



**Universidad
Zaragoza**

Trabajo Fin de Grado

Diseño de paneles para insonorización de espacios
mediante herramientas de diseño generativo

Design of panels for soundproofing of spaces using
generative design tools

Autor/es

Pablo Martín Vera

Director/es

Ignacio López Forniés

Titulación del autor

Ingeniería de Diseño Industrial y Desarrollo de Producto

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

2024

ÍNDICE

0.1 - OBJETIVOS	4
1 - INVESTIGACIÓN INICIAL	5
1.1 - FUNDAMENTOS DEL SONIDO	6
1.2 - ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA	10
1.3 - DISEÑO ASISTIDO POR ORDENADOR: DEFINICIONES	19
2 - METODOLOGÍA DE TRABAJO	23
2.1 - PROCESO DE MODELADO PARAMÉTRICO	24
2.2 - ALGORITMOS DE SIMULACIÓN ACÚSTICA	27
3 - RESULTADOS DEL PROCESO GENERATIVO	32
3.1 - PANELES PARÁMETRICOS	33
3.2 - SIMULACIÓN ACÚSTICA	36
4 - CONCLUSIONES	49
4.1 - COMENTARIOS FINALES	50
4.2 - OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE	51
5 - BIBLIOGRAFÍA	52

0.1 - OBJETIVOS

El objetivo del proyecto es abordar la insonorización de espacios mediante la creación de paneles modulares que se adapten a varios ambientes distintos. Para ello se empleará el diseño generativo, que permite evaluar múltiples variables y opciones desde las primeras fases del proyecto, donde cada una de las propuestas que se están generando ya cumplen con los requisitos de diseño. En este caso, se buscarán tanto la efectividad en la insonorización como la reducción de materiales y su impacto medioambiental por su producción y fabricación.

1

INVESTIGACIÓN INICIAL

1.1 - FUNDAMENTOS DEL SONIDO

La comprensión de la generación del sonido, su percepción por parte de un usuario o una audiencia, y su relación con el ruido, constituirá la base para evaluar los criterios acústicos de una sala en el presente proyecto. Este apartado se enfocará en los aspectos físicos, cuantitativos y perceptivos tanto del sonido como del ruido.

1.1.1 - EL SONIDO COMO ENERGÍA

El sonido es una variación de la presión atmosférica causada por la oscilación de partículas en un medio, generalmente el aire, a través del cual se transmite longitudinalmente la onda sonora. La vibración de un objeto, como una cuerda en tensión, genera un ciclo de compresión y expansión en el medio adyacente, alterando la presión atmosférica.

Entre los parámetros que caracterizan el sonido, destacan su nivel de presión, que refleja la cantidad de energía que genera, y su frecuencia, que indica el número de vibraciones por unidad de tiempo y el recorrido de la onda. El nivel de presión sonora determina la intensidad del sonido, mientras que la frecuencia define su composición en términos de graves, medios y agudos.

Para que la propagación de la onda tenga lugar, es indispensable contar con medio material, independientemente de su tipo. Las características de este medio, como la temperatura, el estado de las partículas, la densidad y la elasticidad, determinarán la velocidad de propagación. En este trabajo, se abordará el acondicionamiento acústico de un espacio arquitectónico, por lo que el medio de propagación predominante será el aire. En la tabla siguiente (Fig. 1.1), se muestran las velocidades de propagación en diferentes materiales.

Material	Velocidad del sonido (m/s)
Aire	340
Acero	6100
Madera	5260
Ladrillo	3650

Figura 1.1: Velocidad del sonido en algunos materiales.

Observando los datos, puede concluirse que en los medios de propagación más densos y menos elásticos la propagación es más alta. La longitud de onda, o la distancia entre dos oscilaciones, depende tanto de la frecuencia como de la velocidad de propagación e través de la ecuación:

$$V = f * \lambda$$

Donde V es la velocidad del sonido, f es la frecuencia en Hertzios [Hz] y λ es la longitud de onda.

1.1.2 - FRECUENCIA Y LONGITUD DE ONDA

Además de la velocidad de propagación, existen otras variables importantes para identificar un sonido. Si se considera el sonido más simple, un tono puro, su representación en una onda sinusoidal (Fig. 1.2) permite distinguir las principales características.

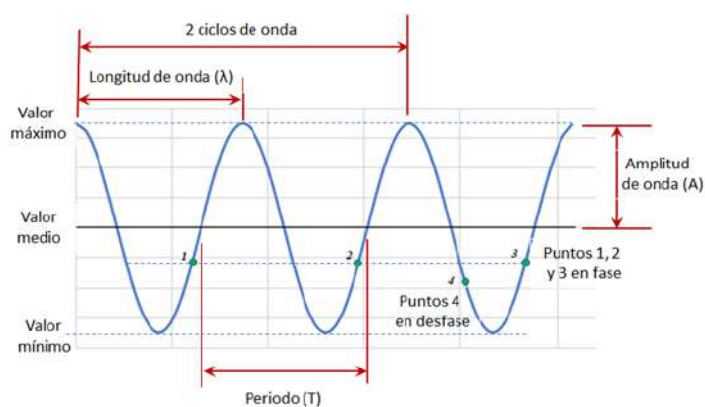


Figura 1.2: Presentación gráfica de algunos parámetros de la onda armónica.

La frecuencia representa el número de oscilaciones que se repiten por segundo y su unidad en el Sistema Internacional es el Hertzio [Hz]. En el ámbito de la música, se conoce como tono y permite diferenciar entre agudos y graves, dependiendo de si la frecuencia es alta o baja, respectivamente. El rango de audición de un ser humano promedio se encuentra entre 20 Hz y 20,000 Hz, y tiende a disminuir con la edad. Aunque algunas frecuencias ultrasónicas son detectables por animales como perros y murciélagos, no son relevantes en el diseño de espacios acústicos.

Para facilitar el análisis y simplificar el rango audible de frecuencias, estas se dividen en bandas de octava. Las octavas se producen en intervalos exponenciales, aumentando con una relación de 2:1, de manera similar a las octavas en un teclado musical. Por ejemplo, un filtro de octava con una frecuencia central de 1 kHz tiene una frecuencia inferior de 707 Hz y una superior de 1.414 kHz. Cualquier frecuencia fuera de este rango no pasaría el filtro. Las bandas de octava típicas se encuentran en 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 y 16000 Hz.

1.1.3 - AMPLITUD

La amplitud de la onda se asocia con la presión sonora, es decir, con la fuerza ejercida por unidad de superficie sobre las partículas del medio en un punto determinado. En el medio más común para este proyecto, el aire, las moléculas se alteran levemente, oscilando por encima y por debajo de los valores de presión atmosférica. Esta variación de presión se conoce como presión sonora, cuya unidad es el Newton por metro cuadrado [N/m^2] o Pascal [Pa], y es el parámetro más utilizado para cuantificar el nivel de ruido relativo de un sonido.

La unidad estándar para cuantificar el ruido es el decibel [dB], que facilita la comprensión y comparación de datos al ser una unidad logarítmica. Esto se debe a que, en el tratamiento de datos relacionados con la audición, se ha considerado que el oído humano responde al sonido de manera logarítmica, con diferencias de hasta 1 : 5.000.000 en la escala.

El Nivel de Presión Sonora (SPL, por sus siglas en inglés Sound Pressure Level) es el nivel de presión sonora medido en relación con un valor de referencia que corresponde a 20 nPa, el umbral de audición humana a 1000 Hz. El decibel se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$dB = 20 \log \left(\frac{P_{SPL}}{P_{REF}} \right)$$

Donde P_{SPL} es la medida de la presión sonora y P_{REF} es el valor de referencia para la audición humana. Debido a esta relación logarítmica, duplicar el nivel de presión sonora (P_{SPL}) equivale aproximadamente a aumentar 6 dB. El rango audible se representa en una escala logarítmica que varía aproximadamente de 0 a 140 dB (Fig. 1.3).



Figura 1.3: Niveles de ruido en un entorno cotidiano.

1.2 - ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA

Este apartado se enfocará en el comportamiento del sonido en espacios cerrados, analizando cómo reaccionan los materiales y la geometría del entorno, qué métricas se utilizan para medir los parámetros acústicos, y otras cuestiones relacionadas con las preferencias subjetivas al acondicionar un espacio.

La acústica, como disciplina científica, es relativamente nueva, habiendo sido formalmente desarrollada en los últimos 100 años y actualmente se considera una rama de la ingeniería. Los instrumentos necesarios para medir y registrar los datos acústicos no estuvieron disponibles hasta la invención de la amplificación electrónica y los micrófonos a principios del siglo XX. Aunque se han establecido métricas específicas para evaluar la acústica arquitectónica, estas no siempre garantizan que un espacio ofrezca una experiencia auditiva satisfactoria.

1.2.1 - EL SONIDO EN ESPACIOS CERRADOS

El sonido producido por una fuente situada en un campo abierto, sin obstáculos, se puede escuchar directamente. Sin embargo, a menudo en conciertos o eventos al aire libre, el espacio no es el más adecuado para una correcta audición. Por ello, se recurre a elementos estructurales o dispositivos electrónicos de amplificación, como altavoces, para proyectar mejor el sonido. Aunque estos métodos son sencillos y eficaces para mejorar la experiencia acústica, el análisis de sonido en el interior de un espacio cerrado resulta más complejo.

Debido al crecimiento de las ciudades, la expansión industrial y el aumento del transporte, el acondicionamiento acústico y el confort en la construcción y funcionamiento de edificios

residenciales, públicos e industriales adquiere una gran relevancia. El ruido y la contaminación acústica que generan estos factores afectan negativamente al bienestar físico y mental, interfiriendo con las pautas de sueño de las personas y provocando descansos deficientes.

Con el ritmo de vida actual y la concentración de la población en grandes ciudades, resulta casi imposible evitar el ruido. Las fuentes de este pueden ser diversas, desde el tráfico exterior hasta ruidos producidos dentro de los edificios, como los sistemas de ventilación, calefacción y aire acondicionado. Se estima que el 22% de la población está expuesta a niveles de ruido superiores a los recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Este dato es preocupante, ya que la exposición prolongada a niveles elevados de ruido puede tener consecuencias mucho más graves que la fatiga constante y la disminución de la productividad.

Diversos estudios señalan que el impacto del ruido en el cuerpo humano puede acarrear problemas en los órganos auditivos, el sistema cardiovascular y el sistema nervioso, afectando el instinto de autopreservación, el autocontrol y el sentido del equilibrio. El grado de aparición de estos síntomas depende de los parámetros del ruido, el tiempo de exposición y la sensibilidad de cada individuo. Concretamente, se ha demostrado que las mujeres y las personas de mayor edad son más propensas a verse afectadas por los efectos del ruido.

Para prevenir estos efectos adversos, es fundamental incorporar soluciones que mejoren el aislamiento acústico en los sistemas constructivos tradicionales. Este enfoque debe ser considerado en cualquier proyecto de construcción, ya que el confort acústico ya está presente en muchas normativas municipales sobre vivienda, lugares de trabajo y edificios públicos.

1.2.2 - PANELES ACÚSTICOS

En el apartado de interferencias de ondas, se observó que las ondas sonoras se reflejan cuando inciden sobre una superficie dada. Sin embargo, esta es solo una de las interacciones posibles que las ondas sonoras pueden experimentar al chocar con un obstáculo. Al analizar los tipos de ruido que se generan en un edificio, se puede concluir que las superficies no solo reflejan, sino que también pueden transmitir y absorber las ondas sonoras. Las propiedades de los materiales, como su densidad y composición, determinan su capacidad para reflejar, absorber o transmitir el sonido, lo que tiene un impacto directo en la acústica de un espacio. Estas propiedades son fundamentales a la hora de diseñar un entorno acústicamente eficiente y confortable, ya que influyen en la manera en que el sonido se comporta dentro del mismo.

