

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Tratamiento acústico en ambientes interiores de edificaciones  
mediante paneles de micelio de hongo**

Trabajo de graduación presentado por Miguel Eduardo Sazo Valdez para  
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil Arquitectónica

Guatemala,

2023



**Tratamiento acústico en ambientes interiores de edificaciones  
mediante paneles de micelio de hongo**

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería




**Tratamiento acústico en ambientes interiores de edificaciones  
mediante paneles de micelio de hongo**

Trabajo de graduación presentado por Miguel Eduardo Sazo Valdez para  
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil Arquitectónica


Guatemala,

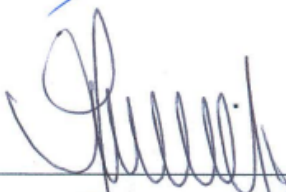
2023


Vo. Bo. :

(f)   
\_\_\_\_\_  
(Ing. Andrés Bernhard)

Tribunal Examinador:

(f)   
\_\_\_\_\_  
(Ing. Andrés Bernhard)

(f)   
\_\_\_\_\_  
(Arq. Jennifer Morataya)

(f)   
\_\_\_\_\_  
(Ing. Roberto Godo)

Fecha de aprobación: Guatemala, viernes 22 de junio 2023

## PREFACIO

En el transcurso del segundo semestre de cuarto año de la carrera de ingeniería civil arquitectónica, se recibió el curso de acústica. Los temas despertaron mucha curiosidad en especial el tema de tratamiento acústico, ya que muchas personas tienden a confundir el tratamiento acústico con el aislamiento acústico. El tratamiento acústico busca mejorar la calidad del sonido dentro de un recinto, no evitar el paso del sonido de una habitación a otra, que es lo que muchas personas piensan al escuchar la palabra “acústica”.

Dentro de los contenidos del curso se aprendió en cuanto a los materiales absorbentes los cuales tienen la peculiaridad de ser materiales conformados por estructuras de entramados, donde existen cavidades, lo que los hace materiales porosos. Estos materiales porosos permiten absorber parte de la energía de las ondas de sonido al momento en que estas inciden con el material, haciendo que la onda reflejada sea más débil que la incidente.

Semanas antes de recibir el tema en la universidad, se conversó con un amigo en cuanto a la estructura de los hongos, dicho amigo comentó que los hongos estaban conformados por estructuras llamadas micelio, el cual estaba conformado por filamentos llamados hifas. Al momento de escuchar las características de los materiales absorbentes en la clase, se hizo la relación con la estructura de los hongos, por lo que se tomó la decisión de utilizarlo como tema de investigación para la tesis.

En Guatemala se tiene la limitación que se desconoce mucho en cuanto a la importancia que realmente tiene el control acústico, ya sea para el tratamiento de recintos o aislamiento, por lo que existen pocos expertos dentro del país solucionando requerimientos especializados. Debido a que en Guatemala no se cuenta con leyes que regulen el control acústico en edificaciones, no se cuentan con laboratorios especializados, centros de investigación de materiales acústicos, cámaras reverberantes, cámaras anecoicas, entre otros. Debido a estas limitaciones se recurrió a investigar otros métodos para poder realizar las mediciones requeridas para la tesis con los recursos disponibles.

Andrés Bernhard, graduado de un maestría en acústica en la Universidad Politécnica de Valencia, propició el equipo, conocimientos y apoyo para el desarrollo de los temas tratados en la presente tesis.

# CONTENIDO

	Página
<b>PREFACIO</b> . . . . .	<b>III</b>
<b>LISTA DE CUADROS</b> . . . . .	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE GRÁFICOS</b> . . . . .	<b>X</b>
<b>RESUMEN</b> . . . . .	<b>XII</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> . . . . .	<b>1</b>
<b>II. OBJETIVOS</b> . . . . .	<b>2</b>
A    Objetivo general . . . . .	2
B    Objetivos específicos . . . . .	2
<b>III. MARCO TEÓRICO</b> . . . . .	<b>3</b>
A    Acústica . . . . .	3
B    Sonido . . . . .	3
1    Ondas de sonido . . . . .	4
2    Atributos característicos de las ondas . . . . .	4
3    Proceso de audición de sonido . . . . .	7
C    Ruido . . . . .	7
D    Acústica en edificaciones . . . . .	8
1    Acondicionamiento acústico . . . . .	8
2    Aislamiento acústico . . . . .	9
3    Materiales acústicos en edificaciones . . . . .	10
E    Afecciones provocadas por fenómenos acústicos . . . . .	11
F    Fenomenología de la propagación del sonido en una sala . . . . .	12
1    Reflexión . . . . .	12
2    Refracción . . . . .	13
3    Sombras de sonido . . . . .	14
4    Difracción . . . . .	14
5    Absorción . . . . .	15
G    Reverberación . . . . .	16
H    Teorías para el estudio de acústica en recintos . . . . .	17
1    Teoría estadística . . . . .	17
2    Teoría geométrica . . . . .	19
3    Teoría ondulatoria . . . . .	20
I    Materiales y dispositivos utilizados para el tratamiento acústico . . . . .	21
1    Materiales absorbentes . . . . .	21
2    Resonadores . . . . .	22

3	Difusores . . . . .	26
J	Paneles acústicos . . . . .	29
<b>IV.</b>	<b>METODOLOGÍA . . . . .</b>	<b>31</b>
A	Recopilación de información preliminar . . . . .	31
B	Iteraciones fallidas . . . . .	32
1	Iteración No. 1 . . . . .	32
2	Iteración No. 2 . . . . .	34
3	Iteración No. 3 . . . . .	36
C	Iteración exitosa . . . . .	38
D	Ensamblaje . . . . .	41
E	Mediciones . . . . .	42
<b>V.</b>	<b>CÁLCULOS . . . . .</b>	<b>48</b>
A	Cálculo de tiempo de reverberación teórico en CIT 421 sin tratamiento acústico . . . . .	48
1	Conversión de resultados de tiempos de reverberación en banda de tercios de octava a banda de octavas de medición con sonómetro en CIT 421 sin tratamiento acústico . . . . .	48
2	Coefficientes de absorción de materiales de construcción del salón CIT 421 . . . . .	50
3	Áreas por elemento y material del salón CIT 421, sin tratamiento acústico . . . . .	50
4	Cálculo de volumen del recinto . . . . .	51
5	Área de absorción equivalente del recinto para frecuencias en bandas de octava, sin tratamiento acústico . . . . .	52
6	Tiempo de reverberación por frecuencias en bandas de octava . . . . .	53
B	Despeje del coeficiente de absorción acústica para cada frecuencia en bandas de octava partiendo de la fórmula de Sabine . . . . .	55
C	Cálculo de tiempo de reverberación teórico en salón CIT 421 con tratamiento acústico . . . . .	55
1	Conversión de resultados de tiempos de reverberación en bandas de tercios de octava a banda de octavas de medición con sonómetro en CIT 421 con tratamiento acústico . . . . .	55
2	Áreas por elemento y material del salón CIT 421, con tratamiento acústico . . . . .	57
3	Área de absorción equivalente del recinto para frecuencias en bandas de octava, con tratamiento acústico . . . . .	58
4	Cálculo de coeficientes de absorción de los paneles de micelio de hongo ostra para frecuencias en octavas . . . . .	60
D	Cálculo de costo total de manufactura de paneles de micelio de hongo . . . . .	62
1	Cálculo de costo total de inversión a depreciar para fabricación de paneles de micelio de hongo ostra . . . . .	62
2	Cálculo de depreciación por $m^2$ de paneles de micelio de hongo ostra . . . . .	63
3	Cálculo de depreciación por $m^2$ de plancha de micelio de hongo ostra de 7.5 cm de espesor . . . . .	63
4	Cálculo de gastos variables para fabricación de paneles de micelio de hongo ostra . . . . .	63

5	Cálculo de gastos variables por $m^2$ de panel de micelio de hongo ostra . . .	64
6	Cálculo de gastos variables para fabricación de planchas de micelio de hongo ostra . . . . .	64
7	Cálculo de gastos variables por $m^2$ de plancha de micelio de hongo ostra . .	64
8	Cálculo total costo de panel de micelio de hongo por $m^2$ . . . . .	64
9	Cálculo total costo de plancha de micelio de hongo por $m^2$ . . . . .	65
<b>VI.</b>	<b>RESULTADOS . . . . .</b>	<b>66</b>
A	Resultados de mediciones in situ de tiempos de reverberación en salón CIT 421 . .	66
1	Tiempo de reverberación global resultante RT60 . . . . .	66
2	Tiempo de reverberación resultante RT20 . . . . .	68
3	Tiempo de reverberación resultante RT30 . . . . .	71
4	Tiempo de reverberación global resultante RT60 convertido a banda de octava	74
B	Resultados de coeficientes de absorción acústica de panel de micelio de hongo Pleorotus Ostreatus . . . . .	74
C	Costo por $m^2$ de panel acústico de micelio de hongo Pleorotus Ostreatus . . . . .	76
D	Costo por $m^2$ de plancha de micelio de hongo Pleorotus Ostreatus . . . . .	76
<b>VII.</b>	<b>CONCLUSIONES . . . . .</b>	<b>78</b>
<b>VIII.</b>	<b>RECOMENDACIONES . . . . .</b>	<b>79</b>
<b>IX.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA . . . . .</b>	<b>80</b>

## LISTA DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Tiempos de reverberación en CIT 421 sin tratamiento acústico medido con sonómetro Larson Davies, expresado en banda de tercios de octava . . . . .	48
2	Coeficientes de absorción acústica para frecuencias en bandas de octava para los materiales constructivos del CIT 421 . . . . .	50
3	Áreas de elementos del cerramiento agrupados por material y forma, en salón CIT 421 sin tratamiento acústico . . . . .	51
4	Producto entre las áreas de elementos del cerramiento y los coeficientes de absorción acústica de cada uno de los materiales de los elementos para cada octava . . .	52
5	Tiempos de reverberación en CIT 421 con tratamiento acústico medido con sonómetro Larson Davies, expresado en bandas de tercios de octava . . . . .	56
6	Áreas de elementos del cerramiento agrupados por material y forma, en salón CIT 421 con tratamiento acústico . . . . .	58
7	Producto entre las áreas de elementos del cerramiento y los coeficientes de absorción acústica de cada uno de los materiales de los elementos para cada octava de recinto con tratamiento acústico . . . . .	59
8	Modificación de coeficientes de absorción acústica en bandas de octava de paneles de micelio de hongo ostra para suavización de desviación de la curva . . . . .	62
9	Cálculo de inversión total a depreciar cada 5 años . . . . .	63
10	Cálculo de gastos variables totales para la fabricación de 4 paneles de micelio de hongo . . . . .	64
11	Cálculo de gastos variables totales para la fabricación de 4 planchas de micelio de hongo de 7.5 cm de espesor . . . . .	64
12	Tiempos de reverberación en CIT 421 sin tratamiento acústico medido con sonómetro Larson Davies, expresado en banda de tercios de octava . . . . .	66
13	Tiempos de reverberación en CIT 421 con tratamiento acústico medido con sonómetro Larson Davies, expresado en bandas de tercios de octava . . . . .	67
14	RT20 en CIT 421 sin tratamiento acústico medido con sonómetro Larson Davies, expresado en bandas de tercios de octava . . . . .	68
15	RT20 en CIT 421 con tratamiento acústico medido con sonómetro Larson Davies, expresado en bandas de tercios de octava . . . . .	69
16	RT30 en CIT 421 sin tratamiento acústico medido con sonómetro Larson Davies, expresado en bandas de tercios de octava . . . . .	71
17	RT30 en CIT 421 con tratamiento acústico medido con sonómetro Larson Davies, expresado en bandas de tercios de octava . . . . .	72
18	RT60 en CIT 421 sin tratamiento acústico medido con sonómetro Larson Davies, expresado en banda de octava . . . . .	74
19	RT60 en CIT 421 con tratamiento acústico medido con sonómetro Larson Davies, expresado en banda de octava . . . . .	74

20	Coeficientes de absorción de panel acústico de micelio de hongo ostra de 7.5 cm de espesor en banda de octava . . . . .	75
21	Coeficientes de absorción de panel acústico ROCKWOOL ROCKBOARD 40 de 3 in de espesor en banda de octava . . . . .	75
22	Caracterización de coeficientes de absorción acústica . . . . .	76

## LISTA DE GRÁFICOS

Ilustración		Página
1	Comportamiento de una onda sonora al sufrir reflexión debido al choque con una superficie incidente . . . . .	12
2	Ejemplificación gráfica de refracción de ondas sonoras ante distintas condiciones de medio de propagación. . . . .	13
3	Esquematación de fenómeno "sombra de sonido" . . . . .	14
4	Casos de difracción de ondas sonoras a través de rendijas de distintas características	15
5	Comportamiento de las ondas sonoras al colisionar con una superficie absorbente, ejemplificado mediante el modelo simplificado de ondas . . . . .	16
6	Esquema básico de un resonador de membrana o diafragmático . . . . .	23
7	Esquema básico de un resonador de cavidad simple de Helmholtz montado en una pared . . . . .	25
8	Esquema básico de un resonador de cavidad múltiple de Helmholtz a base de paneles perforados . . . . .	25
9	Esquema básico de un resonador de cavidad múltiple de Helmholtz a base de listones	26
10	Difusor policilíndrico . . . . .	27
11	Difusor "Maximum Length Sequence"(MLS) . . . . .	28
12	Difusor QRD de madera . . . . .	28
13	Difusor "primitive root diffusor"(PRD) . . . . .	29
14	Paquete de micelio primario sobre sorgo . . . . .	33
15	Crecimiento de hifas fuera de la bolsa formando una estructura coralina . . . . .	34
16	Moldes plásticos recubiertos con aluminio . . . . .	34
17	Proceso de esterilización mediante agua hirviendo del sustrato nutritivo para la eliminación de bacterias y microorganismos no deseados . . . . .	35
18	Moldes plásticos rellenos de heno, sorgo y micelio primario . . . . .	35
19	Desecho de intento de generación de panel acústico con heno y micelio primario .	36
20	Sembrado de sorgo con micelio primario en sustrato de algodón luego de tres semanas . . . . .	37
21	Micelio en etapa de incubación cubriendo el sustrato de algodón . . . . .	38
22	Algodón hervido con el fin de esterilizarlo y evitar la aparición de contaminantes indeseados en el cultivo . . . . .	39
23	Sorgo con micelio primario espolvoreado sobre y dentro de las capas de sustrato . .	39
24	Moldes plásticos con el cultivo de hongo envueltos en bolsa plástica . . . . .	40
25	Cultivo de hongo Pleurotus ostreatus posterior a tres días de siembra sobre sustrato de algodón . . . . .	40
26	Cultivo de hongo Pleurotus ostreatus luego de dos semanas de haber sido sembrado sobre sustrato de algodón . . . . .	41
27	Bastidor de plywood para panel acústico de micelio de hongo ostra . . . . .	41
28	Bastidor de playwood con relleno de 7 cm micelio de hongo ostra . . . . .	42

29	Secciones, vista en planta y de techo reflejado de CIT 421 . . . . .	43
30	Sonómetro marca Larson Davies Clase 1, utilizado para las mediciones de tiempos de reverberación de frecuencias en tercios de octava . . . . .	43
31	Amplificador marca Larson Davis utilizado para emisión de ruido rosa para mediciones de tiempo de reverberación . . . . .	44
32	Bocina dodecaédrica marca Larson Davis utilizada para la generación del campo difuso para la medición de tiempo de reverberación . . . . .	44
33	Primeras seis mediciones de tiempo de reverberación en CIT 421 sin tratamiento acústico . . . . .	45
34	Segundo grupo de seis mediciones de tiempo de reverberación en CIT 421 sin tratamiento acústico . . . . .	46
35	Primer grupo de seis mediciones de tiempo de reverberación en CIT 421 con tratamiento acústico . . . . .	46
36	Segundo grupo de seis mediciones de tiempo de reverberación en CIT 421 con tratamiento acústico . . . . .	47
37	Curvas de comportamiento de tiempo de reverberación de CIT 421 utilizando paneles de micelio de hongo ostra como tratamiento acústico, real Vs. coeficientes de absorción modificados . . . . .	62
38	Curvas comparativas de comportamiento de tiempo de reverberación de CIT 421 con tratamiento acústico con paneles de micelio de hongo ostra y sin tratamiento acústico. Generado por sonómetro Larson Davies . . . . .	67
39	Curvas comparativas de comportamiento de RT20 en CIT 421 con tratamiento acústico mediante paneles de micelio de hongo, y sin tratamiento acústico. Generado por sonómetro Larson Davies . . . . .	69
40	Calidad de mediciones de RT20 para CIT 421 sin tratamiento acústico . . . . .	70
41	Calidad de mediciones de RT20 para CIT 421 con tratamiento acústico . . . . .	70
42	Curvas comparativas de comportamiento de RT30 en CIT 421 con tratamiento acústico mediante paneles de micelio de hongo, y sin tratamiento acústico. Generado por sonómetro Larson Davies . . . . .	72
43	Calidad de mediciones de RT30 para CIT 421 sin tratamiento acústico . . . . .	73
44	Calidad de mediciones de RT30 para CIT 421 con tratamiento acústico . . . . .	73

## RESUMEN

En universidades, colegios, casas, teatros, estudios de grabación, oficinas, auditorios, cines, entre otros, se busca que una de las características principales de dichos recintos sea el confort, y parte importante del confort se logra mediante buenas cualidades acústicas.

Las ondas de sonido dentro de recintos construidos principalmente por concreto, acero, vidrio, azulejo, si no se controla apropiadamente, pueden presentar reverberación, lo que puede generar molestias en los ocupantes de un recinto, provocando efectos secundarios como dolores de cabeza, falta de atención, falta de calidad sonora, sensación de presencia de ruido, interferencia conversacional, entre otros. (Kaamin, 2017)

La opción más utilizada actualmente para el tratamiento acústico de recintos es a través de paneles acústicos realizados a partir de polímeros y resinas, existen diversos tipos y cada uno tiene sus ventajas y desventajas, dentro de las ventajas podemos encontrar, por ejemplo, la reutilización de las fibras tales como la lana de roca y fibra de vidrio para la generación de nuevas planchas de lana de roca y fibra de vidrio respectivamente, sin embargo materiales como el fieltro o poliuretano no tienen dichas ventajas. Tanto las fibras de vidrio como la lana mineral, poliuretano, entre otros, son materiales no orgánicos, lo que les da la ventaja de que tienen vidas útiles longevas. Otro punto positivo de la lana de roca y fibra de vidrio es su buen desempeño de absorción acústica. Dentro de los puntos negativos podemos encontrar que la degradación de algunos de los tipos de soluciones actuales es muy lenta y compleja posterior a ser desechados. Al ser empleadas máquinas para la elaboración de los materiales porosos tales como la lana de roca, poliuretano, fieltro, fibra de vidrio, entre otros, genera emisión de CO<sub>2</sub> en su proceso de fabricación. Un punto negativo de la fibra de vidrio, especialmente la de baja densidad, es el hecho de que puede generar enfermedades como la silicosis. En el caso de la lana de roca puede generarse neumoconiosis si las personas presentan una exposición prolongada si el material se encuentra sin ningún tipo de barrera mecánica.

La alternativa propuesta es mediante el uso de estructuras naturalmente porosas formadas por hifas, las cuales conforman el micelio del hongo. El micelio es la estructura que sostiene a los hongos y a diferencia de la madera procedente de los árboles es de rápido crecimiento, requiere menor espacio para desarrollarse y menor cantidad de agua. Los paneles de micelio pueden ser producidos de manera sostenible, son amigables con el medio ambiente, y además se degradan fácilmente después de su desecho. Presentan la desventaja que al estar constituidos por una estructura orgánica, son alimento para otros organismos, por lo que el requerimiento del tratamiento del micelio se vuelve un factor importante, al igual que la madera debe ser tratada para ser utilizada en la construcción, el micelio del hongo debe de ser tratado para presentar una mayor vida útil. (Peiffer, 2019)

Se buscó conocer más en cuanto a las características de crecimiento, tipos de hongos, comportamiento, propiedades para identificar la mejor categoría para la fabricación de paneles acústicos, resaltando por encima del resto, los hongos filamentosos. Se identificó la especie *Pleurotus Ostratus* como una buena opción, debido a que es un hongo, que carece de toxinas, es de rápido crecimiento, se cultiva en Guatemala e incluso es comestible. (Adamatzky, 2018)

Se generaron tres iteraciones que resultaron fallidas, sin embargo propiciaron los conocimientos para poder generar una cuarta iteración, la cual fue exitosa. Se generó una técnica para el crecimiento de hongo ostra que permitió un cultivo puro, estable y de rápido crecimiento, además de que no se generó la fructificación, lo cual hubiera dificultado la generación de las planchas para ser colocadas dentro de los bastidores de los paneles acústicos. Se desarrolló un método de inhibición del crecimiento del hongo, permitiendo que el la proliferación y liberación de esporas no fuera un problema.

Los paneles de micelio de hongo *Pleurotus Ostreatus* presentaron un desempeño adecuado en las pruebas de tiempos de reverberación dentro del salón del CIT 421, provocando una reducción de 4.3 segundos a 2.5 segundos para la frecuencia crítica del recinto de 500 Hz, representando una reducción del 41.86 % del tiempo de reverberación.

## I. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia se ha reconocido la importancia de la calidad acústica de los recintos. En la antigua Roma se generaron los anfiteatros, los cuales eran estructuras que buscaban que todos los receptores pudieran escuchar de forma adecuada los mensajes del emisor. Las iglesias antiguas buscaban generar cierto nivel de reverberación con el fin de generar una atmósfera sacra.

En la actualidad el aumento en el uso de acero, concreto, vidrio y aluminio ha generado un aumento en recintos donde los niveles de reverberación son superiores a lo deseado, generando afecciones tales como dolores de cabeza, pérdida de inteligibilidad, pérdida de atención, etc. Lo cual no es aceptable para ciertos espacios tales como: iglesias, teatros, salones de clase, oficinas, salas de reuniones, etc.

En la presente tesis se buscó analizar los efectos y comportamientos, de paneles acústicos generados con micelio de hongo *Pleorotus Ostreatus*, relacionados con la absorción de ondas sonoras en recintos arquitectónicos.

Se fabricaron los paneles de micelio de hongo ostra para realizar mediciones de tiempos de reverberación. Se escogió el salón del CIT 421 para realizar las mediciones debido a que era un salón pequeño con altos niveles de reverberación. Se utilizó una bocina dodecaédrica para energizar el salón y se procedió a medir el tiempo de reverberación con sonómetro sin paneles de micelio de hongo.

Se observó que la frecuencia crítica para el salón del CIT 421 sin tratamiento acústico fue la frecuencia de 500 Hz, la cual tardó 4.3 segundos en presentar una reducción de 60 dB, sin embargo la frecuencia crítica para el salón del CIT 421 utilizando los paneles de micelio de hongo fue 250 Hz, la cual tardó 2.69 segundos en presentar una reducción de 60 dB lo que fue un 37.44 % de diferencia en el tiempo de las frecuencias críticas.

Se logró calcular exitosamente, de manera referencial, los coeficientes de absorción acústica en bandas de octava para los paneles de micelio de hongo ostra de 7.5 cm de espesor y  $15.26 \text{ kg/m}^3$  de densidad, obteniendo para la frecuencia de 125 Hz un  $\alpha$  de 1.00, para 250 Hz un  $\alpha$  de 0.70 (siendo este el coeficiente más bajo), para 500 Hz un  $\alpha$  de 0.89, para 1000 Hz un  $\alpha$  de 1.00, para 2000 Hz un  $\alpha$  de 1.00, y para 4000 Hz un  $\alpha$  de 1.00.

Se comprobó que sí se genera una disminución en el tiempo de reverberación para todas las frecuencias en bandas de tercios de octava en el rango de 100 Hz a 5000 Hz mediante el uso de paneles de micelio de hongo *Pleorotus Ostreatus*.

## II. OBJETIVOS

### A. Objetivo general

Generar un panel acústico, a partir de cultivo de micelio de hongo, cuyo propósito sea reducir el tiempo de reverberación en un recinto.

### B. Objetivos específicos

- Generar un panel acústico propio a partir de cultivo de micelio de hongo *Pleurotus ostreatus* procedente de Guatemala mediante un medio nutritivo basado en algodón esterilizado.
- Generar una comparación entre los resultados, en frecuencias en bandas de tercios de octavas, del tiempo de reverberación del CIT 421 sin tratamiento acústico comparado con los tiempo de reverberación utilizando tratamiento acústico mediante paneles de micelio de hongo *Pleurotus ostreatus*.
- Determinar de manera referencial los coeficientes de absorción acústica en bandas de octava de los paneles de micelio de hongo *Pleurotus Ostreatus*.
- Determinar y calificar el NRC de los paneles de micelio de hongo *Pleurotus Ostreatus* para el tratamiento acústico de recintos.
- Identificar si existe una reducción de la reverberación de manera cuantitativa en el CIT 421 mediante la implementación de paneles de micelio de hongo *Pleurotus ostreatus*.
- Determinar el costo total de manufactura por  $m^2$  de plancha de micelio de hongo ostra de 7.5 cm de espesor.
- Determinar el costo total de manufactura por  $m^2$  de panel acústico con relleno de plancha de micelio de hongo ostra de 7.5 cm de espesor.

### III. MARCO TEÓRICO

#### A. Acústica

La palabra acústica viene del griego *akoúein*, que significa: oír, en general se conoce como la rama de la física que se dedica al estudio de la generación, propiedades y propagación del sonido". También se conoce puede definir como la ciencia que estudia la transmisión, producción, percepción del sonido y los cuerpos sonoros. Por lo que las intervenciones acústica buscan el manejo del comportamiento de las ondas sonoras en un espacio determinado, además de la producción, transmisión y recepción de las mismas (Graus, 2019).

La acústica se puede diferenciar en varias ramas, tales como la acústica musical, acústica arquitectónica, acústica submarina, psicoacústica, entre otras.

La acústica musical es el estudio de la producción y la transmisión del sonido emanado por instrumentos musicales, debido a las características físicas de los mismo. La acústica musical se enfoca en la descripción e investigación de la manera en que los sonidos son empleados para generar ritmos y patrones musicales. Esta rama de la acústica busca mejorar los sonidos procedentes de los instrumentos musicales y de la voz humana (Jaramillo, 2007).

La acústica arquitectónica es la acústica de los recintos, cuyas ondas son transportadas a través del aire, vibraciones o impacto. Esta rama se encarga de analizar las características de la presión sonora y la interacción de las ondas con los materiales y diseños propuestos para una edificación. Esta rama de la acústica ha ido en auge conforme se ha buscado el mejoramiento de la calidad de vida de los seres humanos (Jaramillo, 2007).

#### B. Sonido

El sonido es la alteración de la presión atmosférica generada por la oscilación de partículas, a través de las cuales las ondas sonoras son transmitida de manera esférica y compleja (en el modelo simplificado se considera la transmisión de forma longitudinal en forma de rayo). Para que un sonido cobre su relevancia es importante que exista la fuente, el medio y el receptor (Jaramillo, 2007).

