

Universidad Austral de Chile
INSTITUTO DE ACÚSTICA
Proyecto acústico - Acondicionamiento acústico
ACUS213

“Acondicionamiento acústico de salas de reuniones y sala de ensayo, Campus Los Canelos, UACH”

FECHA DE ENTREGA: 29 DE NOVIEMBRE DE 2023

Profesor:
Felipe Figueroa

Estudiante:
Daniela Narváez
Rafael Hayde

Índice

1 Introducción

El acondicionamiento acústico consiste en la definición de las formas y revestimientos de las superficies interiores de un recinto con objeto de conseguir las condiciones acústicas más adecuadas para el tipo de actividad a la que se haya previsto destinarlo.(?, ?)

El presente informe tiene como objetivo analizar y proponer soluciones para el acondicionamiento acústico de dos salas de reuniones y una sala de ensayo de orquesta.

La importancia del acondicionamiento acústico radica en su capacidad para mejorar la experiencia auditiva de las personas que utilizan estos espacios. En el caso de las salas de reuniones, es imprescindible una óptima inteligibilidad de la palabra ya que la comprensión del mensaje oral es de suma importancia. (?, ?) En el contexto de una sala de ensayo de orquesta, el acondicionamiento acústico es crucial para lograr una reproducción fiel y equilibrada de los instrumentos musicales, permitiendo a los músicos escucharse entre sí y trabajar en conjunto de manera óptima.

Para llevar a cabo este proyecto, se utilizará normativas que indican el procedimiento de medición tiempo de reverberación y cálculo de parámetros acústicos como la ISO 3382 – 2 (?, ?).

2 Objetivos

- Objetivo General:**

Proponer un acondicionamiento acústico para dos salas de reuniones y una sala de ensayo de orquesta, en el Centro de Extensión Campus los Canelos, UACh.

- Objetivos Específicos:**

- Caracterizar acústicamente las salas.
- Analizar los parámetros acústicos de las salas.
- Generar una propuesta de diseño de acondicionamiento acústico para optimizar el sonido de las salas.
- Comparar los resultados mediante recomendaciones internacionales.
- Estimar presupuestos del acondicionamiento acústico para cada sala.

3 Antecedentes del recinto

El Centro de Extensión Campus Los Canelos de la Universidad Austral de Chile, ubicado en la calle Yeras Buenas, en la ciudad de Valdivia, inaugurado en 2019, busca “acoger y congregar a diferentes comunidades en torno a las artes, las culturas, la extensión científica, temas públicos e iniciativas del área de la salud. Atendiendo a los lineamientos y políticas de vinculación con el medio universitarias se priorizó la adecuación de los espacios con una orientación hacia su uso público. Este centro cuenta con tres salones multiuso para exposiciones, charlas y conferencias, sumando más de $250\ m^2$ de superficie totalmente equipados con sistemas de audio y video. Además, alberga a las distintas unidades, programas y áreas que conforman la Dirección de Vinculación con el medio, con un espacio cercano a los $300\ m^2$ utilizados como salas de reuniones y oficinas.” (?, ?)



Figura 1: Centro de Extensión Campus los Canelos, UACH.

En específico, este proyecto considera el acondicionamiento acústico de dos salas de reuniones, de 30 y $35\ m^2$, y la sala de ensayo de la Orquesta de Cámara de Valdivia, de $62\ m^2$.

El Centro de Extensión Campus Los Canelos de la Universidad Austral de Chile, como se puede observar en la figura ?? se encuentra ubicado en Yeras Buenas 181, en la ciudad de Valdivia.

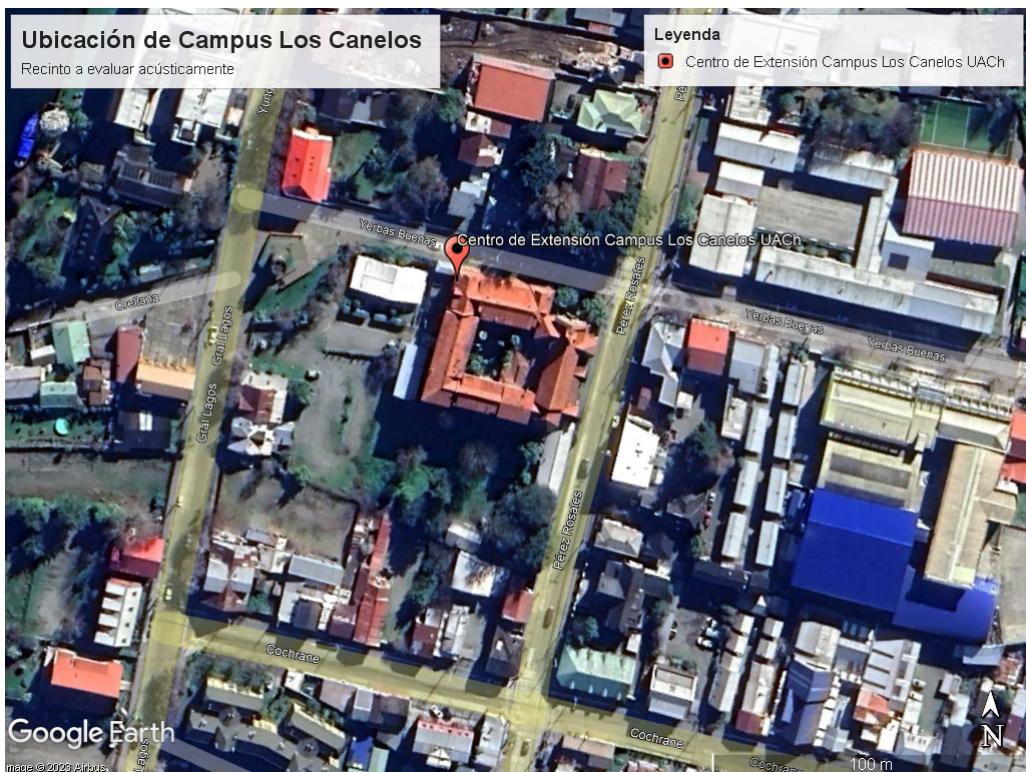


Figura 2: Geolocalización del edificio

Los salones a estudiar dentro del recinto son dos salas de reuniones con soporte para videoconferencia y una sala de ensayo utilizada por la Orquesta de Cámara de Valdivia, como se puede observar en las Figuras ??, ?? y ?? respectivamente.



Figura 3: Fotografía de sala de reunión 1



Figura 4: Fotografía de sala de reunión 2

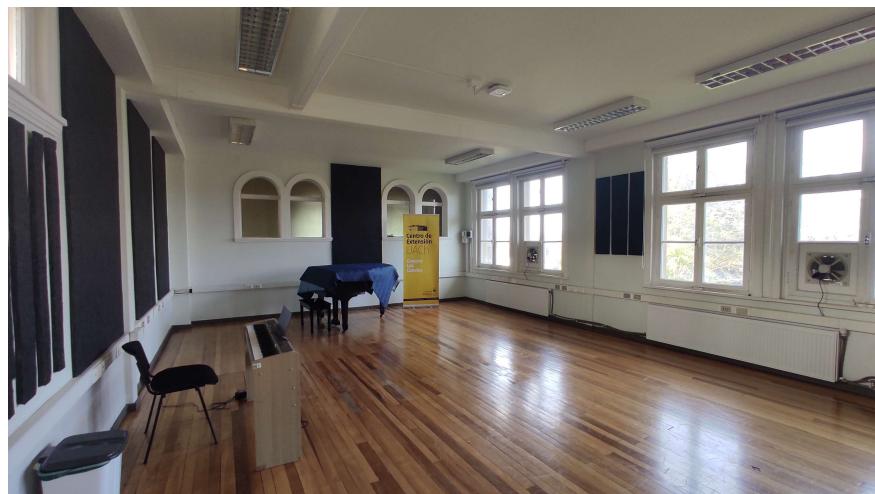


Figura 5: Fotografía de sala de ensayo

4 Planificación

4.1 Plan de trabajo

Para elaborar el proyecto es importante la realización de actividades las cuales se ven descritas en la tabla ?? con sus respectivos resultados esperados para un trabajo óptimo.

Tabla 1: Plan de trabajo

Actividad	Descripción	Resultado esperado	Indicador de cumplimiento
Planificación	Establecer contacto con el establecimiento y planificación de actividades	Organización del proyecto	Carta Gantt y puntos de medición
Mediciones	Realizar mediciones de dimensión, ruido de fondo y tiempo de reverberación de las salas	Mediciones de respuesta al impulso de las salas, geometría y volumen	Datos de características físicas y acústicas del recinto
Modelación	Modelar las salas en software CAD	Modelo en software EASE del recinto	Archivo de software EASE con modelo del recinto
Análisis de datos	Procesar y tabular los datos obtenidos de las mediciones	Tabla comparativa con recomendaciones	Archivo CSV con los datos procesados de las mediciones
Diseño de propuesta	Proporcionar un diseño de acondicionamiento acústico acorde con recomendaciones para las salas	Determinar una solución de acondicionamiento acústico óptimo para los usos de las salas	Documentación del detalle y archivo de software EASE con la implementación de la propuesta
Análisis de propuesta	Evaluar el acondicionamiento acústico a través de software EASE	Comprobar el mejoramiento de las características acústicas de cada sala	Tabla comparativa de los parámetros de las salas acondicionadas y recomendaciones bibliográficas
Presupuesto de diseño	Presentar una cotización de los elementos y materiales propuestos para el acondicionamiento acústico	Listado de los elementos requeridos para el acondicionamiento en el mercado y sus respectivos valores	Presupuesto de los elementos que componen la propuesta de acondicionamiento acústico
Redacción de informe	Evidenciar el desarrollo del proyecto mediante avances progresivos	Plasmar los resultados del trabajo realizado en el proyecto	Informe final del proyecto
Elaboración de póster	Sintetizar la información presente en el informe en formato póster	Resumen general del proyecto	Póster

4.2 Cronograma

A continuación, en la tabla ?? se puede observar la planificación respectiva del proyecto, partir de las actividades planteadas en la tabla ???. Esta planificación se plantea por semanas, desde la semana del 21 de agosto hasta la semana del 2 de diciembre del presente año. Los números señalan la cantidad de horas que se emplearan en realizar cada actividad. Las semanas destacadas son las que corresponden a las entregas de avances del proyecto.

Tabla 2: Carta Gantt del proyecto

Actividad	Semanas															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Planificación	3	4														
Mediciones		6	3													
Modelación			6	6	6											
Análisis de datos				2	4											
Diseño de propuesta					4	4	4	4	4	4						
Análisis de propuesta					2	2	2	2	2	2						
Presupuesto de diseño								2	2	2	2					
Redacción de informe	2	2	2	2		2	2	2		2	2	2	2	2	2	
Elaboración de poster														2	2	

Actualmente el proyecto se encuentra en la semana 15, en la cual se hace la última entrega de informe, teniendo ya una solución y un presupuesto de este.

