos. De esta forma, esta implementación disminuiría el ruido provocado por el sistema de climatización propio del aula.

Un mantenimiento correctivo en los sistemas de climatización sería lo ideal antes de su reubicación, revisando que el sistema de amortiguamiento del compresor no esté desgastado y que el ventilador se encuentre en buen estado.

Se recomienda realizar un análisis acústico en los ductos de los sistemas de climatización del edificio 12H, para un posible rediseño o implementación de material absorbente en el interior de los ductos.

Referencias

Aenor asociación española de normalización y certificación. (n.d.). UNE EN 20354:1994

Acústica. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante (ISO

354:1985). AENOR Asociación Española de Normalización. *UNE-EN ISO 354*.

ANSI/ASA. (2019, July 23). *Criterios para evaluar el ruido ambiental*. ANSI/ASA S12.2-

2019: Criterios para evaluar el ruido ambiental.

Arau, H., & Puchades, H. A. (1999). *ABC de la acústica arquitectónica*. Ceac.

<https://books.google.com.ec/books?id=DcY0x88wzgMC>

Avilés López, R., y Perera Martín, R. (2017). *Manual de acústica ambiental y arquitectónica*.

Ediciones Paraninfo, S.A. <https://books.google.com.ec/books?id=FQgaDgAAQBAJ>

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

[r#dimensiones](https://www.isover.com.co/productos/black-theater-#dimensiones)

Butler, G. F. (1974). A note on improving the attenuation given by a noise barrier. *Journal of*

Sound and Vibration, 32(3), 367–369. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0022->

[460X\(74\)80092-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0022-460X(74)80092-1)

Díez, F. M. (2006). *Higiene industrial*. Lex Nova.

https://books.google.com.ec/books?id=W8Ensq2_q0cC

Domingo, R. B. (2013). *Acústica medioambiental. Vol. I* (Issue v. 1). Editorial Club

Universitario. https://books.google.com.ec/books?id=b_AtDwAAQBAJ

Fernández, L. G. (2016). *Elaboración de inventarios de focos contaminantes. UF1941*.

Editorial Tutor Formación. <https://books.google.com.ec/books?id=pJ8mDAAAQBAJ>

Francisco Javier Duque Aldaz, Hugo Alfredo Pérez Benítez, Jaime Patricio Fierro Aguilar, &

Galo Wilfrido Tobar Farías. (2021). de Investigación y Desarrollo Profesional (Ed.),

Contaminación introducción al ruido y al sonido (Primera, pp. 228–235). CIDEPRO

Editorial.

Gheller Flavia, Lovo Elisa, Arsie Athena, & Bovo Roberto. (2020). Classroom acoustics:

Listening problems in children. *Building Acoustics*, 27(1), 47–59.

Isbert, A. C. (1998). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Universitat Politècnica de

Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica.

<https://books.google.com.ec/books?id=YvpoBQAAQBAJ>

Jaramillo, A. M. J. (2007). *ACÚSTICA: ciencia del sonido*. Instituto Metropolitano.

<https://books.google.com.ec/books?id=HMWtf1RT04kC>

Manual para la formación en medio ambiente. (2008). 346–347.

Möser, M., & Barros, J. L. (2009). *Ingeniería Acústica: Teoría y Aplicaciones*. Springer

Berlin Heidelberg. <https://books.google.com.ec/books?id=NQBEAAAQBAJ>

Rayleigh, J. W. S. B. (1894). *The Theory of Sound* (Issue v. 1). Macmillan.

<https://books.google.com.ec/books?id=zTYIAAAAIAAJ>

Rougeron, C. (1977). *Aislamiento acústico y térmico en la construcción*. Editores Técnicos

Asociados. <https://books.google.com.ec/books?id=l62bH8f9AJYC>

Savioli, C. U. (2003). *Introducción a la acústica*. Tecnibook Ediciones.

<https://books.google.com.ec/books?id=PsmWDwAAQBAJ>

Vendrell, F. J. S., Galiana, J. L., & Reyna, A. L. (1996). *Acústica arquitectónica y*

urbanística. Universitat Politècnica de València.

<https://books.google.com.ec/books?id=pKJDAAAACAAJ>

Yang, W., & Bradley, J. (2009). Effects of room acoustics on the intelligibility of speech in

classrooms for young children. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 125,

922–933. <https://doi.org/10.1121/1.3058900>

Zapata Rueda, C. M., Viegas, G. M., San Juan, G. A., Calonge, H. R., Coronado Ruiz, J. A.,

Ochoa Villegas, J., Rendón Gaviria, L., Sarmiento Miranda, L. C., Arango Díaz, L., &

Tafur Jiménez, L. A. (2018). *Comodidad ambiental en aulas escolares: Incidencia en la*

salud docente y rendimiento cognitivo de los estudiantes en colegios públicos de Bogotá, Medellín y Cali. Editorial Bonaventuriana.

https://books.google.com.ec/books?id=7X_1DwAAQBAJ

Anexos y apéndices

Anexo A. Gráficas y tablas seleccionadas

Figura A1

Curvas Noise Criteria (ANSI/ASA. 2019)

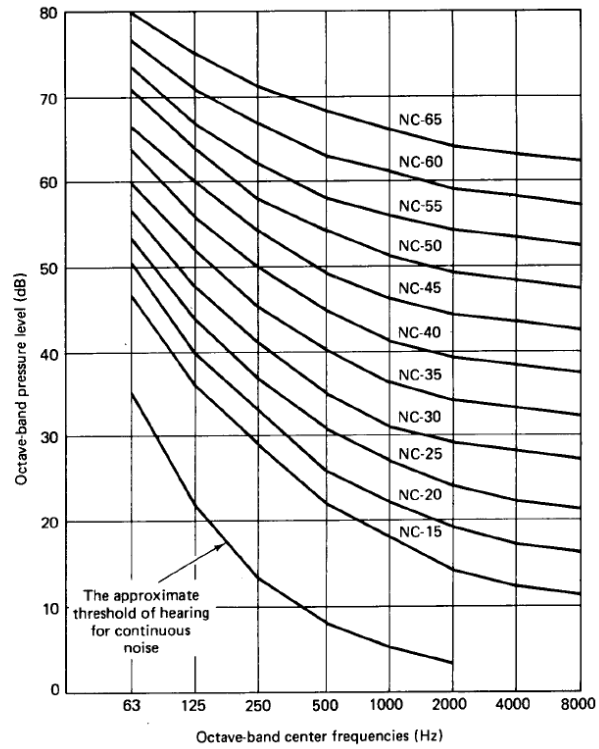


Figura A2

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 (vestíbulos 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

Atenuación de los filtros de banda (Díez, 2006)

Tabla 3. Atenuación de los Filtros A, B, C.

Hz	Aten. A	Aten. B	Aten. C
31,50	-39,40	-17	-3
63	-26,20	-9	-0,8
125	-16,10	-4	-0,2
250	-8,60	-1	0
500	-3,20	0	0
1.000	0,00	0	0
2.000	1,20	0	-0,2
4.000	1,00	-1	-0,8
8.000	-1,10	-3	-3

Figura A4

Factor de direccionalidad de una fuente sonora (*Manual para la formación en medio ambiente*, 2008).



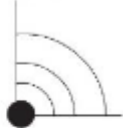
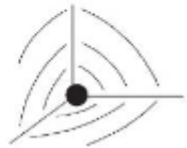
Valores más usuales de Q	
Fuente situada en el centro de un espacio abierto 	Q = 1
Fuente situada sobre una superficie 	Q = 2
Fuente situada en la intersección de dos planos 	Q = 4
Fuente situada en la intersección de tres planos 	Q = 8

Figura A5

Propiedades absorbentes de la lana de vidrio (Black Theater, 2018)

DESEMPEÑO ACÚSTICO										
PRODUCTO Y ESPESOR (A Mounting)	DENSIDAD		FRECUENCIAS POR BANDA DE OCTAVA, Hz							RESISTENCIA TÉRMICA R-VALUE (1) (hr.ft ² .°F /BTU) (R100 m ² .°C/W)
	pcf	kg/m ³	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)

NRC (Coeficiente De reducción de ruido): Valores esperados basados en productos similares y un número limitado de muestras, ASTM C423 Método de ensayo estándar para los coeficientes de reducción de ruido mediante el método de reverberación. (Montaje A): Material colocado sobre un soporte sólido como un muro de concreto. Los valores NRC deben ser usados como una referencia para comparar diferentes materiales de construcción.

(1) Transmitancia térmica $U=1/R$ (BTU/hr.ft².°F - W/m².°C)

Figura A6

Coeficiente de absorción de diferentes superficies (Arau & Puchades, 1999)

Material	α_{125}	α_{250}	α_{500}	α_{1000}	α_{2000}	α_{4000}
1 Pared de ladrillo	0,025	0,025	0,03	0,04	0,05	0,07
2 Pared de ladrillo pintado	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
3 Pared de ladrillo encalada	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	-
4 Bloque de hormigón áspero	0,36	0,44	0,31	0,29	0,39	0,25
5 Bloque de hormigón pintado	0,10	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08
6 Hormigón de obra fino	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
	-	-	-	-	-	-
7 Hormigón de obra pintado al esmalte	0,02	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
8 Hormigón enfoscado muy fino	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
9 Yeso, escayola, 5 cm	0,004	0,004	0,005	0,006	0,008	0,015
10 Yeso, escayola fibrosa, 5 cm	0,08	0,06	0,05	0,04	0,04	0,04
11 Enlucido de paredes	0,35	0,30	0,20	0,55	0,10	0,04
	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	0,03
12 Yeso, escayola, con acabado áspero	-	-	-	-	-	-
	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06	0,06
13 Yeso, escayola, con acabado fino	0,14	0,10	0,06	0,05	0,04	0,03
14 Yeso 25 mm con cámara de aire en el dorso	0,14	0,10	0,06	0,04	0,04	0,03
15 Tablero de cartón yeso de 13 mm con cámara de aire en el dorso sujeto por perfiles 5 x 10 cm interdistanciados 40 cm	0,16	0,10	0,06	0,04	0,04	0,03
16 Tablero de yeso de 15 mm montado en idénticas condiciones que 15	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09
17 Mármol o baldosa pulida	0,20	0,08	0,05	0,05	0,05	0,05
18 Contrachapado de madera de 10 mm formando pequeñas cavidades máx. 25 mm en dorso	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
19 Contrachapado de madera de 6 mm con 80 mm cavidad de aire rellena parcialmente con material absorbente	0,28	0,22	0,17	0,09	0,10	0,08
20 Igual que 19, pero sin material absorbente	0,60	0,30	0,10	0,09	0,09	0,09
21 Contrachapado de madera de 3 mm con cavidad de aire en el dorso	0,40	0,18	0,08	0,05	0,04	0,03
22 Madera fijada sólidamente a una pared o a un sólido	0,11	0,21	0,10	0,05	0,03	0,02
23 Plafón de madera de pino de 20 mm y 50 mm de cámara de aire	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02
24 Plafón de madera de cedro con cámara en el dorso	0,10	0,11	0,10	0,08	0,08	0,05
	0,20	0,15	0,15	0,10	0,10	0,10