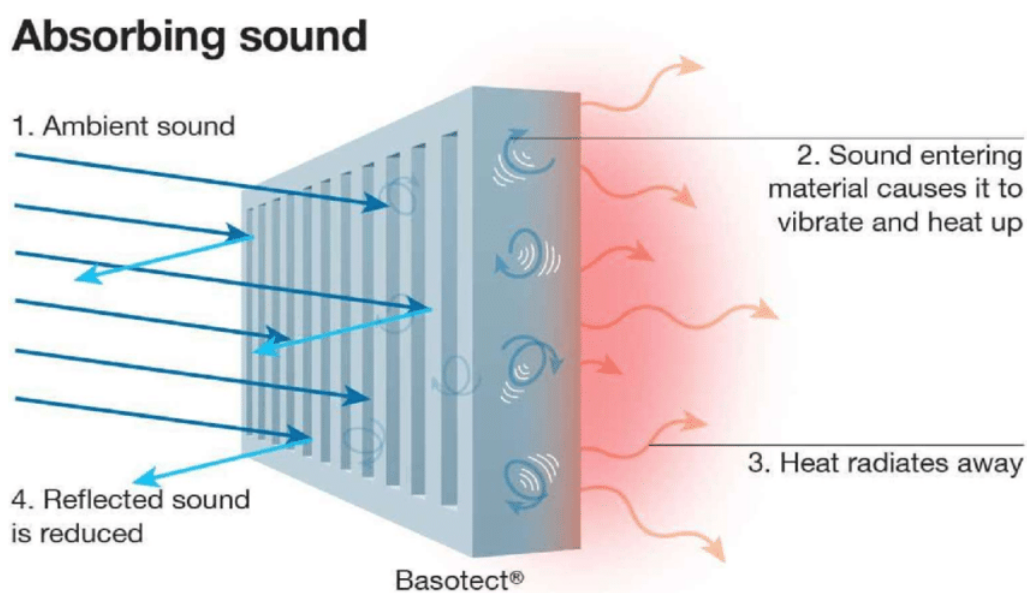


Figura 1.4: Esquema de funcionamiento de un panel acústico. 1- El sonido ambiental incide sobre él. 2- La onda sónica hace vibrar el material poroso junto al aire. 3- La fricción produce pérdida energética en forma de calor. 4- El sonido reflejado es atenuado.

La función de los paneles acústicos (Fig. 1.4) es aprovechar las propiedades de reflexión y absorción, ya que, además de reflejar parte de la onda sonora, transforman el sonido en un tipo distinto de energía. En términos generales, todos los paneles acústicos están compuestos por al menos una cara porosa, en la cual, cuando se ve afectada por un sonido, la fibra del panel vibra junto al aire alojado en los poros. Este fenómeno genera fricción entre ambos medios, lo cual se traduce en una pérdida de energía sonora en forma de calor. Este proceso corresponde a la absorción acústica. Sin embargo, es común encontrar otros términos relacionados con el aislamiento acústico, como "aislar", "insonorizar" o "acondicionar", que pueden resultar confusos. Es importante destacar dos de estos términos (Fig. 1.5), ya que su comprensión es fundamental a la hora de seleccionar materiales o sistemas adecuados para garantizar el confort acústico:

- Aislar implica reflejar lo máximo posible una onda sónica, de modo que su propagación por el medio material se detiene. El fenómeno que se produce se denomina en otros ámbitos reverberación.
- Absorber implica siempre transformar parte de la energía acústica en calor, normalmente entre las paredes del material absorbente acústico.

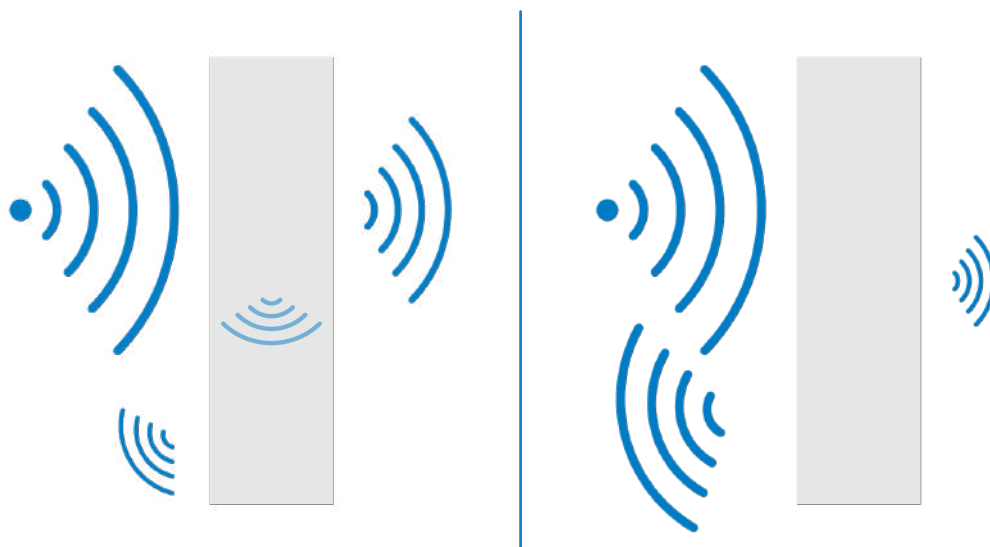


Figura 1.5: Esquema que ilustra los fenómenos de absorción | aislamiento.

A menudo, en los trabajos de acondicionamiento acústico, es necesario utilizar ambas técnicas, aislamiento y absorción, para mejorar la calidad sonora de recinto y adecuar la sonoridad a sus características, tales como su uso, tamaño o geometría. Un ejemplo de ello sería la planificación de una sala de conferencias. En este caso, se debe llevar a cabo un tratamiento de absorción acústica para evitar que el sonido se propague a las salas colindantes, de modo que el ruido no interfiera en otros espacios. Al mismo tiempo, se debe aplicar un tratamiento de aislamiento para garantizar que el sonido dentro de la sala sea adecuado para los espectadores, asegurando que la sonoridad de las presentaciones se perciba de manera clara y eficiente, sin filtrarse hacia el exterior. Este enfoque integral asegura que tanto el control del ruido no deseado como la optimización de la acústica interior se logren de manera efectiva.

1.2.3 - PROPIEDADES DE LOS PANELES

Los paneles acústicos han ganado popularidad en los últimos años gracias a los avances en materiales y procesos de fabricación, lo que ha permitido crear productos más delgados sin perder su eficacia acústica. Estos paneles ofrecen múltiples ventajas que los hacen adecuados para diversas aplicaciones. En primer lugar, son altamente duraderos, con una vida útil superior a los 20 años cuando se instalan y mantienen adecuadamente. Además, son versátiles y pueden adaptarse tanto a entornos residenciales como industriales, e incluso a condiciones especiales como alta humedad. Muchos también cuentan con propiedades de aislamiento térmico, lo que contribuye a la eficiencia energética y reduce los costos de calefacción. Estas características hacen que los paneles acústicos sean una solución eficaz no solo para el control del ruido, sino también para mejorar la sostenibilidad y la eficiencia energética en los edificios.

1.2.4 - TIPOS DE PANELES ACÚSTICOS

El mercado de paneles acústicos ofrece una amplia variedad de opciones que se clasifican según dos criterios: el uso y el tipo de material. Según el tipo de material, existen diferentes tipos de paneles acústicos:

- Paneles acústicos de madera: Se instalan en paredes y suelos para reducir las reverberaciones y mejorar la calidad acústica. Son sostenibles, duraderos y estéticamente versátiles.
- Paneles acústicos de espuma: Compuestos por poliuretano expandido, se utilizan en salas de ensayo, restaurantes, hospitales y espacios donde se requiere acondicionamiento acústico.
- Paneles acústicos de fibra de vidrio: Son aislantes térmicos y acústicos, seguros en caso de fuego, y se usan en paneles decorativos y en el aislamiento interno de estructuras.
- Paneles acústicos de lana de vidrio: Destacan por su excelente aislamiento térmico y se emplean en combinación con otros paneles.
- Paneles acústicos geotextiles: Fabricados con espuma de poliuretano reciclada y fibras textiles, ofrecen gran capacidad de absorción acústica y térmica. Se utilizan en muros y techos

Según su uso, los paneles se dividen en:

- Paneles de techo: Mejoran la calidad acústica de un espacio al controlar la reverberación. Además, tienen una función estética y están disponibles en diversos diseños y colores.
- Paneles de pared: Se instalan en las paredes para absorber el sonido, reduciendo la reverberación y mejorando la claridad acústica. Son fáciles de instalar y adaptables a diferentes estilos.
- Paneles decorativos: Diseñados principalmente para absorber sonido, estos paneles también se distinguen por su aspecto estético, permitiendo su integración en ambientes donde la decoración es clave.

1.2.5 - ESTUDIO DE MERCADO

El análisis de los productos y las reseñas de los usuarios revela varias características valoradas: los usuarios prefieren paneles de tamaño compacto, generalmente cuadrados y no mayores a 50 x 50 cm, fáciles de instalar sin necesidad de herramientas especializadas, como los autoadhesivos. La estética es clave, ya que muchos paneles permanecen visibles después de su instalación, y se busca un equilibrio entre diseño y funcionalidad. Además, todos los productos destacan por su etiquetado de sostenibilidad, siendo seguros para ambientes con niños o mascotas, y son inodoros o recomiendan ventilar las estancias tras la instalación. También son ignífugos o resistentes al fuego, lo cual es fundamental para prevenir riesgos en caso de incendio.

En la página 34 del anexo puede consultarse una tabla en la que se analizan detalladamente seis productos distintos. Se han escogido para representar distintas opciones de compra y conocer la experiencia de sus usuarios.

1.2.6 - VARIABLES ACÚSTICAS

Para poder analizar las características de un acondicionamiento acústico y dar una valoración adecuada, se han establecido una serie de parámetros que permiten evaluar su efectividad. Es fundamental conocer qué información proporcionan acerca del comportamiento del sonido en un espacio, ya que, cuando se realice una propuesta de diseño para paneles y barreras acústicas, estos parámetros serán indicadores clave de su capacidad para mejorar la acústica del entorno.

1.2.6.1 - TIEMPO DE REVERBERACIÓN (RT)

Como se ha mencionado al comentar el fenómeno de reflexión de las ondas sonoras y su influencia en el aislamiento acústico, una de las medidas más importantes a considerar es la reverberación. Este fenómeno puede definirse como el tiempo que permanece un sonido en un espacio después de que la fuente sonora haya cesado. El tiempo de reverberación o RT (*Reverberation Time*, por sus siglas en inglés) es la medida acústica asociada a este fenómeno y se refiere al tiempo en segundos que tarda un sonido en disminuir 60 dB después de haber cesado. Este tiempo depende del volumen del espacio y de las propiedades de absorción de los materiales que componen las superficies. El tiempo de reverberación puede expresarse mediante la siguiente fórmula:

$$RT = \frac{(0,049)V}{\sum_1^n s_n a_n}$$

donde V es igual al volumen total de la habitación, s es la superficie expuesta de un material y a es el coeficiente de absorción de ese material.

1.2.6.2 - TIEMPO DE PRONTO DECAIMIENTO (EDT)

Este parámetro, conocido como EDT (*Early Decay Time*, por sus siglas en inglés), al igual que el tiempo de reverberación, mide la velocidad de caída del sonido, pero lo hace evaluando el descenso inicial. Específicamente, corresponde a los primeros 10 dB de caída en la intensidad del sonido.

Idealmente, el EDT debería ser igual al tiempo de reverberación, pero con frecuencia es algo menor, y el grado en que ambos parámetros difieren puede indicar la calidad de la difusión del sonido en el espacio.

El EDT se define como el tiempo que transcurre desde que la fuente emisora deja de emitir hasta que el nivel de presión sonora disminuye 10 dB, y luego este valor se multiplica por 6. Al igual que el RT, el EDT varía según la frecuencia del sonido.

$$EDT = 6 * (t_{-10})$$

1.2.6.3 - CLARIDAD (C80)

El parámetro referido en este apartado, la Claridad (C80), está relacionado con cuestiones energéticas y depende del tiempo. Este índice se utiliza para valorar el ratio de comprensión de uno o varios sonidos en una señal compleja, como una composición musical. Se define como el cociente entre la energía sonora que llega a un receptor durante los primeros 80 ms (es decir, la energía del sonido directo más las primeras reflexiones) y la energía que llega después de ese tiempo. Se calcula en la banda de frecuencia entre 125 Hz y 4 kHz.

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{0,08} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$$

Se ha elegido un intervalo temporal de 80 ms como adaptación a la fisiología del oído humano. Esto se debe a que, cuando se trata de la audición, las reflexiones que llegan al oyente dentro de ese lapso de tiempo llegan al mismo tiempo que el sonido directo.

1.2.6.4 - DEFINICIÓN (D50)

La Definición (D50) indica el nivel de claridad del sonido, es decir, la facilidad con la que un oyente puede comprender el mensaje transmitido por un emisor. El parámetro D50 se define como la relación entre la energía que llega al oyente durante los primeros 50 ms (es decir, la energía del sonido directo más las primeras reflexiones) y la energía total que recibe.

$$D_{50} = \frac{\int_0^{0,05} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$$

En este caso, la energía recibida al principio debe ser mayor que la energía recibida al final para que el índice de calidad sea aceptable y garantice una buena acústica para el discurso.

