

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 | 4 |
| 2 | Objetivos | 4 |
| 3 | Antecedentes del recinto | 5 |
| 4 | Planificación | 8 |
| 4.1 | Plan de trabajo | 8 |
| 4.2 | Cronograma | 9 |
| 5 | Metodología | 10 |
| 5.1 | Medición de dimensiones del recinto | 10 |
| 5.2 | Medición de parámetros acústicos del recinto | 10 |
| 5.2.1 | Ruido de fondo | 11 |
| 5.2.2 | Tiempo de reverberación | 11 |
| 6 | Modelación | 13 |
| 6.1 | Modelación en SketchUp | 13 |
| 6.2 | Modelación en EASE | 14 |
| 7 | Recomendaciones de parámetros acústicos | 15 |
| 7.1 | Salas de reuniones | 15 |
| 7.2 | Sala de ensayo | 15 |
| 8 | Resultados del estado actual de los recintos | 16 |
| 8.1 | Ruido de fondo | 16 |
| 8.2 | Tiempo de reverberación | 17 |
| 8.2.1 | Salas de reunión | 17 |
| 8.2.2 | Sala de ensayo | 19 |
| 9 | Propuesta | 20 |
| 9.1 | Salas de reunión | 20 |
| 9.1.1 | Nube | 20 |
| 9.2 | Sala de ensayo | 20 |
| 10 | Medición de coeficiente de absorción de materiales | 21 |
| 11 | Conclusiones parciales | 23 |
| Referencias | | 24 |
| 12 | Anexo | 25 |
| 12.1 | Presupuesto | 25 |
| 12.2 | Marco teórico | 25 |
| 12.2.1 | Ruido de fondo (RdF) | 25 |
| 12.2.2 | Tiempo de reverberación (TR) | 27 |
| 12.2.3 | Medición de coeficiente de absorción en tubo de impedancia | 29 |
| 12.3 | Posiciones de micrófono y fuente en mediciones de tiempo de reverberación | 30 |

| | | |
|------|---|----|
| 12.4 | Mediciones de tiempo de reverberación | 32 |
| 12.5 | Resultados curvas NR | 34 |

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.(Carrión Isbert, 1990)

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. (Carrión Isbert, 1990) 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 (Asociación Española de Normalización, 2019).

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.” (Dirección de Vinculación con el Medio, 2023)



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 2 se encuentra ubicado en Yeras Buenas 181, en la ciudad de Valdivia.

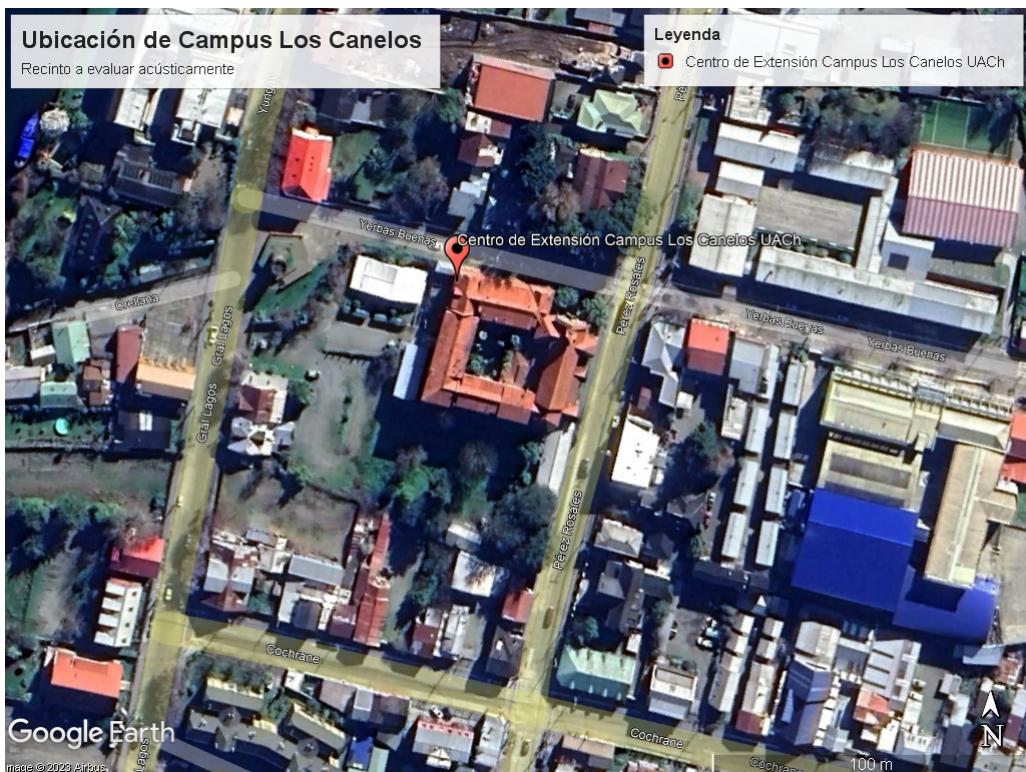


Figura 2: Geolocalización del edificio

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 3, 4 y 5 respectivamente.