Material	α_{125}	α_{250}	α_{500}	α_{1000}	α_{2000}	α_{4000}
25 Madera delgada (5 a 10 mm) formando cámara de aire en el dorso	0,42	0,21	0,06	0,05	0,04	0,04
26 Madera (10 a 13 mm) formando cámara de aire 50 a 100 mm en el	0,30	0,25	0,20	0,17	0,15	0,10
27 Madera sólida, 5 cm de espesor	0,01	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04
28 Vidrios de 6 mm área pequeña	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
29 Vidrios de 6 mm área grande	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,018
30 Vidrio de 3 mm ventana	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
31 Vitrinas emplomadas 3 mm	0,64	0,40	0,20	0,13	0,17	0,05
32 Vidrios pesados luna grande	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
33 Pavimiento cerámico	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
34 Baldosa de tierra sobre hormigón	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
35 Loseta de caucho sobre hormigón	0,019	0,033	0,040	0,036	0,018	0,020
36 Loseta de linóleo sobre hormigón	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03	0,02
37 Loseta de plástico vinílico sobre hormigón	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03	0,02
38 Loseta de corcho de 2 cm encerada y pulida	0,04	0,03	0,05	0,11	0,07	0,02
39 Parqué sobre rastreles	0,05	0,03	0,06	0,09	0,10	0,20
40 Parqué encima de hormigón	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
41 Madera barnizada sobre vigas	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07

59 Fibra de vidrio 22 kg/m ² 30 mm	0,10	0,32	0,55	0,66	0,79	0,77
60 Fibra de vidrio 22 kg/m ² 50 mm	0,19	0,43	0,77	0,82	0,94	0,83
61 Fibra de vidrio 22 kg/m ² 70 mm	0,33	0,65	0,88	0,91	0,97	0,94
62 Fibra de vidrio 100 kg/m ² 30 mm	0,54	0,87	0,90	0,96	0,97	0,93
63 m: Aire (30 % HR) m ⁻¹	-	-	-	-	0,00327	0,01100
64 m: Aire (50 % HR) m ⁻¹	-	-	-	-	0,00260	0,00750
65 m: Aire (70 % HR) m ⁻¹	-	-	-	-	0,00196	0,00650
66 Agua (piscinas)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02000	0,02000
67 Abertura de escenario	0,30	0,40	0,50	0,60	0,60	0,50
68 Audiencia ocupando butacas bien tapizadas	0,52	0,68	0,85	0,97	0,93	0,85
69 Butacas bien tapizadas	0,49	0,66	0,80	0,88	0,82	0,70
70 Butacas tapizadas de cuero	0,44	0,54	0,60	0,62	0,58	0,50
71 Bancos de iglesia de madera 100 % ocupados	0,57	0,61	0,75	0,86	0,91	0,86
72 Asientos de madera 100 % ocupados	0,60	0,74	0,88	0,96	0,93	0,85
73 Asientos de madera 75 % ocupados	0,46	0,56	0,65	0,75	0,72	0,65
74 Lana de roca 100 kg/m ² 30 mm	0,07	0,40	0,88	0,92	0,96	1,05

Apéndice A. Resultados de la propagación sonora teórica para los edificios 12E y 12J.

Tabla A1

Propagación de ruido teórico para el edificio 12J en dirección al edificio 12H.

Compresores	R(m)	Potencia sonora por cada frecuencia						
		125[Hz]	250[Hz]	500[Hz]	1000[Hz]	2000[Hz]	4000[Hz]	8000[Hz]
		73.5	75	74	72.5	67.5	62.5	56.5
		Factor de corrección						
		-16.1	-8.6	-3.2	0	1.2	1	-1.1
		Potencia sonora corregida (dBA)						
		57.4	66.4	70.8	72.5	68.7	63.5	55.4
		Presión sonora por cada frecuencia (dBA)						
1	11.63	28.09	37.09	41.49	43.19	39.39	34.19	23.30
2	11.63	28.09	37.09	41.49	43.19	39.39	34.19	23.30
3	11.63	28.09	37.09	41.49	43.19	39.39	34.19	23.30
4	11.63	28.09	37.09	41.49	43.19	39.39	34.19	23.30
5	13.03	27.10	36.10	40.50	42.20	38.40	33.20	22.57
6	13.03	27.10	36.10	40.50	42.20	38.40	33.20	22.57
7	13.03	27.10	36.10	40.50	42.20	38.40	33.20	22.57
8	13.03	27.10	36.10	40.50	42.20	38.40	33.20	22.57
9	14.74	26.03	35.03	39.43	41.13	37.33	32.13	21.76
10	14.74	26.03	35.03	39.43	41.13	37.33	32.13	21.76
11	14.74	26.03	35.03	39.43	41.13	37.33	32.13	21.76
12	14.74	26.03	35.03	39.43	41.13	37.33	32.13	21.76
							dBA promedio	57

Tabla A2

Propagación de ruido teórico para el edificio 12J en dirección a las oficinas de la terraza.

Compresores	R(m)	Potencia sonora por cada frecuencia						
		125[Hz]	250[Hz]	500[Hz]	1000[Hz]	2000[Hz]	4000[Hz]	8000[Hz]
		73,5	75	74	72,5	67,5	62,5	56,5
		Factor de corrección						
		-16,1	-8,6	-3,2	0	1,2	1	-1,1
		Potencia sonora corregida (dBA)						
		57,4	66,4	70,8	72,5	68,7	63,5	55,4
		Presión sonora por cada frecuencia (dBA)						
1	8,81	30,50	39,50	43,90	45,60	41,80	36,60	24,98
2	8,81	30,50	39,50	43,90	45,60	41,80	36,60	24,98
3	8,81	30,50	39,50	43,90	45,60	41,80	36,60	24,98
4	10,52	28,96	37,96	42,36	44,06	40,26	35,06	23,92
5	10,52	28,96	37,96	42,36	44,06	40,26	35,06	23,92
6	10,52	28,96	37,96	42,36	44,06	40,26	35,06	23,92
7	12,23	27,65	36,65	41,05	42,75	38,95	33,75	22,98
8	12,23	27,65	36,65	41,05	42,75	38,95	33,75	22,98
9	12,23	27,65	36,65	41,05	42,75	38,95	33,75	22,98
10	13,94	26,51	35,51	39,91	41,61	37,81	32,61	22,13
11	13,94	26,51	35,51	39,91	41,61	37,81	32,61	22,13
12	13,94	26,51	35,51	39,91	41,61	37,81	32,61	22,13
							dBa promedio	58,54

Tabla A3

Propagación de ruido teórico para el edificio 12E.

compresores	R(m)	Potencia sonora por cada frecuencia						
		125[Hz]	250[Hz]	500[Hz]	1000[Hz]	2000[Hz]	4000[Hz]	8000[Hz]
		73,5	75	74	72,5	67,5	62,5	56,5
		Factor de corrección						
		-16,1	-8,6	-3,2	0	1,2	1	-1,1
		Potencia sonora corregida (dBA)						
		57,4	66,4	70,8	72,5	68,7	63,5	55,4
		Presión sonora por cada frecuencia (dBA)						
1	28,23	20,39	29,39	33,79	35,49	31,69	26,49	18,39
2	28,23	20,39	29,39	33,79	35,49	31,69	26,49	18,39
3	28,23	20,39	29,39	33,79	35,49	31,69	26,49	18,39
4	28,23	20,39	29,39	33,79	35,49	31,69	26,49	18,39
5	26,83	20,83	29,83	34,23	35,93	32,13	26,93	18,83
6	26,83	20,83	29,83	34,23	35,93	32,13	26,93	18,83
7	26,83	20,83	29,83	34,23	35,93	32,13	26,93	18,83
8	26,83	20,83	29,83	34,23	35,93	32,13	26,93	18,83
9	25,47	21,28	30,28	34,68	36,38	32,58	27,38	19,28
10	25,47	21,28	30,28	34,68	36,38	32,58	27,38	19,28
11	25,47	21,28	30,28	34,68	36,38	32,58	27,38	19,28
12	25,47	21,28	30,28	34,68	36,38	32,58	27,38	19,28
13	24,7	21,55	30,55	34,95	36,65	32,85	27,65	19,55
							dBA promedio	51,14

Tabla A4

Resultados del número de Fresnel teórico para la barrera acústica que corresponde al edificio

12J.

R(m)	A	B	Longitud de onda						
			2,744	1,372	0,686	0,343	0,1715	0,08575	0,042875
			N						
8,81	3,35	6,58	0,82	1,63	3,27	6,53	13,06	26,12	52,24
8,81	3,35	6,58	0,82	1,63	3,27	6,53	13,06	26,12	52,24
8,81	3,35	6,58	0,82	1,63	3,27	6,53	13,06	26,12	52,24
10,52	4,82	6,58	0,64	1,28	2,57	5,13	10,26	20,52	41,05
10,52	4,82	6,58	0,64	1,28	2,57	5,13	10,26	20,52	41,05
10,52	4,82	6,58	0,64	1,28	2,57	5,13	10,26	20,52	41,05
12,23	6,41	6,58	0,55	1,11	2,22	4,43	8,86	17,73	35,45
12,23	6,41	6,58	0,55	1,11	2,22	4,43	8,86	17,73	35,45
12,23	6,41	6,58	0,55	1,11	2,22	4,43	8,86	17,73	35,45
13,94	8,05	6,58	0,50	1,01	2,01	4,02	8,05	16,09	32,19
13,94	8,05	6,58	0,50	1,01	2,01	4,02	8,05	16,09	32,19
13,94	8,05	6,58	0,50	1,01	2,01	4,02	8,05	16,09	32,19

Tabla A5

Resultados del número de Fresnel teórico para la barrera acústica que corresponde al edificio

12 E.

R(m)	A	B	Longitud de onda						
			2,744	1,372	0,686	0,343	0,1715	0,08575	0,042875
			N						
28,38	5,82	23,12	0,41	0,82	1,63	3,27	6,53	13,06	26,12
28,38	5,82	23,12	0,41	0,82	1,63	3,27	6,53	13,06	26,12
28,38	5,82	23,12	0,41	0,82	1,63	3,27	6,53	13,06	26,12
28,38	5,82	23,12	0,41	0,82	1,63	3,27	6,53	13,06	26,12
26,95	4,57	23,12	0,54	1,08	2,16	4,31	8,63	17,26	34,52
26,95	4,57	23,12	0,54	1,08	2,16	4,31	8,63	17,26	34,52
26,95	4,57	23,12	0,54	1,08	2,16	4,31	8,63	17,26	34,52
26,95	4,57	23,12	0,54	1,08	2,16	4,31	8,63	17,26	34,52
25,64	3,42	23,12	0,66	1,31	2,62	5,25	10,50	20,99	41,98
25,64	3,42	23,12	0,66	1,31	2,62	5,25	10,50	20,99	41,98
25,64	3,42	23,12	0,66	1,31	2,62	5,25	10,50	20,99	41,98
25,64	3,42	23,12	0,66	1,31	2,62	5,25	10,50	20,99	41,98
24,25	2,51	23,12	1,01	2,01	4,02	8,05	16,09	32,19	64,37

Tabla A6

Pérdida por inserción teórica para el edificio 12J.

