

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

Metodología para el análisis y mejoramiento de la grabación del saxofón con relación a los parámetros acústicos de una sala en sonido en vivo en tiempo real

Gales Daian Avendaño Cardona

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Maestro en Artes de la Grabación y Producción musical.

Asesor(es)

Fredy Alberto Alzate

Instituto Tecnológico Metropolitano - ITM

Facultad de Artes y Humanidades

Departamento Artes de la Grabación y Producción Musical

Medellín, Colombia

2023

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

RESUMEN

Este proyecto tiene como objetivo diseñar una metodología adecuada para la grabación en vivo y corrección por medio de filtros del saxofón de acuerdo al comportamiento acústico de un recinto en tiempo real. En la investigación se estudiará la relación que tiene el sonido del saxofón con respecto a una determinada sala que tiene parámetros acústicos importantes como; claridad, inteligibilidad y tiempo de reverberación.

Con la ayuda de software y herramientas de uso libre para la medición y corrección por medio de filtros para la compensación acústica como: *Room EQ Wizard*, y *DRC: Digital Room Correction Rephase* y *plu-gins*, se tomará una respuesta al impulso y se determinarán los parámetros acústicos que se pueden analizar para realizar la grabación de un saxofón en vivo en un sistema de refuerzo sonoro en tiempo real.

De igual forma, con el presente trabajo se busca determinar rangos adecuados en los parámetros acústicos de una sala, que permitan a un músico tomar las decisiones y realización de correcciones necesarias durante la grabación en sonido en vivo, de acuerdo a las falencias acústicas del recinto.

Palabras clave: Saxofón, sonorización acústica, grabación, análisis sonoro, medición acústica.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		Versión	\$VERSIO
		Fecha	\$FECHA

RECONOCIMIENTOS

Agradezco a la Facultad de Artes y Humanidades del ITM por el préstamo de las instalaciones y equipos para llevar a cabo la realización de este trabajo de investigación. A los docentes que compartieron su amplio conocimiento tanto académico como personal. A Fredy Alzate, asesor de este trabajo de investigación, que sin su conocimiento y pasión por la acústica el trabajo no hubiera podido dar los resultados que se presentaron. También a mis compañeros del semillero de Acusmusic que participaron activamente en cada una de las salidas de campo para realizar las capturas del proyecto.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

TABLA DE CONTENIDO

- 1.1 Objetivos
 - Generales
 - Específicos
- 1.1 Organización del Trabajo
- 2.1 El saxofón
- 2.2 Ubicación del micrófono para la captura del sonido en el saxofón
- 2.3 Cámara anecoica
- 2.4 Sonido
- 2.5 Directividad
- 2.6 Tono
- 2.7 Timbre
- 2.8 Frecuencia fundamental y armónicos.
- 2.9 Tiempo de Reverberación (TR60)
 - 2.9.1 Parámetros asociados a las primeras reflexiones
- 2.10 Claridad Musical: C80
- 2.11 Sonoridad: G
- 2.12 Calidez acústica: BR
- 2.13 Brillo: Br
- 2.14 Respuesta al impulso
 - 2.14.1 Sistema lineal simple
 - 2.14.2 Convolución
 - 2.14.3 Definición de filtros FIR (Finite Impulse Response)
- 2.15 Room EQ Wizard (REW)
- 2.16 DRC: Digital Room Correction
- 2.17 rePhase
- 2.18 REAPER
- 3.1 Procedimiento de medición
- 3.2. Equipamiento

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		Versión	\$VERSIO
		Fecha	\$FECHA

3.2.1 Descripción del funcionamiento del sistema

3.2.2 Software

3.3 Medida de la respuesta al impulso

3.3.1 Fuentes

3.3.2 Condiciones de medida

3.4 Proceso software REW y rePhase

- Paso 1
- Paso 2
- Paso 3
- Paso 4
- Paso 5
- Paso 6
- Paso 7
- Paso 8
- Paso 9

3.5 Proceso de convolución en REAPER

- Paso 1
- Paso 2
- Paso 3

3.5.1 Cómo corregir la latencia

5.1. Conclusiones

5.2 Errores comunes en el proceso de corrección de sistemas de reproducción de audio o altavoces:

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

1. INTRODUCCIÓN

En las diversas presentaciones y conciertos que realiza el músico, específicamente el saxofonista, se está condicionado por el estado acústico de la sala; es decir, por niveles de reverberación altos, materiales con baja absorción sonora, por los que los parámetros acústicos de la sala no se ajustan para permitir una apreciación de una pieza musical con calidad. Para grabar en vivo dentro de este contexto, es necesario indagar sobre la relación que tiene la acústica de una sala con las características sonoras del instrumento, con el fin de obtener un resultado agradable desde el punto de vista psicoacústico y técnico.

1.1 Objetivos

Generales

Diseñar y aplicar una metodología para el análisis y el mejoramiento del sonido en vivo del saxofón por medio de filtros FIR en tiempo real, por medio de compensación y corrección a través de filtros en el altavoz teniendo en cuenta los parámetros acústicos de la sala.

Específicos

1. Recoger información de bases de datos acerca de la caracterización acústica del saxofón, modelo físico y componentes espectrales de acuerdo con sus materiales y formas de ejecución.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

2. Recopilar grabaciones y técnicas de ejecución en una cámara anecoica que sirvan como referencia para el análisis y comparación de recintos en condiciones reales.

3. Realizar mediciones de los parámetros acústicos de un recinto o auditorio por medio de respuestas al impulso.

4. Analizar la influencia de los parámetros acústicos de las salas (claridad, inteligibilidad, tiempo de reverberación, entre otros), para mejorar la calidad sonora del saxofón durante su interpretación en vivo en un recinto.

5. Diseñar una metodología de grabación en vivo del saxofón, que permita una mejor calidad sonora del instrumento durante su interpretación en un recinto a través de filtros aplicados al sistema de reproducción del sonido.

1.1 Organización del Trabajo

Este trabajo comienza con el marco teórico, donde se expone una breve historia y evolución del instrumento musical, el cual es objeto de estudio de la presente investigación. También se definen los términos que son utilizados para el desarrollo del trabajo mismo. Además, se exponen brevemente los Softwares que serán usados para el posterior análisis.

En el capítulo de la Metodología se expone el paso a paso del cómo se tomaron las medidas acústicas de los recintos, los ángulos y lugares en dónde fue puesto el micrófono de medición acústica para tener las capturas, cómo se grabó el instrumento, y el procedimiento posterior para realizar el análisis de la información. También se exponen los

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		Versión	\$VERSIO
		Fecha	\$FECHA

ajustes que se hicieron y cómo se usaron los diferentes Softwares, tablas y gráficas de mediciones que se obtuvieron.

En el capítulo Resultados se da a conocer la percepción que tienen diferentes músicos profesionales, estudiantes de la Universidad de Antioquia sobre las conclusiones del trabajo.

Por último, se encuentran las conclusiones y recomendaciones del presente trabajo, basados en los resultados y posibles errores que se cometieron a la hora de desarrollar el mismo. También se exponen futuros trabajos que se podrían realizar en esta misma línea de estudio.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 El saxofón

El saxofón es un instrumento cónico fabricado principalmente de latón que se ensancha en su extremo formando una campana; algunos de estos son elaborados en plata y otros incluso con llaves bañadas en oro. Este instrumento cuenta con 24 agujeros de tono de tamaño variable que ocupan todo el largo del tubo, e incluye dos agujeros más pequeños que permiten octavar de manera más fácil a su registro superior.

Este instrumento cuenta con llaves que permiten tapar cada uno de los agujeros. Estas llaves sujetan unas zapatillas las cuales tienen la función de sellar el paso del aire que va por el tubo del instrumento el cual tiene perforaciones a distintas alturas por lo que

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

según se van cerrando, más grave será la nota (menor frecuencia) o abriendo, más aguda será la nota (mayor frecuencia) (Azuara, 2016).

La siguiente Figura 1 muestra la distribución común de las llaves que tienen todos los tipos de saxofones.

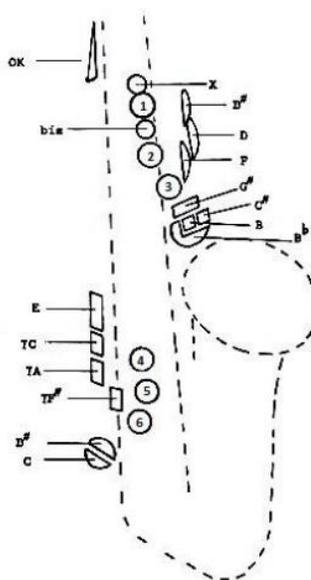


Figura 1. Nomenclatura de las llaves en el saxofón (Azuara, 2016).

Dependiendo del saxofón, este puede traer de una a dos llaves extras con el fin de ayudar a prolongar el registro agudo o grave del instrumento; permitiendo tener entre 2 y 4 notas más en todo el registro del saxofón. De este modo, la cantidad de llaves en un saxofón varían entre 22 y 25, con las que se pueden realizar, de forma natural, entre 32 y 34 notas distintas.

El registro natural del saxofón comprende dos octavas completas que van de do grave a un do agudo, y ocho notas adicionales, dos por debajo que le permite llegar hasta un sib y seis por encima hasta llegar a un Fa# sobreagudo (tercera octava).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

Los siguientes cuadros permiten evidenciar las notas naturales de la familia de saxofones y sus frecuencias.

SAXOFÓN SOPRANO EN Sib	NATURAL	FRECUENCIA	SAXOFÓN TENOR EN Sib	NATURAL	FRECUENCIA
Sib	SOL#	207,65	Sib	SOL#	103,83
SI	LA	220,00	SI	LA	110,00
DO	Sib	233,08	DO	Sib	116,54
DO#	SI	246,94	DO#	SI	123,47
RE	DO	261,63	RE	DO	130,81
RE#	DO#	277,18	RE#	DO#	138,59
MI	RE	293,66	MI	RE	146,83
FA	Mib	311,13	FA	Mib	155,56
FA#	MI	329,63	FA#	MI	164,81
SOL	FA	349,23	SOL	FA	174,61
SOL#	FA#	369,99	SOL#	FA#	185,00
LA	SOL	392,00	LA	SOL	196,00
LA#	SOL#	415,30	LA#	SOL#	207,65
SI	LA	440,00	SI	LA	220,00
DO	Sib	466,16	DO	Sib	233,08
DO#	SI	493,88	DO#	SI	246,94
RE	DO	523,25	RE	DO	261,63
RE#	DO#	554,37	RE#	DO#	277,18
MI	RE	587,33	MI	RE	293,66
FA	Mib	622,25	FA	Mib	311,13
FA#	MI	659,26	FA#	MI	329,63
SOL	FA	698,46	SOL	FA	349,23
SOL#	FA#	739,99	SOL#	FA#	369,99
LA	SOL	783,99	LA	SOL	392,00
LA#	SOL#	830,61	LA#	SOL#	415,30
SI	LA	880,00	SI	LA	440,00
DO	Sib	932,33	DO	Sib	466,16
DO#	SI	987,77	DO#	SI	493,88
RE	DO	1046,50	RE	DO	523,25
RE#	DO#	1108,73	RE#	DO#	554,37
MI	RE	1174,66	MI	RE	587,33
FA	Mib	1244,51	FA	Mib	622,25
FA#	MI	1318,51	FA#	MI	659,26

Figura 2. Frecuencias para los saxofones en Sib (Azua, 2016).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

SAXOFÓN ALTO EN Mib	NATURAL	FRECUENCIA	SAXOFÓN BARÍTONO EN Mib	NATURAL	FRECUENCIA
Si _b	DO#	138,59	Si _b	DO#	69,30
SI	RE	146,83	SI	RE	73,42
DO	Mi _b	155,56	DO	Mi _b	77,78
DO#	MI	164,81	DO#	MI	82,41
RE	FA	174,61	RE	FA	87,31
RE#	FA#	185,00	RE#	FA#	92,50
MI	SOL	196,00	MI	SOL	98,00
FA	SOL#	207,65	FA	SOL#	103,83
FA#	LA	220,00	FA#	LA	110,00
SOL	LA#	233,08	SOL	LA#	116,54
SOL#	SI	246,94	SOL#	SI	123,47
LA	DO	261,63	LA	DO	130,81
LA#	DO#	277,18	LA#	DO#	138,59
SI	RE	293,66	SI	RE	146,83
DO	Mi _b	311,13	DO	Mi _b	155,56
DO#	MI	329,63	DO#	MI	164,81
RE	FA	349,23	RE	FA	174,61
RE#	FA#	369,99	RE#	FA#	185,00
MI	SOL	392,00	MI	SOL	196,00
FA	SOL#	415,30	FA	SOL#	207,65
FA#	LA	440,00	FA#	LA	220,00
SOL	LA#	466,16	SOL	LA#	233,08
SOL#	SI	493,88	SOL#	SI	246,94
LA	DO	523,25	LA	DO	261,63
LA#	DO#	554,37	LA#	DO#	277,18
SI	RE	587,33	SI	RE	293,66
DO	Mi _b	622,25	DO	Mi _b	311,13
DO#	MI	659,26	DO#	MI	329,63
RE	FA	698,46	RE	FA	349,23
RE#	FA#	739,99	RE#	FA#	369,99
MI	SOL	783,99	MI	SOL	392,00
FA	SOL#	830,61	FA	SOL#	415,30
FA#	LA	880,00	FA#	LA	440,00

Figura 3. Frecuencias para los saxofones en Mib (Azuara, 2016).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		Versión	\$VERSIO
		Fecha	\$FECHA

Los saxofones varían mucho en tamaño y forma. El saxo más popular es el saxo tenor en Si bemol curvado, cuyos armónicos abarcan de B2 a F5 (117 a 725 Hz), y el alto en Mi bemol, que se extiende de C3 a G5 (140 a 784 Hz). También dentro de esta familia están el saxofón soprano de tubo recto y el sopranino, así como los saxofones barítono y bajo. El contenido armónico de estos instrumentos varía hasta 8 kHz y puede ampliarse mediante ruidos respiratorios de hasta 13 kHz.

2.2 Ubicación del micrófono para la captura del sonido en el saxofón

Al igual que con otros instrumentos de viento, el micrófono debe colocarse aproximadamente en el centro del instrumento a la distancia deseada y apuntar ligeramente hacia la campana (Figura 4). Los ruidos de las llaves se consideran parte del sonido del saxofón; sin embargo, estos pueden reducirse o eliminar apuntando el micrófono más cerca del borde exterior de la campana. Si apuntamos el micrófono más hacia la campana resaltaremos las frecuencias bajas. Lo más recomendable es tener el micrófono a una altura media del instrumento que nos permita percibir todo el registro sonoro. (*Huber y Runstein, 2010*).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		Versión	\$VERSIO
		Fecha	\$FECHA

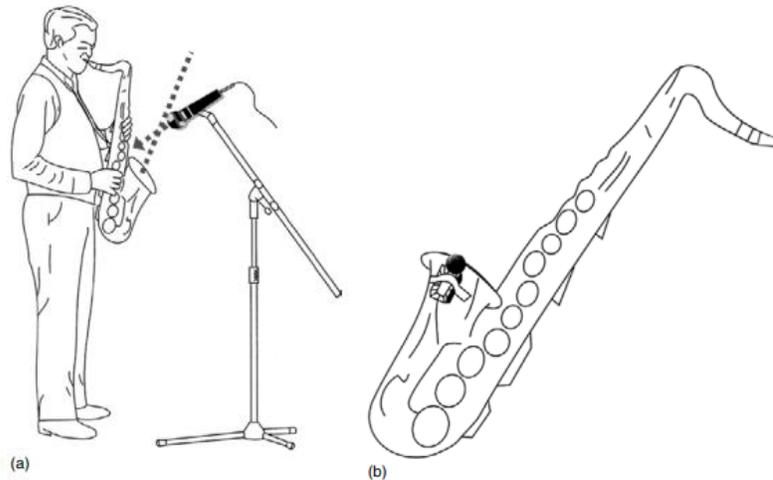


Figura 4. Posiciones de micrófono típico para el saxofón: (a) colocación estándar; b) Colocación típica de "clip-on" (Huber y Runstein, 2010).

2.3 Cámara anecoica

Una cámara anecoica es una sala, una habitación o un pequeño habitáculo en el que todas sus superficies (paredes, techos y suelo) están revestidas con materiales absorbentes para minimizar el sonido que se refleja. El término anecoico significa no reflectante o sin eco. En estas salas, los materiales absorbentes reducen al mínimo las reflexiones que producen las ondas acústicas o electromagnéticas en cualquier superficie.

Las cámaras están aisladas del exterior para evitar la entrada de sonidos externos. El espacio que se crea es similar al que se daría en el vacío o en el campo abierto. No hay presencia alguna de influencias sonoras. En todo el planeta, tanto en la naturaleza como en los ambientes urbanos, siempre hay algo de reflexión de absorción de sonido. La sensación que se vive en una cámara de este tipo es de completa extrañeza, pues el ser humano

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		Versión	\$VERSIO
		Fecha	\$FECHA

siempre está habituado a escuchar sonidos y ruidos en todo momento. El límite del oído humano se establece en los cero decibelios. Por debajo de este nivel, no es capaz de captar sonido. Cuando una persona se introduce en una sala anecoica, comienza a escuchar los latidos de su corazón, la respiración, la irrigación sanguínea e incluso el sonido del estómago y los intestinos.

De esta forma, la falta de costumbre del ser humano a la percepción del silencio casi absoluto, producen una sensación de desequilibrio y desorientación que en algunos casos puede ser peligrosa.

Se puede realizar las mediciones en cualquier momento, al ser una sala cerrada que simula las condiciones de propagación en el espacio libre, no depende de las condiciones climáticas lo cual aumenta el espacio de medición y al no haber otras interferencias de sonido al estar recubierta por materiales absorbentes, la señal de estudio no tendrá otras señales que atenúen la señal principal de prueba. (*Marketing, 2021*).

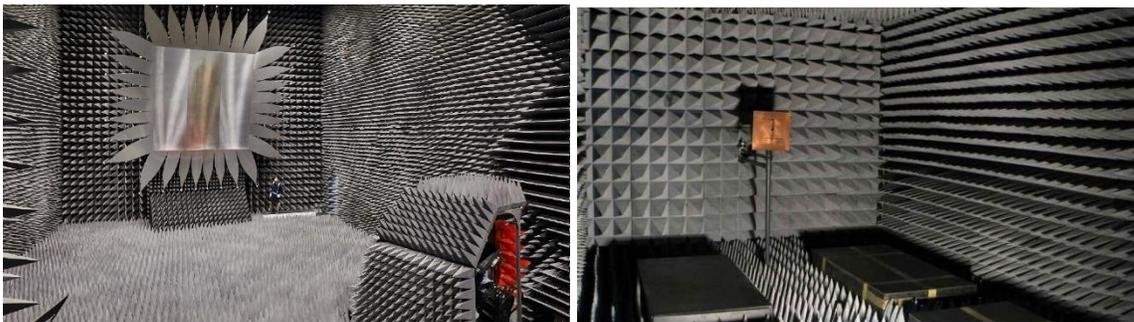


Figura 5 Cámara anecoica (Samaniago, 2022).