En otras palabras el sonido es una forma de energía que se manifiesta al excitar las moléculas del aire en el espacio creando diferenciales de presión a su paso, viajando en forma de onda, estos diferenciales de presión son interpretados el sistema auditivo generando estímulos al oyente (Graus, 2019).

El aire producto de la atmósfera del Planeta Tierra es uno de los responsables de que los humanos puedan escuchar sonidos. Las moléculas que componen la atmósfera se atraen entre sí y se mantienen conectadas, generando una especie de malla permitiendo que el sonido viaje a través de ella generando disturbios en cadena en la misma. El sonido se ve afectando por factores externos como lo son la temperatura, la química del medio por el que viaja y los cambios de presiones atmosféricas (García, 2018).

## **1. Ondas de sonido.**

Las ondas de sonido son generadas al momento que un agente emisor empuja las moléculas de aire de alrededor, generando una reacción en cadena con las moléculas contiguas. De esta forma las moléculas en esa región se comprimen en una zona más pequeña. Cuando la dirección del movimiento del sonido es en sentido contrario, la presión disminuye permitiendo que las moléculas se muevan en el sentido del diafragma. La repetición de los movimientos hace que las moléculas individuales que se encuentren directamente delante del diafragma, vibren continuamente hacia delante y hacia atrás con respecto a la horizontal en referencia a la dirección de propagación. Estas vibraciones afectan, a su vez, a otras partículas adyacentes, por interacción entre partículas, transmitiendo así la onda (Manrique & Marco, 2014).

Debido a estos movimientos longitudinales, se crean unas regiones donde las partículas de aire están comprimidas y otras en las que se encuentran más separadas, estas regiones se conocen como zonas de compresión y zonas de enrarecimiento, respectivamente (Manrique & Marco, 2014).

En las ondas sonoras, las partículas del medio que sirve de vehículo al sonido vibran en la misma dirección en la que la onda sonora se desplaza, por tanto, se denominan ondas longitudinales (Manrique & Marco, 2014).

Las ondas de sonido simples pueden ser descritas mediante funciones trigonométricas, las cuales corresponden a la categoría de ondas sinusoidales, sin embargo existe una amplia variedad de tipos de ondas que tienen su función específica en el sonido, entre estas podemos encontrar las ondas triangulares, cuadradas, de pulso, ondas de serrucho o rampa, entre otros. Debido a los armónicos que cada uno de los tipos de ondas genera suenan de manera distinta, la aplicación varía particularmente en la composición de sonidos sintetizados electrónicamente (Manrique & Marco, 2014).

Las ondas sinusoidales, las cuales son las más usuales en cuanto a temas de sonido, tienen la característica de que cuando la onda sube su cresta es positiva y cuando baja es negativa, la cresta positiva representa la concentración de moléculas en esa parte de la atmósfera y las crestas negativas representan los vacíos de moléculas, por lo que el sonido es el resultado de concentraciones y vacíos de moléculas que se mueven progresivamente por el aire.

## **2. Atributos característicos de las ondas.**

### **a. Amplitud de onda**

La palabra amplitud viene del latín *amplitudo*, que significa “cualidad de extenso”. La amplitud de la onda es la distancia entre el punto más alto y el punto medio o de equilibrio, en las gráficas es la distancia entre la cresta y el eje X. Es el módulo de elongación máxima (Gutiérrez, 2014).

En audio la amplitud generalmente se mide en decibeles, esta característica de las ondas ayuda a

determinar cuán fuerte suena un sonido, usualmente entre más amplia la onda, más grande es el nivel de presión sonora y los oídos lo traducen como un mayor sonido, sin embargo no siempre es así, ya que existen otras variables como la cantidad de energía de la onda para la determinación del volumen. (Gutiérrez, 2014).

Los decibeles equivalen a la décima parte de un Bel, que es el valor mínimo que puede diferenciar una persona, esta unidad de medida recibió su nombre del inventor Estadounidense Alexander Graham Bell. Los decibeles se comportan en escala logarítmica, por cada 3 decibeles que se aumentan, equivale a dos veces el nivel de energía en audio, por ejemplo, se tiene un bocina que reproduce 100 db, al agregar una segunda bocina el aumento en índice de presión sonora únicamente será de 3db, dejando un valor de presión sonora en la sala de 103 db. Los oídos tienen la característica de comportarse de manera logarítmica (Gutiérrez, 2014).

#### b. Volumen

El volumen es la cantidad de energía que posee una onda y es independiente de la amplitud de la onda, ya que a mayor cantidad de energía, mayor volumen, independientemente de la altura de la onda. Se puede visualizar de forma gráfica como el área bajo la curva de la función sinusoidal (Gutiérrez, 2014).

#### c. Frecuencia

La frecuencia es la cantidad de ciclos (transcurso de una onda desde su cresta positiva hasta su cresta negativa) que ocurren en un segundo. Presenta cuán frecuente son los periodos de la onda, la unidad de medida que se utiliza para medir las frecuencias es el Hertz (Hz) (Gutiérrez, 2014).

Las frecuencias bajas suenan grave y las frecuencias altas suenan agudas para los oídos. De 20 Hz a 360 Hz las frecuencias se consideran graves, de 360 Hz a 1,400 Hz las frecuencias se consideran medias, y de 1,400 Hz a 20,000 Hz las frecuencias se consideran altas. El oído humano únicamente tiene la capacidad de tener una banda de frecuencia audible en el rango de 20 Hz a 20,000 Hz (Bernhard, 2021).

El hercio es equivalente al inverso de un segundo, por lo que puede ser descrito de la siguiente forma:

$$Hz = \frac{1}{s} = s^{-1} \quad (1)$$

#### d. Periodo

El periodo es el intervalo temporal en el que se repite el movimiento de la onda, o en otras palabras es el tiempo que se tarda una oscilación en ser completa, para esta medida se utilizan los segundos como dimensional (Bernhard, 2021).

El periodo es el inverso de la frecuencia por lo que puede ser descrito de la siguiente forma:

$$T = \frac{1}{f} = f^{-1} \quad (2)$$

Donde:

T = periodo

f = frecuencia

#### e. Longitud de onda

La longitud de onda es la distancia mínima entre dos puntos de igual estado de vibración, por facilidad en la medición se suele medir de cresta a cresta, de valle a valle o bien de la intersección con el eje x a la intersección con el eje x (Bernhard, 2021).

La longitud de onda se relaciona con la frecuencia, la velocidad de onda y el periodo, esta interrelación puede ser descrita mediante la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{c}{f} = cT \quad (3)$$

Donde:

$\lambda$  = longitud de onda

f = frecuencia de la onda

c = velocidad de onda

T = periodo de la onda

Las longitudes de onda audibles por el ser humano se encuentran entre el rango de 17 metros y 17 milímetros. Las ondas con frecuencias bajas presentan longitudes de onda mayores, conforme la frecuencia aumenta la longitud de onda disminuye, ejemplo de esto es la longitud de una onda que viaja en el aire a temperatura de 24 °C con una frecuencia baja de 100 Hz, ésta onda tiene una longitud de 3.457 m, a diferencia de una onda de frecuencia alta de 10,000 Hz que igualmente viaja por el mismo aire a 24 °C, su longitud de onda es 0.03457 m, lo cual es cien veces menor que la onda con frecuencia baja (Bernhard, 2021).

#### f. Velocidad de propagación de onda

Las ondas tienen la característica de poder viajar a distintas velocidades dependiendo de la temperatura y el medio por el que viajan. La relación de la velocidad de las ondas viajando en el aire es directamente proporcional a la temperatura del ambiente, este comportamiento es descrito mediante la siguiente ecuación, considerando el aire como medio de propagación (Bernhard, 2021).

$$v = 331.3 + 0.6t \quad (4)$$

Donde:

v = velocidad de propagación de onda en m/s

t = temperatura en grados celsius

Como se mencionó anteriormente, la velocidad de propagación de las ondas también se

encuentra en dependencia del medio, siendo las variaciones de velocidad de las ondas bastante significativas, por ejemplo para aire a temperatura promedio de 24 °C la velocidad promedio de las ondas de sonido es de 345 m/s, en el aluminio sólido la velocidad de propagación de las ondas de sonido es de 5104 m/s, sin embargo en el vacío absoluto la velocidad teórica es 0 m/s, ya que no existe propagación debido a que no hay medio (Bernhard, 2021).

### **3. Proceso de audición de sonido.**

El oído es un transductor de señal que es capaz de captar una perturbación del medio, la propaga, modifica y transforma en señales eléctricas que son enviadas al cerebro, el cual se encarga del procesamiento, interpretación y sentido de las mismas (Manrique & Marco, 2014).

El proceso de captación de sonido empieza con una perturbación externa, usualmente es transmitida por el aire, propagándose de manera longitudinal hasta llegar a un receptor, y dependiendo de la intensidad y frecuencia, el oído se percata o no de su presencia, esto depende del umbral de audición del receptor, los rangos comunes de frecuencias audibles para un oído sano son de 20 Hz a 20,000 Hz (Manrique & Marco, 2014).

El sonido luego es recogido por el pabellón auricular, el cual es una lámina compuesta por cartílago plegado, en diversos sentidos. sobre sí mismo, se sitúa en las partes laterales de la cabeza, posteriormente a la articulación temporo-mandibular y a la región parotídea, anterior a la región mastoidea e inferior a la región temporal. El pabellón se encarga de hacer converger las ondas sonoras hacia el conducto auditivo externo, actuando como una pantalla receptora, además permite diferenciar los sonidos que provienen del frente del receptor de los que provienen de atrás, también distorsiona las señales sonoras incidentes de forma lineal (Manrique & Marco, 2014).

Posterior a ser captadas, las ondas de sonido son conducidas por el conducto auditivo externo, el cual es un conducto fibrocartilaginoso que tiene un efecto resonante, el cual refuerza la frecuencias entre los 2,000 Hz y los 5,000 Hz. Además es responsable de conectar a la membrana timpánica en su extremo interno (Manrique & Marco, 2014).

Posteriormente las ondas sonoras viajan a la cadena de huesos, la cual se compone por el martillo, yunque y estribo, estos son los responsables de la transmisión de la vibración hasta la ventana oval, con el fin de generar movimiento en los líquidos laberínticos, pasando de un medio aéreo a uno líquido, donde se estimulan las células del oído interno, transmitiendo estas a las terminaciones nerviosas los impulsos que llevarán el estímulo a las áreas corticales del lóbulo temporal (Manrique & Marco, 2014).

### **C. Ruido**

El ruido es una categorización del sonido, la cual se basa en el criterio de que un sonido no es agradable, ya sea por su alto índice de presión sonora equivalente ponderada A, o bien por las frecuencias predominantes que compongan el sonido. Un aspecto clave del ruido es que puede ser una clasificación circunstancial para un sonido, sin importar la fuente, la distancia, la sensación auditiva, ya que un sonido puede ser agradable para unos y ruido para otros. Ejemplo sería un pianista tocando una composición muy compleja en un teatro, para la gente que fue a escuchar al pianista consideraría el sonido como algo agradable, sin embargo si el mismo pianista interpretara

la misma melodía en medio de una platica importante, sería molesto y se volvería ruido. (Jaramillo, 2007)

Velocidad de propagación: La propagación de una onda puede ser variable y está estrechamente relacionada con el tipo de medio por el que se desplace la onda, aspectos importantes del medio que pueden llegar a afectar la velocidad son la temperatura, humedad y elasticidad.

## **D. Acústica en edificaciones**

### **1. Acondicionamiento acústico.**

Existen distintos acercamiento en cuanto a temas acústicos en edificaciones, uno de ellos, probablemente el menos mencionado, es el tratamiento acústico, con frecuencia se suele confundir este tipo de acercamiento a la acústica, como el aislar un recinto para que el sonido no salga de este, o bien para que el sonido no ingrese a un recinto. Este tipo de estrategias corresponden a la rama de estudio del aislamiento acústico. El acondicionamiento acústico busca generar confort en cuanto a cómo se percibe el sonido dentro del recinto, no se busca interferir el sonido, en cambio se busca hacerlo más "limpio"(Frasquet, 2010).

El éxito en el diseño del acondicionamiento acústico no es únicamente lograr que ciertos valores se hallen dentro del margen deseado, sino en que ello ocurra en todos los puntos del recinto, en otras palabras, en que exista una uniformidad y coherencia del sonido. Un oyente ubicado dentro del espacio de un recinto experimenta dos tipos de contribuciones sonoras al momento de existir un sonido, una de estas es el sonido directo y la otra es el sonido reflejado o indirecto. Se le conoce como sonido directo a todo aquél que llega al oyente directamente desde la fuente emisora de sonido sin ningún tipo de interferencia y el sonido indirecto o reflejado es aquel que proviene de la reflexión del sonido emitido por la fuente y redirigido hacia el oyente, debido a las características geométricas de la sala (Frasquet, 2010).

Dentro de los parámetros relacionados con el acondicionamiento acústico que son claves tener presentes para poder generar una solución significativa podemos encontrar:

#### **1) Reverberación (TR)**

Este indicador muestra el tiempo en el que un evento sonoro pierde 60 dB dentro de un recinto cerrado.

#### **2) Claridad de voz (C50)**

Este parámetro define la inteligibilidad de la palabra y de la música cantada. Se define como la relación entre la energía sonora recibida durante los primeros 50ms desde la llegada del sonido directo y la energía sonora que llega después de los primeros 50ms (Abad, 2018).

El parámetro de referencia para la aceptación de la inteligibilidad dentro de un recinto es la condición de que el C50 debe ser mayor o igual a 2dB. Cuanto mayor sea el valor del C50 sobre los 2dB mayor será la sonoridad y la inteligibilidad de palabra en el punto considerado (Abad, 2018).

### 3) Claridad musical (C80)

Indica el grado de separación entre los diferentes sonidos individuales que conforman una composición musical. Este indicador toma en consideración la energía sonora que llega al oyente durante los primeros 80ms. Suele representarse en condiciones de sala vacía, y presenta el fenómeno de disminuir a medida que el tiempo de reverberación medio aumenta. Para frecuencias de 500 Hz, 1kHz y 2kHz se recomienda que el parámetro de claridad (C80) sitúe entre -2dB y 2dB. (Frasquet, 2010).

Se utiliza el intervalo temporal de 80ms debido a que cuando se trata de música, las reflexiones que llegan al oyente dentro de ese intervalo son integradas por el oído justo con el sonido directo, lo que genera que aumente la claridad musical (Abad, 2018).

### 4) Calidez acústica y brillo (BR)

Se le llama calidez acústica al fenómeno de que un recinto presente una buena respuesta a frecuencias bajas. Este concepto representa la riqueza en sonidos graves, melosidad y suavidad de la música en el recinto. Este parámetro puede definirse como la relación entre la suma de los tiempos de reverberación a frecuencias de 125Hz y 250Hz, y la suma de los tiempos de reverberación de frecuencias de 500Hz y 1kHz (Frasquet, 2010).

## 2. Aislamiento acústico.

El aislamiento acústico es distinto al concepto de tratamiento acústico. El aislamiento acústico no busca la mejora en la calidad del sonido y el comportamiento controlado del comportamiento de las ondas de sonido dentro de un recinto, busca garantizar la protección de los recintos contra el ruido aéreo, de impactos y vibraciones, tanto procedentes del interior como los procedentes del exterior del recinto. Esto puede ser logrado mediante el uso adecuado de materiales combinados, que juntos generen sinergias físicas. Este enfoque se centra en reducir al máximo los efectos de las fuentes de ruido al disminuir la energía de las ondas sonoras, ya sea externas al recinto o bien las que son generadas dentro de este. (Bernhard, 2021).

Algunas de las consideraciones a tener en cuenta para temas de aislamiento acústico de edificaciones son:

1) Es importante ser consciente de los materiales y configuración de las fachadas y cubiertas, ya que estas son la primera barrera en la mayoría de ocasiones frente al ruido aéreo, generado por carros, camiones, animales, aviones, eventos climatológicos, entre otros. (Bernhard, 2021).

2) Protección en tabiques, pisos y techos contra ruido aéreo y de impacto. Esto se puede lograr mediante el uso de materiales viscoelásticos, cámaras de aire, materiales absorbentes y materiales densos. Este es uno de los puntos más importantes para garantizar la privacidad y confort dentro de recintos. (Bernhard, 2021).

3) Se debe tener presente y se debe generar protección a vibraciones y ruido aéreo de equipos tales como compresores, motores, bombas, entre otros. Estos pueden representar molestias significativas que interrumpen el confort de los ocupantes de la edificación si no se logra impedir el

paso del sonido generado por dichos aparatos, ya que cuentan con niveles de presión sonora bastante elevados. (Bernhard, 2021).

4) Se debe tener en cuenta la protección en muros colindantes entre viviendas, con el fin de que el ruido generado en vecindades no ingrese a la edificación e interrumpa el confort interno. (Bernhard, 2021).

### **3. Materiales acústicos en edificaciones.**

Una gran cantidad de materiales utilizados en las obras de construcción tales como el acero, concreto, cerámica, vidrio, son materiales sonoramente reflectantes, por lo que una de las características principales de los denominados materiales acústicos es su capacidad de absorción de sonido.(Jaramillo, 2007).

#### 1) Tipos de materiales

Debido a las propiedades físicas de los materiales, se puede tener un amplio espectro de comportamientos cuando dichos materiales entran en contacto con las ondas sonoras, sin embargo existen características específicas que al ser utilizadas en recintos brindan resultados deseados, ya sea para el aislamiento acústico, o bien para el tratamiento acústico de un recinto. Podemos agrupar los materiales acústicamente beneficiosos en cuatro grandes grupos:

##### a) Cámaras de aire

Estas tienen la característica de ser un espacio confinado entre una envolvente, la cual como su nombre lo dice alberga aire. (Arrieta, 2006).

##### b) Materiales absorbentes

Se le denomina así a todos aquellos materiales porosos formados por entramados de poros o canales interconectados, entre estos materiales se encuentran la lana de roca, fibra de vidrio, celulosa, poliéster, resina de melanina. Buen desempeño para frecuencias medias y altas (Arrieta, 2006).

##### c) Capa impermeable

Este tipo se caracteriza principalmente por su densidad, entre estos materiales se encuentra el block, concreto, acero, adobe, ladrillo. Presenta un buen aislamiento para frecuencias medias y altas, sin embargo es la mejor capa para tratar de frecuencias bajas (Arrieta, 2006).

##### d) Lámina visco-elástica

Este tipo se caracteriza por su poca rigidez, lo que permite que puedan funcionar como amortiguadores, dentro de estos materiales se encuentra el hule, vinilo cargado en masa y el pegamento verde (Arrieta, 2006).

#### 2) Coeficiente de absorción

Para poder determinar numéricamente las propiedades absorbentes de un material se suele utilizar el coeficiente de absorción de sonido, el cual representa la relación entre la energía absorbida y la energía incidente sobre la superficie de un material. El rango de valores que toma este coeficiente van de 0 a 1, siendo el valor 0 una representación del 100 % de reflexión, y 1 el 100 % de absorción. Se utiliza el símbolo  $\alpha$  para caracterizar al coeficiente de absorción acústica (Orduña, 2014)

### 3) Errores en el uso de materiales

Muchas de las personas que desconocen del tema de tratamiento acústico emplean erróneamente el poliestireno expandido, este material a pesar de que es poroso, sus celdas son cerradas, por lo que no se logra el efecto de absorción que la mayoría de personas esperaría, Este material funciona como una capa aislante, no dejando pasar a través ni el aire, por lo que no existe dirección que produzca energía en forma de calor reduciendo así parte de la energía sonora. Otro error muy común es utilizar materiales para el aislamiento acústico como materiales para tratamiento acústico, lo que no es funcional debido a la diferencia de las propiedades de los mismos.(Jaramillo, 2007)

### 4) Coeficiente de reducción de ruido

Este coeficiente también conocido como NRC, es una media de los coeficientes de absorción en las bandas de octava de frecuencia entre 250 Hz y 2000Hz, aproximando al múltiplo de 0.05 más cercano. (Jaramillo, 2007)

## **E. Afecciones provocadas por fenómenos acústicos**

Es un hecho que el ruido puede generar ciertos problemas de salud en las personas, debido a ello muchas empresas invierten en equipos de protección personal, acondicionamiento de las instalaciones, aislamiento de recintos, modificaciones de maquinarias, con el fin de reducir el índice de presión sonora equivalente ponderado A (dBA), para reducir la menor cantidad de daño para con las personas, incluso los cubanos realizan exámenes médicos periódicos a los estudiantes que estudian en escuelas taller, y se le veta el acceso a los alumnos que muestran algún problema auditivo, con el objetivo de evitar complicaciones. En Europa se tiene como ley el control de niveles de presión sonora y calidad acústica de ciertos recintos (González, 2014).

Otro fenómeno acústico que puede causar afecciones a la salud son las resonancias que debido a las reflexiones en cerramientos paralelos en los recintos, además de esto existe el fenómeno de los ecos flotantes, el cual aumenta el índice de presión sonora equivalente ponderado A de ciertas frecuencias, lo cual puede producir pérdida de atención por parte del receptor del mensaje. Este fenómeno suele presentarse con las voces masculinas, debido a la mayor cantidad de frecuencias bajas y en salones de clase pequeños, o cuando la altura del techo es mayor a 3m (González, 2014).

Una de las problemáticas de una mala acústica es la dificultad para entender los mensajes de un emisor en una conversación, este fenómeno también se puede relacionar con la pronunciación del emisor, las características del ruido de fondo, y la distancia entre el emisor y el receptor. Los ruidos de fondo representan, cuando son muy altos, una seria molestia en los salones de clases y pueden provocar que el mensaje resulte completamente incomprensible, además de esto, en ambientes escolares con mala acústica, la voz de los profesores entra en resonancia debido al bajo coeficiente

de absorción acústica de los materiales del cerramiento de los salones educativos, lo que genera la presencia de reverberación generando que la inteligibilidad del mensaje decaiga y se distorsione el timbre del de la persona emisora (González, 2014).

Otra afección a la salud relacionada con los fenómenos acústicos es el hecho de que la mayoría de los individuos expuestos a condiciones de ambientes ruidosos pueden llegar a presentar insomnio y cansancio durante el día, lo que genera una disminución de la efectividad en el rendimiento de la persona durante el día. Las personas que son expuestas a la hora de dormir a ruido, presentan episodios de ciclo REM menos frecuentes y de menor duración, generando que el hecho de haber dormido no sea tan eficiente para que el cuerpo se logre recuperar y se sienta descansado. Existen diversas variables que pueden intervenir en el efecto de la interferencia en el sueño, los cuales son: la capacidad de adaptarse al ruido por parte de la persona, la sensibilidad de la persona y el tipo de estímulo acústico captado. Esta es una de las razones por las que en Europa se tiene por ley niveles máximos admisibles para el índice de presión sonora permitido en ambientes de vivienda (González, 2014).

## F. Fenomenología de la propagación del sonido en una sala

### 1. Reflexión.

La reflexión es un fenómeno característico de las ondas sonoras, el cual se genera al momento en el que la onda incidente, que viaja por un medio (comúnmente el aire), se encuentra con una superficie de separación de diferente composición, esto provoca un cambio en la dirección del movimiento ondulatorio generando una onda reflejada sobre el medio por el cual viajaba inicialmente. Parte de la energía inicial de la onda es reflejada (J. Fernández, 2019).

La reflexión puede ser mejor comprendida a través de dos leyes, las cuales establecen que el rayo incidente, el reflejado y la normal a la superficie en el punto de incidencia están en el mismo plano. Otra ley que rige la reflexión establece que el ángulo del rayo incidente con respecto a la recta normal es igual que el ángulo formado por la onda reflejada y la recta normal (J. Fernández, 2019).

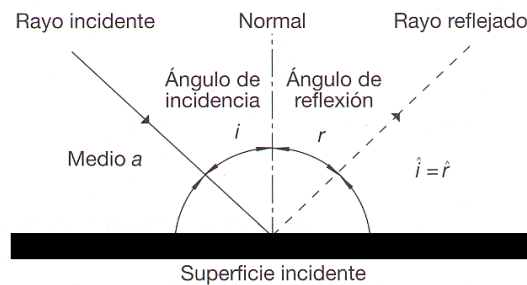


Figura 1. Comportamiento de una onda sonora al sufrir reflexión debido al choque con una superficie incidente (J. Fernández, 2019)

Una consideración importante a tener en cuenta en cuanto a la reflexión de las ondas es el hecho de que la onda reflejada no cambia la velocidad con la que originalmente colisionó la onda incidente, además la frecuencia no presenta variaciones, ni la longitud de la onda, por lo que las características del sonido se mantienen a pesar de que las ondas se reflejten (J. Fernández, 2019).

En la reflexión algunas ondas pueden llegar a sufrir un cambio de fase. Lo que genera que posterior a la incidencia de la onda sobre la barrera, la onda reflejada experimenta una inversión en el sentido de la vibración que, en el caso de las ondas armónicas, se traduce en un desfase de  $180^\circ$  o  $\pi$  radianes respecto a la fase original de la onda incidente. En general se puede mencionar que se produce un cambio de fase si la onda se propaga sobre un medio menos denso que sobre el que incide (J. Fernández, 2019).

## 2. Refracción.

La refracción es un fenómeno experimentado por las ondas sonoras, al sufrir un cambio de dirección en su movimiento ondulatorio, el cual se genera al momento en el que la onda pasa de un medio a otro de propiedades distintas, en el cual se ve afectada la velocidad de propagación de la onda. Este fenómeno se rige por dos leyes importantes, las cuales establecen que el rayo incidente, el rayo refractado y la recta normal a la superficie en el punto de incidencia, están en el mismo plano. La segunda ley que rige este fenómeno para las ondas acústicas es la ley de Snell, la cual establece que la relación entre el ángulo de incidencia de la onda, el ángulo de refracción, y las velocidades de las ondas en el medio inicial y en el segundo medio, guardan cierta relación, la cual es una constante adimensional.(J. Fernández, 2019).



Figura 2. Ejemplificación gráfica de refracción de ondas sonoras ante distintas condiciones de medio de propagación.

(Gutiérrez, 2014)

El fenómeno de la refracción también se puede generar cuando la onda sonora entra en contacto con un objeto y por fricción se ve obligado a virar un poco, lo que genera un cambio en la dirección (Gutiérrez, 2014).

$$n = \frac{\text{sen}(i)}{\text{sen}(r)} = \frac{v_1}{v_2} \quad (5)$$

Donde:

n = constante adimensional

$i$  = ángulo formado entre el rayo incidente y la recta normal  
 $r$  = ángulo formado entre el rayo refractante y la recta normal  
 $v_1$  = velocidad de la onda en medio 1  
 $v_2$  = velocidad de la onda en medio 2

### 3. Sombras de sonido.

Otro caso particular que se puede presentar dentro de recintos, es cuando hay un objeto en medio de la trayectoria del sonido, lo que genera el fenómeno de "sombra de sonido", este fenómeno ocurre cuando ciertas ondas de sonido no pueden llegar atrás de un objeto que se interpone en la trayectoria, lo que genera una pérdida de frecuencias altas, denominando la zona de sombra a aquella zona con pérdida de dichas frecuencias. Las frecuencias bajas no sufren ninguna pérdida y se continuarán escuchando con facilidad incluso dentro de la zona de sombra de sonido (Gutiérrez, 2014).