1.3 - DISEÑO ASISTIDO POR ORDENADOR: DEFINICIONES

Tras presentar las propiedades acústicas y el comportamiento del sonido en distintos entornos, se abordará el diseño generativo como una disciplina que explora soluciones estéticas y funcionales. En este contexto, se analizarán enfoques recientes que, aunque adoptan terminologías diversas según el autor o centro de investigación, a menudo expresan conceptos similares. Por lo tanto, se considera necesario definir y distinguir claramente estos términos para su uso preciso en el futuro.

El significado de diseño computacional ha evolucionado significativamente en las últimas dos décadas. Hoy en día, las técnicas de diseño asistido por ordenador en ingeniería y arquitectura

van más allá de la automatización de la obtención de planos, abarcando procesos que utilizan las capacidades de cálculo de un ordenador para tareas como la automatización de procedimientos de diseño (deducción e inducción), la gestión eficiente de grandes volúmenes de información, la incorporación rápida de cambios y la asistencia a los diseñadores mediante feedback automático, como simulaciones inmediatas. Este tipo de diseño requiere habilidades especializadas, lo que ha dado lugar a nuevos métodos que, a su vez, generan terminología que debe definirse claramente.

1.3.1 - DISEÑO PARAMÉTRICO

El diccionario de la RAE define "parámetro" como una variable que identifica elementos mediante su valor numérico o como un dato necesario para analizar una situación. El diseño paramétrico, basado en el pensamiento algorítmico, utiliza parámetros y operaciones para establecer relaciones entre ellos. A medida que avanzaron las tecnologías de diseño asistido por ordenador, especialmente en computación e interfaces, se establecieron las bases del diseño paramétrico, vinculado a la metodología BIM (Building Information Modeling), que permite asociar relaciones geométricas y topológicas entre los elementos del diseño. Esto no solo cambia el proceso de diseño, sino que también impacta en la creación de productos más complejos y adaptados a las necesidades de la sociedad.

El diseño paramétrico permite modelar piezas y objetos mediante geometrías con parámetros asociados, representando las relaciones dentro de la geometría del producto. Las herramientas paramétricas permiten analizar la lógica de asociación y modificar parámetros (como dimensiones o ángulos), lo que influye en otros parámetros gracias a las relaciones previamente establecidas. Además, la interfaz visual del diseño paramétrico facilita la creación y modificación

del objeto algorítmico durante el proceso de diseño. asociados, representando las relaciones dentro de la geometría del producto. Las herramientas paramétricas posibilitan analizar la lógica de asociación y la geometría de las formas creadas, así como explorar alternativas ajustando parámetros. Cambiar un parámetro (como dimensiones o ángulos) influye en otros, gracias a las relaciones establecidas previamente. Además, la interfaz visual del diseño paramétrico facilita la creación y modificación del objeto algorítmico durante el proceso.

1.3.2 - DISEÑO GENERATIVO

El diccionario de la RAE define "generativo" como algo que tiene la virtud de engendrar algo, pero esta definición no cubre completamente el concepto de diseño generativo, que debe diferenciarse del diseño paramétrico. Ambos emplean descripciones algorítmicas, pero el diseño generativo es más autónomo, ya que se basa en un proceso iterativo de optimización que utiliza software para generar soluciones de diseño dentro de ciertas restricciones. A diferencia del diseño tradicional, que crea y luego evalúa, el diseño generativo se enfoca en generar opciones que cumplan con las especificaciones desde el inicio, utilizando parámetros para definir objetivos y limitaciones.

El proceso generativo crea y evalúa una variedad de soluciones, ejecutando instrucciones en secuencias que continúan hasta cumplir los criterios iniciales. Este enfoque permite generar soluciones complejas incluso con algoritmos sencillos, lo que hace difícil predecir los resultados solo con la descripción del programa. Las herramientas generativas, como Galapagos en Rhino, GDE en CATIA o DreamCatcher en Autodesk, requieren definir especificaciones a través de parámetros y usar funciones de criterios para evaluar las soluciones.

1.3.3 - RHINOCEROS Y GRASSHOPPER

Después de analizar las metodologías de diseño paramétrico y generativo, se ha optado por usar Rhino como herramienta principal para el proyecto debido a su flexibilidad y capacidad de integración con otros programas y plugins especializados. Rhino, en su versión base, permite crear y editar superficies y sólidos en 3D, gestionar modelos complejos y realizar pruebas de rendimiento. La verdadera potencia del software se encuentra en Grasshopper, su editor de algoritmos gráficos, que facilita la creación de geometrías dinámicas y el diseño paramétrico sin necesidad de conocimientos avanzados de programación. Grasshopper permite explorar soluciones de diseño de manera eficiente, con visualización en tiempo real de los cambios y trazabilidad desde el algoritmo, optimizando la creación de formas y estructuras mediante análisis detallados y permitiendo la integración de diversos formatos de archivo. Este entorno de programación visual es especialmente útil en el ámbito arquitectónico y acústico, ya que permite realizar diseño, modelado y simulación de manera integrada desde las primeras fases del proyecto.

1.3.4 - PACHYDERM ACOUSTICS

Pachyderm Acoustics es un plugin de Rhino esencial para este proyecto, ya que utiliza *ray-tracing* e *image-source* para realizar análisis acústicos, evaluando parámetros como el tiempo de reverberación, y la presión acústica. El *ray-tracing* ayuda a los diseñadores a entender cómo la geometría influye en el sonido, reduciendo efectos como ecos o vibraciones. Pachyderm es fundamental para simular los paneles acústicos diseñados con técnicas generativas, permitiendo recrear las condiciones de una sala y obtener datos sobre el comportamiento de las ondas sonoras.

2

METODOLOGÍA DE TRABAJO

Durante el proceso de desarrollo, se han trabajado distintos algoritmos como parte de un proceso de aprendizaje y optimización, cada uno de los cuales ha mejorado las capacidades del sistema hasta llegar al algoritmo definitivo. Este algoritmo final será el que permitirá generar cuatro propuestas de diseño concretas, las cuales se explorarán y evaluarán más a fondo.

2.1 - PROCESO DE MODELADO PARAMÉTRICO

2.1.1 - PRUEBA 1: PANEL VORONOI

El primer algoritmo creado representó una toma de contacto fundamental con el sistema de programación, a través del cual se inició el aprendizaje de los recursos disponibles. La idea original fue utilizar un diagrama de Voronoi para generar curvas aleatorias, lo que permitiría crear patrones geométricos complejos. Estos diagramas se forman al conectar varios puntos entre sí, trazando las mediatrices de los segmentos que los unen. Las intersecciones de estas mediatrices definen una serie de polígonos en el plano bidimensional alrededor de un conjunto de puntos de control, de tal forma que el contorno de los polígonos creados se mantiene a una distancia igual de los puntos vecinos, delimitando así su zona de influencia.

Sin embargo, a pesar de que este método genera particiones del plano que se pueden alterar mediante parámetros, los resultados fueron superficies poco atractivas y con geometrías abruptas (Fig. 2.1). Debido a este hecho y a que la exploración formal no permitió obtener resultados variados y llamativos, se ha descartado este sistema. Aunque el primer intento no fue exitoso en su implementación final, proporcionó valiosas lecciones sobre la interacción entre programación, geometría y las limitaciones de fabricación.

Para consultar la creación del algoritmo visitar la página 62 del anexo, el algoritmo completo está en la página 127.

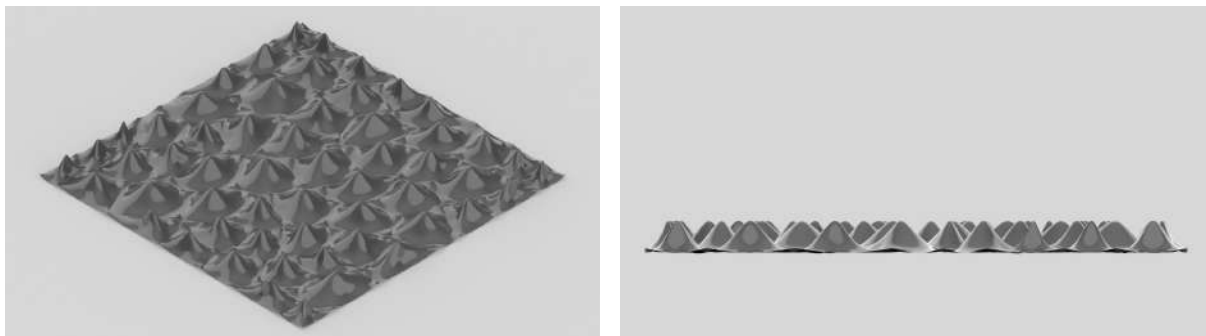


Figura 2.1: Renders del resultado del primer algoritmo de prueba.

2.1.2 - PRUEBA 2: PANEL LAMINADO

La segunda propuesta tenía como objetivo imitar las texturas que algunos diseñadores y arquitectos logran crear en paredes y techos mediante la disposición de tableros con ciertas separaciones. Este tipo de construcciones es común en los tutoriales del plugin, ya que permite generar variaciones en la forma del conjunto modificando el recorte de cada uno de los elementos que lo conforman.

Una vez obtenidos los resultados del algoritmo (Fig. 2.2), se generaron una serie de paneles modificando los parámetros para explorar las distintas posibilidades de diseño. Sin embargo, el resultado fue similar al caso anterior, ya que las formas obtenidas no fueron completamente satisfactorias. Las variaciones formales a través de los parámetros resultaron limitadas, lo que redujo significativamente la capacidad de realizar comparaciones útiles entre las diferentes configuraciones.

Para consultar la creación del algoritmo visitar la página 71 del anexo, el algoritmo completo está en la pagina 128.

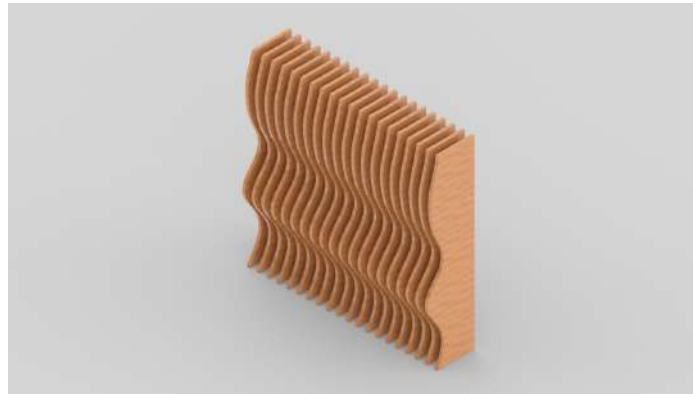


Figura 2.2: Renders del resultado con acabado de madera.

2.1.3 - MODELO DE PANEL FINAL

El enfoque elegido para este algoritmo es más complejo que en los dos casos anteriores, aunque pueden encontrarse similitudes. Su funcionamiento se basa en generar nuevamente un conjunto de puntos, en este caso para descomponer sus coordenadas en los planos X, Y y Z. Posteriormente, se introducen interferencias en las posiciones de cada punto, de modo que al recomponer estas coordenadas y generar las superficies se obtienen resultados distintos.

Inicialmente, el método elegido para realizar la primera transformación es aplicar una onda senoidal en el eje Z. Esto garantiza que en el relieve superficial se puedan formar crestas y valles, características muy útiles para producir rebotes en las ondas sonoras. Después, se aplica otra desconstrucción de las coordenadas para volver a transformar Z. Para consultar la creación del algoritmo visitar la página 78 de los Anexos, el algoritmo completo está en la pagina 129.

2.2 - ALGORITMOS DE SIMULACIÓN ACÚSTICA

En esta sección se presentarán los algoritmos diseñados para realizar simulaciones acústicas utilizando el plugin Pachyderm Acoustics de Grasshopper, cuyo propósito es evaluar la respuesta acústica en espacios cerrados.

Para realizar estas simulaciones, es necesario contar con un modelo tridimensional de la habitación en Rhino (Fig. 2.3), ya que el plugin Pachyderm Acoustics requiere una representación precisa del espacio. Es fundamental que las unidades en Rhino estén configuradas en metros y que las superficies definan un espacio cerrado para garantizar el funcionamiento adecuado del complemento. Además, es imprescindible definir dos puntos en el espacio que actúen como emisor y receptor de las ondas sonoras, respectivamente.

