



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SALTA

Alumno: Lucas Navarro

Carrera: Licenciatura en Imagen y Sonido

Tema: PROPUESTA DE DISEÑO PARA EL ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO EN LA IGLESIA EVANGÉLICA “EL BUEN SAMARITANO”

Director de Tesis: Lic. José Saavedra

Año: 2023

I. ÍNDICE

I.	ÍNDICE	2
II.	RESUMEN	8
III.	ABSTRACT.....	10
IV.	MARCO METODOLÓGICO	12
	PROYECTO	13
	FUNDAMENTACIÓN	13
	OBJETIVOS.....	14
	ALCANCES.....	15
	LIMITACIONES.....	15
	HIPÓTESIS.....	16
	PARADÍGMA / TIPO DE INVESTIGACIÓN	18
V.	MARCO REFERENCIAL	25
VI.	ESTADOS DE ARTE	27
VII.	MARCO TEÓRICO	33
	1. PRINCIPIOS BÁSICOS DEL SONIDO	34
	1.1. El Sonido.....	34
	1.2. Generación y propagación del sonido.....	34
	1.3. Frecuencia del sonido (f).....	34
	1.4. Velocidad de propagación del Sonido (c).....	35
	1.5. Banda de frecuencias	35

1.6.	Nivel de presión sonora (SPL).....	36
1.7.	Presión, potencia e intensidad.....	37
1.8.	Decibeles (dB).....	38
2.	ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO	39
2.1.	Absorción del sonido.....	39
2.2.	Reflexión del sonido	41
2.3.	Difusión del sonido.....	42
3.	ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA	43
3.1.	Curvas NC	43
3.2.	Acústica Geométrica	45
3.3.	Acústica estadística	46
3.4.	Acústica ondulatoria	46
3.4.1.	Campo directo y campo reverberante.....	47
3.5.	Tiempo de reverberación RT.....	47
3.5.1.	Valores recomendados del tiempo de reverberación	48
3.5.2.	Cálculo del tiempo de reverberación Sabine	48
3.5.3.	Coefficiente de absorción.....	49
3.6.	Relaciones energéticas ELR (“Early to Late Ratios”)	50
3.6.1.	Claridad musical (C_{80}).....	51
3.7.	Claridad de la Voz (C_{50}).....	51

3.8.	Norma ISO 3382-2 Mediciones de parámetros acústicos en recintos.....	52
4.	MATERIALES ACÚSTICOS.....	54
4.1.	Absorbentes.....	54
4.2.	Resonadores.....	55
4.2.1.	Resonador de membrana o diafragmático.....	56
4.2.2.	Resonador simple de cavidad (Helmholtz).....	57
4.2.3.	Resonador múltiple de cavidad (Helmholtz) a base de paneles perforados o ranurados.....	58
4.2.4.	Resonador múltiple de cavidad (Helmholtz) a base de listones.....	61
VIII.	TRABAJO DE CAMPO.....	63
	RECONOCIMIENTO DEL RECINTO.....	64
	RECOLECCIÓN DE DATOS.....	66
	EXPOSICIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS.....	70
	ANEXO.....	86
	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	94
	BIBLIOGRAFÍAS.....	96
	HOJA DE EVALUACIÓN.....	97

AUTORIDADES

GRAN CANCELLER

S.E.R. Mons. Mario Antonio Cargnello Arzobispo de Salta

RECTOR

Ing. Rodolfo Gallo Cornejo

VICERRECTORA ACADÉMICA

Mg. Constanza Diedrich

DECANA DE LA FACULTAD DE ARTES Y CIENCIAS

Lic. María Dolores Medina Bouquet

SECRETARIA ACADÉMICA

Abg. Adriana Ibarguren

JEFE DEL DEPARTAMENTO DE COMUNICACIONES SOCIALES

Dr. Gustavo Alejandro Iovino

DIRECTOR DE TESIS

Lic. José Saavedra Arce

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios primeramente por bendecirme todos los días de mi vida y por haberme otorgado una familia maravillosa, quienes han creído en mí siempre.

A mis padres Raúl Navarro y Sabina Gutiérrez y a mi querida abuela Isolina Maita quienes estuvieron siempre presentes, tanto económica como afectivamente durante toda mi carrera. A mi pareja Mercedes Sayago, quien estuvo alentándome y aconsejándome para no bajar los brazos en el último tramo del proyecto.

A todas las personas que hicieron parte del proceso académico, compañeros y profesores.

También agradecer a mi director de tesis el Lic. José Saavedra Arce, quien con mucha paciencia y dedicación me brindo las herramientas necesarias para llevar a cabo este proyecto de investigación.

II. RESUMEN

La iglesia evangélica el “Buen Samaritano” está ubicada en la Ciudad de Salta, en el barrio 6 de Septiembre, la cual fue fundada hace 26 años por los pastores Raúl Lazarte y Ángela Rueda. Según sus testimonios dicha iglesia nunca fue investigada ni tratada acústicamente, es por eso que se decidió llevar adelante este proyecto de investigación. En éste recinto se realizan distintos eventos como predicaciones, reproducción de contenidos multimedia, presentación de música en vivo, obras de teatro y danzas.

En el siguiente proyecto de investigación se llevará a cabo una propuesta de diseño para el acondicionamiento acústico de la Iglesia Evangélica “El Buen Samaritano”.

Para efectuar este proyecto se realizará un estudio mediante cálculos, herramientas y técnicas que ayuden a reconocer posibles falencias del recinto, posteriormente teniendo en cuenta las actividades que se presentan allí y los valores recomendados para este tipo de salas, plantear el nuevo diseño con las debidas modificaciones que respondan a las necesidades actuales de la comunidad evangélica.

PALABRAS CLAVES

Sonido / diseño acústico / tiempo de reverberación / claridad musical / claridad de la voz.



III. ABSTRACT

The evangelical church "El Buen Samaritano" is located in 6 de Septiembre neighborhood, in Salta and was founded 26 years ago by pastors Raúl Lazarte and Ángela Rueda. According to their testimonies, the church has never been investigated or treated acoustically, which is why this research project has been undertaken. In this building, different events are held such as preaching, reproduction of multimedia content, live music performances, plays, and dances. In the following research project, a design proposal will be carried out for the acoustic conditioning of the "El Buen Samaritano" evangelical church. To accomplish this project, a study will be conducted using calculations, tools, and techniques that help identify possible flaws in the building. Afterward, taking into account the activities that take place there and the recommended values for this type of space, the new design will be proposed with the necessary modifications that meet the current needs of the evangelical community.

KEYWORDS: Sound / acoustic design / reverberation time / musical clarity / voice clarity



IV. MARCO

METODOLÓGICO

TEMA

Propuesta de diseño para el acondicionamiento acústico de la Iglesia Evangélica el “Buen Samaritano”.

PROYECTO

Optimización acústica de la Iglesia Evangélica el “Buen Samaritano”.

FUNDAMENTACIÓN

Actualmente en Salta, la acústica de recintos ha tomado cada vez más importancia entre las iglesias evangélicas, debido a los buenos resultados obtenidos en iglesias de otras provincias como ser la Iglesia “Rey de Reyes”, la Iglesia “Catedral de la Fe” en Buenos Aires, la iglesia “Visión de futuro” en Córdoba, entre otras, las cuáles muestran una mejoría importante en la claridad musical y la claridad de la voz apreciada por los espectadores. Hoy en día el acondicionamiento acústico de espacios cerrados como teatros, auditorios o salas de conferencias, es muy importante ya que en ellos inciden factores que en este tipo de recintos son indeseados como los tiempos de reverberación altos, áreas de focalización de sonido, sombras acústicas, etc. En estos recintos se realizan predicaciones, reproducción de contenido multimedia o presentación de música en vivo, y por lo tanto es sumamente importante reducir o mitigar las dificultades anteriormente descritas.

Por esta razón, en este proyecto de investigación, se propone mejorar la **claridad musical** y la **claridad de la voz**, teniendo en cuenta el **tiempo de reverberación**. De ésta manera optimizar las charlas, las predicaciones y las presentaciones musicales en la comunidad cristiana, todo esto bajo unas consideraciones de diseños funcionales, estéticos y de calidad.

OBJETIVOS

Objetivo General:

Diseñar y determinar un acondicionamiento acústico óptimo para la Iglesia evangélica el “Buen Samaritano”, teniendo en cuenta los eventos que se realizan allí, mejorando la **claridad musical** y la **claridad de la voz** en el recinto.

Objetivos Específicos:

- Reconocer las distintas actividades que se realizan en el recinto.
- Definir los parámetros físicos que intervienen en la sala, tales como la geometría y materiales de revestimiento, utilizando dispositivos de recolección de datos para el estudio de las condiciones iniciales del recinto.
- Estudiar y analizar el comportamiento acústico de la sala a través de observaciones, mediciones y cálculos.
- Diseñar y proponer formas para alcanzar los valores acústicos recomendados para mejorar la claridad musical y la claridad de la voz, teniendo en cuenta el tiempo de reverberación.

ALCANCES

- Este proyecto pretende mejorar la calidad de escucha de las personas que asisten a la iglesia evangélica “El Buen Samaritano” a través de un diseño de acondicionamiento acústico.
- Se detallarán los parámetros acústicos más relevantes para dicho salón, de acuerdo a las actividades que se realizan en él.
- Se establecerá un presupuesto para la mejora acústica de la iglesia evangélica “El Buen Samaritano”.
- Que las estrategias desarrolladas, sirvan para futuros proyectos con fines similares.

LIMITACIONES

- Debido a las diferentes actividades que se realizan en el salón, es posible que no todas tengan la óptima calidad que como si se dieran de manera individual.
- Las dimensiones de la iglesia no se pueden modificar, por lo que se deberá adaptar al espacio disponible.
- La aprobación del presupuesto presentado, dependerá de los coordinadores de dicha iglesia.

HIPÓTESIS

Para optimizar la respuesta acústica de la Iglesia el “Buen Samaritano” se debería definir e implementar un **diseño acústico** donde, los materiales absorbentes y resonadores colocados de manera estratégica, ayuden a mejorar **la claridad musical y la claridad de la voz**, de esta manera llegar a los valores necesarios para este tipo de recinto.

Tipos de Hipótesis

Según la clasificación de **Hernández Sampieri, Roberto (2006)**, “**Formulación de hipótesis**” en su capítulo N°5 nos dice que existen cuatro tipos de hipótesis:

- Las hipótesis descriptivas
- Las hipótesis correlacionales.
- Las hipótesis de diferencia entre grupos
- Las hipótesis de causalidad

De acuerdo al tema de este proyecto se llevará a cabo la **hipótesis de causalidad**. Este tipo de hipótesis no solamente afirma la relación entre dos o más variables y como se dan dichas relaciones, sino que además propone un “sentido de entendimiento” de ellas. Este tipo de hipótesis establecen relaciones de **causa-efecto** entre ellas.

A las variables que se consideren **causas** reciben el nombre de **variables independientes**, mientras que a las variables que se consideren **efectos** reciben el nombre de **variables dependientes**.

OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

Variables	Definición Conceptual	Dimensiones	Indicadores	Items
Diseño Acústico (V. independiente)	Conjunto de componentes acústicos que determinan el comportamiento del sonido en su interacción con las superficies del recinto.	<ul style="list-style-type: none"> - Paneles fonoabsorbentes (lana de vidrio) - Resonadores de membrana, simple y múltiple de cavidad (Helmholtz) - Difusores de madera 	<ul style="list-style-type: none"> - Coeficiente de absorción. (α) - Tiempo de reverberación 	<ul style="list-style-type: none"> - Medición - Cálculos - Observación
Claridad Musical (V. dependiente)	La relación entre la energía sonora que llega al oyente durante los primeros 80ms desde la llegada del sonido directo y la que llega después de ese tiempo. Se calcula por cada banda de frecuencias y se expresa en escala logarítmica.	<ul style="list-style-type: none"> - Sonido directo - C_{80}. 	<ul style="list-style-type: none"> - Banda de frecuencia - Tiempo de reverberación - Nivel de presión sonora 	<ul style="list-style-type: none"> - Medición - Cálculos
Claridad de la Voz (V. dependiente)	Se define como la relación entre la energía sonora que llega al oyente durante los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo (incluye el sonido directo y las primeras reflexiones) y la que le llega después de los primeros 50 ms. Se calcula en cada banda de frecuencias entre 125 Hz y 4 kHz y se expresa en escala logarítmica.	<ul style="list-style-type: none"> - Absorción del sonido - Reflexión del sonido - Difusión del sonido - C_{50} 	<ul style="list-style-type: none"> - Banda de frecuencia - Tiempo de reverberación - Nivel de presión sonora 	<ul style="list-style-type: none"> - Medición - Cálculos

PARADÍGMA / TIPO DE INVESTIGACIÓN

PARADIGMA DE INVESTIGACIÓN

En este proyecto nos abocaremos en el **Paradigma Positivista**, también se lo denomina **cuantitativo**, empírico-analítico racionalista.

“Para las investigaciones cuantitativas, el investigador (sujeto) debe separarse de su objeto de estudio para poder generar conocimiento objetivo sobre él; hay una realidad de naturaleza objetiva, y los valores del investigador no deben influir en el proceso de conocimiento.” (Ruth Sautu, “Manual de metodología”, 2005).

Se trabajará con una **realidad objetiva** ya que es susceptible de conocer, se necesita conocer la mayor cantidad de información posible de esta realidad.

Se trabajará con datos duros, numéricos, cálculos, tablas, curvas, esquemas y diagramas.

En el análisis de interpretación de datos se obtendrá una valoración fiable y objetiva.

TIPO DE INVESTIGACIÓN

El tipo de investigación es el **explicativo - correlacional**.

La investigación **explicativa** según Hernández Sampieri, 1991, señala que *“los estudios explicativos van más allá de la descripción de conceptos o fenómenos o del establecimiento de relaciones entre conceptos; están dirigidos a responder a las causas de los eventos físicos o sociales. Como su nombre lo indica, su interés se centra en explicar por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se da éste, o por qué dos o más variables están relacionadas...”*

Según Hernández Sampieri (1991), los estudios de alcance **explicativo** buscan determinar los motivos por los cuales sucede un determinado fenómeno, además, permiten obtener una comprensión más acertada de dicho fenómeno y sus causas.

*"La investigación **correlacional** tiene como finalidad conocer la relación o grado de asociación que exista entre dos o más conceptos, categorías o variables, en ocasiones solo se analiza la relación entre dos variables, pero con frecuencia se ubican en el estudio relaciones entre tres, cuatro o más variables. "Sampieri Hernández, Roberto, 1991.*

En el presente proyecto de investigación tenemos dos variables dependientes, **la claridad musical y la claridad de la voz**, a través de estudios y mediciones se buscará la relación entre ambas.

En este proyecto de investigación se va a tomar como objeto de estudio un recinto físico que será expuesto a variables, posteriormente serán intervenidas y medidas.

UNIVERSO, MUESTRA Y UNIDAD DE ANALISIS

El proyecto de investigación se llevará a cabo entre abril y junio de 2023.

Universo:

La Iglesia el "**Buen Samaritano**" está ubicada en el Barrio "6 de Septiembre", en la calle Francisco Muñiz N° 807, en la provincia de Salta-Capital.

Muestra:

Será en La Iglesia evangélica el "**Buen Samaritano**".

Tipo de muestreo:

No probabilístico.

“En las muestras no probabilísticas, la elección de elementos no depende de la probabilidad, sino de las características de la investigación o propósitos del investigador.” (Hernández Sampieri, 2006).

En éste proyecto de investigación la muestra fue seleccionada por conveniencia del investigador, se pretende estudiar el caso particular de la Iglesia el “Buen Samaritano”, que posee características arquitectónicas únicas y difícilmente se encuentre otra igual.

TÉCNICAS:

Observación, Medición y Análisis de Datos.

Observación:

El tipo de observación será **directa**, según Hernández Sampieri (2006, p. 374), *“consiste en el registro sistemático, válido y confiable de comportamientos o conductas que se manifiestan”*. Las variables a observar son especificadas y definidas antes de comenzar la recolección de datos.

Se observará de forma **directa** al fenómeno, entrando en contacto con él, cuyos resultados se considerarán datos estadísticos originales.

La observación será **estructurada**, ya que se realizará con la ayuda de elementos apropiados, tales como: cuadros, tablas, fórmulas, entre otras.

Medición:

Se realizarán mediciones con instrumentos específicos, interfaz de audio y analizador de sonido, acompañado de una notebook. Con la ayuda de estos instrumentos se buscará

conocer las características acústicas que presenta el recinto. Se tomarán seis medidas en diferentes puntos del recinto para sacar conclusiones más precisas, con un sonido de impulso (globo) ubicado a la altura de las fuentes sonoras. Se analizará el comportamiento de las ondas sonoras en las bandas de frecuencias 125 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz y 4000 Hz respectivamente y el tiempo de reverberación utilizando la fórmula de Sabine.

$$RT = 0,161 \frac{V}{A_{\text{tot}}} \text{ (en segundos)}$$

V = volumen del recinto (en m³).

A_{tot} = absorción total del recinto (definida seguidamente).

Se utilizará cinta métrica para medir las dimensiones del recinto, de las cuales serán plasmadas en el programa SketchUp, se realizará un listado de los materiales que componen el salón, como ser placas de yeso (durlock), tipo de piso, puertas, ventanas, etc., con su espesor y su absorción. Los datos obtenidos se detallarán en una planilla de Excel para su posterior análisis.

Análisis de Datos:

Una vez realizadas las mediciones, se analizarán los datos obtenidos, de los cuales se diagnosticarán las características acústicas óptimas para el recinto.

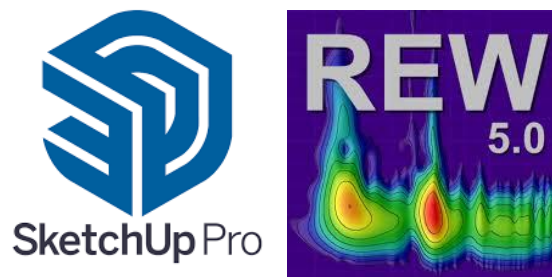
Instrumentos de recolección de datos

Para las mediciones acústicas se utilizará:

- ✓ **Notebook**
- ✓ **Sonómetro de medición**

- ✓ Interfaz de audio
- ✓ Software

La **notebook** que se utilizará para el proyecto de investigación será de la marca **ACER** modelo **Aspire E 15**, en la cual usará los softwares **SketchUp** y el **Room EQ Wizard**.