Este fenómeno es consecuencia de la naturaleza de las ondas, las frecuencias altas viajan a semejanza de rayos rectos, por lo que se comportan de manera direccional, sin embargo las frecuencias bajas viajan de manera omnidireccional, lo que les permite rodear obstáculos durante su propagación (Gutiérrez, 2014).

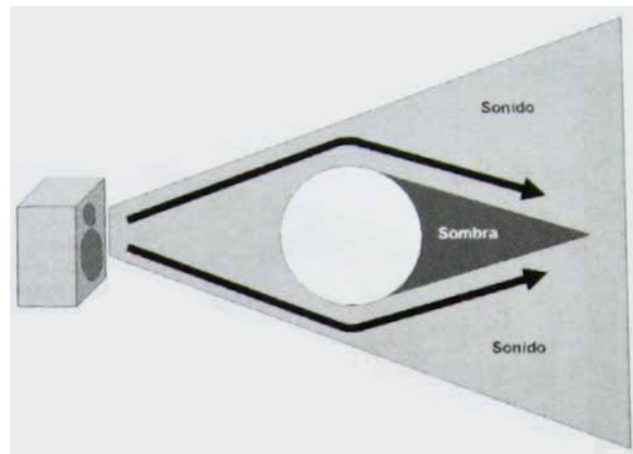


Figura 3. Esquemmatización de fenómeno "sombra de sonido"

(Gutiérrez, 2014)

### 4. Difracción.

La difracción es un fenómeno en el cual se ven involucradas las ondas sonoras al momento de atravesar un obstáculo por un orificio pequeño, lo que genera cierta distorsión y propagación en todas direcciones detrás de dicho orificio, el comportamiento de la onda sonora se encuentra relacionado con el tamaño del orificio, para que la difracción tome lugar, el tamaño del orificio debe ser del mismo orden que el de la longitud de onda. La difracción no se presenta únicamente en situaciones con orificios, también puede generarse frente a cualquier obstáculo o borde afilado con

un tamaño comparable a la longitud de la onda sonora. Ejemplo de esto es el sonido bordenando pequeños obstáculos que se encuentren en el camino de propagación al estar la longitud de onda comprendida entre unos pocos centímetros y unos pocos metros (J. Fernández, 2020).

Uno de los modelos más conocidos es el modelo de difracción de Fraunhofer, en el cual el obstáculo a considerar es una rendija estrecha y larga, se analizan las ondas incidentes haciendo la suposición que son normales al plano de la rendija que el observador se encuentra a una distancia grande en comparación con la anchura de la misma. Cuando la onda incide sobre la rendija, según el principio de Huygens, todos los puntos de su plano se convierten en fuentes secundarias de ondas, emitiendo nuevas ondas denominadas ondas difractadas (García, 2018).

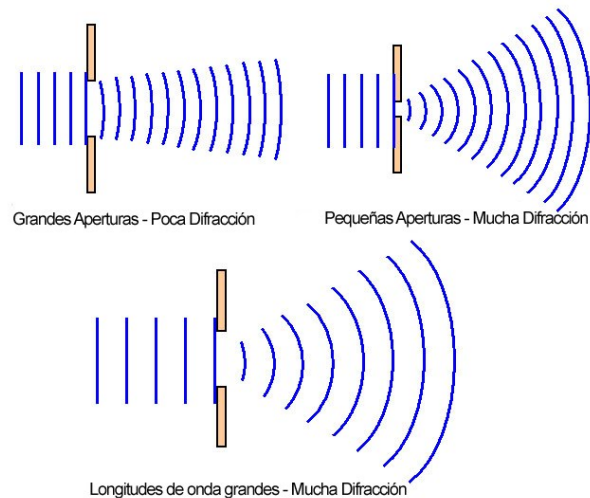
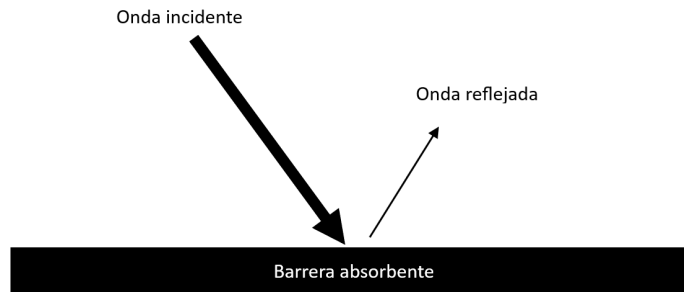


Figura 4. Casos de difracción de ondas sonoras a través de rendijas de distintas características (Gutiérrez, 2014)

## 5. Absorción.

En el caso de las ondas sonoras al cambiar de medio de propagación puede alterar tanto la velocidad como la dirección de la onda. Usualmente el cambio de medio para las ondas acústicas se genera entre el aire y superficies de distintos materiales, dependiendo de las características de los materiales sobre los que incide la onda es el comportamiento de la onda reflejada, existen materiales con coeficientes de absorción altos como la fibra de vidrio, el cual es un material con un coeficiente de absorción acústica bastante elevado para ondas cuyas frecuencias sean 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, por lo que al colisionar las ondas con este material, pierden un nivel considerable de energía, principalmente las ondas cuyas frecuencias sean las anteriormente mencionadas, generando que la onda reflejada sea más débil que la onda incidente al generarse el fenómeno de reflexión. Caso contrario sucede cuando las ondas sonoras colisionan con un muro de concreto, el cual tiene coeficientes de absorción acústica bajos, por lo que las ondas no pierden tanta energía, generando que la reflexión de las ondas sea más significativa (Jaramillo, 2007).



*Figura 5.* Comportamiento de las ondas sonoras al colisionar con una superficie absorbente, ejemplificado mediante el modelo simplificado de ondas (Gutiérrez, 2014)

## G. Reverberación

La reverberación se puede definir como un fenómeno acústico de reflexión de ondas que se produce en un ambiente cerrado, cuando una onda choca contra las paredes, suelo o techo y rebota, permitiendo que el sonido persista por cierto tiempo en el ambiente. El parámetro que permite cuantificar el grado de reverberación de una sala es el TR o bien “tiempo de reverberación”, siendo éste el periodo de tiempo en segundos que transcurre desde que se desactiva la fuente excitadora del campo directo, hasta que los decibelios del sonido inicial se encuentren 60dB abajo del índice de presión sonora original (E. Fernández, 2016).

Un aspecto importante tanto para la generación de vivienda, como para la generación de oficinas, salones de colegios, universidades, cafeterías, teatros, cines, entre otros, es el control de la reverberación. El no controlar la reverberación en estos ambientes puede generar un considerable pérdida de confort, generación de sensación de molestia, dolores de cabeza, pérdida de atención, entre otros. Un ejemplo muy conocido es dentro de los salones de clases no tratados, cuando se encuentran dos o más personas hablando de distintos temas al mismo tiempo dentro del salón se empieza a perder la claridad de los mensajes y por lo general los emisores empiezan a subir el volumen de su voz, lo que resulta en molestias para los ocupantes del recinto, además de la pérdida de atención e incluso puede generar dolores de cabeza, inclusive en salones donde exista reverberación la voz de una sola persona puede ser suficiente generar estos mismo síntomas. (E. Fernández, 2016).

La reverberación usualmente se llega a confundir con el fenómeno al cual se le llama eco, a pesar de ser similares no son iguales, la gran diferencia entre estos dos fenómenos es el tiempo de retardo de la reflexión relativa del sonido directo, el oído humano a partir de los 50 milisegundos de retardo de la reflexión relativa de sonido directo identifica el sonido como otro evento separado al ruido inicial. El retardo de reflexión relativo al sonido directo en la reverberación se sitúa debajo de los 50 milisegundos, generando un efecto de ruido de fondo, interferencia y distorsión del mensaje, dando la sensación de que existe un murmullo a baja intensidad de presión sonora (E. Fernández, 2016).

La existencia de la reverberación se encuentra en dependencia de diversos factores, sin embargo existen dos factores generales para que se presente el fenómeno acústico. El primero de ellos es la existencia de un espacio cerrado, ya que este fenómeno se origina debido al retorno del sonido al emisor ocasionado por la reflexión de ondas sonoras, por lo que al ser un recinto abierto las ondas

no tienen donde incidir, por ende no pueden rebotar, las secciones del recinto que se encuentren completamente abiertas al exterior se pueden considerar con coeficiente de absorción de 1, comportándose como si fueran un material idealmente absorbente. El segundo factor clave para la existencia de la reverberación es la naturaleza de los materiales que se encuentren recubriendo el recinto, tanto en el perímetro como en el techo y piso, ya que en dependencia de su coeficiente de absorción se generará una mayor reflexión o se generará una mayor absorción, afectando directamente en el tiempo en el que el índice de presión sonora de las ondas de distintas frecuencias se reduce en 60 dB. Existen otros factores importantes como las dimensiones del recinto, tanto altura como largo y ancho, además de la disposición y forma de la envolvente de la sala, entre otros. (García, 2018).

## H. Teorías para el estudio de acústica en recintos

Existen tres modelos teóricos fundamentales con los que se puede entender y describir el proceso del sonido en auditorios, salas, teatros, entre otros. Estas tres teorías son: la teoría estadística, teoría geométrica y la teoría ondulatoria. Cada uno de los modelos tienen sus puntos fuertes, puntos débiles o limitaciones (Pellis et al., 2011).

### 1. Teoría estadística.

El modelo teórico estadístico para el estudio de acústica en recintos parte del axioma de la existencia de un campo sonoro difuso en el espacio analizado. Las magnitudes utilizadas para este método son el recorrido libre medio y el coeficiente de absorción. Las ecuaciones con las que se ampara este modelo son las ecuaciones de Sabine, Eyring y Millington (Pellis et al., 2011). Un campo sonoro se considera difuso cuando la densidad de la energía es la misma en cualquier punto de un recinto, además el flujo de energía es igual en todas las direcciones y el tiempo de reverberación es el mismo en todo el espacio analizado (Pellis et al., 2011).

Para el modelo teórico de análisis estadístico se parte de la relación estadística del recorrido libre medio de una onda sonora.

$$l = \frac{4V}{S} \quad (6)$$

Donde:

V = volumen del recinto

S = área de la superficie de la sala

El coeficiente de absorción de una sala en la realidad no se obtiene tan fácilmente, ya que los recintos tradicionalmente analizados cuentan con distintos materiales en cada una de las caras, los materiales de las puertas, piso, paredes, muros, cielos falsos o techos, varían. Esta complicación genera que se debe fraccionar el análisis de un recinto bajo el análisis estadístico por áreas y materiales, para esto es de utilidad el coeficiente de absorción media de un recinto (Pellis et al., 2011).

$$A = \sum_{i=1}^n S_i \alpha_i \quad (7)$$

Donde:

$\alpha_i$  = coeficiente de absorción de la región analizada

$S_i$  = área de la superficie de la región analizada

A = área de absorción teórico total del recinto

En 1930 Carl F. Eyring establece una fórmula que sirve para describir el tiempo de reverberación de una sala, esta fórmula toma en cuenta el efecto de absorción secuencial, lo que hace que sea más exacta para el estudio de recintos muy absorbentes (Bernhard, 2021).

En la práctica se utiliza comúnmente la fórmula de Eyring cuando el espacio analizado es un recinto con coeficiente de absorción superior a 0,2 y absorción uniformemente distribuida (Pellis et al., 2011).

$$T_r = \frac{0.162V}{-S \ln\left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n S_i \alpha_i}{S}\right)} \quad (8)$$

Donde:

$T_r$  = tiempo de reverberación

V = volumen del recinto

S = área de la superficie total del recinto

$\alpha_i$  = coeficiente de absorción de la región analizada

$S_i$  = área de la superficie de la región analizada

Analizando la ecuación de Eyring, cuando el coeficiente de absorción total del recinto (descrito en la ecuación No.8) es pequeño comparado con la unidad, el denominador tiende a 0, debido al logaritmo natural, por lo que se pueden considerar únicamente los dos primeros términos del desarrollo en serie del neperiano del denominador. Esto genera otra ecuación descrita por Wallace Sabine para el cálculo de tiempo de reverberación en un recinto. Sabine suponen que el descenso de energía acústica cuando cesa la fuente se produce de forma lineal (Pellis et al., 2011).

En la práctica se utiliza comúnmente la fórmula de Sabine cuando el espacio analizado es un recinto vivo, con coeficiente de absorción medio inferior a 0,2 (Pellis et al., 2011).

Esta ecuación es más utilizada en el calculo de recintos poco absorbentes, a diferencia de la ecuación de Eyring, ya que la ecuación de Sabine usualmente arroja resultados un poco mayores a los de Eyring (Bernhard, 2021).

$$T_r = \frac{0.162V}{A} \quad (9)$$

Donde:

$T_r$  = tiempo de reverberación

V = volumen del recinto

A = área de absorción teórico total del recinto (Ecuación No.7)

Si en el proceso de reverberación se considera que la energía encuentra todas las superficies de la sala, una tras otra, el fenómeno de la reverberación puede ser más fácilmente descrito mediante la ecuación de Millington-Sette. Millington suponen que el descenso de energía acústica cuando cesa la fuente se produce a saltos (Norris, 2007).

En la práctica se utiliza comúnmente la fórmula de Millington cuando el espacio analizado es un recinto con coeficiente de absorción medio superior a 0.2 y absorción muy dispar entre los distintos materiales, siempre que no exista algún coeficiente de absorción próximo a la unidad (Pellis et al., 2011).

$$T_r = \frac{0.162V}{\sum_{i=1}^n S_i \ln\left(\frac{1}{1-A_i}\right)} \quad (10)$$

Donde:

$T_r$  = tiempo de reverberación

$\alpha_i$  = coeficiente de absorción de la región analizada

$S_i$  = área de la superficie de la región analizada

V = volumen del recinto

## 2. Teoría geométrica.

El modelo teórico geométrico puede aplicarse cuando el caso analizado del recinto involucra frecuencias medias y alta, lo cual es una limitante para aplicar este modelo de forma general a cualquier circunstancia de estudio (Pellis et al., 2011).

Este modelo teórico de estudio de la acústica de salas se suele utilizar cuando las dimensiones de las paredes del recinto son mucho mayores comparadas con la longitud de onda. Por ejemplo, para una frecuencia media de 1000 Hz, a la que corresponde una longitud de onda de 34 cm, las dimensiones lineales de las paredes y del techo, así como las distancias cubiertas por la onda sonora, son mayores que la longitud de onda en varios órdenes de magnitud. Los métodos de la acústica geométrica se utilizaron inicialmente para estudiar la distribución de las primeras reflexiones del sonido desde las paredes del recinto analizado mediante técnicas para dibujar los frentes de onda tras sus reflexiones en todo tipo de superficies (Pellis et al., 2011).

En la acústica geométrica se analiza el comportamiento del sonido utilizando un modelo más sencillo basado en un rayo sonoro en lugar de una onda. El rayo sonoro es una conjetura de una onda plana que ocupa una región finita y específica en el espacio tiempo. Su composición espectral incluye componentes monocromáticos cuyas frecuencias están comprendidas en un intervalo determinado, en palabras más simples los rayos sonoros son líneas cuyas tangentes a las mismas en un punto cualquiera del espacio coincide con la dirección de propagación, lo que permite visualizar la propagación del sonido a lo largo de rayos, ignorando su naturaleza ondulatoria (Pellis et al.,

2011).

El modelo teórico de acústica geométrica se basa en cinco hipótesis, las cuales son:

1) Propagación rectilínea del sonido.

Esta se apoya en el principio de Fermat, el cual dice que en un medio libre de obstáculos toda onda se propaga por la ruta más rápida, en otras palabras la línea recta entre dos puntos (Pellis et al., 2011).

2) Las ondas esféricas pueden aproximarse por ondas planas.

Las ondas esféricas se comportan como una onda plana que decrece su amplitud en una relación de uno dividido la distancia recorrida desde la fuente sonora (Pellis et al., 2011).

3) Los fenómenos de difracción son poco importantes.

En los casos de análisis en los cuales la dimensiones de los muros del recinto sean muy grandes comparadas con la longitud de onda del sonido, es posible aplicar una descripción geométrica de las reflexiones (Pellis et al., 2011).

4) Reflexión.

Esta hipótesis se basa en que si en recorrido de un rayo se encuentra un obstáculo que no forme parte del movimiento ondulatorio, o en otras palabras, no entra en resonancia, parte de la energía acústica rebota, generando el fenómeno de la reflexión. Si la superficie con la que incide el rayo es lisa, el rayo se refleja en una sola dirección, lo que se conoce como reflexión especular, siguiendo las leyes de Snell. Si la superficie de incidencia es de textura rugosa, el rayo se refleja en varias direcciones, lo que se conoce también bajo el nombre de reflexión difusa, siguiendo la ley de Lambert (Pellis et al., 2011).

5) Incoherencia.

Esta hipótesis sobre la que se basa el modelo teórico de la acústica geométrica consiste en no tomar en consideración los fenómenos de interferencia, por lo que si varios frentes sonoros inciden en un punto al mismo tiempo, no se consideran las relaciones entre sus fases, en cambio, se suman sus intensidades (Pellis et al., 2011).

### **3. Teoría ondulatoria.**

De las tres teorías la teoría ondulatoria, también conocida como teoría de ondas de la acústica de auditorios, es la teoría físicamente más precisa. Esta teoría establece que el volumen de aire del espacio de una sala es un sistema vibrante lineal de parámetros distribuidos (Pellis et al., 2011).

Gracias al desarrollo y enrobustecimiento del estudio de las ondas, ha llevado a una mejor comprensión de la a influencias del espacio y del contorno de una sala cuando una fuente genera

sonido dentro de ella. Esta teoría se basa en la resolución de la ecuación de onda con condiciones de frontera dados por el espacio real, lo que se convierte en un arma de doble filo, ya que la solución analítica de la ecuación se vuelve únicamente posible para salas de geometría muy sencilla y para condiciones de frontera ideales (Pellis et al., 2011).

En espacios arquitectónicos que presenten geometrías complicadas por la disposición de muros, o bien diseños muy extravagantes basados en arquitectura orgánica, generan dificultades demasiado complejas para ser analizadas de forma práctica y recurrente, ya que cada modelo matemático sería diferente, ya que sería necesario tener en cuenta todos los detalles de la reflexión, absorción, refracción y difusión del sonido en todos los puntos de las superficies del recinto analizado, así como todas las propiedades físicas de la fuente sonora (Pellis et al., 2011).

## **I. Materiales y dispositivos utilizados para el tratamiento acústico**

### **1. Materiales absorbentes.**

Los materiales absorbentes son aquellos materiales porosos formados por entramados de poros o canales conectados entre sí. En los últimos años se ha popularizado su uso en distintas áreas por sus propiedades térmicamente aislantes y acústicamente absorbentes, por lo que se utiliza para el tratamiento acústico, aislamiento acústico, automoción, aires acondicionados, entre otros (Bernhard, 2021). La característica de absorción de ondas sonoras de estos materiales permite reducir el tiempo de reverberación en recintos de manera eficiente, principalmente para frecuencias medias y altas, siempre en dependencia del espesor y material (Carrión, 2020).

Los materiales absorbentes de espesor estándar colocados sobre una pared rígida, tienen la peculiaridad de presentar un pobre desempeño en cuanto a la absorción a bajas frecuencias, sin embargo su capacidad de absorber bajas frecuencias mejora al separar este tipo de materiales de la pared del recinto. Si se desea reducir el tiempo de reverberación para frecuencias bajas, se recomienda utilizar otro tipo de elementos como lo son los resonadores (Carrión, 2020).

Existen ciertos parámetros estándar para la clasificación de los materiales como materiales absorbentes, ya que desde hace años se itera en la creación modelos para obtener el comportamiento acústico de materiales absorbentes. Los modelos actuales más básicos intentan modelar el comportamiento frecuencial de los materiales, utilizando como base la impedancia del material y su constante de propagación, las cuales son características intrínsecas de cada material. Estas características sirven para predecir el comportamiento de propagación y absorción de las ondas sonoras al colisionar con el material. Las pérdidas de energía se dan por la viscosidad que está relacionado con la transformación y disipación de la energía acústica en calor. (Alba et al., 2008).

Uno de los parámetros que determinan el comportamiento acústico de un material poroso o fibroso, es la resistencia al flujo del aire  $R$ , la cual puede ser descrita mediante la siguiente ecuación:

$$R = \frac{\Delta P}{F} \quad (11)$$

Donde:

R = resistencia al flujo del aire

$\Delta P$  = caída de presión

F = flujo de aire a través de la muestra.

Usualmente se utilizan materiales sintéticos porosos, tales como lana de roca, fibra de vidrio, poliéster o poliuretano, siendo este último procedente de petroquímicos, Una característica no favorable de las fibras de vidrio, en especial las de baja densidad, es el hecho de que pueden generar silicosis, al provocar que el cuerpo no pueda expulsar las fibras debido a que se incrustan en el aparato respiratorio. En el caso de las lanas minerales puede ser posible que generen neumoconiosis si se tiene contacto prolongado sin protección (Navacerrada et al., 2016). La lana de roca tiene ciertas ventajas, lo que la hace una de las soluciones más utilizadas en la actualidad como material absorbente, dentro de estas podemos encontrar su largo periodo de vida útil, su reciclaje para la generación de más lana minera y su excelente desempeño como absorbente acústico (Navacerrada et al., 2016).

La resistividad al flujo de aire es la resistencia al flujo del aire por unidad de espesor del material en la dirección del flujo de aire, este parámetro puede ser analizado y calculado mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{\Delta PS}{Fd} \quad (12)$$

Donde:

$\sigma$  = resistencia al flujo de aire por unidad de espesor del material

$\Delta P$  = caída de presión

F = flujo de aire a través de la muestra

S = área de superficie de material que incide con el flujo de aire

d = espesor del material en dirección del flujo de aire

## 2. Resonadores.

Los resonadores acústicos son elementos en forma de panel que proporcionan una curva de absorción con un valor máximo a una determinada frecuencia objetivo, para las cuales fue diseñado el resonador, esta frecuencia es llamada "frecuencia de resonancia", y está en dependencia de las características físicas y geométricas del resonador acústico. Cuentan con un buen desempeño para la absorción de ondas sonoras de frecuencias bajas, usualmente inferiores a los 500 Hz, reduciendo así el tiempo de reverberación de las mismas (Carrión, 2020).

La influencia sobre la absorción acústica de un resonador se ve en dependencia del espesor de la placa del mismo, además del espesor de la cavidad de aire y por la caracterización de los materiales absorbentes utilizados para la fabricación del resonador acústico. Existen resonadores de membrana, resonadores de cavidad múltiple y resonadores de cavidad simple (Arau, 1997).

## 1) Resonadores de membrana

Los resonadores de membrana son aquellos resonadores formados por un panel de un material no poroso y flexible, el cual es colocado a una cierta distancia de la pared rígida, con el fin de dejar una cavidad de aire entre ambas superficies, usualmente como material para el panel se utiliza madera (Carrión, 2020).

Este tipo de resonadores funciona cuando una onda sonora incide sobre el panel generando que éste entre en vibración como respuesta a la excitación producida. Esta vibración, cuya amplitud depende principalmente de la frecuencia de la onda sonora, es máxima a la frecuencia de resonancia, la cual está en dependencia de la naturaleza del panel y distancia entre el panel y la pared, esta resonancia genera que el panel presente deflexiones de vaivén, lo que genera la pérdida de una parte de la energía sonora incidente, que se disipa en forma de calor (Carrión, 2020).

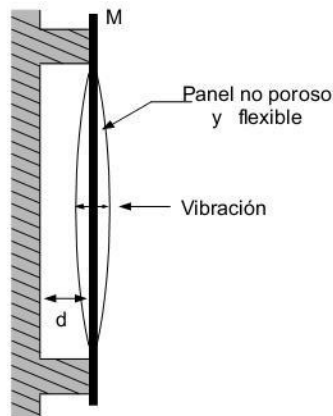


Figura 6. Esquema básico de un resonador de membrana o diafragmático (Carrión, 2020)

Para los resonadores de membrana o diafragmáticos es posible calcular la frecuencia de resonancia teórica, con el fin de afinar los diseños de los modelos antes de realizar su fabricación, mediante la siguiente ecuación:

$$\alpha(\phi) = \frac{4\mu * \cos(\phi)}{(\mu * \cos(\phi) + 1)^2} \quad (13)$$

Donde:

$\alpha$  = frecuencia de resonancia

$\mu$  = resistividad específica de la fibra del panel

$\phi$  = ángulo de incidencia del sonido

Para poder conocer el valor del coeficiente de absorción en función del ángulo de incidencia del panel de resonancia, se puede obtener mediante la aproximación de Kosten mediante la siguiente ecuación:

$$\alpha(\phi) = \frac{4\mu * \cos(\phi)}{(\mu * \cos(\phi) + 1)^2 + \left(\frac{\omega m * \cos(\phi)}{\rho c} - \frac{c}{\omega L}\right)^2} \quad (14)$$

Donde:

$\alpha$  = frecuencia de resonancia

$\mu$  = resistividad específica de la fibra del panel

$\phi$  = ángulo de incidencia del sonido

L = espesor de la cavidad de aire

m = masa unitaria de panel perforado

## 2) Resonador de cavidad simple de Helmholtz

Los resonadores de cavidad simple están formados por una cámara rígida cerrada de aire conectada a la sala, a través de una abertura o diafragma estrecho de longitud "Lz sección "S". Para este tipo de resonadores la frecuencia de resonancia no depende de la forma de la cavidad del resonador. Cuando las dimensiones del resonador son menores a la longitud de onda y la apertura no es muy grande, la frecuencia de resonancia puede describirse como el cociente de la sección de la abertura del resonador entre el producto de la longitud efectiva del cuello por el volumen de la cámara (Rossell et al., 2005).

Cuando la longitud de onda es superior a la longitud del cuello del resonador, el aire en el cuello se moverá como una unidad. Si la longitud de la onda sonora es significativamente mayor a la raíz cúbica del volumen de la cámara del resonador, la presión acústica radiará el sonido como una fuente simple. En el cuello del resonador se generan pérdidas por viscosidad, sin embargo cuando el cuello tiene un diámetro mayor a 1cm, estas pérdidas son despreciables, ya que en general son menores que las asociadas con la radiación (Rossell et al., 2005).