5 Metodología

5.1 Medición de dimensiones del recinto

Para caracterizar el recinto, es necesario tener las dimensiones de cada sala. Parte del detalle de las dimensiones fueron proporcionadas por el encargado del Campus Los Canelos. En la figura ?? se puede observar una vista superior de las salas a estudiar.

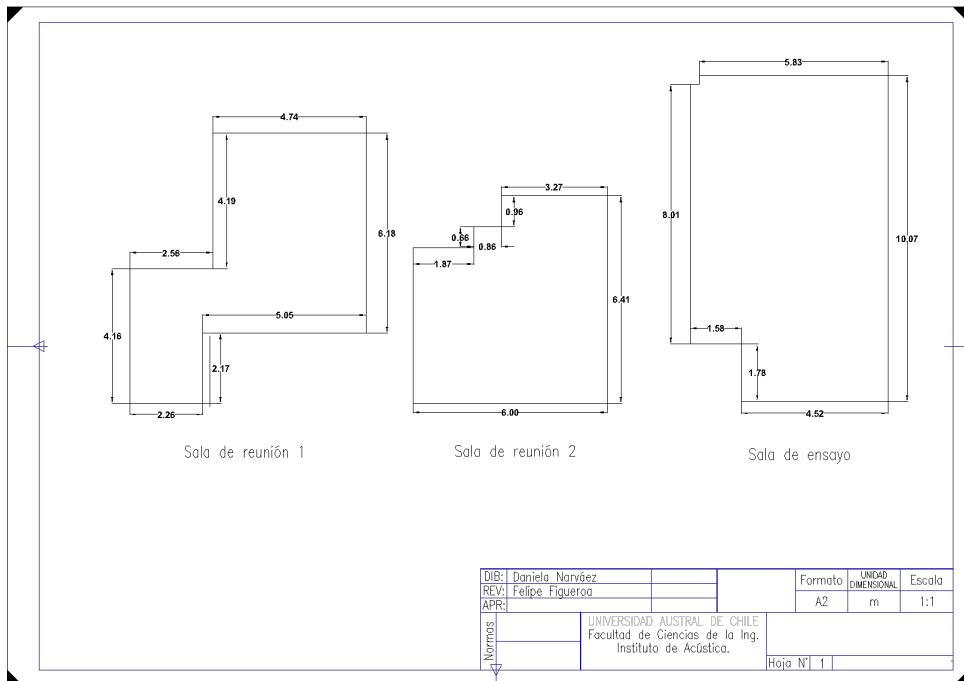


Figura 6: Planos de salas de reuniones y sala de ensayo Campus los canelos

5.2 Medición de parámetros acústicos del recinto

Para poder caracterizar acústicamente los salones, se necesita medir parámetros como el ruido de fondo y tiempo de reverberación de cada sala. Para esto se utilizará los siguientes instrumentos:

Tabla 3: Instrumentación utilizada para las mediciones

Instrumentos	Uso
Sonómetro Cirrus CR:171B	Medir nivel de presión sonora equivalente
Micrófono Behringer ECM8000	Recibir el nivel de las fuentes
Conectores XLR	Enviar señal de audio
Interfaz de audio TASCAM US 4x4	Procesar señales de audio
Cinta métrica	Medir distancia de fuente y micrófonos
Termómetro e higrómetro digital	Medir temperatura y humedad en el lugar de medición
Protectores auditivos	Proteger oídos de la exposición de sonidos fuertes
Notebook con software ARTA	Procesar y analizar señales
Globos	Fuente impulsiva

5.2.1 Ruido de fondo

Para medir el ruido de fondo se utilizó el sonómetro Cirrus basándose en el procedimiento descrito en el D.S. 38/11, que indica lo siguiente: "Se deberá medir el NPSeq en forma continua, hasta que se estabilice la lectura, registrando el valor de NPSeq cada 5 minutos. Se entenderá por estabilizada la lectura, cuando la diferencia aritmética entre dos registros consecutivos sea menor o igual a 2 dB(A). El nivel a considerar será el último de los niveles registrados. En ningún caso la medición deberá extenderse por más de 30 minutos."(?, ?)



Figura 7: Medición de ruido de fondo

5.2.2 Tiempo de reverberación

Para la medición de tiempo de reverberación se siguió el procedimiento que indica la norma ISO 3382-2 (?, ?), utilizando el método de respuesta impulsiva en cada una de las salas, utilizando globos como fuente impulsiva. En cada sala de reuniones se realizan dos posiciones de fuente y tres de micrófono, y para la sala de ensayo se utilizan dos posiciones de fuente y cuatro de micrófono, realizando dos mediciones para cada combinación de fuente-micrófono. En el anexo ?? se encuentran los planos con las posiciones de fuente y micrófono utilizadas en cada salón.



Figura 8: Medición de ruido de tiempo de reverberación

6 Modelación

6.1 Modelación en SketchUp

A partir de los planos de la figura ?? y de las mediciones más detalladas de cada sala, se modeló las tres salas en el software SketchUp (? , ?), resultando los modelos de las figuras ??, ?? y ??, tomando en consideración muebles que utilizaban mayor volumen en las salas de reuniones.

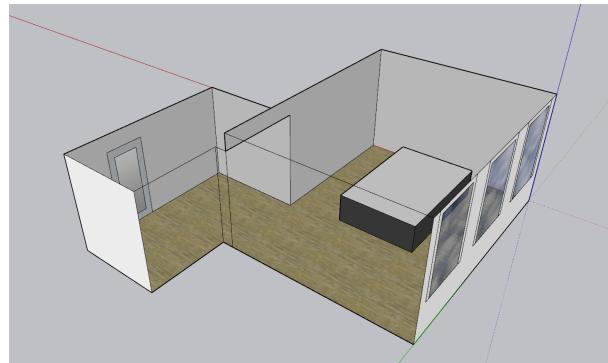


Figura 9: Modelo en SketchUp de Sala de reunión 1

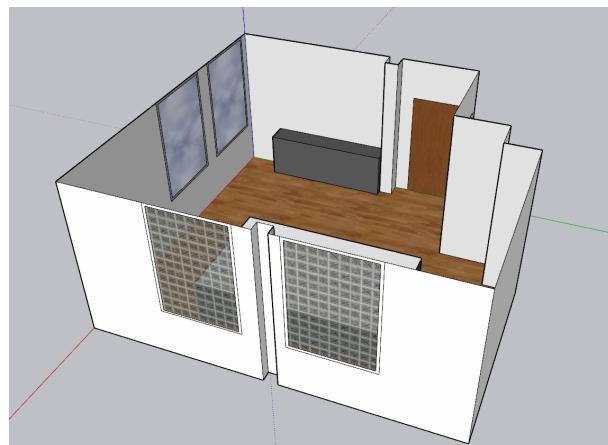


Figura 10: Modelo en SketchUp de Sala de reunión 2



Figura 11: Modelo en SketchUp de Sala de ensayo

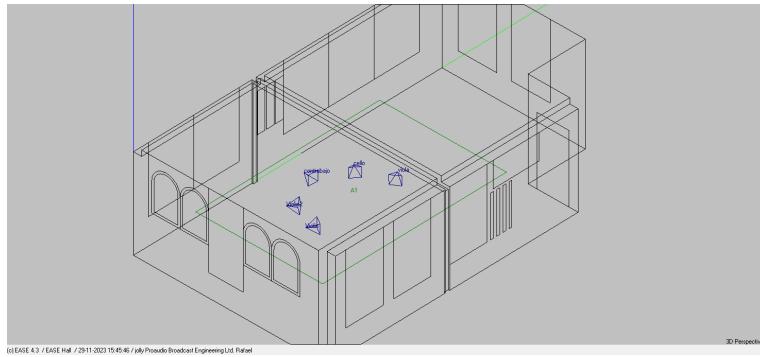


Figura 12: Imagen de la distribución de instrumentos en el EASE

6.2 Modelación en EASE

A partir de los modelos en SketchUp, estos se importaron al software EASE (? , ?), verificando las superficies y que estos estén bien cerrados para un correcto uso en el programa. Para calibrar los modelos, se identificó los materiales de cada sala, para poder asignar los coeficientes de absorción a cada superficie correspondientemente. En la tabla ?? se pueden observar los materiales que se le asignaran a las distintas superficies y su respectivo coeficiente de absorción, además de la fuente de donde se trajeron estos datos. Las superficies cuyo material es desconocido, fueron despejadas desde la ecuación ??.

Tabla 4: Materiales utilizados para modelo en EASE.

Material	Frecuencia (Hz)						Fuente
	125	250	500	1000	2000	4000	
Parquet	0.04	0.04	0.07	0.06	0.06	0.07	(?, ?)
Madera	0.25	0.34	0.18	0.10	0.10	0.06	(?, ?)
Black Acoustic Board (2")	0.13	0.75	1.17	1.14	1.05	1.09	(?, ?)
Vidrio	0.05	0.5	0.03	0.03	0.02	0.02	(?, ?)

Para tener modelar la sala ocupada se consideró el siguiente coeficiente de absorción por persona:

Tabla 5: Coeficiente de absorción de una persona sentada de EASE

Frecuencia Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Absorción α	0.31	0.51	0.73	0.80	0.82	0.82

Para simular a los músicos tocando en la sala de ensayo, se ingresó archivos GLL de cada instrumento que compone la orquesta de cámara que ensaya en el lugar.(?, ?) Estos instrumentos se ubicaron como se muestra en la figura ??, distribución que se estableció, a partir de imágenes de la orquesta de cámara ensayando en el lugar.(ver figura ?? y ??)



Figura 13: Ensayo de cuerdas frotadas de orquesta de cámara en la sala de ensayo



Figura 14: Ensayo de bronces y maderas de la orquesta de cámara en la sala de ensayo

7 Recomendaciones de parámetros acústicos

Como objetivo de acondicionamiento acústico de cada sala, se consideran recomendaciones de los parámetros antes medidos, los cuales dependen del uso de estas. Por lo que estos se dividen en dos grupos, los que son dirigidos para el uso del habla y otro para la sala dirigida a música clásica.

7.1 Salas de reuniones

Para las salas de reuniones se consideran recomendaciones de parámetros determinados para sala de conferencias. En la tabla ?? se pueden observar los valores objetivo para este tipo de salas y la fuente bibliográfica que determina estos valores.

Parámetro	Uso	Valores	Fuente
Curvas NC	Para salas de juntas	25 - 30	(?, ?)
T_{target}	Speech/Lecture ($A2$)	0.6	(?, ?)
$C_{50speech}$	Para la voz	$C_{50} > 0$	(?, ?)
STI	Transmisión del habla	$STI > 0.45$	(?, ?)

Tabla 6: Parámetros objetivos para salas de reuniones

7.2 Sala de ensayo

Para la sala de ensayo se consideran recomendaciones de parámetros determinados para sala de conciertos de música de cámara, ya que este espacio es utilizado para este tipo de música. En la tabla ?? se pueden observar los valores objetivo para este tipo de salas y la fuente bibliográfica que determina estos valores.