- El **sonómetro de medición** es un instrumento de medida diseñado especialmente para recolectar datos como, el nivel de presión sonora, amplitud de frecuencia, el modelo que se utilizará es el **sound level meter g2 tech** (**Mínimo nivel de sonido medido - Máximo nivel de sonido medido: 30 dB - 130 dB**).



El **interface de audio** es un dispositivo hardware que se conecta al ordenador y gestiona las entradas, las salidas y el procesamiento del sonido. La interface que se usará para esta investigación será la **Behringer Umc22 Usb 48khz**.



La grabación de las distintas bandas de frecuencia se realizará de la siguiente manera:

- A la notebook **ACER** se le instalará el software de grabación **Room EQ Wizard** y el software **SketchUp**, luego a través de vía USB se le conectará la interfaz de audio **Behringer Umc22 Usb 48khz**, a dicha interfaz se le adherirá el **sonómetro de medición**.
- Posteriormente se ubicará el sonómetro en seis puntos diferentes del recinto (desocupado).
- Una vez colocado el sonómetro de medición y preparado el software **Room EQ Wizard**, se ajustará la interfaz de audio a una ganancia correcta y se tomará las muestras de grabación con un impulso (globo) de cada una de las bandas de frecuencias mencionadas anteriormente.
- En el software **SketchUp** se expondrá gráficamente el recinto en sus condiciones acústicas actuales.



**Ordenador (Room
EQ Wizard)**



**Interface de
Audio**



**Sonómetro
de medición**

V. MARCO

REFERENCIAL

La iglesia evangélica el “Buen Samaritano” está ubicada en la Ciudad de Salta, en el barrio “6 de septiembre”, es coordinada por los pastores Raúl Lazarte y Ángela Rueda.

En esta institución cristiana se presentan diferentes actividades, como ser predicaciones, conferencias, obras de teatro, danzas e interpretación musical en vivo. Esta información fue obtenida en una reunión con los coordinadores de dicha iglesia.



En lo que concierne a dimensiones, la iglesia evangélica el “Buen Samaritano” presenta un formato rectangular de 8,03 mts de ancho x 19,90 mts de largo y 3,50 mts de altura. En sus paredes y techos tiene revestimientos de durlock (yeso), en sus pisos cerámicos y en una de sus paredes tiene distribuidas cuatro ventanas que dan a la calle.





VI. ESTADOS DE

ARTE

- Tesis para Licenciatura en Imagen y Sonido (Ucasal)

DELGADO Emmanuel Jesús, *Diseño y Acondicionamiento Acústico y Electroacústica del Futuro Salón Multiusos para Cine-mini Teatro “Plaza” de Santa María (Catamarca), (2016).*

http://bibliotecas.ucasal.edu.ar/opac_css/index.php?lvl=cmspage&pageid=24&id_notice=60

148

Esta Tesis analiza el comportamiento acústico del Salón Multiusos “Plaza” de Santa María (Catamarca) en estudio según su Diseño Arquitectónico, exponiendo los valores que deberían alcanzar para obtener una acústica correcta en la sala.

Problema: Se identificaron problemas en el diseño arquitectónico, lo que afecta en diferentes aspectos del recinto.

Metodología: Cuantitativa

Conclusión: Con esta investigación se han encontrado desaciertos que perjudicarían a la acústica del recinto, a la comodidad, y seguridad de los espectadores. Se precedió a identificar los problemas del diseño, recomendar los parámetros ideales a perseguir y finalmente, se propuso un nuevo diseño, el cual se aproxima a las recomendaciones ideales.

Aporte: El aporte que da esta Tesis es la metodología y los métodos utilizados; análisis, cálculos, entre otros. Además, nos ayuda a presentar los altavoces a utilizar en el sistema de sonido y la disposición de cada uno en el recinto, describiendo brevemente sus funciones y características.

- **Tesis para optar al título de Graduado en Medios Audiovisuales. Escola Universitaria Politècnica de Mataró. Catalunya, España.**

ALEJANDRES J.L. y VIVES J.A. *Análisis Técnico Acústico, (2009).*

<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/7497/Memoria.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Este proyecto tiene como objetivo principal enumerar una serie de mejoras audiovisuales y desarrollar un informe de mantenimiento de la sala de actos del Colegio Joan Pelegrí.

Partiendo del análisis a nivel técnico de la sala y mantenimiento de ésta, identificar las diferentes carencias con las que elaborar un informe técnico, un informe de mantenimiento audiovisual y mapa acústico que ayude a mejorar el funcionamiento de la sala.

Metodología: Cuantitativa

Conclusión: La realización de este proyecto ha servido para repasar conceptos de acústica, trabajar con material especializado, como el sonómetro NL-05, manejar nuevo software AutoCad, para la realización de los planos. Otras herramientas también como el Photoshop CS3 para los mapas de presión sonora, han ayudado a ampliar conocimientos de grafismo. En cuanto a los informes técnicos de la sala, han aportado una ampliación de conceptos técnicos sobre los aparatos de audio e iluminación, así como toda la parte de seguridad o eléctrica. El proceso de investigación de cada uno de los componentes de la sala ha supuesto un gran esfuerzo que ha aportado una ampliación de conocimientos.

Aporte: Lo que aporta dicha investigación es su objetividad, el tipo de estudio descriptivo de cada elemento de los equipos de sonido y de iluminación. Además, aporta su metodología

aplicada, los mapas, los planos, etc., que facilitaron la comprensión del lugar. También se aplicará las mismas herramientas informáticas como el Auto CAD, entre otras.

- **Tesis para Licenciatura en Imagen y Sonido (Ucasal)**

SAAVEDRA ARCE José Alberto, *Calidad Acústica del Teatro Provincial de Salta, (2014)*

En esta Tesis se buscó cuantificar los efectos que provocan las características del Teatro Provincial de Salta, en cuanto al sonido y cómo influye en las actividades que se realizan en dicho auditorio.

Problema: El índice de la calidad acústica del Teatro Provincial de Salta es acorde para ciertos tipos eventos, ejemplo (conciertos sinfónicos, zarzuelas) pero no se adecua correctamente al resto de los eventos que se realizan en él.

Metodología: Cuantitativa

Aporte: Dicha Tesis nos aporta la manera para definir parámetros útiles a la hora de medir, calcular y diseñar un recinto.

- Tesis para Licenciatura en Imagen y Sonido (Ucasal)

JUAREZ Maira Soledad, *Propuesta Acústica para las salas Cinematográficas del Cine Opera de Salta, (2014).*

En dicha tesis busca determinar el comportamiento acústico que presentan las salas del Cine Opera de Salta, examinando si presentan dificultades acústicas. Plantea además posibles soluciones a dichas problemáticas.

Problema: Indicadores tales como fisonomía del oído humano, RT, Curvas NC, materiales para la construcción y los sistemas de reproducción sonora presentan anomalías que interrumpen el buen desarrollo de la actividad a la que han sido destinadas.

Metodología: Cuantitativa

Aporte: Uno de los aportes que me parece significativo de esta Tesis es la importancia del estudio de los materiales para la construcción y los parámetros para lograr un diseño armónico, entre la selección de materiales (para la correcta escucha y edificación) y los métodos de aislación.

- Tesis para optar al grado de Licenciado en Ciencias de la Ingeniería y al Título Profesional de Ingeniero Civil Acústico. (Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile).

NAVARRETE, A. A. (2013). *Evaluación de la calidad acústica del Teatro Universidad de Chile y recomendaciones para su mejora.*

<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2013/bmfcin321e/doc/bmfcin321e.pdf>

En este documento se presenta la asesoría acústica para el Teatro Universidad de Chile, definido para este trabajo como sala de conciertos, la cual consiste en el diagnóstico de la calidad acústica actual del teatro en base a bibliografía especializada. Además, en base a éste, se proponen recomendaciones para mejorar su calidad acústica.

Metodología: La metodología consistió en la definición de valores esperados para cada parámetro propuesto; medición, cálculo o simulación de los parámetros acústicos que entrega este recinto; comparación de éstos con los resultados esperados y proposición de soluciones. Cuantitativa.

Conclusión: A partir del estudio realizado es posible concluir que el teatro Universidad de Chile cuenta con un comportamiento acústico regular para recintos de este tipo. Basándose en este análisis, las medidas de mejoramiento consistieron básicamente en el rediseño de la geometría del escenario, el cierre de ciertos volúmenes interiores y el cambio de algunos revestimientos.

Aporte: Lo que va aportar esta investigación es la metodología cuantitativa a la hora de realizar los cálculos pertinentes, la forma de desarrollar el proyecto como ser la presentación del recinto a estudiar con fotografías, proyectos en Auto CAD, planos, vistas y cortes. También se tendrá como referencia al igual que en las demás investigaciones; conceptos y parámetros acústicos, nivel de presión sonora, Tiempo de Reverberación RT, inteligibilidad de la palabra, %ALcons, entre otras teorías de acústica.

VII. MARCO TEÓRICO

1. PRINCIPIOS BÁSICOS DEL SONIDO

1.1. El Sonido

- **Federico Miyara en su libro "Acústica y sistemas de sonido" (1999) establece que:**

*"El **sonido** consiste en la propagación de una perturbación en el aire. Para comprender mejor este concepto imaginemos un tubo muy largo lleno de aire, con un pistón en un extremo. El aire está formado por una cantidad muy grande de pequeñas partículas o moléculas. Inicialmente, el aire dentro del tubo está en reposo, o, más técnica-mente, en equilibrio este equilibrio es dinámico, lo cual significa que las moléculas no están quietas, sino que se mueven caóticamente en todas las direcciones debido a la agitación térmica, pero con la particularidad de que están homogéneamente repartidas en el interior del tubo."*

1.2. Generación y propagación del sonido

- **En Antoni Carrión (1998) encontramos que:**

*El elemento generador del **sonido** se denomina **fente sonora** (tambor, cuerda de un violín, cuerdas vocales, etc.). La generación del sonido tiene lugar cuando dicha fuente entra en vibración. Dicha vibración es transmitida a las partículas de aire adyacentes a la misma que, a su vez, la transmiten a nuevas partículas contiguas.*

Las partículas no se desplazan con la perturbación, sino que simplemente oscilan alrededor de su posición de equilibrio. La manera en que la perturbación se traslada de un lugar a otro se denomina propagación de la onda sonora.

1.3. Frecuencia del sonido (f)

- **Federico Miyara (1999) establece en su que:**

Se define como la cantidad de ciclo por segundo, o lo que es lo mismo, la cantidad de perturbaciones por segundos. Se expresa en **Hertz (Hz)**. La frecuencia de los sonidos audibles está comprendida entre 20 Hz (sonidos graves) y los 20000 Hz (sonidos agudos) o 20 kHz (Kilohertz).

1.4. Velocidad de propagación del Sonido (c)

- **Antoni Carrión (1998) en su libro establece que:**

“La velocidad de propagación del sonido (c) es función de la elasticidad y densidad del medio de propagación. Debido a que, en el aire, ambas magnitudes dependen de la presión atmosférica estática P_0 y de la temperatura, resulta que, considerando las condiciones normales de 1 atmósfera de presión y 22 °C de temperatura, la velocidad de propagación del sonido es de, aproximadamente, 345 m/s.

Si bien el aire constituye el medio habitual de propagación de las ondas sonoras, conviene tener presente que el sonido puede propagarse a través de cualquier otro medio elástico y denso. Cuanto más denso y menos elástico sea el medio, mayor será la velocidad del sonido a su través. Por ejemplo, la velocidad de propagación del sonido generado por un tren a través de los raíles es mucho mayor que a través del aire, por lo que la vibración del raíl se percibirá mucho antes que el sonido aéreo debido a dicho tren.”

1.5. Banda de frecuencias

- **Antoni Carrión (1998) establece en su libro que:**

“Las notas inferior y superior de un piano de 88 teclas tienen unas frecuencias fundamentales de 27,5 Hz y 4.400 Hz, respectivamente. La primera corresponde a un sonido muy grave, mientras que la segunda va asociada a uno muy agudo. Por consiguiente, un

sonido grave está caracterizado por una frecuencia baja, en tanto que uno agudo lo está por una frecuencia alta. El conjunto de frecuencias situado entre ambos extremos se denomina banda o margen de frecuencias del piano. Dicha definición es válida para cualquier fuente sonora.

En el caso de la audición humana, la banda de frecuencias audibles para una persona joven y sana se extiende, aproximadamente, de 20 Hz a 20.000 Hz (o bien 20 kHz). Las frecuencias inferiores a 20 Hz se llaman subsónicas y las superiores a 20 kHz ultrasónicas, dando lugar a los infrasonidos y ultrasonidos, respectivamente.”

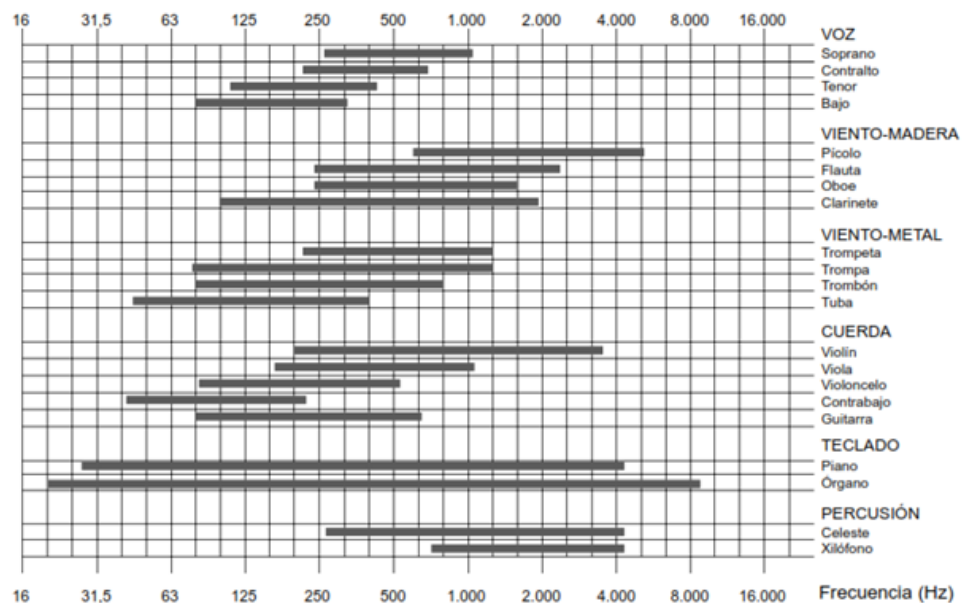


Fig. 1. Bandas de frecuencias de instrumentos musicales y de la voz.

1.6. Nivel de presión sonora (SPL)

- *En Antoni Carrión (1998) encontramos que:*

La presión sonora constituye la manera más habitual de expresar la magnitud de un campo sonoro.

La unidad de medida es el Newton/metro² (N/m²) o Pascal (Pa). En principio, el valor a

considerar es la diferencia entre el valor fluctuante de la presión sonora total PT y su valor de equilibrio $P0$. Debido a la variación de dicha magnitud con el tiempo, se utiliza como valor representativo su promedio temporal, que recibe el nombre de valor eficaz o r.m.s. (“root-mean-square”). Ahora bien, la utilización de dicho valor eficaz da lugar a una serie de problemas cuyo origen se halla en el comportamiento del oído humano.

En la tabla 1 se muestran los niveles de presión sonora correspondientes a una serie de sonidos y ruidos típicos, junto con la valoración subjetiva asociada.

FUENTE SONORA	NIVEL DE PRESIÓN SONORA SPL (dB)	VALORACIÓN SUBJETIVA DEL NIVEL
Despegue avión (a 60 m)	120	Muy elevado
Edificio en construcción	110	
Martillo neumático	100	
Camión pesado (a 15 m)	90	Elevado
Calle (ciudad)	80	
Interior automóvil	70	
Conversación normal (a 1 m)	60	Moderado
Oficina, aula	50	
Sala de estar	40	
Dormitorio (noche)	30	Bajo
Estudio de radiodifusión	20	

Tabla 1. Niveles de presión sonora correspondientes a sonidos y ruidos típicos, y valoración subjetiva asociada.

1.7. Presión, potencia e intensidad

- *En Alejandro L. Giani (2014) encontramos que:*

Presión Sonora

La presión sonora $[p]$ es un incremento variable de presión atmosférica resultante de la presencia de la energía sonora.

Potencia Sonora

La potencia sonora [w] es la cantidad de energía sonora emitida por unidad de tiempo.

Intensidad Sonora

La intensidad sonora [I] expresada en vatios/m² [W/m²] es la cantidad de energía sonora que atraviesa una unidad de área perpendicular a las direcciones de propagación del sonido en la unidad de tiempo.

1.8. Decibeles (dB)

- *En Alejandro L. Giani (2014) encontramos que:*

La unidad más utilizada es el **decibelio [dB]** que permite manejar fácilmente unidades que de otra forma sería muy incómodo a la hora de realizar cálculos.

A través de las definiciones anteriores, podemos expresar en decibelios la relación entre el nivel de potencia acústica de la Fuente y la presión sonora originada en un punto alejado a una distancia r.

2. ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO

El éxito en el diseño acústico de cualquier tipo de recinto, una vez fijado su volumen y definida sus formas, radica en primer lugar en la elección de los materiales más adecuados para utilizar como revestimientos del mismo con objeto de obtener unos tiempos de reverberación óptimos.

Además, en según qué tipo de espacios, resulta necesario potenciar la aparición de primeras reflexiones (es el caso de teatros y salas de conciertos) y/o conseguir una buena difusión del sonido (exclusivamente en el caso de salas de conciertos).