Longitud de onda						
2,744	1,372	0,686	0,343	0,1715	0,08575	0,042875
IL(dBA)						
12,29	15,14	18,12	21,13	24,14	27,15	30,16
12,29	15,14	18,12	21,13	24,14	27,15	30,16
12,29	15,14	18,12	21,13	24,14	27,15	30,16
11,37	14,12	17,08	20,08	23,09	26,10	29,11
11,37	14,12	17,08	20,08	23,09	26,10	29,11
11,37	14,12	17,08	20,08	23,09	26,10	29,11
10,83	13,52	16,45	19,45	22,46	25,47	28,48
10,83	13,52	16,45	19,45	22,46	25,47	28,48
10,83	13,52	16,45	19,45	22,46	25,47	28,48
10,49	13,12	16,03	19,03	22,04	25,05	28,06
10,49	13,12	16,03	19,03	22,04	25,05	28,06
10,49	13,12	16,03	19,03	22,04	25,05	28,06
dBA		40.22				

Tabla A7

Perdida por inserción teórica para el edificio 12E.

Longitud de onda						
2,744	1,372	0,686	0,343	0,1715	0,08575	0,042875
IL(dBA)						
9,80	12,29	15,14	18,12	21,13	24,14	27,15
9,80	12,29	15,14	18,12	21,13	24,14	27,15
9,80	12,29	15,14	18,12	21,13	24,14	27,15
9,80	12,29	15,14	18,12	21,13	24,14	27,15
10,74	13,41	16,33	19,33	22,34	25,35	28,36
10,74	13,41	16,33	19,33	22,34	25,35	28,36
10,74	13,41	16,33	19,33	22,34	25,35	28,36
10,74	13,41	16,33	19,33	22,34	25,35	28,36
11,45	14,22	17,18	20,18	23,19	26,20	29,21
11,45	14,22	17,18	20,18	23,19	26,20	29,21
11,45	14,22	17,18	20,18	23,19	26,20	29,21
11,45	14,22	17,18	20,18	23,19	26,20	29,21
13,12	16,03	19,03	22,04	25,05	28,06	31,07
dBA			33.5			

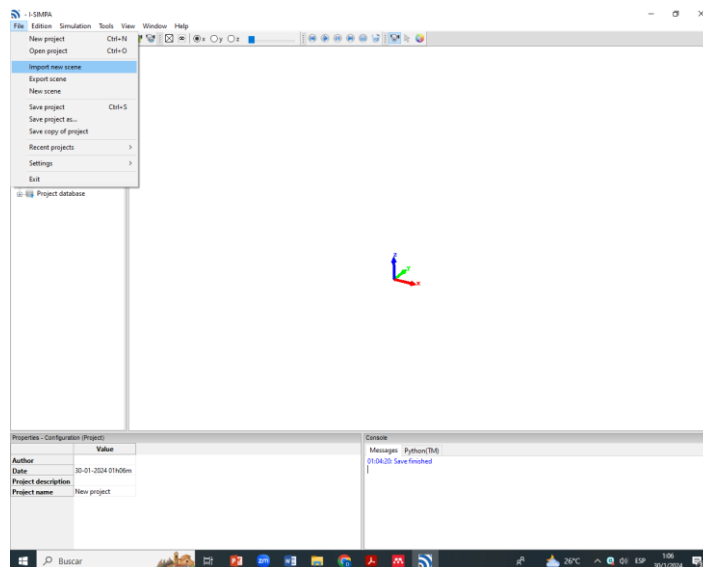
Apéndice B. Proceso de simulación del tiempo de reverberación

Para obtener el tiempo de reverberación de las aulas se utilizó el programa I-SIMPA donde el proceso a seguir para modelar el área de las aulas a analizar es el siguiente:

1. Después de exportar el modelo desde SketchUp en formato .3ds se procede a ingresar a la aplicación I-SIMPA para importar el archivo haciendo clic en la pestaña *File*, y luego hacer clic en la opción *Import new scene*.

Figura B1

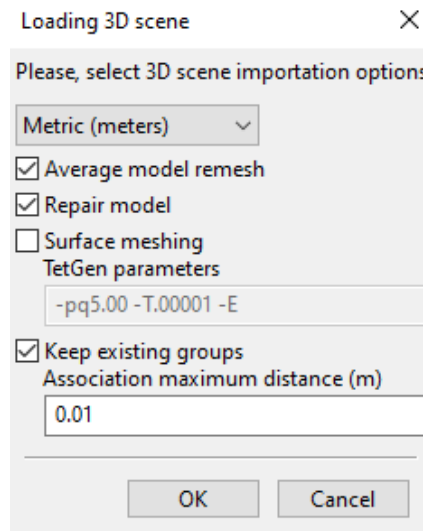
Modelo del aula A001-12H importado a I-SIMPA



2. Al abrir el archivo en I-SIMPA se abre la siguiente ventana, donde se deberá escoger las opciones de *average model remesh* y *repair model*, esto es necesario para que el programa repare y cierre el modelo importado, con el fin de evitar errores en la simulación.

Figura B2

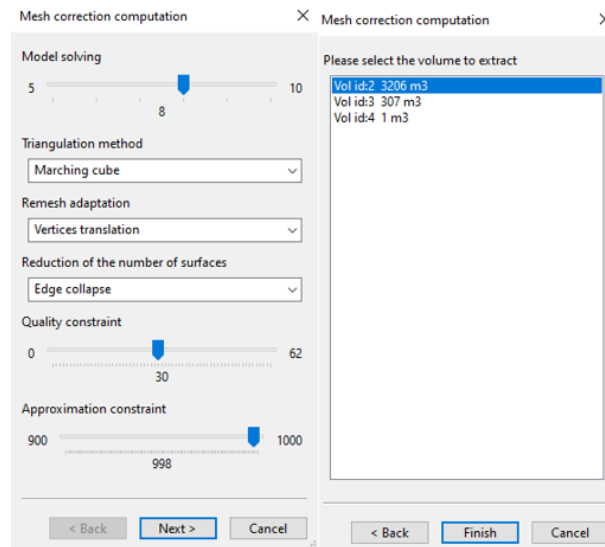
Reparación del modelo y configuración del mallado



3. Al dar clic en *ok*, se mostrará la siguiente ventana la cual mostrará la precisión del mallado y la reparación del modelo. Para la simulación se escogió la precisión de 8 en el apartado *Model solving*, esto debido a la limitada capacidad computacional, posterior a eso se procede a aceptar el mallado, dar clic en *Next* y luego *Finish*.

Figura B3

Parámetros del mallado



4. Luego de cargar el mallado es necesario separar las diferentes superficies del modelo del aula esto dependiendo del material del que estén hechas. Para proceder a la selección se utiliza la herramienta llamada *Surface selección mode* que se encuentra en la barra de herramientas en la parte superior.

Figura B4

Barra de herramientas

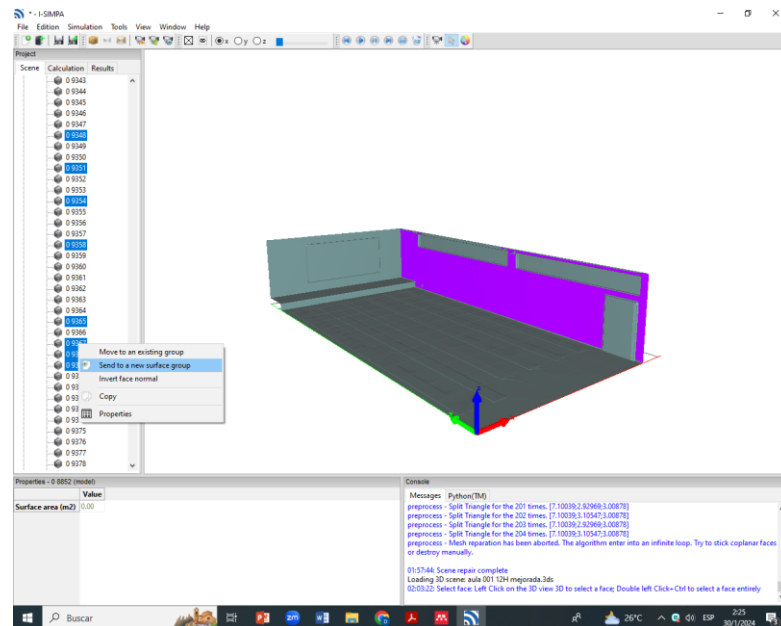


5. Dar doble clic izquierdo sobre la superficie deseada seleccionará dicha superficie y si se dese seleccionar múltiples áreas se debe mantener presionada la tecla Ctrl + clic izquierdo. Una vez seleccionada la superficie se agrupa en una carpeta diferente en la pestaña *Surface* dando clic derecho sobre algún numero perteneciente a la superficie, los cuales se diferenciarán por estar sombreados, y seleccionando la opción *Sent to a*

new Surface group. Este procedimiento es necesario para colocar los coeficientes de absorción a sus respectivas superficies.

Figura B5

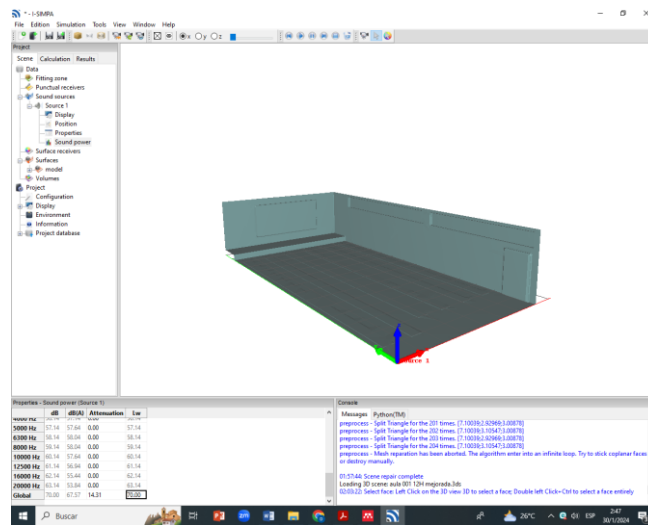
Agrupación de las diferentes superficies



6. Para colocar la fuente de sonido se da clic derecho sobre la pestaña *Sound sources* y luego en la opción *New source*, dentro de la nueva fuente daremos clic en la opción *Sound power* y colocamos el valor de potencia sonora de 70dB, además en el apartado *Position* se coloca la posición donde estará la fuente de sonido.