Figura 3: Fotografía de sala de reunión 1



Figura 4: Fotografía de sala de reunión 2

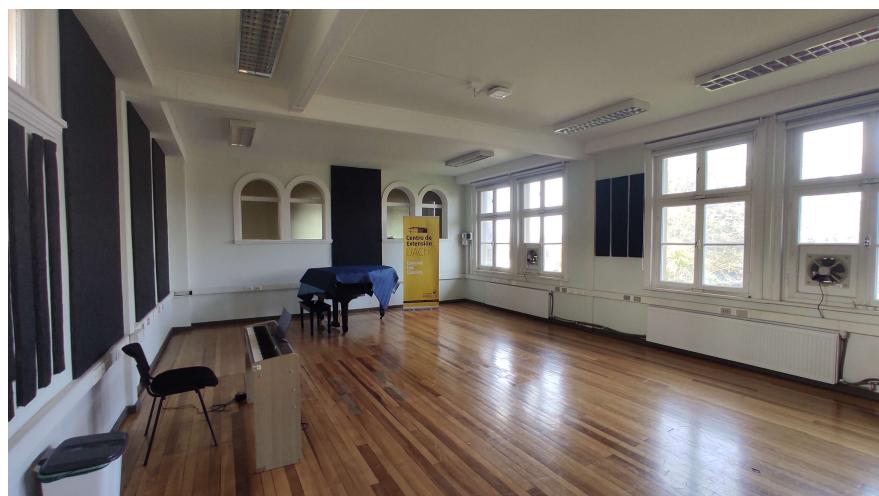


Figura 5: Fotografía de sala de ensayo

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 1 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 2 se puede observar la planificación respectiva del proyecto, partir de las actividades planteadas en la tabla 1. 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 | 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 6 se puede observar una vista superior de las salas a estudiar.

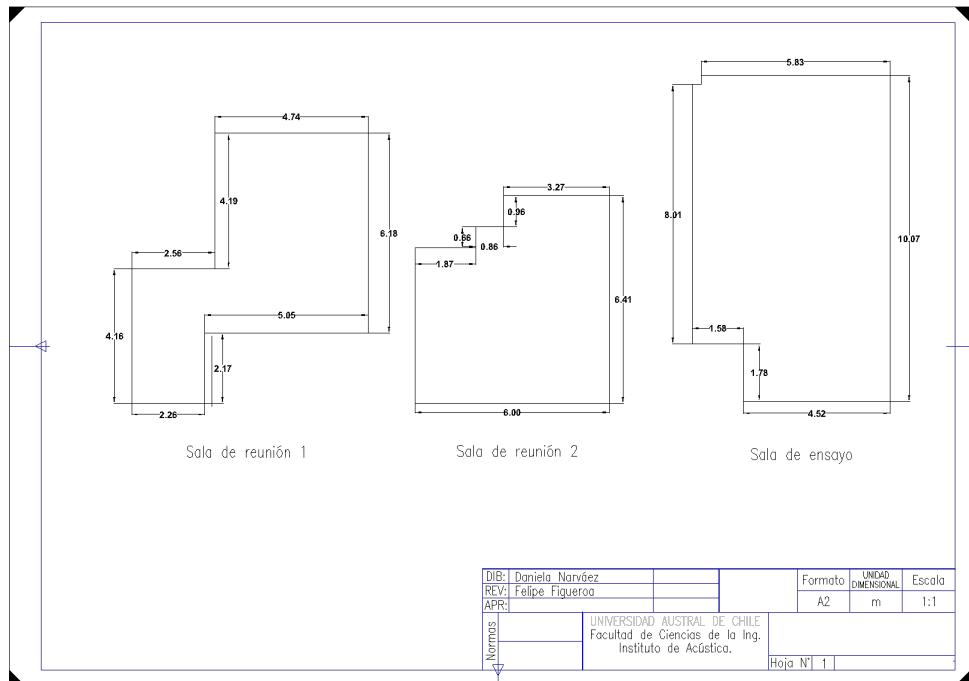


Figura 6: Planos de salas de reuniones y sala de ensayo Campus los canelos

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 midiendo 5 minutos hasta que el nivel de presión sonora equivalente se estabilice, basándose en el procedimiento descrito en el D.S. 38/11 (Decreto Supremo N° 38, 2011).



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 (Asociación Española de Normalización, 2019), utilizando el método de respuesta impulso 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 12.3 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 6 y de las mediciones más detalladas de cada sala, se modeló las tres salas en el software SketchUp (Trimble Inc., versión 2020), resultando los modelos de las figuras 9, 10 y 11, tomando en consideración muebles que utilizaban mayor volumen en las salas de reuniones.

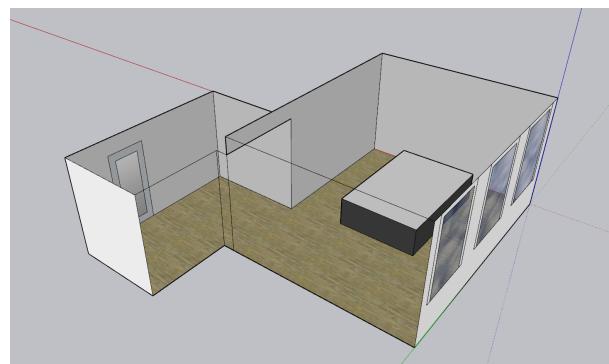


Figura 9: Modelo en SketchUp de Sala de reunión 1

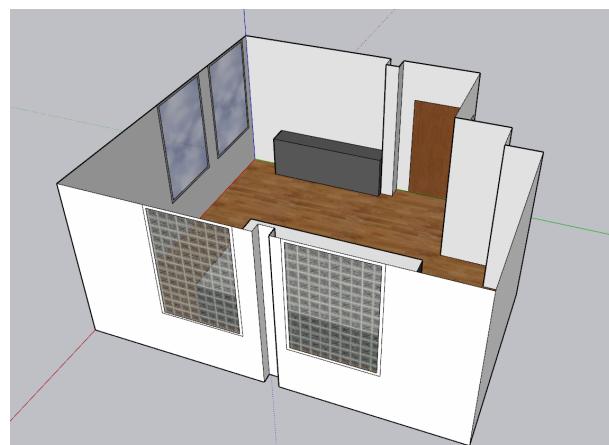


Figura 10: Modelo en SketchUp de Sala de reunión 2



Figura 11: Modelo en SketchUp de Sala de ensayo

6.2 Modelación en EASE

A partir de los modelos en SketchUp, estos se importaron al software EASE (AFMG Technologies GmbH, Versión 4.3), 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 4 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 1.