Parámetro	Uso	Valores	Fuente
Curvas NC	Salas de conciertos y teatros de ópera	20 - 25	(?, ?)
RT_{mid}	Sala de conciertos (música de cámara)	1.3 - 1.7	(?, ?)
C_{80}	Para música sinfónica	$-2 < C_{80} < 2$	(?, ?)
D_{50}	Salas de concierto	$D_{50} < 0.5$	-

Tabla 7: Parámetros objetivos para sala de ensayo

8 Resultados del estado actual de los recintos

A continuación se muestran los resultados de las mediciones y parámetros más específicos del ruido de fondo y tiempo de reverberación, como curvas NC y NR, claridad ($C_{50speech}$, C_{80}) y definición D_{50} .

8.1 Ruido de fondo

En las figuras ??, ?? y ??, se pueden observar los valores obtenidos del ruido de fondo en bandas de octava con su respectiva curva NC más cercana.

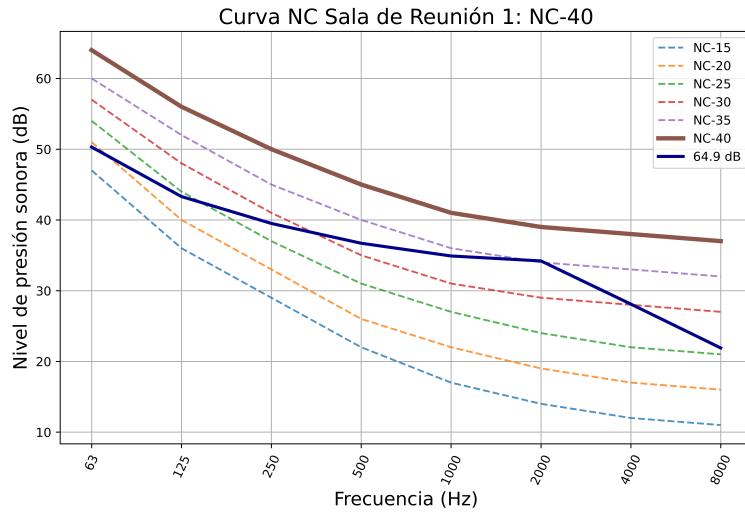


Figura 15: Curvas NC sala de reunión 1

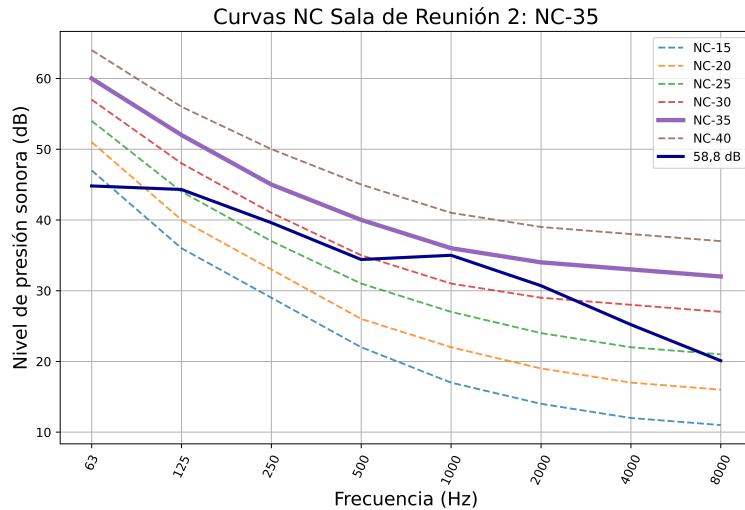


Figura 16: Curvas NC sala de reunión 2

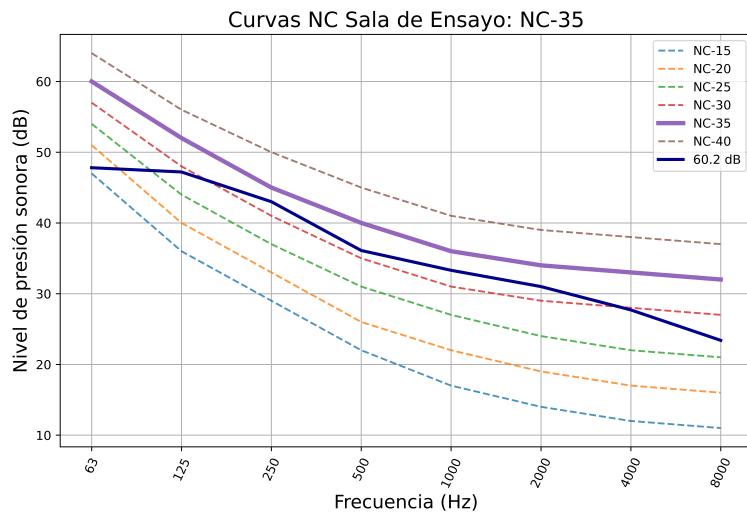


Figura 17: Curvas NC sala de ensayo

Según las recomendaciones mencionadas en la sección ?? se puede determinar que los valores de ruido de fondo como se muestran en la tabla ?? no cumplen para todas las salas.

Salones	Curva NC recomendada	Curva NC medida	Estado
Sala de reunión 1	25 - 30	40	No cumple
Sala de reunión 2	25 - 30	35	No cumple
Sala de ensayo	20 - 25	35	No cumple

Tabla 8: Estado de parámetros de ruido de fondo por sala

8.2 Tiempo de reverberación

8.2.1 Salas de reunión

A partir del tiempo de reverberación medido (ver anexo ??), se obtienen los gráficos de tiempo de reverberación descritos en la norma DIN18041 para las salas de reunión.

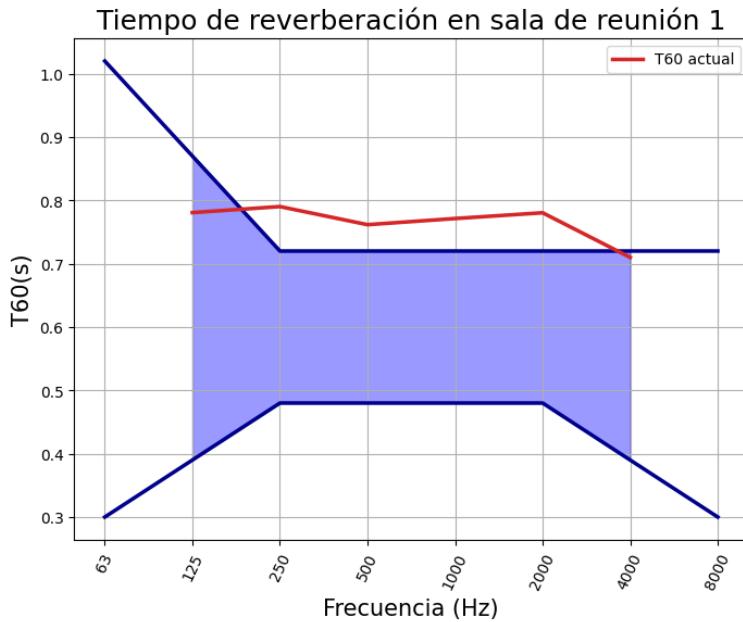


Figura 18: Tiempo de reverberación Sala de reunión 1

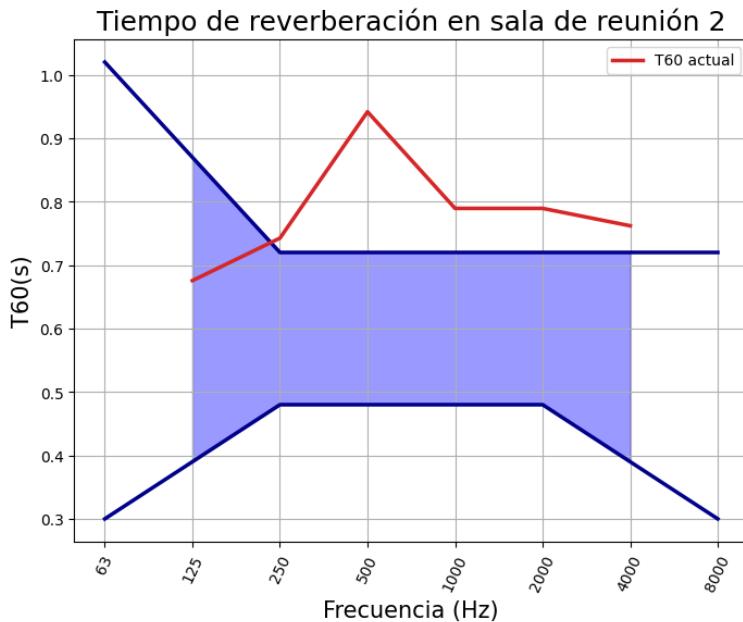


Figura 19: Tiempo de reverberación Sala de reunión 2

A continuación se muestra una tabla con los valores obtenidos a partir de las mediciones realizadas. Los gráficos más detallados se encuentran en el anexo.

Parámetro	Recomendación	Sala de reunión 1	Sala de reunión 2
$T_{target}(s)$	0.6	No cumple	No cumple
$C_{50speech}$	$C_{50speech} > 0$	1.79	0.89
STI	$STI > 0.45$	0.66	0.64

Tabla 9: Parámetros acústicos de las salas de reunión

8.2.2 Sala de ensayo

Para la sala de ensayo, se determinaron parámetros a partir del tiempo de reverberación, parámetros que se analizaron su cumplimiento con recomendaciones mencionadas en la sección ???. Se obtuvo el siguiente gráfico de definición D_{50} :

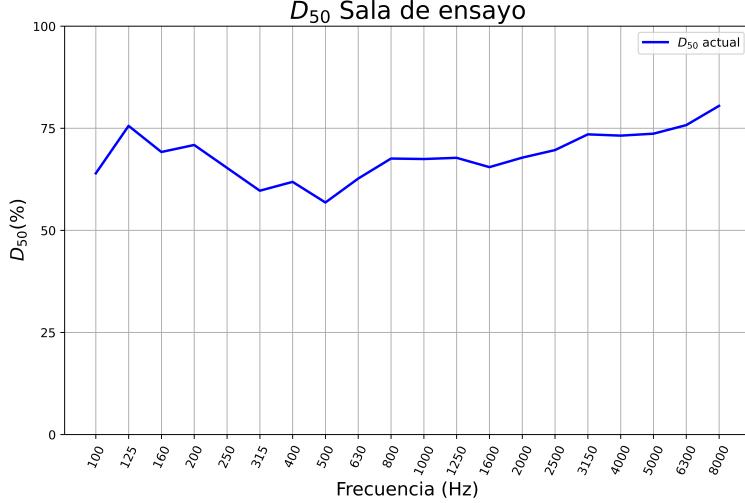


Figura 20: D_{50} de sala de ensayo

En la tabla ?? se puede observar el estado actual de la sala de ensayo determinando su RT_{mid} , C_{80} y D_{50} .

Parámetro	Recomendación	Sala de ensayo
$RT_{mid}(s)$	1.3 - 1.7	0.74
C_{80}	$-2 < C_{80} < 2$	6.04
D_{50}	$D_{50} < 0.5$	No cumple

Tabla 10: Parámetros acústicos de la sala de ensayo y su estado

8.3 Análisis modal

Para observar el estado actual de la sala de ensayo de mejor manera, se hizo un análisis modal. En la figura ?? se puede observar la distribución modal de la sala.