Figura B6

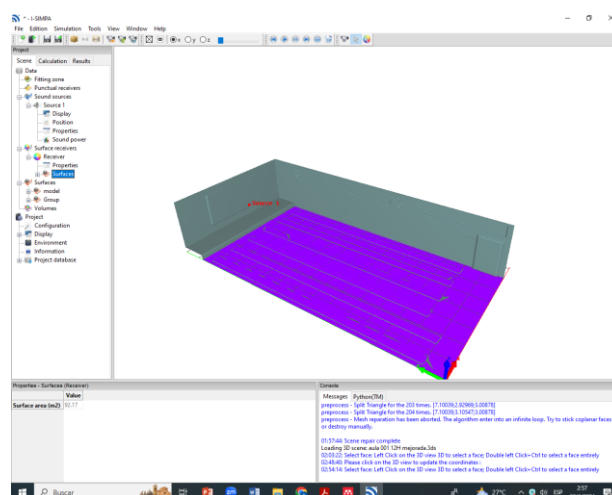
Fuente de sonido para la simulación



7. Para finalizar se debe seleccionar el área de escucha en la pestaña *Surface receiver*, haciendo clic derecho y escogiendo la opción *New scene receiver*. Es necesario seleccionar las áreas del piso y los pupitres ya que es donde los estudiantes se colocan cada clase.

Figura B7

Área de escucha para las aulas

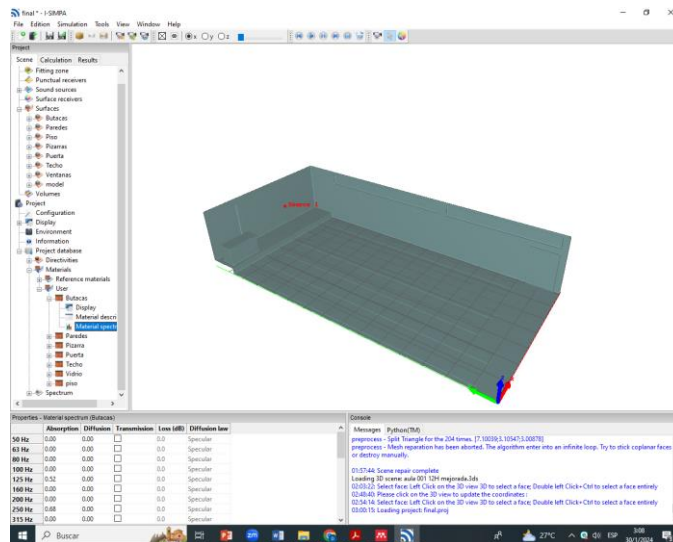


8. En la pestaña *Project database* se da clic en el apartado *Materials*. En esta carpeta se añade un nuevo material dando clic derecho. A cada uno de los materiales añadidos se

les coloca su correspondiente coeficiente de absorción haciendo clic en el apartado de *Material spectrum*.

Figura C8

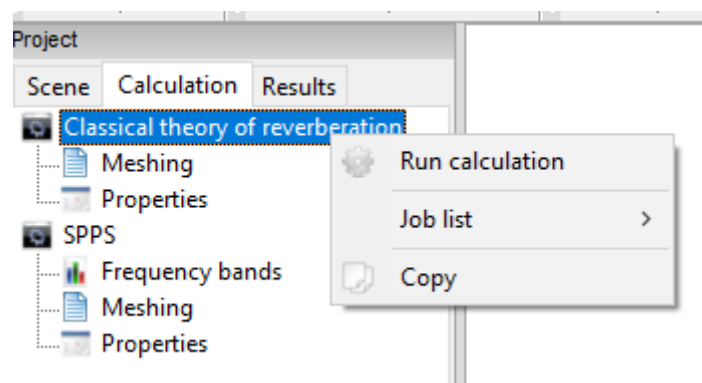
Materiales y coeficientes de absorción añadidos



9. En la pestaña de *Calculation* damos clic derecho a *Classical theory of reverberation* luego en la opción *Run simulation*.

Figura B9

Compilación de la simulación



10. En la pestaña *Result* abrimos la carpeta con la fecha y hora de la compilación y se da doble clic en el apartado *Main results* lo que desplegará una ventana en donde se encontrará el tiempo de reverberación en las diferentes frecuencias.

Figura B10

Resultados de la simulación

Project

Scene Calculation Results

Results

Classical theory of reverberation

2024-01-17_01h57m14s

Main results

config

projct_config

Spreadsheet - J:\classical theory of reverberation\2024-01-17_01h57m14s\...

Main results X

	A_Sabine m ²	TR_Sabine s	L_Sabine dB	A_Eyring m ²
50 Hz	0.00	2266.42	59.8	-0.00
63 Hz	0.00	1445.19	58.8	-0.00
80 Hz	0.00	914.29	57.8	-0.00
100 Hz	0.00	602.20	57.0	-0.00
125 Hz	44.00	1.16	30.9	47.03
160 Hz	0.00	269.94	55.4	-0.00
200 Hz	0.00	186.83	54.0	-0.00
250 Hz	45.48	1.11	33.7	48.72
315 Hz	0.00	101.49	54.3	-0.00
400 Hz	0.00	79.04	54.2	-0.00
500 Hz	47.67	1.05	36.4	51.25
630 Hz	0.00	54.13	54.0	-0.00
800 Hz	0.00	45.30	54.8	-0.00
1000 Hz	52.29	0.95	39.0	56.63
1250 Hz	0.00	30.98	55.1	-0.00
1600 Hz	0.00	23.75	55.0	-0.00
2000 Hz	50.29	0.96	42.0	54.29
2500 Hz	0.00	12.91	54.4	-0.00
3150 Hz	0.00	8.88	53.8	-0.00
4000 Hz	45.88	0.94	44.9	49.18
5000 Hz	0.00	4.00	52.2	-0.00

Apéndice C. Curvas NC de cada aula en los edificios 12C y 12H

Figura C1a

Curvas NC del aula A001 del edificio 12C con valores medidos.

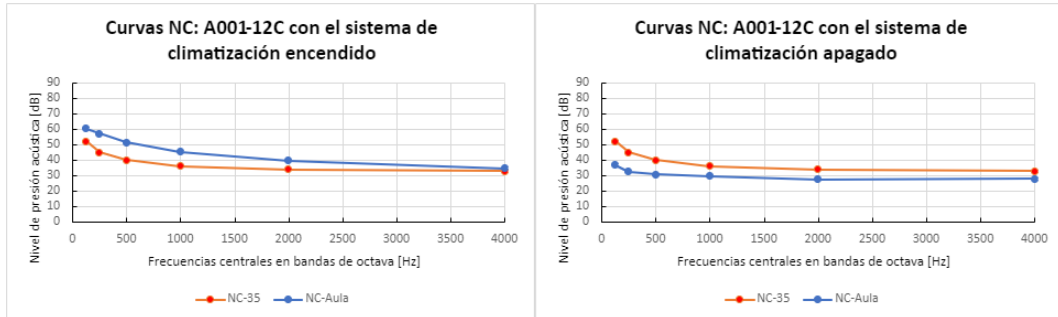


Figura C1b

Curvas NC del aula A001 del edificio 12C con valores calculados teóricamente de la solución propuesta.

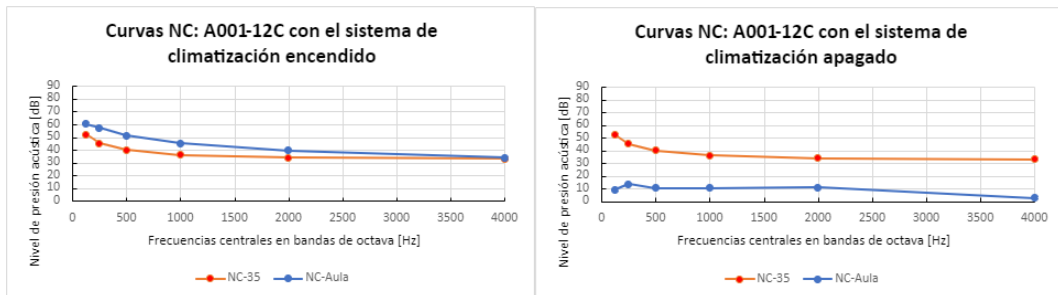


Figura C2a

Curvas NC del aula A003 del edificio 12C con valores medidos.

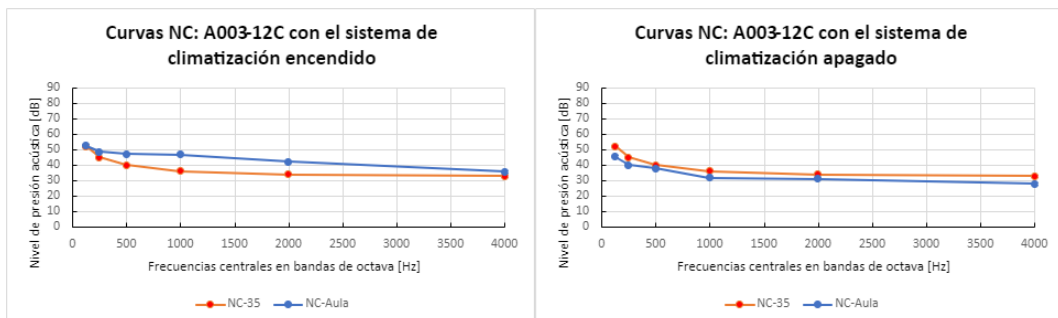


Figura C2b

Curvas NC del aula A003 del edificio 12C con valores calculados teóricamente de la solución propuesta.

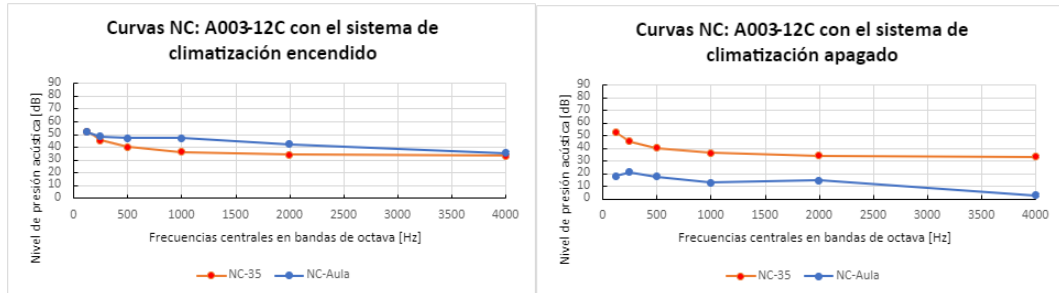


Figura C3a

Curvas NC del aula A002 del edificio 12H con valores medidos.