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 | (Recuero López, 2000) |
| Madera | 0.25 | 0.34 | 0.18 | 0.10 | 0.10 | 0.06 | (Recuero López, 2000) |
| Black Acoustic Board (2") | 0.13 | 0.75 | 1.17 | 1.14 | 1.05 | 1.09 | (Energy, 2023) |
| Vidrio | 0.05 | 0.5 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | (Recuero López, 2000) |

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 |

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 6 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 | (Recuero López, 2000) |
| T_{target} | Speech/Lecture (A2) | 0.6 | (Deutsches Institut für Normung e.V., 2016) |
| C_{50} | Para la voz | $C_{50} > 0$ | (Marshall, 1994) |
| STI | Transmisión del habla | $STI > 0.45$ | (ISO 9921, 2003) |

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 7 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 | (Recuero López, 2000) |
| RT_{mid} | Sala de conciertos (música de cámara) | 1.3 - 1.7 | (Carrión Isbert, 1990) |
| C_{80} | Para música sinfónica | $-2 < C_{80} < 2$ | (Marshall, 1994) |
| 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_{50} , C_{80}) y definición D_{50} .

8.1 Ruido de fondo

En las figuras 12, 13 y 14, se pueden observar los valores obtenidos del ruido de fondo en bandas de octava con su respectiva curva NC más cercana.

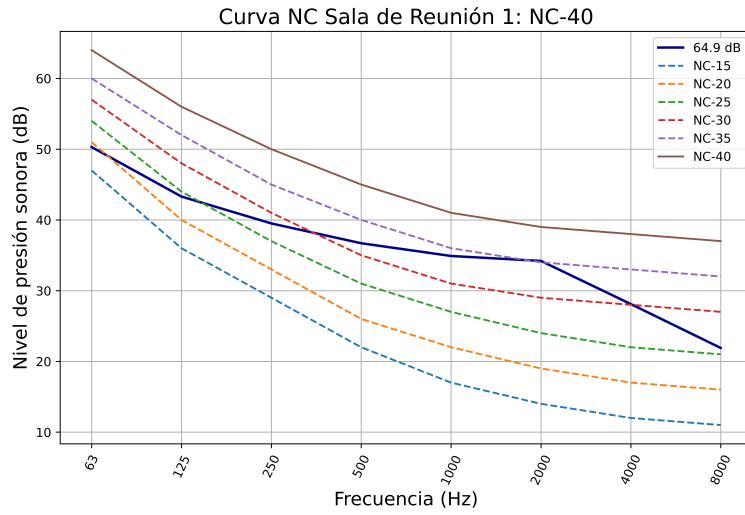


Figura 12: Curvas NC sala de reunión 1

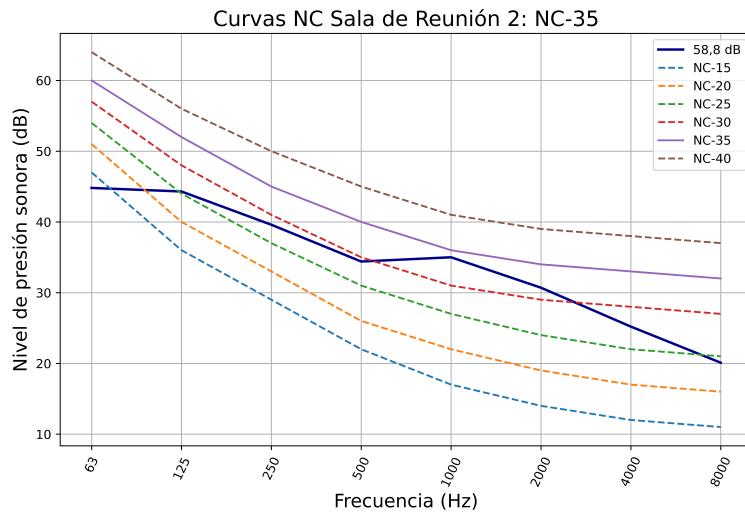


Figura 13: Curvas NC sala de reunión 2

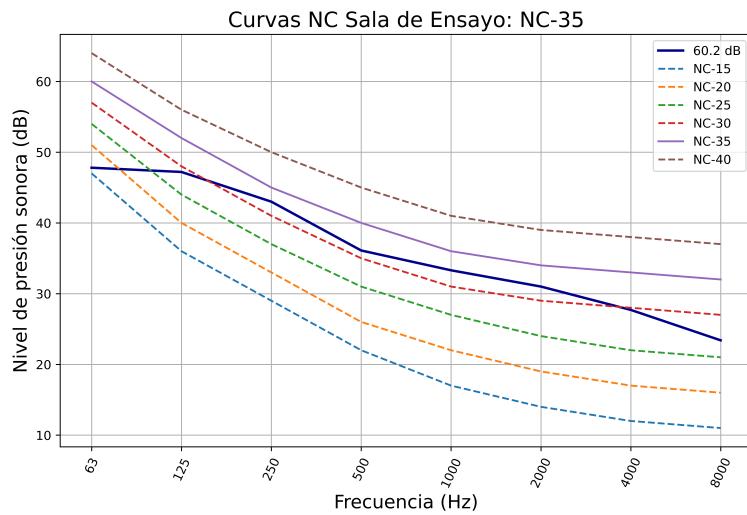


Figura 14: Curvas NC sala de ensayo

Según las recomendaciones mencionadas en la sección 7 se puede determinar que los valores de ruido de fondo como se muestran en la tabla 8 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.