La frecuencia de resonancia de los resonadores de cavidad simple de Helmholtz puede describirse mediante la siguiente ecuación:

$$\omega_0 = c \sqrt{\frac{S}{L'V}} \quad (15)$$

Donde:

$\omega_0$  = frecuencia de resonancia

S = sección de cuello del resonador de cavidad

L' = longitud efectiva del cuello del resonador de cavidad

V = volumen de cámara de resonador

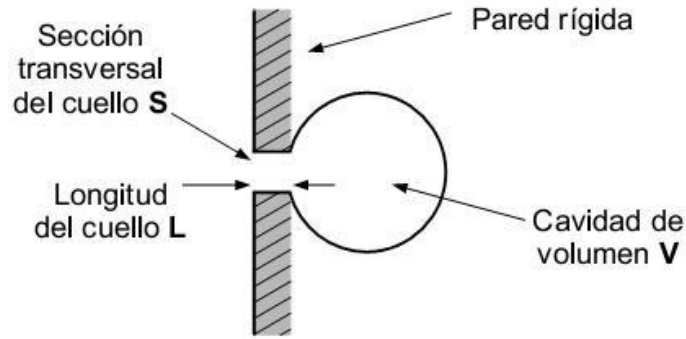


Figura 7. Esquema básico de un resonador de cavidad simple de Helmholtz montado en una pared (Carrión, 2020)

### 3) Resonador de cavidad múltiple de Helmholtz a base de paneles ranurados

Este tipo de resonadores están formados por un panel no poroso y rígido, dicho panel tiene la peculiaridad de estar perforado, ya sea mediante agujeros circulares o ranuras, al igual que los resonadores de membrana, se sitúa el panel a cierta distancia de una pared rígida, con el fin de generar una cámara de aire entre ambos elementos (Carrión, 2020).

Los resonadores de cavidad múltiple básicamente funcionan como un grupo de resonadores de cavidad simple que comparten una misma cavidad. Esta cavidad o cámara de aire funciona a modo de elemento acoplador entre las diferentes perforaciones del panel. Este resonador también cuenta con la característica de que el elemento que entra en vibración con la onda sonora al momento de su incidencia es el aire contenido en la cámara y no el panel como sucedía en el caso de los resonadores de membrana (Carrión, 2020).

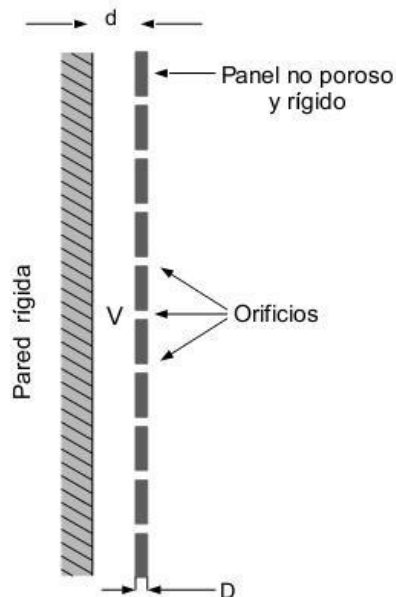


Figura 8. Esquema básico de un resonador de cavidad múltiple de Helmholtz a base de paneles perforados (Carrión, 2020)

#### 4) Resonador de cavidad múltiple de Helmholtz a base de listones

Este tipo de resonadores está formado por un conjunto de listones, los cuales se colocan espaciados y se montan dejando espacio a una pared rígida con el fin de dejar interpuesta una cámara de aire. Los resonadores de cavidad múltiple de Helmholtz a base de listones funcionan de manera similar a los resonadores múltiples de paneles ranurados con respecto a que el aire contenido en los espacios intermedios entre listones es el que entra en vibración al momento de la incidencia de la onda sonora (Carrión, 2020).

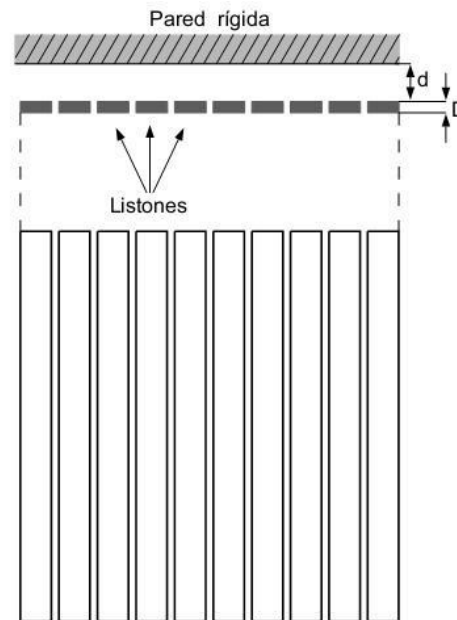


Figura 9. Esquema básico de un resonador de cavidad múltiple de Helmholtz a base de listones (Carrión, 2020)

### 3. Difusores.

Otro elemento importante dentro del tratamiento acústico son los difusores, estos buscan generar efectos muy diferentes al buscado por los materiales absorbentes. Los difusores son artefactos que se utilizan dentro de la acústica de salas con el fin de repartir de forma equitativa la energía sonora en torno a la superficie reflectora. Se utilizan usualmente para conseguir que el campo reverberante de un recinto llegue a todos los puntos del mismo, obteniendo así un sonido brillante y envolvente. El uso de difusores es una gran herramienta en el tratamiento acústico para poder tratar los ecos flotantes, ya que no elimina la energía acústica de las ondas con tiempos de reverberación altos, sino que las redirecciona y esparce, evitando que se vuelvan molestas (Galiana & Gordillo, 2019).

Algunos difusores logran que los tiempos de reverberación se igualen para un amplio rango de frecuencias, evitando que exista mayor permanencia de una frecuencia determinada dentro del recinto, generando un campo más uniforme, lo que brinda una mejor sensación e inmersión al

oyente, mejorando el confort acústico (Galiana & Gordillo, 2019).

Existen distintos tipos de difusores, entre estos podemos encontrar los siguientes:

#### 1) Difusores policilíndricos

Este tipo de difusores se encuentra compuesto por superficies curvadas con un radio inferior a 5 metros, lo que ayuda a que no se comporte como un reflector de sonido. Al reducirse el radio del difusor, la zona de cobertura del mismo aumenta, y el nivel asociado a cada reflexión es menor (Galiana & Gordillo, 2019).



*Figura 10.* Difusor policilíndrico

(Galiana & Gordillo, 2019)

#### 2) Difusores MLS

Estos difusores se basan en la secuencia pseudoaleatoria "Maximum Length Sequence", por la cual recibe su nombre el difusor, esta secuencia MLS está compuesta por dos valores absolutos que se alternan entre 0 y 1, o bien entre 1 y -1. El diseño de los difusores MLS se caracteriza por tener una serie de tramos en una superficie rígida, con dimensiones del orden de la mitad de la longitud de onda sobre la que se quiere actuar, los espacios se alternan brindando incisiones de una profundidad igual a la de la cuarta parte de la longitud de onda (Bongiovanni et al., 2011).

Una de las deficiencias de este tipo de difusores es el hecho de que únicamente pueden actuar sobre un rango de frecuencias de aproximadamente una octava. Otra deficiencia que presentan los difusores MLS es que para frecuencias bajas en las que se tiene longitudes de onda muy grandes, se requiere que el difusor adopte dimensiones muy grandes, lo que genera que sea impráctico (Galiana & Gordillo, 2019).



Figura 11. Difusor "Maximum Length Sequence"(MLS)  
(Galiana & Gordillo, 2019)

### 3) Difusores QRD

Los difusores QRD pueden ser encontrados en dos variantes, unidimensionales y bidimensionales. Los difusores unidimensionales están diseñados para producir difusión en un único plano espacial, a diferencia de los difusores QRD bidimensionales, que suelen tener una disposición geométrica de su estructura que produce difusión en todas las direcciones posibles (Bongiovanni et al., 2011).

Al igual que los difusores MLS poseen ranuras, sin embargo la profundidad de las ranuras en los difusores QRD está en dependencia de una secuencia matemática que genera una serie repetitiva, la cual genera difusión para unas frecuencias concretas (Galiana & Gordillo, 2019).

La profundidad de las ranuras está descrita por la siguiente ecuación:

$$S_n = (n^2) \bmod(p) \quad (16)$$

Donde:

$S_n$  = profundidad de la ranura

$p$  = número primo

$n$  = número entero desde 0 hasta  $p-1$

mod = función que devuelve el residuo de la división entre  $n^2$  y  $p$



Figura 12. Difusor QRD de madera

(Galiana & Gordillo, 2019)

#### 4) Difusores PRD

Los difusores "primitive root diffusor" tiene la peculiaridad de no presentar simetría a lo largo de su estructura, son similares en funcionamiento a los difusores QRD unidimensionales, sin embargo varía en el calculo de la profundidad de las ranuras (Bongiovanni et al., 2011).

La profundidad de las ranuras está descrita por la siguiente ecuación:

$$S_n = (g^n) \bmod(p) \quad (17)$$

Donde:

$S_n$  = profundidad de la ranura

$p$  = número primo

$n$  = número entero desde 0 hasta  $p-1$

$g$  = raíz primitiva de  $p$

$\bmod$  = función que devuelve el residuo de la división entre  $g^n$  y  $p$

Con este tipo de difusores la energía asociada a la reflexión especular de las ondas es muy baja, siendo prácticamente nula, por lo que hace que estos difusores PRD sean buenos para la cancelación de ecos en recintos (Bongiovanni et al., 2011).



*Figura 13.* Difusor "primitive root diffusor"(PRD)  
(Bongiovanni et al., 2011)

#### J. Paneles acústicos

Los paneles acústicos son elementos compuestos utilizados para la absorción de ondas acústicas, usualmente se componen de una estructura rígida o bastidor, un relleno poroso, lo que brinda propiedades de absorción acústica, y además se componen por un recubrimiento de tela porosa, para permitir el ingreso de las ondas de sonido y además cumpliendo una función de

contenedor para el material absorbente. Dentro de los materiales para paneles acústicos existen los materiales porosos y los resonadores (Bernhard, 2021).

Los materiales absorbentes son todos aquellos compuestos por entramados de poros o canales conectados entre sí. La pérdida de energía en este tipo de materiales se da por la viscosidad que transforma y disipa la energía acústica en calor, haciendo que la energía de las ondas de ruido sea disminuida cada vez que entra en contacto con el material, disminuyendo la energía con la que regresa al oyente. Dentro de los materiales absorbentes se encuentra la lana de roca, fibra de vidrio, poliéster, resina de melamina y espuma de poliuretano. La absorción de los materiales depende de la frecuencia, un grosor bajo del material absorbente usualmente es bueno controlando altas frecuencias, y los espesores mayores son mejores para bajas frecuencias. Los materiales absorbentes se pueden caracterizar por porosidad, resistencia al flujo de aire y factor de estructura (Bernhard, 2021).

Los paneles acústicos constituidos por materiales absorbentes tienen como característica principal el coeficiente de absorción. El coeficiente de absorción es una característica propia del material, varía en un rango de 0 a 1, donde un coeficiente de absorción acústica de 0 significa que el material es completamente reflectante, y si tiene un valor de 1 significa que el material es completamente absorbente. El coeficiente de absorción acústica también denominado por la letra griega alfa no es un dato único por material, este coeficiente se especifica por material y por banda frecuencial, usualmente dado para frecuencias de 125Hz, 250Hz, 500Hz, 1000Hz, 2000Hz y 4000Hz, esto con el fin de cubrir la mayor parte de las frecuencias presentes en la voz humana y sonidos comunes (Bernhard, 2021).

## IV. METODOLOGÍA

### A. Recopilación de información preliminar

El enfoque de la investigación nació de la teoría de que los materiales porosos, debido a sus propiedades y características físicas, constituyen parte importante del tratamiento acústico, en particular con el tratamiento o control de la reverberación en recintos cerrados. Además se entendió la importancia de buscar alternativas adicionales debido a que el material comúnmente utilizado para el tratamiento acústico es la lana mineral, fibra de vidrio o espumas, los cuales son materiales que una vez son desechado se convierten en un problema medioambiental al no ser biodegradables y permanecer mucho tiempo en los vertederos, además de esto, materiales como la lana mineral, fibra de vidrio o asbesto, pueden generar enfermedades respiratorias, si se manipulan sin una correcta protección, tales como la asbestosis, neumoconiosis, etc. Para poder entrar en contacto con la fibra de vidrio se debe utilizar equipo de protección personal, ya que pueden generar irritación al entrar en contacto con la piel.

En la búsqueda de otras soluciones de materiales que no contaran con las problemáticas de los materiales comúnmente utilizados para el relleno de paneles para el tratamiento acústico, en específico del tiempo de reverberación en recintos cerrados, se encontró que los hongos se encuentran constituidos naturalmente por una red de estructuras denominadas hifas, las cuales son filamentos naturales generados a partir de esporas, estos filamentos se entrelazan formando una estructura más compleja llamada micelio. EL micelio tiene características estructurales similares a la lana mineral o fibra de vidrio, por lo que se consideró como una buena opción para poder buscar resultados similares a partir de materia orgánica.

La fibra de vidrio o lana mineral son materiales que cuentan con características físicas que les permiten ser excelentes materiales acústicamente absorbentes, ya que están constituidos por filamentos entrelazados que generan una estructura más compleja llena de cavidades de aire, y a lo largo de los años se ha popularizado su uso debido al buen desempeño que presentan. Con base en el espesor de las planchas de estos materiales es el comportamiento y desempeño de los mismos para distintas frecuencias. Además de ser utilizados para el tratamiento acústico como relleno de paneles para el control de la reverberación, también son utilizados como relleno en muros de tablayeso o Durock, con el fin de buscar el aislamiento acústico, igualmente por sus propiedades absorbentes.

Posterior a la investigación del micelio y la identificación de características físicas similares a las características físicas de los materiales más utilizados para la realización de paneles acústicos, se tuvo la teoría de que el micelio de hongo podría funcionar de manera similar, como un material absorbente, teniendo la ventaja frente a la lana mineral o fibra de vidrio que al momento de ser desechado incluso podría servir como abono y se degradaría con facilidad, contribuyendo a la reducción de volumen de desechos, ya que el micelio al ser un material orgánico cerraba su ciclo de vida de manera amigable con el medio ambiente.

Se consideraron otras variables importantes a tomar en cuenta como la neutralidad frente a la salud humana, por lo que se buscó una especie de hongo que no fuera venenoso y sus esporas no tuvieran efectos perjudiciales para la salud, debido a esto se tomó la decisión de seleccionar una especie dentro de los hongos comestibles. En Guatemala existen comunidades apoyadas por cooperativas que se dedican a la reproducción, siembra, cosecha y venta de hongos. Se buscó la

mentoría de la doctora Patrizia Lupo, directora del departamento de microbiología del la Universidad del Valle de Guatemala, la cual sugirió el uso del hongo ostra, científicamente conocido como *Pleurotus ostreatus*, éste hongo es comestible y de rápido crecimiento. En el departamento de Chimaltenango, Guatemala, se practica la reproducción del micelio primario sobre sorgo, popularmente conocido como maicillo, el cual es empaquetado en bolsas de 1 lb y es vendido para el cultivo en casa de este hongo comestible. Debido a que la especie *Pleurotus Ostreatus* es un hongo comestible, además existe documentación y estudios científicos que lo avalan como una especie no dañina para la salud humana, además de ser una especie de rápido crecimiento.

Surgió la interrogante de cómo evitar el crecimiento y fructificación del hongo, ya que media vez exista humedad el *Pleurotus ostreatus* seguiría creciendo tanto de altura como en su área superficial, y llegado el tiempo de madurez empezarían a crecer el fruto en forma de platillo en capas, que es lo que se come. El *Pleurotus ostreatus* tiene la característica de desarrollarse adecuadamente en temperaturas inferiores a 30 °C, siendo los 35 °C la temperatura crítica para el hongo, ya que no puede sobrevivir a temperaturas mayores a ésta. Por lo que se planteó como parte del proceso de elaboración de los paneles el poder someter al micelio a una temperatura superior a los 35 °C con el fin de que el hongo muriera y pudiera ser utilizada su estructura de soporte como un polímero orgánico inerte, lo que eliminaba la preocupación de que a lo largo del ciclo de vida del panel el hongo expidiera esporas en el recinto, lo que no hubiera sido saludable para los ocupantes, ya que se hubieran podido producir afecciones respiratorias, y especialmente hubiera sido un problema si alguno de los ocupantes fuera alérgico.

## **B. Iteraciones fallidas**

### **1. Iteración No. 1.**

Con base en las investigaciones se determinaron ciertos factores claves para permitir el correcto crecimiento del hongo, dentro de estos factores fue un medio nutritivo llamado también como sustrato, además era necesario poder mantener un ambiente húmedo para que el hongo se desarrollara correctamente. También era importante según varias bibliografías, colocar el hongo en un ambiente obscuro alrededor de los 25 °C en el periodo de incubación, el cual es el periodo donde las hifas empiezas a crecer y entrelazarse para dar lugar al micelio.

Se procedió a realizar el pedido de una libra de micelio primario sobre sorgo a una comunidad de Chimaltenango, este micelio primario tenía textura dura, similar a la de la plastilina solidificada, se guardó el paquete en un lugar obscuro y lo más seco posible, con el fin de poder realizar la siembra sobre sustrato y que el micelio no comenzara a proliferar en un ambiente no controlado. Se adquirió un saco de heno y mazorca de maíz, el cual se tenía contemplado para ser utilizado como medio nutritivo para que el hongo pudiera desarrollarse correctamente.



*Figura 14.* Paquete de micelio primario sobre sorgo

Dos semanas después de la compra del micelio primario se sacó de su zona de almacenaje, al observar la bolsa se encontraron roturas y un brote de micelio puro fuera de la bolsa, la caja donde se había guardado estaba cubierta de esporas y el hongo presentaba un crecimiento amorfo. Este accidente permitió la comprensión de la importancia del control de las condiciones a las que estaba el hongo, ya que debido a la humedad del ambiente el hongo había entrado en etapa de incubación. Además el sorgo, que es un grano, había servido como el medio de alimento o sustrato del hongo para permitirle su rápido crecimiento. Además de esto se comprendió que las hifas del hongo tienden naturalmente a formar estructuras similares a la de los corales, media vez no encuentren limitantes de espacio, por lo que era necesario poder guiar el crecimiento para darle la forma deseada de plancha para poder ser utilizado dentro de paneles, ya que una estructura tipo coralina hubiera dificultado la obtención de datos y cálculos para la especificación de los paneles de hongo. El micelio primario dentro de la bolsa tuvo la peculiaridad de crecer y adoptar la forma de la bolsa en la que estaba contenido, lo que permitió observar que este hongo puede adoptar cualquier forma, media vez se restrinja su crecimiento a cierta forma determinada.

Con el fin de seguir entendiendo el comportamiento de crecimiento del *Pleurotus Ostreatus* se volvió a almacenar la bolsa de micelio y se almacenó durante dos semanas más, al retirar la bolsa nuevamente era evidente que media vez el hongo tenga una fuente orgánica de alimentación, humedad y obscuridad iba a seguir desarrollándose indeterminadamente, hasta toparse con condiciones de falta de nutrientes, humedad o temperaturas no idóneas. Por lo que se afirmó la idea de la búsqueda de una manera para poder inhibir el crecimiento del *Pleurotus ostreatus*, ya que no hubiera sido funcional tener un panel acústico que estuviera constantemente en crecimiento y que pudiera esparcirse más allá del espacio designado, afectando la estética y comodidad de los ocupantes del recinto.



*Figura 15.* Crecimiento de hifas fuera de la bolsa formando una estructura coralina

## **2. Iteración No. 2.**

Con base en los aprendizajes adquiridos posterior a la iteración No.1 se buscó un sustrato que pudiera dar estructura al crecimiento del hongo y que fuera lo más moldeable posible, con el fin de poder acoplarse a la forma del recipiente donde se podría. Con base en diversas literaturas se decidió utilizar el heno, ya que era de los sustratos predilectos para el cultivo de hongo ostra. Sin embargo con el fin de obtener resultados más estéticos se decidió recortar el heno en trozos pequeños, además que esto permitía que el heno se ajustase de mejor manera a la forma del molde y se generase una red más porosa.

Se adquirieron charolas plásticas para que sirvieran de molde para la colocación del micelio y el sustrato, para que al momento de que las hifas empezaran a crecer el micelio adoptara la forma de los moldes rectangulares, una consideración importante que se tuvo fue que las bandejas debían ser plásticas sin agujeros, con el fin de poder retener la mayor humedad posible. Las charolas se recubrieron de papel aluminio para permitir condiciones de obscuridad al cultivo además de permitir un desmoldado fácil a la hora de tener que retirar los paneles de los moldes.



*Figura 16.* Moldes plásticos recubiertos con aluminio

Posterior a limpiar el heno lo mejor posible, retirarle cualquier resto no deseado de materia orgánica y cortar las tiras de heno lo más pequeñas posibles, se procedió a hervir agua y colocar todos los pedazos de heno dentro, el tiempo que se colocó el heno en el agua hirviendo fue de 45

min, con el fin de poder esterilizarlo y eliminar así la mayor parte de bacterias y microorganismos no deseados, para que el cultivo de hongo ostra fuera lo más puro posible y que no se llegase a presentar contaminación de algún moho u bacteria que compitiera por el suministro alimenticio del sustrato, con el fin de que el *Pleurotus ostreatus* se desarrollase de la mejor manera y tener el cultivo controlado y puro para poder realizar las mediciones y no contar con más factores de error que pudieran influir en los resultados.



*Figura 17.* Proceso de esterilización mediante agua hirviendo del sustrato nutritivo para la eliminación de bacterias y microorganismos no deseados

El heno se dejó enfriar, ya que el hongo es sensible a temperaturas arriba de los 35 °C, luego se colocó una capa de heno húmedo, luego se espolvoreó el sorgo lleno de micelio primario sobre el heno, luego se colocó otra capa de heno y luego otra capa de sorgo. El panel llegó a una altura de 4 cm y se planeaba colocar otra capa de heno y otra capa de micelio luego de que el micelio empezara a expandirse. Se procedió a tapar el molde con aluminio para brindar condiciones de penumbra y se almacenaron los paneles en una bodega oscura. Se tuvo cuidado durante el tiempo de incubación de colocar los moldes bien tapados en alto, para que no ingresara ningún insecto en el cultivo y lo contaminara.



*Figura 18.* Moldes plásticos rellenos de heno, sorgo y micelio primario

Los paneles se dejaron almacenados por dos semanas, antes de volver a abrirlo para poder

volver a humedecer el sustrato, sin embargo a la hora de abrir los paneles se encontraron larvas blancas y el cultivo presentaba un olor bastante desagradable, las hifas no se desarrollaron correctamente y empezaron a descomponerse, el micelio se tornó de color café en lugar de blanco. Se descubrió que el sorgo con micelio madre utilizado para el cultivo había estado contaminado y debido a esto a pesar de haber esterilizado el sustrato se filtraron microorganismos que evitaron el correcto desarrollo del *Pleurotus ostreatus*. Se decidió documentar el resultado fallido y se procedió a tirar todo el sustrato engusanado.

Dentro de los aprendizajes recopilados se puede destacar la importancia del cuidado de la pureza del micelio primario, ya que la bolsa de sorgo seguramente no había sido correctamente empacado en la comunidad de Chimaltenango debido a que no contaban con equipo especializado, ni una zona inocua para la realización de la reproducción del micelio primario. Se estableció como tiempo límite admisible una semana desde el tiempo de compra de las bolsas de sorgo con micelio hasta el tiempo de su siembra en el sustrato, con el fin de evitar que el micelio primario sufriera contaminación.



*Figura 19.* Desecho de intento de generación de panel acústico con heno y micelio primario

### **3. Iteración No. 3.**

Debido a la poca maleabilidad y poco aspecto estético del heno, además de su lento proceso de esterilización, se tomó la decisión de utilizar otro sustrato como medio nutritivo, dentro de las opciones analizadas como sustituto del heno se consideró el papel higiénico, el algodón, esponja y pulpa de zanahoria, finalmente se escogió utilizar algodón debido a su estructura porosa, con el fin de que al momento de crecer las hifas fueran creciendo y consumiendo la estructura del algodón tomando la misma forma.

Se decidió realizar una prueba a pequeña escala utilizando algodón como sustrato y los mismo moldes plásticos utilizados en la iteración No. 2, la razón por la que se decidió realizar una prueba a pequeña escala fue para determinar si el algodón realmente funcionaba como medio nutritivo, se partió del benchmark del uso de algodón para la siembra de frijol en frascos, el cual funciona bien y le permite a la planta de frijol poder crecer de manera adecuada por varias semanas. El algodón presentaba la ventaja de tener una estructura porosa, ser fácilmente moldeable, poderse trabajar en capas, y ser ligero, los cuales era atributos importantes para el proyecto.

Se procedió a comprar otra libra de sorgo con micelio primario con el fin de sembrarlo la misma semana de la compra, para evitar que el cultivo llegara a contaminarse como en la iteración No. 2. Dos días después de la recepción del sorgo, se procedió a colocar algodón nuevo en las bandejas plásticas, las cuales previamente se habían lavado, se envolvió el molde de plástico en papel plástico traslúcido para poder llevar un mejor control del crecimiento del hongo sobre el algodón, debido a la importancia de que durante el periodo de incubación el hongo estuviera en condiciones de obscuridad se seleccionó un mueble dentro de la bodega con el fin de generar la penumbra requerida permitiendo utilizar el plástico transparente para poder tener un mejor control sobre el crecimiento de la siembra.

Se espolvoreó el sorgo con el micelio primario sobre el molde y se colocó una capa de algodón recién desempacado, posteriormente se volvió a agregar más sorgo con micelio y se colocó otra capa de algodón, dejando una muestra de 8 cm aproximadamente. Se tomó la decisión de no adicionarle agua debido a la experiencia previa de la iteración No. 1, en la cual el micelio puro nació a través de la bolsa absorbiendo la humedad del ambiente.

Se cubrió el panel con papel film con el fin de que el cultivo no perdiera humedad, además de que no ingresase ningún contaminante exterior, el panel se almacenó durante dos semanas, luego de las dos semanas se revisó y no había habido crecimiento de hifas dentro del algodón, por lo que se decidió dejar una semana más. Al transcurso de tres semanas posterior al sembrado del hongo, no había habido ningún crecimiento, por lo que se tuvo la teoría que el papel film era un aislante de la humedad muy bueno, por lo que no la dejaba ingresar. Se decidió aperturar agujeros sobre el film que recubría el molde, con el fin de dejar ingresar humedad, lo cual fue una decisión arriesgada, ya que iba a permitir el ingreso de contaminantes externos al cultivo, luego de una semana no hubo crecimiento.



*Figura 20.* Sembrado de sorgo con micelio primario en sustrato de algodón luego de tres semanas

Se tomó la decisión de abrir por completo el papel film que recubría el molde y se utilizó un aspersor para poder humedecer el algodón lo más uniformemente posible, luego de haber mojado el algodón se procedió a cerrar nuevamente con papel film. Una semana después se volvió a examinar el cultivo y las hifas habían empezado a crecer y extenderse por el algodón, también se identificó que el cultivo se había contaminado debido a que se había quedado expuesto el contacto con el ambiente. Debido a que era una prueba se decidió seguir con el cultivo para poder probar técnicas y entender mejor los requerimientos prácticos del *Pleurotus ostreatus*.