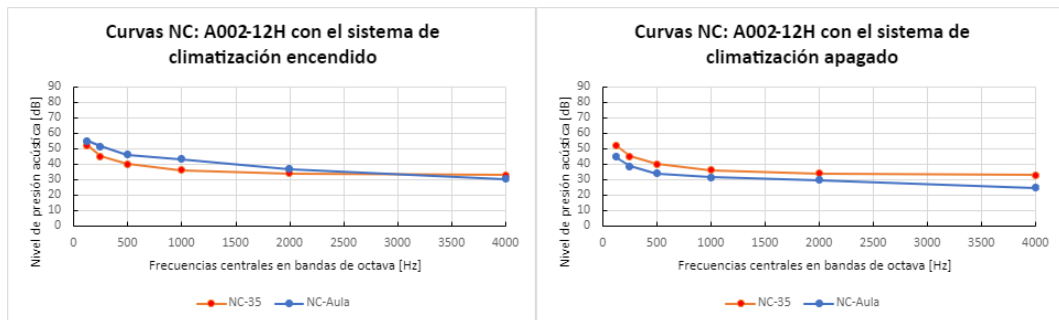


Figura C3b

Curvas NC del aula A002 del edificio 12H con valores calculados teóricamente de la solución propuesta.

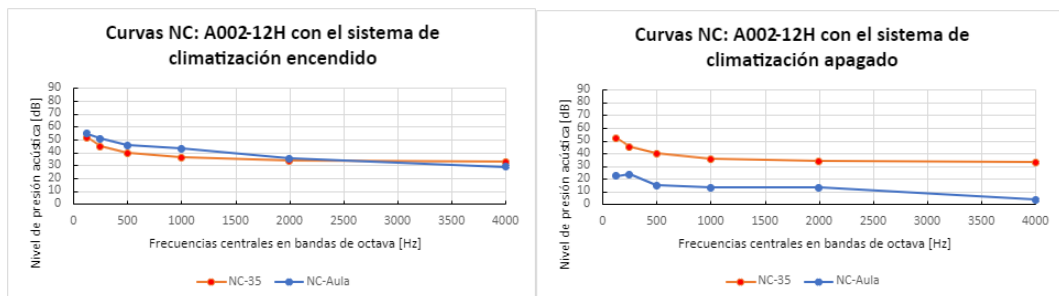


Figura C4a

Curvas NC del aula A101 del edificio 12H con valores medidos.

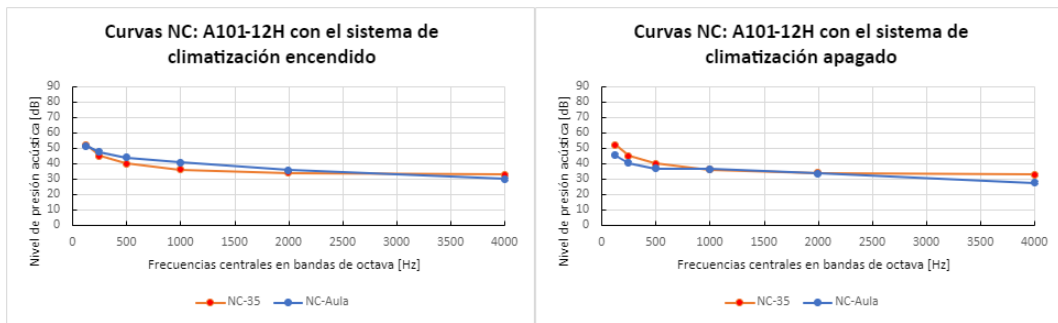


Figura C4b

Curvas NC del aula A101 del edificio 12H con valores calculados teóricamente de la solución propuesta.

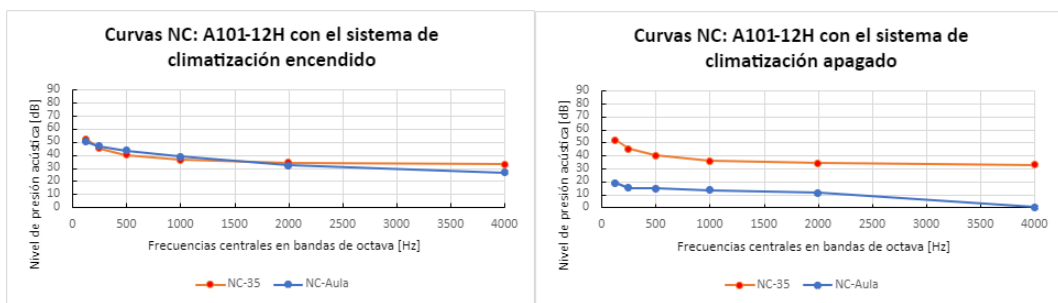


Figura C5a

Curvas NC del aula A102 del edificio 12H con valores medidos.

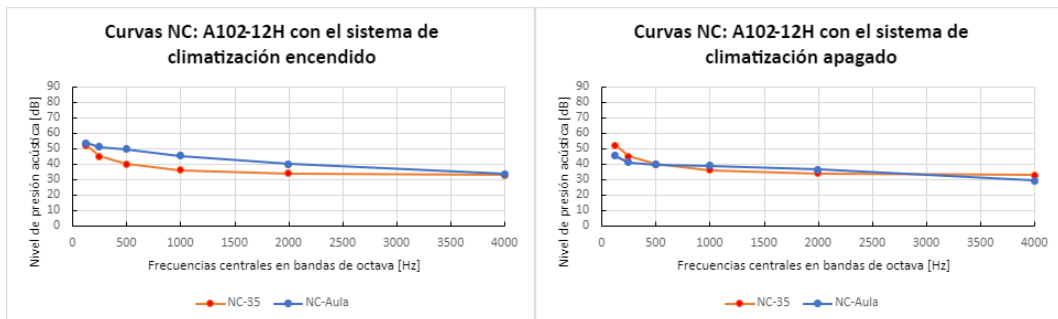


Figura C5b

Curvas NC del aula A102 del edificio 12H con valores calculados teóricamente de la solución propuesta.

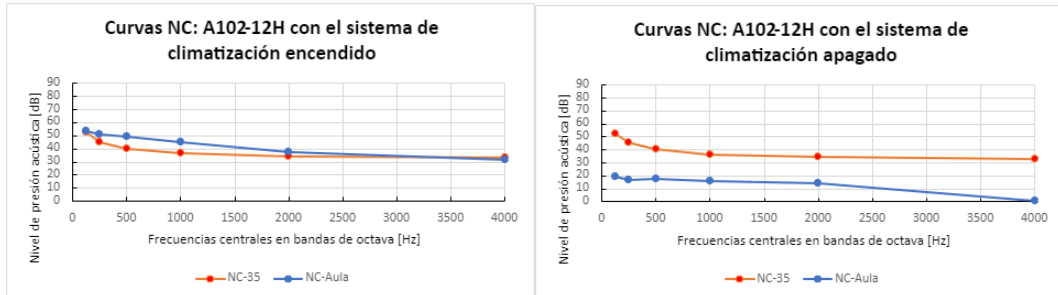


Figura C6a

Curvas NC del aula A103 del edificio 12H con valores medidos.

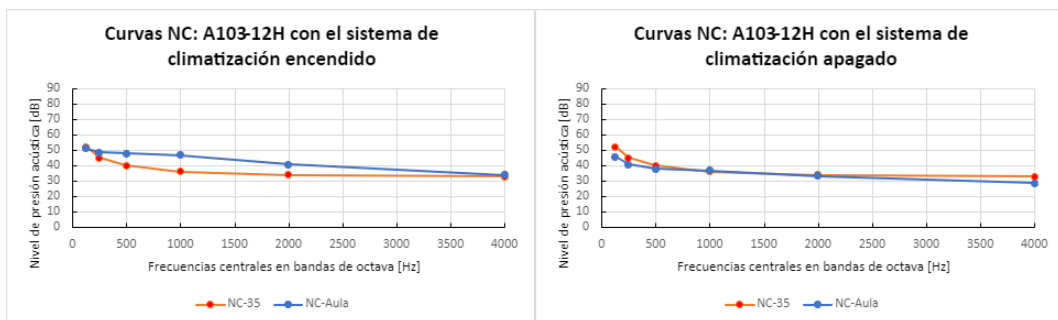


Figura C6b

Curvas NC del aula A103 del edificio 12H con valores calculados teóricamente de la solución propuesta.

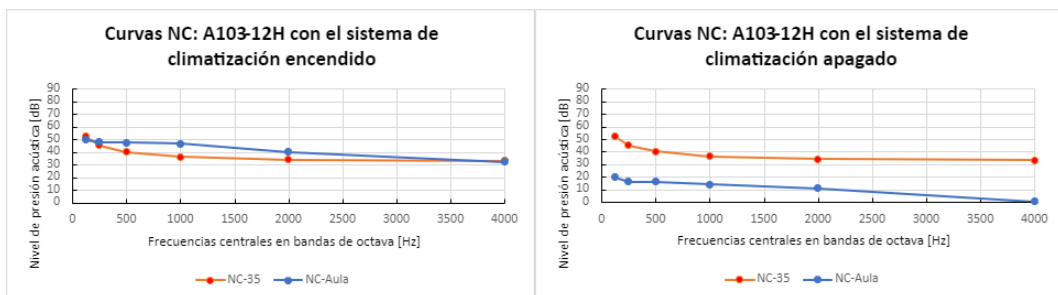


Figura C7a

Curvas NC del aula A104 del edificio 12H con valores medidos.

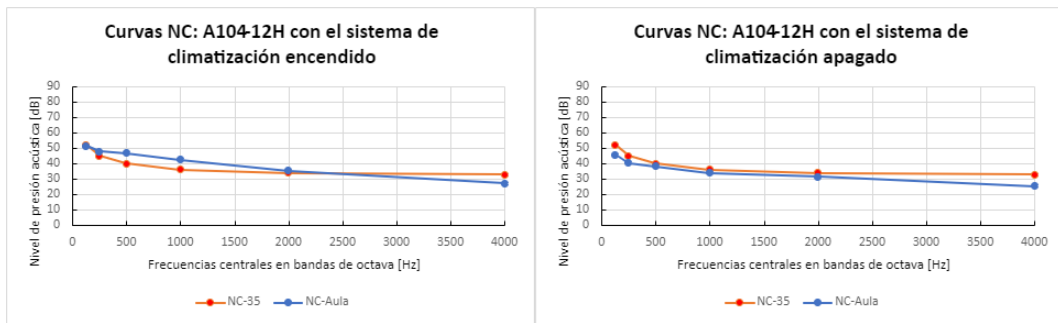


Figura C7b

Curvas NC del aula A104 del edificio 12H con valores calculados teóricamente de la solución propuesta.