En este capítulo se describen los diferentes tipos de materiales y elementos utilizados a tal efecto, así como sus características básicas. Cada uno de ellos produce principalmente uno de los siguientes efectos sobre la energía sonora:

- ▶ **Absorción del sonido:** debida mayoritariamente a la presencia en el recinto de materiales absorbentes, de elementos absorbentes selectivos (resonadores), del público y de las sillas.
- ▶ **Reflexión del sonido:** debida a la existencia de elementos reflectores utilizados para la generación de reflexiones útiles hacia la zona de público.
- ▶ **Difusión del sonido:** debida a la presencia de elementos difusores utilizados para dispersar, de forma uniforme y en múltiples direcciones, la energía sonora incidente.

2.1. Absorción del sonido

- ***En Antoni Carrión (1998) encontramos que:***

*“La **absorción del sonido** es la reducción de la energía asociada a las ondas sonoras, tanto en su propagación a través del aire como cuando inciden sobre sus superficies límite, es*

determinante en la calidad acústica final de un recinto.”

Básicamente, dicha reducción de energía, en orden de mayor a menor importancia, es debida a una absorción producida por:

- ▶ El público y las sillas
- ▶ Los materiales absorbentes y/o los absorbentes selectivos (resonadores), expresamente colocados sobre determinadas zonas a modo de revestimientos del recinto.
- ▶ Todas aquellas superficies límite de la sala susceptibles de entrar en vibración (como, por ejemplo, puertas, ventanas y paredes separadoras ligeras).
- ▶ El aire
- ▶ Los materiales rígidos y no porosos utilizados en la construcción de las paredes y techo del recinto (como, por ejemplo, el hormigón).

Absorción de los materiales utilizados en la construcción de las paredes y techo de un recinto

Dichos materiales, por reglas generales muy rígidas y con porosidad nula, dan lugar a una mínima absorción del sonido.

FRECUENCIA (Hz)	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Hormigón macizo	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04
Bloques de hormigón pintados	0,10	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08
Ladrillo revestido con yeso	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04

Tabla 2. Coeficientes de absorción α_{SAB} de materiales habitualmente utilizados en la construcción de recintos

Según se observa, si bien todos los valores son extremadamente bajos, el material con una mayor rugosidad presenta unos coeficientes de absorción ligeramente más elevados. Ello es debido a que su superficie es mayor y, por tanto, la capa de aire adyacente donde se produce la disipación de energía también lo es.

2.2. Reflexión del sonido

- **En Flores P. (1989) encontramos que:**

“Cuando un sonido se transmite en un medio determinado choca con los objetos presentes, parte de la energía es reflejada. La onda refleja conserva la misma frecuencia y longitud de onda que incidente, aunque disminuye su amplitud, y por lo tanto su intensidad.”

El ángulo de incidencia de un rayo sonoro es igual al ángulo de reflexión del rayo reflejado al chocar con cualquier obstáculo, la onda reflejada actúa como si procediera de una fuente sonora virtual situada detrás del obstáculo, y a una distancia igual a la de la fuente sonora real.

- **En Antoni Carrión (1998) encontramos que:**

“Al analizar la evolución temporal del sonido reflejado en un punto cualquiera del recinto objeto de estudio, se observan básicamente dos zonas de características notablemente diferenciadas: una primera zona que engloba todas aquellas reflexiones que llegan inmediatamente después del sonido directo, y que reciben el nombre de primeras reflexiones o reflexiones tempranas (“early reflections”), y una segunda formada por reflexiones tardías que constituyen la denominada cola reverberante.”

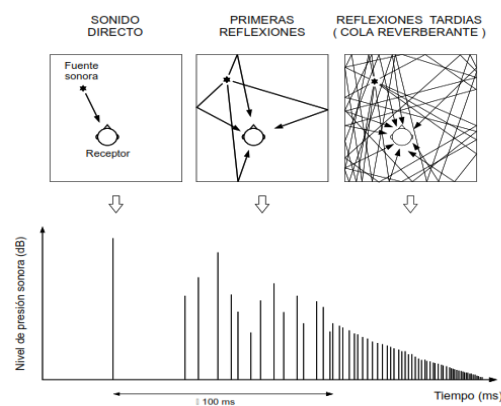


Fig.2. Eco grama asociado a un receptor con indicación del sonido directo, las primeras reflexiones y la cola reverberante.

En un recinto real, la manera más elemental de obtener dicha representación gráfica es emitiendo un sonido intenso y breve como, por ejemplo, un disparo.

2.3. Difusión del sonido

- En *Antoni Carrión (1998)* explica que:

*“La **difusión del sonido** en una sala se consigue mediante la colocación de elementos expresamente diseñados para dispersar, de forma uniforme y en múltiples direcciones, la energía sonora que incide en sobre los mismos.”*

En la figura 3 siguiente se presenta una comparación entre el efecto producido sobre una onda sonora incidente por un material absorbente, un reflector y un difusor.

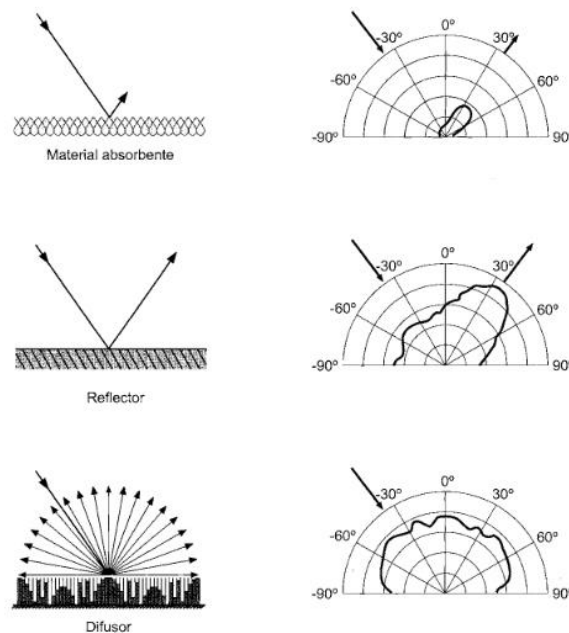


Fig. 3. Comparativa entre los efectos de absorción, reflexión especular y difusión del sonido.

De su observación se deduce lo siguiente:

- En el caso del material absorbente, la energía reflejada es la misma.

- En el caso del elemento reflector, la energía reflejada es mucho mayor y está concentrada alrededor de la dirección de reflexión especular.
- En el caso del elemento difusor, la energía reflejada es elevada y está repartida de forma uniforme en todas las direcciones de reflexión.

La difusión también es utilizada para eliminar alguna de las anomalías que pueden aparecer en tanto en recintos destinados a la palabra como en salas de conciertos. Como se verá, dichas anomalías pueden aparecer en forma de coloraciones, desplazamiento de la fuente sonora, ecos o focalizaciones del sonido.

En la figura 4 se muestra un ejemplo sencillo de difusión producida por un conjunto de pirámides construida a base de un material reflectante y dispuesto sobre una pared rígida.

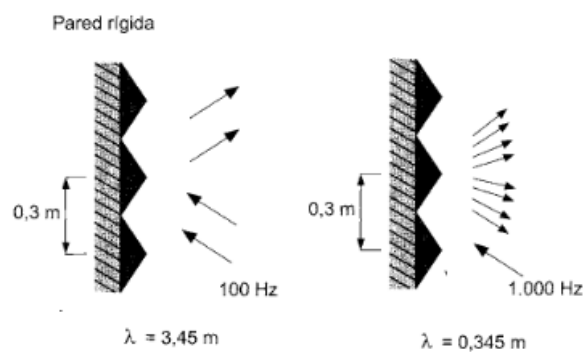


Fig. 4. Ejemplo de difusión del sonido producida por un conjunto de pirámides colocadas sobre una pared rígida.

3. ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA

La acústica arquitectónica, en este trabajo es uno de las teorías más importantes, ya que el diseño del salón está directamente relacionado con esta teoría.

3.1. Curvas NC

- *En Antoni Carrión (1998) encontramos que:*

“La evaluación objetiva del grado de molestia que un determinado ruido ambiental provoca en un oyente se realiza por comparación de los niveles de ruido existentes en un recinto, en cada banda de octava comprendida entre 63 Hz y 8 kHz, con un conjunto de **curvas de referencia denominadas NC (“Noise Criteria”).**”

Se dice que un recinto cumple una determinada especificación NC (por ejemplo: NC20) cuando los niveles de ruido de fondo, medidos en cada una de dichas bandas de octava, están por debajo de la curva NC correspondiente (Figura 5).

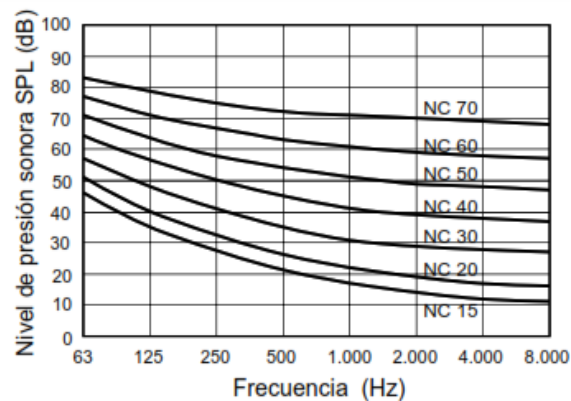


Fig.5. Curvas NC (“Noise Criteria”).

Para verificar el cumplimiento de una determinada especificación NC, es necesario analizar el ruido de fondo presente en el recinto por bandas de octava.

En la tabla 3 se muestran las curvas NC recomendadas para diferentes tipos de recintos, junto con su equivalencia en dBA.

TIPOS DE RECINTOS	CURVA NC RECOMENDADA	EQUIVALENCIA EN dBA
Estudios de grabación	15	28
Salas de conciertos y teatros	15-25	28-38
Hoteles (habitaciones individuales)	20-30	33-42
Salas de conferencias / Aulas	20-30	33-42
Despachos de oficinas / Bibliotecas	30-35	42-46
Hoteles (vestibulos y pasillos)	35-40	46-50
Restaurantes	35-40	46-50
Salas de ordenadores	35-45	46-55
Cafeterías	40-45	50-55
Polideportivos	40-50	50-60
Talleres (maquinaria ligera)	45-55	55-65
Talleres (maquinaria pesada)	50-65	60-75

Tabla 3. Curvas NC recomendadas y niveles de ruido de fondo equivalentes (en dBA).

3.2. Acústica Geométrica

- **En Antoni Carrión (1998) encontramos que:**

En general, las primeras reflexiones presentan un nivel energético mayor que las correspondientes a la cola reverberante, ya que son de orden más bajo.

Además, por el hecho de depender directamente de las formas geométricas de la sala, son específicas de cada punto y, por tanto, determinan las características acústicas propias del mismo, juntamente con el sonido directo. (Figura 6)

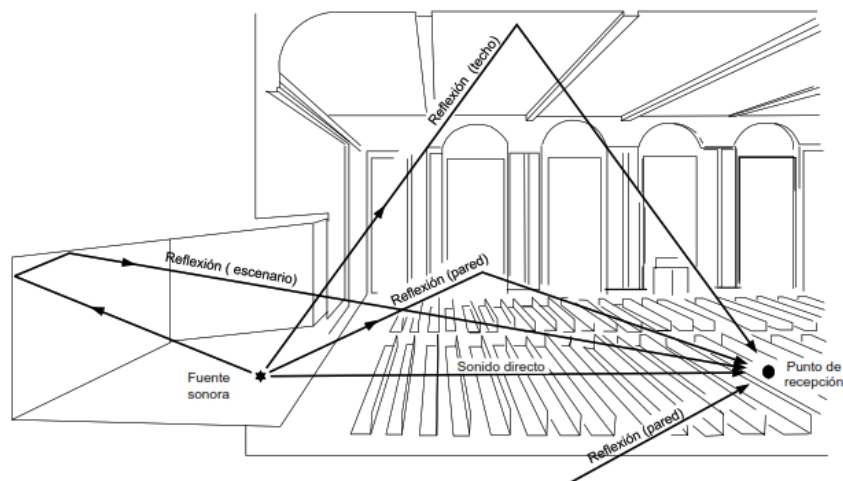


Fig.6. Ejemplo de llegada del sonido directo y de las primeras reflexiones a un receptor.

3.3. Acústica estadística

- **En Antoni Carrión (1998) explica que:**

*“Debido a que la densidad temporal de reflexiones en un punto cualquiera de un recinto cerrado aumenta de forma cuadrática con el tiempo, existe una gran concentración de dichas reflexiones en cualquier punto de recepción y, además, sus características son prácticamente iguales con independencia del punto considerado. Es por ello que el estudio de la cola reverberante se efectúa siempre mediante criterios basados en la denominada **acústica estadística**.”*

3.4. Acústica ondulatoria

- **En Antoni Carrión (1998) explica que:**

La combinación de ondas incidentes y reflejadas en una sala da lugar a interferencias constructivas y destructivas o, lo que es lo mismo, a la aparición de las denominadas ondas estacionarias o modos propios de la sala. Cada modo propio va asociado a una frecuencia, igualmente denominada propia, y está caracterizado por un nivel de presión sonora SPL que varía en función del punto considerado (figura 7).

*“El estudio analítico de los modos propios se realiza mediante la denominada **acústica ondulatoria** que, conjuntamente con la acústica geométrica y la estadística anteriormente comentadas, constituyen las tres teorías clásicas que hacen posible conocer con rigor el comportamiento del sonido en un recinto cualquiera.”*

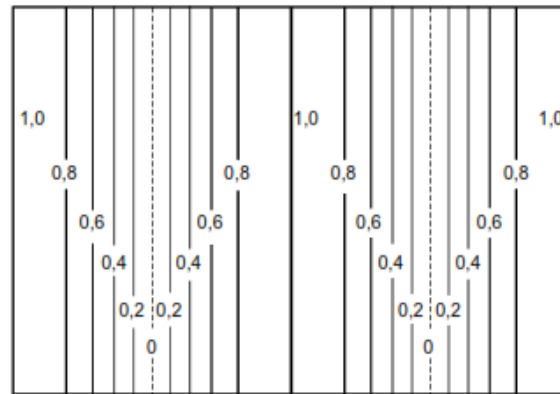


Fig. 7. Distribución de niveles SPL normalizados asociados a un modo propio de una sala.

3.4.1. Campo directo y campo reverberante.

Para este proyecto de investigación es importante conocer el campo sonoro donde se va a trabajar, es por eso preciso definir el campo directo y el campo reverberante.

- **En Miyara Federico (1999) explica que:**

*“Por **campo sonoro** se entiende el valor que adquiere la presión sonora en cada punto del espacio. A los efectos de análisis, el campo sonoro se divide en dos componentes, campo directo y campo reverberante. El **campo directo** contiene la parte del sonido que acaba de ser emitida por la fuente, y que por lo tanto aun no experimento ninguna reflexión, y el **campo reverberante**, en cambio, incluye el sonido después de la primera reflexión.”*

Una de las características de campo directo es que es bastante direccional, mientras que el campo reverberante es difuso, es decir a direccional.

3.5. Tiempo de reverberación RT

Este parámetro tiene mucha importancia para este proyecto de investigación, ya que forma parte de uno de los objetivos principales necesarios para mejorar la calidad acústica.

- **En Antoni Carrión (1998) explica que:**

“Con el fin de poder cuantificar la reverberación de un recinto, se define el **tiempo de reverberación** (de forma abreviada RT) a una frecuencia determinada como el tiempo (en segundos) que transcurre desde que el foco emisor se detiene hasta el momento en que el nivel de presión sonora SPL cae 60 dB con respecto a su valor inicial.”

3.5.1. Valores recomendados del tiempo de reverberación

- En Antoni Carrión (1998) explica que:

Habitualmente, cuando se establece un único valor recomendado de RT para un recinto dado, se suele hacer referencia al obtenido como media aritmética de los valores correspondientes a las bandas de 500 Hz y 1kHz. Se representa por **RTmid**.

TIPO DE SALA	RT _{mid} * SALA OCUPADA (EN S)
Sala de conferencias	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 4. Márgenes de valores recomendados de RTmid en función del tipo de sala (recintos ocupados).

3.5.2. Cálculo del tiempo de reverberación Sabine

La correspondiente expresión matemática, obtenida aplicando la teoría acústica estadística y despreciando el efecto de la absorción producida por el aire, es la siguiente:

$$RT = 0,161 \frac{V}{A_{\text{tot}}} \quad (\text{en segundos})$$

Donde:

V = volumen del recinto (en m³).

A_{tot} = absorción total del recinto (definida seguidamente).

3.5.3. Coeficiente de absorción

El grado de absorción del sonido de un material cualquiera se representa mediante el llamado **coeficiente de absorción α**. Se define como la relación entre la energía absorbida por dicho material y la energía incidente sobre el mismo:

$$\alpha = \frac{\text{Energía absorbida}}{\text{Energía incidente}}$$

Sus valores están comprendidos entre 0 (correspondiente a un material totalmente reflectante) y 1 (caso de absorción total). El valor de α está directamente relacionado con las propiedades físicas del material y varía con la frecuencia. En cuanto a la denominada absorción A de un material cualquiera, ésta se obtiene como resultado de multiplicar su coeficiente de absorción α por su superficie S. La unidad de absorción es el sabine (1 sabine corresponde a la absorción de 1 m² de ventana abierta).

Finalmente, y debido a que un recinto está constituido por distintas superficies recubiertas de materiales diversos, se define la **absorción total** A_{tot} como la suma de todas y cada una de las absorciones individuales, es decir:

$$A_{\text{tot}} = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n$$

3.6. Relaciones energéticas ELR (“Early to Late Ratios”)

- *En Antoni Carrión (1998) explica que:*

Con el fin de estudiar las características del sonido reflejado en una sala, así como su relación con el sonido directo, se utilizan una serie de parámetros que expresan relaciones energéticas ELR (“Early to Late Ratios”) y que dependen del tiempo. Dichos parámetros son: **C_t** y **C_x** .