Durante la búsqueda de información, se encontró una librería de grabaciones de un saxofón alto en cámara anecoica realizadas por la Universidad Pública de Iowa. Las

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

grabaciones fueron realizadas en noviembre de 1997 con un micrófono Neumann KM84, una grabadora Panasonic SV-3800 DAT y en formato de 16 bits - 44,1 kHz- mono.

A continuación, encontrará el enlace del sitio web donde podrá escuchar y descargar los sonidos del saxofón grabados en cámara anecoica:

<https://theremin.music.uiowa.edu/MISaltosaxophone.html>

2.4 Sonido

Según la Real Academia de la lengua española el sonido es la sensación producida en el órgano del oído por el movimiento vibratorio de los cuerpos, transmitido por un medio elástico, como el aire (*ASALE & RAE, s. f.*). Entrando un poco más en términos especializados en audio encontramos que es una pequeña alteración de la presión atmosférica producida por una oscilación de partículas, a través de las cuales se transmite longitudinalmente la onda sonora (*Jaramillo, 2007*).

2.5 Directividad

La directividad es un fenómeno característico de las ondas sonoras, o electromagnéticas, como podría ser una antena de telecomunicaciones o cualquier instrumento musical que tenga radicación alguna. Se define como la relación entre la intensidad de la radiación en una dirección dada desde la fuente y la intensidad de la radiación promediada en todas las direcciones. La directividad se representa gráficamente en un patrón polar que puede ser omnidireccional (todas las direcciones), bidireccional o unidireccional. (*Directivity - an overview / ScienceDirect Topics, s. f.*)

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		o	O
		Versión	\$VERSIO
		n	N
		Fecha	\$FECHA

2.6 Tono

El tono, también conocido como altura, es la propiedad de percepción que nuestro sistema auditivo asocia con la frecuencia (*Lizarraga Seijas, 2013*), que nos ayuda a saber si un sonido es agudo o grave. Siendo la onda sinusoidal el sonido más simple que podemos encontrar. Para que podamos percibir claramente el tono o altura de una señal debe tener una periodicidad clara (*Sacco, s. f.*). Así, para que se pueda percibir la altura de una señal, esta no debería variar su frecuencia en un espacio mínimo de tiempo. Entre más oscilaciones tenga una onda en un segundo será más aguda, caso contrario si tenemos una onda que oscila pocas veces en un segundo. Como se puede ver, las siguientes gráficas muestran una onda sinusoidal de 440 Hz y otra de 4000 Hz, en el mismo intervalo de tiempo.

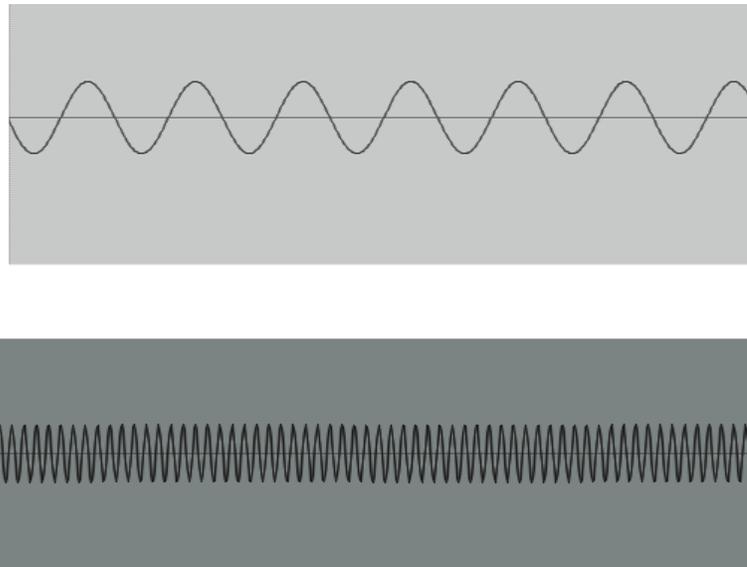


Figura 6. Forma de onda de diferentes frecuencias generadas por el software Reaper (*Cockos, 2022*).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

2.7 Timbre

El timbre, como lo define Lizarraga (*Lizarraga Seijas, 2013*), es la cualidad que tiene el sonido que nos permite diferenciar un sonido de otro. El timbre de cada instrumento depende de los armónicos que contenga una nota. Si tenemos dos señales con la misma frecuencia (altura o tono) pero provenientes de dos instrumentos diferentes, podemos diferenciar una de la otra gracias al timbre. La frecuencia más grave es la que generalmente determina el periodo y la altura, denominada Frecuencia Fundamental o base (*Sacco, s. f.*). El resto de las frecuencias, denominadas armónicos generalmente son múltiplos de la frecuencia fundamental.

2.8 Frecuencia fundamental y armónicos.

A diferencia de una onda sinusoidal, en el que su tono o altura puede asociarse directamente con la frecuencia (Hz), el tono de un sonido complejo (puede ser el sonido de un instrumento musical), se asocia a su frecuencia fundamental. Los sonidos complejos, conocidos como sonidos armónicos no solo consta de una frecuencia, sino de un grupo de frecuencias que generalmente son múltiplos de la fundamental. Aquellas frecuencias que no son múltiplos de la fundamental reciben el nombre de inarmónicos. (*Lizarraga Seijas, 2013*).

2.9 Tiempo de Reverberación (TR60)

Puede ser entendido como la prolongación del sonido dentro de un recinto, debido a las múltiples reflexiones de la energía sonora en las superficies que este contiene, y luego

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		Versión	\$VERSIO
		Fecha	\$FECHA

que la fuente ha dejado de emitir. Para el caso del RT60, es el tiempo que se tarda el sonido en decaer 60dB respecto al nivel que la fuente se encontraba emitiendo.

2.9.1 Parámetros asociados a las primeras reflexiones

A continuación, se procede a enumerar ciertos parámetros relacionados con las primeras reflexiones en un punto de medida cualquiera, que, por norma general, se relacionan con la inteligibilidad¹ en dicho punto. Cuanta más presencia de primeras reflexiones, mejor inteligibilidad. Más concretamente, miden la relación energética producida por las primeras reflexiones con respecto a la energía total en el punto de interés.

2.10 Claridad Musical: C80

La claridad musical, también conocida como C80, es un parámetro utilizado en la acústica de auditorios para medir la relación entre la energía del sonido directo y la energía del sonido reflejado. Se refiere a la cantidad de tiempo que tarda el sonido en disminuir en 80 decibeles después del final de la señal directa. En otras palabras, mide la capacidad de un auditorio para producir una sensación de claridad en el sonido.

La claridad musical es importante en auditorios y salas de conciertos, ya que puede influir en la calidad del sonido y en la experiencia auditiva de los oyentes. Si la relación de energía entre el sonido directo y el sonido reflejado no es adecuada, puede haber una pérdida de claridad y una sensación de reverberación excesiva.

¹ La inteligibilidad se refiere a la claridad del sonido emitido por una fuente, de manera que este sea entendible.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		o	O
		Versión	\$VERSIO
		n	N
		Fecha	\$FECHA

Para corregir este parámetro utilizando filtros digitales, se puede utilizar un ecualizador paramétrico para ajustar la respuesta en frecuencia del sistema de sonido y mejorar la relación de energía entre el sonido directo y el sonido reflejado. El ecualizador paramétrico permite ajustar la ganancia, la frecuencia central y la anchura de banda de cada banda de frecuencia, lo que permite un ajuste fino y preciso de la respuesta en frecuencia del sistema de sonido.

Es importante destacar que la corrección de la claridad musical utilizando filtros digitales no siempre es posible o efectiva, ya que depende de las características acústicas del auditorio o sala de conciertos y de la ubicación de los altavoces. En algunos casos, puede ser necesario realizar ajustes físicos en la sala, como la instalación de paneles absorbentes o difusores acústicos, para mejorar la relación de energía entre el sonido directo y el sonido reflejado.

En conclusión, es posible corregir la relación de energía entre el sonido directo y el sonido reflejado utilizando filtros digitales, pero su eficacia dependerá de las características acústicas del auditorio o sala de conciertos y de la ubicación de los altavoces. Es importante tener en cuenta que, en algunos casos, pueden ser necesarios ajustes físicos en la sala para mejorar la claridad musical y la experiencia auditiva de los oyentes. (*García, 2021*).

Matemáticamente se describe como:

$$C80 = \frac{\text{Energía hasta } 80\text{ms}}{\text{Energía a partir de } 80\text{ms}}$$

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

Los valores recomendados por Beranek, según el promedio de las frecuencias centrales, denominándolo *musical average*.

$$C80 = \frac{C80(500Hz) + C80(1kHz) + C80(2kHz)}{3}$$

El valor recomendado depende si la sala está vacía/ocupada de:

$$\text{Para salas vacías: } -4 \leq C80 \leq 0dB$$

$$\text{Para salas ocupadas: } -2 \leq C80 \leq +2dB$$

2.11 Sonoridad: G

La sonoridad es la diferencia entre el nivel producido por una fuente en un punto de la sala y la misma fuente emitiendo con la misma potencia dentro de una cámara anecoica en el punto situado a 10 metros de distancia. (*Ingeniería acústica, s. f.*).

2.12 Calidez acústica: BR

Es la relación entre los tiempos de reverberación de las bajas frecuencias (125 y 250 Hz) y de las frecuencias medias (500 y 1000 Hz). (*García, 2021*). Para obtener su valor se aplica la siguiente expresión:

$$BR = \frac{TR_{125Hz} + TR_{250Hz}}{TR_{500Hz} + TR_{1000Hz}}$$

Se recomienda un valor de:

$$\text{Para } TR_{mid} = 2,2s: \quad 1,10 \leq BR \leq 1,25$$

$$\text{Para } TR_{mid} = 1,8: \quad 1,10 \leq BR \leq 1,45$$

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		o	O
		Versión	\$VERSIO
		N	N
		Fecha	\$FECHA

2.13 Brillo: Br

Es la relación entre los tiempos de reverberación de las altas frecuencias (2 y 4 KHz) y de las frecuencias medias (500 y 1000 Hz). (García, 2021). Para obtener su valor se recomienda la siguiente expresión:

$$BR = \frac{TR\ 2000Hz + TR\ 4000Hz}{TR\ 500Hz + TR\ 1000Hz}$$

Se recomienda un valor de:

$$Br \geq 0,87$$

2.14 Respuesta al impulso

El análisis acústico de una sala se puede realizar utilizando una respuesta al impulso. Este tipo de señal no existe en la realidad; sin embargo, puede reproducirse de diferentes maneras. En acústica, por ejemplo, el sonido se puede realizar por medio de un barrido de frecuencias en corto tiempo, tratando de que se aproxime a una señal impulsiva teórica.

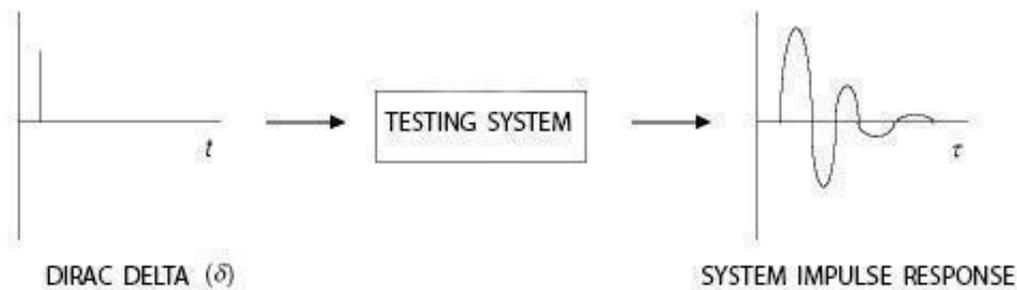


Figura 7. Respuesta al impulso (Farina, 2001).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		o	O
		Versión	\$VERSIO
		N	
		Fecha	\$FECHA

2.14.1 Sistema lineal simple

Analicemos un sistema lineal simple hecho por un reproductor de CD, un amplificador, un altavoz, un micrófono y un analizador de sonido. En el análisis analógico es necesario estudiar las características de una habitación; por ejemplo, el sonido es ejecutado por el reproductor de CD y el sistema de amplificación, luego capturado por medio del micrófono y finalmente analizado. El grupo de factores de elementos (amplificador- altavoz- sala- micrófono) se puede representar analíticamente como un sistema, junto con un filtro que crea una modificación en la señal. El sonido filtrado por la habitación se puede estudiar por medio del analizador.

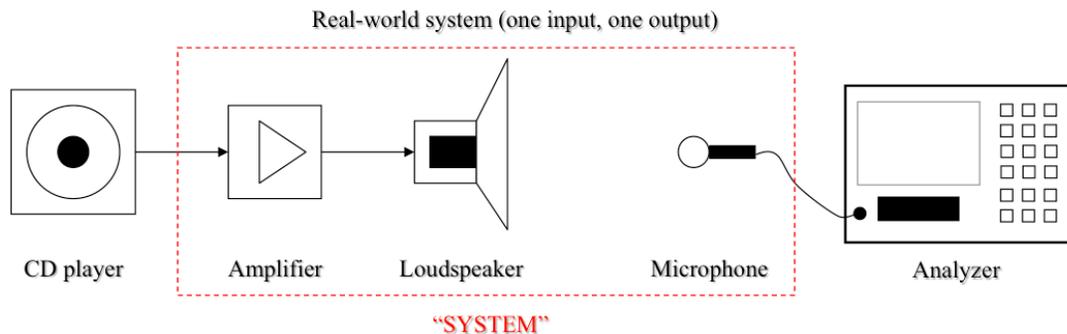


Figura 8. Sistema lineal simple (Farina, 2001).

Lo que sucede en el bloque "SYSTEM" se puede ver en la Figura 9: una señal de entrada $x(t)$ es filtrada por un sistema que tiene respuesta de impulso $h(t)$ y se convierte en la señal de salida $y(t)$.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		o	O
		Versión	\$VERSIO
		N	
		Fecha	\$FECHA

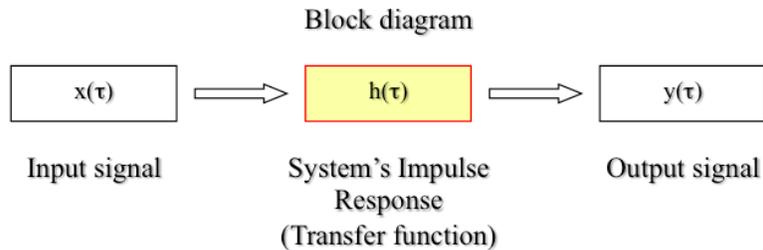


Figura 9. Diagrama de bloque (Farina, 2001).

Desde un punto de vista matemático se trabaja con señales digitales muestreadas.

La cosa es solo una suma de productos.

Este tipo de combinación lineal (o suma de multiplicaciones) recibe el nombre de *convolución*. También se llama filtrado FIR, Finite Impulse Response o Respuesta finita al impulso. También hay una técnica de filtrado diferente, llamada IIR (Infinite Impulse Response), que no se explica aquí porque se define más abajo.

2.14.2 Convolución

La convolución es un proceso matemático utilizado en el procesamiento de señales de audio para simular la respuesta de un sistema acústico, como un altavoz o una sala de grabación. En el contexto del procesamiento de señales de audio, la convolución se utiliza para convolucionar la señal de audio con una respuesta al impulso, también conocida como respuesta de impulso finito (FIR).

El proceso de convolución consiste en multiplicar cada muestra de la señal de audio por la respuesta al impulso y sumar los productos resultantes. Este proceso se repite para cada muestra de la señal de audio y la respuesta al impulso, produciendo una nueva señal de audio convolucionada.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

En resumen, la convolución es un proceso matemático utilizado en el procesamiento de señales de audio para simular la respuesta de un sistema acústico.

Convolución en tiempo real y diferencias con la convolución en grabación

La convolución en tiempo real se utiliza para corregir la respuesta de frecuencia y la fase en sistemas de sonido en vivo. Esto permite ajustar el sonido de los altavoces en tiempo real para adaptarse a las características de la sala o del sistema de sonido en el que se está trabajando. En cambio, la convolución en el proceso de grabación en vivo se utiliza para procesar la señal de audio antes de la reproducción. Esto permite corregir cualquier problema de fase o de respuesta en frecuencia de antemano y producir una grabación de alta calidad.

Ahora, para hacer una convolución en tiempo real con Reaper y una respuesta al impulso medida y corregida con Room EQ Wizard, se debe configurar la convolución en tiempo real y el enrutamiento de la señal en Reaper. La convolución en tiempo real se utiliza para corregir la respuesta de frecuencia y la fase en sistemas de sonido en vivo, mientras que la convolución en el proceso de grabación en vivo se utiliza para producir una grabación de alta calidad (*Farina, 2007*).

2.14.3 Definición de filtros FIR (Finite Impulse Response)

Los filtros FIR (Filtro de Respuesta Finita del Impulso, por sus siglas en inglés) son un tipo de filtro digital utilizado en el procesamiento de señales de audio. Estos filtros

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		o	O
		Versión	\$VERSIO
		n	N
		Fecha	\$FECHA

utilizan una respuesta de impulso finita, lo que significa que la salida del filtro depende únicamente de una cantidad finita de muestras de la señal de entrada.

Una de las ventajas de los filtros FIR es que su respuesta en frecuencia puede ser diseñada con mayor precisión que los filtros IIR (Filtro de Respuesta Infinita del Impulso). Además, los filtros FIR son más estables que los filtros IIR y no presentan problemas de retroalimentación, lo que puede ser especialmente importante en aplicaciones en tiempo real.

A continuación, algunos ejemplos de aplicaciones de filtros FIR en audio:

1. Eliminación de ruido: los filtros FIR pueden ser utilizados para eliminar ruido de una señal de audio. Por ejemplo, se puede diseñar un filtro FIR que atenúe las frecuencias que se encuentran en el rango de frecuencias del ruido no deseado.

2. Ecuilización: los filtros FIR pueden ser utilizados para modificar la respuesta en frecuencia de una señal de audio. Por ejemplo, se puede diseñar un filtro FIR que realce ciertas frecuencias en una mezcla musical para mejorar la calidad del sonido.

3. Crossover: los filtros FIR pueden ser utilizados en sistemas de audio de múltiples vías para dividir la señal de audio en varias bandas de frecuencia. Por ejemplo, se puede diseñar un filtro FIR que divida una señal de audio en dos bandas de frecuencia, una para los bajos y otra para los agudos, y luego enviar cada banda a un altavoz diferente.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		Versión	\$VERSIO
		Fecha	\$FECHA

Los filtros FIR son una herramienta importante en el procesamiento de señales de audio. Sus ventajas incluyen una respuesta en frecuencia más precisa y mayor estabilidad. Además, los filtros FIR pueden ser utilizados en una variedad de aplicaciones, como la eliminación de ruido, la ecualización y la división de frecuencias.

En consecuencia, los filtros FIR son importantes en la fase debido a que su respuesta en frecuencia está directamente relacionada con la respuesta en fase. En un filtro FIR, la fase de la señal de salida cambia de manera lineal con la frecuencia, lo que significa que la fase de la señal de salida puede ser controlada con precisión mediante el diseño del filtro.

Ahora, la fase es importante en sistemas de audio porque puede afectar significativamente la calidad del sonido. La fase es una medida de cuánto una señal se desfasa en el tiempo en relación con otra señal de referencia. En un sistema de audio, la fase puede ser afectada por los componentes y los cables utilizados, así como por los procesadores de señal y los filtros.

Cuando las señales de audio son reproducidas en un sistema de audio, la fase puede afectar la calidad del sonido. Por ejemplo, si la fase de una señal se desfasa, los armónicos de la señal pueden cancelarse o reforzarse en ciertas frecuencias, lo que puede resultar en una distorsión o coloración no deseada del sonido.

Los filtros FIR son útiles en la corrección de la fase en sistemas de audio, ya que su respuesta en fase es lineal y predecible. Los filtros FIR pueden ser diseñados para corregir

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		o	O
		Versión	\$VERSIO
		N	
		Fecha	\$FECHA

las desviaciones de fase en ciertas frecuencias, lo que puede mejorar la calidad del sonido y reducir la distorsión.

En resumen, la fase es una medida importante en sistemas de audio, ya que puede afectar significativamente la calidad del sonido. Los filtros FIR son útiles en la corrección de la fase, ya que su respuesta en fase es lineal y predecible (Janardhana, 2020).

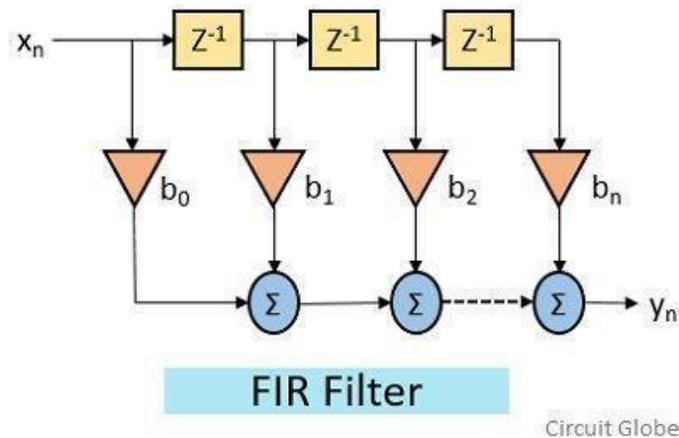


Figura 10. forma discreta de filtro FIR (Janardhana, 2020).

2.15 Room EQ Wizard (REW)

REW es un software gratuito para la medición acústica de salas, altavoces y dispositivos de audio. Sus funciones, permiten optimizar la acústica de recintos, y de igual forma, facilitan la optimización en la ubicación de sistemas de altavoces y la localización de puntos de audición.

Las funciones de medición y análisis de audio de REW lo ayudan a optimizar la acústica de su sala de audición, estudio o cine en casa y a encontrar las mejores ubicaciones

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		o	O
		Versión	\$VERSIO
		N	N
		Fecha	\$FECHA

para sus altavoces, subwoofers y posición de audición. Incluye herramientas para generar señales de prueba de audio, medir SPL e impedancia, respuestas de frecuencia e impulso, distorsión de medición, retardo de grupo y decaimiento espectral, cascadas, espectrogramas y curvas de energía-tiempo; generación de gráficos para análisis en tiempo real (RTA); cálculo de tiempos de reverberación, parámetros de Thiele-Small y la identificación de frecuencias y de tiempos de caída de resonancias modales. (Mulcahy, s. f.).

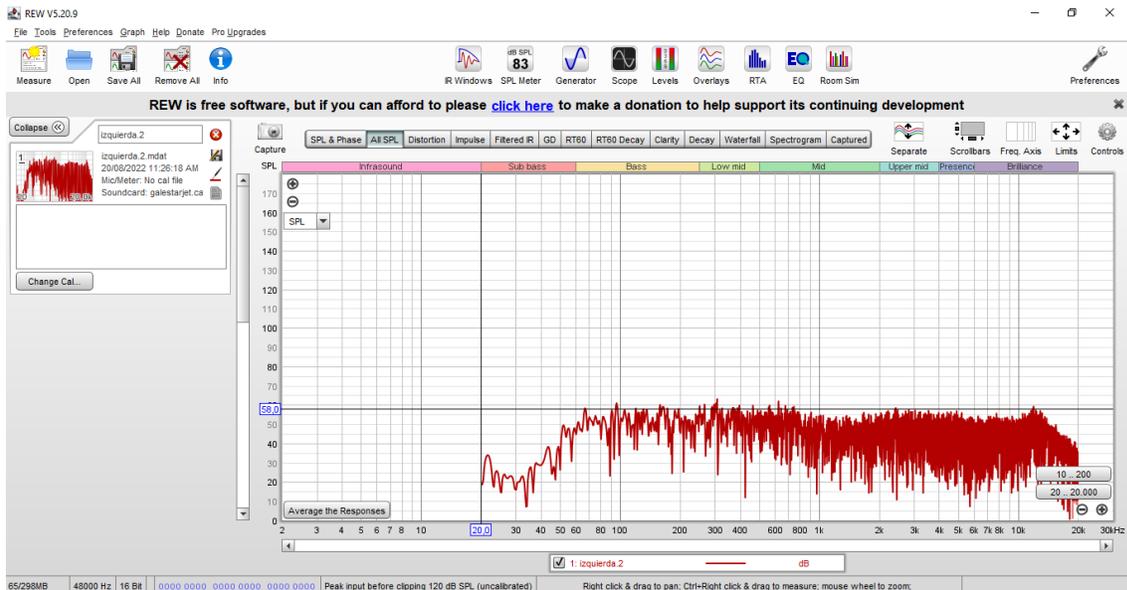


Figura 11. Forma de onda. Figura generada por el software REW (REW, 2022).

2.16 DRC: Digital Room Correction

Digital Room Correction (DRC) es una técnica utilizada en el campo del audio profesional para corregir las irregularidades acústicas de una sala de grabación o reproducción de sonido. La corrección se realiza mediante el uso de filtros digitales que

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

ajustan la respuesta de los altavoces en función de la respuesta al impulso medida en la sala.

El proceso de DRC implica la medición de la respuesta al impulso del sistema de audio en la sala, utilizando micrófonos y software de análisis. Luego, se utiliza un software de DRC para crear un filtro inverso que se aplica al audio para corregir las irregularidades en la respuesta de los altavoces.

Existen varios software libre de DRC, como por ejemplo, *REW (Room EQ Wizard)* y *rePhase*, que permiten la medición de la respuesta al impulso y la creación de filtros inversos para su aplicación en tiempo real o en la post-producción.

En el caso de usar DRC en tiempo real, se puede utilizar un software como REAPER, que permite la incorporación de plugins VST (*Virtual Studio Technology*), como por ejemplo, el plugin de DRC. Esto permitiría la corrección de la respuesta de los altavoces en tiempo real durante una actuación en vivo, mejorando la calidad del sonido y minimizando los efectos negativos de la acústica del espacio.

Es importante tener en cuenta que la implementación de DRC en tiempo real requiere una latencia muy baja, para evitar problemas de sincronización entre el audio en vivo y la corrección aplicada. También es importante tener una medición precisa de la respuesta al impulso del sistema de audio en el espacio en el que se utilizará el DRC, ya que esto es esencial para crear un filtro inverso preciso que realmente corrija las irregularidades acústicas del espacio (*DRC: Corrección de sala digital, s. f.*).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		o	O
		Versión	\$VERSIO
		N	
		Fecha	\$FECHA

2.17 rePhase

rePhase es una herramienta de generación de FIR para construir cruces activos de fase completamente lineal con pendientes arbitrarias.

También permite compensar manualmente los cambios de fase. Una vez generado, el FIR se puede aplicar utilizando cualquier hardware o software estéreo, o motor de convolución multidireccional. (*rePhase*, s. f.)

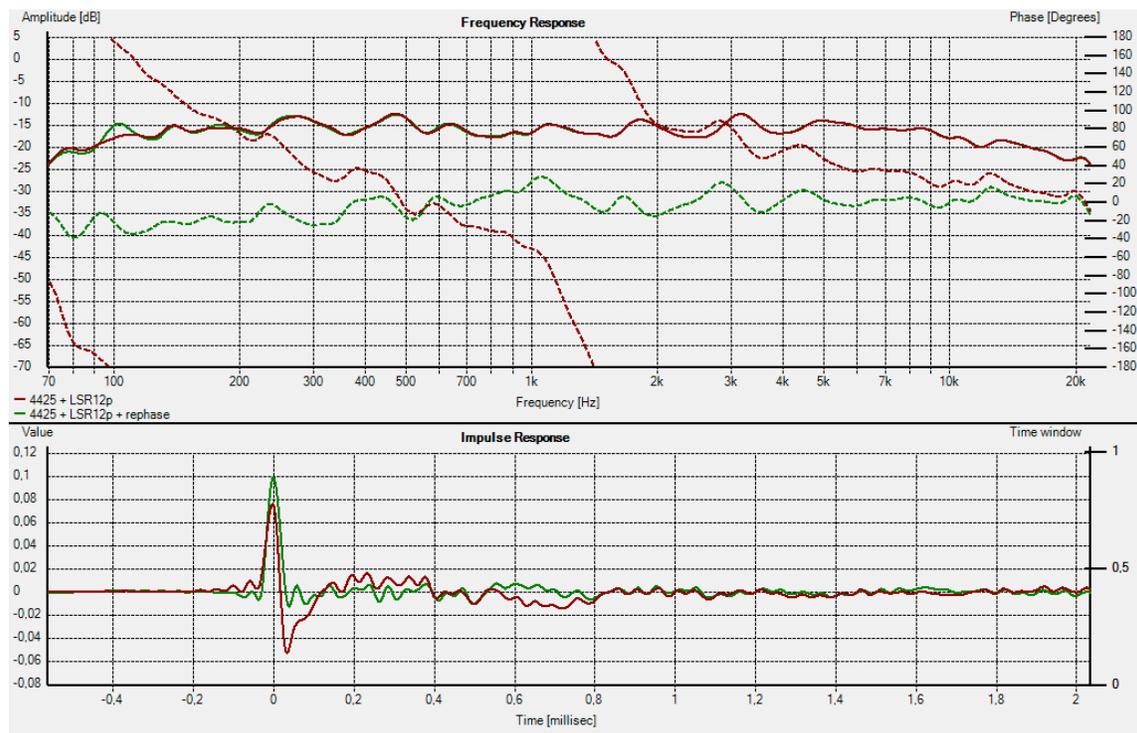


Figura 12. Respuesta en frecuencia y respuesta en impulso (*rePhase*, 2022.)

2.18 REAPER

REAPER es un DAW (*Digital Audio Workstation*) de producción de audio digital para computadoras, que ofrece un conjunto completo de herramientas de grabación,

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		o	O
		Versión	\$VERSIO
		N	N
		Fecha	\$FECHA

edición, procesamiento, mezcla y masterización de audio multipista y MIDI. (*SEGADOR / Producción de audio sin límites*, s. f.)

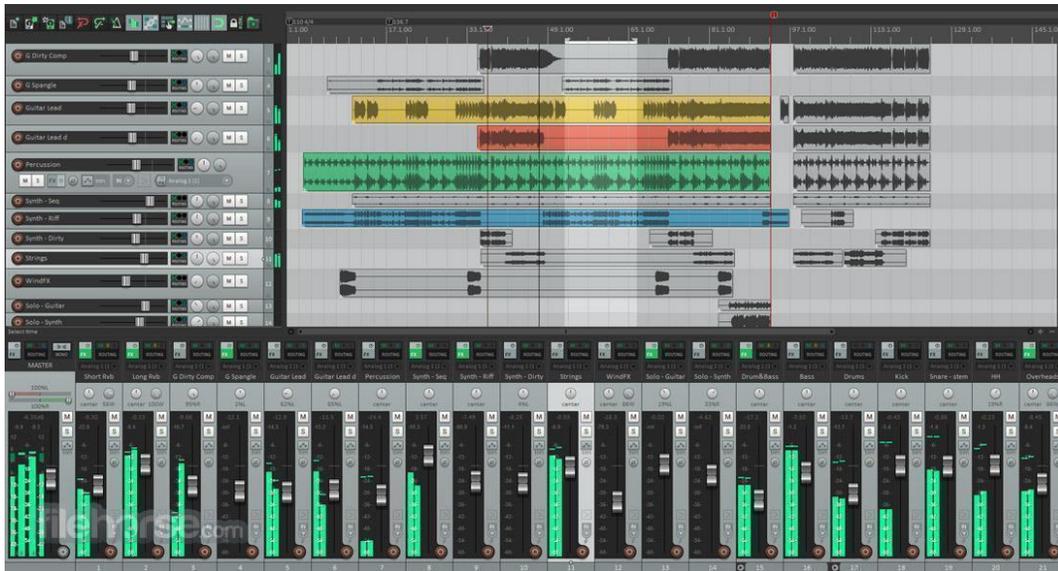


Figura 13. Interfaz de REAPER (*SEGADOR / Producción de audio sin límites*, s. f.)

3. METODOLOGÍA

3.1 Procedimiento de medición

El software *rePhase* es una herramienta de procesamiento de señal que se utiliza para corregir la respuesta de frecuencia y la fase en sistemas de reproducción de audio. La

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		Versión	\$VERSIO
		Fecha	\$FECHA

corrección de la respuesta de frecuencia y fase es importante para obtener una reproducción de sonido precisa y sin distorsión.

El proceso de corrección de sistemas de reproducción de audio con los software *Room EQ Wizard (REW)* y *rePhase* implica los siguientes pasos:

1. Medición de la respuesta en frecuencia del sistema: se utiliza un micrófono de medición y se realiza una medición de la respuesta en frecuencia del sistema de reproducción de audio en un espacio determinado. La medición se realiza en varios puntos del espacio para obtener una idea general de la respuesta del sistema.

2. Análisis de la respuesta en frecuencia del sistema: se utiliza el software *REW* para analizar la respuesta en frecuencia del sistema y determinar la cantidad de exceso de fase y mínima fase presentes en la señal. El exceso de fase y la mínima fase son desviaciones en la fase de la señal que pueden afectar la calidad del sonido.

3. Creación del filtro de corrección: se utiliza el módulo de corrección de fase y respuesta de frecuencia de *REW* para crear un filtro de corrección. Este filtro se basa en la medición realizada previamente y se utiliza para corregir las desviaciones en la respuesta de frecuencia y fase, incluyendo el exceso de fase y la mínima fase.

4. Exportación del filtro: el filtro creado se exporta en formato de archivo de respuesta de impulso Finita (FIR) y se importa en el software *rePhase*.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		o	O
		Versión	\$VERSIO
		n	N
		Fecha	\$FECHA

5. Procesamiento de la señal con *rePhase*: se utiliza *rePhase* para aplicar el filtro FIR en la señal de audio. El software *rePhase* utiliza técnicas de procesamiento de señal avanzadas para aplicar el filtro FIR de manera precisa y sin afectar la calidad de la señal. El proceso también incluye la corrección del exceso de fase y mínima fase, lo que puede mejorar la calidad del sonido.

6. Carga del filtro en el sistema de reproducción de audio: una vez que el filtro se ha procesado en *rePhase*, se carga en el sistema de reproducción de audio para corregir la respuesta de frecuencia y fase del sistema.

En resumen, el software *rePhase* se utiliza para aplicar filtros FIR para corregir la respuesta de frecuencia y fase en sistemas de reproducción de audio. El proceso de corrección de sistemas de reproducción de audio con los software *Room EQ Wizard* y *rePhase* implica medir la respuesta en frecuencia del sistema, analizar el exceso de fase y la mínima fase en *REW*, crear un filtro de corrección, exportar el filtro, procesar la señal con *rePhase*, corregir el exceso de fase y mínima fase, y cargar el filtro en el sistema de reproducción de audio.

El método empleado para la medición es el especificado por la norma ISO 3382, teniendo en cuenta los parámetros que se observan en la siguiente figura.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

ISO 3382 parameters												
	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630
EDT (s)	4,249	2,775	2,250	1,681	2,090	1,486	2,264	2,354	1,749	1,622	1,612	1,810
T20 (s)		3,601	2,544	2,495	1,969	1,942	2,191	1,845	1,869	1,520	1,949	1,729
T30 (s)			2,730	2,221	1,927	1,910	2,331	1,915	1,778	1,660	1,991	1,776
Topt (s)		3,601	2,724	2,222	1,926	1,929	2,321	1,956	1,791	1,817	1,950	1,776
T60M (s)												
C50 (dB)	-8,82	-0,27	6,37	-4,29	-3,19	-4,57	-4,55	0,33	0,57	-0,14	0,40	0,44
C80 (dB)	-9,14	-0,76	7,34	-2,22	-1,84	-3,60	-2,16	1,83	1,22	1,21	2,19	2,72
D50 (%)	11,6	48,5	81,3	27,1	32,4	25,9	26,0	51,9	53,3	49,2	52,3	52,5
TS (s)	0,336	0,190	0,121	0,177	0,158	0,149	0,161	0,121	0,105	0,093	0,096	0,087
	800	1.000	1.250	1.600	2.000	2.500	3.150	4.000	5.000	6.300	8.000	10.000
EDT (s)	1,826	1,798	1,555	1,572	1,626	1,338	1,328	1,302	1,010	1,158	1,026	0,840
T20 (s)	1,655	1,622	1,721	1,770	1,671	1,589	1,416	1,301	1,261	1,186	1,003	0,819
T30 (s)	1,777	1,627	1,797	1,770	1,709	1,564	1,409	1,341	1,268	1,208	1,002	0,831
Topt (s)	1,695	1,601	1,717	1,757	1,748	1,576	1,420	1,343	1,274	1,219	1,005	0,829
T60M (s)												
C50 (dB)	0,13	2,45	2,81	0,26	0,41	2,41	2,57	5,44	5,83	5,35	6,57	8,18
C80 (dB)	2,46	3,45	3,70	2,80	2,83	5,01	4,87	7,05	7,99	7,13	8,64	10,52
D50 (%)	50,7	63,7	65,6	51,5	52,3	63,5	64,4	77,8	79,3	77,4	81,9	86,8
TS (s)	0,089	0,067	0,073	0,094	0,078	0,058	0,063	0,041	0,034	0,033	0,027	0,019

Figura 14. ISO 3382 parameter (Mulcahy, s. f.).

Para obtener las medidas de los parámetros acústicos derivados de la respuesta de impulso se hace uso del software libre *Room EQ Wizard (REW)*. Mediante este software se puede medir el *SPL (Sound Pressure Level)* e impedancia, medir la distorsión, calcular tiempos de reverberación, entre otros parámetros acústicos basados en la medición de respuestas al impulso. Solo es necesario un ordenador con tarjeta de sonido, una fuente sonora y un micrófono para la captación.

3.2. Equipamiento

El equipamiento utilizado para la realización de las medidas cumple con lo especificado en la norma ISO 3382, los cuales se indican a continuación.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		Versión	\$VERSIO
		Fecha	\$FECHA

- **Electro Voice ZLX12p:** Cabina utilizada como fuente de sonido, ya que no cuenta con una fuente omnidireccional o dodecaedro que es lo recomendado. Se utilizó una cabina activa direccional que ofrece una fidelidad y calidad de sonido apropiadas para realizar el procedimiento de medición. La cabina se encontraba apoyada en su respectivo trípode para mantenerla elevada del suelo. En la figura 18 se puede ver una imagen con las características del equipo.



Figura 15. Cabina Electro Voice ZLX12p (Electro Voice, s. f.)

- **Micrófono:** Deben ser omnidireccional. Debería ser tan pequeño como sea posible y preferiblemente tener un diagrama con un diámetro máximo de 13mm. Se permiten micrófonos con diámetros de hasta 26mm, siempre que sean del tipo de respuesta en presión o respuesta en campo libre, pero con un corrector de incidencia aleatoria que proporcione una respuesta plana para incidencia aleatoria.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		o	O
		Versión	\$VERSIO
		N	N
		Fecha	\$FECHA

Las capturas se realizaron con un micrófono condensador Behringer ECM8000 colocado sobre su base, este micrófono está diseñado para la medición acústica de salas en tiempo real, ya que cuenta con un patrón polar omnidireccional y una respuesta en frecuencia de 15Hz a 20kHz. En la figura 16 se puede ver una imagen del micrófono usado para realizar este tipo de mediciones con sus características.



Figura 16. Micrófono Behringer ECM8000 (Red Chip Company Ltd., 2011).

- **Ordenador portátil:** ThinkPad E14 con el software ROOM EQ REW de registro y análisis espectral correspondiente. El ordenador genera la señal de excitación y recoge la señal captada por el micrófono.

- **Tarjeta de sonido:** USB Scarlett 2i2, dos entradas de micrófono con conectores XLR/Jack, dos salidas de línea en Jack TRS, ajuste de ganancia entrada- salida.

Esta tarjeta de sonido proporciona un nivel de entrada, de respuesta y un margen dinámico con rangos que satisfacen las aplicaciones profesionales. En la figura 17 se presenta la tarjeta de sonido usada para la medición.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		o	O
		Versión	\$VERSIO
		N	
		Fecha	\$FECHA



Figura 17. Tarjeta de sonido USB Scarlett 2i2 (Focusrite, s. f.)

- **Cableado:** Para la interconexión de equipos se usó:
 - Cable XLR para conectar el micrófono a la entrada del micrófono de la tarjeta de sonido
 - Cable de poder para alimentar la cabina con energía
 - Cable USB para conectar la tarjeta de sonido externa con el ordenador
 - Cable con un extremo XLR macho y TRS para conectar la cabina a la entrada de salida de audio de la tarjeta de sonido.

3.2.1 Descripción del funcionamiento del sistema

A partir del ordenador junto con el software *REW* se genera la señal de excitación que es emitida por la fuente tipo *log sweep*. El micrófono se encarga de recoger la señal de excitación. Esta señal es recogida por el ordenador gracias al software *REW* a través de la tarjeta de sonido. La señal es procesada para su posterior análisis y obtención de los parámetros acústicos.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		Versión	\$VERSIO
		Fecha	\$FECHA

Antes de realizar las medidas hay que comprobar que la relación señal a ruido sea la correcta. Si no se tiene suficiente nivel hay que aumentar el nivel de la señal mediante el amplificador, teniendo cuidado de que no se produzca saturación del sistema. En la figura 18, podemos ver el esquema del montaje realizado para tomar las capturas de la respuesta al impulso de la sala.

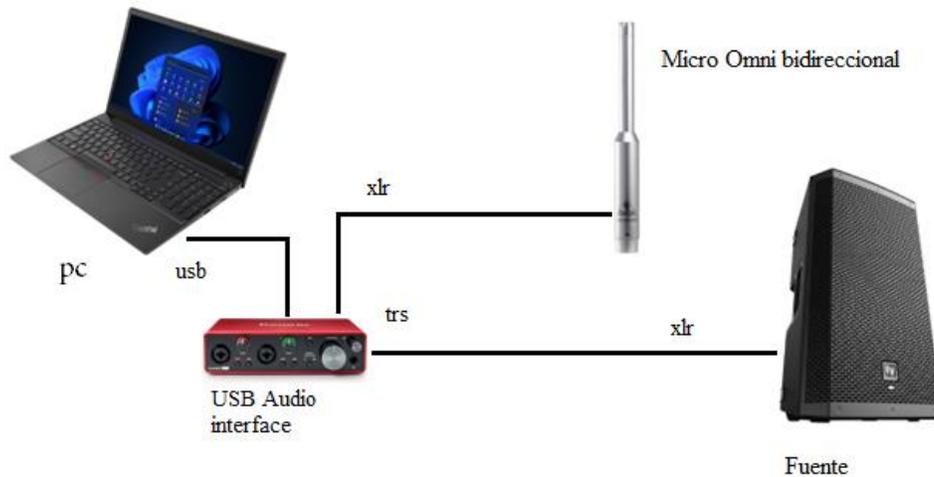


Figura 18. Esquema de montaje (Elaboración propia, 2022).

3.2.2 Software

En REW es el software encargado de recoger y almacenar las mediciones realizadas en el ordenador. Se basa en la medición de respuestas impulsivas a partir de las cuales calcula el tiempo de reverberación y diversos parámetros acústicos de acuerdo con las normas y estándares. Antes de realizar las medidas hay que realizar la configuración de los distintos parámetros del software como lo muestra la Figura 19.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		o	O
		Versión	\$VERSIO
		N	
		Fecha	\$FECHA

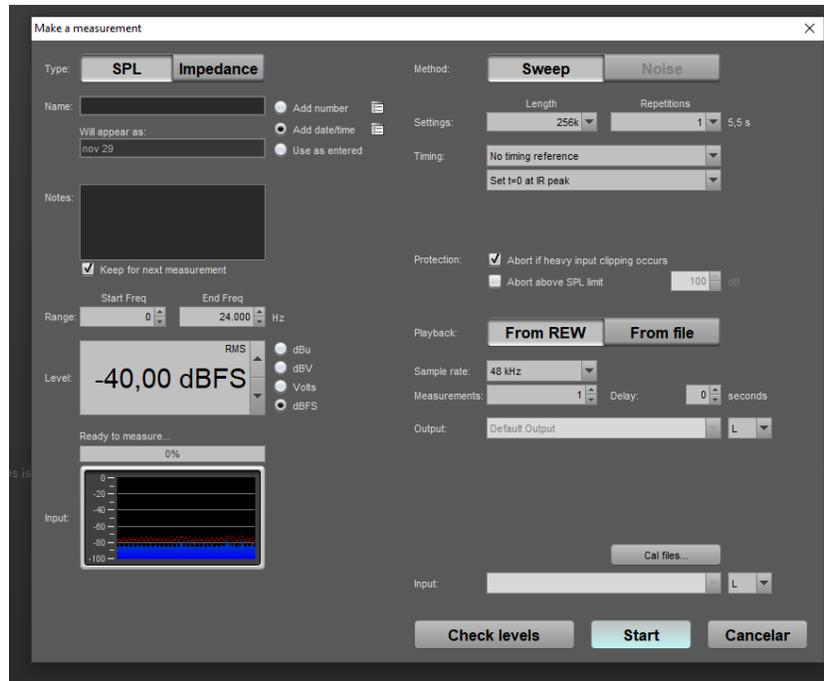


Figura 19. Configuración para las medidas del software REW (REW, 2022).

El valor de *pre-average* se fija en 2. Esto quiere decir que se obtienen dos respuestas al impulso en cada combinación fuente-receptora. El resultado que se obtiene de cada medida es el promedio de cada una de las respuestas obtenidas en todas las repeticiones de la medida.

3.3 Medida de la respuesta al impulso

A continuación, se explica el proceso llevado a cabo para obtener los parámetros acústicos a partir de la respuesta impulsiva.

En primer lugar, se excita la sala como se mencionó antes mediante una fuente omnidireccional con un barrido tipo *log sweep*. En la Figura 20, se muestra un ejemplo de respuesta impulsiva de la sala obtenida con el software REW.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		o	O
		Versión	\$VERSIO
		N	
		Fecha	\$FECHA

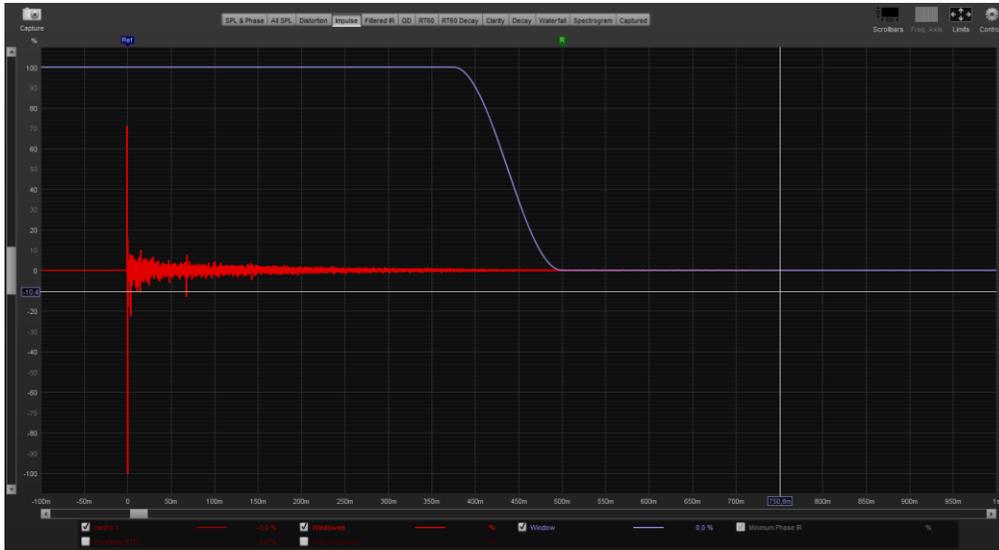


Figura 20. Respuesta impulso en el punto central del auditorio de la Facultad de Artes y Humanidades del ITM (REW, 2022).

Las figuras 21, 22, 23 y 24 tomadas del software *REW*, nos muestran el impulso obtenido en diferentes puntos del auditorio.

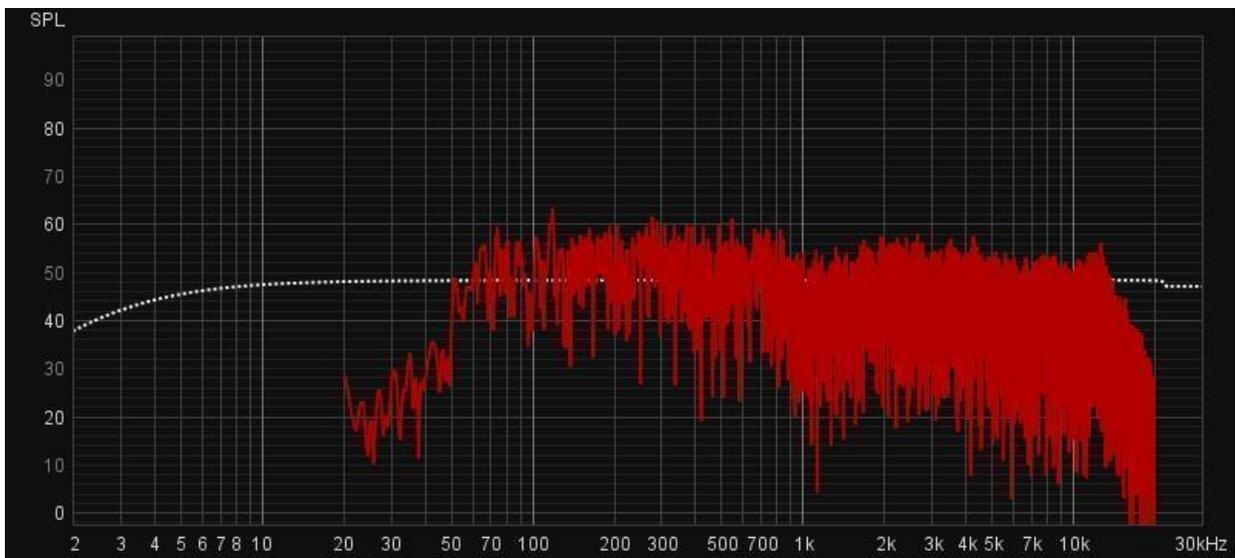


Figura 21. Auditorio Facultad de Artes y Humanidades ITM- Impulso escenario- lado izquierdo

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		o	O
		Versión	\$VERSIO
		N	
		Fecha	\$FECHA

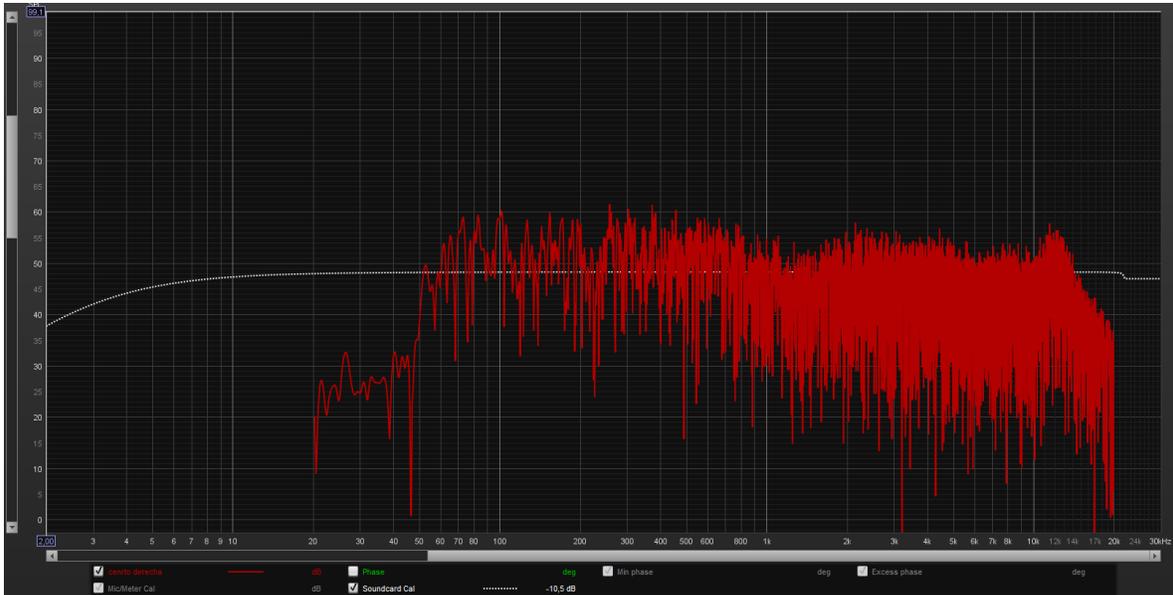


Figura 22. Auditorio Facultad de Artes y Humanidades ITM- Impulso escenario-derecho

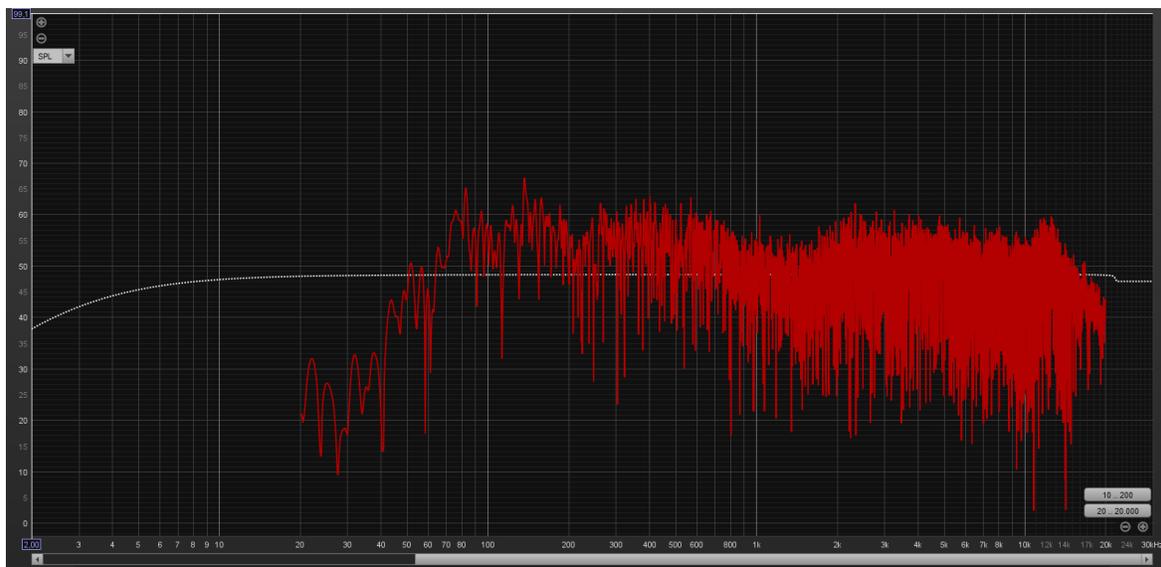


Figura 23. Auditorio Facultad de Artes y Humanidades ITM- Impulso centro del escenario

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		o	O
		Versión	\$VERSIO
		n	N
		Fecha	\$FECHA

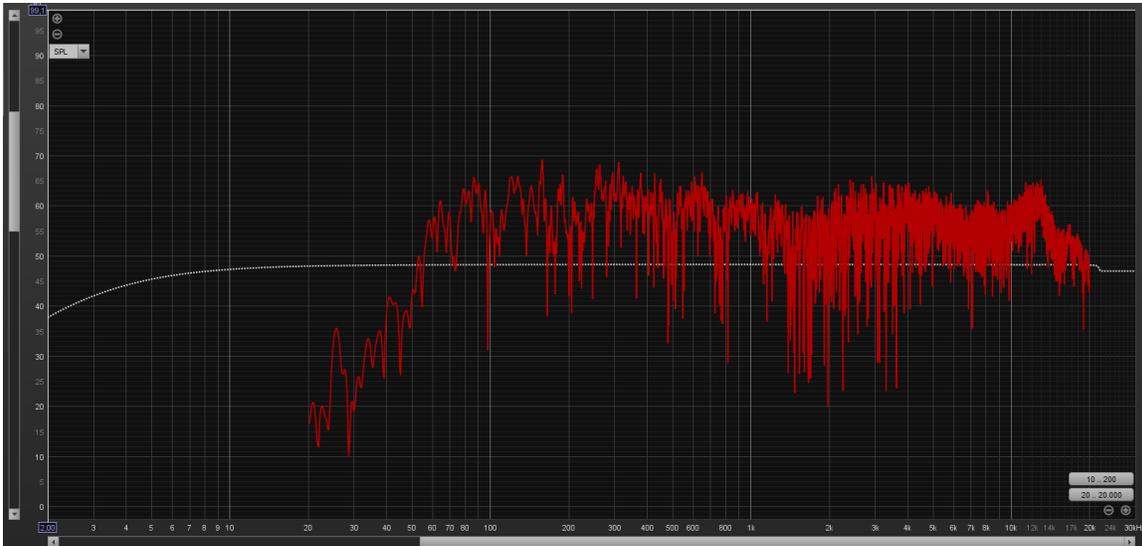


Figura 24. Auditorio Facultad de Artes y Humanidades ITM- impulse centro del escenario

3.3.1 Fuentes

La norma ISO 3382 recomienda utilizar un mínimo de tres posiciones de la fuente en la escena. La fuente debería estar situada en posiciones representativas de las utilizadas por los intérpretes en la sala y se recomienda una altura de la fuente de 1,5 m para evitar una modificación de baja frecuencia de la potencia de la salida de la fuente en el rango de frecuencias de medición.