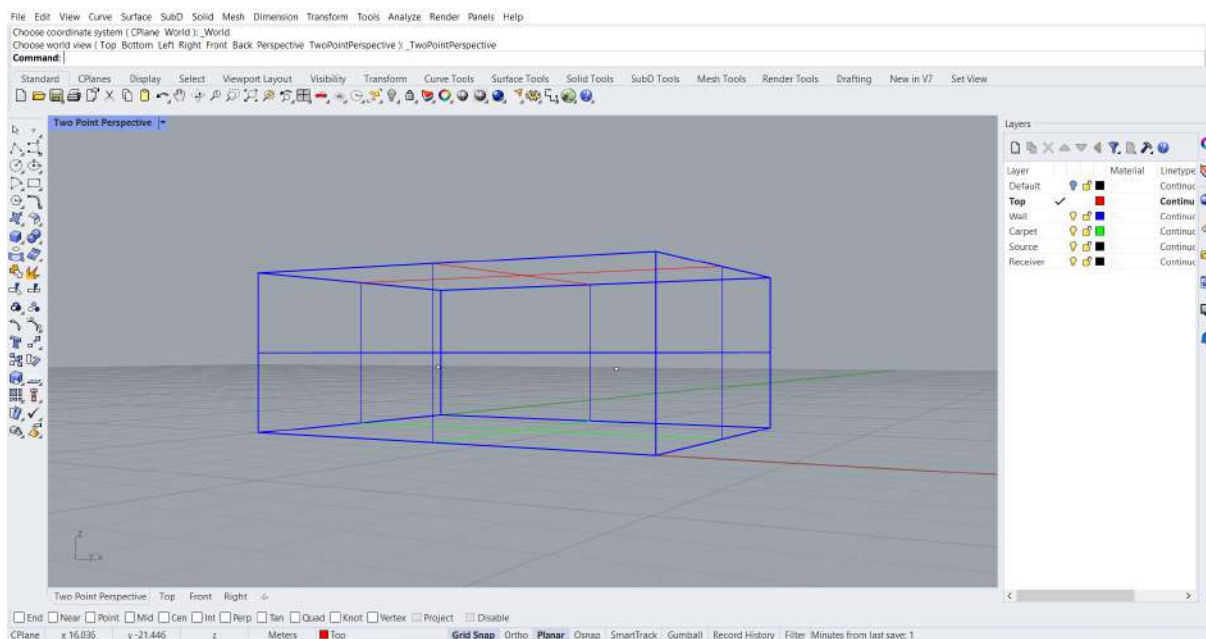
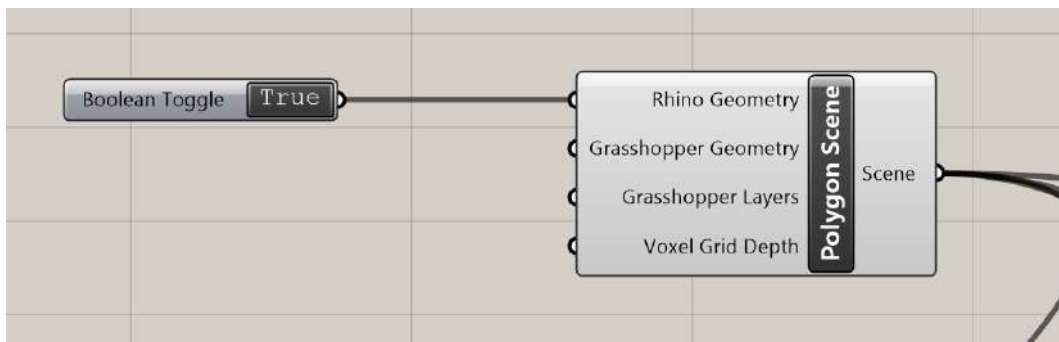


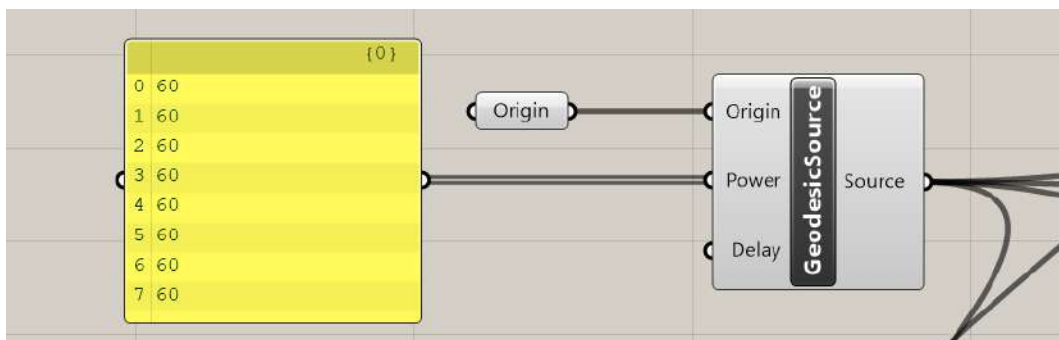
Figura 2.3: Entorno modelado en Rhino, separando los materiales por capas.

Una vez que se ha configurado el entorno y establecido los parámetros necesarios, se procederá a detallar el algoritmo de simulación paso a paso. Para obtener una visión general del algoritmo, consultar el mapa general en la página 130 del anexo. Los componentes involucrados en la simulación son los siguientes:

1. **Polygon Scene:** Construye un escenario para la simulación con la geometría existente en el modelo de Rhino y/o la geometría definida por Grasshopper. Se ha añadido un botón con un dato booleano para poder iniciar la simulación, ya que de lo contrario se inicia siempre que se abre el archivo y dificulta la consulta del algoritmo.

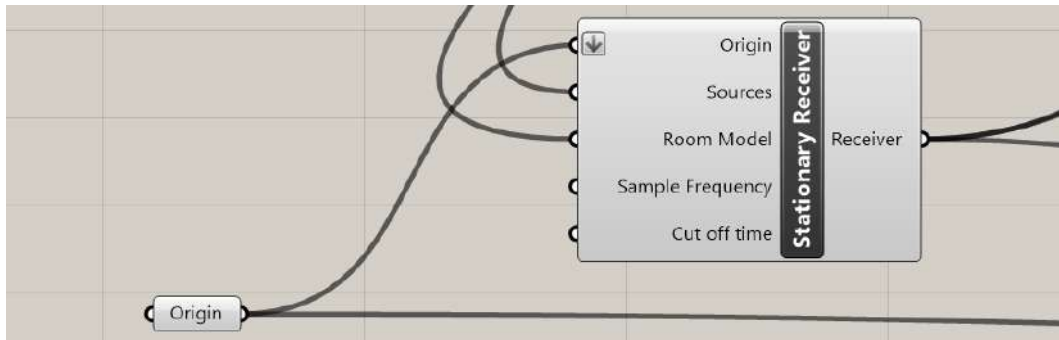


2. **Geodesic Source:** Genera una fuente sonora omnidireccional en el espacio. Como parámetros de entrada, debemos definir el punto de origen en Rhino y el Nivel de Presión Sonora (SPL) en decibelios.

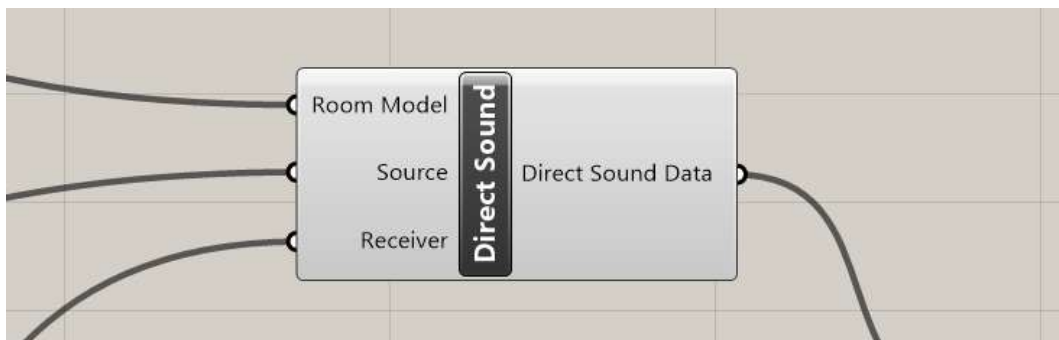


3. **Stationary Receiver:** Define uno de los puntos del modelo de Rhino como micrófono, en el que se realizarán las lecturas para definir como actúan las distintas variables acústicas. Es

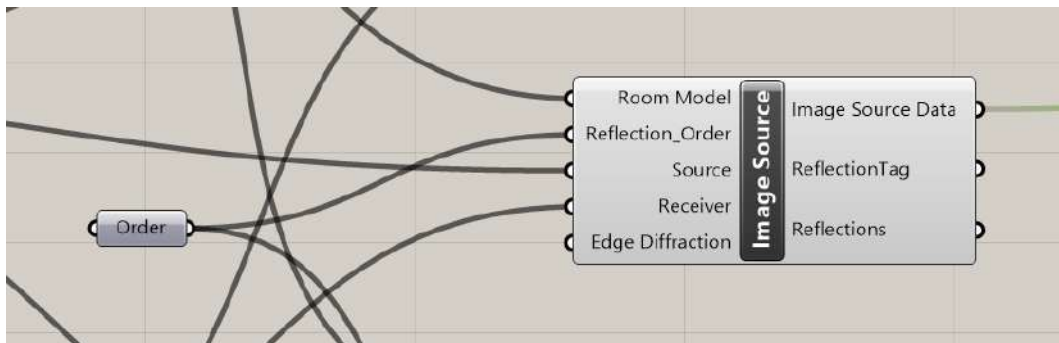
necesario vincular esta operación a las dos anteriores para que quede definido por completo el escenario que se va a estudiar.



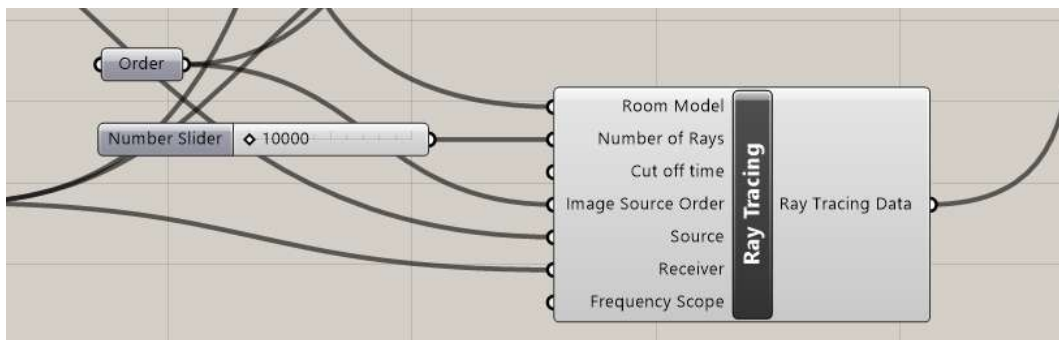
4. **Direct Sound:** Mediante los parámetros de salida de las operaciones anteriores, produce la función de sonido directo.



5. **Image Source:** Además de los cálculos anteriores, se necesita establecer la constante de reflexión mediante el input Order. Después calcula la reflexión de la onda sonora mediante la ley de Snell, teniendo en cuenta la geometría definida por el modelo y la atenuación de la onda que se produce en el tiempo.



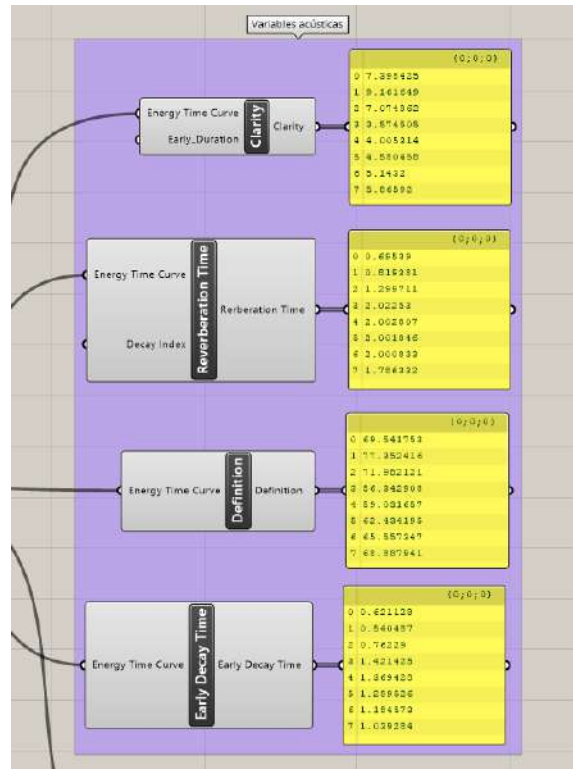
6. **Ray Tracing:** A través de la geometría del espacio que se ha modelado y especificado en la operación Polygon Scene, se realizan los cálculos de trazado de rayos que van a representar la trayectoria de la onda sonora en este medio. La cantidad mínima recomendada de rayos por el desarrollador del software es de 10000, aunque se ha colocado un slider que permite aumentar la cantidad si el hardware lo permite.