Se define **C_t** como la relación entre la energía que llega a un oyente dentro de los primeros t segundos desde la llegada del sonido directo (incluye el sonido directo), y la energía que le llega con posterioridad. El **C_t** se expresa en escala logarítmica (dB), y para música se suele utilizar el valor medio de los correspondientes a las bandas de 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz:

$$C_t(t) = \frac{\text{Energía hasta el instante } t}{\text{Energía a partir del instante } t} \quad (\text{en dB})$$

El parámetro **C_{t0}** posee una diferencia con respecto de **C_t** ya que no tiene en cuenta la energía correspondiente al sonido directo. Por lo tanto, la fórmula utilizada es la siguiente:

$$C_{t0}(t) = \frac{\text{Energía hasta el instante } t \text{ (excluyendo el sonido directo)}}{\text{Energía a partir del instante } t} \quad (\text{en dB})$$

La diferencia entre las evoluciones temporales de **C_t** y **C_{t0}** da una indicación de la importancia relativa del sonido directo en un punto cualquiera de una sala. Por último tenemos **C_x** que es el equivalente teórico del valor **C_{t0}** , y corresponde al caso de un campo sonoro totalmente difuso. Entonces podemos decir que la diferencia entre **C_x** y **C_{t0}** se puede utilizarse para indicar como se difunde el sonido en la sala.

3.6.1. Claridad musical (C_{80})

- *En Antoni Carrión (1998) explica que:*

La claridad musical C_{80} indica el grado de separación entre los diferentes sonidos individuales integrantes de una composición musical. Según Cremer, el C_{80} se define como la relación entre la energía sonora que llega al oyente durante los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo y la que le llega después de los primeros 80 ms, calculada en cada banda de frecuencias entre 125 Hz y 4 kHz. El C_{80} se expresa en escala logarítmica (dB):

$$C_{80} = \frac{\text{Energía hasta 80 ms}}{\text{Energía a partir de 80 ms}} \quad (\text{en dB})$$

La elección del intervalo temporal de 80 ms se debe a que, cuando se trata de música, las reflexiones que llegan al oyente dentro de dicho intervalo son integradas por el oído junto con el sonido directo y, por tanto, contribuyen a aumentar la claridad musical. Constituyen, pues, las denominadas primeras reflexiones.

Habitualmente se utiliza el valor medio denominado “music average”:

$$C_{80} (\text{“music average”}) = \frac{C_{80} (500 \text{ Hz}) + C_{80} (1 \text{ kHz}) + C_{80} (2 \text{ kHz})}{3} \quad (\text{en dB})$$

3.7. Claridad de la Voz (C_{50})

La claridad de la voz C_{50} se define como la relación entre la energía sonora que llega al oyente durante los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo (incluye el sonido directo y las primeras reflexiones) y la que le llega después de los primeros 50 ms. Se calcula en cada banda de frecuencias entre 125 Hz y 4 kHz y se expresa en escala logarítmica:

$$C_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{0,05} p^2(t) dt}{\int_{0,05}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (\text{en dB})$$

Habitualmente se utiliza el valor medio ponderado denominado “speech average”:

$$C_{50} (\text{“speech average”}) = 0,15 \cdot C_{50} (500 \text{ Hz}) + 0,25 \cdot C_{50} (1 \text{ kHz}) + \\ + 0,35 \cdot C_{50} (2 \text{ kHz}) + 0,25 \cdot C_{50} (4 \text{ kHz}) \quad (\text{en dB})$$

3.8. Norma ISO 3382-2 Mediciones de parámetros acústicos en recintos

CONDICIONES DE MEDICIÓN

“En muchos recintos, el número de personas presentes puede influir mucho en el tiempo de reverberación. Las mediciones del tiempo de reverberación se deberían realizar en un recinto sin personas...”

EQUIPO

- **Fuente acústica**

“La fuente debería ser lo más omnidireccional posible. Para mediciones de precisión, la directividad de la fuente acústica debe cumplir los requisitos de la Norma ISO 3382-1:-, apartado A.3.1. Debe producir un nivel de presión acústica suficiente para generar curvas de decrecimiento con el rango dinámico mínimo requerido sin contaminación por ruido de fondo.”

- **Micrófonos y equipo de análisis**

“Se debe utilizar micrófonos omnidireccionales para detectar la presión acústica y la salida se puede conectar:

- *Directamente a un amplificador, un conjunto de filtros y un sistema donde se muestran las curvas de decrecimiento o un equipo de análisis que permita calcular las respuestas impulsivas; o*
 - *A un registrador de señal para un posterior análisis.”*
- **Micrófono y filtros**

“El micrófono debería ser lo más pequeño posible y tener preferiblemente un diámetro de diafragma máximo de 14mm. Se permiten micrófonos con diámetros de hasta 27mm si son del tipo respuesta en presión o del tipo respuesta en campo libre, siempre y cuando se suministren con un corrector de incidencia aleatoria. Los filtros de banda de octava o de un tercio de octava debe cumplir la Norma IEC 61260.”

- **Posiciones de medición**

“En la tabla se indican los números mínimos de posiciones de medición para obtener una cobertura adecuada en un recinto. En recintos con una geometría complicada, se deberían utilizar más posiciones de medición. Se debe escoger una distribución de posiciones de micrófono que tengan en cuenta las principales influencias susceptibles de ser el origen de las diferencias en el tiempo de reverberación a lo largo del recinto.”

	Control	Ingeniería^a	Precisión
Combinaciones fuente-micrófono	2	6	12
Posiciones de la fuente ^b	≥ 1	≥ 2	≥ 2
Posiciones de micrófono ^c	≥ 2	≥ 2	≥ 3
Número de decrecimientos en cada posición (método del ruido interrumpido)	1	2	3
^a Cuando el resultado se utiliza para un término de corrección en otras mediciones del nivel de ingeniería, solo se requiere una posición de la fuente y tres posiciones de micrófono. ^b Para el método del ruido interrumpido, se pueden utilizar simultáneamente fuentes no correlativas. ^c Para el método del ruido interrumpido y cuando el resultado se utiliza para un término de corrección, se puede utilizar una percha de micrófono rotativo en lugar de múltiples posiciones de micrófono.			

“... Las posiciones de micrófono deben estar preferiblemente separadas al menos media longitud de onda, es decir, a una distancia mínima de 2 m para el rango de frecuencia habitual. La distancia desde cualquier posición de micrófono a la superficie reflectante más cercana, incluyendo el suelo, debería ser al menos un cuarto de longitud de onda, es decir, generalmente en torno a 1m... Se debe tener en cuenta que las capturas se realizan 1.20 m del suelo...”

“Las posiciones de micrófono no deben estar muy próximas la posición de la fuente, para evitar una influencia demasiado fuerte del sonido directo.”

4. MATERIALES ACÚSTICOS

4.1. Absorbentes

- ***En Antoni Carrión (1998) explica que:***

La absorción que sufren las ondas sonoras cuando inciden sobre los distintos materiales absorbentes utilizados como revestimientos de las superficies límite del recinto, así como su dependencia en función de la frecuencia, varía considerablemente de un material a otro. Los materiales absorbentes se utilizan generalmente para conseguir uno de los siguientes objetivos:

- Obtención de los tiempos de reverberación más adecuados en función de la actividad (o actividades) a la cual se haya previsto destinar el espacio objeto de diseño.
- Prevención o eliminación de ecos.
- Reducción del nivel de campo reverberante en espacios ruidosos (restaurantes, fábricas, estaciones, etc.).

Los materiales absorbentes comerciales de este tipo se manufacturan básicamente a partir de:

- Lana de vidrio
- Lana mineral
- Espuma a base de resina de melamina
- Espuma de poliuretano



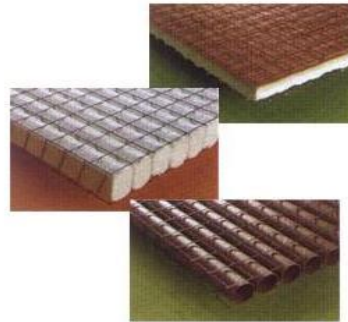
Material absorbente a base de lana de vidrio



Material absorbente a base de lana mineral



Material absorbente a base de espuma de resina de melamina



Material absorbente a base de espuma de poliuretano

Fig.8. Imagen de diferentes tipos de materiales absorbentes.

4.2. Resonadores

- *En Antoni Carrión (1998) explica que:*

Si se pretende obtener una gran absorción a frecuencias bajas con objeto de reducir sustancialmente los valores del tiempo de reverberación, es preciso hacer uso de absorbentes selectivos o **resonadores**. Se trata de elementos que presentan una curva de absorción con un valor máximo a una determinada frecuencia. Los resonadores pueden

utilizarse de forma independiente, o bien, como complemento a los materiales absorbentes.

Básicamente, existen los siguientes tipos de resonadores:

- ▶ De membrana o diafragmático
- ▶ Simple de cavidad (Helmholtz)
- ▶ Múltiple de cavidad (Helmholtz) a base de paneles perforados o ranurados
- ▶ Múltiple de cavidad (Helmholtz) a base de listones

4.2.1. Resonador de membrana o diafragmático

- *En Antoni Carrión (1998) explica que:*

Está formado por un panel de un material no poroso y flexible, como por ejemplo la madera, montado a una cierta distancia de una pared rígida con objeto de dejar una cavidad cerrada de aire entre ambas superficies.

En la figura 9 se representa un esquema básico de un resonador de membrana constituido por un panel de masa por unidad de superficie M , separado una distancia “ d ” de la pared rígida.

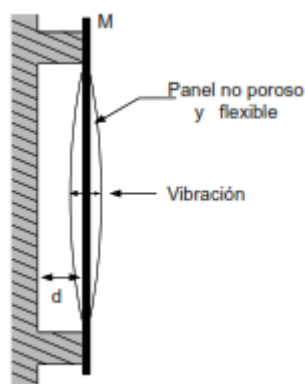


Fig.9. Esquema básico de un resonador de membrana o diafragmático

Partiendo de que, a las frecuencias de diseño generalmente bajas, se cumple que:

$$d \ll \lambda$$

Suponiendo que la onda sonora incide perpendicularmente sobre el panel, la expresión teórica para el cálculo de f_0 es la siguiente:

$$f_0 = \frac{600}{\sqrt{Md}} \quad (\text{en Hz})$$

Donde:

M = masa por unidad de superficie del panel (en Kg/m²)

d = distancia del panel a la pared rígida (en cm)

4.2.2. Resonador simple de cavidad (Helmholtz)

- *En Antoni Carrión (1998) explica que:*

Está formado por una cavidad cerrada de aire conectada a la sala a través de una abertura o cuello estrecho. En la figura 10 se muestra un esquema básico de este tipo de resonador. El volumen de la cavidad se indica por V , mientras que la sección transversal y la longitud del cuello se representan por S y L , respectivamente.

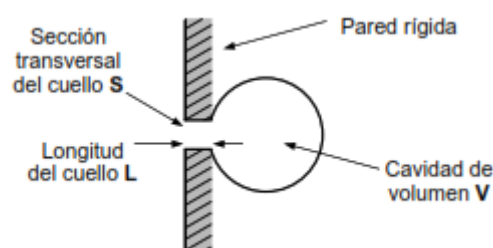


Fig.10. Esquema básico de un resonador simple de cavidad (Helmholtz) montado en una pared

Partiendo de que, a las frecuencias de diseño generalmente bajas, se cumple que:

$$L \ll \lambda$$

$$\sqrt[3]{V} \ll \lambda$$

El aire del cuello se mueve como una unidad, y constituye el elemento de masa, mientras

que el aire de la cavidad se comporta como un muelle, constituyendo el elemento de rigidez. De forma análoga al resonador de membrana, la masa del aire del cuello junto con la rigidez del aire de la cavidad da lugar a un sistema resonante que presenta un pico de absorción a la frecuencia de resonancia f_0 .

En este caso, la expresión teórica para el cálculo de f_0 es la siguiente:

$$f_0 = 5480 \sqrt{\frac{S}{LV}} \text{ (en Hz)}$$

Donde:

S = sección transversal del cuello (en cm²)

L = longitud del cuello (en cm)

V = volumen de la cavidad (en cm³).

4.2.3. Resonador múltiple de cavidad (Helmholtz) a base de paneles perforados o ranurados

- **En Antoni Carrión (1998) explica que:**

Está formado por un panel de un material no poroso y rígido de espesor D, en el que se han practicado una serie de perforaciones circulares o ranuras, montado a una cierta distancia “d” de una pared rígida, a fin de dejar una cavidad cerrada de aire entre ambas superficies.

En la figura 11 se representa un esquema básico de este tipo de resonador.

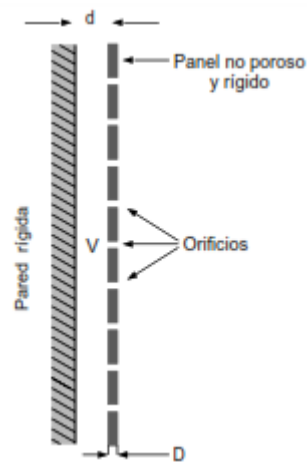


Fig.11. Esquema básico de un resonador múltiple de cavidad (Helmholtz) a base de paneles perforados o ranurados

Partiendo de la base de que, a las frecuencias de diseño normalmente bajas, se cumple que:

$$d \ll \lambda$$

El resonador múltiple de cavidad puede ser considerado de cualquiera de las siguientes maneras:

- ▶ Como un resonador de membrana en el que la masa del panel ha sido sustituida por la masa del aire contenido en cada perforación o ranura. En este caso, es precisamente dicho aire, y no el panel, el que entra en vibración cuando una onda sonora incide sobre el elemento.
- ▶ Como un conjunto de resonadores simples de Helmholtz que comparten una misma cavidad. Dicha cavidad actúa a modo de elemento acoplador entre los diferentes orificios practicados.

Los paneles perforados o ranurados integrantes de los resonadores múltiples de cavidad suelen ser de alguno de los siguientes materiales:

- madera

- cartón-yeso
- chapa metálica
- ladrillo

En las figuras 12, 13, 14 y 15 se muestran diversos resonadores comerciales que utilizan alguno de los mencionados materiales.

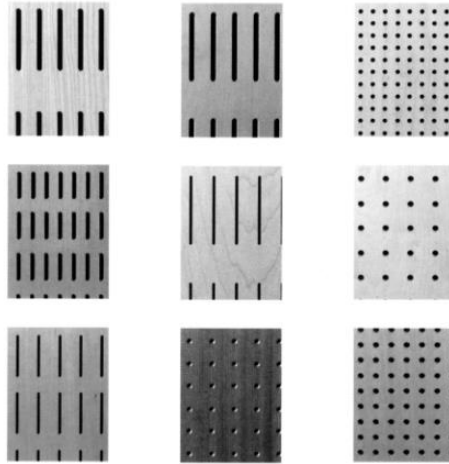


Fig.12. Resonadores a base de paneles de madera perforados y ranurados

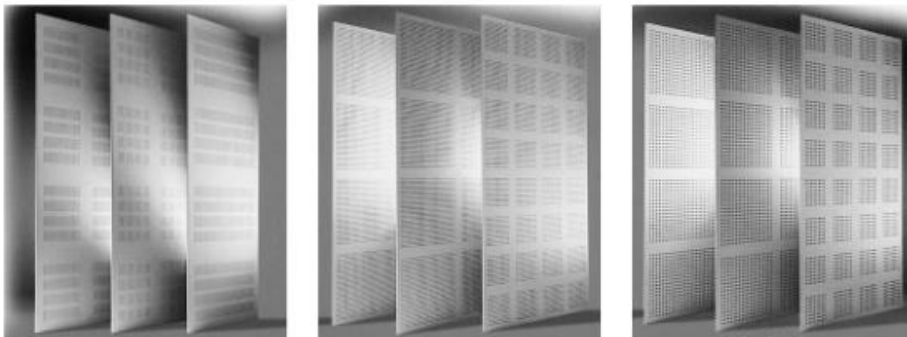


Fig.13. Resonadores a base de placas de cartón-yeso perforadas y ranuradas

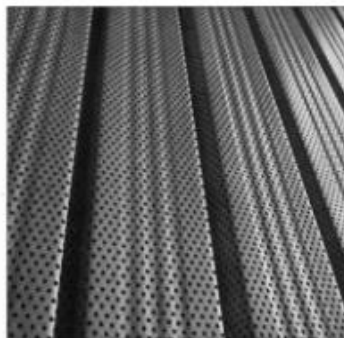


Fig.14. Resonador a base de chapa metálica nervada, prelacada y perforada



Fig.15. Resonadores a base de ladrillos perforados y ranurados

4.2.4. Resonador múltiple de cavidad (Helmholtz) a base de listones

- *En Antoni Carrión (1998) explica que:*

Está formado por un conjunto de listones de espesor D equiespaciados y montados a una cierta distancia " d " de una pared rígida con objeto de dejar interpuesta una cavidad cerrada de aire.

En la figura 16 se representa un esquema básico de este tipo de resonador.

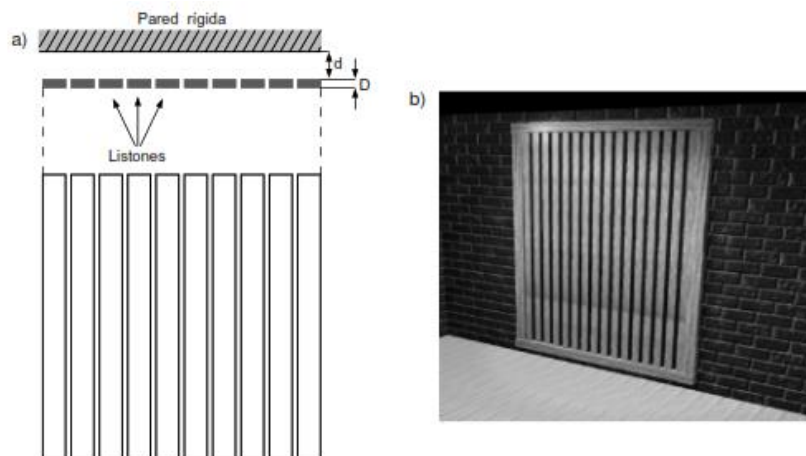


Fig.16. Resonador múltiple de cavidad (Helmholtz) a base de listones: a) esquema básico; b) imagen virtual

Este tipo de resonador es parecido al resonador múltiple a base de paneles, con la diferencia de que, en este caso, la masa que se debe considerar es la del aire contenido en los espacios intermedios entre listones.