Para realizar las medidas se han utilizado 5 posiciones de fuente en el escenario, correspondientes con las posibles posiciones de los oyentes. Dos posiciones a cada lado (derecha – izquierda), una en el centro del escenario y otra a más de 2m de la primera captura. Se trató de ubicar para este trabajo en campo lejano, ubicando el micrófono en la audiencia para así generar la captura que esta recibe.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

Se calculó una distancia aproximadamente de 4.5 a 5 m entre el intérprete y el micrófono. Debemos tener presente que la fuente que emite el sonido no es omnidireccional.

La medición acústica se realizó en dos recintos, el Auditorio del Centro Cultural de la Facultad de Artes de la Universidad de Antioquia (Carlos E. Restrepo) y el auditorio de la Facultad de Artes y Humanidades del ITM, ambos auditorios con una capacidad promedio de 500 personas.

Por facilidad de préstamos de equipos y por actividades académicas, en este trabajo se muestra el proceso de la medida en el auditorio de la facultad de Artes y Humanidades del ITM. En la Figura 25 se exponen los planos del auditorio de la Facultad de Artes y Humanidades del ITM diseñado con software *Sketchup*, realizado por el semillero de investigación Acusmusic en el año 2020. Las fotografías del auditorio Carlos E. Restrepo se exponen en los anexos.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		o	O
		Versión	\$VERSIO
		N	
		Fecha	\$FECHA

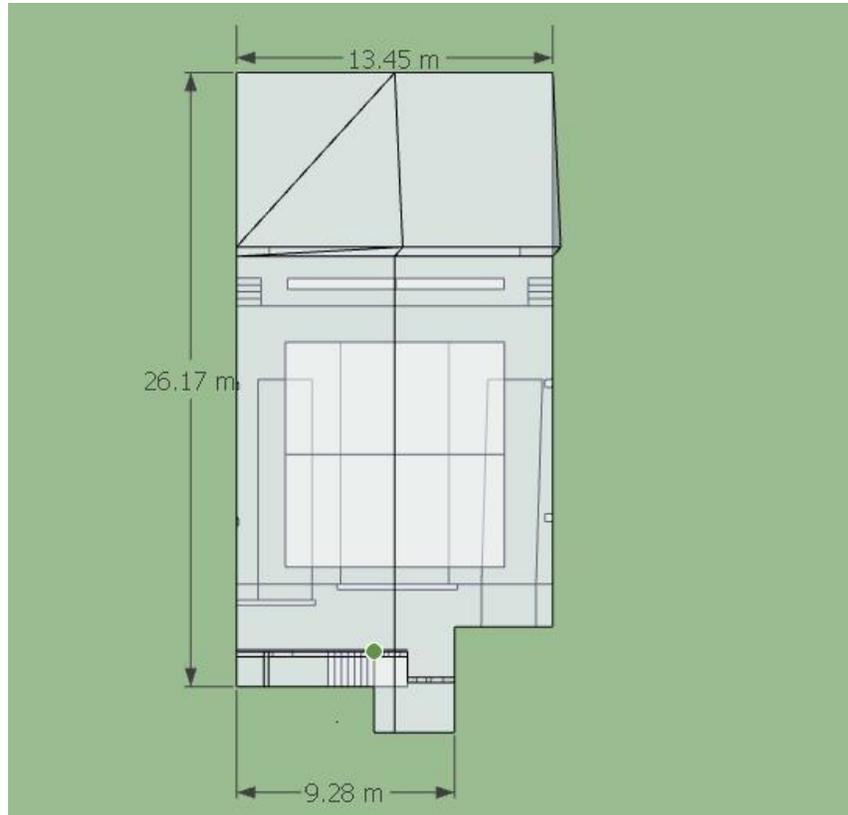


Figura 25. Plano Auditorio Facultad de Artes y Humanidades ITM

3.3.2 Condiciones de medida

El estado de ocupación de la sala al momento de realizar la medición fue del 0% como indica la norma ISO 3382. La sala no cuenta con aire acondicionado y las luces del recinto se encontraban encendidas. La tarima se encontraba ocupada con algunos muebles como pupitres y sillas como se expone en la Figura 26.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		o	O
		Versión	\$VERSIO
		N	
		Fecha	\$FECHA



Figura 26. Auditorio Facultad de Artes y Humanidades ITM

3.4 Proceso software REW y rePhase

Después de tener la respuesta de cada una de las posiciones en que se ubicó el micrófono, se procede a analizar con el *software REW* y *rePhase* para encontrar cuáles parámetros acústicos son los que deben ser corregidos al momento de hacer la grabación con el instrumento.

- **Paso 1**

Para iniciar, se ingresa a las preferencias del *software REW* y en la pestaña de *Analysis* se asegura de marcar la casilla *Add frequency dependent window* para así tener un suavizado de 1/21 de octava y 15 ciclos *FDW* para generar los filtros de corrección y evitar la “microgestión” de las correcciones de amplitud y fase. Luego en la pestaña de *Equaliser*, marcar el *EQ rePhase*, *software* libre con el que se busca realizar las correcciones. En las figuras 27 y 28 puede ver el debido proceso mencionado.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		o	O
		Versión	\$VERSIO
		Fecha	\$FECHA

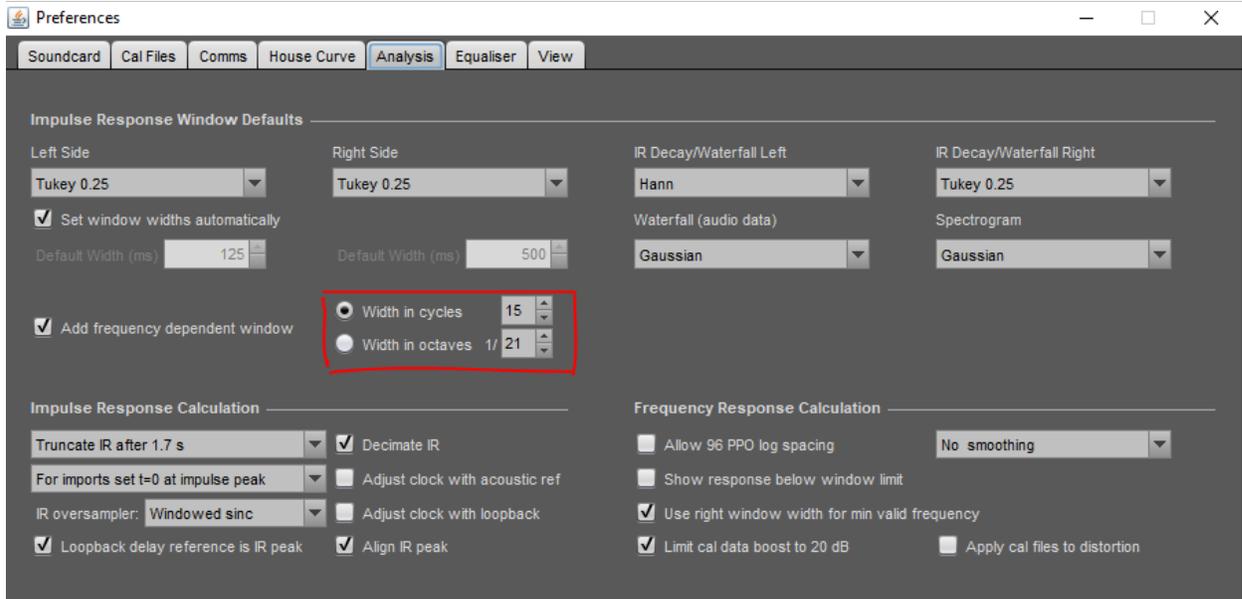


Figura 27. Ventana de preferencias REW Analysis (REW, 2022).

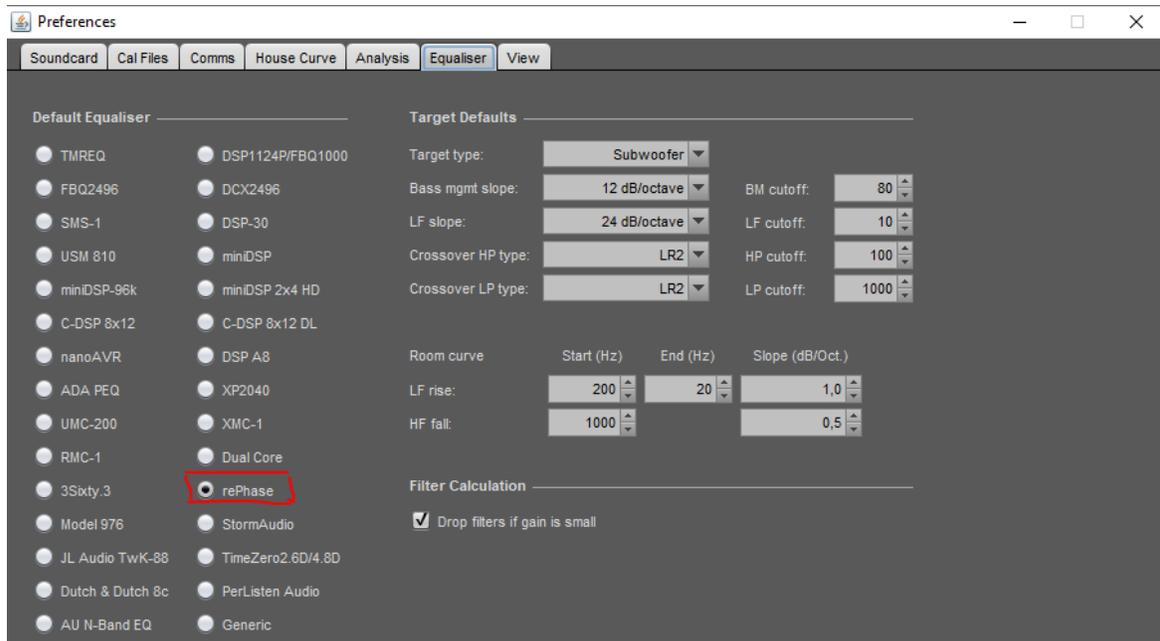


Figura 28. Ventana de preferencias REW Equalizer (REW, 2022).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		o	O
		Versión	\$VERSIO
		N	N
		Fecha	\$FECHA

- **Paso 2**

Se importan las medidas que fueron tomadas anteriormente en el auditorio (centro del público, derecha del público, izquierda del público y centro de la tarima) al software como se indica en la Figura 29.

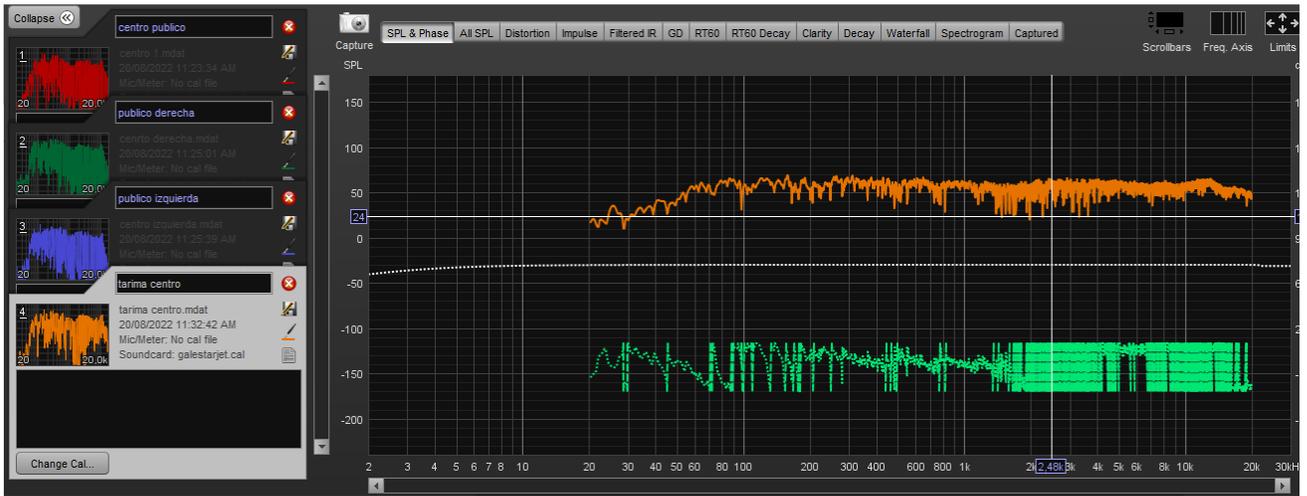


Figura 29. Ventana de REW medidas exportadas (REW, 2022).

Se realiza el promedio de las cuatro medidas para poder hacer el ajuste del recinto. Rueda de *Controls* que está en la parte superior derecha, opción *Time align* y *Vector Average*, como indica la Figura 30.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		o	O
		Versión	\$VERSIO
		N	
		Fecha	\$FECHA



Figura 30. Ventana de REW –Alineación de las medidas y Vector promedio (REW, 2022).

En la siguiente Figura (31) se observa que el vector promedio, tiene algunas fluctuaciones en la señal, y la gráfica azul está indicando la fase.



Figura 31. Ventana de REW –Vector promedio (REW, 2022).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		o	O
		Versión	\$VERSIO
		N	N
		Fecha	\$FECHA

• **Paso 3**

En la pestaña de *EQ* en la parte superior del *software*, el ecualizador *rePhase* debe estar activado como lo muestra la Figura 32.



Figura 32. Ventana de REW –EQ Filters (REW, 2022).

En la pestaña de *Target settings* se debe indicar el *full range speaker* y calcular el *Target* (objetivo), inmediatamente calcula el objetivo, las señales que superan el nivel las va a atenuar y las que estén por debajo las va a enfatizar. En la pestaña de *Filter Tasks* los filtros deben trabajar desde 20Hz a 20000Hz, que acople la respuesta de los filtros al *target*, que optimice las ganancias, optimice las ganancias y el Qs , optimice ganancias y frecuencias. Después de todo esto, el archivo debe ser guardado en formato XML (archivo simple de texto que sirve para representar la información de manera estructurada) . Como se expone en la Figura 33 y 34.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		o	O
		Versión	\$VERSIO
		Fecha	\$FECHA



Figura 33. Ventana de REW –Target Settings (REW, 2022).



Figura 34. Ventana de REW –Filter Tasks (REW, 2022).

En la Figura 35 vemos la manera correcta de exportar el archivo. *File* y exportar vector de todas las medidas como *text*.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		o	O
		Versión	\$VERSIO
		N	N
		Fecha	\$FECHA

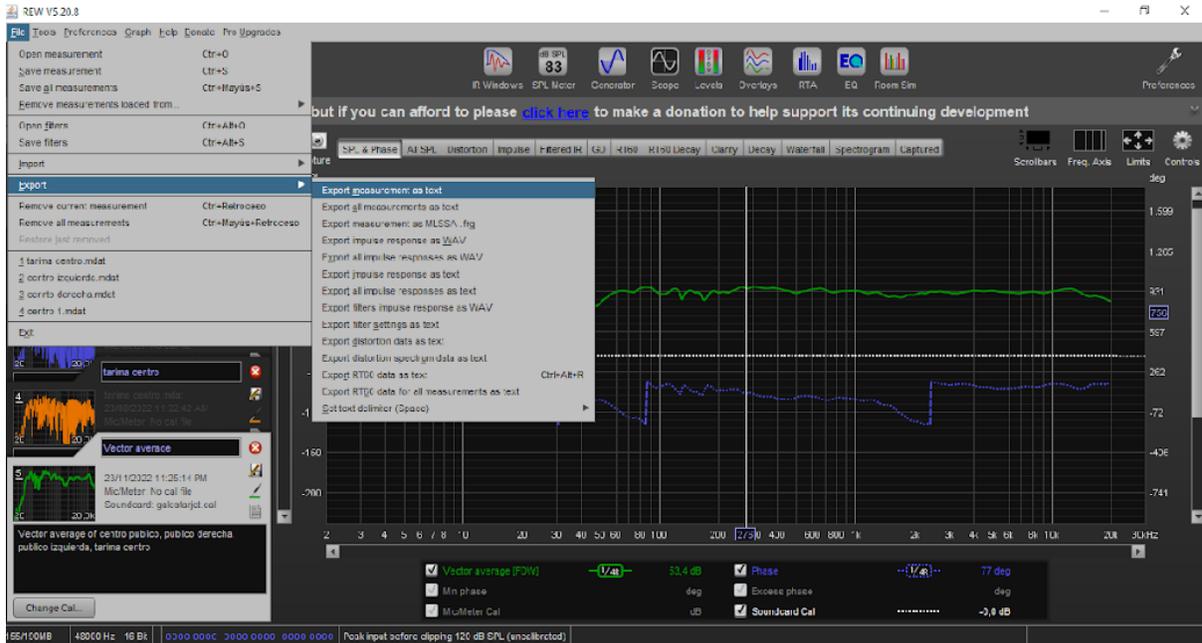


Figura 35. Ventana de REW –Export measurement as text (REW, 2022).

Antes de seguir con el procedimiento se debe aclarar que el *rePhase* trabaja con filtros FIR y Room EQ con filtros IIR ya definidos anteriormente. Para hacer este tipo de correcciones se deben trabajar con filtros FIR debido a que trabajan con fase lineal.

Un filtro de fase lineal tiene un retardo de grupo exactamente igual para todas las frecuencias, el retardo de grupo establece el “tiempo” que gasta cada frecuencia en atravesar el filtro. Este tipo de filtros aseguran que no se van a desfasar entre sí las diferentes frecuencias permitiendo un proceso puro sobre los sonidos que tengan transitorios muy destacados, sin colorear ni debilitar el carácter impulsivo.

- **Paso 4**

Se dirige al *software* libre *rePhase* e importa desde *File* la medida del vector promedio que se guardó en formato *text*. La Figura 36 enseña el proceso. Pestaña de

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		o	O
		Versión	\$VERSIO
		N	N
		Fecha	\$FECHA

Paraphrastic Gain EQ, Tools, se indica que cargue los filtros del *REW* que fueron guardados en pasos anteriores.