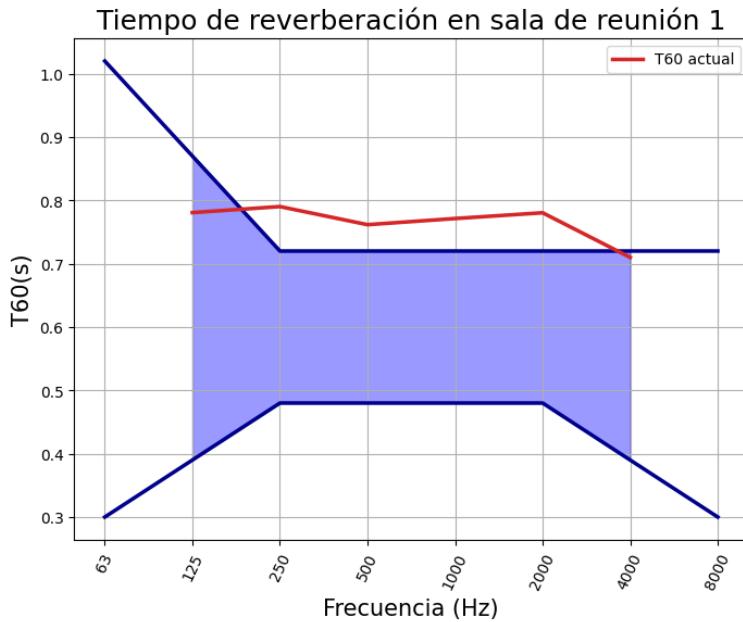


Figura 15: Tiempo de reverberación Sala de reunión 1

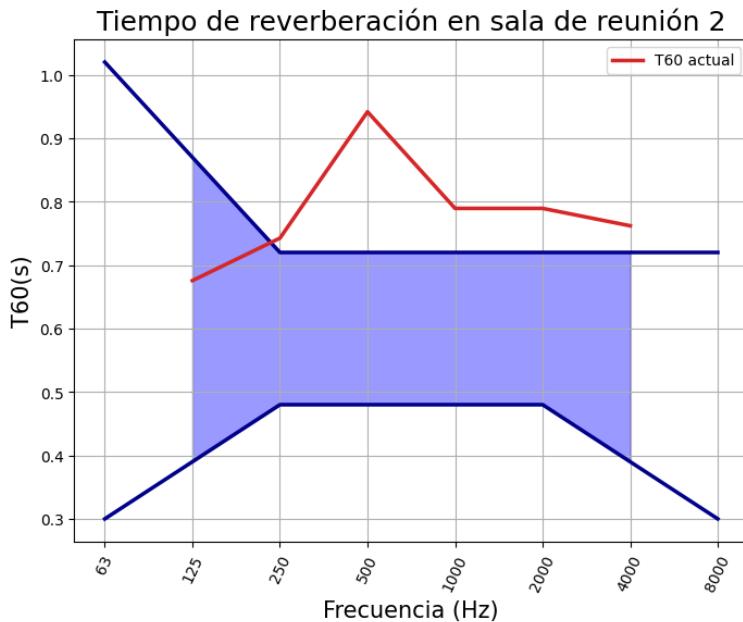


Figura 16: Tiempo de reverberación Sala de reunión 2

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 7. Se obtuvo el siguiente gráfico de definición D_{50} :

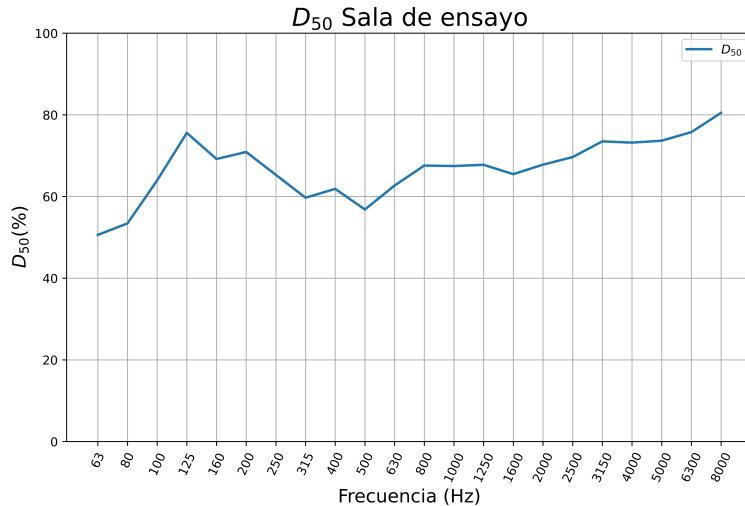


Figura 17: D_{50} de sala de ensayo

En la tabla 10 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

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 ranurado en el cielo de cada recinto. Se proponen dos posibles soluciones para cada una de las salas, la cual varía el tamaño del cielo y la cantidad de material absorbente dentro de este.

9.1.1 Nube

Para la primera propuesta se sugiere instalar en una sección de cada sala el material, donde la superficie en la sala 1 sería de ... m^2 y de m^2 en la sala 2, como se puede observar en la figura ...