7. **Energy-Time Curve:** A partir de los datos de la simulación, es posible establecer la curva Energía-Tiempo en el que visualizar la atenuación de la onda sonora. Se trata de una operación fundamental, ya que su resultado permite calcular todas las variables acústicas que se han especificado en el apartado de investigación.



8. **Variables Acústicas:** Ofrece los valores de las variables acústicas en las distintas octavas de frecuencias (0-7). En este proyecto vamos a estudiar la Claridad (C80), Tiempo de Reverberación (RT), Definición (D50) y Tiempo de Pronto Decaimiento (EDT).



3.2.2 - ANIMACIONES

El algoritmo de simulación acústica carece de visualización de los rayos acústicos, lo que dificulta representar la distribución de la onda sonora en el tiempo. Para superar esta limitación, se desarrollará un algoritmo paralelo que permita visualizar de manera animada la evolución de la onda acústica, facilitando su comprensión en el espacio y el tiempo. El algoritmo completo para generar animaciones se encuentra en la página 130 del anexo.

3

RESULTADOS

3.1 - PANELES PARÁMETRICOS

En este apartado se presentan los diseños de los paneles acústicos desarrollados, con el objetivo de generar una variedad de formas que demuestren la capacidad del software generativo para producir alternativas funcionales y estéticamente atractivas. Se han creado cuatro propuestas, todas con una base cuadrada de 50x50 cm y un espesor entre 4,5 y 6,5 cm, dependiendo del modelo.

Los paneles están compuestos por micelio, un biomaterial derivado de hongos con propiedades aislantes acústicas (Fig. 3.1). Este material se cultiva sobre sustratos orgánicos, donde el micelio se expande y transforma el sustrato en biomasa fúngica, deteniendo su crecimiento antes de producir esporas. Los compuestos de micelio, que han ganado popularidad por su sostenibilidad, requieren poca energía para su fabricación y se desintegran al final de su ciclo de vida. Esta alternativa ecológica podría reemplazar los materiales acústicos tradicionales de plástico y fibras sintéticas, que generan emisiones contaminantes y residuos.



Figura 3.1: Espuma de material a base de micelio utilizado para embalaje.

3.1.1 - PROPUESTA 1

La forma del panel se inspira en los paneles de espuma de poliuretano utilizados en estudios de grabación, con valles y crestas redondeadas en su cara principal y una textura porosa. Para lograr este diseño, se configuran los parámetros de la onda de modo que se generen dos ciclos y medio en el eje X y tres en el eje Y.



3.1.2 - PROPUESTA 2

Este panel, similar al de la prueba 2, imita aquellos formados por la superposición de láminas o paneles, mostrando un efecto de "ola" en el perfil debido a las ondas de distinta amplitud. Para lograr este diseño, los parámetros de la primera onda se configuran para generar tres ciclos en el eje X y uno en el eje Y.



3.1.3 - PROPUESTA 3

Este panel destaca por su estética única, diferenciándose de otras propuestas del proyecto. Su superficie presenta ondulaciones que imitan una moldura ornamental. Para lograrlo, se usan parámetros que generan dos ciclos completos en las coordenadas X y Y, modificando las Z con ruido Perlin. Al repetir el proceso diez veces, se intensifica la deformación y complejidad de la forma.



3.1.4 - PROPUESTA 4

Esta propuesta tiene una estética más conservadora, con ondulaciones suaves y regulares que crean valles y crestas definidas. Este acabado es común en el mercado, lo que permite comparar su rendimiento con otras opciones. Se generan dos ciclos y medio en el eje X y tres ciclos completos en el eje Y. El algoritmo utiliza una función senoidal simple para modificar las coordenadas Y y dar forma al panel.



3.2 - SIMULACIÓN ACÚSTICA

Los paneles acústicos de este proyecto se elaboraron con el mismo material utilizado en un estudio de la Universidad de Pensilvania, dirigido por Natalie Walter y Benay Gürsoy, cuyo objetivo fue evaluar las propiedades acústicas del material basado en micelio. Se busca replicar las condiciones de su experimento para contrastar los resultados obtenidos con los diseños desarrollados en este trabajo.

La simulación se lleva a cabo en una habitación rectangular de 5,5 metros de largo, 4 metros de ancho y 3 metros de altura, con los paneles instalados en una pared (Fig 3.2). Se asignan materiales específicos a las paredes, suelo y techo, y la configuración incluye una fuente sonora y un receptor acústico. Dado que los compuestos de micelio son nuevos y carecen de datos acústicos completos, se utilizan los coeficientes de absorción del estudio de la Universidad de

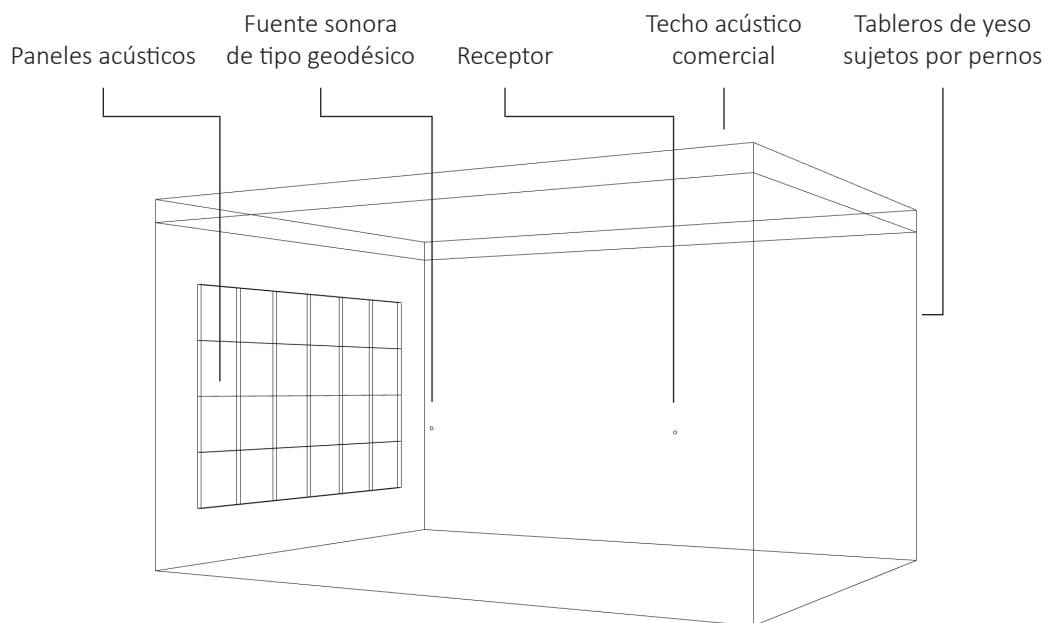


Figura 3.2: Diagrama del escenario donde tiene lugar el experimento.

Pensilvania. Tras realizar tres simulaciones y promediarlas, se replican dos experimentos clave para evaluar cómo afectan los paneles a la acústica del espacio.

Además de los datos acústicos obtenidos en las simulaciones, se han desarrollado animaciones de cada experimento para representar visualmente el comportamiento de las ondas sonoras en los diferentes entornos. Debido a la complejidad de la geometría de los paneles, se ha simplificado su visualización, pero se han preservado los efectos generados por la reflexión de las ondas sonoras. Para ello, se ha simplificado la visualización de la geometría de los paneles debido a su complejidad, pero los efectos producidos por la reflexión de las ondas sonoras se mantienen. Los enlaces para visualizar las animaciones se encuentran a continuación:

- Experimento A-1: [<enlace>](#)
- Experimento B-1: [<enlace>](#)
- Experimento B-2: [<enlace>](#)
- Experimento B-3: [<enlace>](#)
- Experimento B-4: [<enlace>](#)
- Experimento B-5: [<enlace>](#)
- Experimento B-6: [<enlace>](#)

En la Figura 3.3 se resume de manera efectiva la comparación de lo que se evalúa en cada uno de ellos. Para comprobar los datos obtenidos durante las simulaciones, consultar el documento en las páginas 131 y 132 del anexo.




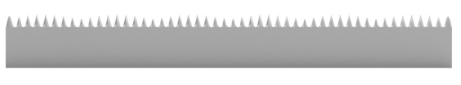
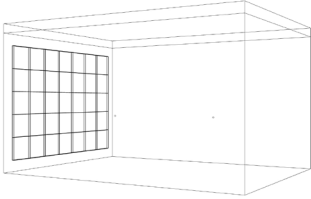
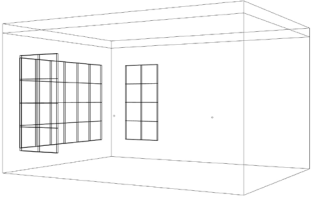
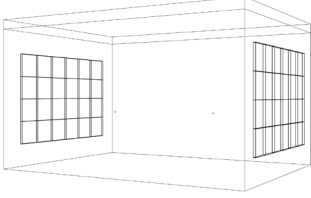
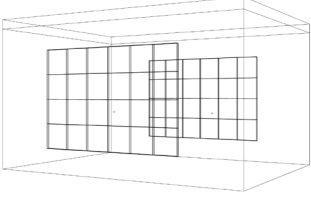
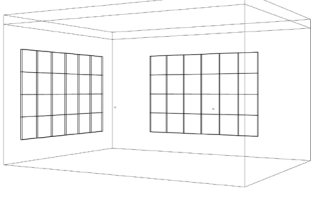
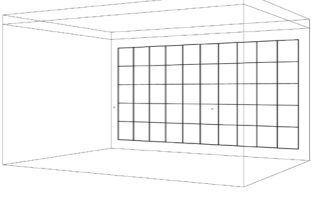
Experimento A	
1 	2 
3 	4 
Experimento B	
1 	2 
3 	4 
5 	6 

Figura 3.3: Tabla resumen de los dos experimentos con sus nomenclaturas.

3.2.1 - EXPERIMENTO A

El primer conjunto de simulaciones emplea los paneles 1, 2, 3 y 4, obtenidos a través del algoritmo de software generativo desarrollado en este proyecto. Se lleva a cabo una simulación inicial en una habitación vacía, para luego cubrir una superficie de pared idéntica al experimento A del estudio previamente mencionado (Fig. 3.4) con los paneles acústicos de 50x50 cm.