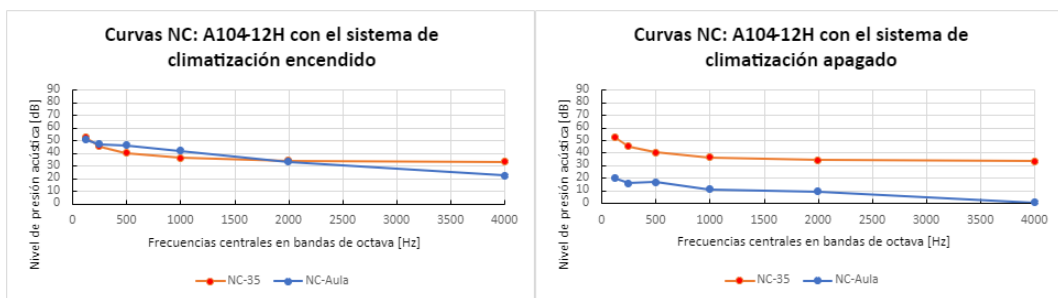


Figura C8a

Curvas NC del aula A105 del edificio 12H con valores medidos.

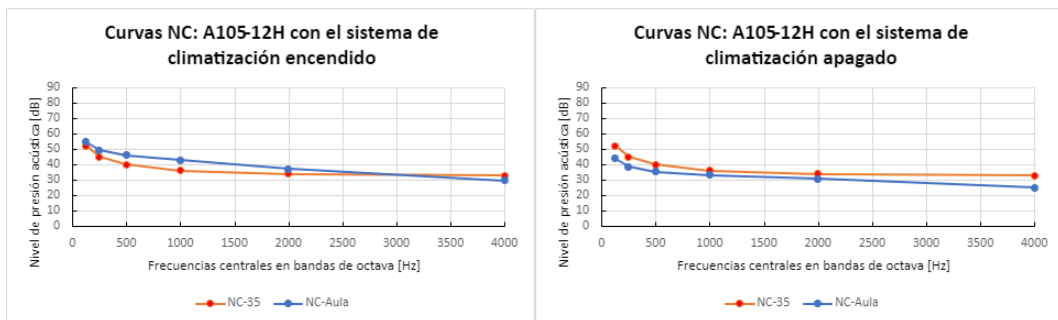


Figura C8b

Curvas NC del aula A105 del edificio 12H con valores calculados teóricamente de la solución propuesta.

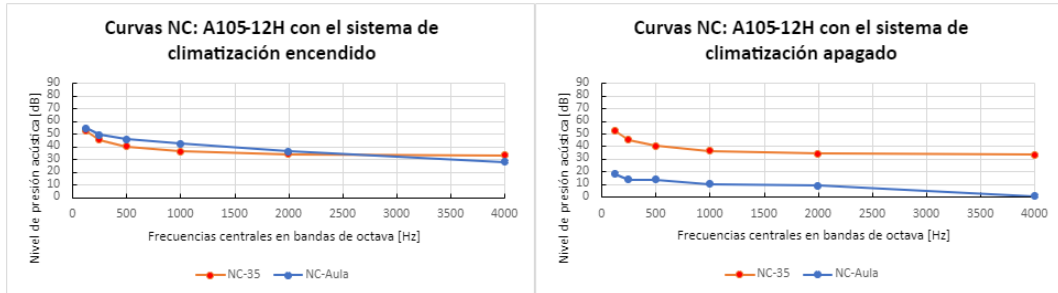


Figura C9a

Curvas NC del aula A201 del edificio 12H con valores medidos.

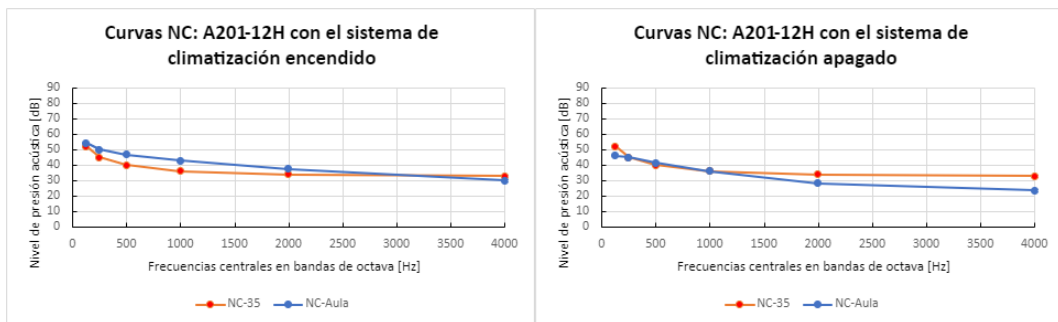


Figura C9b

Curvas NC del aula A201 del edificio 12H con valores calculados teóricamente de la solución propuesta.

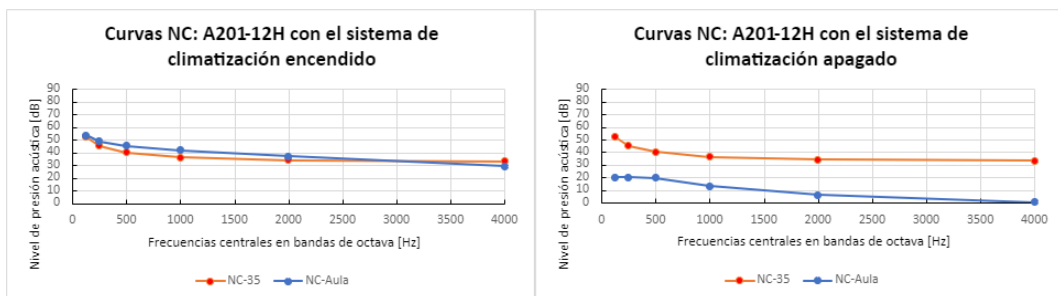


Figura C10a

Curvas NC del aula A202 del edificio 12H con valores medidos

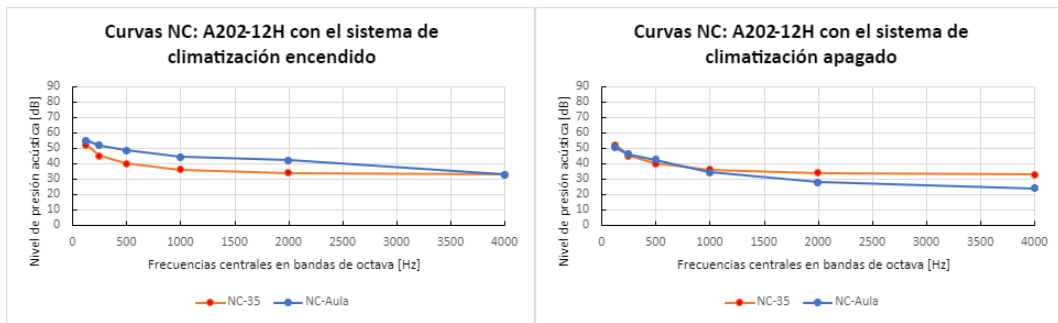
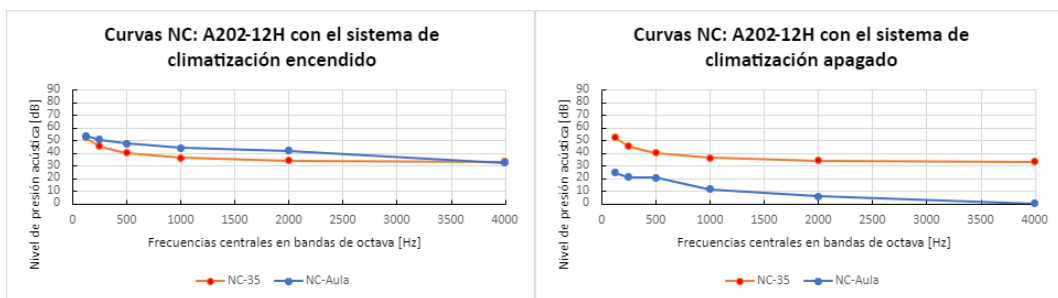


Figura C10b

Curvas NC del aula A202 del edificio 12H con valores calculados teóricamente de la solución propuesta.



Apéndice C. Inteligibilidad de la palabra de cada aula en los edificios 12C y 12H

Tabla C1

Porcentaje de pérdida de consonante para el aula A001 del edificio 12C.

A001-12C							
Frecuencias [Hz]	Tiempo de reverberación [s]	Coefficiente de absorción	Volumen [m3]	Área [m2]	Constante del aula [m2]	Distancia crítica [m]	% AICons
125	1,187	0,13	306,9	326,4	48,77	1,96	3,09
250	0,978	0,15	306,9	326,4	57,6	2,13	2,55
500	0,927	0,16	306,9	326,4	62,17	2,21	2,42
1000	0,795	0,19	306,9	326,4	76,56	2,45	2,07
2000	0,796	0,19	306,9	326,4	76,56	2,45	2,07
4000	0,793	0,19	306,9	326,4	76,56	2,45	2,07

Tabla C2

Porcentaje de pérdida de consonante para el aula A002 del edificio 12C.