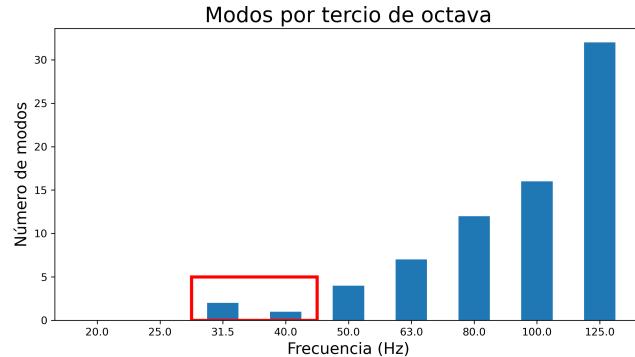


Figura 21: Distribución modal de la sala de ensayo

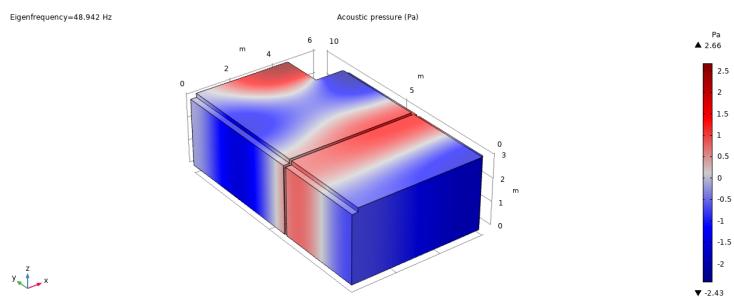


Figura 22: Modo los 48hz

9 Propuesta

9.1 Salas de reunión

En las salas de reunión se pudo analizar que el tiempo de reverberación no es el mejor para su utilización según la norma DIN18041, por lo que con esta solución se buscará disminuirlo, mejorando la inteligibilidad y la claridad del habla.

Para esto se sugiere la aplicación de un panel de volcanita ranurado con lana de vidrio, con un plenum de 20 cm y lana de vidrio de 6 cm, esto en un área del cielo donde la superficie en la sala 1 sería de 12.5 m^2 y de 9 m^2 en la sala 2, como se puede observar en la figura ?? y ??.

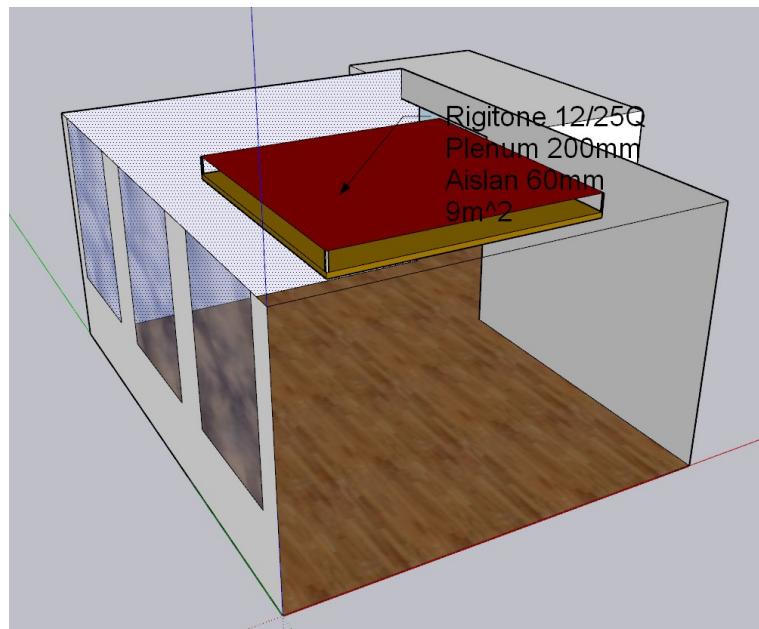


Figura 23: Propuesta de acondicionamiento en sala de reunión 1

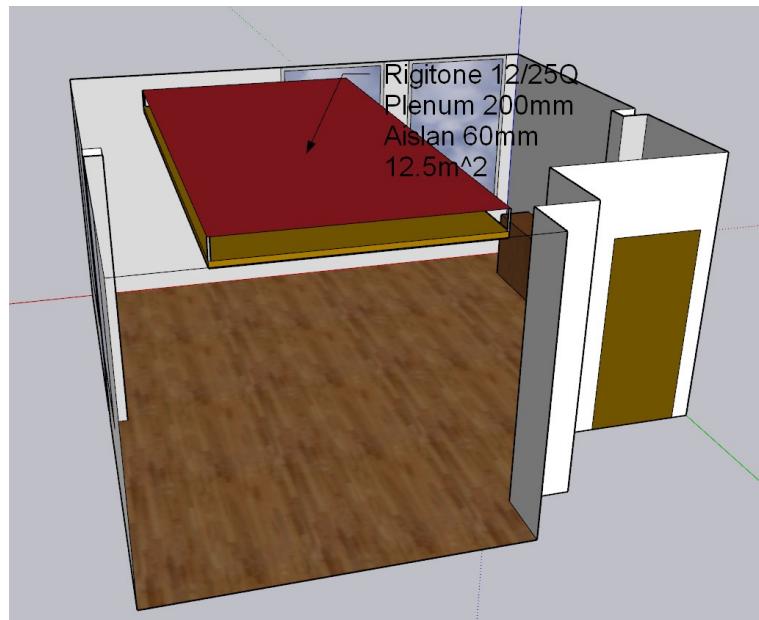


Figura 24: Propuesta de acondicionamiento en sala de reunión 2

El coeficiente de absorción acústica del conjunto de materiales indicados se indican en la tabla ??

12/25 Q						
Plenum	200 mm					
Aislan	60 mm					
Frecuencia Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
α	0.60	0.90	0.95	0.90	0.80	0.75

Tabla 11: Coeficiente de absorción de Volcanita acústica Rigitone

9.2 Sala de ensayo

Para la sala de ensayo se recomienda extraer el material absorbente que se instaló, cambiando así el tiempo de reverberación favorablemente para el uso que le da al recinto.



Figura 25: Propuesta de acondicionamiento en sala de ensayo

10 Resultados de recintos acondicionados

10.1 Salas de reunión

Para el caso de las salas de reunión se obtuvieron los siguientes resultados de ambas propuesta de acondicionamiento. (ver tabla ...)

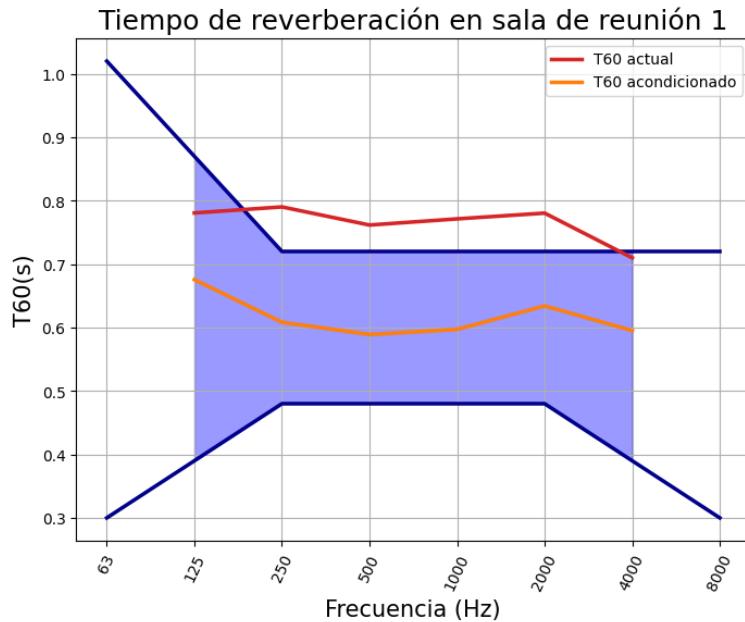


Figura 26: Tiempo de reverberación del estado actual y acondicionado de la sala de reunión 1

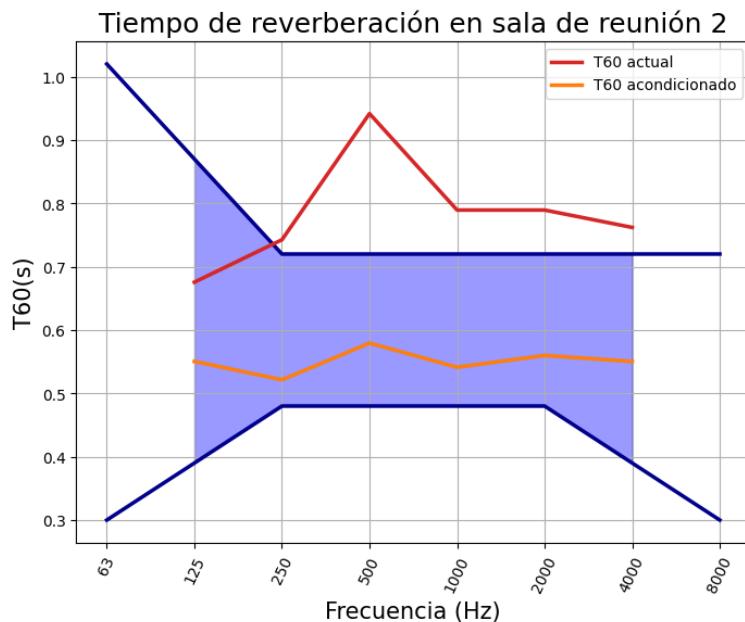


Figura 27: Tiempo de reverberación del estado actual y acondicionado de la sala de reunión 2

Parámetro	Recomendación	Sala de reunión 1		Sala de reunión 2	
		Estado actual	Propuesta	Estado actual	Propuesta
T_{target}	0.6	No cumple	Cumple	No cumple	Cumple
$C_{50speech}$	$C_{50speech} > 0$	1.79	3.5	0.89	3.9
STI	STI >0.45	0.66	0.70	0.64	0.72

Tabla 12: Parámetros acústicos de las salas de reunión del estado actual y acondicionado

10.2 Sala de ensayo

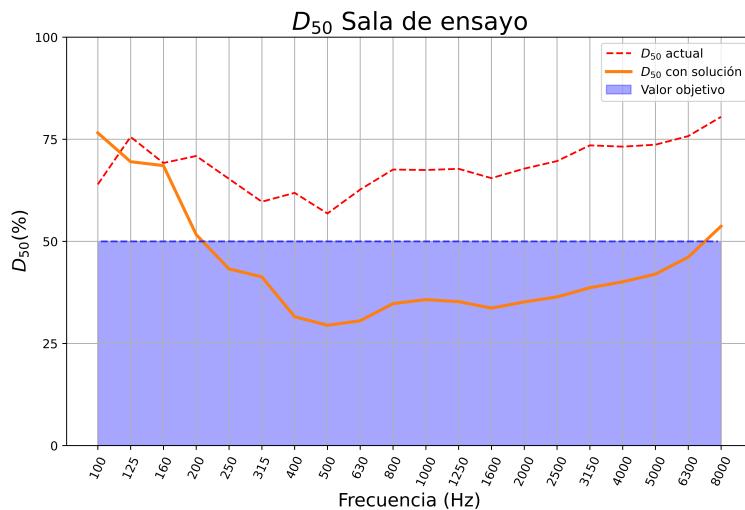


Figura 28: D_{50} del estado actual y acondicionado de sala de ensayo

Para el caso de la sala de ensayo se obtuvieron los siguientes resultados. (ver tabla ??)