9.2 Sala de ensayo

10 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 18)



Figura 18: 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 19

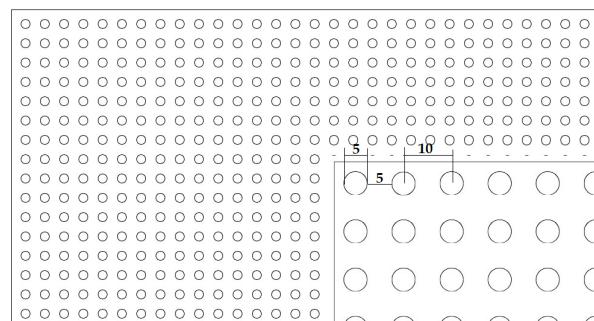


Figura 19: Imagen de la madera ranurada medida

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 5 indicada en el anexo. Los coeficientes obtenidos se pueden observar en la tabla 11 y en la figura 20 y 21

Tabla 11: coeficiente de absorción de los materiales

| | | Madera 5/10 | | | |
|----------------|-----------------|-------------------|--------|----------------|--------|
| | | Lana mineral 5 cm | | Lana de vidrio | |
| 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 |

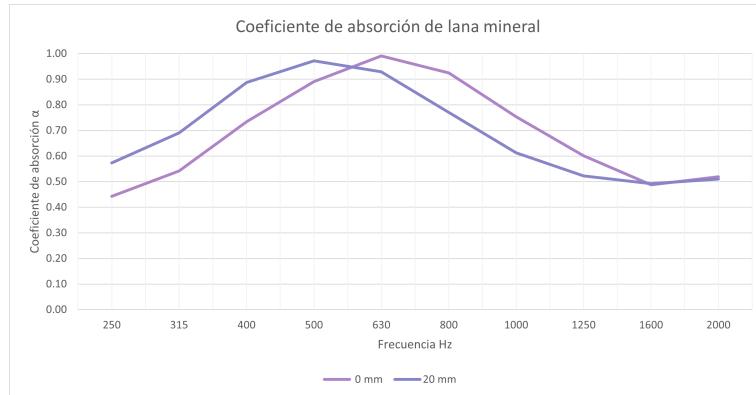


Figura 20: Gráfico de coeficiente de absorción de madera ranurada con lana mineral con distinto plenum

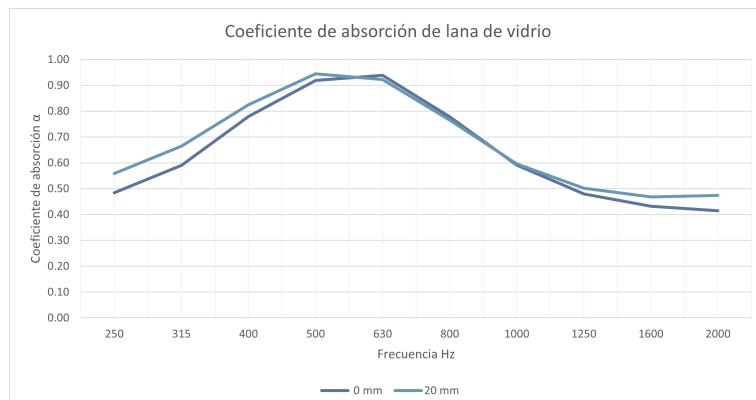


Figura 21: Gráfico de coeficiente de absorción de madera ranurada con lana de vidrio con distinto plenum

11 Conclusiones parciales

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, el cual puede confundirse con un mal acondicionamiento de las salas, al momento de dar un diagnóstico del estado de los recintos.

Por otro lado, el tiempo de reverberación es perjudicial al momento de estudiar un recinto para el habla, como lo son las salas de conferencia. Sin embargo, en un salón para practicar música clásica, este se puede utilizar a favor para sacar el mayor potencial del sonido de los instrumentos.

En la situación actual de las salas de reuniones el tiempo de reverberación y claridad están dentro de lo recomendado, por lo que estos no necesitan de una gran intervención en el acondicionamiento, el problema que radica en estos salones es el ruido, producido probablemente por la ubicación geográfica cercana a una avenida con un tránsito vehicular. Para el caso de la sala de ensayo, los valores de tiempo de reverberación son bajos con respecto a lo recomendado, esto probablemente a la intervención que se le realizó previamente al recinto.

En trabajos próximos se espera mejorar el estado de la sala de ensayo y dar una posible solución al problema de ruido producido por el tránsito vehicular en los tres recintos.

Referencias

- AFMG Technologies GmbH. (Versión 4.3). *EASE*. (Disponible en: <https://www.afmgb.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=N0o69999>)
- Carrion Isbert, A. (1990). Diseño acústico de espacios arquitectónicos. *Informes de la Construcción*, 42(408), 61–66.
- Decreto Supremo Nº 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 Nº 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.
- Kuttruff, H. (2017). *Room acoustics* (Sixth ed.). CRC Press, Taylor & Francis Group.
- 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/>)

12 Anexo

12.1 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 12: 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%) | 613.465 |
| | | | | Total (con IVA) | 3.842.227 |

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

12.2 Marco teórico

12.2.1 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 22). (Carrion Isbert, 1990)

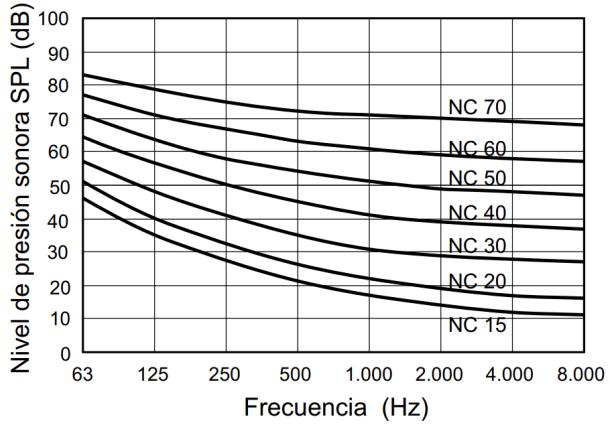


Figura 22: Curvas NC (“Noise Criteria”)

En la tabla 13 se muestran las curvas NC recomendadas para diferentes tipos de recinto, junto con su equivalencia en dBA.