Al observar nuevamente el cultivo tres días después fue notorio que el algodón había retenido gran parte de la humedad y el micelio no tenía suficiente agua para poder desarrollarse correctamente, ya que el crecimiento había sido significativamente lento, por lo que se procedió a atomizar agua hasta humedecer por completo el cultivo. Cuatro días después se analizó nuevamente el crecimiento del hongo y sorprendentemente el crecimiento y expansión había sido mayor que todas las semanas anteriores juntas, por lo que se comprendió el alto nivel de agua requerido por el hongo para crecer utilizando un sustrato de algodón.



*Figura 21.* Micelio en etapa de incubación cubriendo el sustrato de algodón

Los resultados del uso del algodón fueron bastante favorables, debido a que permitía retener agua por tiempo prolongado, además de ser fácilmente trabajable y además brindaba una estructura porosa en la cual las hifas podían crecer imitando la estructura y además se acoplaba de manera fácil a la forma del molde. Debido a estas características se decidió continuar con el algodón para la siguiente prueba, sin embargo debido a lo aprendido en la tercer iteración se identificó como un punto clave el mantener altos niveles de humedad en el algodón, para permitir el correcto crecimiento del micelio a través del algodón.

### **C. Iteración exitosa**

Con base en los resultados obtenidos de la iteración No. 3 se decidió proceder con las pruebas a gran escala, debido a que ya se había comprobado que el algodón era un buen sustrato y ya se conocían las condiciones necesarias para que el *Pleurotus Ostreatus* pudiera crecer adecuadamente. Uno de los aprendizajes importantes obtenidos de las iteraciones pasadas fue la importancia de la calidad y forma del recipiente que iba a funcionar como molde, este debía poder ser fácil de abrir y cerrar, además las dimensiones del mismo debían ser las más grandes posibles para agilizar el proceso. Se decidió comprar cuatro cajas plásticas de 20 cm de altura, 36 cm de ancho y 82 cm de largo, ya que fueron las de mayor tamaño que se lograron conseguir que tuvieran tapadera.

Debido a que se quería un cultivo puro, se compraron las bolsas de micelio primario con sorgo un día antes de que se fuera a ejecutar la siembra, también se revisaron meticulosamente para asegurarse que no existiera presencia de algún contaminante. Se procedió a esterilizar los recipientes plásticos con sus tapaderas con vapor de agua hirviendo, además se decidió poner a hervir el algodón, ya que en el empaque del mismo mencionaba que no estaba esterilizado.



*Figura 22.* Algodón hervido con el fin de esterilizarlo y evitar la aparición de contaminantes indeseados en el cultivo

Se tomó la decisión de adicionar papel higiénico como parte del sustrato para poder variar el relieve de los paneles, por lo que también se pusieron a hervir rollos de papel higiénico y posteriormente se dejaron escurrir y enfriar, ya que el hongo solo soporta 35 °c. Se colocó el papel higiénico en la base y sobre este se colocó el algodón.

Se espolvoreó el sorgo con el micelio primario en la base del molde y se fueron colocando capas de sustrato y capas de sorgo con micelio, con el fin de que se generara una distribución del micelio lo más homogénea posible. En las iteraciones anteriores se había utilizado únicamente una libra, sin embargo, con el fin de poder cubrir todas las zonas del panel en un tiempo corto, se utilizaron dos libras por molde, las cuales se espolvorearon lo más uniforme posible sobre y dentro del sustrato.



*Figura 23.* Sorgo con micelio primario espolvoreado sobre y dentro de las capas de sustrato

El algodón se encontraba saturado de agua, por lo que se tomó la decisión de no agregar más agua, ya que podría afectar el crecimiento. Se tapó cada recipiente con su respectiva tapadera, se envolvió en una bolsa plástica negra y se almacenaron los recipientes plásticos con el cultivo en una bodega oscura. Se decidió colocar los moldes envueltos en bolsas sobre bancos, con el fin de

elevar el cultivo del suelo reduciendo el riesgo de ingreso de plagas, además se cuidó que no estuviera en contacto con las paredes.



*Figura 24.* Moldes plásticos con el cultivo de hongo envueltos en bolsa plástica

Tres días después de la siembra del sorgo con micelio primario sobre el sustrato de algodón se revisó la cosecha, se identificó un crecimiento acelerado de las hifas por toda la estructura del algodón y la superficie del recipiente plástico, lo cual fue más rápido del tiempo esperado con base en la experiencia con las iteraciones pasadas. Se realizó un chequeo general para confirmar que no hubiera presencia de ningún crecimiento de algún contaminante como moho u otro tipo de hongo, el resultado de la revisión fue satisfactorio, ya que no se encontró presencia de ningún organismo no deseado. El micelio presentó un color blanco bastante pulcro, algo que llamó la atención fue el hecho de que las hifas naturalmente había formado entramados filamentosos sobre la superficie del algodón dando la apariencia de copos de nieve.



*Figura 25.* Cultivo de hongo *Pleurotus ostreatus* posterior a tres días de siembra sobre sustrato de algodón

Luego de confirmar el éxito del cultivo del hongo, se decidió cada tres días aumentar el espesor del cultivo adicionando capas de algodón esterilizado, por lo que se procedió a realizar este proceso dos veces en cada siembra, conforme avanzabas los días el crecimiento empezó a ser exponencial, por lo que las nuevas capas de algodón eran cubiertas y rellenas por entramados de hifas en toda su estructura, por lo que la densidad y distribución del micelio fue uniforme y cubrió el 100 % del cultivo, se logró generar un espesor de 7.5cm.



*Figura 26.* Cultivo de hongo *Pleurotus ostreatus* luego de dos semanas de haber sido sembrado sobre sustrato de algodón

Se realizó un diseño de bastidores para los paneles en Revit y se hizo la cuantificación del despiece. El agujero interno del bastidor donde iría el relleno de micelio de hongo ostra se hizo de 0.79 m x 0.36 m, dando una superficie efectiva de absorción de  $0.2844 m^2$ . La altura del bastidor para el panel se diseñó de 8 cm.

#### **D. Ensamblaje**

Se procedió a adquirir una plancha de plywood, debido a espesor reducido y su fácil manejabilidad. Se realizó el trazado de las piezas con base en el modelo de Revit, se procedió a cortar y ensamblar las piezas de los cuatro bastidores. En paralelo al trabajo de fabricación de bastidores, se colocaron al sol los paneles de micelio de hongo, los cuales luego de tres semanas estaban listos con el espesor deseado, con el fin de deshidratarlos, ya que durante el tiempo de incubación se mantuvieron bajo mucha humedad, por lo que si no se secaba bien se podían pudrir.



*Figura 27.* Bastidor de plywood para panel acústico de micelio de hongo ostra

Posterior a que el micelio de hongo se deshidratará se horneó por 45 min a  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ , con el fin de

inhibir el crecimiento de hifas y proliferación de esporas, básicamente se mató al hongo, el cual soportaba una temperatura máxima de 35 °C. Además a 350 °C cualquier agente de contaminación externo tampoco sobrevive. Debido a que la plancha de micelio de hongo tenía una longitud de 0.76 m se tuvo que cortar a la mitad, con el fin de poder colocar las planchas de micelio dentro del horno.

Las cuatro planchas de micelio de hongo se dejaron enfriar y posteriormente se colocaron en su respectivo bastidor. Las planchas de micelio presentaban cierta rigidez, debido a que las hifas habían generado una estructura relativamente densa. Se identificó que debido a la pérdida de agua en el proceso de deshidratación y posterior a ser horneado el micelio de hongo tenía un espesor de aproximadamente 7 cm, por lo que a la hora de colocarlo en el bastidor quedó 1 cm de aire, entre la parte superior del bastidor y la parte superior del micelio de hongo ostra.



*Figura 28.* Bastidor de playwood con relleno de 7 cm micelio de hongo ostra

Se forraron los paneles de tela de lino de color azul y verde, con el fin de que fuera estético, se escogió esta tela debido a que era una tela porosa, sin embargo era posible tensarla para dar un aspecto liso. Se notó que el peso de los paneles era significativo, por lo que en próximas iteraciones no se utilizaría playwood de media pulgada.

## **E. Mediciones**

Para la realización de mediciones con los paneles de micelio se buscó un recinto donde se presentase el fenómeno de la reverberación de forma notoria, además otra característica importante que se consideró fueron las dimensiones del recinto, ya que al contar únicamente con cuatro moldes hubiera sido muy tardado el proceso para tener una cantidad significativa de paneles acústicos de micelio de hongo para poder tratar un espacio con dimensiones amplias. El recinto escogido fue el salón del CIT 421, ya que cumplía con todas las características requeridas para poder realizar las mediciones de tiempos de reverberación. Fue bastante predecible que el salón 421 presentara reverberación debido a que el piso era de concreto pulido, dos de los muros eran de vidrio con perfiles de aluminio, el techo era de concreto, y la altura era considerable. Al ingresar al recinto y hablar se comprobó que se presentaba el fenómeno, haciendo que la interlocución fuera complicada y que al momento de hablar dos personas al mismo tiempo fuera casi imposible entender los mensajes.

Las mediciones se realizaron con la ayuda del Ingeniero Andrés Bernhard, quien estudió una maestría en acústica en la Universidad Politécnica de Valencia. Se decidió realizar pruebas de medición de tiempo de reverberación con el fin de poder tener un comparativo del comportamiento de las ondas de sonido dentro del CIT 421 sin tratamiento acústico y con tratamiento acústico. A

partir del tiempo de reverberación se identificó que se podía utilizar la ecuación de Sabine, Eyrin o Millington, despejando dichas ecuaciones y extrayendo los coeficientes de absorción para cada frecuencia.

Se recopilaron todas las medidas del salón CIT 421 con el fin de poder generar un modelo teórico del cuarto con la mayor cantidad de detalle posible para la realización de los cálculos. Se generó un modelo 3D en Revit del recinto, con el fin de poder analizarlo con detenimiento.

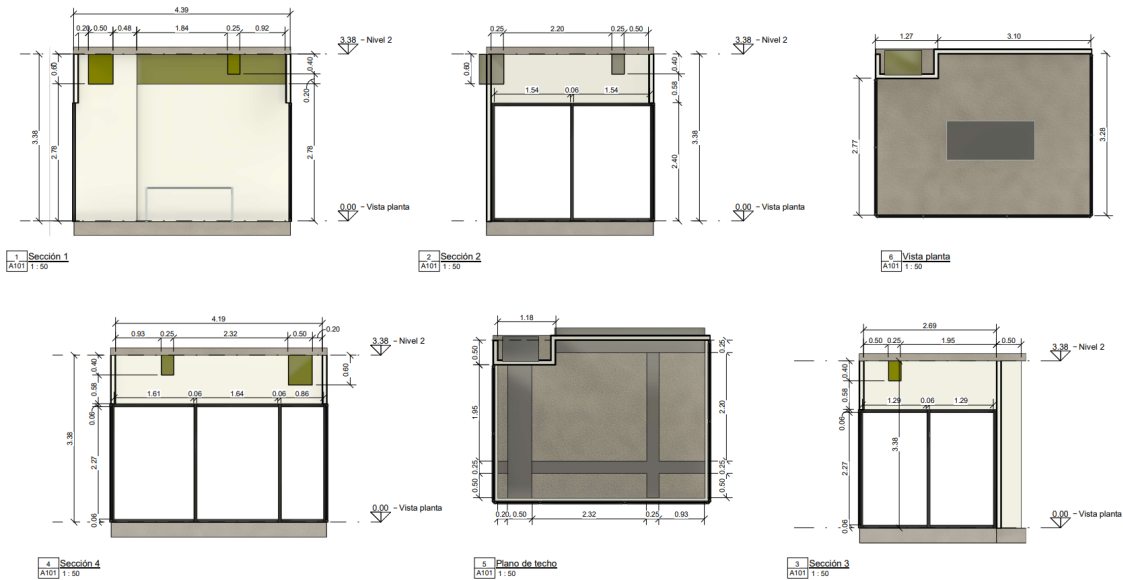


Figura 29. Secciones, vista en planta y de techo reflejado de CIT 421

El equipo utilizado para la medición consistió de un sonómetro “Environmental noise and building acoustic sound level meter”, marca Larson Davis, dicho equipo era un modelo 831 clase 1, el cual cuenta con la integración de las normas IEC 61672-1:2013, ANSI S1.4, ANSI S1.43. Contaba además anotación por voz, capaz de calcular Lden y CNEL, GPS, tiene la capacidad de generar 6 Ln, además del espectro normalizado.



Figura 30. Sonómetro marca Larson Davies Clase 1, utilizado para las mediciones de tiempos de reverberación de frecuencias en tercios de octava

Se utilizó un amplificador modelo BAS002 de la marca Larson Davis, el cual es compatible con las normas: ROHS, CE, ISO 140, ISO 3382, ASTM E90, ASTM E336, ASTM C426, ASTM E2235. Este amplificador permitía configurar el tipo de ruido que iba a ser emitido, se configuró para emitir ruido rosa, ya que para mediciones de tiempo de reverberación en recintos es importante lograr un campo difuso donde la densidad media de la energía que forman todas las ondas reflejadas es uniforme en cualquier punto del recinto cerrado.



*Figura 31.* Amplificador marca Larson Davis utilizado para emisión de ruido rosa para mediciones de tiempo de reverberación

Se utilizó como fuente dodecaédrica a la bocina omnidireccional modelo BAS001 de la marca Larson Davis, la cual puede ser usada mediciones bajo el ISO 140-4, ISO 140-3, ISO 3382, DIN55210, ASTM E90, E336, E2235, C42. Esta bocina permitió energizar el cuarto con ruido rosa, lo que permitió que teóricamente en cualquier punto del recinto se tuviera la misma presión sonora para cada frecuencia.



*Figura 32.* Bocina dodecaédrica marca Larson Davis utilizada para la generación del campo difuso para la medición de tiempo de reverberación

Se inició con la medición de tiempo de reverberación del recinto sin ningún tipo de tratamiento acústico, con el fin de tener un punto de comparación para poder comparar los resultados con los tiempos de reverberación del mismo recinto utilizando los paneles de micelio de hongo ostra.

Con el fin de generar una muestra más representativa se tomó la decisión de realizar seis mediciones para cada posición de la fuente dodecaédrica, la fuente se colocó en dos diferentes

puntos, por lo que el total de mediciones fue de doce para el recinto sin los paneles de micelio de hongo. Durante las mediciones hubo presencia de cierto factores de error, tales como estudiantes que pasaban a la par del CIT 421 platicando o riéndose, además hubo existencia de sonidos de apertura de puertas o de personas corriendo, lo que pudo haber ocasionado que ciertas frecuencias por ruidos externos hubieran sido captadas por el sonómetro. Con el fin de evitar que los ruidos externos generaran modificaciones significativas en las mediciones de tiempo de reverberación dentro del recinto, se elevó considerablemente el volumen al cual sería emitido el sonido, con el fin de que el índice de presión sonora posterior al decaimiento de 60 dB todavía estuviera por encima del ruido de fondo.

Se configuró el build-up time a 7 segundos, lo que significaba que por 7 segundo se iba a permitir la energización del recinto con ruido rosa mediante la bocina dodecaédrica, posterior a esto la bocina iba a cesar su emisión de ruido y el sonómetro iba a empezar a registrar el tiempo de decaimiento de los 60 dB, esto con el fin de generar el campo difuso lo más uniforme posible, y permitir que las mediciones del sonómetro fueran más exactos. La configuración del build-up time no se varió durante las doce mediciones con el fin de que los resultados fuera precisos.

El tiempo de registro del sonómetro se configuró para ser de 7 segundos con el fin de dar tiempo suficiente para que si alguna frecuencia tardaba más de 6 segundos en perder 60 dB pudiera ser captado el tiempo de reverberación completo.

Para las mediciones sin tratamiento acústico se hicieron en dos grupos, el primer grupo fue con la bocina dodecaédrica cerca de el muro cortina del salón, se procedió a ajustar el amplificador, se hicieron 6 mediciones con el sonómetro sin variar la posición de la bocina de la siguiente forma:

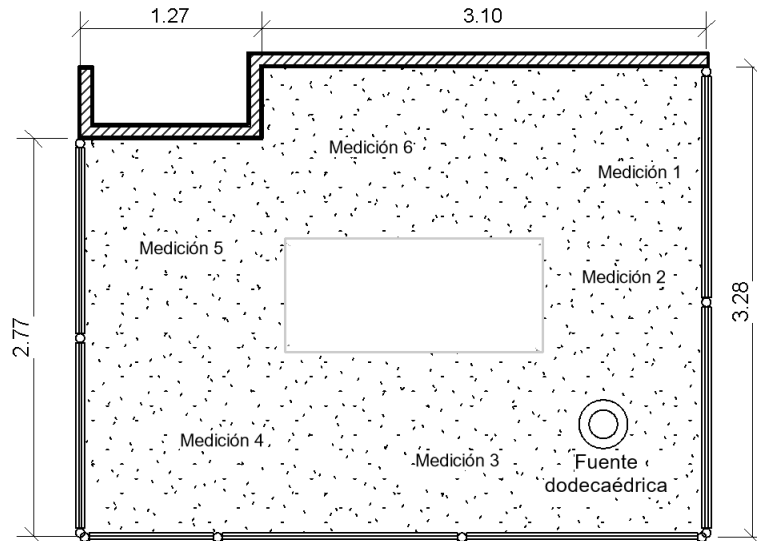


Figura 33. Primeras seis mediciones de tiempo de reverberación en CIT 421 sin tratamiento acústico

Posterior a las primeras seis mediciones se realizaron otras seis mediciones en el recinto sin tratamiento acústico, sin embargo la posición de la fuente dodecaédrica se movió de lugar, con el fin de obtener una muestra más representativa de los tiempo de reverberación para cada una de las frecuencias en tercios de octava. Se registró el tiempo de reverberación de la siguiente forma:

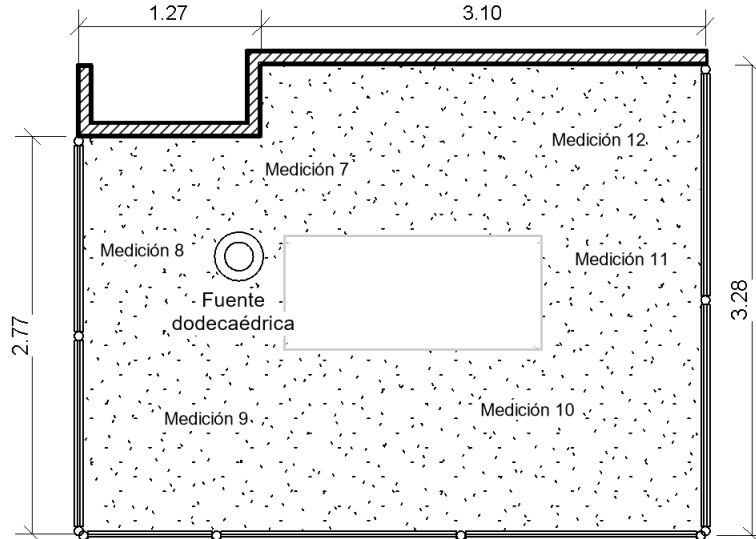


Figura 34. Segundo grupo de seis mediciones de tiempo de reverberación en CIT 421 sin tratamiento acústico

Al finalizar las doce mediciones sin tratamiento acústico se procedió a colocar los paneles de micelio de hongo, los cuales tenían un área de absorción efectiva de  $0.36\text{m} \times 0.79\text{m}$  por panel, dando una superficie absorbente total dentro del recinto de  $1.14\text{m}^2$ , los paneles fueron colocados sobre la mesa del centro del CIT 421 boca arriba con el fin de que la superficie absorbente quedara expuesta al ambiente. Se volvieron a realizar mediciones dejando la bocina dodecaédrica en un solo lugar y se movió el sonómetro a seis diferentes puntos, al igual que las mediciones previas.

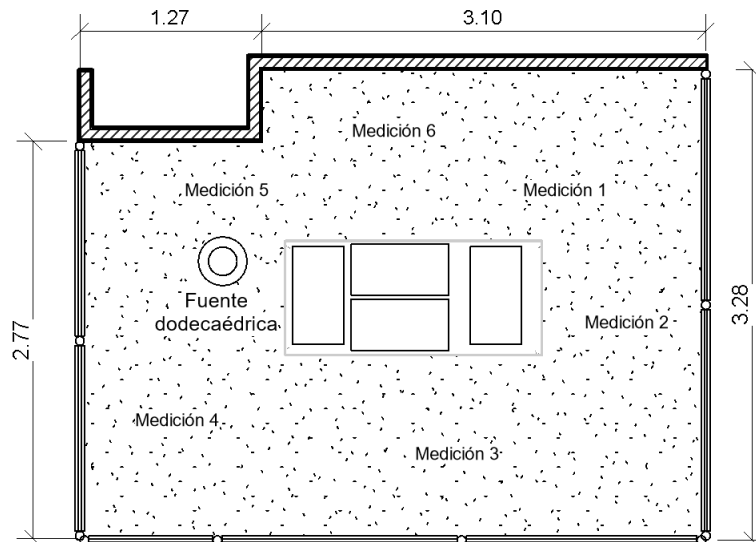


Figura 35. Primer grupo de seis mediciones de tiempo de reverberación en CIT 421 con tratamiento acústico

Al igual que con las mediciones sin tratamiento acústico se procedió a realizar otras seis mediciones luego de mover la bocina a otro punto dentro de la sala. Tanto la configuración del amplificador, como del sonómetro no se modificó, con el fin de que las condiciones con tratamiento acústico y sin tratamiento acústico fueran medidas bajo condiciones similares para

poder realizar una comparación más significativa. Las mediciones se hicieron colocando el sonómetro en las siguientes posiciones:

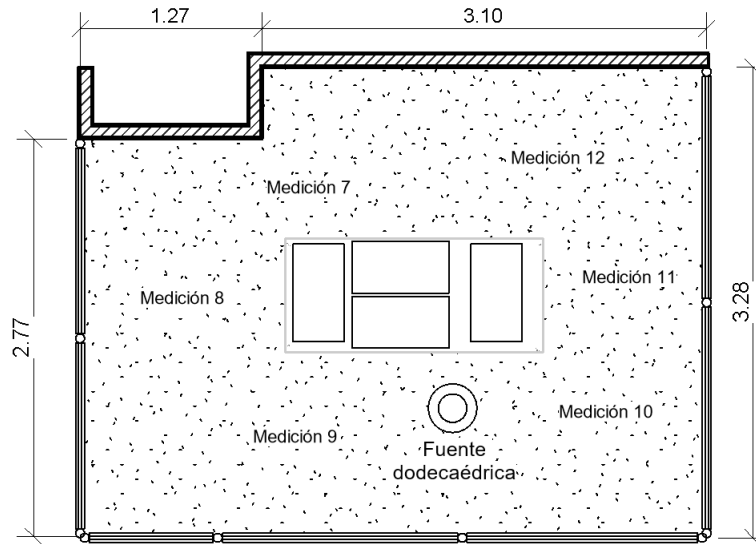


Figura 36. Segundo grupo de seis mediciones de tiempo de reverberación en CIT 421 con tratamiento acústico

## V. CÁLCULOS

### A. Cálculo de tiempo de reverberación teórico en CIT 421 sin tratamiento acústico

#### 1. Conversión de resultados de tiempos de reverberación en banda de tercios de octava a banda de octavas de medición con sonómetro en CIT 421 sin tratamiento acústico.

Debido a que la mayoría de fichas técnicas de materiales y bibliografías de coeficientes de absorción acústica de ciertos materiales aparecen dados en banda de octavas, usualmente para las frecuencias de 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz y 2000 Hz, se tomó la decisión de convertir los resultados de las mediciones de tiempo de reverberación del CIT 421 sin tratamiento acústico a banda de octava, ya que los resultados de las mediciones de tiempo de reverberación con el sonómetro Larson Davies estaban expresados en banda de tercios de octava.

Cuadro 1  
*Tiempos de reverberación en CIT 421 sin tratamiento acústico medido con sonómetro Larson Davies, expresado en banda de tercios de octava*

<b>Frecuencia</b>	<b>Tiempo de reverberación</b>
100 Hz	2.41 s
125 Hz	2.46 s
160 Hz	2.82 s
200 Hz	3.31 s
250 Hz	3.73 s
315 Hz	4.02 s
400 Hz	4.19 s
500 Hz	4.30 s
630 Hz	4.06 s
800 Hz	3.59 s
1000 Hz	3.21 s
1250 Hz	3.05 s
1600 Hz	2.84 s
2000 Hz	2.57 s
2500 Hz	2.14 s
3150 Hz	2.23 s
4000 Hz	2.34 s
5000 Hz	2.41 s

Cálculo de tiempo de reverberación para 125 Hz en bandas de octava a partir de mediciones con sonómetro *in situ* en bandas de tercios de octava mostradas en el Cuadro No. 1:

$$Tr_{125Hz} = \frac{Tr_{100Hz} + Tr_{125Hz} + Tr_{160Hz}}{3} \quad (18)$$

$$Tr_{125Hz} = \frac{2.41s + 2.46s + 2.82s}{3} = 2.56s \quad (19)$$

Donde:

Tr = tiempo de reverberación

Cálculo de tiempo de reverberación para 250 Hz en bandas de octava a partir de mediciones con sonómetro *in situ* en bandas de tercios de octava:

$$Tr_{250Hz} = \frac{Tr_{200Hz} + Tr_{250Hz} + Tr_{315Hz}}{3} \quad (20)$$

$$Tr_{250Hz} = \frac{3.31s + 3.73s + 4.02s}{3} = 3.69s \quad (21)$$

Cálculo de tiempo de reverberación para 500 Hz en bandas de octava a partir de mediciones con sonómetro *in situ* en bandas de tercios de octava:

$$Tr_{500Hz} = \frac{Tr_{400Hz} + Tr_{500Hz} + Tr_{630Hz}}{3} \quad (22)$$

$$Tr_{500Hz} = \frac{4.19s + 4.3s + 4.06s}{3} = 4.18s \quad (23)$$

Cálculo de tiempo de reverberación para 1000 Hz en bandas de octava a partir de mediciones con sonómetro *in situ* en bandas de tercios de octava:

$$Tr_{1000Hz} = \frac{Tr_{800Hz} + Tr_{1000Hz} + Tr_{1250Hz}}{3} \quad (24)$$

$$Tr_{1000Hz} = \frac{3.59s + 3.21s + 3.05s}{3} = 3.28s \quad (25)$$

Cálculo de tiempo de reverberación para 2000 Hz en bandas de octava a partir de mediciones con sonómetro *in situ* en bandas de tercios de octava:

$$Tr_{2000Hz} = \frac{Tr_{1600Hz} + Tr_{2000Hz} + Tr_{2500Hz}}{3} \quad (26)$$

$$Tr_{2000Hz} = \frac{2.84s + 2.57s + 2.14s}{3} = 2.52s \quad (27)$$

Cálculo de tiempo de reverberación para 4000 Hz en bandas de octava a partir de mediciones con sonómetro *in situ* en bandas de tercios de octava:

$$Tr_{4000Hz} = \frac{Tr_{3150Hz} + Tr_{4000Hz} + Tr_{5000Hz}}{3} \quad (28)$$

$$Tr_{4000Hz} = \frac{2.23s + 2.34s + 2.41s}{3} = 2.33s \quad (29)$$

## 2. Coeficientes de absorción de materiales de construcción del salón CIT 421.

El nombre de los elementos citados en la tabla hacen referencia a la imagen 29, cuyas secciones y vistas se utilizaron para la identificación de secciones por material y forma.