VIII. TRABAJO DE CAMPO

INTRODUCCIÓN

Para describir este proyecto de investigación de una manera más ordenada, se dividió en tres etapas:

- Reconocimiento del recinto
- Recolección de datos
- Exposición y análisis de datos.

RECONOCIMIENTO DEL RECINTO

Primeramente, como se ha mencionado en nuestros objetivos necesitamos describir las diferentes actividades que se realizan en la Iglesia “El Buen Samaritano”. Esta información se pudo conseguir a través una entrevista que se les realizó a los coordinadores de la iglesia.

A continuación, se mencionan las actividades:

- Interpretación musical en vivo.
- Predicaciones.
- Obras de teatro y danzas.

Para realizar el diseño del acondicionamiento acústico de la Iglesia “El Buen Samaritano” fue necesario conocer las dimensiones arquitectónicas del recinto y sus condiciones acústicas actuales, por tal motivo se realizó una visita a la iglesia el día sábado 13 de mayo de 2023 a las 20:00 pm de la noche, se eligió ese día y hora ya que no se realizaba ninguna actividad en el salón, lo cual facilitó la realización de las mediciones.

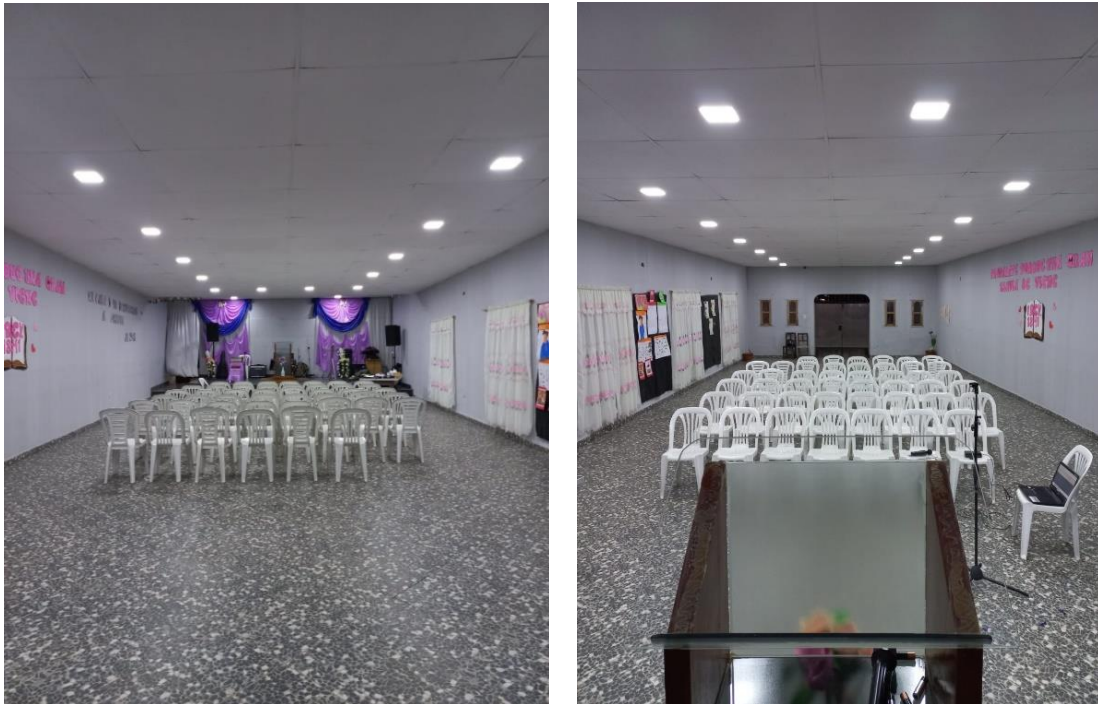


Fig. 17. Vista desde el escenario de la Iglesia "El Buen Samaritano"



Fig. 18. Vista lateral de la Iglesia "El Buen Samaritano"

RECOLECCIÓN DE DATOS

VALORES GEOMÉTRICOS

Con la ayuda de una cinta métrica y cálculos se pudo obtener las medidas de las superficies del recinto y el volumen total, que se resumen a continuación.

Altura maxima	3,50 m
Anchura maxima	8,03 m
Longitud maxima	19,90 m
Superficie total	159,80 m ²
Volumen total	559,29 m ³

Tabla 5. Valores geométricos

PLANO

Luego de haber tomado las mediciones del recinto, se logro consolidar el plano.

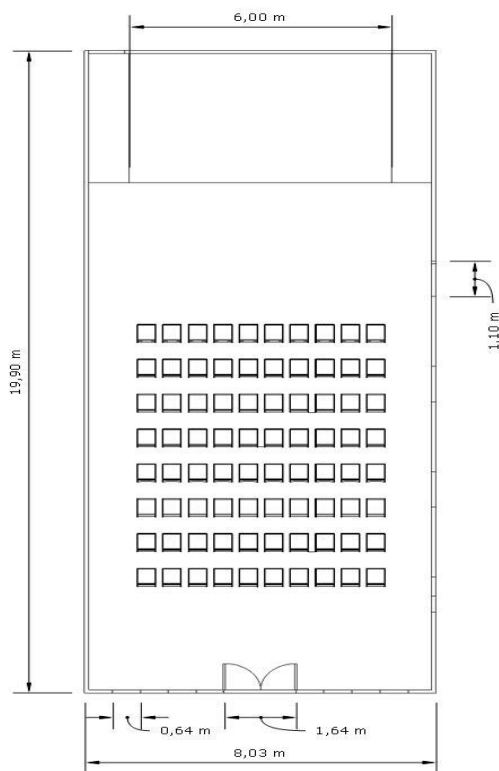


Fig. 19. Vista superior del plano

MATERIALES Y SUS COEFICIENTES DE ABSORCIÓN

Una vez realizada la virtualización del recinto, se ordenaron los datos de absorción de cada material que componen la iglesia, para luego calcular la absorción total del salón. En la Tabla 6 se pueden visualizar los materiales utilizados y su coeficiente de absorción por frecuencia.

MATERIALES	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Cielorraso de yeso	0,3	0,09	0,04	0,05	0,04	0,03
Placa de yeso en pared	0,31	0,07	0,04	0,06	0,05	0,03

Ventana de vidrio 0,5cm espesor	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
Puerta de metal	0,15	0,1	0,06	0,08	0,1	0,05
Cerámicos (piso)	0,04	0,04	0,08	0,12	0,13	0,1

Tabla 6. Materiales y sus coeficientes de absorción

MEDICIONES

Una vez en el recinto, se realizaron las mediciones acústicas, específicamente **del tiempo de reverberación, la claridad musical y la claridad de la voz**. Para esto se contó con un sonómetro (sound level meter g2 tech), una interface de audio (Behringer Umc22 Usb 48khz), un software (Room EQ Wizard) y se utilizó el método de impulso de un globo.

Las respectivas grabaciones se hicieron con el recinto desocupado, se eligieron 6 puntos diferentes de medición para poder obtener un resultado promedio de precisión, se grabó en formato WAV, a 44.1KHz y 16 bits. Se debe tener en cuenta que todas las capturas se realizaron a 1.20 metro del suelo como lo sugiere la normativa ISO 3382.

En las Figuras 20 y 21 se puede observar la simulación de las diferentes mediciones.

SIMULACIÓN DE LAS DIFERENTES TOMAS

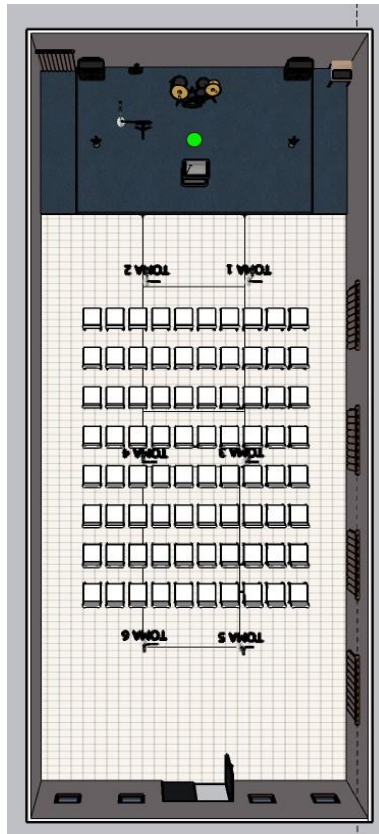


Fig.20. Vista superior de la simulación

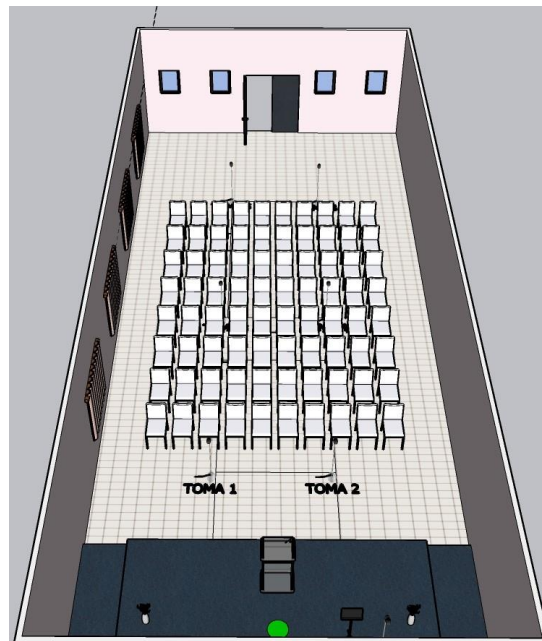


Fig.21. Vista superior con sillas de las 6 mediciones

EXPOSICIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS

A continuación, se detallan los valores de los diferentes parámetros acústicos elegidos anteriormente. Todos estos datos serán comparados con los valores óptimos correspondientes a salas destinadas a la palabra y la música.

TIEMPO DE REVERBERACIÓN

La siguiente tabla detalla los valores de TR, en las 6 bandas de frecuencia comprendidas entre 125 y 4000 Hz, estas muestras fueron recogidas desde el software Room EQ Wizard para conseguir un análisis más preciso por bandas de frecuencias.

FRECUENCIA (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
TOMA 1	1,51s	1,66s	1,90s	1,88s	1,65s	1,31s
TOMA 2	1,26s	1,70s	1,90s	1,90s	1,67s	1,33s
TOMA 3	1,36s	1,61s	1,93s	1,90s	1,69s	1,36s
TOMA 4	1,10s	1,50s	1,78s	1,91s	1,65s	1,35s
TOMA 5	1,65s	1,88s	2,01s	1,93s	1,65s	1,37s
TOMA 6	1,22s	1,70s	2,00s	1,91s	1,69s	1,37s
PROMEDIO TR	1,35s	1,67s	1,92s	1,90s	1,66s	1,35s

Tabla 7. Valores del Tiempo de reverberación

La Figura 22 corresponde al promedio de todas las mediciones analizadas de RT, este gráfico se toma como la curva de tiempo de reverberación por frecuencia inicial del recinto.



Fig. 22. Curva de las 6 mediciones del Tiempo de Reverberación

Con estos datos obtenidos se pudo realizar el cálculo del RT_{mid} :

$$RT_{mid} = \frac{RT (500 \text{ Hz}) + RT (1 \text{ kHz})}{2} \quad (\text{en s})$$

$$RT_{mid} = 1,91s$$

RT_{mid} ÓPTIMO PARA SALA POLIVALENTE: 1,2s y 1,5s

CLARIDAD DE LA VOZ C_{50}

La siguiente tabla detalla los valores de C_{50} , para las 6 bandas de frecuencia comprendidas entre 125 y 4000 Hz. Estas muestras fueron recogidas desde el software Room EQ Wizard para conseguir un análisis más preciso.

FRECUENCIA (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
TOMA 1	1,31 dB	-2,89 dB	-0,95 dB	0,93 dB	-1,35 dB	1,30 dB
TOMA 2	-1,24 dB	-2,56 dB	-2,75 dB	-0,22 dB	-0,49 dB	0,27 dB
TOMA 3	-4,12 dB	-2,86 dB	-6,36 dB	-4,16 dB	-3,22 dB	-1,47 dB
TOMA 4	-2,83 dB	-4,17 dB	-6,54 dB	-3,31 dB	-1,75 dB	-0,97 dB
TOMA 5	-7,72 dB	-4,44 dB	-2,83 dB	-3,67 dB	-3,80 dB	-2,41 dB
TOMA 6	-4,49 dB	-2,27 dB	-4,83 dB	-4,03 dB	-0,93 dB	-1,49 dB
PROMEDIO C₅₀	-3,18 dB	-3,20 dB	-4,04 dB	-2,41 dB	-1,93 dB	-0,80 dB

Tabla 8. Valores de la Claridad de la Voz

La Figura 23 corresponde al promedio de todas las mediciones analizadas de C₅₀, este gráfico se toma como la curva de la claridad de la voz por frecuencia inicial del recinto.



Fig.23. Curva de las 6 mediciones de la claridad de la voz

$$C_{50} \text{ ("speech average")} = 0,15 \cdot C_{50} (500 \text{ Hz}) + 0,25 \cdot C_{50} (1 \text{ kHz}) + \\ + 0,35 \cdot C_{50} (2 \text{ kHz}) + 0,25 \cdot C_{50} (4 \text{ kHz}) \quad (\text{en dB})$$

VALOR MEDIO PONDERADO DE C_{50} : -2,09 dB

VALOR ÓPTIMO C_{50} : ≥ 2 dB

CLARIDAD MUSICAL C_{80}

La siguiente tabla detalla los valores de C_{80} , para las 6 bandas de frecuencia comprendidas entre 125 y 4000 Hz. Estas muestras fueron recogidas desde el software Room EQ Wizard para conseguir un análisis más preciso.

FRECUENCIA (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
TOMA 1	3,44 dB	-0,35 dB	0,95 dB	2,12 dB	0,97 dB	3,87 dB
TOMA 2	1,83 dB	0,56 dB	0,83 dB	1,46 dB	1,87 dB	2,95 dB
TOMA 3	-1,21 dB	-1,28 dB	-2,88 dB	-1,13 dB	0,26 dB	2,10 dB
TOMA 4	3,42 dB	-1,56 dB	-3,23 dB	-0,69 dB	1,17 dB	2,19 dB
TOMA 5	-0,29 dB	0,46 dB	0,46 dB	0,51 dB	-0,99 dB	0,81 dB
TOMA 6	1,92 dB	0,58 dB	-0,76 dB	-0,33 dB	1,44 dB	1,24 dB
PROMEDIO C_{80}	1,52 dB	-0,26 dB	-0,77 dB	0,32 dB	0,79 dB	2,19 dB

Tabla 9. Valores de la Claridad Musical

La Figura 24 corresponde al promedio de todas las mediciones analizadas de C_{80} , este gráfico se toma como la curva de la claridad musical por frecuencia inicial del recinto.



Fig.24. Curva de las 6 mediciones de la claridad musical

$$C_{80} \text{ ("music average")} = \frac{C_{80} (500 \text{ Hz}) + C_{80} (1 \text{ kHz}) + C_{80} (2 \text{ kHz})}{3} \text{ (en dB)}$$

VALOR MEDIO DE C_{80} : 0,11dB

VALOR ÓPTIMO C_{80} : $-4 \leq C_{80} \leq 0$ dB

ABSORCIÓN TOTAL

Como ya se sabe que se optó por recoger las muestras del Tiempo de Reverberación desde el software Room EQ Wizard, se decidió implementar el cálculo de RT de Sabine para despejar la α Absorción total.

Formula de Sabine:

$$RT = 0,161 \frac{V}{A_{tot}}$$

Despejando A_{tot} :

$$A_{tot} = 0,161 \frac{V}{RT}$$

Ya conociendo los valores de V y RT , se procedió a realizar el cálculo de área equivalente de absorción sonora para las frecuencias de 125, 250, 500, 1000, 2000 y 4000Hz.

FRECUENCIA Hz	125	250	500	1000	2000	4000
α Total	66,7s	53,92s	46,90s	47,40s	54,24s	66,70s

Tabla 10. Valores de la absorción total en cada frecuencia

DISEÑO DEL ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO

Luego de un análisis detallado de las muestras obtenidas, durante la recolección de datos se pudo observar que los parámetros elegidos no se encuentran dentro de los rangos de valores recomendados.

De acuerdo a los datos recolectados en el trabajo de campo, y teniendo en cuenta el marco teórico, este recinto en cuanto a Tiempo de Reverberación (TR) se encuentra arriba de los valores recomendados, por otro lado, la Claridad de la Voz (C_{50}) se encuentra muy debajo de los valores recomendados y por último la Claridad Musical (C_{80}) se encuentra levemente por arriba del rango de valores recomendados.

Teniendo en cuenta entonces nuestra hipótesis podemos llegar a la conclusión que, efectivamente el recinto investigado requiere un diseño de acondicionamiento acústico que permita reducir las áreas reflectantes.

Para llevar a cabo el acondicionamiento acústico y poder cumplir con los valores establecidos para cada parámetro, se propuso disminuir el Tiempo de reverberación con la implementación de paneles acústicos fonoabsorbentes y resonadores en la superficie interna del recinto, la selección de estos paneles se llevó a cabo tomando referencias reales del mercado local en pro de poder llevar la propuesta a un nivel realizable y accesible para la iglesia “El Buen Samaritano”.

Teniendo en cuenta los gráficos de cada parámetro, nos vamos a central en las frecuencias de 500Hz a 4000Hz donde se ve notablemente que las curvas no se asemejan a las recomendadas. Es por eso que se buscó detalladamente materiales absorbentes que se destaquen en las frecuencias ya mencionadas.

PROPUESTAS

En cuanto a paneles fonoabsorbentes se decidió por hacerlos a medida, colocando lana de roca dentro de un marco de listones de madera, recubiertos en una tela de terciopelo. Las medidas de estos paneles son de 1,20 m de alto, 0,80 m de ancho y 0,050 m de profundidad. Se eligió lana de roca como material fonoabsorbente ya que tiene un alto índice de absorción acústica en las frecuencias 500Hz a 4000Hz, además cuenta con la ventaja de ser atóxico, de no oxidarse ni pudrirse. Estos paneles fueron diseñados con el propósito de reducir el Tiempo de Reverberación y mejorar la calidad acústica del salón.