A002-12C							
Frecuencias [Hz]	Tiempo de reverberación [s]	Coefficiente de absorción	Volumen [m3]	Área [m2]	Constante del aula [m2]	Distancia crítica [m]	% AICons
125	1,469	0,1	227,7	259,2	28,8	1,5	5,16
250	1,191	0,12	227,7	259,2	35,35	1,66	4,18
500	1,158	0,12	227,7	259,2	35,35	1,66	4,07
1000	0,951	0,15	227,7	259,2	45,74	1,89	3,34
2000	1,02	0,14	227,7	259,2	42,2	1,82	3,58
4000	0,889	0,16	227,7	259,2	49,37	1,97	3,12

Tabla C3*Porcentaje de pérdida de consonante para el aula A003 del edificio 12C.*

A003-12C							
Frecuencias [Hz]	Tiempo de reverberación [s]	Coefficiente de absorción	Volumen [m3]	Área [m2]	Constante del aula [m2]	Distancia crítica [m]	% AICons
125	1,856	0,07	150,02	184,91	13,92	1,04	16,7
250	1,236	0,11	150,02	184,91	22,85	1,34	6,59
500	1,041	0,13	150,02	184,91	27,63	1,47	5,55
1000	0,859	0,15	150,02	184,91	32,63	1,6	4,58
2000	0,907	0,14	150,02	184,91	30,1	1,54	4,84
4000	0,888	0,15	150,02	184,91	32,63	1,6	4,74

Tabla C4*Porcentaje de pérdida de consonante para el aula A004 del edificio 12C.*

A004-12C							
Frecuencias [Hz]	Tiempo de reverberación [s]	Coefficiente de absorción	Volumen [m3]	Área [m2]	Constante del aula [m2]	Distancia crítica [m]	% AICons
125	1,816	0,07	143,85	179	13,47	1,03	16,34
250	1,1	0,12	143,85	179	24,41	1,38	6,12
500	1,079	0,12	143,85	179	24,41	1,38	6
1000	0,854	0,15	143,85	179	31,59	1,57	4,75
2000	0,878	0,15	143,85	179	31,59	1,57	4,88
4000	0,847	0,15	143,85	179	31,59	1,57	4,71

Tabla C5*Porcentaje de pérdida de consonante para el aula A005 del edificio 12C.*

A005-12C							
Frecuencias [Hz]	Tiempo de reverberación [s]	Coefficiente de absorción	Volumen [m3]	Área [m2]	Constante del aula [m2]	Distancia crítica [m]	% AICons
125	1,577	0,08	156,51	191,04	16,61	1,14	14,19
250	1,24	0,1	143,85	191,04	21,23	1,29	6,9
500	1,034	0,12	143,85	191,04	26,05	1,43	5,75
1000	0,874	0,14	143,85	191,04	31,1	1,56	4,86
2000	0,884	0,14	143,85	191,04	31,1	1,56	4,92
4000	0,878	0,14	143,85	191,04	31,1	1,56	4,88

Tabla C6*Porcentaje de pérdida de consonante para el aula A101 del edificio 12C.*

A101-12C							
Frecuencias [Hz]	Tiempo de reverberación [s]	Coefficiente de absorción	Volumen [m3]	Área [m2]	Constante del aula [m2]	Distancia crítica [m]	% AICons
125	1,032	0,14	226,05	257,8	41,97	1,81	3,65
250	0,994	0,14	226,05	257,8	41,97	1,81	3,52
500	0,91	0,16	226,05	257,8	49,1	1,96	3,22
1000	0,734	0,19	226,05	257,8	60,47	2,18	2,6
2000	0,77	0,18	226,05	257,8	56,59	2,11	2,73
4000	0,797	0,18	226,05	257,8	56,59	2,11	2,82

Tabla C7*Porcentaje de pérdida de consonante para el aula A102 del edificio 12C.*

A102-12C							
Frecuencias [Hz]	Tiempo de reverberación [s]	Coefficiente de absorción	Volumen [m3]	Área [m2]	Constante del aula [m2]	Distancia crítica [m]	% AICons
125	1,323	0,1	143,85	179	19,89	1,25	11,91
250	1,157	0,11	143,85	179	22,12	1,32	6,43
500	0,967	0,13	143,85	179	26,75	1,45	5,38
1000	0,774	0,17	143,85	179	36,66	1,7	4,3
2000	0,757	0,17	143,85	179	36,66	1,7	4,21
4000	0,754	0,17	143,85	179	36,66	1,7	4,19

Tabla C8*Porcentaje de pérdida de consonante para el aula A103 del edificio 12C.*

A103-12C							
Frecuencias [Hz]	Tiempo de reverberación [s]	Coefficiente de absorción	Volumen [m3]	Área [m2]	Constante del aula [m2]	Distancia crítica [m]	% AICons
125	0,995	0,13	156,51	191,04	28,55	1,5	5,09
250	1,056	0,12	156,51	191,04	26,05	1,43	5,4
500	1,071	0,12	156,51	191,04	26,05	1,43	5,47
1000	0,82	0,16	156,51	191,04	36,39	1,69	4,19
2000	0,845	0,16	156,51	191,04	36,39	1,69	4,32
4000	0,879	0,15	156,51	191,04	33,71	1,63	4,49

Tabla C9*Porcentaje de pérdida de consonante para el aula A104 del edificio 12C.*

A104-12C							
Frecuencias [Hz]	Tiempo de reverberación [s]	Coefficiente de absorción	Volumen [m3]	Área [m2]	Constante del aula [m2]	Distancia crítica [m]	% AICons
125	1,108	0,13	228,03	259,48	38,77	1,74	3,89
250	1,006	0,14	228,03	259,48	42,24	1,82	3,53
500	0,961	0,15	228,03	259,48	45,79	1,89	3,37
1000	0,762	0,19	228,03	259,48	60,87	2,18	2,67
2000	0,769	0,18	228,03	259,48	56,96	2,11	2,7
4000	0,763	0,19	228,03	259,48	60,87	2,18	2,68

Tabla C10*Porcentaje de pérdida de consonante para el aula A105 del edificio 12C.*

A105-12C							
Frecuencias [Hz]	Tiempo de reverberación [s]	Coefficiente de absorción	Volumen [m3]	Área [m2]	Constante del aula [m2]	Distancia crítica [m]	% AICons
125	1,136	0,12	227,7	259,2	35,35	1,66	3,99
250	0,933	0,15	227,7	259,2	45,74	1,89	3,28
500	0,978	0,14	227,7	259,2	42,2	1,82	3,44
1000	0,866	0,16	227,7	259,2	49,37	1,97	3,04
2000	0,895	0,16	227,7	259,2	49,37	1,97	3,14
4000	0,911	0,16	227,7	259,2	49,37	1,97	3,2

Tabla C11*Porcentaje de pérdida de consonante para el aula A001 del edificio 12H.*

A001-12H							
Frecuencias [Hz]	Tiempo de reverberación [s]	Coefficiente de absorción	Volumen [m3]	Área [m2]	Constante del aula [m2]	Distancia crítica [m]	% AICons
125	2,101	0,07	319,5	345,6	26,01	1,43	5,26
250	1,647	0,09	319,5	345,6	34,18	1,64	4,12
500	1,314	0,11	319,5	345,6	42,71	1,83	3,29
1000	1,14	0,13	319,5	345,6	51,64	2,01	2,85
2000	1,199	0,12	319,5	345,6	47,13	1,92	3
4000	1,109	0,13	319,5	345,6	51,64	2,01	2,78

Tabla C12*Porcentaje de pérdida de consonante para el aula A102 del edificio 12H.*

A102-12H							
Frecuencias [Hz]	Tiempo de reverberación [s]	Coefficiente de absorción	Volumen [m3]	Área [m2]	Constante del aula [m2]	Distancia crítica [m]	% AICons
125	1,196	0,11	192,44	225,44	27,86	1,48	4,97
250	1,149	0,12	192,44	225,44	30,74	1,55	4,78
500	1,016	0,14	192,44	225,44	36,7	1,7	4,22
1000	0,905	0,15	192,44	225,44	39,78	1,77	3,76
2000	0,885	0,16	192,44	225,44	42,94	1,83	3,68
4000	0,872	0,16	192,44	225,44	42,94	1,83	3,63

Tabla C13*Porcentaje de pérdida de consonante para el aula A104 del edificio 12H.*

A104-12H							
Frecuencias [Hz]	Tiempo de reverberación [s]	Coefficiente de absorción	Volumen [m3]	Área [m2]	Constante del aula [m2]	Distancia crítica [m]	% AICons
125	1,41	0,1	192,44	225,44	25,05	1,4	5,86
250	1,067	0,13	192,44	225,44	33,69	1,63	4,44
500	1,078	0,13	192,44	225,44	33,69	1,63	4,48
1000	0,906	0,15	192,44	225,44	39,78	1,77	3,77
2000	0,831	0,17	192,44	225,44	46,17	1,9	3,45
4000	0,835	0,16	192,44	225,44	42,94	1,83	3,47

Tabla C14*Porcentaje de pérdida de consonante para el aula A201 del edificio 12H.*

A201-12H							
Frecuencias [Hz]	Tiempo de reverberación [s]	Coefficiente de absorción	Volumen [m3]	Área [m2]	Constante del aula [m2]	Distancia crítica [m]	% AICons
125	1,593	0,09	202,04	234,53	23,2	1,35	6,31
250	1,539	0,09	202,04	234,53	23,2	1,35	6,09
500	1,229	0,11	202,04	234,53	28,99	1,51	4,87
1000	1,015	0,14	202,04	234,53	38,18	1,73	4,02
2000	1,027	0,14	202,04	234,53	38,18	1,73	4,07
4000	0,964	0,14	202,04	234,53	38,18	1,73	3,82

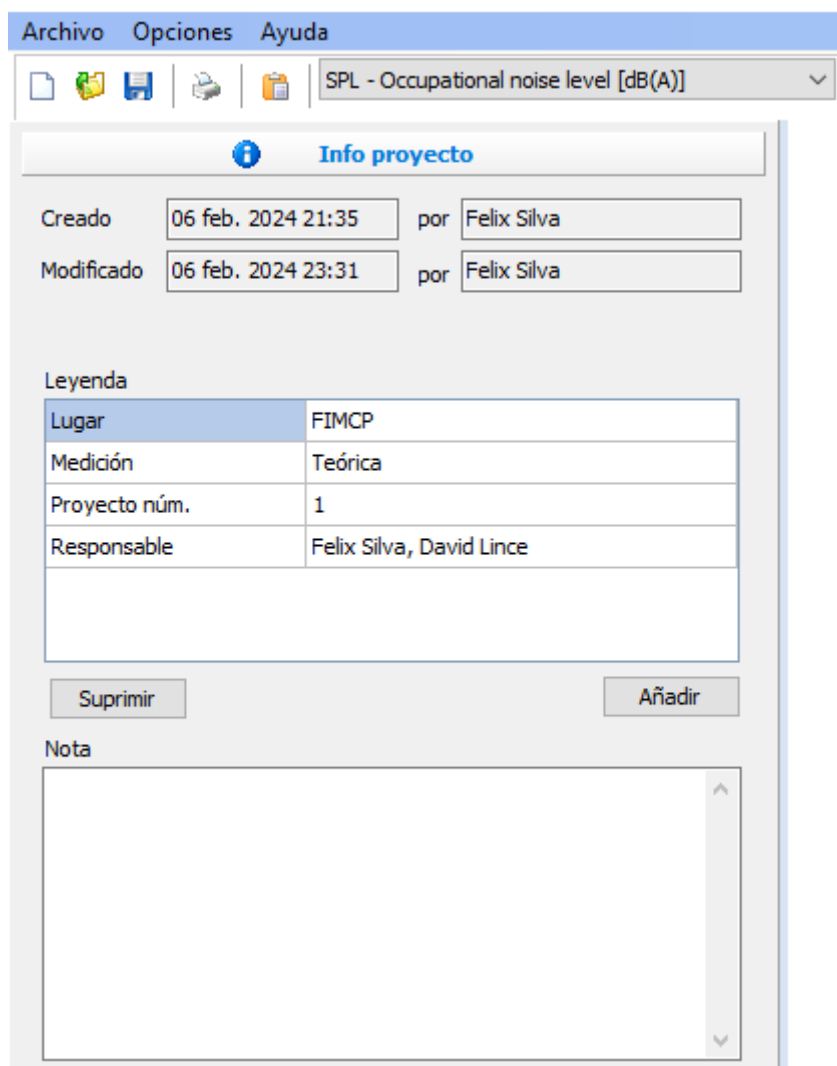
Apéndice D. Mapa de ruido

Para generar el mapa de ruido se utilizó el software Noiseatwork en su versión de prueba. Los pasos que se realizaron fueron:

1. Se colocó la información del mapa de ruido, llenando el lugar, medición, proyecto y responsable.

Figura D1

Información del mapa de ruido



The screenshot shows the 'Info proyecto' window in the Noiseatwork software. The window title is 'SPL - Occupational noise level [dB(A)]'. The interface includes a menu bar with 'Archivo', 'Opciones', and 'Ayuda'. Below the menu bar is a toolbar with icons for file operations. The main content area is titled 'Info proyecto' and contains the following information:

Creado: 06 feb. 2024 21:35 por Felix Silva
Modificado: 06 feb. 2024 23:31 por Felix Silva

Leyenda

Lugar	FIMCP
Medición	Teórica
Proyecto núm.	1
Responsable	Felix Silva, David Lince

Buttons: Suprimir, Añadir

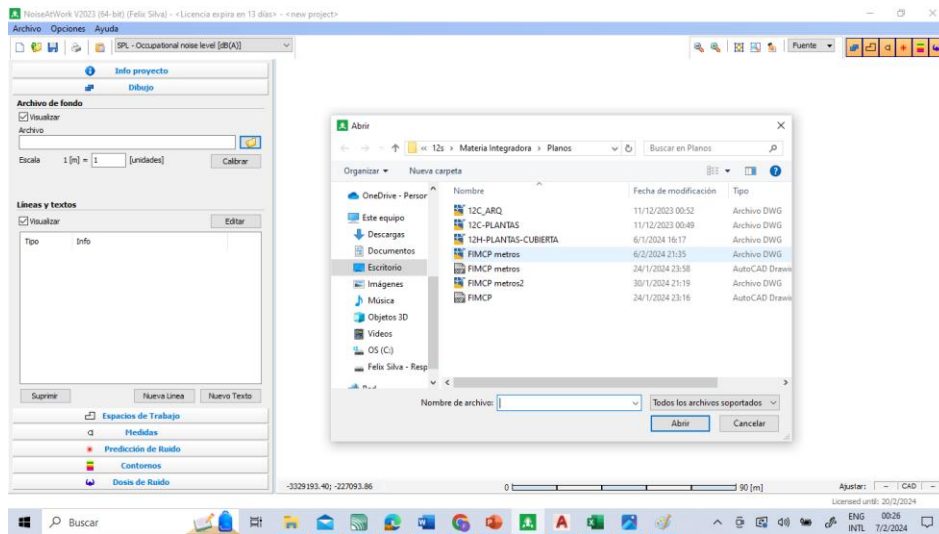
Nota

The 'Nota' field is currently empty.

2. Se exportó el CAD previamente dibujado de los edificios de la FIMCP por medio del apartado *Dibujo* y selección.

Figura D2

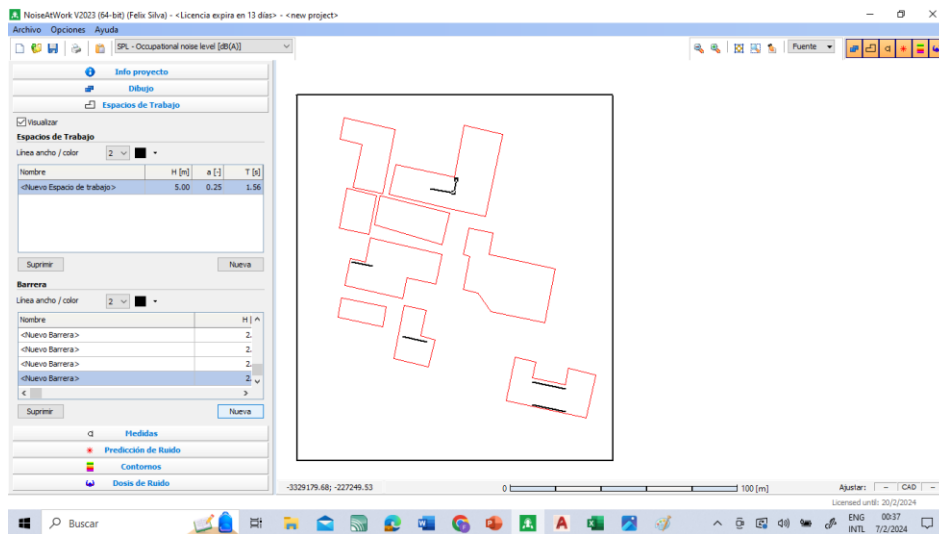
Importar el CAD en Noiseatwork



3. Se seleccionó el área de trabajo por medio del apartado *Espacios de trabajo* y creando una nueva. Además, se colocaron las barreras en el apartado *Barrera* y creando una nueva.

Figura D3

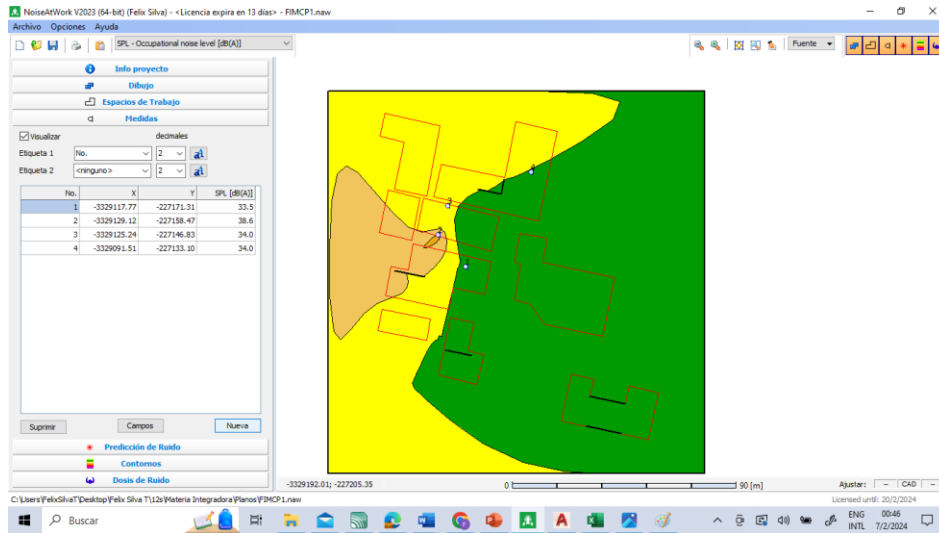
Selección del área de trabajo y barreras



4. En *Medidas*, se colocaron los puntos calculados teóricamente en la propagación de ruido con las barreras acústicas en unidad de dBA.

Figura D4

Puntos de ruido calculados teóricamente



5. Para los colores del mapa de ruido, se seleccionó el apartado *Contorno*, marcando medidas y los rangos para los colores se lo selecciona a conveniencia.

Figura D5

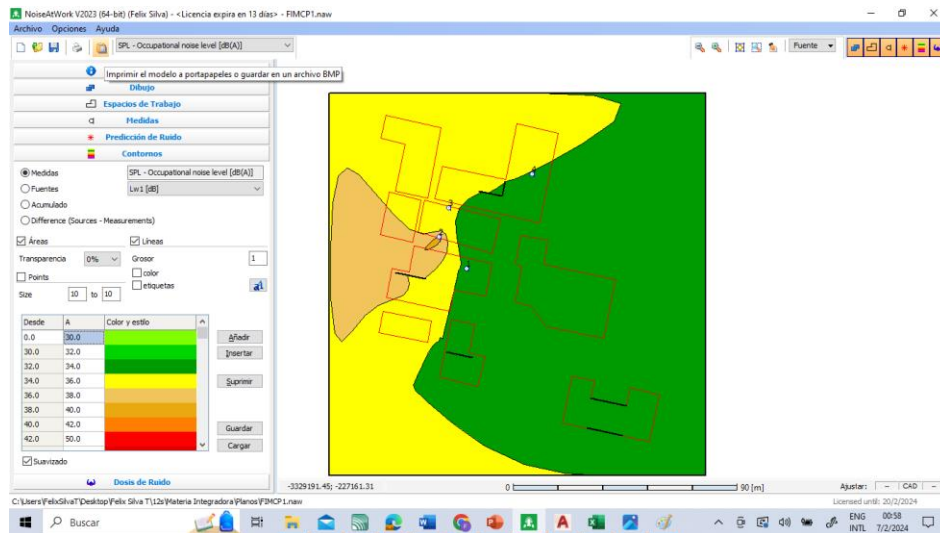
Contorno de colores del mapa de ruido



- Se descargó el mapa de ruido en forma de figura mediante el portapapeles. Se encuentra en la parte superior izquierda.

Figura D6

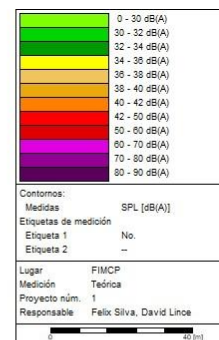
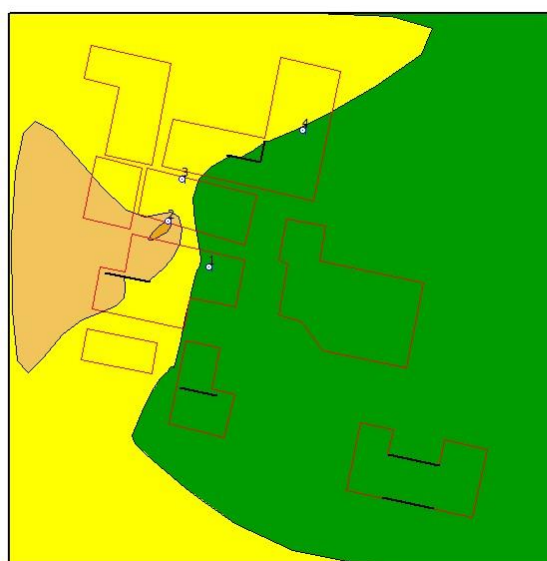
Guardar el mapa de ruido como imagen



El archivo descargado se ve de la siguiente manera:

Figura D7

Mapa de ruido de la FIMCP



Por último, usando cualquier interfaz para edición de imagen, se colocó el mapa con una vista superior obtenida de Google Earth. Esta vista se la colocó encima del mapa de ruido alineando los edificios dibujados en CAD.

Figura D8

Mapa de ruido modificado con una imagen de la FIMCP obtenida de Google Earth