Parámetro	Recomendación	Sala de ensayo	
		Estado actual	Propuesta
RT_{mid}	0.3 - 0.7	0.74	1.4
C_{80}	$-2 < C_{80} < 2$	6.04	3
D_{50}	$D_{50} < 0.5$	No cumple	No cumple

Tabla 13: Parámetros acústicos de la sala de ensayo del estado actual y acondicionado

11 Medición de coeficiente de absorción de materiales

Como actividad extra del proyecto, se realizó el análisis del coeficiente de absorción sonora de una muestra de madera ranurada con lana mineral y lana de vidrio. (ver figura ??)



Figura 29: Imágenes de materiales a medir

La madera contaba con ranuras de diámetro de 5mm y una distancia de 10 mm entre ellas como lo indica la figura ??

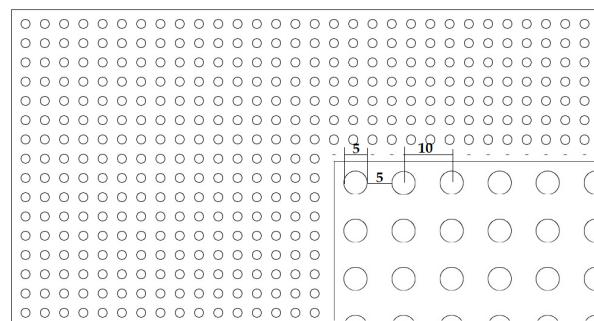


Figura 30: Imagen de la madera ranurada medida

Para realizar las mediciones se utilizó un tubo de impedancia con una muestra de cada materiales, combinando primero la madera con lana mineral sin plenum y un plenum de 2 cm, y lo mismo con la lana de vidrio.

A raíz de las mediciones en el tubo se obtuvo el factor de reflexión, del cual se calculó el coeficiente de absorción de cada combinación a través de la fórmula ?? indicada en el anexo. Los coeficientes obtenidos se pueden observar en la tabla ?? y en la figura ?? y ??

Tabla 14: coeficiente de absorción de los materiales

		Madera 5/10			
		Lana mineral 5 cm		Lana de vidrio 6 cm	
Plenum		0 mm	200 mm	0 mm	200 mm
Frecuencias Hz	250	0.44	0.57	0.48	0.56
	315	0.54	0.69	0.59	0.66
	400	0.73	0.89	0.78	0.83
	500	0.89	0.97	0.92	0.95
	630	0.99	0.93	0.94	0.92
	800	0.92	0.77	0.78	0.77
	1000	0.75	0.61	0.59	0.60
	1250	0.60	0.52	0.48	0.50
	1600	0.49	0.49	0.43	0.47
	2000	0.52	0.51	0.42	0.47
α_ω		0.60	0.60	0.50	0.55

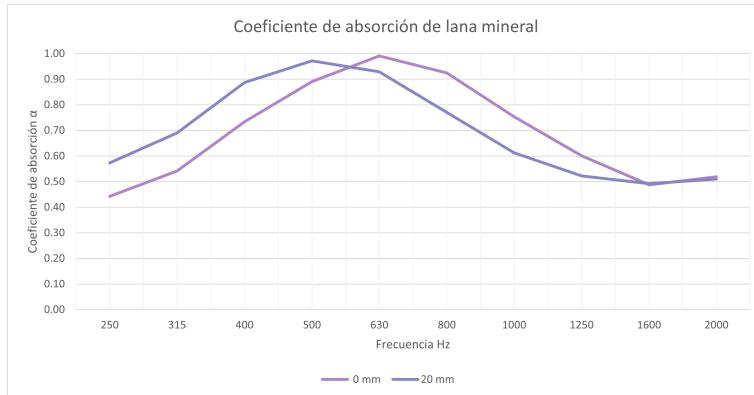


Figura 31: Gráfico de coeficiente de absorción de madera ranurada con lana mineral con distinto plenum

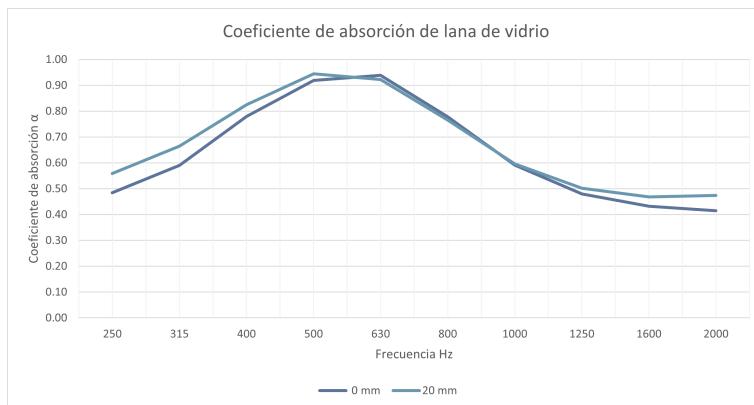


Figura 32: Gráfico de coeficiente de absorción de madera ranurada con lana de vidrio con distinto plenum

12 Conclusiones

Se logró cumplir con las actividades propuestas en el cronograma, logrando medir y analizar el estado actual de las salas, crear una propuesta de mejora en cada uno de los recintos y realizar un presupuesto de estas soluciones.

A raíz de los resultados de las mediciones, se logró identificar si estos son adecuados acústicamente para el uso de cada uno de estos recintos. Por un lado, el ruido presente en los salones es el problema que predomina, incumpliendo con las curvas NC recomendadas para su uso.

En el caso del tiempo de reverberación en las salas de reuniones según la norma DIN18041 estos no cumplen con valores acordes a su uso. Lo cual con la propuesta dada en este proyecto se logró cumplir con este criterio, además de mejorar la claridad y la inteligibilidad de la palabra en ambas salas.

En el caso del tiempo de reverberación de la sala de ensayo, los valores eran demasiado bajos con la implementación que se realizó por parte de la administración, los valores obtenidos no eran aptos para que el sonido resonara y cree intimidad musical, que es lo que se busca en estos recintos. Con la solución de retirar este material, aumentaría el tiempo de reverberación, mejorando la claridad y la definición del sonido de los instrumentos.

Referencias

- Ackermann, D., Brinkmann, F., & Weinzierl, S. (2023). *A database with directivities of musical instruments*.
- AFMG Technologies GmbH. (Versión 4.3). *EASE*. (Disponible en: <https://www.afmg.eu/index.php/products/ease/>)
- Asociación Española de Normalización. (2019). *UNE-ISO 3382 – 2: Acústica. medición de los parámetros de las salas. parte 2: Parámetros relacionados con el tiempo*. (Disponible en: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=Noo69999>)
- Bs en iso 10534 – 2 : 2001, acoustics — determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes - part 2: Transfer-function method* (Standard). (2001, 06). Brussels: European Committee for Standardization.
- Carrión Isbert, A. (1990). Diseño acústico de espacios arquitectónicos. *Informes de la Construcción*, 42(408), 61–66.
- Decreto Supremo N° 38. (2011). [Ministerio del medio ambiente]. (Establece norma de emisión de ruidos generados por fuentes que indica, elaborada a partir de la revisión del decreto N° 146, de 1997, del ministerio secretaría general de la presidencia. 11 de noviembre de 2011)
- Deutsches Institut für Normung e.V. (2016). *Din 18041:2016-03 - acoustic quality in small and medium-sized rooms* (DIN Standard No. DIN 18041). Berlin, Germany: Beuth Verlag GmbH.
- Dirección de Vinculación con el Medio. (2023). *Centro de Extensión Los Canelos*. (Disponible en: <http://vinculacion.uach.cl/index.php/organizacion/quienes-somos/canelos>)
- Energy, S. (2023). *Black acoustic board*. (<https://www.safe-energy.cl/product/black-acoustic-board/>)
- Iso 9921 : 2003, ergonomics — assessment of speech communication* (Standard). (2003, 06). Geneva, CH: International Organization for Standardization.
- Kleiner, M., & Tichy, J. (2014). *Acoustics of small rooms*. London, England: CRC Press.
- Kuttruff, H. (2016). *Room acoustics*. CRC Press.
- Marshall, L. G. (1994). An acoustics measurement program for evaluating auditoriums based on the early/late sound energy ratio. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 96(4), 2251–2261. doi: 10.1121/1.410097
- Recuero López, M. (2000). *Ingeniería acústica* (1st ed.). Madrid, España: Editorial Paraninfo.
- Sabine, W. C. (1922). *Collected papers on acoustics* (2nd ed.). Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Trimble Inc. (versión 2020). *SketchUp*. (Disponible en: <https://www.sketchup.com/>)
- Une en iso 11654 : 1997, acústica — absorbentes acústicos para su utilización en edificios - evaluación de la absorción acústica* (Standard). (1998, 02). Madrid, España: AENOR.

13 Anexo

13.1 Presupuesto

A continuación, se muestra el presupuesto a partir de las horas invertidas descritas en la planificación, dando un total de \$ 3.842.227 pesos.

Tabla 15: Presupuesto del proyecto

	Actividades	Horas	UF/hr	UF*	CLP
Costo ingeniería	Planificación	7	0.6	4.2	151.687
	Mediciones	9	1	9	325.044
	Modelación	18	0.8	14.4	520.070
	Análisis de datos	6	1	6	216.696
	Diseño de propuesta	24	1	24	866.784
	Análisis de propuesta	12	0.8	9.6	346.713
	Cotización de propuesta	8	0.6	4.8	173.356
	Redacción de informe	26	0.6	15.6	563.409
Costo operacional	Arriendo de equipos			1.7	60.000
	Traslados			0.1	5.000
Total		110		89.3	3.228.762
			IVA (19%)	17	613.465
			Total (con IVA)	106.3	3.842.227

*Considerando el valor en UF correspondiente a la fecha del 28 de agosto de 2023 es de \$ 36.116 CLP.

13.2 Marco teórico

13.2.1 Ruido de fondo (RdF)

El ruido de fondo es el sonido presente en una sala cuando no hay actividad o no está presente la fuente a evaluar. Este ruido puede ser causado por sistemas de climatización, instalaciones eléctricas o hidráulicas, e incluso ruido externo como el tráfico.