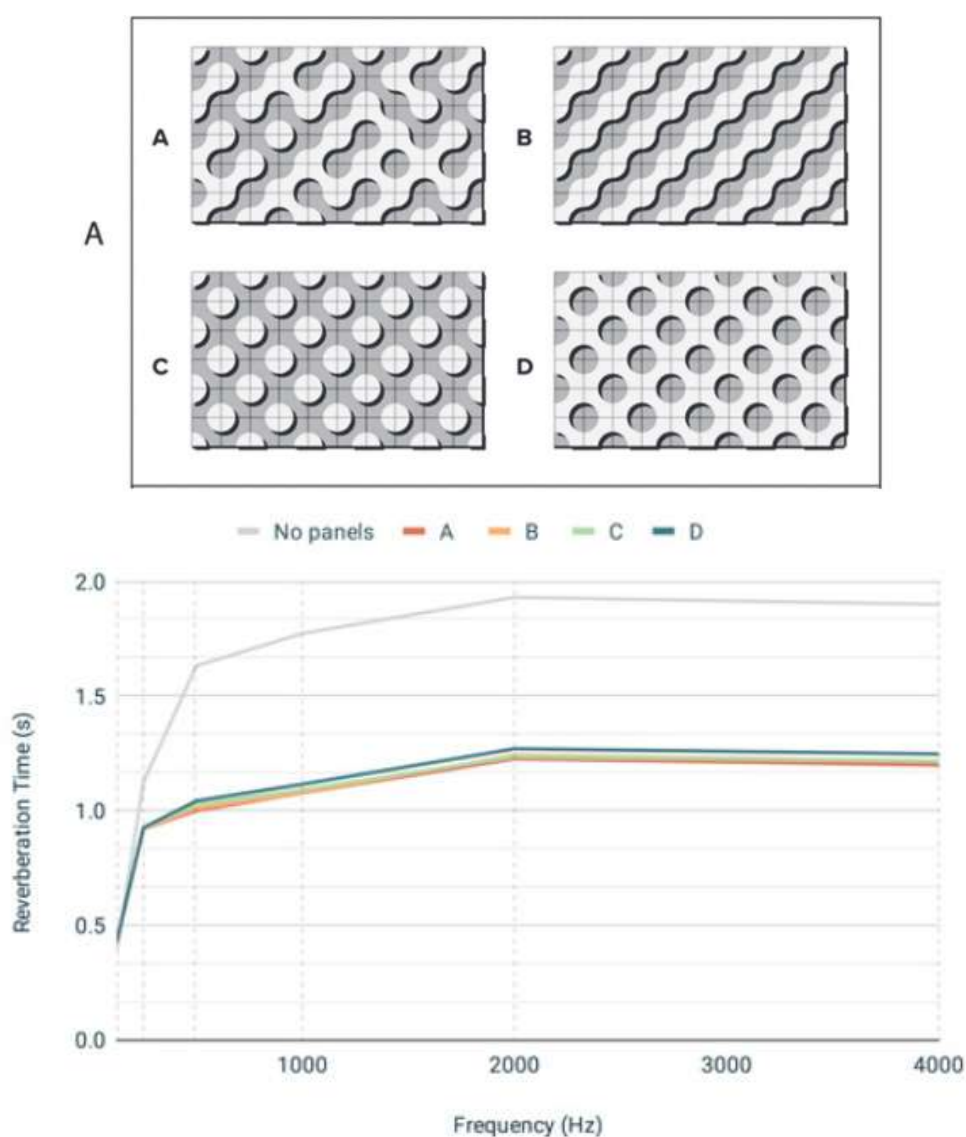


Figura 3.4: Superficie de los paneles y resultados del experimento realizado en la Universidad de Pensilvania.

De esta manera, se obtienen datos sobre cómo la superficie de cada panel influye en la atenuación de la onda sonora. A continuación, se presentan los resultados de cada una de las variables acústicas estudiadas durante el proyecto, con especial énfasis en el tiempo de reverberación, dado su impacto en la calidad acústica del espacio.

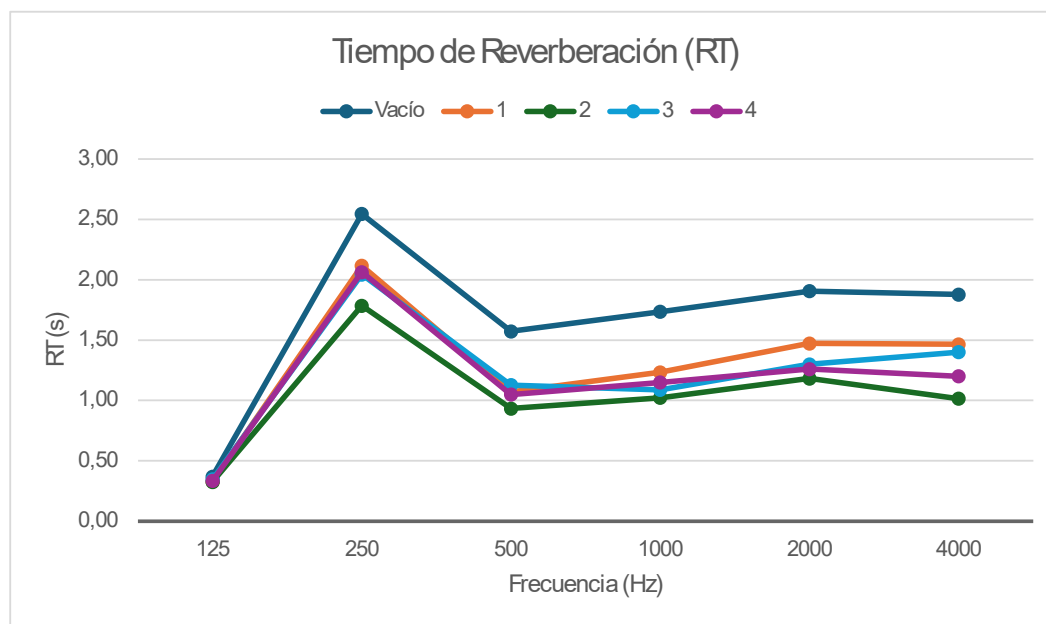


Figura 3.5: Tiempo de reverberación en el experimento A.

Los resultados de la simulación revelan que los materiales basados en compuestos de micelio tienen un impacto positivo en la calidad acústica de la sala. Todos los paneles reducen significativamente el tiempo de reverberación entre las frecuencias de 500 Hz y 4000 Hz, con un promedio de 2,35 segundos (Fig. 3.5). En la gráfica se observan diferencias en el rendimiento de los paneles, siendo más pronunciadas en el intervalo de frecuencias mencionado, destacando el panel 2 como el más eficaz de todos. Sin embargo, la presencia de cualquiera de los paneles contribuye a una reducción notable en el tiempo de reverberación de la sala vacía.

Al analizar las diferencias entre los paneles en la gráfica, se puede concluir que la geometría de la superficie del panel es un factor crucial para la reflexión de la onda sonora y, por lo tanto,

para la disminución del tiempo de reverberación. Los paneles más planos y con valles menos profundos obtienen peores resultados en comparación con aquellos con geometrías más complejas. Los paneles del estudio de la Universidad de Pensilvania muestran resultados muy similares, con diferencias mínimas entre ellos. Sin embargo, el panel 2 presenta un rendimiento superior, especialmente en frecuencias altas (4000 Hz), aunque la diferencia en el tiempo de reverberación es de solo unas décimas de segundo.

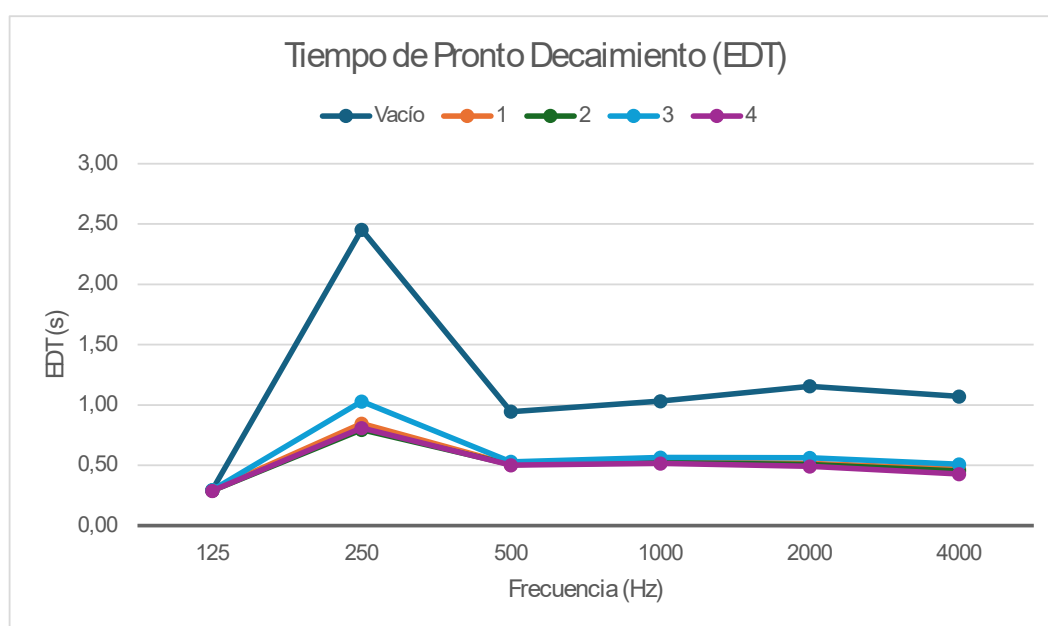


Figura 3.6: Tiempo de pronto decaimiento e el experimento A.

El EDT indica la velocidad con la que el sonido disminuye en 10 dB (Fig. 3.6). Este valor está relacionado con la percepción subjetiva de la reverberación en un espacio. Cuando, como en este caso, los valores del EDT son considerablemente más bajos que el tiempo de reverberación, la música tiende a percibirse como más apagada, mientras que la voz resulta más clara. En comparación con la sala vacía, los valores del EDT para todos los paneles son notablemente bajos, lo que sugiere que la reflexión en la habitación generada por estas barreras es muy alta, al menos en el punto de ubicación del receptor..

La Claridad (C80) se define como el cociente entre la energía sonora recibida durante los primeros 80 ms y la energía total que llega después (Fig. 3.7). Los valores de este parámetro en cada simulación no son significativamente distintos, por lo que la geometría de los paneles no es un factor a tener en cuenta para su optimización, a diferencia de la posición del receptor por ejemplo. Este parámetro acústico mide el grado de separación entre los diferentes sonidos individuales integrantes de una composición musical. Debido a que los valores de C80 superan el límite de 3 dB en todas las frecuencias, la habitación no es apropiada para la reproducir música.

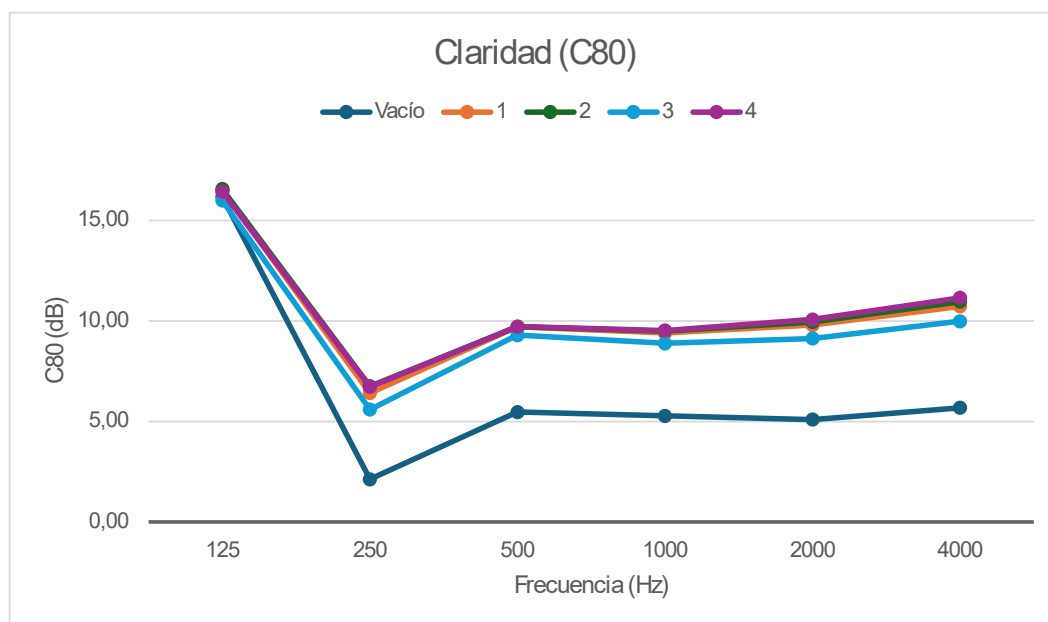


Figura 3.7: Claridad musical en el experimento A.

El parámetro D50 se define como la relación entre la energía que llega al oyente durante los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo y las primeras reflexiones, y la energía total que recibe (Fig. 3.8). Al igual que en el caso del parámetro C80, no se observan variaciones significativas entre los cuatro paneles, aunque todos mejoran los resultados obtenidos en la sala vacía. En todos los casos, se obtienen valores altos de D50 y relativamente bajos

en RT, lo que indica que la concentración de energía sonora en la sala durante las primeras reflexiones, gracias a los paneles, incrementa notablemente la legibilidad del discurso.

Finalmente, es importante destacar que los parámetros D50 y C80 no son estadísticamente independientes, ya que ambos están correlacionados con el tiempo de reverberación, aumentando a medida que este disminuye.