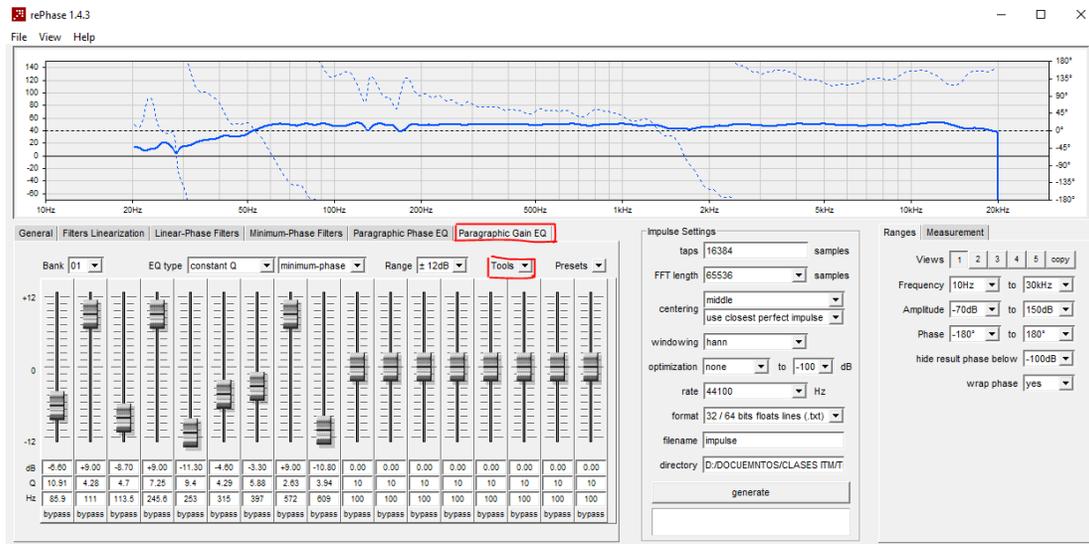


Figura 36. Equalización del REW en rePhase (rePhase, 2022).

- Paso 5

El archivo debe ser guardado en formato .wav de 64bits IEEEmono, como lo muestra la Figura 37. *Generate* y de forma automática crea la respuesta al impulso corregida. El archivo queda guardado de forma automática en la carpeta del programa *rePhase*.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		o	O
		Versión	\$VERSIO
		N	N
		Fecha	\$FECHA

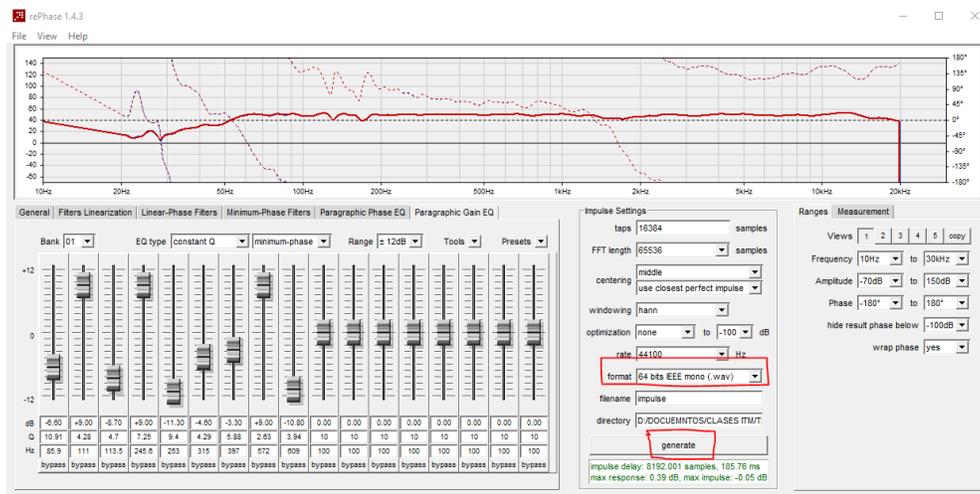


Figura 37. Respuesta impulse corregida (rePhase).

- Paso 6

Se vuelve al *Software REW* y desde file, *import impulse response* que se grabó en el paso anterior, se abre la respuesta de impulso que se generó en .wav

La Figura 38 muestra cómo quedó la corrección.

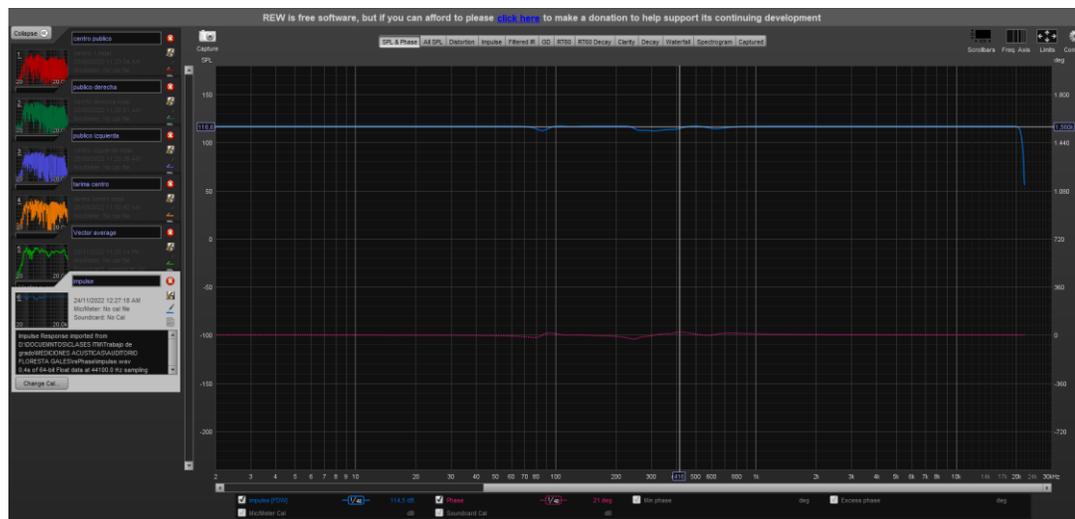


Figura 38. Respuesta impulse corregida .wav (REW, 2022).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		o	O
		Versión	\$VERSIO
		N	
		Fecha	\$FECHA

- **Paso 7**

En las opciones de la parte inferior de la ventana *SPL* se debe seleccionar la casilla 5: *Vector average* y 6: *impulso*. Desde la opción de *control* hay que indicar que debe hacer un *Trase aritmetic* entre el *Vector average* y el *impulso* y realizar una convolución (multiplicación), para poder combinar la respuesta que tenía en bruto y la respuesta impulso corregida. Generar la ecuación y el *software* le dará el nombre de *A time B*. Como lo muestra la Figura 39.



Figura 39. Ventana de REW –convolution (REW, 2022).

Después de esto, se debe producir las *Measurement actions* e indicar al *software* que averigüe el *Excess phase version* para poder terminar de pulir la señal y corregir todos los problemas de fase. Exportar como *text* y nombrarla como *Excess phase*, como se muestra en la figura 40.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		o	O
		Versión	\$VERSIO
		Fecha	\$FECHA

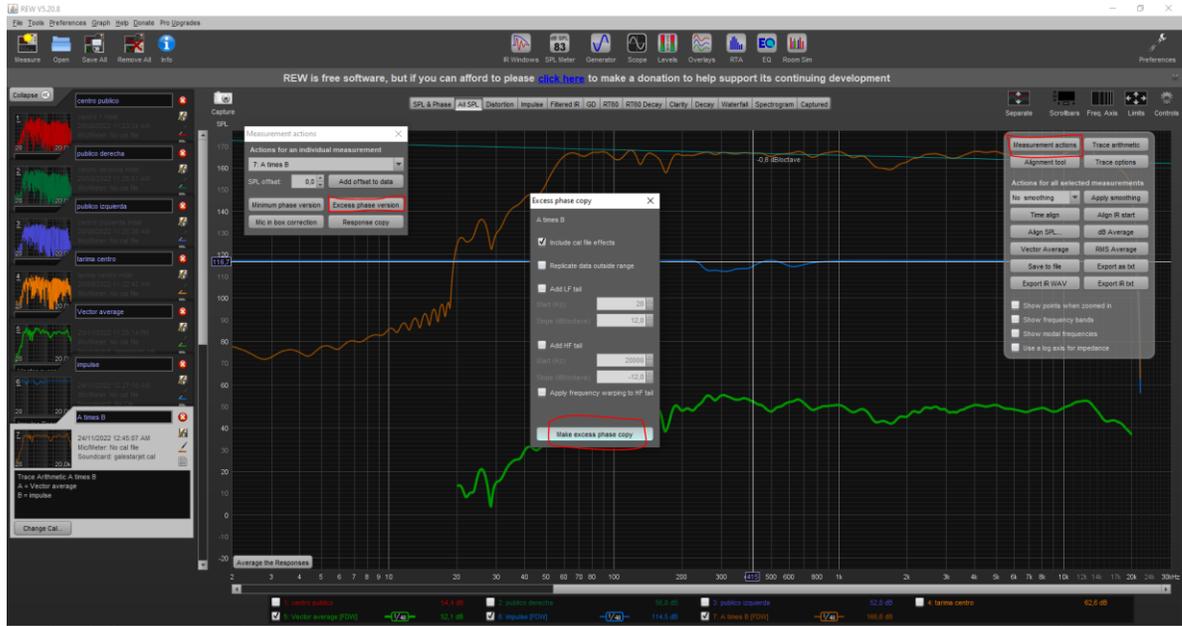


Figura 40. Ventana de REW- Excess phase

- Paso 8

Abrir nuevamente el software *rePhase* e importar el *Excess phase*. Se debe combinar con la medida original del vector promedio que ya se generó anteriormente. Cargar nuevamente los *Paragraphic Gain EQ* del REW y esperar el resultado. Dependiendo de la respuesta obtenida, se puede de forma manual lograr que la señal quede lo más plana posible modificando las frecuencias y manipulando los *faders*. La Figura 41 permite observar la respuesta final modificada. Generar nuevamente el *impulse* en .wav

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		o	O
		Versión	\$VERSIO
		N	N
		Fecha	\$FECHA

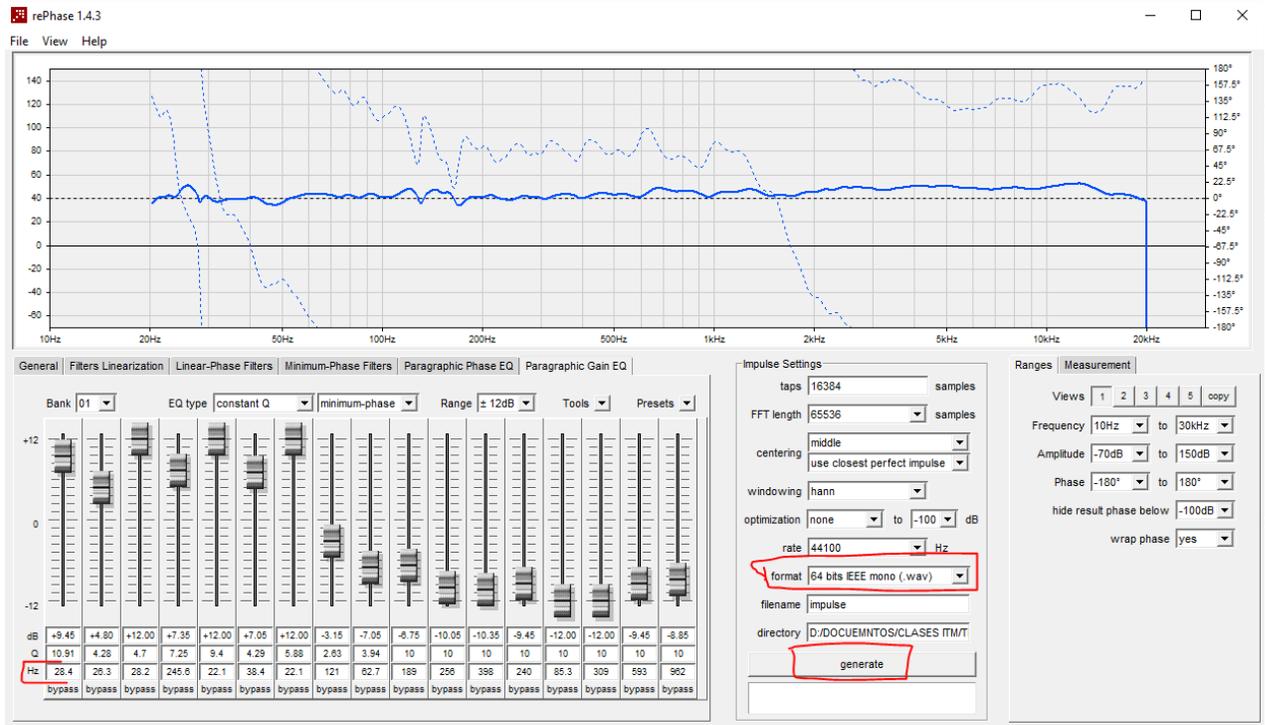


Figura 41. Ventana de rePhase- Impulso modificado (rePhase, 2022).

- Paso 9

Dirigirse de nuevo al *software REW*, importar el impulso y observar (Figura 42) que aquí la fase ha mejorado considerablemente, donde hay una fase cero en la mayoría de las frecuencias. Comparando con la señal inicial, se puede rectificar que el proceso mejoró considerablemente.

Este impulso es el que se va a usar como material para realizar la convolución y trabajar con los *EQ* y corregir a la hora de tomar las grabaciones con el instrumento musical.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

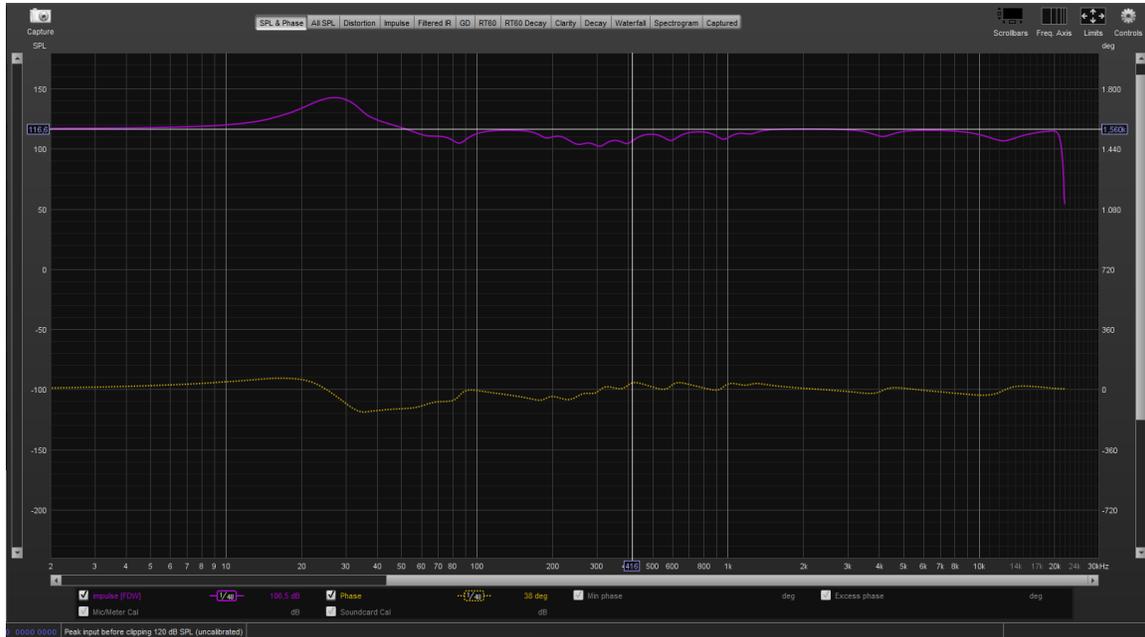


Figura 42. Ventana de REW- Fase del impulse final (REW, 2022).

La Tabla ISO 3382 mostrando el C80 antes y después de la corrección, figura 43 y

44.

ISO 3382 parameters												
	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630
EDT (s)	4,249	2,775	2,250	1,681	2,090	1,486	2,264	2,354	1,749	1,622	1,612	1,810
T20 (s)		3,601	2,544	2,495	1,969	1,942	2,191	1,845	1,869	1,520	1,949	1,729
T30 (s)			2,730	2,221	1,927	1,910	2,331	1,915	1,778	1,660	1,991	1,776
Topt (s)		3,601	2,724	2,222	1,926	1,929	2,321	1,956	1,791	1,817	1,950	1,776
T60M (s)												
C50 (dB)	-8,82	-0,27	6,37	-4,29	-3,19	-4,57	-4,55	0,33	0,57	-0,14	0,40	0,44
C80 (dB)	-9,14	-0,76	7,34	-2,22	-1,84	-3,60	-2,16	1,83	1,22	1,21	2,19	2,72
D50 (%)	11,6	48,5	81,3	27,1	32,4	25,9	26,0	51,9	53,3	49,2	52,3	52,5
TS (s)	0,336	0,190	0,121	0,177	0,158	0,149	0,161	0,121	0,105	0,093	0,096	0,087
	800	1.000	1.250	1.600	2.000	2.500	3.150	4.000	5.000	6.300	8.000	10.000
EDT (s)	1,826	1,798	1,555	1,572	1,626	1,338	1,328	1,302	1,010	1,158	1,026	0,840
T20 (s)	1,655	1,622	1,721	1,770	1,671	1,589	1,416	1,301	1,261	1,186	1,003	0,819
T30 (s)	1,777	1,627	1,797	1,770	1,709	1,564	1,409	1,341	1,268	1,208	1,002	0,831
Topt (s)	1,695	1,601	1,717	1,757	1,748	1,576	1,420	1,343	1,274	1,219	1,005	0,829
T60M (s)												
C50 (dB)	0,13	2,45	2,81	0,26	0,41	2,41	2,57	5,44	5,83	5,35	6,57	8,18
C80 (dB)	2,46	3,45	3,70	2,80	2,83	5,01	4,87	7,05	7,99	7,13	8,64	10,52
D50 (%)	50,7	63,7	65,6	51,5	52,3	63,5	64,4	77,8	79,3	77,4	81,9	86,8
TS (s)	0,089	0,067	0,073	0,094	0,078	0,058	0,063	0,041	0,034	0,033	0,027	0,019

Figura 43. C80 antes de la corrección

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

ISO 3382 parameters													×
	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	
EDT (s)	0,596	0,473	0,372	0,298	0,238	0,186	0,149	0,119	0,095	0,074	0,060	0,047	
T20 (s)	0,385	0,306	0,241	0,193	0,154	0,120	0,096	0,077	0,061	0,048	0,039	0,031	
T30 (s)	0,381	0,302	0,238	0,190	0,152	0,119	0,095	0,076	0,060	0,048	0,038	0,030	
Topt (s)	0,404	0,321	0,252	0,202	0,162	0,126	0,101	0,081	0,064	0,050	0,040	0,032	
T60M (s)													
C50 (dB)					369,35		370,62	364,76	362,54	359,62	359,17	356,93	
C80 (dB)							374,44	366,87	366,89	364,41	361,26	360,03	
D50 (%)					100,0		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
TS (s)	0,062	0,049	0,039	0,031	0,025	0,019	0,015	0,012	0,010	0,008	0,006	0,005	
800 1.000 1.250 1.600 2.000 2.500 3.150 4.000 5.000 6.300 8.000 10.000													
EDT (s)	0,037	0,030	0,024	0,019	0,015	0,012	0,010	0,007	0,006	0,005	0,004	0,003	
T20 (s)	0,024	0,019	0,015	0,012	0,010	0,008	0,006	0,005	0,004	0,003	0,002	0,002	
T30 (s)	0,024	0,019	0,015	0,012	0,010	0,008	0,006	0,005	0,004	0,003	0,002	0,002	
Topt (s)	0,025	0,020	0,016	0,013	0,010	0,008	0,006	0,005	0,004	0,003	0,002	0,002	
T60M (s)													
C50 (dB)	354,37	352,56	350,53	348,36	348,27	346,29	343,12	341,86	340,07	338,36	337,75	336,87	
C80 (dB)	360,48	356,89	355,29	353,44	351,50	349,54	347,29	345,58	344,00	342,40	341,58	340,73	
D50 (%)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
TS (s)	0,004	0,003	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	

Figura 44. C80 después de la corrección

Note como C80 sube exageradamente, esto tiene sentido ya que la idea es mejorar en la corrección de los parlantes y por lo tanto compensar el sonido en el recinto, impactando así en la grabación del saxofón. No es un factor determinante de la acústica real del recinto ya que solo es posible con tratamiento acústico.