Curvas NC: son curvas de referencia que representan los límites de ruido aceptables en un espacio según su uso. Un recinto se considera que cumple una especificación NC determinada (por ejemplo, NC-15, NC-20, etc.) cuando los niveles de ruido de fondo, medidos en diferentes bandas de frecuencia, están por debajo de la curva NC correspondiente para todas las frecuencias entre 63 Hz y 8 kHz (ver figura ??). (?, ?)

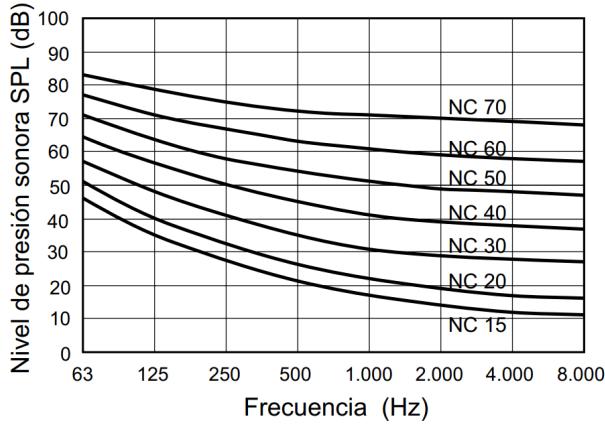


Figura 33: Curvas NC (“Noise Criteria”)

En la tabla ?? se muestran las curvas NC recomendadas para diferentes tipos de recinto, junto con su equivalencia en dBA.

Tabla 16: Curvas NC recomendadas y niveles de ruido de fondo equivalentes en dBA

Tipos de recinto	Curva NC recomendada
Fábricas para ingeniería pesada	55 - 75
Fábricas para ingeniería ligera	45 - 65
Cocinas industriales	40 - 50
Recintos deportivos y piscinas	35 - 50
Grandes almacenes y tiendas	35 - 45
Restaurantes, bares, cafeterías y cafeterías privadas	35 - 50
Oficinas mecanizadas	40 - 50
Oficinas generales	35 - 45
Despachos, bibliotecas, salas de justicia y aulas	30 - 35
viviendas, dormitorios	25 - 35
Salas de hospitales y quirófanos	25 - 35
Cines	30 - 35
Teatros, salas de juntas, iglesias	25 - 30
Salas de conciertos y teatros de ópera	20 - 25
Estudios de registro y reproducción sonora	15 - 20

13.2.2 Tiempo de reverberación (TR)

El tiempo de reverberación T_{60} es el tiempo que tarda el sonido en decaer 60 dB en un espacio cerrado. Este parámetro es importante en el diseño de un sistema de refuerzo sonoro, ya que afecta la claridad, inteligibilidad y calidad del sonido en un recinto.

- T_{30} : Es una expresión del T_{60} que mide el tiempo que demora el sonido en decaer 30 dB. El valor T_{30} se entrega ya multiplicado por el factor correcto para medir la que sería la caída por 60 dB.
- Formula de Sabine: Uno de los modelos para calcular el tiempo de reverberación es la fórmula de Sabine. La cual es calculada según lo indicado en la ecuación ???. (?,

?)

$$T_{60} = 0.161 \cdot \frac{V_t}{S_t \bar{\alpha}} \quad (1)$$

donde:

- V_t es el volumen total de la sala
 - S_t es la superficie total de la sala
 - $\bar{\alpha}$ es la absorción media de la sala
- RT_{mid} : Es la media aritmética de los valores de tiempo de reverberación correspondientes a las bandas de 500 Hz y 1 kHz. En general, el valor más adecuado de RT_{mid} depende del volumen del recinto y de la actividad a la que este destinado este. En la tabla ?? se muestran valores recomendados de RT_{mid} , para diferentes tipos de salas en el supuesto que estén ocupadas. (? , ?)

Tipo de sala	RT_{mid} , sala ocupada
Sala de conferencia	0.7 - 1.0
Cine	1.0 - 1.2
Sala polivalente	1.2 - 1.5
Teatro de ópera	1.2 - 1.5
Sala de conciertos (música de cámara)	1.3 - 1.7
Sala de conciertos (música sinfónica)	1.8 - 2.0
Iglesia/catedral (órgano y canto coral)	2.0 - 3.0
Locutorio de radio	0.2 - 0.4

Tabla 17: Valores de RT_{mid} recomendados en función del tipo de sala (recintos ocupados)

En el caso de salas de salas de conferencia/aulas el RT_{mid} recomendado, considerando volúmenes entre los 100 y 10000 m^3 , es entre los valores de:

$$0.7 \leq RT_{mid} \leq 1s$$

- Claridad: La claridad se refiere a cómo se distribuye la energía del sonido en un espacio. En términos simples, se mide la relación entre el sonido directo y las primeras reflexiones (llamada energía temprana) en comparación con la energía que llega después. En acústica, se utiliza el parámetro C_{50} para evaluar la claridad en entornos destinados a la voz y el C_{80} para la música. Estos valores se obtienen de manera logarítmica y se calculan para un rango de frecuencias entre 125 y 4000 Hz. (? , ?)

$$C_{50} = 10 \log_{10} \left[\int_0^{50ms} [g(t)]^2 dt / \int_{50ms}^{\infty} [g(t)]^2 dt \right] \quad (2)$$

$$C_{80} = 10 \log_{10} \left[\int_0^{80ms} [g(t)]^2 dt / \int_{80ms}^{\infty} [g(t)]^2 dt \right] \quad (3)$$

Marshall, define valores apropiados de C_{50} para el habla y C_{80} para distintos tipos de música, descritos en la figura ?? (? , ?)

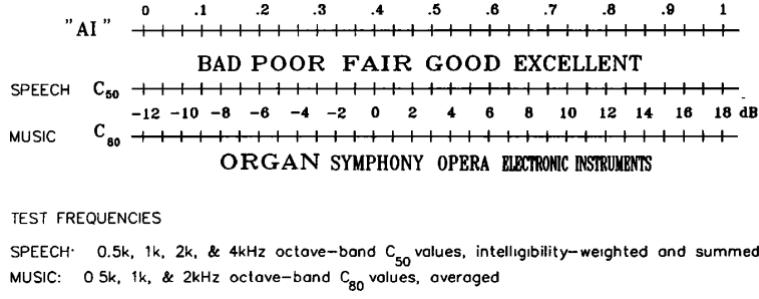


Figura 34: Recomendaciones de claridad para el habla y música

- Definición: El parámetro llamado definición se determinó para evaluar la cantidad de energía temprana, el cual se deriva directamente de la respuesta impulso $g(t)$ en la siguiente ecuación:

$$D_{50} = \left[\int_0^{50ms} [g(t)]^2 dt / \int_0^{\infty} [g(t)]^2 dt \right] \quad (4)$$

Ambas integrales deben incluir el sonido directo, cuya llegada al oyente determina el tiempo $t = 0$. Obviamente, D será del 100% si la respuesta al impulso no contiene componentes con retardos superiores a 50 ms. (? , ?)

- STI: Es el índice de transmisión del habla el cual indica el entendimiento de la palabra y sus valores oscilan entre los 0 y 1, que evalúa la inteligibilidad en el recinto, siendo los valores cercanos a 0 deficientes y los valores cercanos a 1 una inteligibilidad excelente. Según la normativa ISO 9921 (? , ?) los valores clasificarían como se indica en la tabla ??.

Tabla 18: Rango de STI según ISO 9921

Rango de inteligibilidad	STI
Excelente	> 0.75
Bueno	0.60 - 0.75
Razonable	0.45 - 0.60
Pobre	0.30 - 0.45
Malo	< 0.3

13.2.3 Modos normales

Un modo normal puede ser considerado como una resonancia en el aire de un recinto en una cierta frecuencia modal (? , ?). En el espectro de frecuencias bajas, los modos pueden ser identificados por un peak en la curva de respuesta de frecuencia de un recinto, como se puede ver en la Figura ???. Esto debido a que la densidad modal es proporcional al cuadrado de la frecuencia, por lo que a mayor frecuencia existe mayor traslape de estos modos. Este énfasis o supresión de ciertas frecuencias debido al recinto produce una coloración del sonido recibido por un receptor (? , ?).

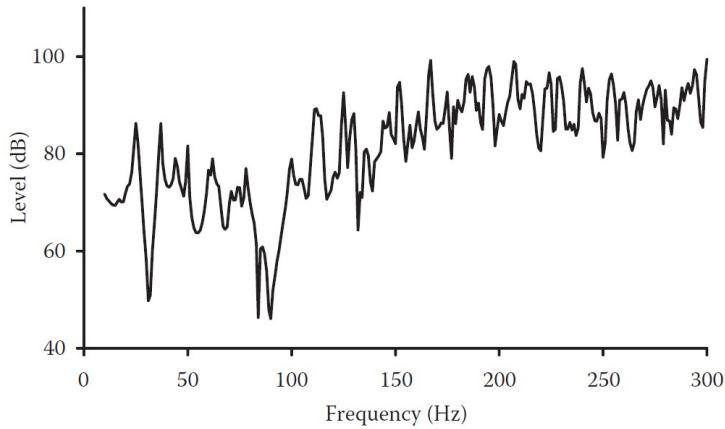


Figura 35: Respuesta en frecuencias bajas de un recinto.

13.2.4 Medición de coeficiente de absorción en tubo de impedancia

Un método utilizado para determinar el coeficiente de absorción acústica de un material es a través del empleo de un tubo de impedancia, también conocido como tubo de Kundt. Este dispositivo consta de un tubo equipado con dos micrófonos dispuestos a lo largo de su longitud, junto con un altavoz ubicado en uno de sus extremos. En el extremo opuesto se sitúa el material cuya capacidad de absorción acústica se pretende medir.



Figura 36: Tubo de Kundt

A partir de la relación de la señal recibida por cada uno de los micrófonos el software ... entrega el coeficiente de reflexión ... el cual se utiliza en la ecuación... para calcular el coeficiente de absorción.

$$\alpha = 1 - |r|^2 = 1 - r_r^2 - r_i^2 \quad (5)$$

donde,

r es el factor de reflexión.

r_r es el componente real del factor de reflexión.

r_i es el componente imaginario del factor de reflexión.(?, ?)

Posteriormente a la obtención de los datos se realiza el cálculo de los valores de coeficientes de absorción ponderado, para esto fue necesario transformar los datos obtenidos anteriormente a tercios de octava y así calcular el coeficiente de absorción sonora práctico (α_{pi}), que se define como el valor del coeficiente de absorción acústica dependiente de la frecuencia, basado en mediciones por bandas de un tercio de octava, que se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$\alpha_{pi} = \frac{\alpha_{i1} + \alpha_{i2} + \alpha_{i3}}{3} \quad (6)$$

Ahora con los coeficiente de absorción práctico, se obtienen los valores de coeficiente de absorción ponderado α_{ω} , utilizando la curva de referencia de la figura ?? Se irá ajustando la curva de referencia por intervalos de 0.05 hacia el valor calculado hasta que la suma de las desviaciones desfavorables sea menor o igual que 0.10, esto ocurre cuando el valor medido es menor que el valor de la curva de referencia. (?, ?)

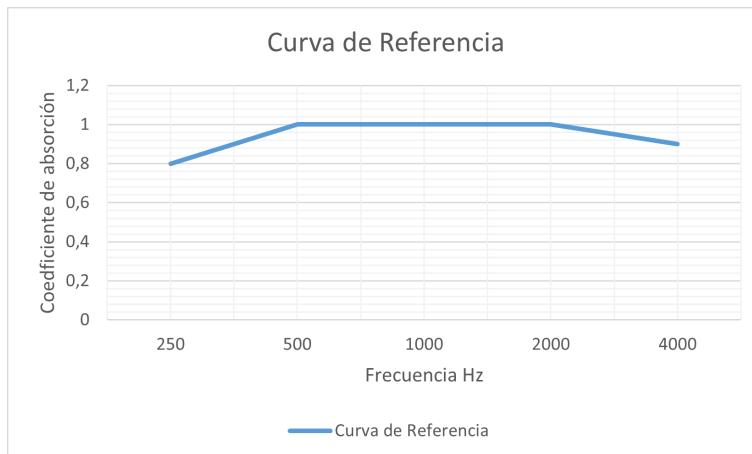


Figura 37: Curva de referencia de la medida de coeficiente de absorción

13.3 Posiciones de micrófono y fuente en mediciones de tiempo de reverberación

A continuación se pueden observar la distribución de las posiciones de fuente y micrófono para las mediciones de tiempo de reverberación.

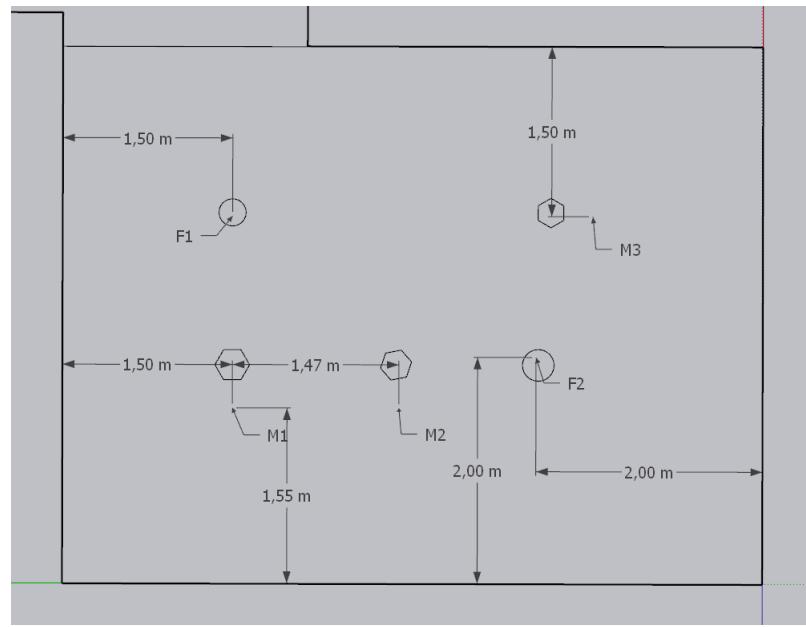


Figura 38: Posiciones de fuente y micrófono para sala de reunión 1

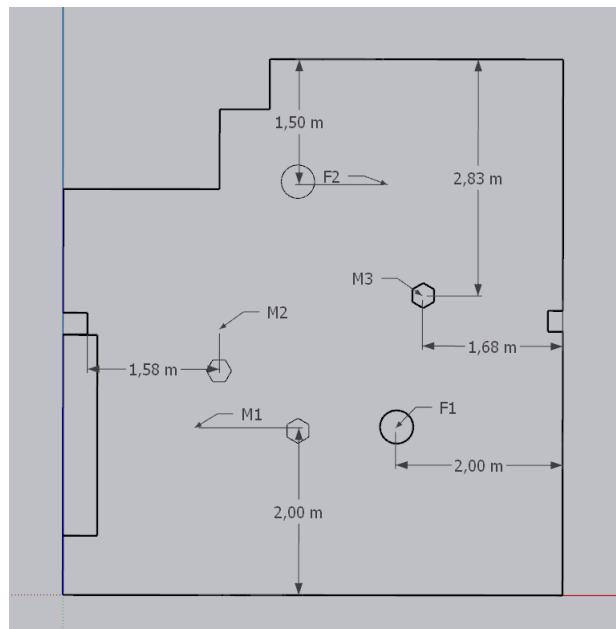


Figura 39: Posiciones de fuente y micrófono para sala de reunión 2

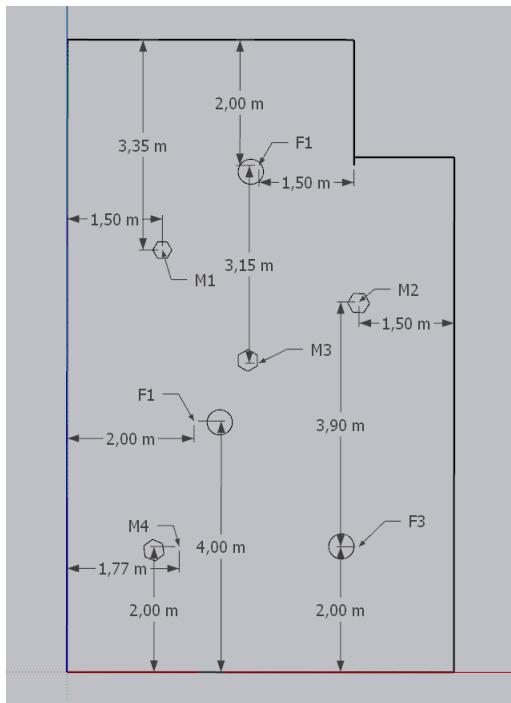


Figura 40: Posiciones de fuente y micrófono para sala de ensayo

13.4 Mediciones de tiempo de reverberación

A continuación se pueden observar los resultados de cada posición de micrófono y fuente de tiempo de reverberación

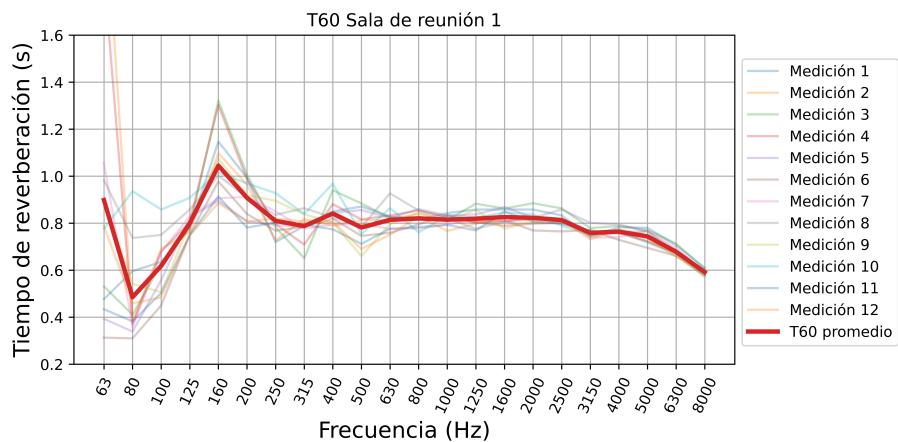


Figura 41: T_{60} sala de reunión 1

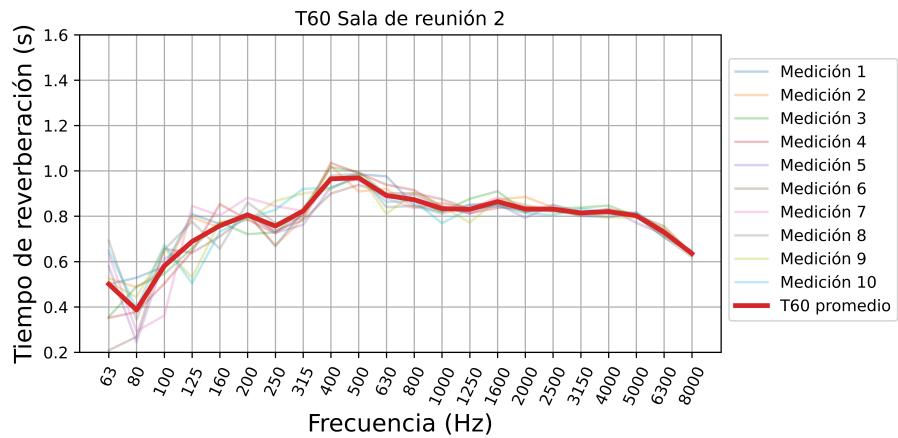


Figura 42: T_{60} sala de reunión 2

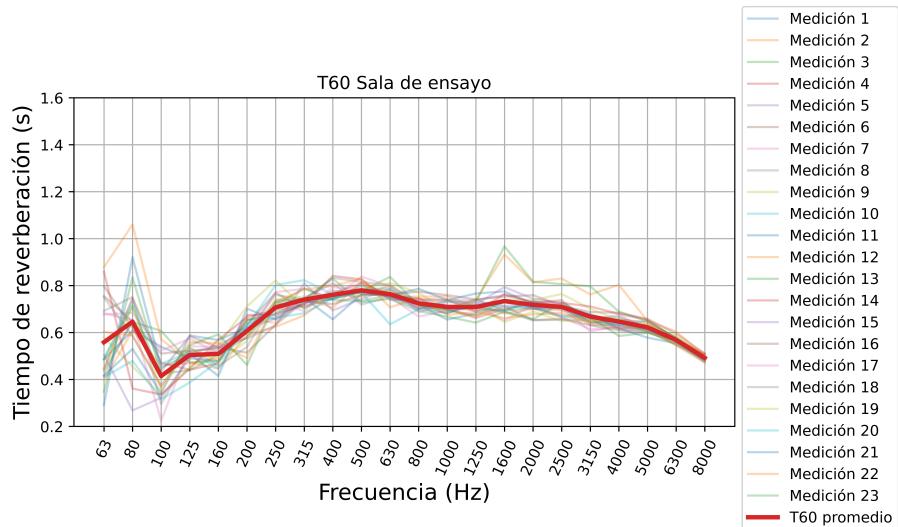


Figura 43: T_{60} sala de ensayo

13.5 STI actual

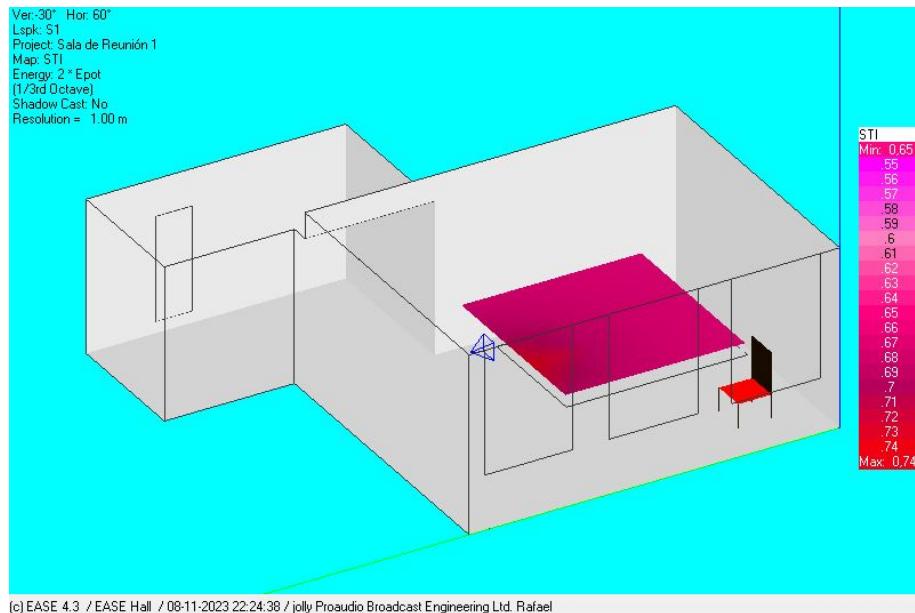


Figura 44: *STI* actual de sala de reunión 1

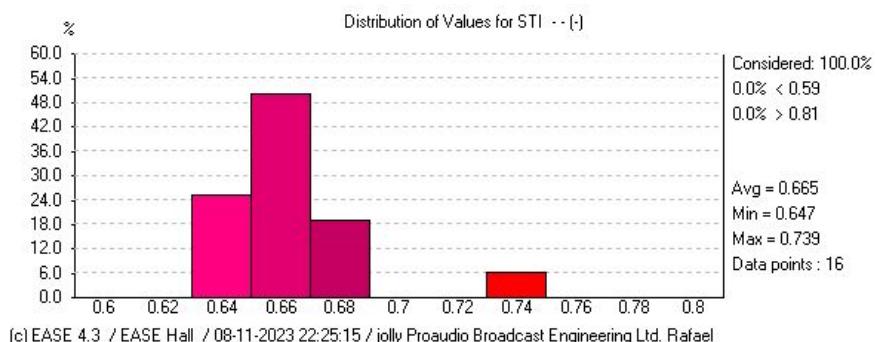


Figura 45: Distribución de *STI* actual en sala de reunión 1

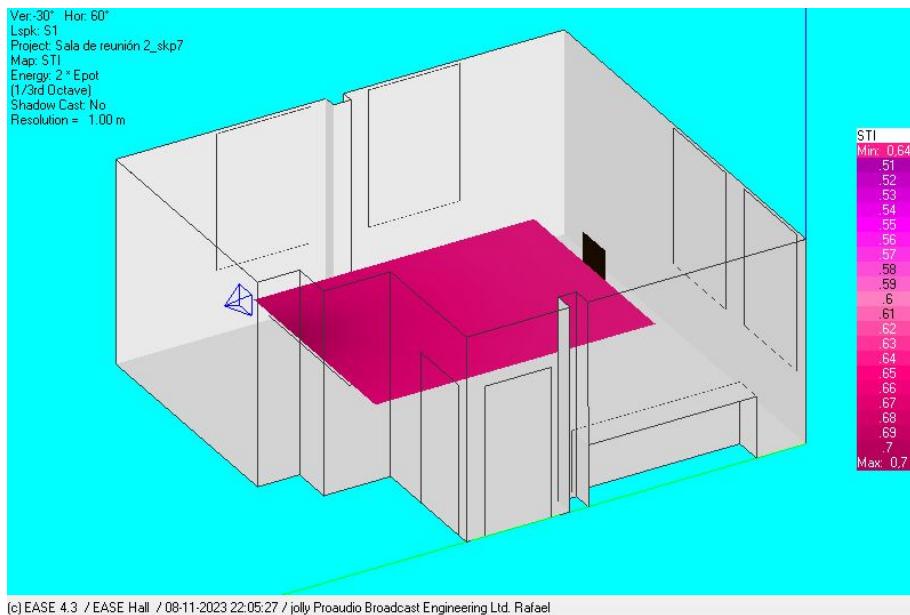


Figura 46: *STI* actual de sala de reunión 2

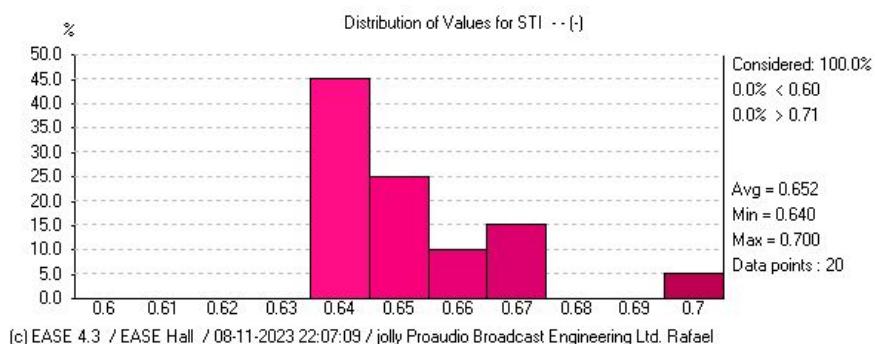


Figura 47: Distribución de *STI* actual en sala de reunión 2

13.6 STI de salas de reunión acondicionadas

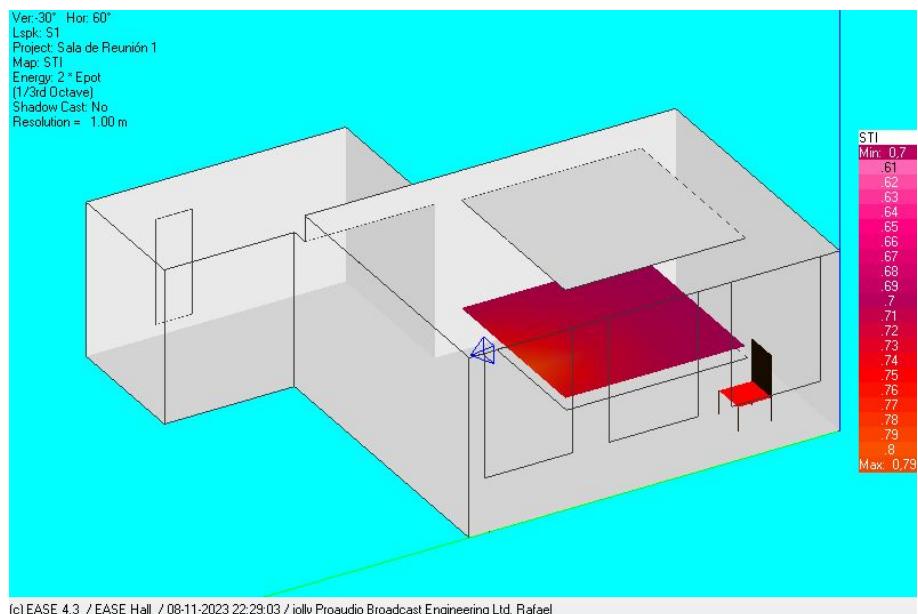


Figura 48: *STI* de sala de reunión 1 acondicionada

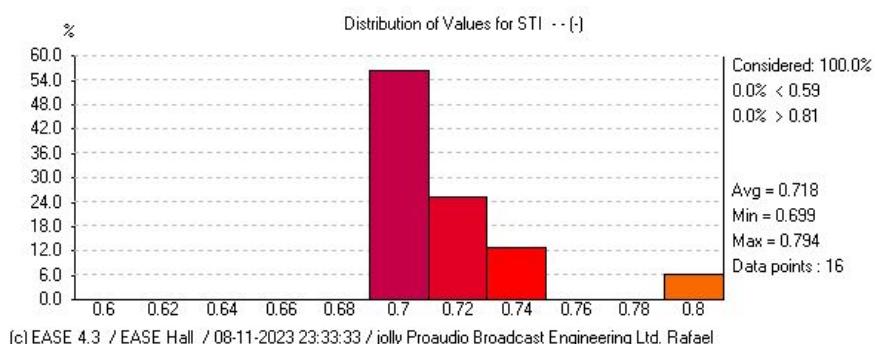


Figura 49: Distribución de *STI* en sala de reunión 1 acondicionada

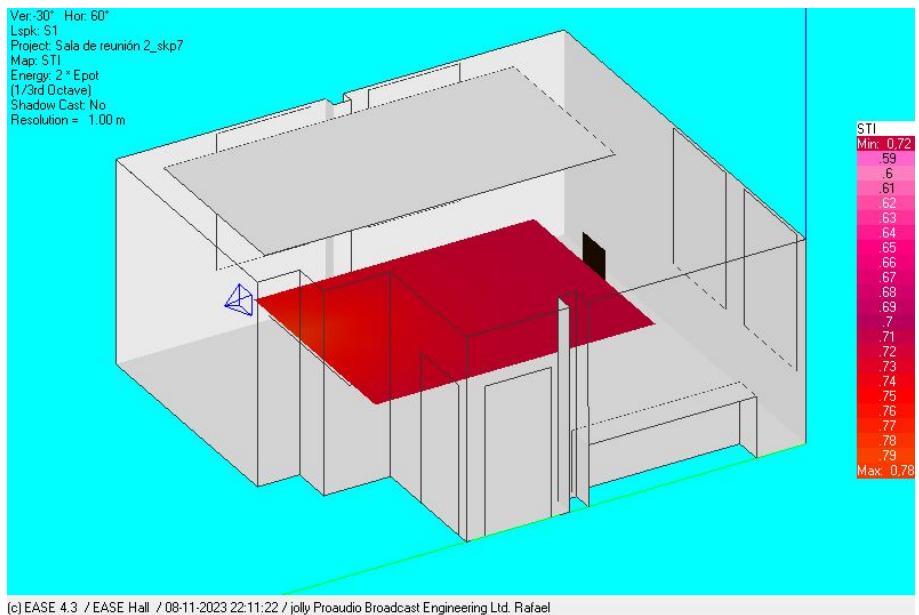


Figura 50: *STI* de sala de reunión 2 acondicionada

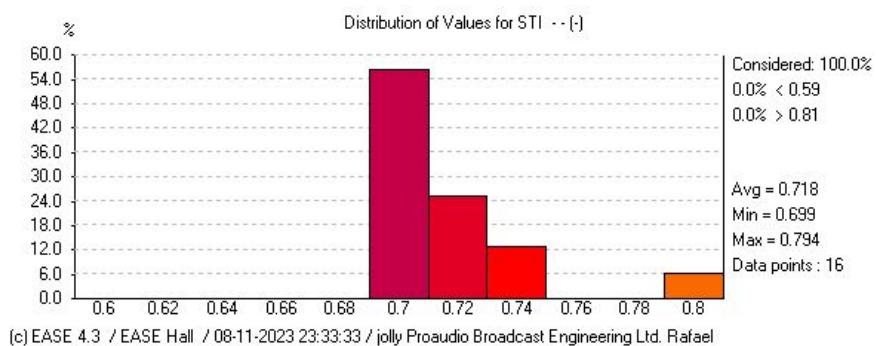


Figura 51: Distribución de *STI* en sala de reunión 2 acondicionada