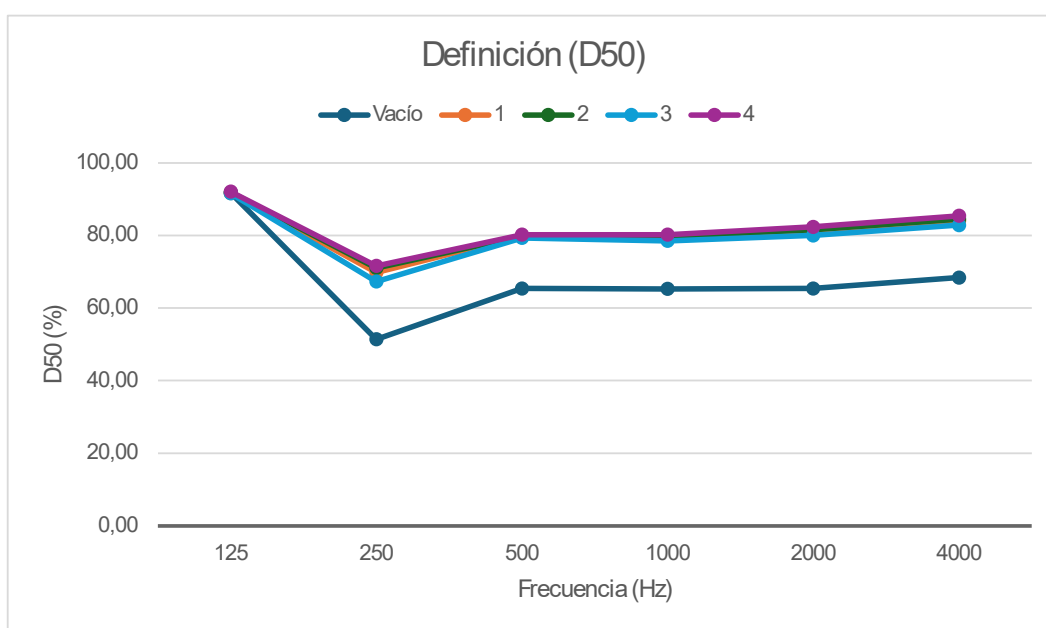


Figura 3.8: Definición de la sala en el experimento A.

3.2.2 - EXPERIMENTO B

El segundo experimento de simulación examina cómo la ubicación de los paneles en la sala influye en el tiempo de reverberación. Para ello, se utiliza el panel 2, que obtuvo los mejores resultados en el experimento A, y se comparan sus propiedades al instalarlo en diferentes posiciones dentro de la habitación. Las ubicaciones de los paneles se han determinado

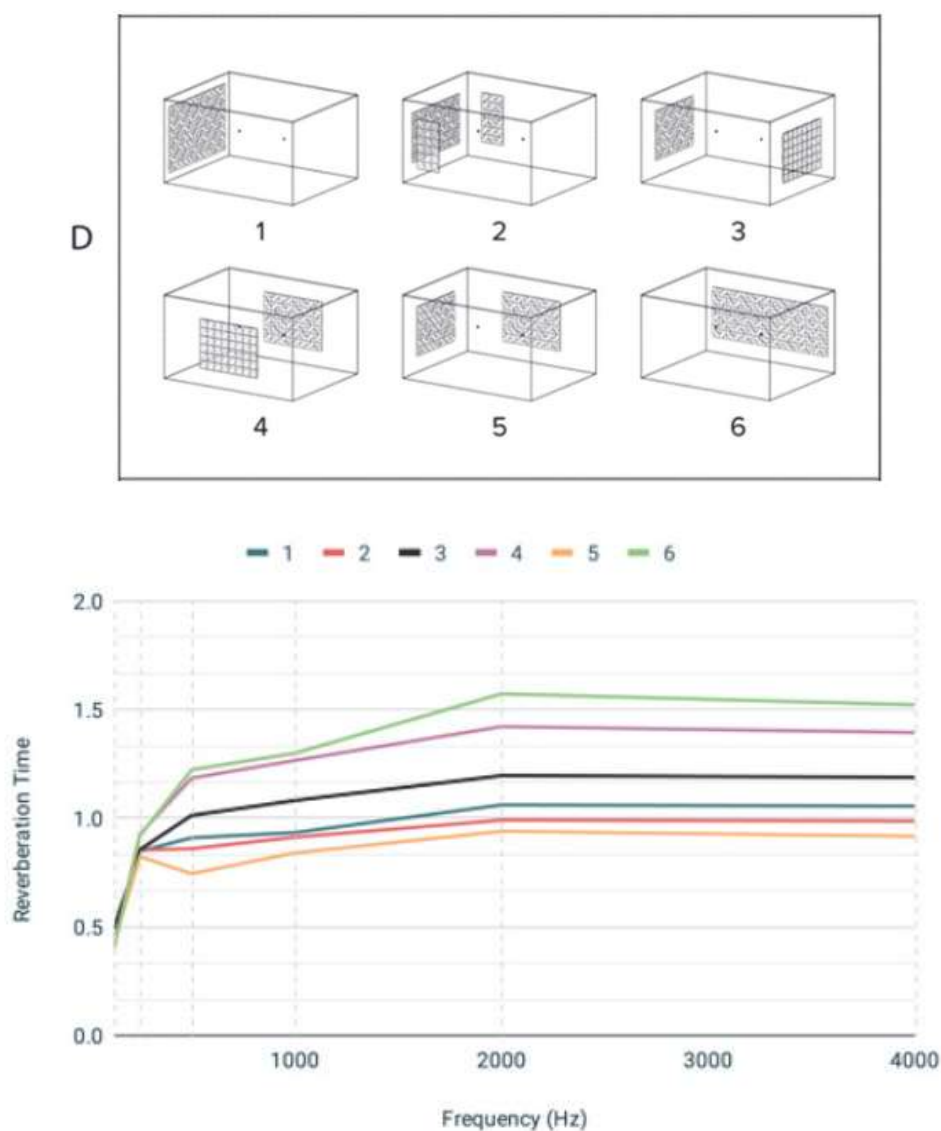


Figura 3.9: Disposición de los paneles y resultados del experimento realizado en la Universidad de Pensilvania.

cubriendo la misma superficie que en el estudio D de la Universidad de Pensilvania (Fig. 3.9), lo que permite realizar una comparación directa de los resultados. La fuente y el receptor de sonido permanecen en las mismas ubicaciones que en el experimento anterior. Las posiciones evaluadas son: (1) en la pared pequeña 35 paneles, (2) en la pared pequeña 24 paneles y 8 en las paredes adyacentes, (3) en las dos paredes pequeñas 24 paneles, (4) en las dos paredes grandes 24 paneles, (5) en la pared pequeña 24 paneles y la misma cantidad en la grande y (6) en la pared grande 50 paneles.

Los resultados muestran que la disposición de los paneles tiene un impacto significativo en el tiempo de reverberación (Fig. 3.10). El escenario 6, en el que los paneles se colocaron en una de las paredes largas, presentó el tiempo de reverberación más largo de media. Por otro lado, el escenario 5, con los paneles ubicados en una pared corta y una larga, obtuvo el tiempo de reverberación más corto. El segundo tiempo de reverberación más corto se logró en el escenario 2, seguido del 1 siendo éste igual al escenario experimento A per con más paneles.

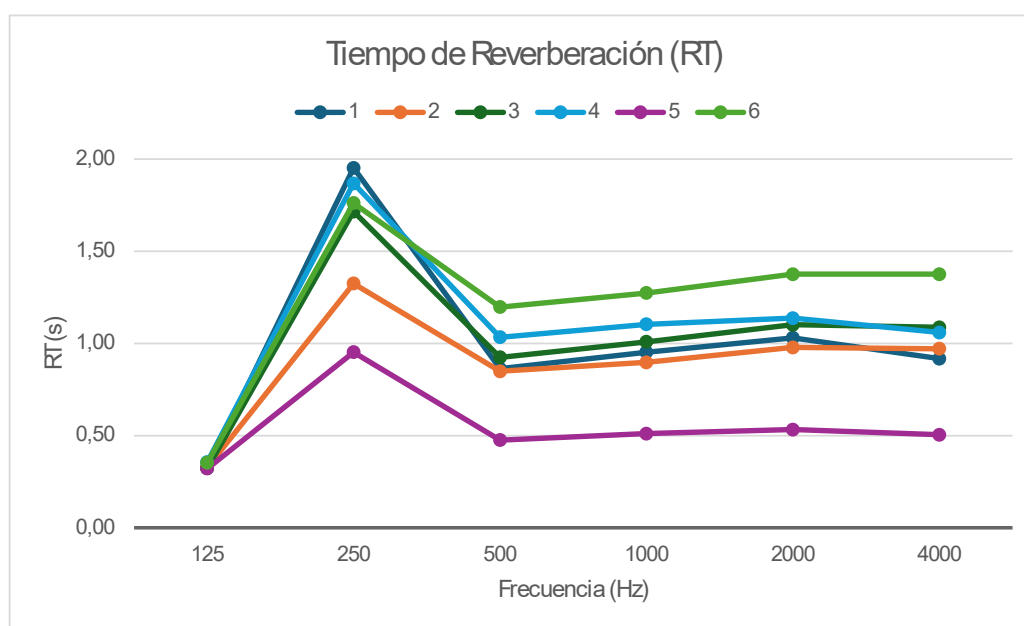


Figura 3.10: Tiempo de reverberación en el experimento B.

Los paneles del estudio de la Universidad de Pensilvania muestran resultados similares, y los escenarios se clasifican de manera comparable (Fig. 3.11). Sin embargo, las simulaciones de este proyecto han mostrado un mayor tiempo de reverberación en las frecuencias bajas, y la diferencia entre los escenarios es algo más pronunciada en todas las frecuencias. A pesar de esto, es importante destacar que el mejor resultado de ambos experimentos, es decir, el panel 2 colocado según la disposición del escenario 5, ha superado los datos obtenidos en el estudio de Pensilvania para el mismo escenario.

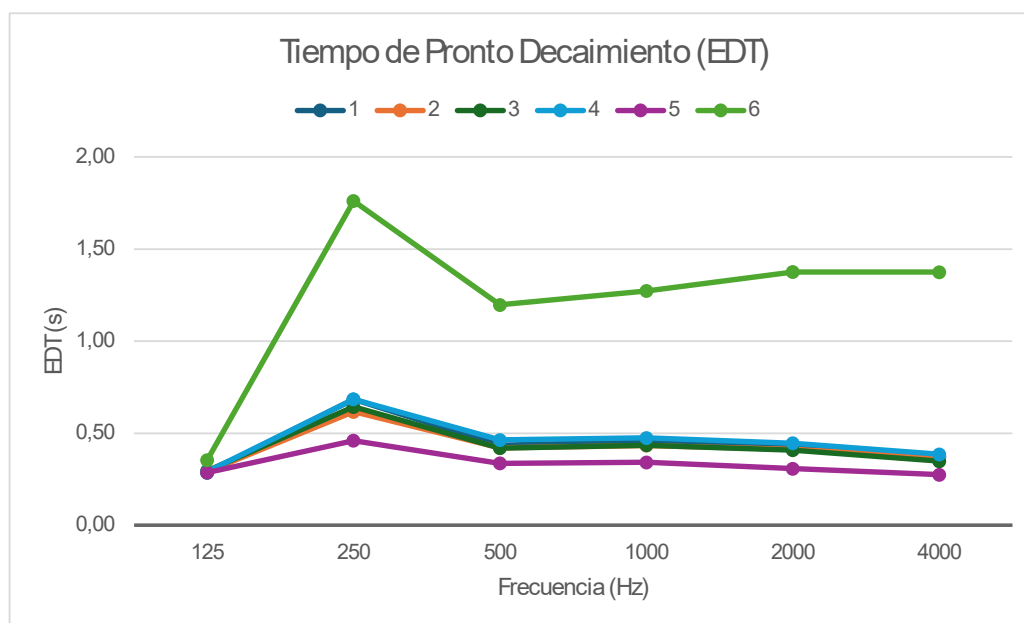


Figura 3.11: Tiempo de reverberación en el experimento B.

El EDT presenta los valores más altos en los escenarios 4 y, especialmente, en el escenario 6, ambos en los que la pared frente a la fuente sonora no tiene ningún panel (Fig. 3.11). Este resultado es coherente, ya que el EDT mide la velocidad con la que la presión sonora disminuye en 10 dB, y la ausencia de barreras en estas ubicaciones influye considerablemente. Los valores de EDT en el resto de los escenarios son similares y están muy alejados de los tiempos de reverberación, lo que indica que ninguna de las seis configuraciones de paneles logra evitar que la habitación sea demasiado apagada para la reproducción de composiciones musicales.