3.5 Proceso de convolución en REAPER

Para hacer una convolución en tiempo real con Reaper y una respuesta al impulso medida y corregida con Room EQ Wizard, se pueden seguir los siguientes pasos:

1. Medición de la respuesta al impulso: se utiliza un micrófono de medición y se realiza una medición de la respuesta al impulso del sistema de reproducción de audio en un espacio determinado. La medición se realiza en varios puntos del espacio para obtener una idea general de la respuesta del sistema.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		Versión	\$VERSIO
		Fecha	\$FECHA

2. Análisis y corrección de la respuesta al impulso: se utiliza el software *Room EQ Wizard* para analizar la respuesta al impulso y corregir cualquier problema de fase o de respuesta en frecuencia. El resultado final es una respuesta al impulso corregida y lista para su uso en la convolución.

3. Configuración de la convolución en tiempo real: en Reaper, se crea una pista de audio y se inserta un plugin de convolución. Se carga la respuesta al impulso corregida en el *plug-in*.

4. Configuración del enrutamiento: se configura el enrutamiento de la señal de audio para que la señal se envíe a la pista de convolución.

5. Procesamiento de la señal en tiempo real: se reproduce la señal de audio en Reaper y la señal se convoluciona en tiempo real con la respuesta al impulso corregida.

La convolución en tiempo real se utiliza para corregir la respuesta de frecuencia y la fase en sistemas de sonido en vivo. Esto permite ajustar el sonido de los altavoces en tiempo real para adaptarse a las características de la sala o del sistema de sonido en el que se está trabajando. En cambio, la convolución en el proceso de grabación en vivo se utiliza para procesar la señal de audio antes de la reproducción. Esto permite corregir cualquier problema de fase o de respuesta en frecuencia de antemano y producir una grabación de alta calidad.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		Versión	\$VERSIO
		Fecha	\$FECHA

El estado de la sala en el momento de la grabación con el instrumento se encontraba en las mismas condiciones en las cuales fueron realizadas las medidas acústicas, tal y como indica la norma ISO 3382.

Es así cómo se decidió realizar el registro sonoro ubicando el micrófono de la misma manera que en la captura de las medidas acústicas, teniendo los mismos ejes de referencia; azimut (derecha e izquierda) y elevación (adelante y atrás). En la siguiente Figura 45, se puede ver la ubicación del micrófono y el intérprete, el estudiante de Artes de la Grabación y Producción Musical, Juan Pablo Correa. El micrófono se posicionó de esta manera ya que se busca tener una captura de sonido con la percepción del oyente.



Figura 45. Grabación por Juan P. Correa

Después de haber analizado la respuesta al impulso del auditorio a través del software *Room EQ Wizard*, se tiene una idea clara de cómo se comporta la sala y cómo esta afecta e influye en el contenido melódico del instrumento. Teniendo claro que la sala no se

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		o	O
		Versión	\$VERSIO
		N	
		Fecha	\$FECHA

encuentra tratada de manera acústica, el saxofón no se comporta igual en todas las frecuencias.

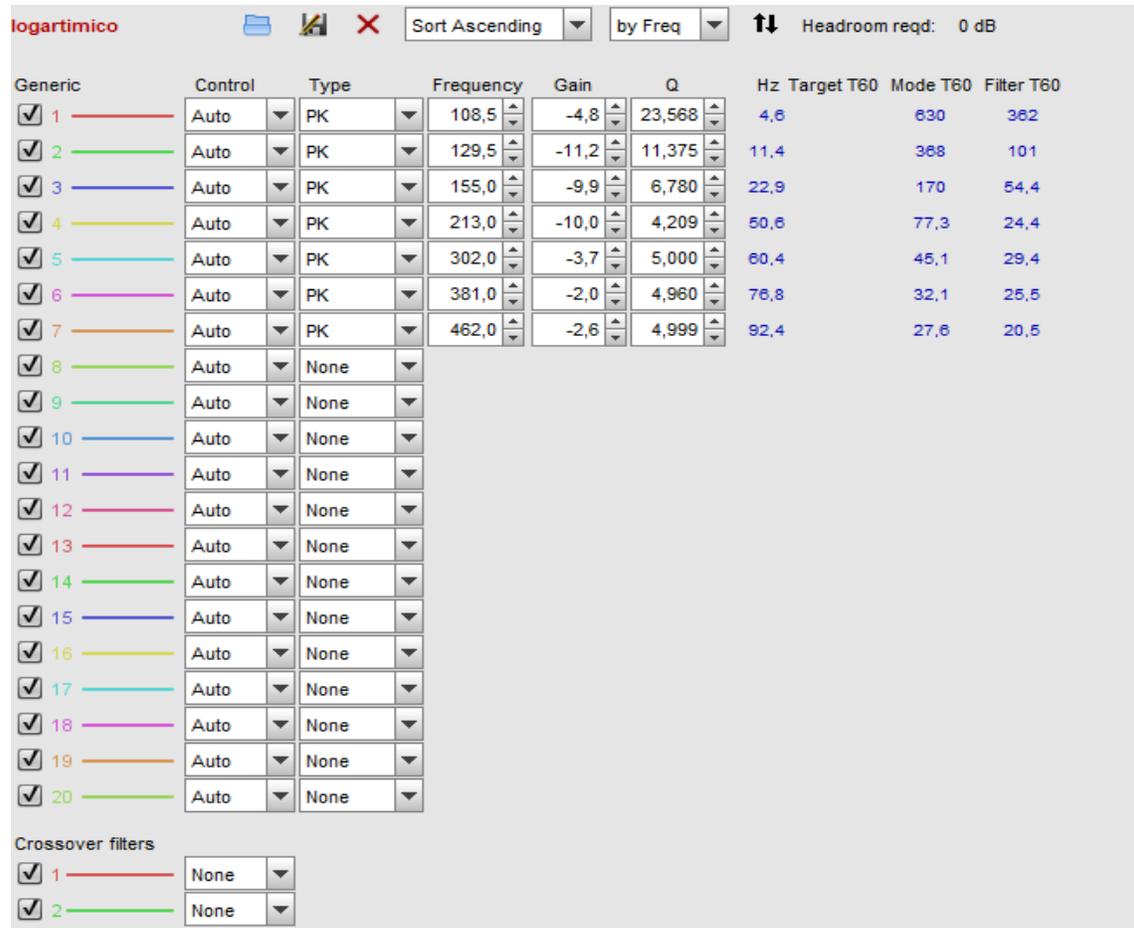
Al analizar la respuesta al impulso del recinto, se encontró que esta presenta fluctuaciones y reflexiones que producen cancelaciones o sumatorias al momento de grabar el saxofón. Esto ocurre en las frecuencias bajas del instrumento como se puede ver en la figura 46, que corresponde a la nota más grave (Sib - 138Hz). Generalmente estas frecuencias son las más críticas que van de 138Hz a 200Hz.



Figura 46. Frecuencia Sib del saxofón Alto (REW. 2022).

En el caso de las cancelaciones, se podría contrarrestar el fenómeno con filtros digitales (Figura 47) adaptativos como solución electrónica ya que la acústica del recinto no se puede modificar.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		o	O
		Versión	\$VERSIO
		N	N
		Fecha	\$FECHA



Generic	Control	Type	Frequency	Gain	Q	Hz	Target T60	Mode T60	Filter T60
<input checked="" type="checkbox"/> 1	Auto	PK	108,5	-4,8	23,568	4,6		630	362
<input checked="" type="checkbox"/> 2	Auto	PK	129,5	-11,2	11,375	11,4		368	101
<input checked="" type="checkbox"/> 3	Auto	PK	155,0	-9,9	6,780	22,9		170	54,4
<input checked="" type="checkbox"/> 4	Auto	PK	213,0	-10,0	4,209	50,6		77,3	24,4
<input checked="" type="checkbox"/> 5	Auto	PK	302,0	-3,7	5,000	60,4		45,1	29,4
<input checked="" type="checkbox"/> 6	Auto	PK	381,0	-2,0	4,960	76,8		32,1	25,5
<input checked="" type="checkbox"/> 7	Auto	PK	462,0	-2,6	4,999	92,4		27,6	20,5
<input checked="" type="checkbox"/> 8	Auto	None							
<input checked="" type="checkbox"/> 9	Auto	None							
<input checked="" type="checkbox"/> 10	Auto	None							
<input checked="" type="checkbox"/> 11	Auto	None							
<input checked="" type="checkbox"/> 12	Auto	None							
<input checked="" type="checkbox"/> 13	Auto	None							
<input checked="" type="checkbox"/> 14	Auto	None							
<input checked="" type="checkbox"/> 15	Auto	None							
<input checked="" type="checkbox"/> 16	Auto	None							
<input checked="" type="checkbox"/> 17	Auto	None							
<input checked="" type="checkbox"/> 18	Auto	None							
<input checked="" type="checkbox"/> 19	Auto	None							
<input checked="" type="checkbox"/> 20	Auto	None							

Crossover filters

<input checked="" type="checkbox"/> 1	None
<input checked="" type="checkbox"/> 2	None

Figura 47. Filtros que entrega el RoomEQ para contrarrestar cancelaciones y sumas dentro del recinto.

Reaper trae integrado una herramienta que permite trabajar con respuestas al impulso a partir del proceso de convolución. Dentro de las respuestas de impulso más utilizadas está la de amplificadores y las de salas. En este caso las de sala serán usadas para convolución el sonido del saxofón y la respuesta al impulso del auditorio, además se contrastará con la respuesta al impulso corregida en tiempo real, para tener un mayor acercamiento de cuáles son los parámetros acústicos que se deben tener en cuenta a la hora de hacer la grabación del instrumento en vivo.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		o	O
		Versión	\$VERSIO
		N	N
		Fecha	\$FECHA

- **Paso 1**

Una vez recogida la respuesta al impulso, se inicia un secuenciador de audio (Reaper) y se importa la grabación del saxofón para realizar una primera prueba.

- **Paso 2**

En otra pista, se carga un *plugin* de reverberación convolutiva, el *plugin* gratuito *ReaVerb* (Figura 48) nativo de Reaper. Se adjunta el archivo de audio con la respuesta al impulso al *plugin* y, mediante un algoritmo, este extrae las características de la reverberación del sonido transitorio: el tiempo de reverberación (TR), la envolvente del sonido transitorio (tiempos de ataque, decay, sustain y release), cantidad de reflexiones, espacio aproximado de la sala, y otros parámetros. En función de todos estos datos, el *plugin* genera una reverberación que se puede utilizar como efecto.

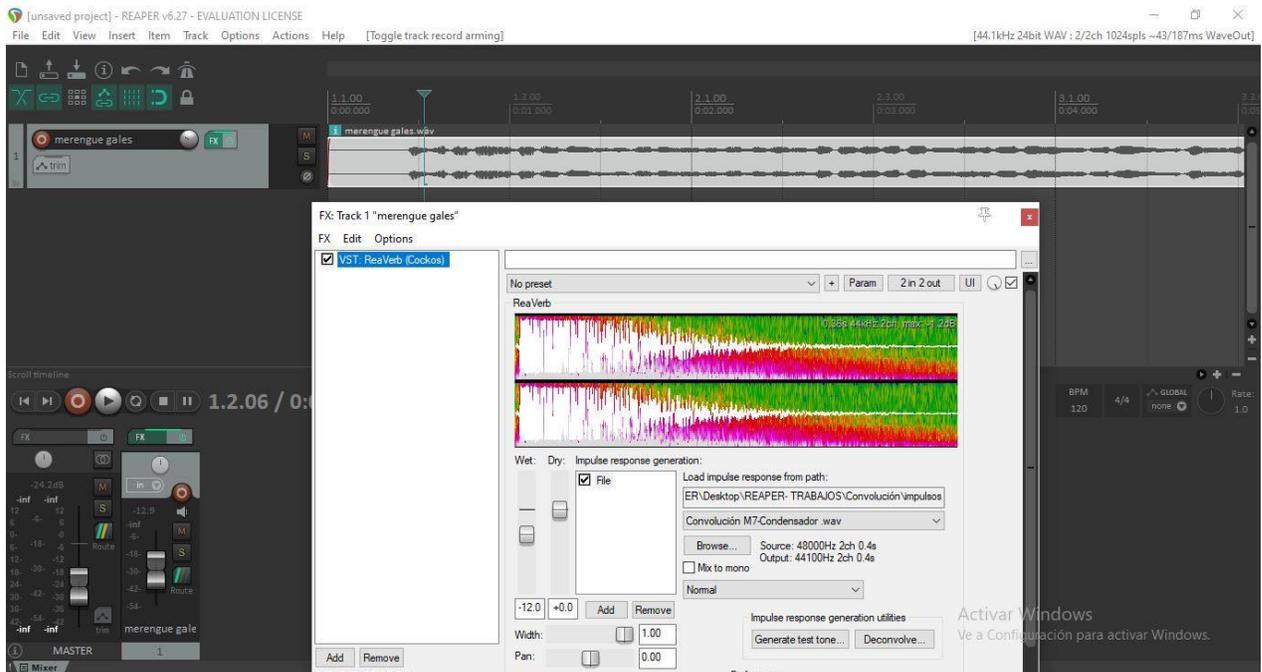


Figura 48. Ventana de plugin *ReaVerb* de *Reaper*

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		Versión	\$VERSIO
		Fecha	\$FECHA

- **Paso 3**

Para finalizar el proceso, se realiza un envío de la captura del saxofón al canal donde está el plugin *ReaVerd* y se escucha el resultado con el impulso de la sala sin corregir. Luego se hace el mismo proceso con la respuesta al impulso corregido, para así escuchar y comparar ambos sonidos.

El resultado será analizado para saber si es útil en la presentación en vivo o solo como herramienta para luego mejorar la grabación del saxofón y aumentar la calidad

Este proceso permite tener un acercamiento real a la sonoridad de la sala con el instrumento y así podemos identificar qué tipo de procesos acústicos o electrónicos o combinados son los más aptos para mejorar la calidad del sonido del instrumento en el lugar.

3.5.1 Cómo corregir la latencia

Para evitar la latencia en un proceso de *Digital Room Correction* mediante la convolución en tiempo real a través de un *plugin* de Reaper, se deben seguir ciertos pasos:

1. Usar un *plugin* de convolución en tiempo real: hay varios *plugins* de convolución disponibles en Reaper, pero no todos son adecuados para su uso en tiempo real. Es importante seleccionar un *plugin* que esté optimizado para trabajar con baja latencia.

2. Configurar correctamente el *plugin*: Una vez que se ha seleccionado un plugin de convolución adecuado, es importante configurarlo correctamente. Esto incluye

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

seleccionar la respuesta al impulso correcta y ajustar los parámetros de convolución según sea necesario para minimizar la latencia.

3. Ajustar la latencia en el *plugin*: El plugin de convolución debe tener la opción de ajustar la latencia. Esto se hace para asegurarse de que el audio se sincronice correctamente y se evite la aparición de ecos o retrasos en el sonido.

4. Usar un sistema de monitoreo de baja latencia: Para asegurarse de que el proceso de *DRC* se esté llevando a cabo en tiempo real sin retrasos notables, se recomienda usar un sistema de monitoreo de baja latencia. Esto puede lograrse utilizando una interfaz de audio de baja latencia o un software de monitoreo que tenga la capacidad de reducir la latencia.

Para evitar la latencia en un proceso de *Digital Room Correction* mediante la convolución en tiempo real a través de un *plugin* de Reaper, es importante seleccionar un *plugin* adecuado, configurarlo correctamente, ajustar la latencia en el *plugin* y utilizar un sistema de monitoreo de baja latencia. Con estos pasos, se puede lograr una corrección de sala digital efectiva y en tiempo real para aplicaciones de sonido en vivo.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		o	O
		Versión	\$VERSIO
		n	N
		Fecha	\$FECHA

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Debido a que no se hicieron medidas de tipo cuantitativo después de haber corregido el sistema de audio, se optó por obtener resultados de tipo cualitativo, es decir, auditivamente por medio de músicos. Se invitaron tres músicos saxofonistas, se aclara que no se usó una muestra más grande para la prueba porque resulta complicada la sincronización con todos los músicos.

Para este caso, los citados fueron: Edison Mesa, Juan José Restrepo y Gustavo Guevara, Maestros en saxofón, egresados de la Universidad de Antioquia, para evaluar y validar la metodología propuesta en este trabajo, a través de un antes y un después de la corrección del sistema de audio.

Estos son algunos de los comentarios que dan los tres Maestros del instrumento.

“El sonido con la corrección en la salida de los parlantes se escucha con más claridad. Cuando escuchamos el pasaje antes, hay notas del saxofón que no se entienden y después con el proceso se entienden más las notas y se nivela el sonido del instrumento” Edison Mesa.

“Yo siento que el saxo se envuelve más en el espacio. Antes del proceso, el saxo va por un lado y se pierde por momentos, mientras que, después del proceso se puede escuchar de forma clara el registro completo del instrumento con un sonido más definido y entendible” Juan José Restrepo.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

“La melodía que toca Juan se oye mejor en el después, incluso se logra distinguir el sonido de las llaves del saxo cuando toca, siento que el cambio es perceptible y da un muy buen resultado” Gustavo Guevara

Se infiere que auditivamente mejoran algunas características del saxofón como son claridad en las notas y pasajes con escalas rápidas son más inteligibles. Se debe aclarar que este método es netamente electrónico; es decir, aplicado a las cabinas y parlantes con la ayuda de filtros FIR, tal como se hace en los estudios de grabación para corregir problemas de la sala con los monitores, siguiendo la misma línea en auditorios entre volúmenes de 1000m² hasta 3000m² el método resulta efectivo, aunque no es posible actuar directamente sobre parámetros como el C80 y el tiempo de reverberación ya que sí dependen cien por ciento de la acústica del recinto.