Tabla 13: 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 |

- **Curvas NR:** Las curvas NR son estándares que muestran los niveles de ruido de fondo aceptables en recintos. Se dividen en números NR (como NR-15, NR-25, NR-35), que indican el nivel máximo de ruido permitido en decibelios (dB) según el propósito del espacio. En la figura 23, se muestran las curvas NR de evaluación de ruido y en la tabla 14 , figuran los valores recomendados del índice de NR para diferentes locales.(Recuero López, 2000)

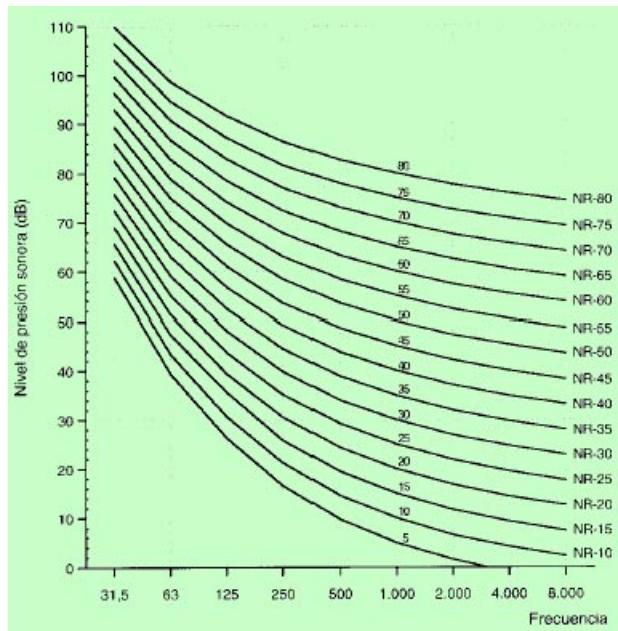


Figura 23: Curvas NR

Tabla 14: Valores recomendados de índice NR para distintos locales.

| Tipos de recintos | Rangos de niveles NR |
|---|----------------------|
| Talleres | 60 - 70 |
| Oficinas mecanizadas | 50 - 55 |
| Gimnasios, piscinas, salas de deporte, pasillos | 40 - 50 |
| Restaurantes, bares y cafeterías | 35 - 45 |
| Despachos, bibliotecas, salas de justicias | 30 - 40 |
| Cines, hospitalares, iglesias, pequeñas salas y aulas de conferencias | 25 - 35 |
| Estudio de televisión, grandes salas de conferencias | 20 - 30 |
| Sala de conciertos, teatros | 20 - 25 |
| Clínicas, recintos para audiometrías | 10 - 20 |

12.2.2 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 1. (Sabine, 1922)

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

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 15 se muestran valores recomendados de RT_{mid} , para diferentes tipos de salas en el supuesto que estén ocupadas. (Carrion Isbert, 1990)

| 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 15: 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.(Carrion Isbert, 1990)

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

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

Marshall, define valores apropiados de C_{50} para el habla y C_{80} para distintos tipos de música, descritos en la figura 24 (Marshall, 1994)

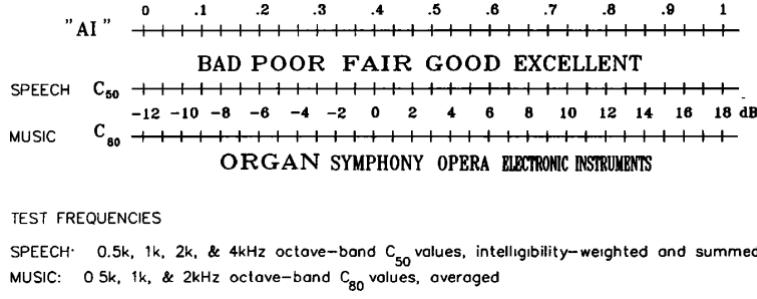


Figura 24: Recomendaciones de claridad para el habla y música

- 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. (Kuttruff, 2017)

- 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 (ISO 9921, 2003) los valores clasificarían como se indica en la tabla 16.

Tabla 16: 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 |

12.2.3 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. 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 25. 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.

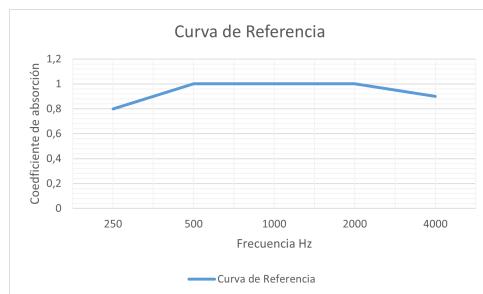


Figura 25: Curva de referencia de la medida de coeficiente de absorción

12.3 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.