Cuadro 2  
Coeficientes de absorción acústica para frecuencias en bandas de octava para los materiales constructivos del CIT 421

Elemento	Material	$\alpha_{125}$	$\alpha_{250}$	$\alpha_{500}$	$\alpha_{1000}$	$\alpha_{2000}$	$\alpha_{4000}$
Viga principal transversal	Concreto	0.010	0.010	0.020	0.020	0.020	0.050
Muro 1	Tablayeso con cavidad de 100 mm	0.060	0.040	0.020	0.030	0.020	0.040
Muro 2	Tablayeso con cavidad de 100 mm	0.060	0.040	0.020	0.030	0.020	0.040
Muro cortina 1	Vidrio templado de 6 mm	0.04	0.030	0.025	0.030	0.070	0.020
Muro transversal	Tablayeso con cavidad de 100 mm	0.060	0.040	0.020	0.030	0.020	0.040
Muro vertical	Tablayeso con cavidad de 100 mm	0.060	0.040	0.020	0.030	0.020	0.040
Muro cortina 2	Vidrio templado de 6 mm	0.040	0.030	0.025	0.030	0.070	0.020
Muro 3	Tablayeso con cavidad de 100 mm	0.060	0.040	0.020	0.030	0.020	0.040
Muro cortina 3	Vidrio templado de 6 mm	0.04	0.030	0.025	0.030	0.070	0.020
Losa entrepiso de techo	Concreto	0.010	0.010	0.020	0.020	0.020	0.050
Losa de piso	Concreto	0.010	0.010	0.020	0.020	0.020	0.050
Cara de peralte viga principal	Concreto	0.010	0.010	0.020	0.020	0.020	0.050
Cara de peralte viga secundaria 1	Concreto	0.010	0.010	0.020	0.020	0.020	0.050
Cara de peralte viga secundaria 2	Concreto	0.010	0.010	0.020	0.020	0.020	0.050
Top de mesa	Plástico duro	0.050	0.000	0.010	0.000	0.030	0.000

## 3. Áreas por elemento y material del salón CIT 421, sin tratamiento acústico.

Para el cálculo de áreas se tomó en cuenta el peralte de las vigas debido a que el sonido incide en todas las superficies posibles al momento de generar un campo difuso, además el peralte y cantidad de vigas generaba que fuera un parámetro significativo.

Cuadro 3  
*Áreas de elementos del cerramiento agrupados por material y forma, en salón CIT 421 sin tratamiento acústico*

<b>Elemento</b>	<b>Material</b>	<b>Área de superficie de incidencia sonora (m<sup>2</sup>)</b>
Viga principal transversal	Concreto	1.706
Muro 1	Tablayeso con cavidad de 100 mm	12.056
Muro 2	Tablayeso con cavidad de 100 mm	2.886
Muro cortina 1	Vidrio templado de 6 mm	7.022
Muro transversal	Tablayeso con cavidad de 100 mm	2.536
Muro vertical	Tablayeso con cavidad de 100 mm	1.690
Muro cortina 2	Vidrio templado de 6 mm	5.857
Muro 3	Tablayeso con cavidad de 100 mm	3.706
Muro cortina 3	Vidrio templado de 6 mm	9.330
Losa entrepiso de techo	Concreto	12.845
Losa de piso	Concreto	13.699
Cara de peralte viga principal	Concreto	8.340
Cara de peralte viga secundaria 1	Concreto	2.160
Cara de peralte viga secundaria 2	Concreto	2.760
Top de mesa	Plástico duro	3.952

#### 4. Cálculo de volumen del recinto.

Se utilizó Revit como fuente de apoyo para la cuantificación de volumen de los elementos, ya que se generó un modelo 3D apegado a las medidas reales de cada uno de los elementos tomados *in situ*, por lo que el modelo podría considerarse un modelo as build. El volumen de las vigas secundarias dentro del CIT 421 fue de  $0.648 \text{ m}^3$ , el volumen de las vigas principales fue de  $1.272 \text{ m}^3$ , el volumen bruto del salón fue de  $46.306 \text{ m}^3$ , por lo que el volumen neto puede obtenerse mediante la siguiente operación:

$$V_{neto} = 46.306\text{m}^3 - 0.648\text{m}^3 - 1.272\text{m}^3 = 44.386\text{m}^3 \quad (30)$$

**5. Área de absorción equivalente del recinto para frecuencias en bandas de octava, sin tratamiento acústico.**

Multiplicando para cada elemento el área mostrada en el Cuadro No. 3 con cada uno de los coeficientes de absorción para cada una de las bandas de octava referentes a ese mismo elementos del Cuadro No. 2 se obtienen las siguientes áreas de absorción equivalentes:

Cuadro 4  
*Producto entre las áreas de elementos del cerramiento y los coeficientes de absorción acústica de cada uno de los materiales de los elementos para cada octava*

<b>Elemento</b>	<b>Material</b>	$\alpha_{125^*S}$	$\alpha_{250^*S}$	$\alpha_{500^*S}$	$\alpha_{1000^*S}$	$\alpha_{2000^*S}$	$\alpha_{4000^*S}$
Viga principal transversal	Concreto	0.017	0.017	0.034	0.034	0.034	0.085
Muro 1	Tablayeso con cavidad de 100 mm	0.723	0.482	0.241	0.362	0.241	0.482
Muro 2	Tablayeso con cavidad de 100 mm	0.173	0.115	0.058	0.087	0.058	0.115
Muro cortina 1	Vidrio templado de 6 mm	0.281	0.211	0.176	0.211	0.492	0.140
Muro transversal	Tablayeso con cavidad de 100 mm	0.152	0.101	0.051	0.076	0.051	0.101
Muro vertical	Tablayeso con cavidad de 100 mm	0.101	0.068	0.034	0.051	0.034	0.068
Muro cortina 2	Vidrio templado de 6 mm	0.234	0.176	0.146	0.176	0.410	0.117
Muro 3	Tablayeso con cavidad de 100 mm	0.222	0.148	0.074	0.111	0.074	0.148
Muro cortina 3	Vidrio templado de 6 mm	0.373	0.280	0.233	0.280	0.653	0.187
Losa entrepiso de techo	Concreto	0.128	0.128	0.257	0.257	0.257	0.642
Losa de piso	Concreto	0.137	0.137	0.137	0.274	0.274	0.274
Cara de peralte viga principal	Concreto	0.083	0.083	0.167	0.167	0.167	0.417
Cara de peralte viga secundaria 1	Concreto	0.022	0.022	0.043	0.043	0.043	0.108
Cara de peralte viga secundaria 2	Concreto	0.028	0.028	0.055	0.055	0.055	0.138
Top de mesa	Plástico duro	0.198	0.000	0.040	0.000	0.119	0.000

Sumando los productos entre las áreas de elementos del cerramiento y los coeficientes de absorción acústica de cada uno de los materiales obtenidos en el Cuadro No. 4 para cada una de las frecuencias en bandas de octava se obtienen los coeficientes de absorción media del recinto.

Cálculo de área de absorción equivalente total con base en la sumatoria del aporte de cada elemento para frecuencia de 125 Hz del CIT 421:

$$\sum(\alpha_{125} * S) = 0.017 + 0.723 + 0.173 + \dots + 0.083 + 0.022 + 0.028 + 0.198 = 2.874 \quad (31)$$

Cálculo de área de absorción equivalente total con base en la sumatoria del aporte de cada elemento para frecuencia de 250 Hz del CIT 421:

$$\sum(\alpha_{250} * S) = 0.017 + 0.482 + 0.115 + \dots + 0.083 + 0.022 + 0.028 + 0 = 1.996 \quad (32)$$

Cálculo de área de absorción equivalente total con base en la sumatoria del aporte de cada elemento para frecuencia de 500 Hz del CIT 421:

$$\sum(\alpha_{500} * S) = 0.034 + 0.241 + 0.058 + \dots + 0.167 + 0.043 + 0.055 + 0.04 = 1.745 \quad (33)$$

Cálculo de área de absorción equivalente total con base en la sumatoria del aporte de cada elemento para frecuencia de 1000 Hz del CIT 421:

$$\sum(\alpha_{1000} * S) = 0.034 + 0.362 + 0.087 + \dots + 0.167 + 0.043 + 0.055 + 0 = 2.183 \quad (34)$$

Cálculo de área de absorción equivalente total con base en la sumatoria del aporte de cada elemento para frecuencia de 2000 Hz del CIT 421:

$$\sum(\alpha_{2000} * S) = 0.034 + 0.241 + 0.058 + \dots + 0.167 + 0.043 + 0.055 + 0.119 = 2.961 \quad (35)$$

Cálculo de área de absorción equivalente total con base en la sumatoria del aporte de cada elemento para frecuencia de 4000 Hz del CIT 421:

$$\sum(\alpha_{4000} * S) = 0.085 + 0.482 + 0.115 + \dots + 0.417 + 0.108 + 0.138 + 0 = 3.024 \quad (36)$$

## 6. Tiempo de reverberación por frecuencias en bandas de octava.

Utilizando la ecuación de Sabine se calcularon los tiempos de reverberación del CIT 421 para las frecuencias en bandas de octava, se generó un proceso iterativo de corrección de coeficientes de absorción de los materiales para obtener datos similares a los tiempos de reverberación obtenidos mediante las mediciones con sonómetro *in situ* y convertidas a bandas de octava mostrados en el Cuadro No. 18, con el fin de generar la caracterización de los materiales del recinto lo más apegado a la realidad posible, ya que no se contaba con la ficha técnica exacta de cada uno de los vidrios, planchas de tablayeso, el top de la mesa, la densidad y composición exacta de las columnas y losas. Se realizó este cotejo con el fin de que el comportamiento de los materiales fuera lo más apegado a la realidad para poder extraer posteriormente los coeficientes de absorción de los paneles acústicos

de micelio de hongo ostra. Los coeficientes de absorción mostrados en el Cuadro No. 2 fueron los coeficientes de la última iteración.

Cálculo de tiempo de reverberación teórico para frecuencia de 125 Hz en salón del CIT 421 sin tratamiento acústico:

$$Tr_{125} = \frac{0.162 * V_{neto}}{\sum(\alpha_{125} * S)} \quad (37)$$

$$Tr_{125} = \frac{0.162 * 44.386}{2.874} = 2.5s \quad (38)$$

Cálculo de tiempo de reverberación teórico para frecuencia de 250 Hz en salón del CIT 421 sin tratamiento acústico:

$$Tr_{250} = \frac{0.162 * V_{neto}}{\sum(\alpha_{250} * S)} \quad (39)$$

$$Tr_{250} = \frac{0.162 * 44.386}{1.996} = 3.6s \quad (40)$$

Cálculo de tiempo de reverberación teórico para frecuencia de 500 Hz en salón del CIT 421 sin tratamiento acústico:

$$Tr_{500} = \frac{0.162 * V_{neto}}{\sum(\alpha_{500} * S)} \quad (41)$$

$$Tr_{500} = \frac{0.162 * 44.386}{1.745} = 4.12s \quad (42)$$

Cálculo de tiempo de reverberación teórico para frecuencia de 1000 Hz en salón del CIT 421 sin tratamiento acústico:

$$Tr_{1000} = \frac{0.162 * V_{neto}}{\sum(\alpha_{1000} * S)} \quad (43)$$

$$Tr_{1000} = \frac{0.162 * 44.386}{2.183} = 3.29s \quad (44)$$

Cálculo de tiempo de reverberación teórico para frecuencia de 2000 Hz en salón del CIT 421 sin tratamiento acústico:

$$Tr_{2000} = \frac{0.162 * V_{neto}}{\sum(\alpha_{2000} * S)} \quad (45)$$

$$Tr_{2000} = \frac{0.162 * 44.386}{2.961} = 2.43s \quad (46)$$

Cálculo de tiempo de reverberación teórico para frecuencia de 4000 Hz en salón del CIT 421 sin tratamiento acústico:

$$Tr_{4000} = \frac{0.162 * V_{neto}}{\sum(\alpha_{4000} * S)} \quad (47)$$

$$Tr_{4000} = \frac{0.162 * 44.386}{3.024} = 2.38s \quad (48)$$

## B. Despeje del coeficiente de absorción acústica para cada frecuencia en bandas de octava partiendo de la fórmula de Sabine

Se decidió calcular los coeficientes de absorción acústica de los paneles de micelio de hongo a partir de la fórmula de Sabine, ya que se intentó mediante la fórmula de Eyring y los resultados no hacían sentido, dando coeficientes de absorción muy superiores a 1. Utilizando la ecuación de Sabine mostrada en la ecuación No.9 se descompuso la sumatoria del producto de los coeficientes de absorción por el área de incidencia con el fin de poder aislar el coeficiente de absorción acústica de los paneles de micelio de hongo para cada frecuencia.

$$Tr = \frac{0.162 * V}{\sum(\alpha S) + \alpha_{panel}S} \quad (49)$$

$$Tr * (\sum(\alpha S) + \alpha_{panel}S) = 0.162 * V \quad (50)$$

$$\sum(\alpha S) + \alpha_{panel}S = \frac{0.162 * V}{Tr} \quad (51)$$

$$\alpha_{panel}S = \frac{0.162 * V}{Tr} - \sum(\alpha S) \quad (52)$$

$$\alpha_{panel} = \left( \frac{0.162 * V}{Tr} - \sum(\alpha S) \right) \frac{1}{S_{panel}} \quad (53)$$

$$\alpha_{panel} = \frac{0.162 * V}{Tr * S_{panel}} - \frac{\sum(\alpha S)}{S_{panel}} \quad (54)$$

## C. Cálculo de tiempo de reverberación teórico en salón CIT 421 con tratamiento acústico

### 1. Conversión de resultados de tiempos de reverberación en bandas de tercios de octava a banda de octavas de medición con sonómetro en CIT 421 con tratamiento acústico.

Con el fin de hacer comparables los datos de coeficiente de absorción acústica para los paneles de micelio de hongo ostra con las fichas técnicas de materiales acústicos se decidió trabajar únicamente en bandas de octavas, al igual que con los cálculos del recinto sin tratamiento acústico, por lo que fue necesario promediar los tercios superior, inferior y la octava central, para obtener un resultado más nivelado.

Cuadro 5

Tiempos de reverberación en CIT 421 con tratamiento acústico medido con sonómetro Larson Davies, expresado en bandas de tercios de octava

Frecuencia	Tiempo de reverberación
100 Hz	1.60 s
125 Hz	1.19s
160 Hz	2.28 s
200 Hz	2.41 s
250 Hz	2.69 s
315 Hz	2.35 s
400 Hz	2.58 s
500 Hz	2.54 s
630 Hz	2.45 s
800 Hz	2.19 s
1000 Hz	1.94 s
1250 Hz	1.95 s
1600 Hz	1.87 s
2000 Hz	1.68 s
2500 Hz	1.52 s
3150 Hz	1.58 s
4000 Hz	1.54 s
5000 Hz	1.40 s

Cálculo de tiempo de reverberación para 125 Hz en bandas de octava a partir de mediciones con sonómetro *in situ* en bandas de tercios de octava mostradas en el Cuadro No. 5:

$$Tr_{125Hz} = \frac{Tr_{100Hz} + Tr_{125Hz} + Tr_{160Hz}}{3} \quad (55)$$

$$Tr_{125Hz} = \frac{1.6s + 1.19s + 2.28s}{3} = 1.69s \quad (56)$$

Cálculo de tiempo de reverberación para 250 Hz en bandas de octava a partir de mediciones con sonómetro *in situ* en bandas de tercios de octava:

$$Tr_{250Hz} = \frac{Tr_{200Hz} + Tr_{250Hz} + Tr_{315Hz}}{3} \quad (57)$$

$$Tr_{250Hz} = \frac{2.41s + 2.69s + 2.35s}{3} = 2.48s \quad (58)$$

Cálculo de tiempo de reverberación para 500 Hz en bandas de octava a partir de mediciones con sonómetro *in situ* en bandas de tercios de octava:

$$Tr_{500Hz} = \frac{Tr_{400Hz} + Tr_{500Hz} + Tr_{630Hz}}{3} \quad (59)$$

$$Tr_{500Hz} = \frac{2.58s + 2.54s + 2.45s}{3} = 2.52s \quad (60)$$

Cálculo de tiempo de reverberación para 1000 Hz en bandas de octava a partir de mediciones con sonómetro *in situ* en bandas de tercios de octava:

$$Tr_{1000Hz} = \frac{Tr_{800Hz} + Tr_{1000Hz} + Tr_{1250Hz}}{3} \quad (61)$$

$$Tr_{1000Hz} = \frac{2.19s + 1.94s + 1.95s}{3} = 2.03s \quad (62)$$

Cálculo de tiempo de reverberación para 2000 Hz en bandas de octava a partir de mediciones con sonómetro *in situ* en bandas de tercios de octava:

$$Tr_{2000Hz} = \frac{Tr_{1600Hz} + Tr_{2000Hz} + Tr_{2500Hz}}{3} \quad (63)$$

$$Tr_{2000Hz} = \frac{1.87s + 1.68s + 1.52s}{3} = 1.69s \quad (64)$$

Cálculo de tiempo de reverberación para 4000 Hz en bandas de octava a partir de mediciones con sonómetro *in situ* en bandas de tercios de octava:

$$Tr_{4000Hz} = \frac{Tr_{3150Hz} + Tr_{4000Hz} + Tr_{5000Hz}}{3} \quad (65)$$

$$Tr_{4000Hz} = \frac{1.58s + 1.54s + 1.4s}{3} = 1.51s \quad (66)$$

## 2. Áreas por elemento y material del salón CIT 421, con tratamiento acústico.

Las áreas consideradas para el cálculo del CIT 421 con tratamiento acústico fueron las mismas que las mostradas en el Cuadro No.3, sin embargo se colocaron los paneles de micelio de hongo sobre la mesa con el fin de que el modelo de cálculo fuera más simple, por lo que únicamente el área que se modificó fue la del top de la mesa.

Cuadro 6  
*Áreas de elementos del cerramiento agrupados por material y forma, en salón CIT 421 con tratamiento acústico*

<b>Elemento</b>	<b>Material</b>	<b>Área de superficie de incidencia sonora (m<sup>2</sup>)</b>
Viga principal transversal	Concreto	1.706
Muro 1	Tablayeso con cavidad de 100 mm	12.056
Muro 2	Tablayeso con cavidad de 100 mm	2.886
Muro cortina 1	Vidrio templado de 6 mm	7.022
Muro transversal	Tablayeso con cavidad de 100 mm	2.536
Muro vertical	Tablayeso con cavidad de 100 mm	1.690
Muro cortina 2	Vidrio templado de 6 mm	5.857
Muro 3	Tablayeso con cavidad de 100 mm	3.706
Muro cortina 3	Vidrio templado de 6 mm	9.330
Losa entepiso de techo	Concreto	12.845
Losa de piso	Concreto	13.699
Cara de peralte viga principal	Concreto	8.340
Cara de peralte viga secundaria 1	Concreto	2.160
Cara de peralte viga secundaria 2	Concreto	2.760
Top de mesa	Plástico duro	2.814
Paneles de micelio de hongo ostra	Hongo Pleorotus Ostreatus de 7 cm	1.138

### **3. Área de absorción equivalente del recinto para frecuencias en bandas de octava, con tratamiento acústico .**

Multiplicando para cada elemento el área mostrada en el Cuadro No. 6 con cada uno de los coeficientes de absorción para cada una de las bandas de octava referentes a ese mismo elementos del Cuadro No. 2 se obtienen los siguientes datos de áreas de absorción equivalentes:

Cuadro 7

*Producto entre las áreas de elementos del cerramiento y los coeficientes de absorción acústica de cada uno de los materiales de los elementos para cada octava de recinto con tratamiento acústico*

<b>Elemento</b>	<b>Material</b>	<b>125*S</b>	<b>250*S</b>	<b>500*S</b>	<b>1000*S</b>	<b>2000*S</b>	<b>4000*S</b>
Viga principal transversal	Concreto	0.017	0.017	0.034	0.034	0.034	0.085
Muro 1	Tablayeso con cavidad de 100 mm	0.723	0.482	0.241	0.362	0.241	0.482
Muro 2	Tablayeso con cavidad de 100 mm	0.173	0.115	0.058	0.087	0.058	0.115
Muro cortina 1	Vidrio templado de 6 mm	0.281	0.211	0.176	0.211	0.492	0.140
Muro transversal	Tablayeso con cavidad de 100 mm	0.152	0.101	0.051	0.076	0.051	0.101
Muro vertical	Tablayeso con cavidad de 100 mm	0.101	0.068	0.034	0.051	0.034	0.068
Muro cortina 2	Vidrio templado de 6 mm	0.234	0.176	0.146	0.176	0.410	0.117
Muro 3	Tablayeso con cavidad de 100 mm	0.222	0.148	0.074	0.111	0.074	0.148
Muro cortina 3	Vidrio templado de 6 mm	0.373	0.280	0.233	0.280	0.653	0.187
Losa entrepiso de techo	Concreto	0.128	0.128	0.257	0.257	0.257	0.642
Losa de piso	Concreto	0.137	0.137	0.137	0.274	0.274	0.274
Cara de peralte viga principal	Concreto	0.083	0.083	0.167	0.167	0.167	0.417
Cara de peralte viga secundaria 1	Concreto	0.022	0.022	0.043	0.043	0.043	0.108
Cara de peralte viga secundaria 2	Concreto	0.028	0.028	0.055	0.055	0.055	0.138
Top de mesa	Plástico duro	0.141	0.000	0.028	0.000	0.084	0.000

Sumando los productos entre las áreas de elementos del cerramiento y los coeficientes de absorción acústica de cada uno de los materiales obtenidos en el Cuadro No.7 para cada una de las frecuencias en bandas de octava se obtienen los coeficientes de absorción media del recinto.

Cálculo de área de absorción equivalente total con base en la sumatoria del aporte de cada elemento para frecuencia de 125 Hz del CIT 421:

$$\sum(\alpha_{125} * S) = 0.017 + 0.723 + 0.173 + \dots + 0.083 + 0.022 + 0.028 + 0.141 = 2.817 \quad (67)$$

Cálculo de área de absorción equivalente total con base en la sumatoria del aporte de cada elemento para frecuencia de 250 Hz del CIT 421:

$$\sum(\alpha_{250} * S) = 0.017 + 0.482 + 0.115 + \dots + 0.083 + 0.022 + 0.028 + 0 = 1.996 \quad (68)$$

Cálculo de área de absorción equivalente total con base en la sumatoria del aporte de cada elemento para frecuencia de 500 Hz del CIT 421:

$$\sum(\alpha_{500} * S) = 0.034 + 0.241 + 0.058 + \dots + 0.167 + 0.043 + 0.055 + 0.028 = 1.734 \quad (69)$$

Cálculo de área de absorción equivalente total con base en la sumatoria del aporte de cada elemento para frecuencia de 1000 Hz del CIT 421:

$$\sum(\alpha_{1000} * S) = 0.034 + 0.362 + 0.087 + \dots + 0.167 + 0.043 + 0.055 + 0 = 2.183 \quad (70)$$

Cálculo de área de absorción equivalente total con base en la sumatoria del aporte de cada elemento para frecuencia de 2000 Hz del CIT 421:

$$\sum(\alpha_{2000} * S) = 0.034 + 0.241 + 0.058 + \dots + 0.167 + 0.043 + 0.055 + 0.084 = 2.927 \quad (71)$$

Cálculo de área de absorción equivalente total con base en la sumatoria del aporte de cada elemento para frecuencia de 4000 Hz del CIT 421:

$$\sum(\alpha_{4000} * S) = 0.085 + 0.482 + 0.115 + \dots + 0.417 + 0.108 + 0.138 + 0 = 3.024 \quad (72)$$

#### 4. Cálculo de coeficientes de absorción de los paneles de micelio de hongo ostra para frecuencias en octavas.

Utilizando la ecuación 54 se calculó el coeficiente de absorción del panel acústico realizado con la plancha de hongo Pleorotus Ostreatus para cada una de las frecuencias en banda de octava.

Cálculo de coeficiente de absorción acústica de panel de micelio de hongo ostra para ondas con frecuencia de 125 Hz:

$$\alpha_{panel125} = \frac{0.162 * V}{Tr_{125} * S_{panel}} - \frac{\sum(\alpha_{125} * S)}{S_{panel}} \quad (73)$$

$$\alpha_{panel125} = \frac{0.162 * 44.386m^3}{1.69s * 1.138m^2} - \frac{2.817}{1.138m^2} = 1.26 \quad (74)$$

Cálculo de coeficiente de absorción acústica de panel de micelio de hongo ostra para ondas con frecuencia de 250 Hz:

$$\alpha_{panel250} = \frac{0.162 * V}{Tr_{250} * S_{panel}} - \frac{\sum(\alpha_{250} * S)}{S_{panel}} \quad (75)$$

$$\alpha_{panel250} = \frac{0.162 * 44.386m^3}{2.48s * 1.138m^2} - \frac{1.996}{1.138m^2} = 0.79 \quad (76)$$

Cálculo de coeficiente de absorción acústica de panel de micelio de hongo ostra para ondas con frecuencia de 500 Hz:

$$\alpha_{panel500} = \frac{0.162 * V}{Tr_{500} * S_{panel}} - \frac{\sum(\alpha_{500} * S)}{S_{panel}} \quad (77)$$

$$\alpha_{panel500} = \frac{0.162 * 44.386m^3}{2.52s * 1.138m^2} - \frac{1.734}{1.138m^2} = 0.98 \quad (78)$$

Cálculo de coeficiente de absorción acústica de panel de micelio de hongo ostra para ondas con frecuencia de 1000 Hz:

$$\alpha_{panel1000} = \frac{0.162 * V}{Tr_{1000} * S_{panel}} - \frac{\sum(\alpha_{1000} * S)}{S_{panel}} \quad (79)$$

$$\alpha_{panel1000} = \frac{0.162 * 44.386m^3}{2.03s * 1.138m^2} - \frac{2.183}{1.138m^2} = 1.2 \quad (80)$$

Cálculo de coeficiente de absorción acústica de panel de micelio de hongo ostra para ondas con frecuencia de 2000 Hz:

$$\alpha_{panel2000} = \frac{0.162 * V}{Tr_{2000} * S_{panel}} - \frac{\sum(\alpha_{2000} * S)}{S_{panel}} \quad (81)$$

$$\alpha_{panel2000} = \frac{0.162 * 44.386m^3}{1.69s * 1.138m^2} - \frac{2.927}{1.138m^2} = 1.17 \quad (82)$$

Cálculo de coeficiente de absorción acústica de panel de micelio de hongo ostra para ondas con frecuencia de 4000 Hz:

$$\alpha_{panel4000} = \frac{0.162 * V}{Tr_{4000} * S_{panel}} - \frac{\sum(\alpha_{4000} * S)}{S_{panel}} \quad (83)$$

$$\alpha_{panel4000} = \frac{0.162 * 44.386m^3}{1.51s * 1.138m^2} - \frac{3.024}{1.138m^2} = 1.54 \quad (84)$$

Debido a que la mayoría de bibliografías consideran el coeficiente de absorción acústica máximo como 1, se tomó la decisión de tomar como techo el valor de 1 para los resultados de coeficientes de absorción que sobrepasaran este valor, por lo que se procedió a realizar una gráfica de la curva de comportamiento del tiempo de reverberación en bandas de octava con los coeficientes de absorción de los paneles de micelio de hongo ostra tomando el valor superior como 1. Además se graficó la curva de comportamiento de tiempo de reverberación obtenida de las mediciones con el sonómetro Larson Davies en el CIT 421.