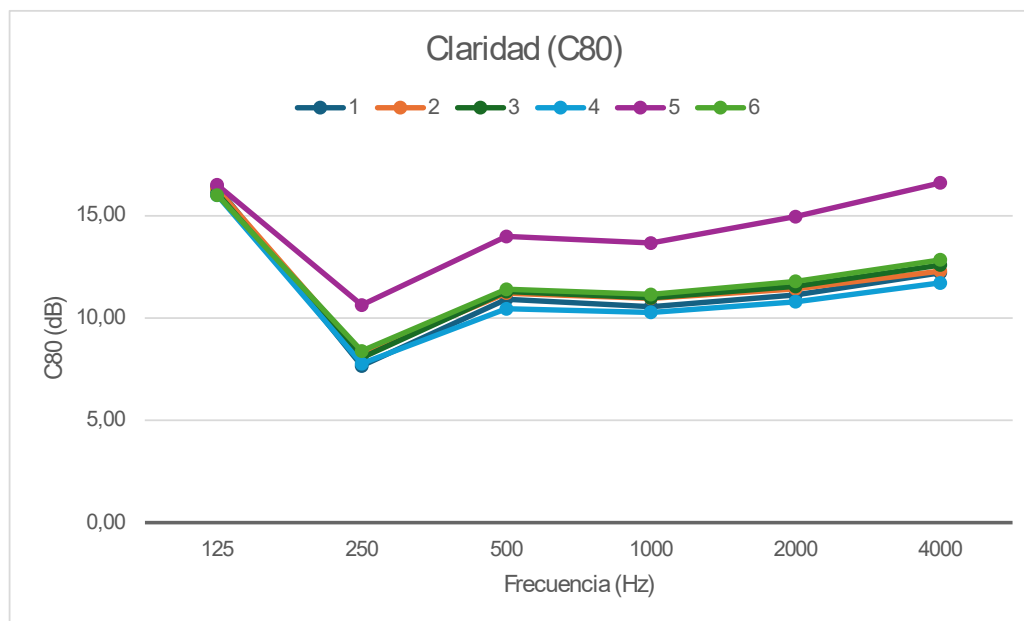


Figura 3.12: Claridad en el experimento B.

En cuanto a la Claridad (Fig. 3.12), los resultados son muy similares a los obtenidos en el experimento A, donde la mayoría de las simulaciones muestran valores bastante consistentes. Esto sugiere que la disposición de los paneles no tiene un impacto significativo. Sin embargo, el escenario 5 sobresale ligeramente sobre los demás, lo que sugiere que ubicar los paneles en paredes adyacentes puede ayudar a concentrar las primeras reflexiones de la onda sonora en la zona donde se encuentra el receptor.

Dado que la Definición (Fig. 3.13) es también un parámetro relacionado con la energía, los resultados son similares a los de la gráfica anterior, sin que ninguno de los escenarios se distinga de manera significativa. Sin embargo, se observa una mejora generalizada respecto a los valores obtenidos en el experimento A, que se realizó con un número menor de paneles y cubriendo una superficie más pequeña. En resumen, se puede concluir que las configuraciones de paneles propuestas resultan apropiadas para espacios como despachos o salas de conferencias, gracias a su eficacia para mejorar la transmisión del discurso.

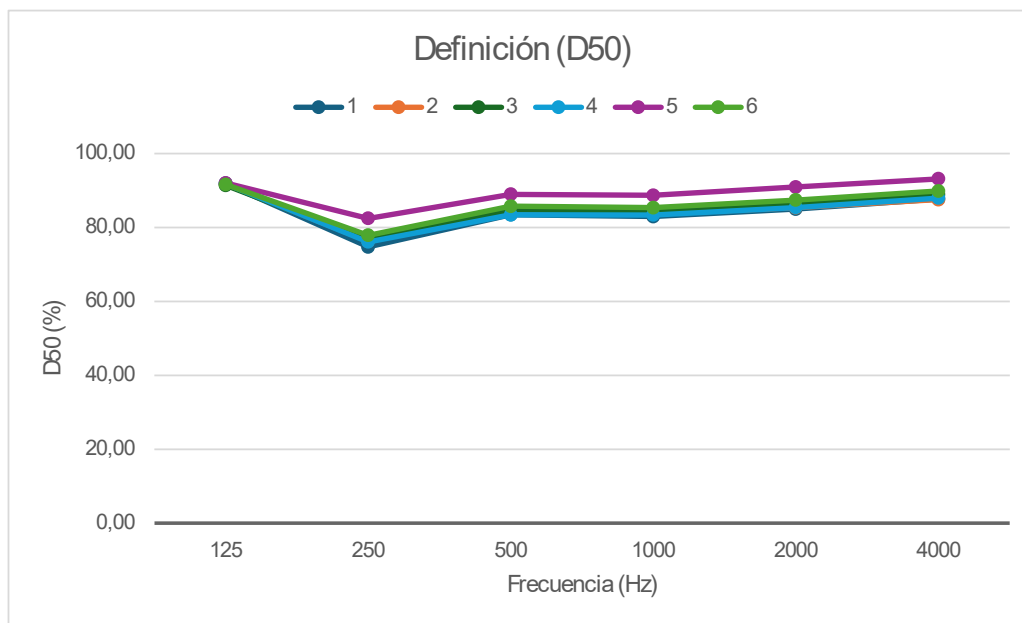


Figura 3.13: Definición en el experimento B.

4

CONCLUSIONES

4.1 - COMENTARIOS FINALES

A lo largo de este proyecto, ha sido sumamente interesante adentrarse en el estudio de la acústica, un campo que, aunque complejo, ofrece grandes oportunidades para la innovación en el diseño de espacios. La investigación sobre la interacción del sonido con distintos materiales y formas ha permitido comprender cómo pequeños ajustes en el diseño pueden influir en la calidad acústica de un entorno.

El uso del diseño generativo, particularmente el diseño paramétrico mediante las herramientas de Rhino y Grasshopper, ha demostrado tener un potencial prácticamente ilimitado. A través de estas herramientas, fue posible explorar diversas formas y configuraciones de paneles acústicos, optimizando su geometría para mejorar el rendimiento sonoro de los espacios. Este enfoque, que combina la creatividad con la capacidad computacional, abre nuevas posibilidades para el desarrollo de soluciones personalizadas en el diseño arquitectónico.







La simulación acústica mediante Pachyderm Acoustics en Rhino ha sido una herramienta clave en este proceso. Gracias a su integración, fue posible evaluar el comportamiento acústico de los paneles y conocer su rendimiento en diferentes escenarios, lo que facilitó la toma de decisiones informadas en cuanto a la disposición y características de los elementos diseñados.

Aunque los resultados obtenidos en las simulaciones son prometedores, cabe destacar que se basan en datos teóricos. Para validar completamente los modelos propuestos, sería necesario avanzar hacia la fabricación de prototipos reales utilizando el material elegido, así como realizar ensayos acústicos para confirmar las propiedades y rendimiento de los paneles en un entorno físico. Esta ampliación del proyecto permitiría verificar la efectividad de las soluciones planteadas y ajustar los diseños en función de resultados empíricos.

En conclusión, este proyecto ha servido como un punto de partida en la exploración de la acústica aplicada al diseño arquitectónico, demostrando el gran potencial de las herramientas digitales y simulaciones para optimizar el rendimiento acústico de los espacios.

4.2 - OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Como cierre de este proyecto, es importante destacar brevemente la relación entre el diseño de paneles propuesto y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Estos objetivos son un conjunto de metas que la sociedad debe esforzarse por alcanzar para lograr un sistema global más sostenible, justo y equitativo. A continuación, se mencionan los ODS específicos que nuestro diseño contribuye a alcanzar, siguiendo la numeración oficial recogida en el documento que establece estos objetivos. Los más relevantes son los siguientes:

	3.9 - Para 2030, reducir sustancialmente el número de muertes y enfermedades producidas por productos químicos peligrosos y la contaminación del aire, el agua y el suelo
	7.a - Investigación y tecnología relativas a la energía limpia, las fuentes renovables, la eficiencia energética y las tecnologías avanzadas y menos contaminantes de combustibles fósiles.
	9.5 - Aumentar la investigación científica y mejorar la capacidad tecnológica de los sectores industriales de todos los países, en particular los países en desarrollo.
	11.b - Adoptar e implementar políticas y planes integrados para promover la inclusión, el uso eficiente de los recursos, la mitigación del cambio climático.
	12.2- Lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales.
	17- Conjunto de metas relativas al Desarrollo Sostenible.

5

BIBLIOGRAFÍA

1.1 - FUNDAMENTOS DEL SONIDO

- Jaramillo, A. M. J. (2007). Acústica: la ciencia del sonido. Itm.
- Merino de la Fuente, J. M., & Muñoz-Repiso, L. (2013). La percepción acústica: Física de la audición. *Revista de ciencias*, (2), 19-26.
- Beléndez, A. (1992). Acústica, fluidos y termodinámica. *Fundamentos Físicos de la Ingeniería*.
- Levitin, D. J. (2006). *This is your Brain on Music. The Science of a Human Obsession*, ed.

1.2 - ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA

- Ramshankar, P., Sukumar, B., Kumar, S. K., Karan, V., & Karthick, C. (2021, November). Experimental Investigation on Sound Absorption Property of a Panel Board Using Maize Stem. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2070, No. 1, p. 012219). IOP Publishing.
- Simion, P. E. S., Găman, A. N., Simion, A., & Hriscan, R. (2022). NOISE LEVEL REDUCTION BY USING SOUND INSULATION/SOUND ABSORBENT MATERIALS. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*, 22(4.1), 341-348.
- Chang, H., & Wang, Y. (2017). Market analysis of soundproof and noise reduction plate. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 100, p. 05021). EDP Sciences.
- Kulakov, K., Romanovich, M., Vasileva, I., & Pertceva, A. (2019). Technical and economic comparison of soundproof wall panels. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 91, p. 02027). EDP Sciences.
- Manzetti, M. C. (2023). Combining 3D Visibility Analysis and Virtual Acoustics Analysis for the Architectural Study of Ancient Theatres. In *Capturing the Senses: Digital Methods for Sensory Archaeologies* (pp. 105-125). Cham: Springer International Publishing.
- Normativa UNE-EN_ISO_3382-2:2008." Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios".

- Spagnolo, R. (Ed.). (2001). *Manuale di acustica applicata*. UTET libreria.

1.3 - DISEÑO ASISTIDO POR ORDENADOR: DEFINICIONES

- Caetano, I., Santos, L., & Leitão, A. (2020). Computational design in architecture: Defining parametric, generative, and algorithmic design. *Frontiers of Architectural Research*, 9(2), 287-300.
- Krish, S. (2011). A practical generative design method. *Computer-Aided Design*, 43(1), 88-100.
- Miller, N. (2011). The Hangzhou tennis center: a case study in integrated parametric design. *ACADIA Regional 2011: Parametricism:(SPC)*, 141-148.
- Amundarain, A. L., Somonte, M. D., & Escudero, M. D. M. E. (2021). El diseño paramétrico como herramienta creativa en diseño de producto. *Técnica industrial*, 329, 32-41.
- Monks, M., Oh, B. M., & Dorsey, J. (2000). Audiooptimization: goal-based acoustic design. *IEEE computer graphics and applications*, 20(3), 76-90.
- Uludüz, Ç., & Aydın, Ç. (2022). Machine as the designer of generative solutions in chair design. *Journal of Computational Design*, 3(1), 81-104.
- Jordahn, S. (2019, April 11). Philippe Starck, Kartell and Autodesk unveil "world's first production chair designed with artificial intelligence". Dezeen.
- Burry, M. (1996). Parametric design and the Sagrada Familia. *Arq: Architectural Research Quarterly*, 1(4), 70-81.
- Hernandez, C. R. B. (2006). Thinking parametric design: introducing parametric Gaudi. *Design Studies*, 27(3), 309-324.
- Herr, C. M., Gu, N., Roudavski, S., & Schnabel, M. A. (2011). The flexibility of logic programming.
- Scelo, T. (2015). Integration of acoustics in parametric architectural design. *Acoustics Australia*, 43(1), 59-67.

-
- Peters, B., Nguyen, J., & Omar, R. (2021). Parametric acoustics: design techniques that integrate modelling and simulation. In Proceedings of Euronoise Congress.

3 - RESULTADOS DEL PROCESO GENERATIVO

- Walter, N., & Gürsoy, B. (2023). Simulating Acoustic Performance of Mycelium-Based Sound Absorption Panels. In 41st Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe, eCAADe 2023 (pp. 277-286). Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe.
- Alfianti, D. A., Basworo, M. T., Prajitno, G., & Indrawati, S. (2019, February). Evaluation of stage acoustic parameters of Grha Sepuluh Nopember room. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1153, No. 1, p. 012006). IOP Publishing.