A continuación se detalla cuanta absorción α aportan los paneles fonoabsorbentes, esta información fue extraída de la página del fabricante de lana de roca.

FRECUENCIA (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Coefficientes de absorción panel acústico armado	0,31s	0,68s	1,14s	1,13s	1,06s	1,07s

Tabla 11. Coeficientes de absorción por frecuencias del panel acústico

También se decidió utilizar resonadores de membrana para lograr una buena performance de absorción en bajas frecuencias, especialmente 125Hz y 250Hz. Se diseñó resonadores contruidos en madera MDF de 3mm de espesor, sus medidas son de 1 m de alto, 1 m de ancho y 0,080 m de profundidad, colocando lana de roca en su interior de 0,040m de espesor. Las medidas de estos resonadores fueron calculadas teniendo en cuenta sus superficies, la frecuencia a tratar y el espesor de la madera MDF.

FRECUENCIA (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Coefficientes de absorción panel resonador de membrana	0,90s	1s	0,65s	0,60s	0,30s	0,15s

Tabla 12. Coeficientes de absorción por frecuencias del panel resonador de membrana

En la siguiente tabla se puede apreciar las dimensiones de los diferentes paneles utilizados.

PANELES SELECCIONADOS	Profundidad	Alto	Ancho
Panel acústico armado	0,05m	1,20m	0,80 m
Panel acústico resonador	0,08m	1m	1m

Tabla 13. Dimensiones de los materiales absorbentes

GRÁFICOS DEL DISEÑO ACÚSTICO

Luego de un análisis detallado de las muestras obtenidas y de haber seleccionado los materiales acústicos adecuados, a continuación se expone gráficamente el recinto sin tratamiento y luego con tratamiento, a través del software SketchUp.



Fig.25. Vista general del recinto desde el escenario sin tratamiento

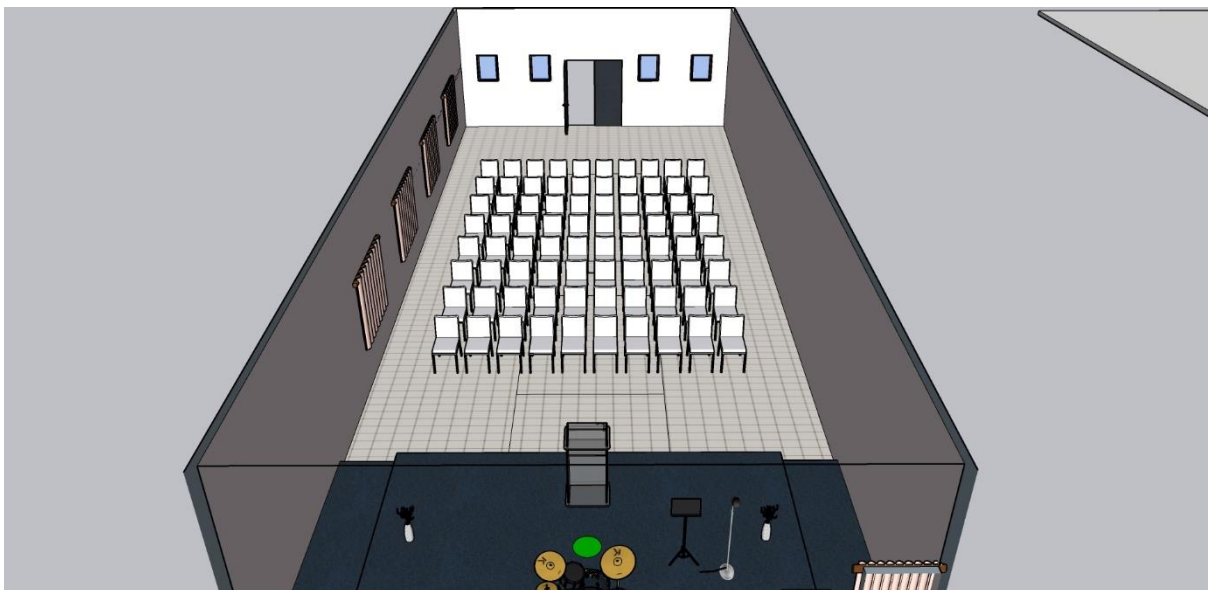


Fig.26. Vista superior trasera del recinto sin tratamiento

En los siguientes gráficos se presenta un diseño de acondicionamiento acústico que resultaría conveniente para la disminución del tiempo de reverberación y de esta forma mejorar claridad de la voz y la claridad musical.

Para lograr calcular las cantidades de paneles fonoabsorbentes y resonadores de membrana se tuvo en cuenta sus superficies y sus coeficientes de α absorción en cada frecuencia.

$$A_{tot} = (\alpha_{mid} * (S_{total} - S_{panel})) + (\alpha_{panel} * S_{panel})$$

Para tener una buena respuesta en frecuencias de 250Hz a 3000Hz, rango donde se encuentra la voz humana, se calculó 21 paneles fonoabsorbentes que se distribuyen en ambas paredes laterales.

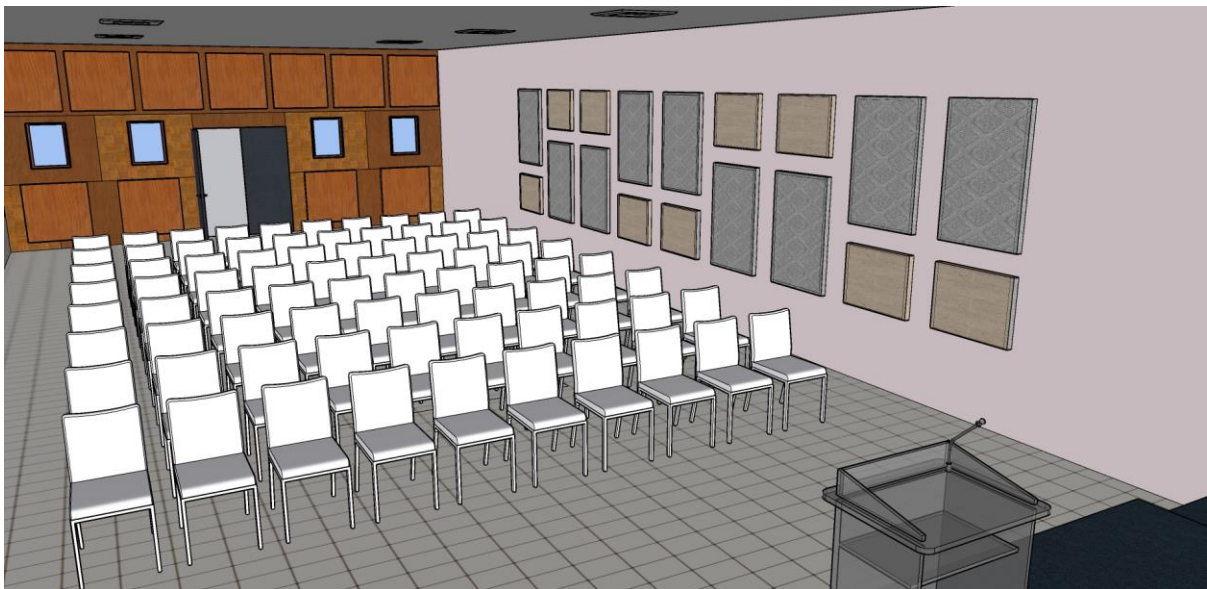


Fig.27. Vista de la pared lateral derecha desde la esquina superior izquierda.



Fig.28. Vista de la pared lateral izquierda desde la esquina superior derecha.

También se colocaron resonadores de membranas en la parte superior e inferior de la pared trasera del recinto, estos resonadores se complementan con los paneles fonoabsorbentes, ya que estos poseen un alto coeficiente de absorción en bajas frecuencias, mientras que los fonoabsorbentes se destacan en las frecuencias medias y altas.

Teniendo en cuenta las frecuencias a tratar, la superficie y la absorción de los resonadores, se obtuvo que lo recomendable para este recinto son 11 resonadores de membranas, los cuales fueron colocados en la pared trasera de forma estratégica.

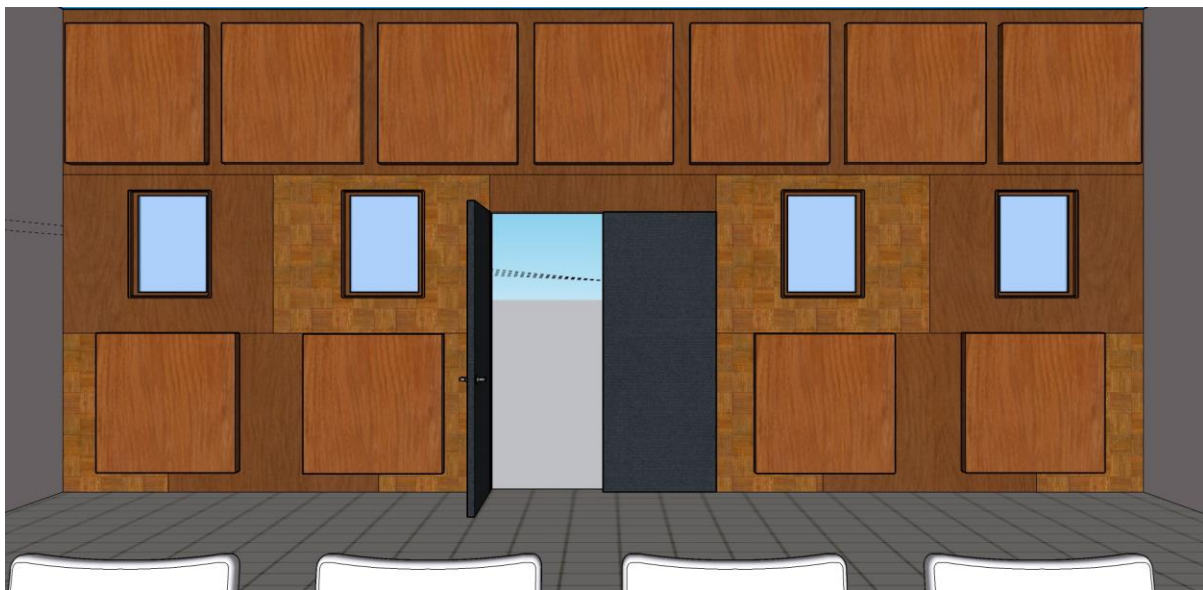


Fig.29. Vista de la pared trasera con los resonadores de membrana colocados

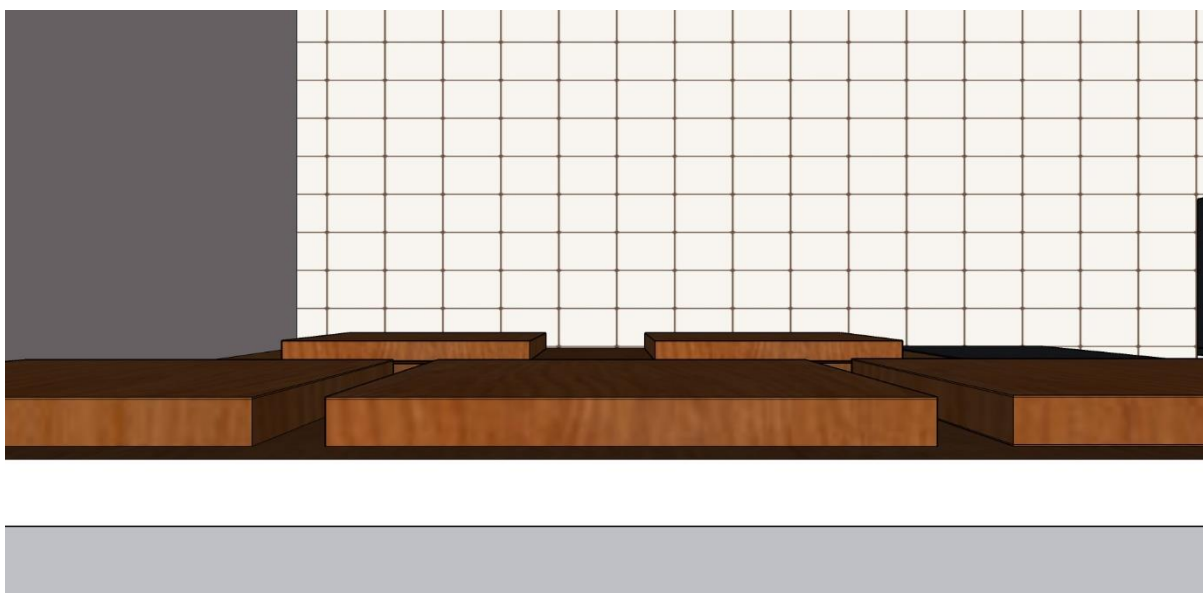


Fig.30. Vista superior de los resonadores de membrana



Fig.31. Vista de la pared trasera superior.



Fig.32. Vista de la pared trasera inferior.

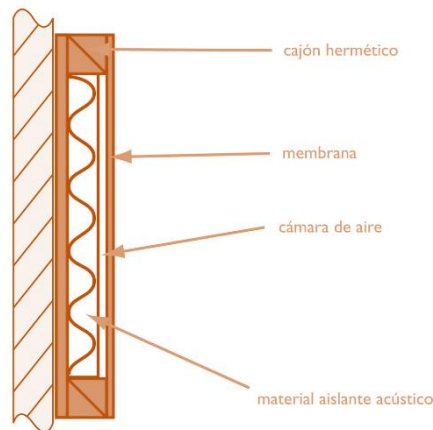


Fig.33. Ejemplo del resonador de membrana

Como podemos ver se trata prácticamente de un cajón de madera con una membrana de madera relativamente fina y cerrada herméticamente. En el interior se encuentra el material aislante colocado de forma mullida y suelta. La membrana entra en vibración debido a la presión sonora a la que es sometida, con ello se produce energía dentro del campo sonoro. El volumen del aire en el interior se pone en movimiento y se desprende de la energía producida a través de la fricción con el material aislante. El material aislante tiene la función de amortiguar la vibración de la membrana hasta un punto de efecto de banda ancha sin que retumbe el absorbente.

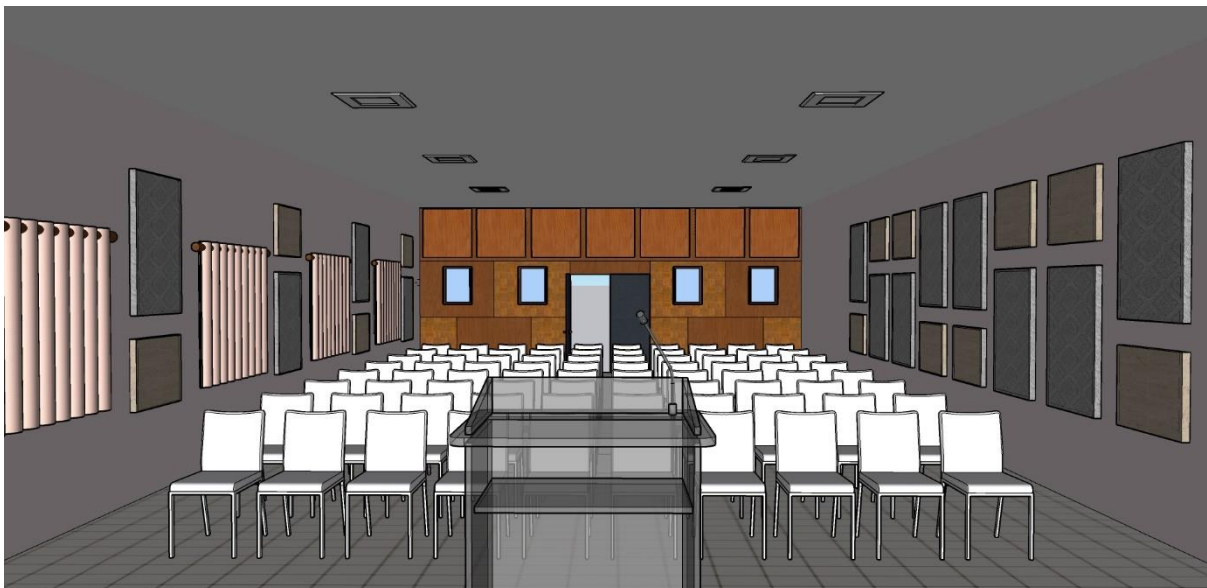


Fig.34. Vista general del recinto desde el escenario con tratamiento acústico

RESULTADOS

Los valores del Tiempo de Reverberación inicialmente eran considerados elevados para el uso específico que se busca dar al recinto, sin embargo, la incorporación de materiales absorbentes permitió no solo reducir el tiempo de reverberación considerablemente, sino también mejorar la claridad musical y la claridad de la voz.

En el siguiente grafico se exponen los efectos del acondicionamiento acústico en el recinto, comparando los valores de TR sin tratamiento y TR con tratamiento.