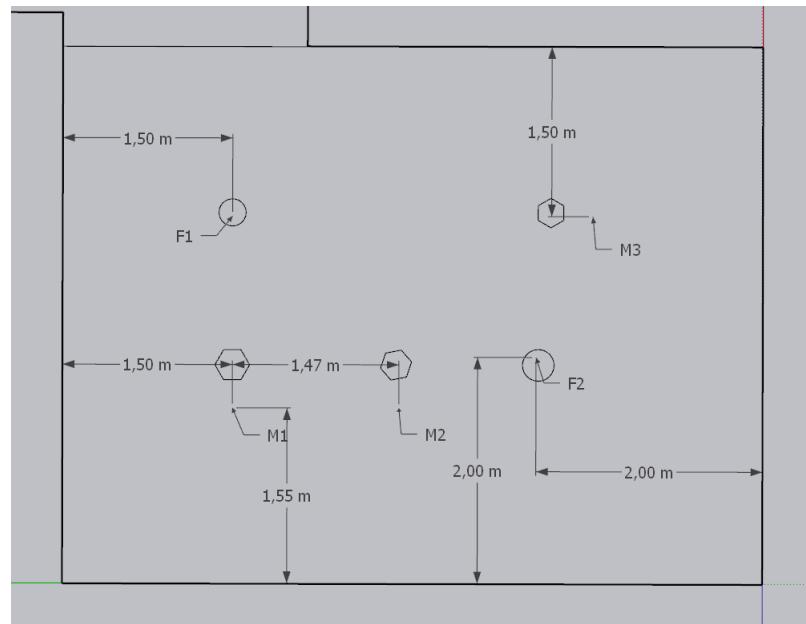


Figura 26: Posiciones de fuente y micrófono para sala de reunión 1

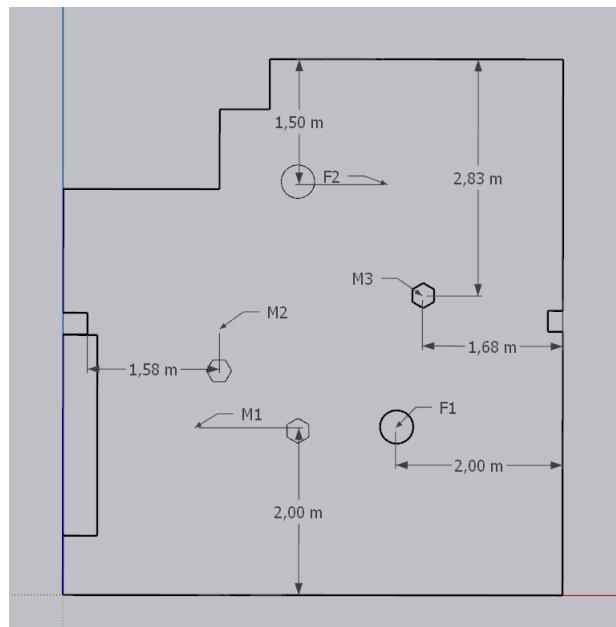


Figura 27: Posiciones de fuente y micrófono para sala de reunión 2

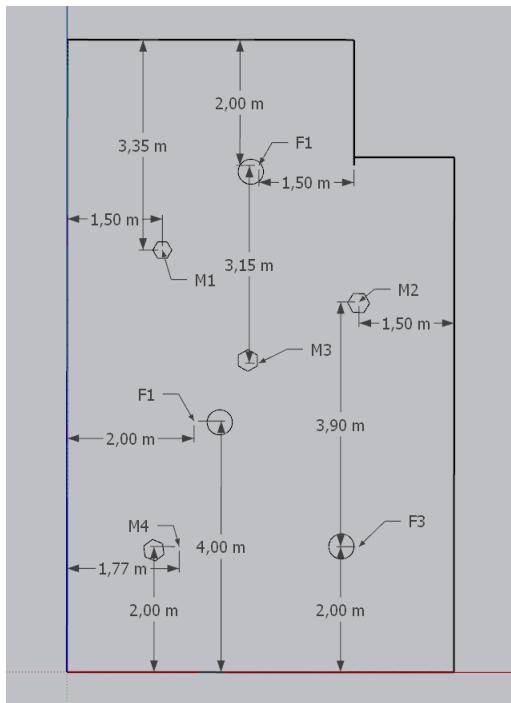


Figura 28: Posiciones de fuente y micrófono para sala de ensayo

12.4 Mediciones de tiempo de reverberación

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

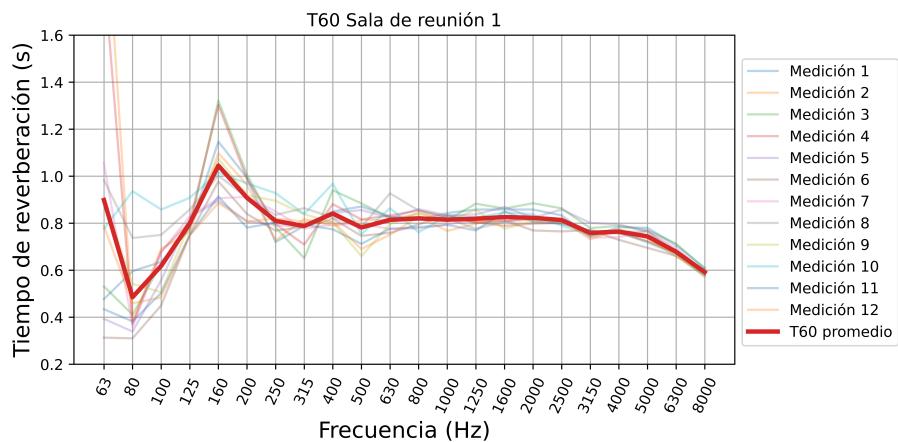


Figura 29: T_{60} sala de reunión 1

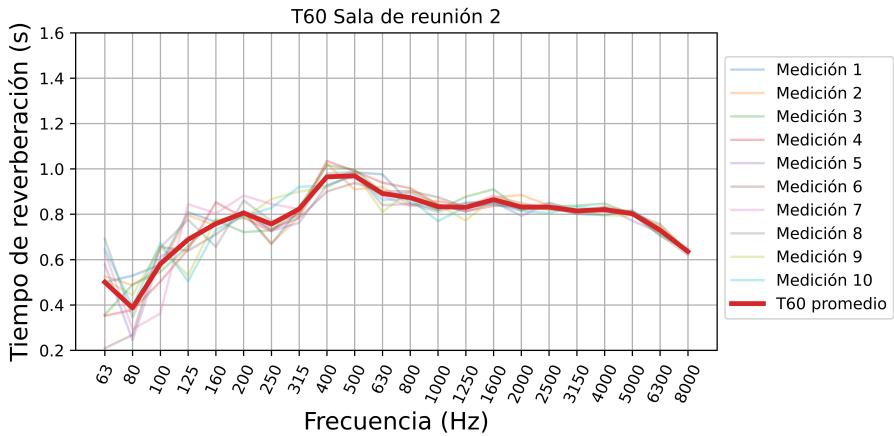


Figura 30: T_{60} sala de reunión 2

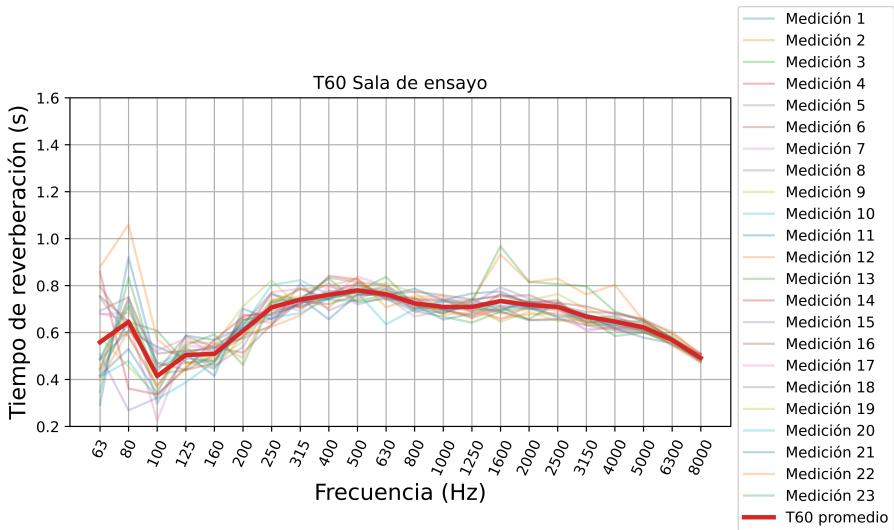


Figura 31: T_{60} sala de ensayo

12.5 Resultados curvas NR

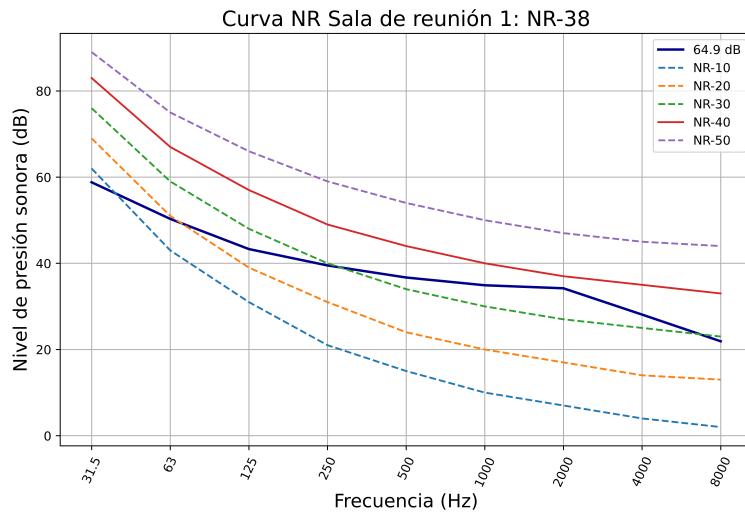


Figura 32: Curvas NR sala de reunión 1

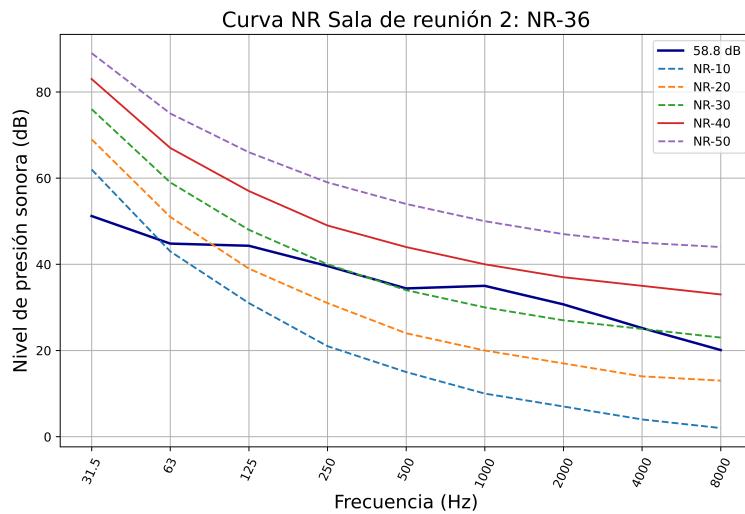


Figura 33: Curvas NR sala de reunión 2

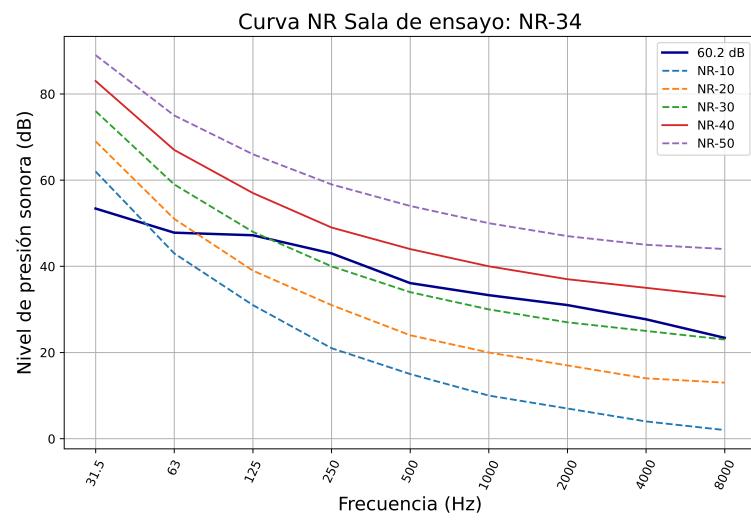


Figura 34: Curvas NR sala de ensayo