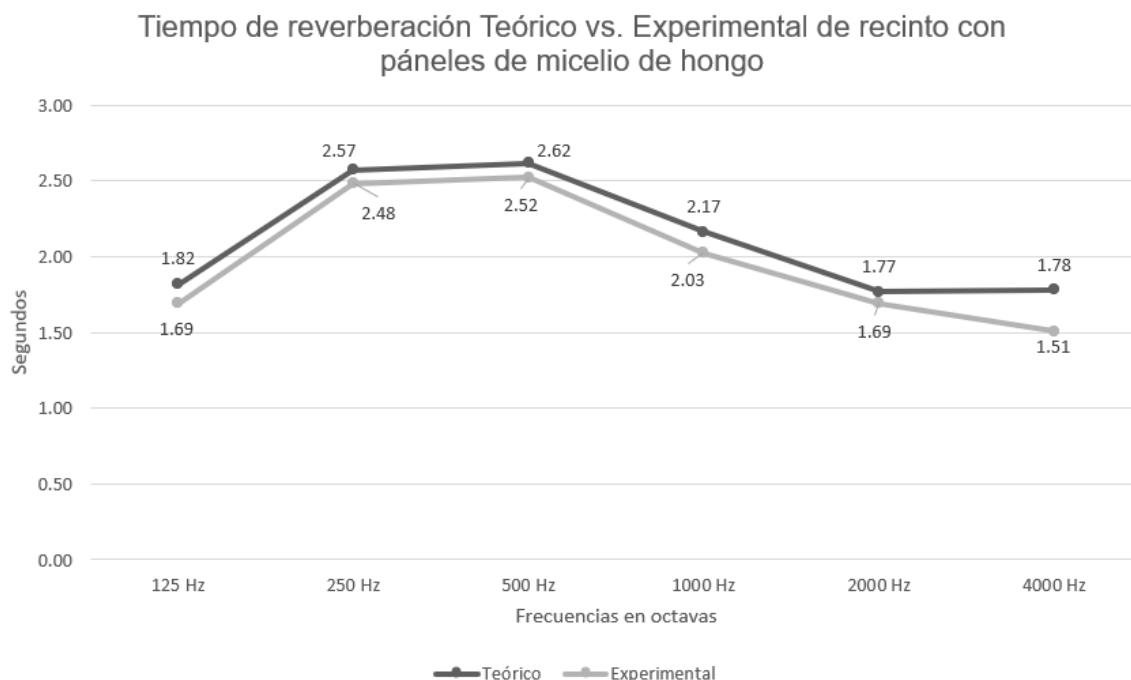


Figura 37. Curvas de comportamiento de tiempo de reverberación de CIT 421 utilizando paneles de micelio de hongo ostra como tratamiento acústico, real Vs. coeficientes de absorción modificados

Se modificaron los valores de coeficientes de absorción para las frecuencias de 250 Hz y 500 Hz, a pesar de que el resultado calculado mediante la ecuación 54 estuviera dentro del rango aceptable, con el fin de que la desviación a la curva real de la medición fuera lo más uniforme posible, por lo que el cambio de coeficientes de absorción acústica para los paneles de micelio de hongo ostra quedó de la siguiente forma:

Cuadro 8

*Modificación de coeficientes de absorción acústica en bandas de octava de paneles de micelio de hongo ostra para suavización de desviación de la curva*

Consideraciones	$\alpha_{125}$	$\alpha_{250}$	$\alpha_{500}$	$\alpha_{1000}$	$\alpha_{2000}$	$\alpha_{4000}$
Coefficientes de absorción acústica resultantes de cálculo a partir de ecuación de Sabine	1.26	0.79	0.98	1.20	1.17	1.54
Coefficientes de absorción acústica modificados, considerando el valor de 1 como máximo	1.00	0.70	0.89	1.00	1.00	1.00

#### D. Cálculo de costo total de manufactura de paneles de micelio de hongo

##### 1. Cálculo de costo total de inversión a depreciar para fabricación de paneles de micelio de hongo ostra.

Cuadro 9  
Cálculo de inversión total a depreciar cada 5 años

Equipo	Cantidad	Costo unitario (Q)	Costo total (Q)
Cajas plásticas con tapadera	4	155	620
Destornillador eléctrico	1	300	300
Sierra caladora	1	668	668
Engrapadora de uso pesado	1	80	80
<b>Total</b>			<b>1668</b>

Costo de inversión por unidad de panel de micelio de hongo ostra:

$$Inv_{tot} = \frac{Q1668}{4} = Q417.00 \quad (85)$$

### 2. Cálculo de depreciación por $m^2$ de paneles de micelio de hongo ostra.

El costo de Q417.00 mostrado en la Ecuación No.85, se consideró como una inversión que debe de hacerse cada 5 años, por lo que se calcula el valor de la depreciación por  $m^2$  considerando este tiempo. Además se estimó, con base en la experiencia que se tuvo cultivando las planchas de micelio, que una plancha de micelio de hongo ostra de 7.5 cm de espesor puede ser producido en un mes, esto dice que en 5 años pueden hacerse 60 planchas de micelio de hongo ostra por molde.

Con base en los datos anteriormente mencionados y considerando el área de los paneles fabricados de  $0.2844 m^2$  se puede calcular el valor de la depreciación por  $m^2$  de la fabricación de paneles de micelio de hongo ostra.

$$DepPanel_{m^2} = \frac{Q417}{5years} * \frac{1year}{12paneles} * \frac{1panel}{0.2844m^2} = 24.44 \frac{Q}{m^2} \quad (86)$$

### 3. Cálculo de depreciación por $m^2$ de plancha de micelio de hongo ostra de 7.5 cm de espesor.

$$DepPlancha_{m^2} = \frac{Q155}{5years} * \frac{1year}{12paneles} * \frac{1panel}{0.2844m^2} = 9.08 \frac{Q}{m^2} \quad (87)$$

### 4. Cálculo de gastos variables para fabricación de paneles de micelio de hongo ostra.

Cuadro 10  
Cálculo de gastos variables totales para la fabricación de 4 paneles de micelio de hongo

Gastos variables	Cantidad	Precio unitario (Q)	Precio total (Q)
Algodón	6	18.3	109.8
Agua	0.001	111	0.111
Gas	0.1	125	12.5
Electricidad	0.002	850	1.7
Bolsas negras de basura	2	1.35	2.7
Sorgo con micelio madre	6	25	150
Madera plywood	0.5	205	102.5
Tornillos	64	1	64
Tela de lino	4	35	140
<b>Total</b>			<b>583.31</b>

5. Cálculo de gastos variables por  $m^2$  de panel de micelio de hongo ostra.

$$GastoPlancha_{m^2} = \frac{Q583.31}{4paneles} * \frac{1panel}{0.2844m^2} = 473.20 \frac{Q}{m^2} \quad (88)$$

6. Cálculo de gastos variables para fabricación de planchas de micelio de hongo ostra.

Cuadro 11  
Cálculo de gastos variables totales para la fabricación de 4 planchas de micelio de hongo de 7.5 cm de espesor

Gastos variables	Cantidad	Precio unitario (Q)	Precio total (Q)
Algodón	6	18.3	109.8
Agua	0.001	111	0.111
Gas	0.1	125	12.5
Bolsas negras de basura	2	1.35	2.7
Sorgo con micelio madre	6	25	150
<b>Total</b>			<b>275.11</b>

7. Cálculo de gastos variables por  $m^2$  de plancha de micelio de hongo ostra.

$$GastoPanel_{m^2} = \frac{Q275.11}{4paneles} * \frac{1panel}{0.2844m^2} = 241.83 \frac{Q}{m^2} \quad (89)$$

8. Cálculo total costo de panel de micelio de hongo por  $m^2$ .

Utilizando los datos obtenidos en las ecuaciones 86, 88 y considerando un costo de Q56.39 de mano de obra por  $m^2$ , se obtiene el costo total de manufactura por  $m^2$  de panel acústico de micelio de hongo ostra terminado.

$$\text{CostoPanel}_{m^2} = 24.44 \frac{Q}{m^2} + 473.20 \frac{Q}{m^2} + Q56.39 = 554.03 \frac{Q}{m^2} \quad (90)$$

#### **9. Cálculo total costo de plancha de micelio de hongo por $m^2$ .**

Utilizando los datos obtenidos en las ecuaciones 87, 89 y considerando un costo de Q33.83 de mano de obra por  $m^2$ , se obtiene el costo total de manufactura por  $m^2$  de plancha de micelio de hongo ostra lista para ser utilizada de relleno absorbente.

$$\text{CostoPlancha}_{m^2} = 9.08 \frac{Q}{m^2} + 241.83 \frac{Q}{m^2} + Q33.83 = 284.74 \frac{Q}{m^2} \quad (91)$$

## VI. RESULTADOS

### A. Resultados de mediciones in situ de tiempos de reverberación en salón CIT 421

#### 1. Tiempo de reverberación global resultante RT60.

Resultado del promedio de las 12 mediciones realizadas en salón del CIT 421 para los resultados de tiempo de reverberación captados por el sonómetro Larson Davies para las mediciones en el recinto sin tratamiento acústico.

Cuadro 12  
*Tiempos de reverberación en CIT 421 sin tratamiento acústico medido con sonómetro Larson Davies, expresado en banda de tercios de octava*

<b>Frecuencia</b>	<b>Tiempo de reverberación</b>
100 Hz	2.41 s
125 Hz	2.46 s
160 Hz	2.82 s
200 Hz	3.31 s
250 Hz	3.73 s
315 Hz	4.02 s
400 Hz	4.19 s
500 Hz	4.30 s
630 Hz	4.06 s
800 Hz	3.59 s
1000 Hz	3.21 s
1250 Hz	3.05 s
1600 Hz	2.84 s
2000 Hz	2.57 s
2500 Hz	2.14 s
3150 Hz	2.23 s
4000 Hz	2.34 s
5000 Hz	2.41 s

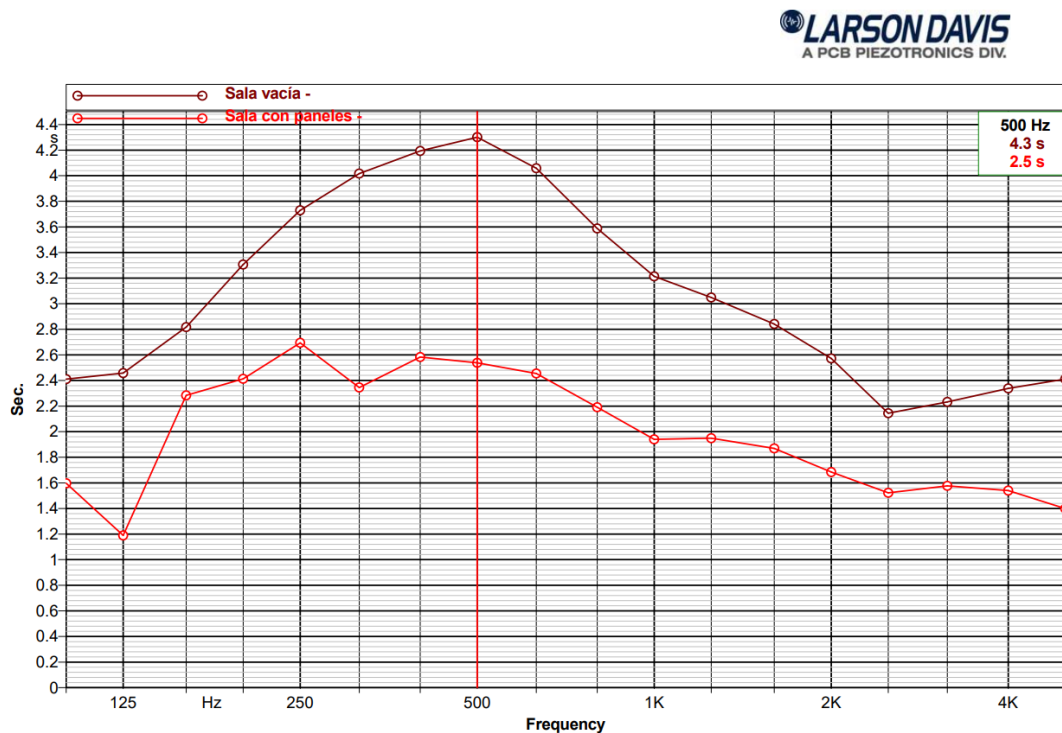
Resultado del promedio de las 12 mediciones realizadas en salón del CIT 421 para los resultados de tiempo de reverberación captados por el sonómetro Larson Davies para las mediciones en el recinto con tratamiento acústico.

Cuadro 13

Tiempos de reverberación en CIT 421 con tratamiento acústico medido con sonómetro Larson Davies, expresado en bandas de tercios de octava

Frecuencia	Tiempo de reverberación
100 Hz	1.60 s
125 Hz	1.19s
160 Hz	2.28 s
200 Hz	2.41 s
250 Hz	2.69 s
315 Hz	2.35 s
400 Hz	2.58 s
500 Hz	2.54 s
630 Hz	2.45 s
800 Hz	2.19 s
1000 Hz	1.94 s
1250 Hz	1.95 s
1600 Hz	1.87 s
2000 Hz	1.68 s
2500 Hz	1.52 s
3150 Hz	1.58 s
4000 Hz	1.54 s
5000 Hz	1.40 s

Figura 38. Curvas comparativas de comportamiento de tiempo de reverberación de CIT 421 con tratamiento acústico con paneles de micelio de hongo ostra y sin tratamiento acústico. Generado por sonómetro Larson Davies



Como se puede apreciar en la Figura No.38 el tiempo de reverberación se reduce en todas las frecuencias, demostrando que el micelio de hongo ostra sí funciona como un material absorbente. El pico máximo de tiempo de reverberación del CIT 421 sin tratamiento acústico de 4.3 segundos fue presentado para frecuencias de 500 Hz, sin embargo tratando el recinto con paneles de micelio de hongo se redujo a 2.5 segundos, lo que es una disminución de 41.86 % del tiempo de reverberación. Esta disminución presentada posterior a la colocación de los paneles de micelio de hongo ostra dentro del recinto fue generada debido a que las ondas de sonido al momento de entrar en contacto con el micelio, perdían energía, generando que el índice de presión sonora disminuyera en 60 dB en menos tiempo que con el recinto sin los paneles.

El pico máximo de tiempo de reverberación del CIT 421 con los paneles de micelio se presentó para la frecuencia de 250 Hz, con un tiempo de 2.69 segundos, lo que indica que las propiedades del micelio lo hacen un mejor absorbente para el resto de bandas de tercio de octava que para la frecuencia de 250 Hz.

## 2. Tiempo de reverberación resultante RT20.

Resultado del promedio de RT20 de las 12 mediciones realizadas en salón del CIT 421 sin tratamiento acústico.

Cuadro 14  
*RT20 en CIT 421 sin tratamiento acústico medido con sonómetro Larson Davies, expresado en bandas de tercios de octava*

<b>Frecuencia</b>	<b>Tiempo de reverberación</b>
100 Hz	2.41 s
125 Hz	2.46 s
160 Hz	2.82 s
200 Hz	3.31 s
250 Hz	3.73 s
315 Hz	4.02 s
400 Hz	4.19 s
500 Hz	4.30 s
630 Hz	4.06 s
800 Hz	3.59 s
1000 Hz	3.21 s
1250 Hz	3.05 s
1600 Hz	2.84 s
2000 Hz	2.57 s
2500 Hz	2.14 s
3150 Hz	2.23 s
4000 Hz	2.34 s
5000 Hz	2.41 s

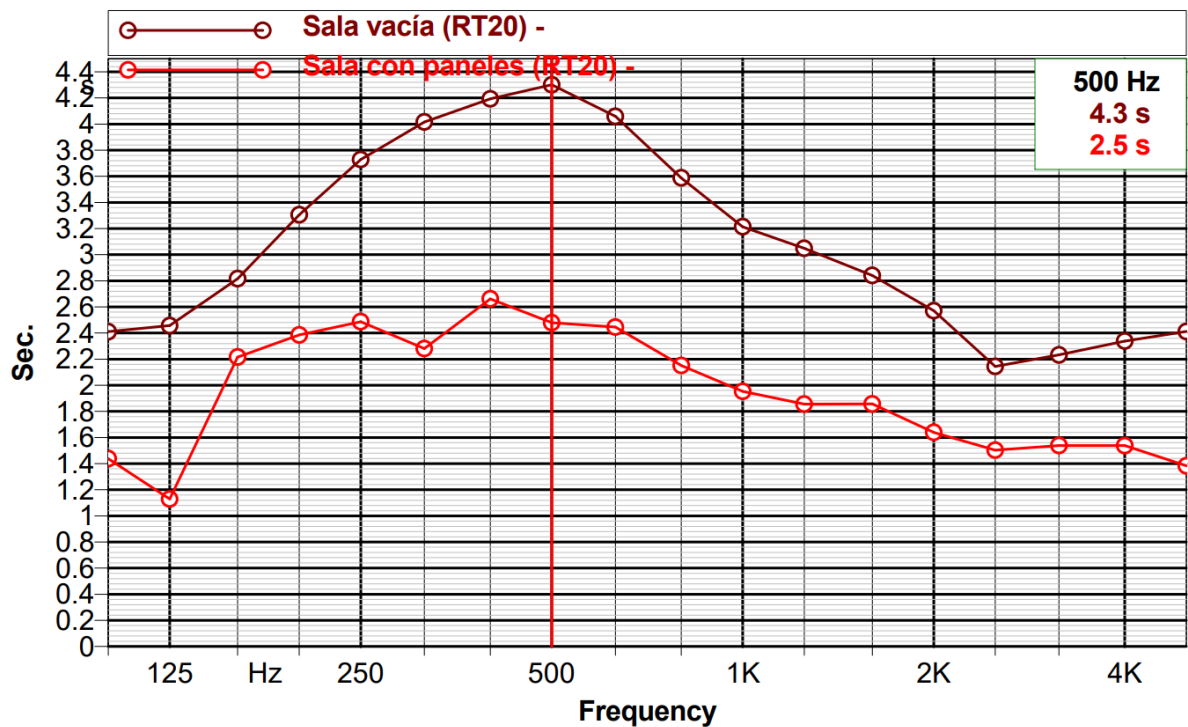
Resultado del promedio de RT20 de las 12 mediciones realizadas en salón del CIT 421 con tratamiento acústico.

Cuadro 15

RT20 en CIT 421 con tratamiento acústico medido con sonómetro Larson Davies, expresado en bandas de tercios de octava

Frecuencia	Tiempo de reverberación
100 Hz	1.44 s
125 Hz	1.13 s
160 Hz	2.22 s
200 Hz	2.39 s
250 Hz	2.49 s
315 Hz	2.28 s
400 Hz	2.66 s
500 Hz	2.48 s
630 Hz	2.45 s
800 Hz	2.15 s
1000 Hz	1.95 s
1250 Hz	1.86 s
1600 Hz	1.86 s
2000 Hz	1.64 s
2500 Hz	1.50 s
3150 Hz	1.54 s
4000 Hz	1.54 s
5000 Hz	1.38 s

Figura 39. Curvas comparativas de comportamiento de RT20 en CIT 421 con tratamiento acústico mediante paneles de micelio de hongo, y sin tratamiento acústico. Generado por sonómetro Larson Davies



El RT20 es el tiempo en el que el índice de presión sonora decae 20dB, se utiliza para poder proyectar el tiempo de reverberación. El tiempo de reverberación se define como el tiempo en el que se presenta un decaimiento de índice de presión sonora de 60dB, por en mucho de los casos es complicado obtener mediciones en recintos para dicho diferencial de presión sonora debido al ruido de fondo, tal cual fue el caso con las mediciones en el CIT 421, por lo que el proyectar utilizando el RT20 y RT30 es necesario para garantizar una buena calidad de resultados del tiempo de reverberación.

Figura 40. Calidad de mediciones de RT20 para CIT 421 sin tratamiento acústico

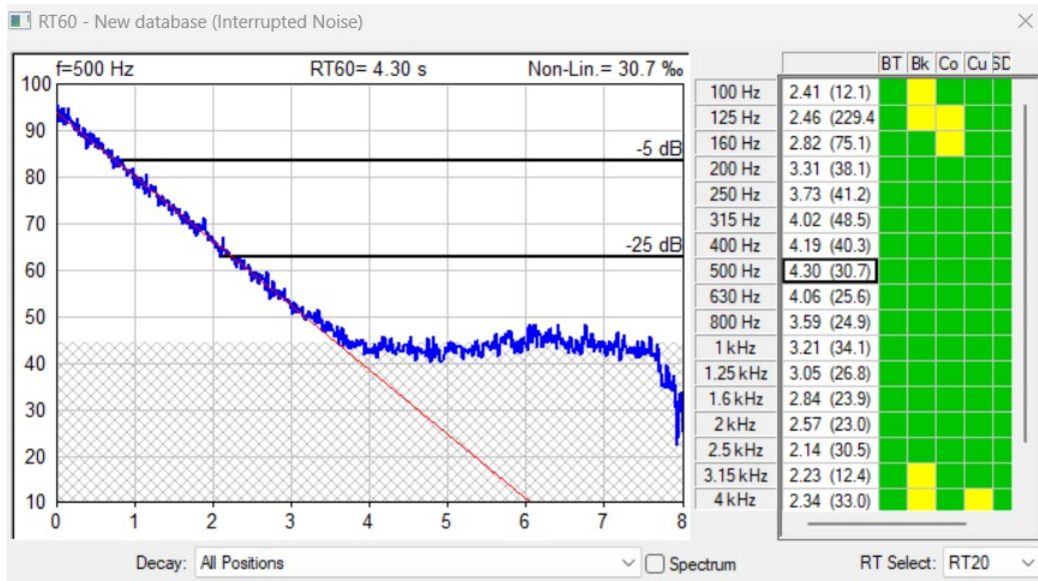
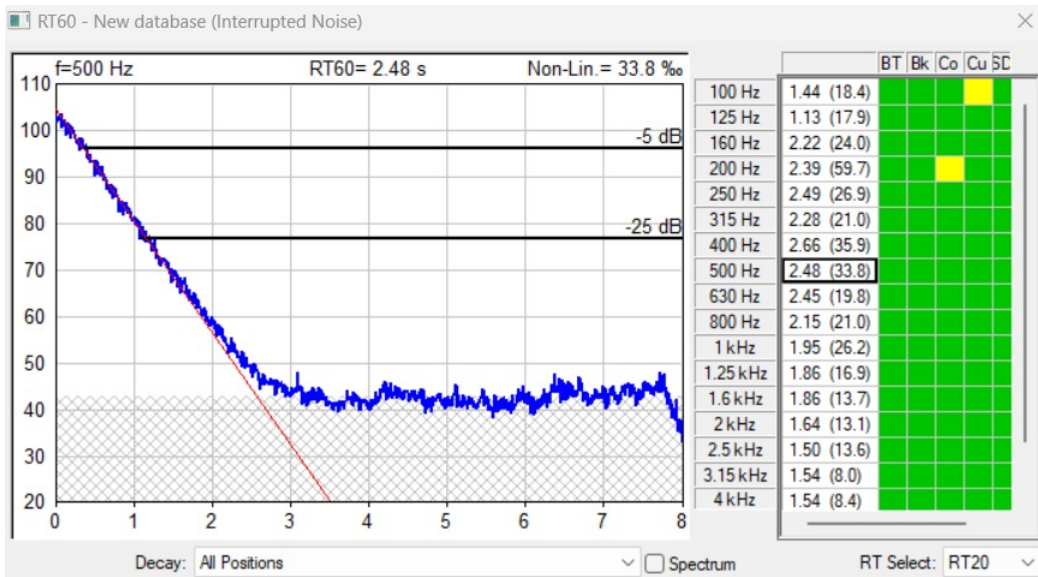


Figura 41. Calidad de mediciones de RT20 para CIT 421 con tratamiento acústico



Como se puede observar en las figuras No.40 y No.41 la calidad de las mediciones realizadas con el sonómetro fueron muy buenas, lo que brinda mayor exactitud y confiabilidad a los resultados de tiempo de reverberación.

### 3. Tiempo de reverberación resultante RT30.

El RT30 representa el tiempo en el que el sonido del recinto sufre una disminución del índice de presión sonora de 30dB, este indicador, al igual que el RT20 es una herramienta para poder generar el tiempo general de reverberación que consiste en el tiempo en el que existe un decaimiento de índice de presión sonora de 60dB.

Resultado del promedio de RT30 de las 12 mediciones realizadas en salón del CIT 421 sin tratamiento acústico:

Cuadro 16  
*RT30 en CIT 421 sin tratamiento acústico medido con sonómetro Larson Davies, expresado en bandas de tercios de octava*

<b>Frecuencia</b>	<b>Tiempo de reverberación</b>
100 Hz	2.41 s
125 Hz	2.46 s
160 Hz	2.68 s
200 Hz	3.31 s
250 Hz	3.71 s
315 Hz	3.97 s
400 Hz	4.22 s
500 Hz	4.32 s
630 Hz	4.03 s
800 Hz	3.76 s
1000 Hz	3.19 s
1250 Hz	3.08 s
1600 Hz	2.86 s
2000 Hz	2.67 s
2500 Hz	2.30 s
3150 Hz	2.43 s
4000 Hz	2.78 s
5000 Hz	2.41 s

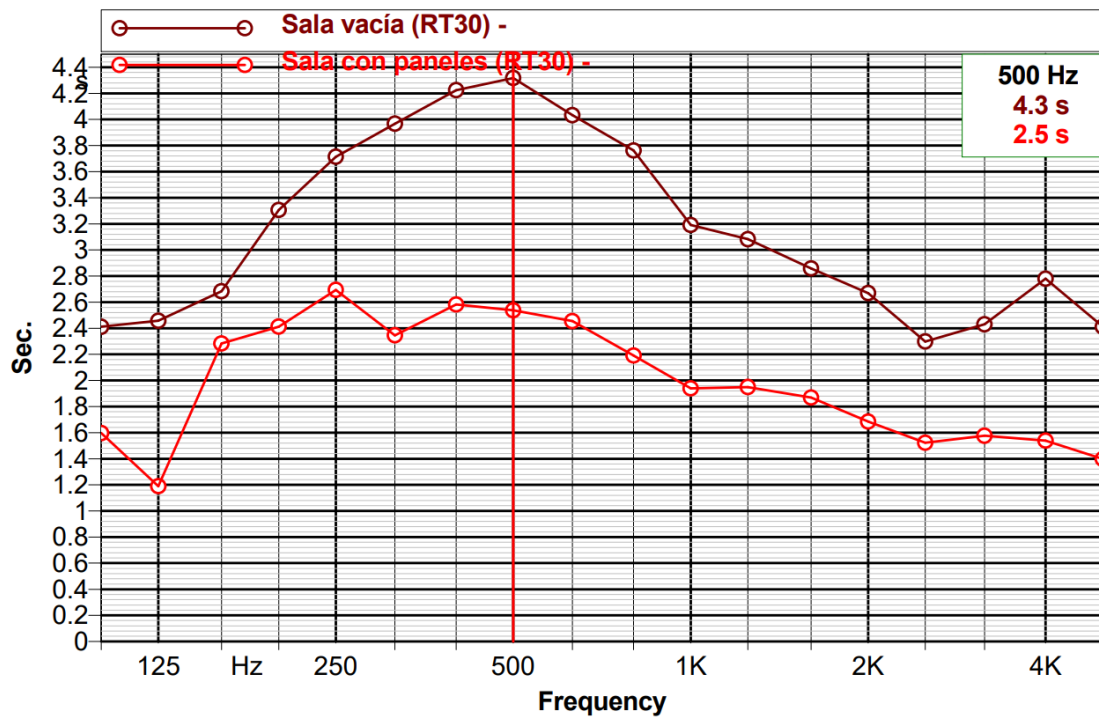
Resultado experimental del promedio de RT30 de las 12 mediciones realizadas en salón del CIT 421 con tratamiento acústico:

Cuadro 17

RT30 en CIT 421 con tratamiento acústico medido con sonómetro Larson Davies, expresado en bandas de tercios de octava

Frecuencia	Tiempo de reverberación
100 Hz	1.60 s
125 Hz	1.19 s
160 Hz	2.28 s
200 Hz	2.41 s
250 Hz	2.69 s
315 Hz	2.35 s
400 Hz	2.58 s
500 Hz	2.54 s
630 Hz	2.45 s
800 Hz	2.19 s
1000 Hz	1.94 s
1250 Hz	1.95 s
1600 Hz	1.87 s
2000 Hz	1.68 s
2500 Hz	1.52 s
3150 Hz	1.58 s
4000 Hz	1.54 s
5000 Hz	1.40 s

Figura 42. Curvas comparativas de comportamiento de RT30 en CIT 421 con tratamiento acústico mediante paneles de micelio de hongo, y sin tratamiento acústico. Generado por sonómetro Larson Davies



En el caso del RT30 la frecuencia que presentó un mayor tiempo de reverberación fue la frecuencia de 250 Hz con 2.69 segundos, lo que llama la atención debido a que al momento de comprar los resultados con los mostrados en la Figura No.39 se evidencia que existe poca capacidad del micelio de hongo *Pleurotus Ostreatus* de absorción acústica a frecuencias en el rango de 250 Hz y 400 Hz.

Figura 43. Calidad de mediciones de RT30 para CIT 421 sin tratamiento acústico

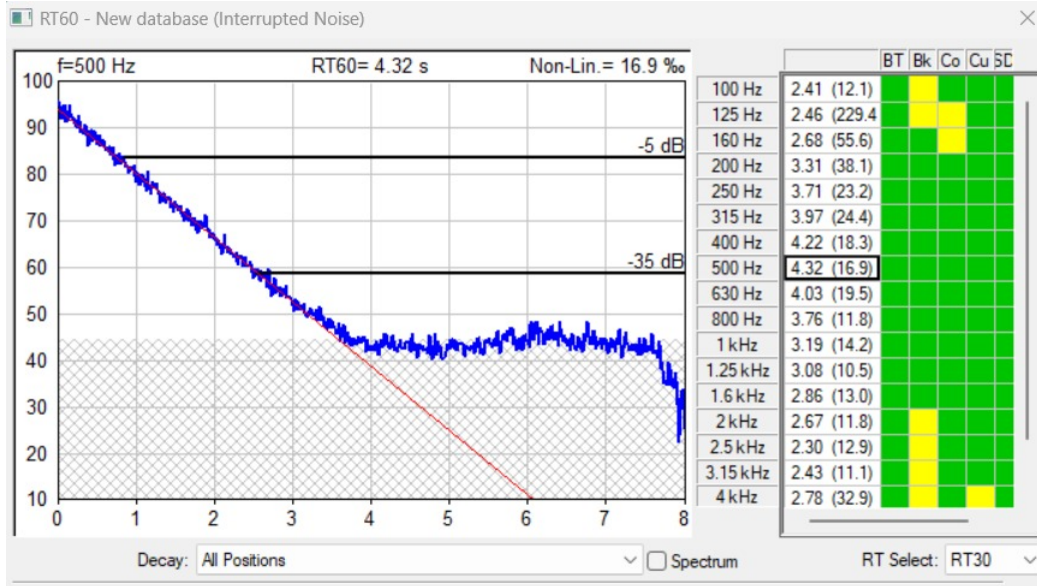
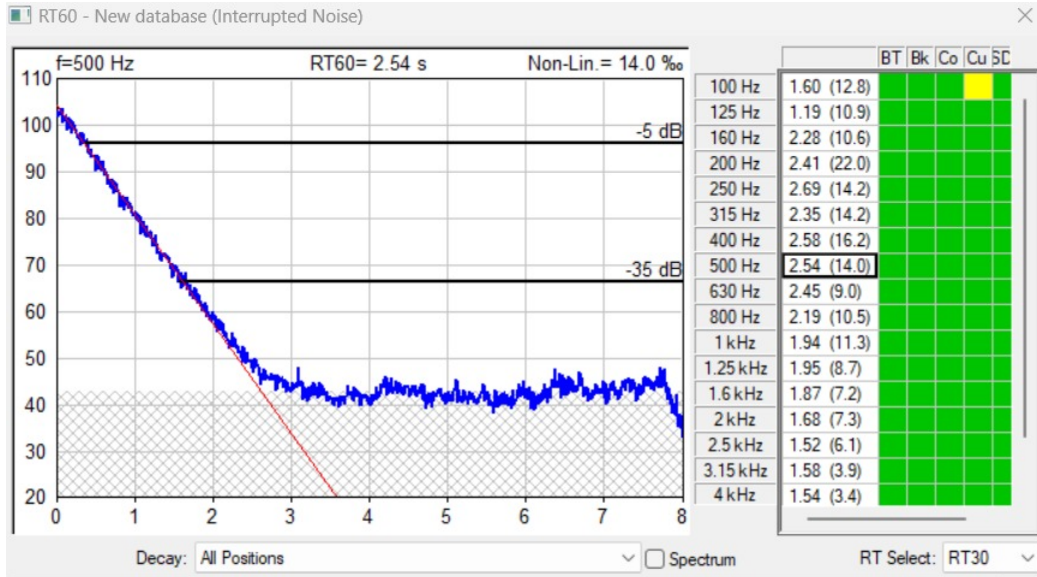


Figura 44. Calidad de mediciones de RT30 para CIT 421 con tratamiento acústico



Como se puede observar en las figuras No.43 y No.44, la igual que con las mediciones de RT20, la calidad de las mediciones realizadas con el sonómetro fueron muy buenas, lo que brinda mayor exactitud a los resultados de tiempo de reverberación.

#### 4. Tiempo de reverberación global resultante RT60 convertido a banda de octava.

Debido a que los coeficientes de absorción acústica se presentan en banda de octava, se tomó la decisión de calcular los coeficientes de absorción de los paneles de micelio de hongo ostra únicamente para estas frecuencias, por lo que se convirtió el tiempo de reverberación experimental obtenido en banda de tercios de octava a banda de octava.

No se seleccionaron los tiempo de reverberación correspondientes a las frecuencias de octava, sino que se decidió promediar el tercio de octava superior e inferior para poder brindar datos más significativos para el espectro de medición, se realizó dicho procedimiento tanto para los resultados de las mediciones de tiempos de reverberación para el recinto sin tratamiento acústico y con tratamiento acústico.

Cuadro 18

*RT60 en CIT 421 sin tratamiento acústico medido con sonómetro Larson Davies, expresado en banda de octava*

<b>Frecuencia</b>	<b>Tiempo de reverberación</b>
125 Hz	2.56 s
250 Hz	3.69 s
500 Hz	4.18 s
1000 Hz	3.28 s
2000 Hz	2.52 s
4000 Hz	2.33 s

Cuadro 19

*RT60 en CIT 421 con tratamiento acústico medido con sonómetro Larson Davies, expresado en banda de octava*

<b>Frecuencia</b>	<b>Tiempo de reverberación</b>
125 Hz	1.69 s
250 Hz	2.48 s
500 Hz	2.52 s
1000 Hz	2.03 s
2000 Hz	1.69 s
4000 Hz	1.51 s

#### B. Resultados de coeficientes de absorción acústica de panel de micelio de hongo *Pleorotus Ostreatus*

Un punto importante a resaltar es el hecho de que las pruebas para la estimación de los coeficientes de absorción acústica de los paneles de micelio de hongo no se realizaron bajo las normas ISO 354: 2003 o ASTM C423 debido a distintas limitaciones, como el no contar con una cámara reverberante con medidas y condiciones normadas, además del tamaño de la superficie absorbente.

Las pruebas y resultados son referenciales, para la obtención de datos exactos se requiere la realización de mediciones siguiendo lo establecido en la norma ISO 354: 2003 o ASTM C423.

Parte importante de la caracterización del panel de micelio de hongo es la densidad, la cual se obtuvo mediante el cálculo del volumen del panel dividida la masa de la plancha de micelio. La densidad promedio fue de  $15.26 \text{ kg/m}^3$

Cuadro 20  
*Coefficientes de absorción de panel acústico de micelio de hongo ostra de 7.5 cm de espesor en banda de octava*

<b>Consideraciones</b>	$\alpha_{125}$	$\alpha_{250}$	$\alpha_{500}$	$\alpha_{1000}$	$\alpha_{2000}$	$\alpha_{4000}$	<b>NRC</b>
Coefficientes de absorción acústica de panel de micelio de hongo ostra de 7.5 cm de espesor	1.00	0.70	0.89	1.00	1.00	1.00	0.90

Como se puede observar en el Cuadro No.20 los coeficientes de absorción acústica máximos son de 1, esto debido a que se limitó el coeficiente con el fin de que fuera más fácil comparar con coeficientes de absorción de otros materiales, además que muchas bibliografías establecen que el coeficiente máximo teórico debe ser de 1, representando esto un 100 % de absorción acústica.

Como información referencial se escogió una plancha ROCKBOARD 40 de ROCKWOOL de 3 in de espesor, ya que su espesor era muy similar al espesor de los paneles de micelio de hongo ostra de 7.5 cm, lo cual equivale a 2.95 in. Se convirtieron los coeficientes de absorción máximos a 1, dichos coeficientes resultaron de la siguiente forma:

Cuadro 21  
*Coefficientes de absorción de panel acústico ROCKWOOL ROCKBOARD 40 de 3 in de espesor en banda de octava*

<b>Consideraciones</b>	$\alpha_{125}$	$\alpha_{250}$	$\alpha_{500}$	$\alpha_{1000}$	$\alpha_{2000}$	$\alpha_{4000}$	<b>NRC</b>
Coefficientes de absorción acústica de panel de ROCKBOARD 40 ROCKWOOL de 3 in de espesor	0.63	0.95	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99

A pesar que los coeficientes de absorción acústica son similares entre la plancha de ROCKBOARD 40 y el micelio de hongo ostra no es posible realizar la comparación numérica como tal de ambos resultados, debido a que los coeficientes acústicos de los paneles de micelio de hongo ostra se obtuvieron aplicando ingeniería inversa a partir de la ecuación de Sabine y no mediante la medición siguiendo las normas ISO 354: 2003 o ASTM C423, por falta de un recinto con las condiciones adecuadas en Guatemala. Para que una comparación cuantitativa sea válida se requiere que se hayan aplicado las mismas condiciones, metodología de ensayo y mismos parámetros.

Con el fin de generar un parámetro de referencia para la mejor comprensión de los resultados obtenidos con los paneles de micelio de hongo se presenta el siguiente cuadro:

Cuadro 22  
*Caracterización de coeficientes de absorción acústica*

<b>Rangos de coeficiente de reducción de ruido (NRC)</b>	<b>Efecto</b>
NRC > 0.80	Muy alto
0.50 <NRC ≤ 0.80	Alto
0.20 <NRC ≤ 0.50	Considerable
0.10 <NRC ≤ 0.20	Significativo
NRC ≤ 0.10	Bajo

(Peroni, 2021)

El desempeño teórico de los paneles de micelio de hongo ostra en base al coeficiente de reducción de ruido de 0.90 obtenido, mostrado en el Cuadro No.20, comparado con la caracterización expresada en el Cuadro No.22 es muy alto, este resultado teórico fue experimentado en cierta medida al momento de la realización de las mediciones, ya que al momento de colocar los paneles dentro del CIT 421 se sintió una diferencia cualitativa importante al momento de hablar dentro del recinto, lo que brinda cierto respaldo a los resultados teóricos obtenidos.

### **C. Costo por $m^2$ de panel acústico de micelio de hongo *Pleorotus Ostreatus***

Por panel acústico de micelio de hongo se hace referencia al panel final de madera relleno de la plancha de micelio de hongo ostra y cubierto por tela de lino listo para instalar.

El costo total de manufactura considerando depreciación, mano de obra y costos variables para la elaboración de 1  $m^2$  de panel acústico de micelio de hongo ostra fue de Q554.03. Como se puede observar en la Ecuación No.90. El mayor impacto en el costo estuvo en los gastos variables, si se hubiera utilizado un plywood de menor espesor se hubiera podido generar un ahorro, además el costo del sorgo pudo haberse reducido al comprar volúmenes mayores.

Otro aspecto crítico en el costo fue el elevado precio de los moldes en los cuales se hizo el micelio de hongo, ya que cada caja costó Q155 y era necesario una caja para la elaboración de una plancha de micelio, a pesar que se buscó fabricar bandejas para poder producir una mayor cantidad de  $m^2$  en el mismo tiempo, el volumen de compra no era suficientemente grande como para obtener un buen precio por la fabricación de los moldes.

### **D. Costo por $m^2$ de plancha de micelio de hongo *Pleorotus Ostreatus***

Por plancha de micelio de hongo se hace referencia al relleno absorbente fabricado a partir de sustrato de algodón esterilizado y sorgo con micelio primario de hongo ostra de 7.5 cm de espesor.

El costo total de manufactura considerando depreciación, mano de obra y costos variables para la elaboración de 1  $m^2$  de plancha de micelio de hongo ostra fue de Q284.74. Como se puede observar en la Ecuación No.91.

Al producir volúmenes más grandes de planchas de micelio de hongo hubiera hecho sentido comprar al por mayor el algodón que se utilizó como el medio de crecimiento del hongo *Pleurotus Ostreatus*, lo cual hubiera reducido de manera importante el gasto variable. Otro factor importante fue la mano de obra de Q33.83, el cual es un costo que puede ser más diluido al manejar una producción mayor.

## VII. CONCLUSIONES

Se logró generar exitosamente un panel acústico a partir de micelio de hongo *Pleorotus Ostreatus*, procedente de micelio madre cultivado en Guatemala. Se demostró que las hifas que conforman el micelio generan una estructura porosa y efectiva para la absorción de parte de la energía de las ondas de sonido, permitiendo que el tiempo de reverberación sea reducido.

Se logró generar una comparación, para frecuencias en tercios de octava, de los tiempos de reverberación del CIT 421 sin tratamiento acústico comparado con los tiempo de reverberación utilizando tratamiento acústico mediante paneles de micelio de hongo *Pleorotus ostreatus*. Se observó que la frecuencia crítica para el salón del CIT 421 sin tratamiento acústico fue la frecuencia de 500 Hz, la cual tardó 4.3 segundos en presentar una reducción de 60 dB, sin embargo la frecuencia crítica para el salón del CIT 421 utilizando los paneles de micelio de hongo fue 250 Hz, la cual tardó 2.69 segundos en presentar una reducción de 60 dB lo que es un 37.44 % de diferencia en el tiempo de las frecuencias críticas. La frecuencia menos crítica en el CIT 421 sin tratamiento acústico fue la frecuencia de 2500 Hz, tardando únicamente 2.14 segundos en presentar una reducción de 60dB. La frecuencia menos crítica en el CIT 421 utilizando los paneles de micelio de hongo fue la frecuencia de 125 Hz, tardando únicamente 1.19 segundos en presentar una reducción de 60dB.

La densidad promedio obtenida para un panel de micelio de hongo *Pleorotus Ostreatus* de 37cm de ancho, 78cm de largo y 7.5cm de espesor fue de  $15.26 \text{ kg/m}^3$ .

Se logró calcular exitosamente, de manera referencial, los coeficientes de absorción acústica en bandas de octava para los paneles de micelio de hongo ostra de 7.5 cm de espesor y  $15.26 \text{ kg/m}^3$  de densidad, obteniendo para la frecuencia de 125 Hz un  $\alpha$  de 1.00, para 250 Hz un  $\alpha$  de 0.70 (siendo este el coeficiente más bajo), para 500 Hz un  $\alpha$  de 0.89, para 1000 Hz un  $\alpha$  de 1.00, para 2000 Hz un  $\alpha$  de 1.00, y para 4000 Hz un  $\alpha$  de 1.00.

El NRC de los paneles de micelio de hongo *Pleorotus Ostreatus* fue de 0.9, lo que indica, de forma general, que tiene un efecto muy alto en cuanto al control de reverberación de recintos.

Se comprobó que sí se genera una disminución en el tiempo de reverberación para todas las frecuencias en bandas de tercios de octava en el rango de 100 Hz a 5000 Hz mediante el uso de paneles de micelio de hongo *Pleorotus Ostreatus*. Para la frecuencia crítica del CIT 421 sin de 500 Hz, se generó una disminución del 41.86 % luego de haber adicionado  $1.14 \text{ m}^2$  de paneles de micelio de hongo ostra.

El costo total de manufactura, considerando depreciación del equipo comprado, la mano de obra y costos variables, por  $\text{m}^2$  de plancha de micelio de hongo ostra de 7.5 cm de espesor fue de 284.74 quetzales.

El costo total de manufactura para la fabricación de paneles acústicos con relleno de micelio de hongo ostra de 7.5 cm de espesor, considerando depreciación del equipo comprado, la mano de obra y costos variables, por  $\text{m}^2$  fue de 554.03 quetzales.

## VIII. RECOMENDACIONES

Se recomienda para futuras investigaciones, buscar algún tratamiento o aditivo con el fin de tratar el micelio de hongo ostra, ya que al ser un material orgánico al igual que la madera, es alimento para distintos organismos, lo que reduce el tiempo de vida si no se trata adecuadamente.

Se recomienda, tal y como se hizo con la iteración exitosa de fabricación de la plancha de micelio, deshidratar las planchas de hongo al sol, y posteriormente cocinarlos a 350 °C por 30 minutos en un horno grande, con el fin de reducir costos en gas e inhibir la proliferación del hongo, dejando únicamente su estructura.

Se recomienda enviar muestras al extranjero para realizar las mediciones de manera apegada a la norma ISO 354: 2003 o ASTM C423, para la obtención de los coeficientes de absorción acústica, con el fin de que los resultados sean más exactos. Además de permitir la comparación de manera fiable con otros materiales absorbentes utilizados comúnmente como la lana mineral, fibra de vidrio o espumas.

Se recomienda realizar las mediciones de tiempos de reverberación en horarios en los que no hayan personas u otras fuentes externas de sonido, con el fin de reducir al máximo el ruido de fondo y eliminar factores de error, especialmente en recintos que se encuentren en espacios educativos o concurridos.

Se recomienda fabricar los bastidores de madera más livianos, con el fin de facilitar el traslado de los paneles, abaratar costos y hacer más eficiente el proceso de manufactura.

Se recomienda la búsqueda de moldes más grandes y económicos para el cultivo del hongo ostra, con el fin de reducir costos total de manufactura y mejorar eficiencia de fabricación.

Se recomienda realizar pruebas con aditivos con el fin de poder tratar el micelio de *Pleurotus Ostreatus* con el fin de sellarlo a plagas y al deterioro ambiental, con el fin de brindarle un mayor tiempo de vida y estabilidad.

Se recomienda y exhorta a los estudiantes de Ingeniería Civil Arquitectónica a realizar una tesis enfocada en determinar el coeficiente de conductividad térmica del hongo *Pleurotus Ostreatus*, para determinar si también puede funcionar como un material aislante.

Se recomienda realizar evaluación de capacidad de aislamiento acústico, usando el panel de micelio de hongo *Pleurotus Ostreatus* como núcleo de particiones livianas, tales como tablayeso o madera.

## IX. BIBLIOGRAFÍA

- Abad, M. (2018). *Estudio Acústico y Electroacústico de la sala de conciertos Ritmo y Compás (Madrid)*. [https://oa.upm.es/21507/1/TESIS\\_MASTER\\_MARTA\\_ABAD\\_SORBET.pdf](https://oa.upm.es/21507/1/TESIS_MASTER_MARTA_ABAD_SORBET.pdf)
- Adamatzky, A. (2018). On spiking behaviour of oyster fungi *Pleurotus djamor*. <https://www.nature.com/articles/s41598-018-26007-1>
- Alba, J., Ramis, J., Lorenzana, M., & del Rey, R. (2008). Propuesta de modelo empírico para materiales absorbentes acústicos. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/10424/III-20V24N2.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Arau, H. (1997). Absorción acústica de paneles resonadores membrana. [http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/publicaciones\\_4355ev018.pdf](http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/publicaciones_4355ev018.pdf)
- Arrieta, D. (2006). Materiales acústicos. <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/36761480/28.MaterialesAcusticoswithcoverpagev2.pdf>
- Bernhard, A. (2021). Acondicionamiento acústico y acústica de salas.
- Bongiovanni, P., Cascino, M., & Sanso, M. (2011). Análisis y diseño de difusores acústicos. <https://www.profesores.frc.utn.edu.ar/electronica/fundamentosdeacusticayelectroacustica/pub/file/FAyE0311E1-Bongiovanni-Cascino-Sanso.pdf>
- Carrión, A. (2020). Elementos absorbentes selectivos (resonadores). [http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing\\_ond\\_1/trabajos\\_07\\_08/io6/public\\_html/Paginas/reso.html#arriba](http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_07_08/io6/public_html/Paginas/reso.html#arriba)
- Fernández, E. (2016). *Estudio de la reverberación en las aulas y zonas comunes*. <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/19982/TFG-A-046.pdf;sequence=1>
- Fernández, J. (2019). Reflexión y refracción de ondas. <https://www.fiscalab.com/apartado/reflexion-refraccion-ondas>
- Fernández, J. (2020). Difracción de Ondas. <https://www.fiscalab.com/apartado/difraccion-ondas>
- Frasquet, M. (2010). Aislamiento y acondicionamiento acústico de un auditorio para actuaciones en directo de bandas de música. <http://hdl.handle.net/10251/11614>
- Galiana, J., & Gordillo, A. (2019). Diseño e implementación de difusores acústicos cristalinos. [https://dehesa.unex.es/flexpaper/template.html?path=https://dehesa.unex.es/bitstream/10662/9941/1/TFGUEX\\_2019\\_Galiana\\_Nieves.pdf#page=5](https://dehesa.unex.es/flexpaper/template.html?path=https://dehesa.unex.es/bitstream/10662/9941/1/TFGUEX_2019_Galiana_Nieves.pdf#page=5)
- García, A. (2018). Difracción producida por una rendija. <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/ondas/difraccion/difraccion.html#:~:text=La%20difracci%20C3%B3n%20se%20observa%20cuando,los%20efectos%20de%20los%20extremos>
- González, Y. (2014). Efectos de la contaminación sónica sobre la salud de estudiantes y docentes, en centros escolares. <https://www.medigraphic.com/pdfs/revcubhigepi/chi-2014/chi1431.pdf>
- Graus, A. (2019). Significado de acústica. <https://www.significados.com/acustica/>
- Gutiérrez, E. (2014). *La Ciencia del Sonido (Segunda edición)*.
- Jaramillo, A. (2007). *Acustica: La ciencia del sonido*. <https://books.google.com.gt/books>
- Kaamin, M. (2017). Sound absorption study on acoustic panel from kapok fiber and egg tray. <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5010572>
- Manrique, M., & Marco, J. (2014). Audiología. [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/61218352/2014\\_Audiologia20191114-63569-1bqoij5-libre.pdf](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/61218352/2014_Audiologia20191114-63569-1bqoij5-libre.pdf)

- Navacerrada, M., Díaz, C., Pedrero, A., Isaza, M., Fernández, P., Álvarez, C., & Restrepo, A. (2016). Caracterización acústica y térmica de no tejidos basados en fibras naturales. [http://sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/97\\_01.pdf](http://sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/97_01.pdf)
- Norris, M. (2007). Acustica de recintos (II). <https://fisica.laguia2000.com/acustica/acustica-de-recintos-ii>
- Orduña, F. (2014). Método para medición in-situ del coeficiente de absorción acústica de materiales utilizando un solo micrófono y deconvolución regularizada. <http://somi.ccadet.unam.mx/somi29/memoriassomi29/PDFS/Instrumentacion/24-XASOMI-36-24.pdf>
- Peiffer, K. (2019). Acoustic Panel Ceilings: Origins. [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/63659196/2020\\_Annual\\_Paper\\_KPeiffer20200617-121852-1ma692h-with-cover-page-v2.pdf](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/63659196/2020_Annual_Paper_KPeiffer20200617-121852-1ma692h-with-cover-page-v2.pdf)
- Pellis, G., Vargas, G., & Zambroni, E. (2011). *Acondicionamiento acústico de recintos, análisis y diseño*. <https://www.profesores.frc.utn.edu.ar/electronica/fundamentosdeacusticayelectroacustica/pub/file/FAyE0511E1-Pellis-Vargas-Zambroni.pdf>
- Peroni. (2021). Absorción acústica - ASTM C423. [https://www.peroni.com/lang\\_ES/scheda.php?id=57900](https://www.peroni.com/lang_ES/scheda.php?id=57900)
- Rossell, I., Soler, S., & Vila, C. (2005). Resonadores de Helmholtz de boca rectangular y cuello de longitud pequeña. [https://dehesa.unex.es/flexpaper/template.html?path=https://dehesa.unex.es/bitstream/10662/9941/1/TFGUEX\\_2019\\_Galiana\\_Nieves.pdf#page=5](https://dehesa.unex.es/flexpaper/template.html?path=https://dehesa.unex.es/bitstream/10662/9941/1/TFGUEX_2019_Galiana_Nieves.pdf#page=5)