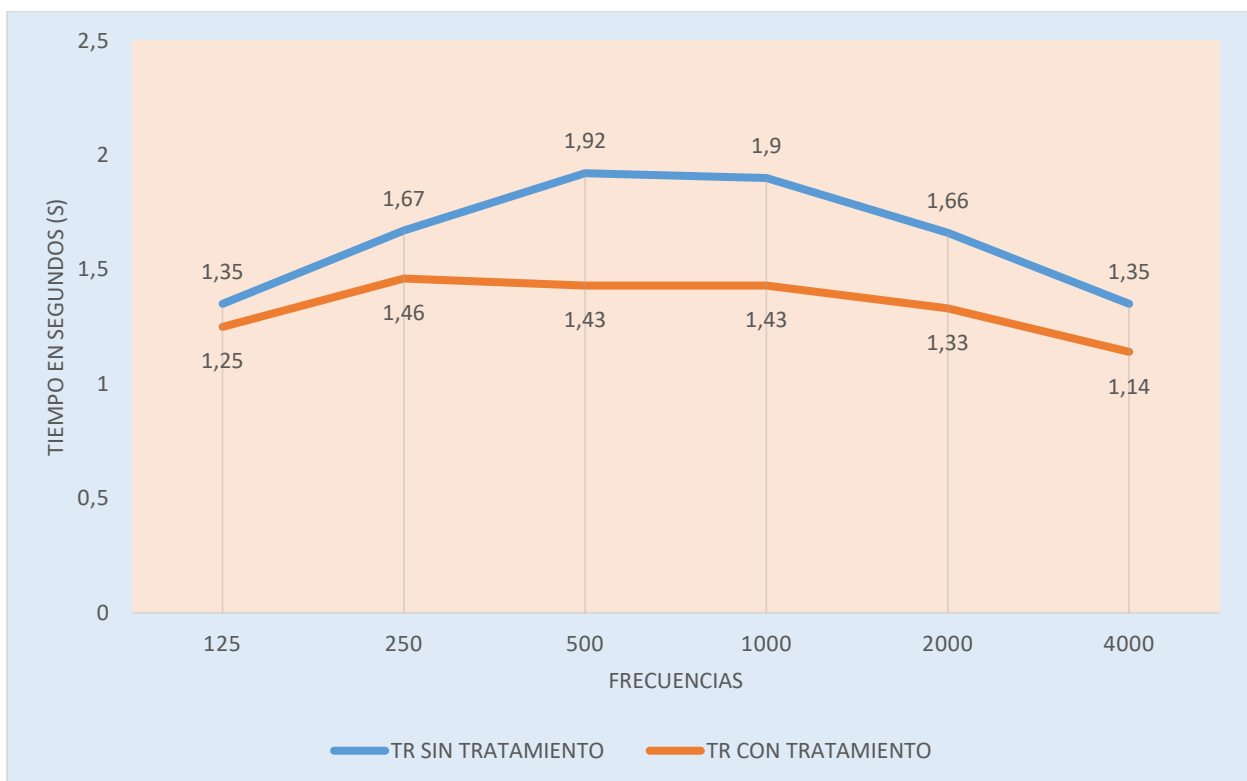


Fig.35. Curvas del tiempo de reverberación sin tratamiento y con tratamiento

FRECUENCIA Hz	125	250	500	1000	2000	4000
TR sin tratamiento	1,35s	1,67s	1,92s	1,90s	1,66s	1,35s

Tabla 14. Valores del tiempo de reverberación sin tratamiento

FRECUENCIA Hz	125	250	500	1000	2000	4000
TR con tratamiento	1,25s	1,46s	1,43s	1,43s	1,33s	1,14s

Tabla 15. Valores del tiempo de reverberación con tratamiento

CONCLUSIÓN

Como se pudo observar en el grafico anterior, con la implementación del tratamiento acústico propuesto se logró reducir el Tiempo de Reverberación a 1,40 segundos, cuyo valor se acerca considerablemente a los valores recomendados para este tipo de recinto. En lo que respecta a claridad de voz y la claridad musical, al reducir el tiempo de reverberación estos dos parámetros también se acercan a sus valores recomendados, permitiendo corroborar la hipótesis del proyecto de investigación. Por otro lado, los objetivos planteados fueron realizados satisfactoriamente.

El acondicionamiento acústico nos permitió reducir las áreas reflectantes, disminuir gran parte de los ecos contraproducentes para una buena inteligibilidad de la palabra e interpretación musical.

ANEXO

HERRAMIENTAS

REW Room EQ Wizard es un software gratuito para la medición acústica de salas, de altavoces y la medición de dispositivos de audio. Genera señales de prueba de audios; mide SPL e impedancia; respuestas de frecuencia e impulso; genera gráficos de analizador en tiempo real (RTA); calcula los tiempos de reverberación; y los parámetros C_{50} y C_{80} .

Lo utilizamos para realizar 6 tomas en el recinto, logrando obtener los valores iniciales de TR, C_{50} y C_{80} de la sala.

A continuación se enseñaran las diferentes capturas que se obtuvo del software REW.

TIEMPO DE REVERBERACIÓN

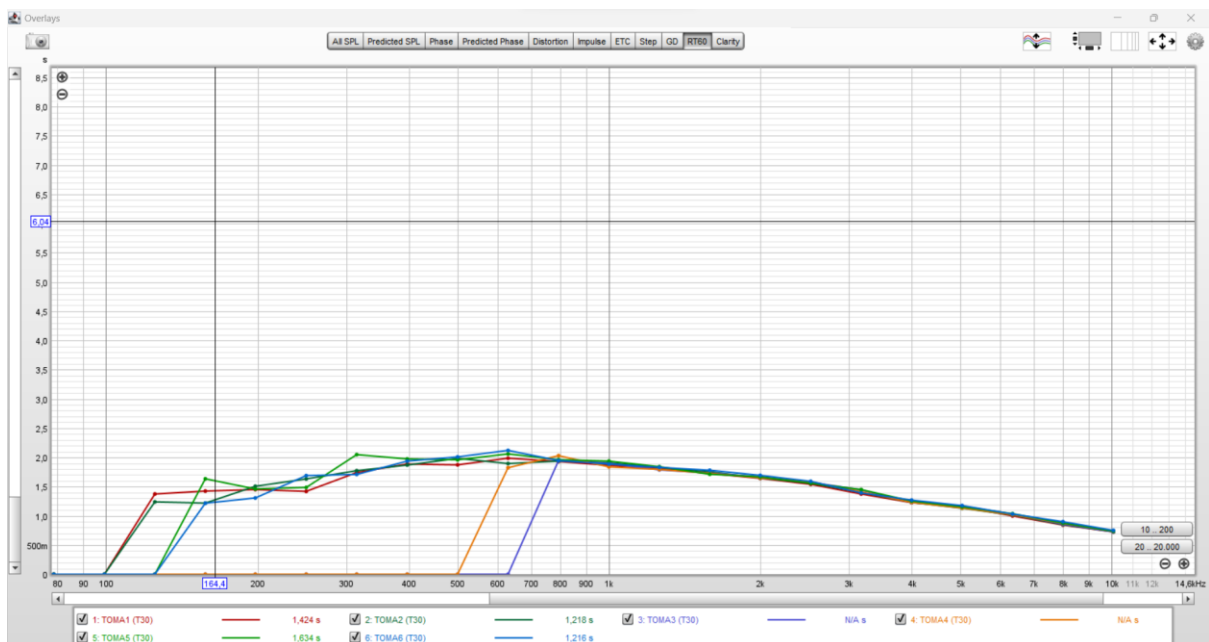


Fig. 36. Gráfico de las 6 mediciones del Tiempo de Reverberación del software REW.

CLARIDAD MUSICAL

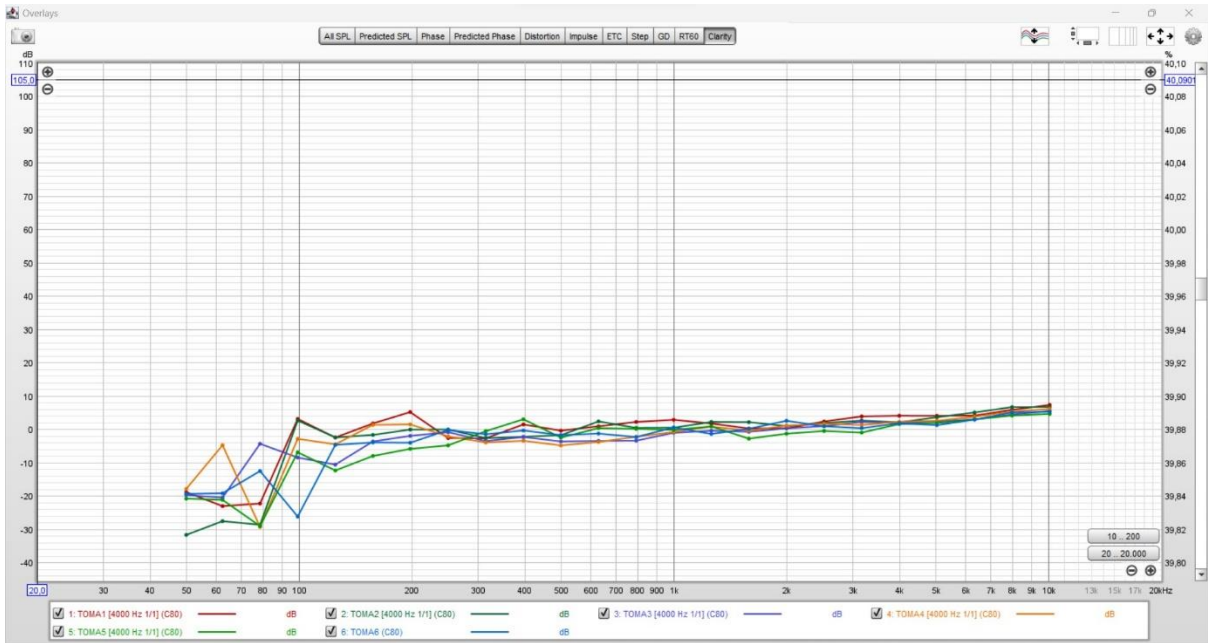


Fig. 37. Gráfico de las 6 mediciones de la Claridad Musical del software REW.

CLARIDAD DE LA VOZ

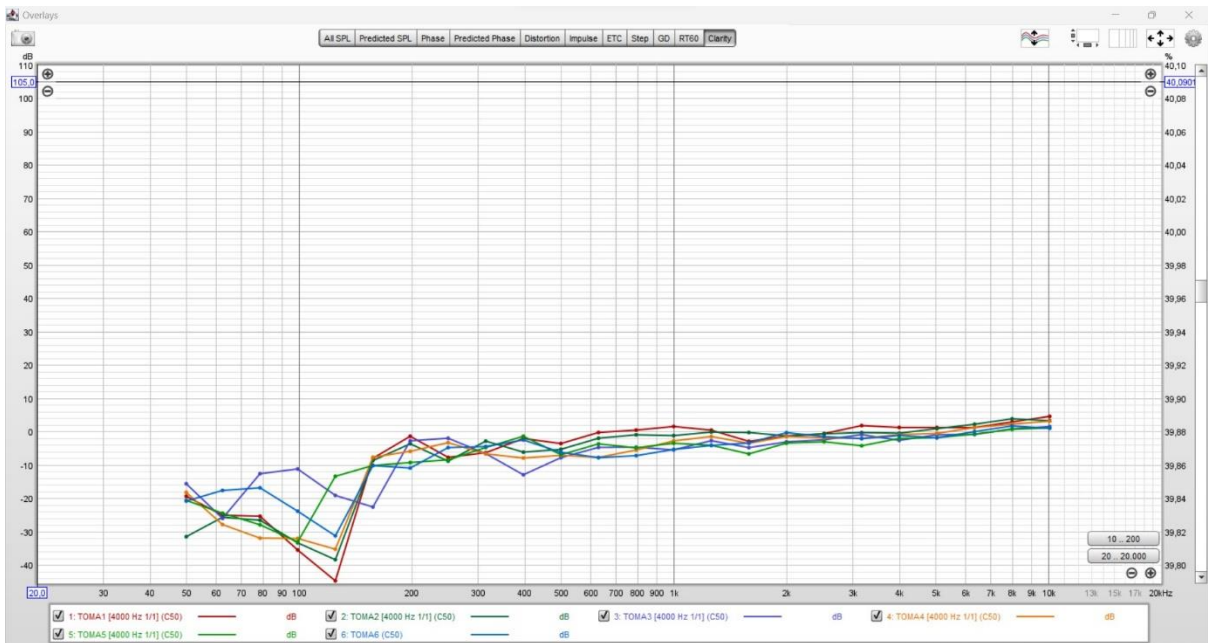


Fig. 38. Gráfico de las 6 mediciones de la Claridad de la Voz del software REW.

IMPULSO



Fig. 39. Gráfico de las 6 mediciones teniendo en cuenta el Impulso del software REW.

DECAIMIENTO ESPECTRAL

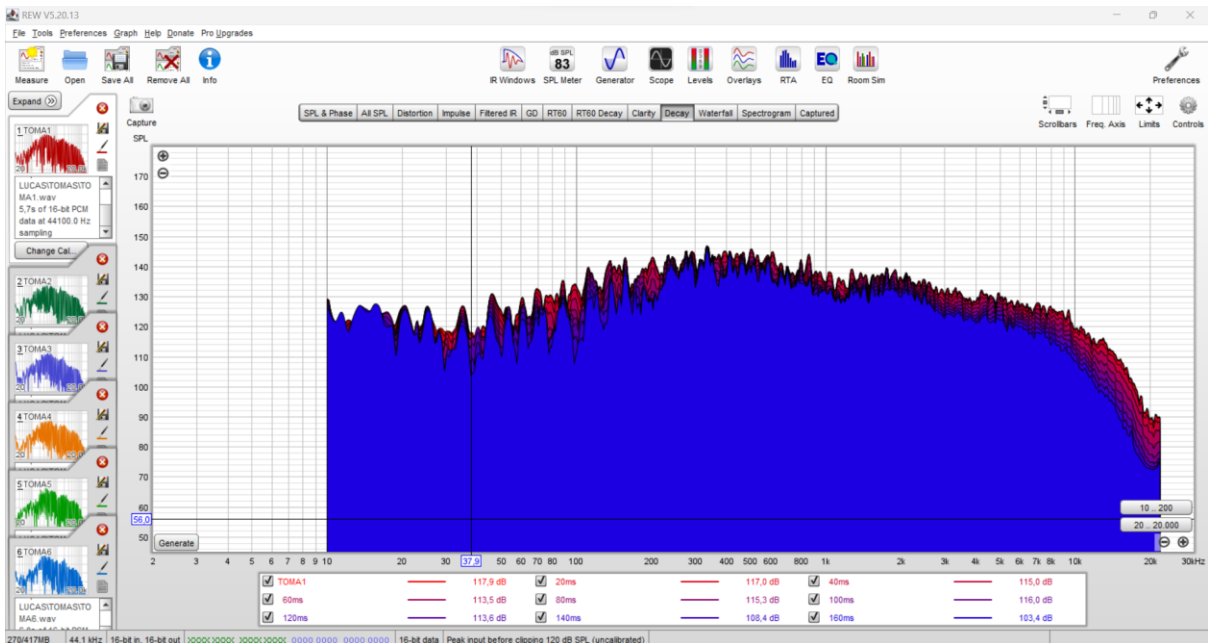


Fig. 40. Gráfico del decaimiento espectral de la toma 1 del software REW.

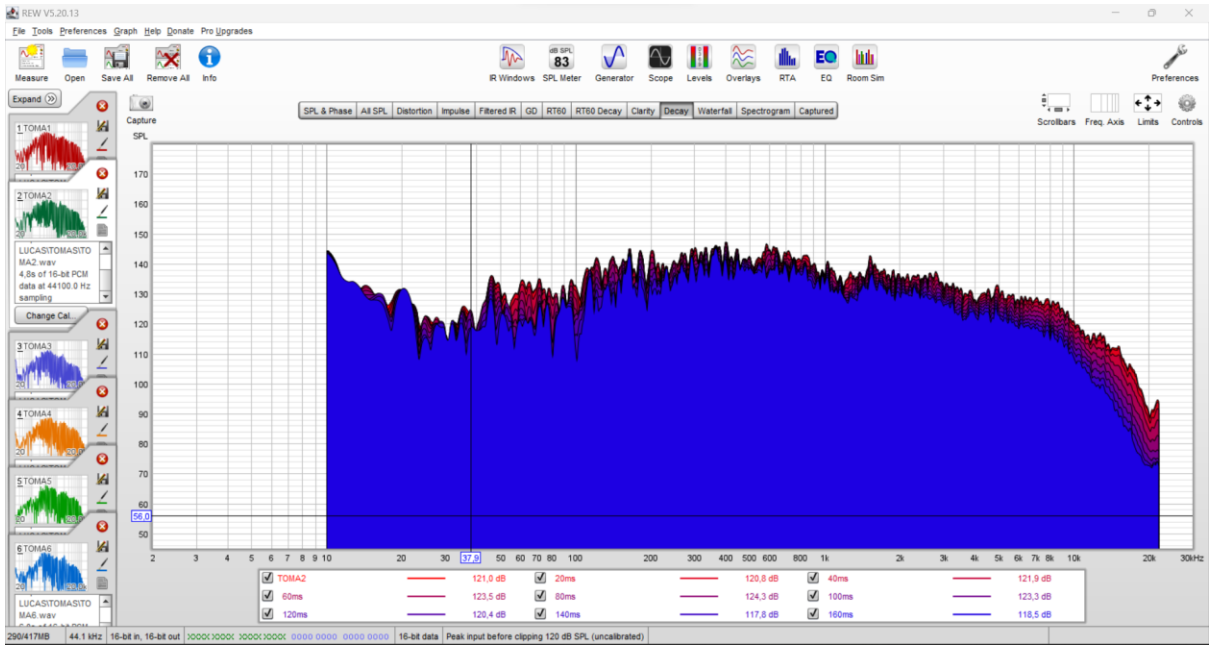


Fig. 42. Gráfico del decaimiento espectral de la toma 2 del software REW.