Los resultados del proceso de filtrado con el software libre *rePhase* son satisfactorios, además, que es un proceso sencillo y que aún se pueden explotar más herramientas del mismo. Por ejemplo, filtros paramétricos, filtros con fase mínima, filtros de fase lineal y otras que mejoran los espectros de frecuencia que requiere el usuario. La curva resultante y por tanto la respuesta al impulso obtenida resultó lo más plana posible con mínimos de cambios de fase. Después de analizar la respuesta al impulso final en el REW, el cálculo de C80 se identificó alto y esto significa que la inteligibilidad de la música aumenta.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Conclusiones del proceso de corrección de sistemas de reproducción de audio o altavoces por medio de *rePhase* y *Room EQ Wizard*:

1. La corrección de sistemas de reproducción de audio mediante el uso de software como *rePhase* y *Room EQ Wizard* es una técnica efectiva para mejorar la respuesta de los altavoces y lograr una mejor calidad de sonido en un espacio determinado.
2. La corrección se lleva a cabo a través de la medición de la respuesta al impulso del sistema de audio y la creación de un filtro inverso que corrige las irregularidades en la respuesta de los altavoces y reduce los efectos negativos de la acústica del espacio.
3. La precisión de la corrección dependerá de la calidad de la medición inicial y de la precisión en la creación del filtro inverso. Es importante realizar múltiples mediciones y asegurarse de que la respuesta al impulso medida sea representativa del comportamiento del sistema en el espacio donde se utilizará.
4. La corrección de sistemas de audio puede ser compleja y requiere un conocimiento profundo de los principios de la acústica y del funcionamiento del software utilizado. Es importante seguir las instrucciones del software cuidadosamente y asegurarse de tener una comprensión clara de los parámetros que se están ajustando.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		Versión	\$VERSIO
		Fecha	\$FECHA

5.2 Errores comunes en el proceso de corrección de sistemas de reproducción de audio o altavoces:

1. No realizar mediciones precisas y representativas de la respuesta al impulso del sistema de audio.
2. Utilizar filtros con exceso de corrección que pueden afectar negativamente la calidad del sonido.
3. No tener en cuenta la directividad de los altavoces y la influencia de la acústica del espacio en la respuesta del sistema de audio.
4. No verificar la corrección después de aplicar los filtros inversos, lo que puede resultar en una respuesta de frecuencia aún peor que antes de la corrección.

Este trabajo sirve como referente y precedente en la Universidad y en Medellín para futuros estudios en materia de acústica musical tanto para el saxofón como en otros instrumentos y espacios. Es una propuesta metodológica que puede ser ajustada a futuro, a medida que se continúe con la experimentación, a miras de conseguir mejoras en los resultados.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		o	O
		Versión	\$VERSIO
		n	N
		Fecha	\$FECHA

6. REFERENCIAS

Acoustic Measurements by Leo L. Beranek: Collectible: Very Good Hardcover (1949) First Edition, Second Printing. | *Singing Saw Books*. (s. f.). Recuperado 10 de marzo de 2022, de <https://www.abebooks.com/first-edition/Acoustic-Measurements-Leo-L-Beranek-John/20091233661/bd>

Acoustics: Sound Fields, Transducers and Vibration—2nd Edition. (s. f.). Recuperado 10 de marzo de 2022, de <https://www.elsevier.com/books/acoustics-sound-fields-transducers-and-vibration/beranek/978-0-12-815227-0>

Amengual Garí, S., Kob, M., & Lokki, T. (2019, septiembre 8). *Analysis of trumpet performance adjustments due to room acoustics*.

Brandtsegg, Ø., & Saue, S. (2017). *Live Convolution with Time-variant Impulse Response*.

Brannmark, L.-J., & Sternad, M. (2015, noviembre 14). *Controlling the impulse responses and the spatial variability in digital loudspeaker-room correction*.

Brandtsegg, Ø., Saue, S., & Lazzarini, V. (2018). Live Convolution with Time-Varying Filters. *Applied Sciences*, 8(1), Art. 1. <https://doi.org/10.3390/app8010103>

Bull, M. (s. f.). *Acoustics in Live Jazz – An investigation into the relationship of room-acoustics and improvised acoustic music*. Recuperado 10 de marzo de 2022, de https://www.academia.edu/37464143/Acoustics_in_Live_Jazz_An_investigation_into_the_relationship_of_room_acoustics_and_improvised_acoustic_music

Colomer, L. (s. f.). Capítulo 1. El sonido como vibración. *Acústica Musical*. Recuperado 10 de marzo de 2022, de <http://cursodeacusticamusical.blogspot.com/>

Condemor, C. (s. f.). *DRCoP: Digital Room Correction on Pendrive*. Recuperado 10 de marzo de 2022, de https://www.academia.edu/32581325/DRCoP_Digital_Room_Correction_on_Pendrive

Craig, A., Harper, A., & Moore, D. (2011, noviembre 16). *An Investigation Into The Effectiveness of Active Room Correction*.

Fase: La cara oculta del audio (II). (s. f.). Hispasonic. Recuperado 27 de enero de 2023, de <https://www.hispasonic.com/tutoriales/fase-cara-oculta-audio-ii/37859>

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		Versión	\$VERSIO
		Fecha	\$FECHA

Farina, A. (2001). Acoustic quality of theatres: Correlations between experimental measures and subjective evaluations. *Applied Acoustics*, 62, 889-916. [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(00\)00082-7](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(00)00082-7)

Farina, A. (2007). Advancements in Impulse Response Measurements by Sine Sweeps. *Journal of The Audio Engineering Society*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Advancements-in-Impulse-Response-Measurements-by-Farina/1aa1dd47e2990728e9b6413543dc1eb7454c8193>

Fontana, F., Gibin, L., Rocchesso, D., & Ballan, O. (1999). Common pole equalization of small rooms using a two-step real-time digital equalizer. *Proceedings of the 1999 IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics. WASPAA'99 (Cat. No.99TH8452)*, 195-198. <https://doi.org/10.1109/ASPAA.1999.810883>

Hak, C. C. J. M., & Wenmaekers, R. H. C. (2010). The Impact of Sound Control Room Acoustics on the Perceived Acoustics of a Diffuse Field Recording. *WSEAS Transactions on Signal processing*, 6(4), 175-185.

Janardhana, V. R. (2020, marzo 24). Difference Between FIR Filter and IIR Filter (with Comparison chart). *Circuit Globe*. <https://circuitglobe.com/difference-between-fir-filter-and-iir-filter.html>

Kalkandjiev, Z. S. (2013). *Room acoustics viewed from the stage: Solo performers' adjustments to the acoustical environment*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Room-acoustics-viewed-from-the-stage-%3A-Solo-%27-to-Kalkandjiev/ebadf489af065d1a979556faecacf43643d7dcde>

Luizard, P., Gerber, S., & Bernardoni, N. H. (2020). *How voice production of singers is influenced by room acoustics*. 80. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02550579>

Music, Acoustics & Architecture by Leo L. Beranek: Good Hardcover (1962) First Edition., No Signature | Tacoma Book Center. (s. f.). Recuperado 10 de marzo de 2022, de <https://www.abebooks.com/first-edition/Music-Acoustics-Architecture-Leo-L-Beranek/31104594475/bd>

Nistal Hurlé, J. (2015, julio 3). *Implementación de plug-ins para REAPER: Módulo de reverberación convolutiva en tiempo real y sistema para la medición de respuestas acústicas en salas [Info:eu-repo/semantics/bachelorThesis]*. *E.T.S.I y Sistemas de Telecomunicación (UPM)*. <https://oa.upm.es/39847/>

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

(PDF) *The impact of sound control room acoustics on the perceived acoustics of a diffuse field recording*. (s. f.). Recuperado 10 de marzo de 2022, de https://www.researchgate.net/publication/229045065_The_impact_of_sound_control_room_acoustics_on_the_perceived_acoustics_of_a_diffuse_field_recording?enrichId=rgreq-4ecf85c0b29e17a1cfbefb8da73d5b35-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzIyOTA0NTA2NTtBUzoyNDEyNTc0OTg4MDQyMjRAMTQzNDUzMTY3ODAzMA%3D%3D&el=1_x_3&_esc=publicationCoverPdf

[PDF] *The impact of sound control room acoustics on the perceived acoustics of a diffuse field recording* | Semantic Scholar. (s. f.). Recuperado 10 de marzo de 2022, de <https://www.semanticscholar.org/paper/The-impact-of-sound-control-room-acoustics-on-the-a-Hak-Wenmaekers/f2796cbd03f3b794a977af346b2df565480fbaf5>

Rey Mora, D. J., & Gil González, L. X. (2013). *Valoración subjetiva de las preferencias acústico-musicales del bambuco y pasillo colombiano*. <https://bibliotecadigital.usb.edu.co/entities/publication/37b7c5db-136b-422c-ac95-ce2c24ae7e43>

Room in room acoustics: The influence of the direct/diffuse sound field ratio in a listening room on played back recorded acoustics. (s. f.). Recuperado 10 de marzo de 2022, de <https://5dok.net/document/7qvk620z-acoustics-influence-direct-diffuse-listening-played-recorded-acoustics.html>

Toole, F. (2015). The Measurement and Calibration of Sound Reproducing Systems. *Journal of the Audio Engineering Society*, 63, 512-541. <https://doi.org/10.17743/jaes.2015.0064>

Vocal adaptation of singers to room acoustics | Request PDF. (s. f.). Recuperado 10 de marzo de 2022, de https://www.researchgate.net/publication/339385389_Vocal_adaptation_of_singers_to_room_acoustics

Venturi, A., Farina, A., & Tronchin, L. (2013). On the effects of pre-processing of impulse responses in the evaluation of acoustic parameters on room acoustics. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 19(1), 015006. <https://doi.org/10.1121/1.4800277>

Wrobel, M. (2011). *DRC (Digital Room Correction)*. 7.

García Monzón, N. (2021). Estudio del acondicionamiento acústico del "Auditori Nou Dàlaquàs". Valencia.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		o	O
		Versión	\$VERSIO
		n	N
		Fecha	\$FECHA

7. ANEXOS

El registro fotográfico presentado a continuación hace parte de la medición acústica realizada en el auditorio del Centro Cultural de la Facultad de Artes de la Universidad de Antioquia, Carlos E Restrepo.



Anexo 1. Auditorio Carlos E. Restrepo



	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		o	O
		Versión	\$VERSIO
		N	N
		Fecha	\$FECHA

Anexo 2. Ubicación del micrófono dentro del Auditorio Carlos E. Restrepo



Anexo 3. Auditorio Carlos E. Restrepo

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		o	O
		Versión	\$VERSIO
		N	
		Fecha	\$FECHA

Especificaciones técnicas

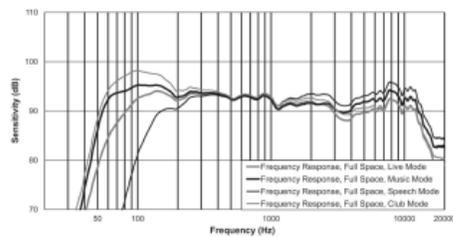
Respuesta de frecuencia (-3 dB) ¹ :	55 Hz - 18 kHz
Rango de frecuencia (-10 dB):	42 Hz - 20 kHz
SPL máximo ² :	127 dB
Cobertura (H x V):	90° x 60°
Potencia nominal:	1000 W
Transductor LF:	Woofer de 380 mm (15 pulgadas), EVS-15L
Transductor HF:	DH-1K
Conectores:	(2) conectores XLR/TRS combo, (1) entrada de 3,5 mm y (1) salida de enlace XLR
Gabinete:	Polipropileno
Rejilla:	Acero de calibre 18 con una capa pulverizada en color negro
Color:	Negro
Dimensiones (Al. x An. x Pr.):	685 mm x 426 mm x 383 mm (27 pulg. x 17 pulg. x 15 pulg.)
Peso neto:	17,3 kg (38,0 lb)

Peso de envío: 23.0 kg (50,78 lb)

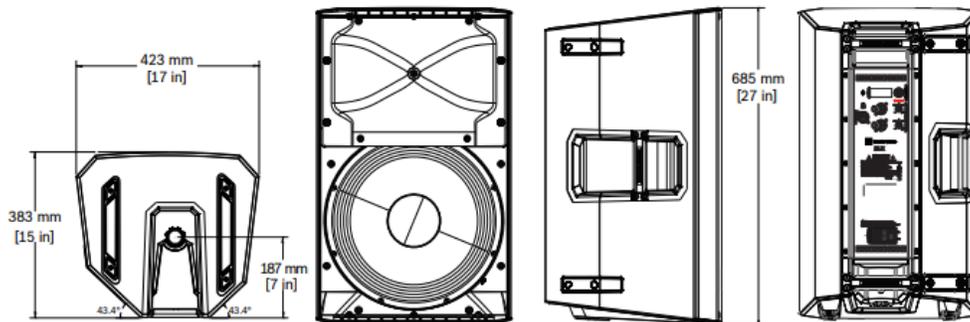
Consumo de potencia³: 100 – 240 V-, 50 – 60 Hz, 0,8 – 0,5 A

1. Medición de todo el espacio usando el valor preestablecido de MUSIC DSP.
2. El SPL máximo se mide a 1 m mediante el uso de ruido rosa de banda ancha en el nivel máximo de salida.
3. La especificación de corriente se especifica a 1/8 de la potencia de salida completa.

Frequency response:



Dimensiones:



Anexo 4. Especificaciones técnicas de la cabina (Electro Voice, s. f.)

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		o	O
		Versión	\$VERSIO
		N	
		Fecha	\$FECHA

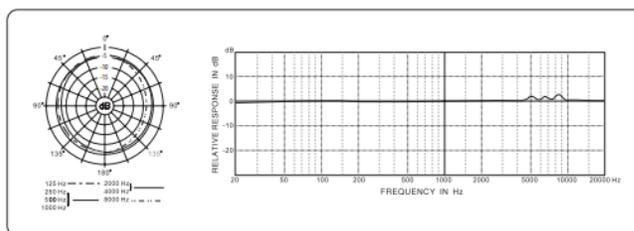
MEASUREMENT CONDENSER MICROPHONE ECM8000 Technical Specifications

Ultra-Linear Measurement Condenser Microphone



FEATURES

- Ultra-linear condenser microphone for measurement and recording application
- Perfectly suited for room equalization application plus high-resolution studio recording and live applications
- Exceptionally flat frequency response and ultra-high sound resolution
- Evenly weighted, true omnidirectional pattern
- Works with phantom power from +15 to +48 V
- Perfect for use with the BEHRINGER ULTRACURVE or any other analyzer
- Ultra-low noise transformerless FET input eliminates low-frequency distortion
- Gold-plated 3-pin XLR connector for highest signal integrity
- Swivel stand mount and transport case included
- High-quality components and exceptionally rugged construction ensure long life
- Conceived and designed by BEHRINGER Germany

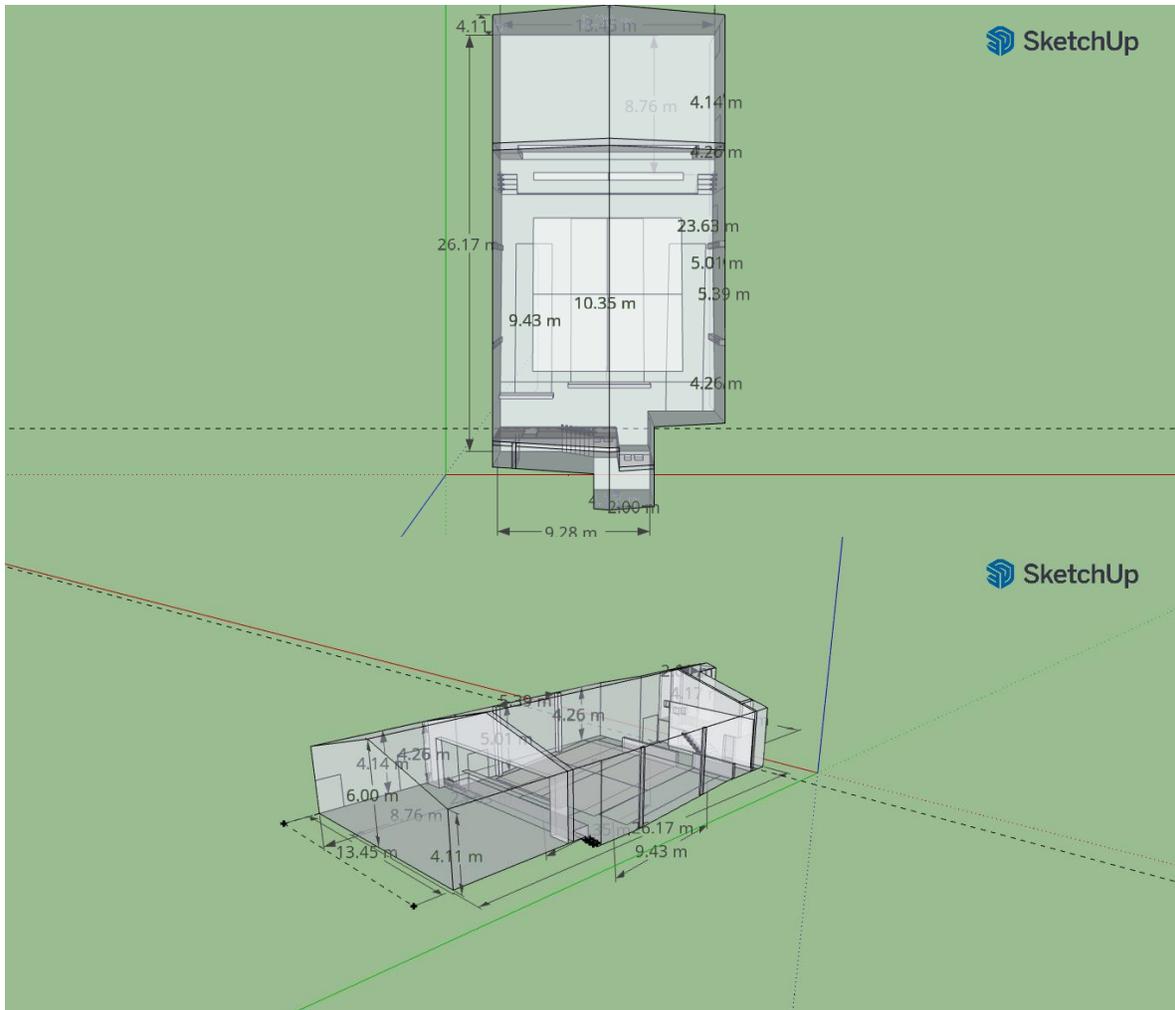


SPECIFICATIONS

Type	electr. condenser
Polar Pattern	omnidirectional
Impedance	200 Ohms
Sensitivity	70 dB

Anexo 5. Especificaciones técnicas Micrófono Behringer ECM8000 (Red Chip Company Ltd., 2011).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		o	O
		Versión	\$VERSIO
		N	
		Fecha	\$FECHA



Anexo 6. Planos auditorio Facultad de Artes y Humanidades del ITM

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIG
		o	O
		Versión	\$VERSIO
		n	N
		Fecha	\$FECHA

FIRMA ESTUDIANTES _____ FIRMA ASESORES _____ _____ <div style="text-align: right; padding-right: 50px;"> FECHA ENTREGA: _____ </div>
--