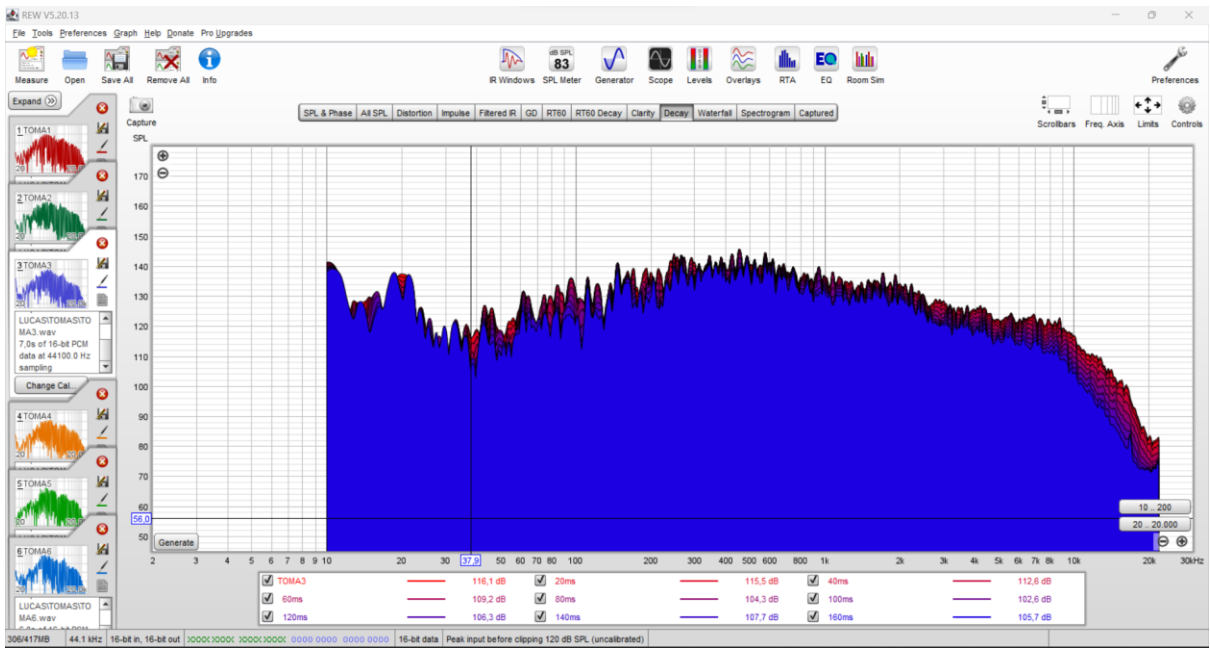


Fig. 43. Gráfico del decaimiento espectral de la toma 2 del software REW.

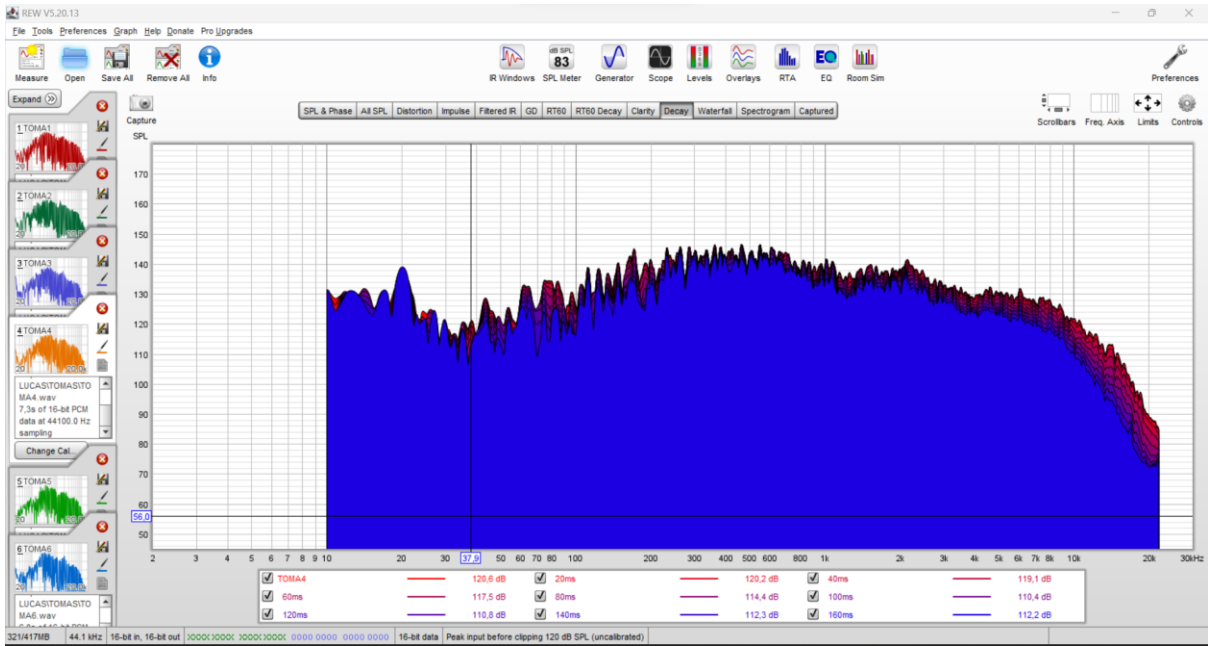


Fig. 44. Gráfico del decaimiento espectral de la toma 4 del software REW.

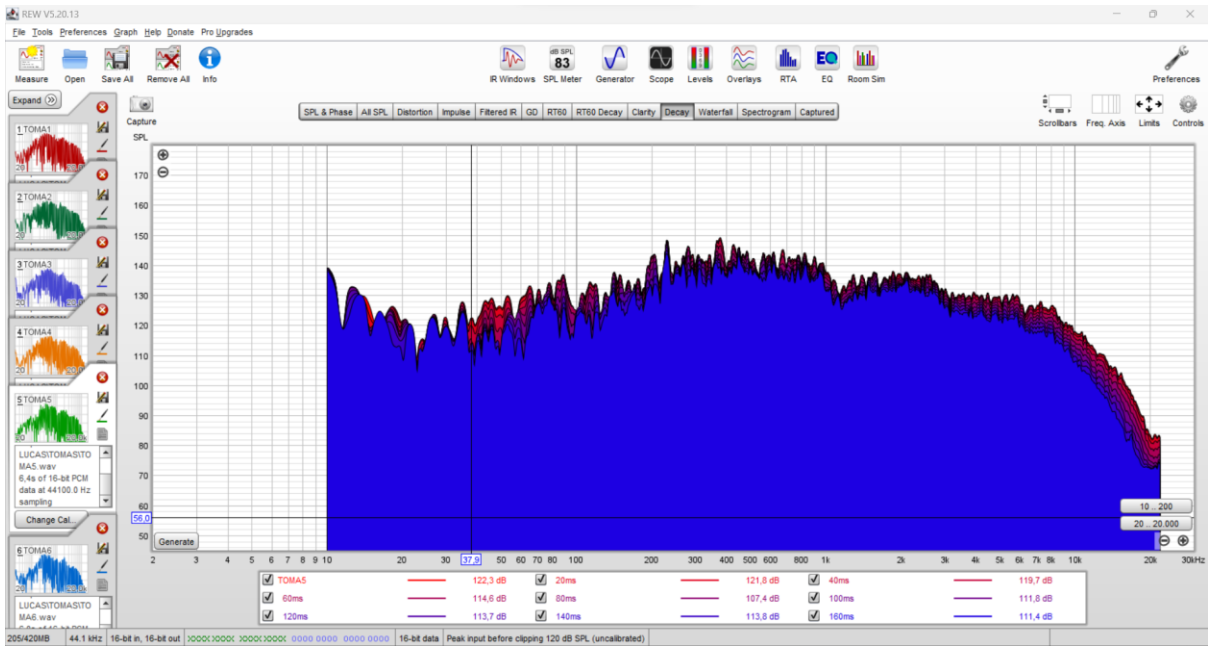


Fig. 45. Gráfico del decaimiento espectral de la toma 5 del software REW.

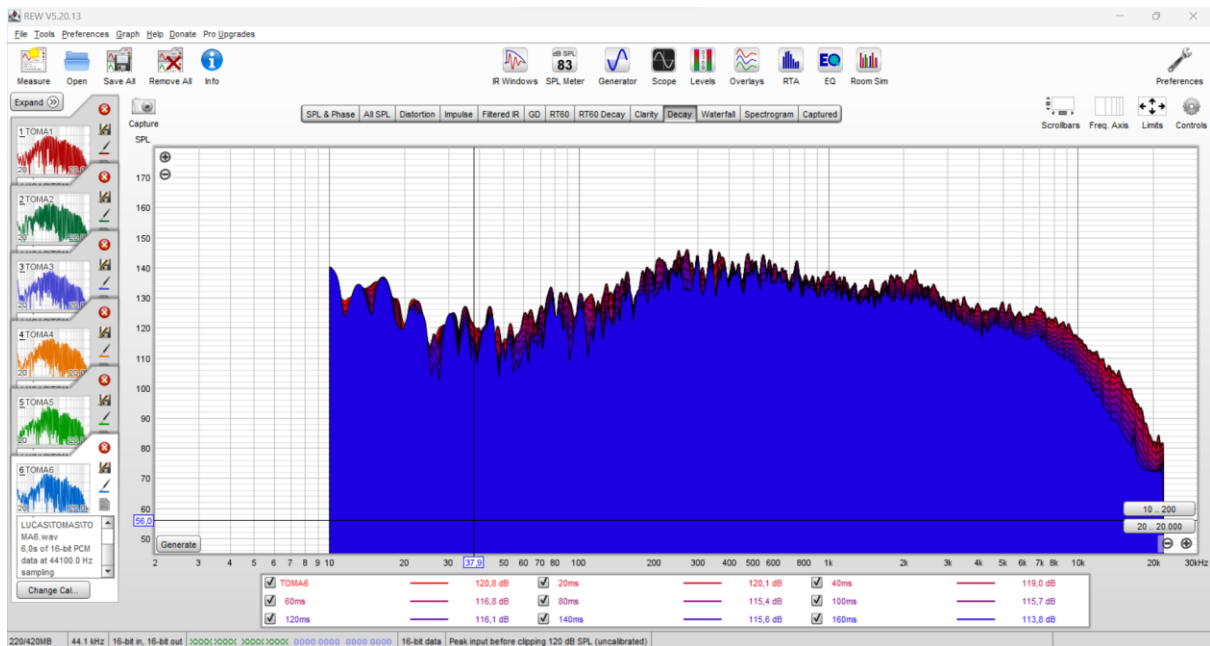


Fig. 46. Gráfico del decaimiento espectral de la toma 6 del software REW.

SketchUp

Es un software de diseño que permite crear modelos en tres dimensiones.

En este caso, lo empleamos para el modelado del recinto, a partir de las medidas obtenidas, y para simular la ubicación de los paneles y resonadores.

Excel

Es un programa informático, con funciones pre programadas que permiten hacer un seguimiento de datos mediante sus celdas.

En este proyecto de investigación se lo utilizó para elaborar tablas y gráficos de representación, para lograr ordenar y comparar los valores obtenidos en las mediciones.

FRECUENCIAS	TR SIN TRATAMIENTO	TR CON TRATAMIENTO
125	1,35	1,25
250	1,67	1,46
500	1,92	1,43
1000	1,9	1,43
2000	1,66	1,33
4000	1,35	1,14
TR promedio	1,79	1,4

Fig. 47. Tabla comparativa en Excel de TR con y sin tratamiento.

FRECUENCIA (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
TOMA 1	1,51s	1,66s	1,9s	1,88s	1,65s	1,31s
TOMA 2	1,26s	1,7s	1,9s	1,9s	1,67s	1,33s
TOMA 3	1,36s	1,61s	1,93s	1,9s	1,69s	1,36s
TOMA 4	1,1s	1,5s	1,78s	1,91s	1,65s	1,35s
TOMA 5	1,65s	1,88s	2,01s	1,93s	1,65s	1,37s
TOMA 6	1,22s	1,7s	2s	1,91s	1,69s	1,37s

Fig. 48. Tabla de TR en Excel.

FRECUENCIA (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
TOMA 1	1,31dB	-2,89dB	-0,95dB	0,93dB	-1,35dB	1,3dB
TOMA 2	-1,24dB	-2,56dB	-2,75dB	-0,22dB	-0,49dB	0,27dB
TOMA 3	-4,12dB	-2,86dB	-6,36dB	-4,16dB	-3,22dB	-1,47dB
TOMA 4	-2,83dB	-4,17dB	-6,54dB	-3,31dB	-1,75dB	-0,97dB
TOMA 5	-7,72dB	-4,44dB	-2,83dB	-3,67dB	-3,8dB	-2,47dB
TOMA 6	-4,49dB	-2,27dB	-4,83dB	-4,03dB	-0,93dB	-1,49dB

Fig. 49. Tabla de C₅₀ en Excel.

FRECUENCIA (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
TOMA 1	3,44dB	-0,35dB	0,95dB	2,12dB	0,97dB	3,87dB
TOMA 2	1,83dB	0,56dB	0,83dB	1,46dB	1,87dB	2,95dB
TOMA 3	-1,21dB	-1,28dB	-2,88dB	-1,13dB	0,26dB	2,1dB
TOMA 4	3,42dB	-1,56dB	-3,23dB	-0,69dB	1,17dB	2,19dB
TOMA 5	-0,29dB	0,46dB	0,46dB	0,51dB	-0,99dB	0,81dB
TOMA 6	1,92dB	0,58dB	-0,76dB	-0,33dB	1,44dB	1,24dB

Fig. 50. Tabla de C₈₀ en Excel.

FRECUENCIA (Hz)	RT	A total	α mid. sin panel	α panel	Sup. panel
125	1,4s	64,35s	0,41s	0,3s	20m ²

250	1,5s	60,17s	0,33s	0,65s	20m ²
500	1,43s	62,83s	0,29s	1,09s	20m ²
1000	1,43s	63,06s	0,3s	1,08s	20m ²
2000	1,33s	67,85s	0,34s	1,02s	20m ²
4000	1,14s	78,96s	0,42s	1,03s	20m ²

Fig. 51. Tabla en Excel para calcular el Tiempo de Reverberación con los paneles fonoabsorbentes.

FRECUENCIA (Hz)	RT	A total	α mid. sin panel	α panel	Sup. panel
125	1,25s	72s	0,42s	0,9s	11m ²
250	1,46s	61,2s	0,33s	1s	11m ²

Fig. 52. Tabla en Excel para calcular el Tiempo de Reverberación con los resonadores de membrana.

ELEMENTO	TERMINACIÓN	Sup.m ²	125	250	500	1000	2000	4000
α panel fonoabsorbente	lana de roca	0,96	0,31	0,68	1,14	1,13	1,06	1,07
		1,20mx0,80m	0,2976	0,6528	1,0944	1,0848	1,0176	1,0272

Fig. 53. Tabla en Excel del coeficiente de absorción por frecuencias de los paneles fonoabsorbentes.

ELEMENTO	TERMINACIÓN	Sup.m ²	125	250	500	1000	2000	4000
α resonador de membrana	mdf	1	0,9	1	0,65	0,6	0,3	0,15
		1mx1m	0,9	1	0,65	0,6	0,3	0,15

Fig. 54. Tabla en Excel del coeficiente de absorción por frecuencias de los resonadores de membrana.

Calcular la profundidad del panel

Ancho de panel : cm

Altura de los paneles: cm

Peso de la placa: Kg

La frecuencia del panel debe ser: Hz

La profundidad del panel es cm

El área del panel es metro²

Un panel fijo con cavidad oculta tiene su frecuencia natural en Hz

Una cavidad fija y oculta en un panel llena de absorbentes tiene una frecuencia esperada en Hz

Fig. 55. Cálculo de la profundidad del resonador de membrana teniendo en cuenta su superficie y la frecuencia a tratar.

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

1. Elaboración del Tema y Pregunta de Investigación. Redacción de la fundamentación completa del proyecto. (1 mes)
2. Consulta y lectura del Estado de Arte. Extracción de aportes del Estado de Arte. (1 mes).
3. Revisión de bibliografía para el Marco Teórico. Realización del Marco Teórico. Citado y referenciado del Marco Teórico. (2 meses).
4. Elaboración de nuevas preguntas para determinar Objetivos. Enumeración de Objetivo General y Objetivos Específicos. (1 mes).
5. Deducción de la Hipótesis de la investigación. Definición y operacionalización de las Variables. (2 meses).
6. Consulta bibliográfica para el Marco Metodológico. Realización del Marco Metodológico. Citado y referenciado del Marco Metodológico. Determinación de Alcances y Limitaciones de la Investigación. Presentación de Borrador. (1mes).
7. Trabajo de campo. (1 mes)
8. Triangulación de teoría, datos obtenidos y análisis de los mismos. Redacción de Conclusiones. Anexos gráficos necesarios. Tesis final para defensa. (2 meses).

BIBLIOGRAFÍAS

- Beranek Leo (1969), ***“Acústica”***, Segunda edición, Editorial Hispano Americana S.A.
- Carrión Antonio (1998), ***“Diseño acústico de espacios arquitectónicos”*** Edición UPC, España.
- Higini Arau (2007), ***“ABC de la acústica arquitectónica”***. Barcelona 2007.
- Harris. C.M. (1995) ***“Manual de medidas acústicas y control de ruido”***. Tercera edición. Madrid, McGraw-Hill.
- Mirian Balestrini A. (2006). ***“Como se elabora el proyecto de Investigación”***.
- Miyara Federico (1999), ***“Acústica y Sistema de sonido”***, UNR Editorial, Argentina.
- Sampieri Hernández, Roberto (2006), ***“Metodología de la Investigación”***. México, McGraw-Hill,pp.
- Sampieri Hernandez, Roberto (1991), ***“Metodología de la Investigación”***, 1991, respecto a la primera edición por McGRAW - HILL INTERAMERICANA DE MÉXICO, S.A. de C.V.
- Sautu Ruth (2005). ***“Manual de metodología: construcción del marco teórico, formulación de os objetivos y elección de la metodología”*** - 1a ed. • Buenos Aires: Consejo Latinoamericano de Ciencias Sociales ·CLACSO, 2005.
- Yuni, J. y Urbano C. (2006). ***“Técnicas para investigar: Recursos metodológicos para la preparación de proyectos de investigación”***, (volumen 1), (Edición 2). Córdoba: Editorial Brujas.
- Yuni, J. y Urbano C. (2006). ***“Técnicas para investigar: Recursos metodológicos para la preparación de proyectos de investigación”***, (volumen 2), (Edición 2). Córdoba: Editorial Brujas.
- Norma Europea en ISO 3382-2 (2008) parte 2: ***“Tiempo de reverberación en recintos ordinarios”***.

HOJA DE EVALUACIÓN


UCASAL

Facultad de Artes y Ciencias

Carrera: Licenciatura en Imagen y Sonido

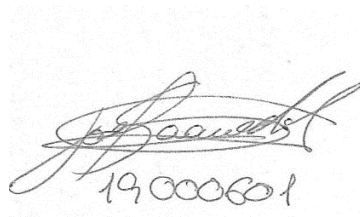
Tema: Propuesta de diseño para el acondicionamiento acústico en la iglesia evangélica “El Buen Samaritano”

Alumno: Lucas Navarro



37602910

Director: Saavedra Arce José Alberto



19000601

Evaluación:

Observaciones: