



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

REVERBERACIÓN POR CONVOLUCIÓN BASADO EN LA ESTRUCTURA
DE LAS IGLESIAS PATRIMONIALES SAN FRANCISCO Y BASÍLICA DEL
VOTO NACIONAL DE LA CIUDAD DE QUITO.

AUTOR

Andrea Analy Pinto Morales

AÑO

2020



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

REVERBERACIÓN POR CONVOLUCIÓN BASADO EN LA ESTRUCTURA DE
LAS IGLESIAS PATRIMONIALES SAN FRANCISCO Y BASÍLICA DEL VOTO
NACIONAL DE LA CIUDAD DE QUITO.

Trabajo de titulación presentado en conformidad con los requisitos establecidos
para optar por el título de Ingeniera de Sonido y Acústica

Profesor Guía

Juan Francisco Jiménez Pacheco, MSc.

Autora

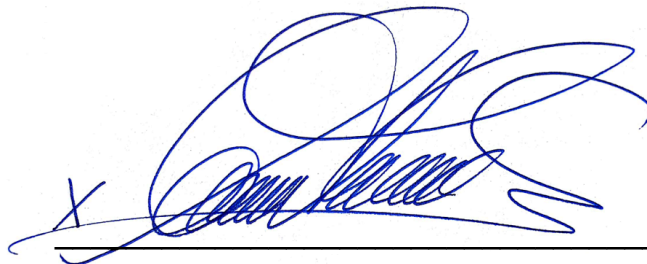
Andrea Analy Pinto Morales

Año

2020

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA.

“Declaro haber dirigido el trabajo, Reverberación por convolución basado en la estructura de las iglesias patrimoniales San Francisco y Basílica del Voto Nacional de la ciudad de Quito, a través de reuniones periódicas con el estudiante, Andrea Analy Pinto Morales en el semestre 202010, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los trabajos de titulación”.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and flourishes, positioned above a horizontal line.

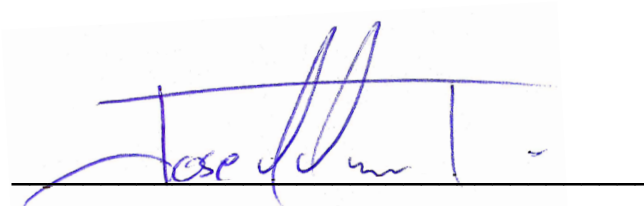
Juan Francisco Jiménez Pacheco

Máster Universitario en Postproducción Digital

CI: 1717340192

DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR.

“Declaro haber revisado este trabajo, Reverberación por convolución basado en la estructura de las iglesias patrimoniales San Francisco y Basílica del Voto Nacional de la ciudad de Quito., del estudiante Andrea Analy Pinto Morales, en el semestre 202010, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.



José Antonio Álvarez Torres

Magister en Musicología

CI: 1708232267

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE.

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes”



Andrea Analy Pinto Morales

CI: 1724754526

AGRADECIMIENTO

Agradezco a todos los profesionales que con sus conocimientos aportaron a este proyecto. Principalmente a mi team por ser incondicionales Rosi, Carlos, Amy, Andrés e Iza.

Por último a todas las personas que me dieron la oportunidad para brillar y demostrar mi potencial en este camino. Gracias.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi tribu Rosi, Alfredo, Pepita y Caro. Gracias por tanto amor y magnánimo apoyo.

A la razón de mi existir, Carlos y Martina son mi inspiración.

RESUMEN

La investigación de este proyecto está basada en la correlación del cómputo de señales acústicas cualitativas de un recinto y la tecnología del audio digital.

A partir de las recomendaciones técnicas de la norma UNE-EN ISO 3382-1 (Medición de parámetros en recintos. Parte 1: Salas de espectáculo), esta describe los protocolos necesarios a ser acatados para la evaluación acústica del tiempo de reverberación y la teoría sobre el posible comportamiento de las reflexiones en un espacio cerrado rectangular, el recinto se valora, tomando mediciones de cada superficie. Con el fin de desarrollar un patrón de posiciones que defina dónde colocar la fuente sonora y los micrófonos, para así obtener las grabaciones de la respuesta al impulso dentro del recinto de estudio.

Dichas grabaciones se realizan dentro de las iglesias: Basílica del Voto Nacional y San Francisco. Las mismas contienen el sonido resultante de haber excitado los recintos por barridos frecuenciales e impulsos explosivos, generados según los procesos pertinentes aquí descritos.

Los archivos de audio son depurados, estandarizados en base a parámetros técnicos, transformados a formato wav para ser cargados dentro del *plug in* IR Live de la casa comercial Waves, el mismo que gracias a sus principios de funcionamiento realiza la convolución entre la señal de audio de un instrumento y el impulso obtenido en las iglesias.

El resultado final es la reverberación digitalizada de dos iglesias de Quito.

ABSTRACT

This research is based on the computational correlation between qualitative acoustic signals in an interior space and digital audio technology.

We analyzed an enclosed space by measuring each of its surfaces using the technical recommendations from UNE-EN ISO 3382-1 Standard (Measurement of room acoustic parameters. Part 1: Performance space), which describes the required protocols for evaluating acoustic reverberation time, and the theory of possible behavior of reflection in interior rectangular spaces.

Recordings were done in the following churches: Basílica del Voto Nacional y San Francisco. They contain the resulting sound from having excited the spaces through frequency sweeps and explosive bursts generated according to the relevant processes described above.

The audio files were cleaned up, standardized per technical parameters and converted to wav format, so that these could be uploaded to the plug in IR Live by Waves, which due to its functionality is able to convolute between the audio signal from an instrument and the pulse gathered in these houses of worship.

The final result is the digitized reverberation of two churches in Quito.

INDICE

1. Capítulo I: Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación.....	3
1.3. Alcance	4
1.4. Objetivos	5
1.4.1. Objetivo general.....	5
1.4.2. Objetivos específicos.....	5
2. Capítulo II: Marco teórico	5
2.1. Procesamiento digital de señales	5
2.1.1. Notación de sistema	6
2.1.2. Notación de señales.....	6
2.2. Convolución	7
2.2.1. Respuesta al impulso	8
2.2.2. Propiedades de la convolución	8
2.3. Transformada rápida de Fourier	9
2.4. Filtros de fase lineal	10
2.5. Tiempo de reverberación	11
2.6. Reverberación en dispositivos	11
2.6.1. Tipos de reverberación.....	13
2.6.2. Parámetros de reverberación artificial.....	14
2.7. Reverberación y convolución	15
2.7.1. Altiverb.....	16
2.7.2. IR Live	17
3. Capítulo III: Metodología	17
3.1. Recintos	17
3.1.1. Iglesia San Francisco	17
3.1.2. Iglesia Basílica del Voto Nacional	18

3.2. Técnica de evaluación de los recintos	19
3.2.1. Posiciones de fuente y micrófonos.....	20
3.2.2. Equipos.....	21
3.2.3. Método de respuesta impulsiva integrada.....	24
3.2.4. Método de grabación <i>in situ</i>	25
3.3. Implementación.....	25
3.3.1. Cadena electroacústica.....	25
3.3.2. Barrido sinusoidal.....	27
3.3.3. Impulso explosivo.....	28
3.4. Evaluación de recintos.....	28
3.4.1. Evaluación Iglesia San Francisco	28
3.4.2 Evaluación Iglesia Basílica del Voto Nacional.....	30
3.5. Procesamiento de señales.....	32
3.5.1. Parámetros técnicos estándar de audio.....	32
3.5.2. Obtención de archivos IR.....	33
3.5.3. Procesamiento de archivos IR.....	34
3.6. Diseño y aplicación de encuesta auditiva	35
3.6.1 Número de muestras.....	36
4. Capítulo IV: Análisis de resultados	37
4.1. Análisis de la respuesta en frecuencia	37
4.1.1. Impulso de San Francisco.....	37
4.1.2. Impulso de la Basílica del Voto Nacional	39
4.2. Tabulación y análisis de encuestas	41
5. Proyecciones.....	46
6. Conclusiones y recomendaciones	47
6.1. Conclusiones.....	47
6.2. Recomendaciones	49
REFERENCIAS	52
ANEXOS	55

1. Capítulo I: Introducción

1.1. Antecedentes

La revolución en la industria musical se dio gracias a las innovaciones del desarrollo de la tecnología para el registro y almacenamiento del audio. Los ingenieros de sonido y productores musicales, desde entonces, permanecen en la búsqueda de recrear nuevos sonidos, efectos y ambientes. En todo este proceso, la reverberación ha sido el efecto más solicitado (De Man *et al.*, 2017).

Llegó a tener tal relevancia, que si se deseaba registrar un audio con cualquier tipo de ambiente referente a la espacialidad de un recinto y que este aportara al sonido del instrumento, en el pasado, la única manera de obtener este efecto era grabarlo *in situ*. Es decir, encontrar el lugar que tuviera las características sonoras solicitadas, pues la reverberación se basa completamente en la arquitectura, dimensión física, geometría y materiales de un entorno (Timón., 2019).

El efecto más popular en los años cincuentas era *chamber reverb*, se lograba en un cuarto medianamente pequeño con un tiempo de reverberación largo, dentro de estos se encontraba un dispositivo de reproducción de audio y un par de micrófonos. (Burgues., 2014).

Sin embargo, se presenta como impedimento técnico el hecho de no poder modificar las propiedades del efecto que un recinto generaba, a causa de esto, surge como solución el diseño de diferentes tipos de reverberaciones artificiales. Lo que dio paso a los dispositivos electro-mecánicos, que recrean reverberaciones en base a resortes o elementos electrónicos (Owsinski., 2014). Creando dispositivos de alta calidad, en los cuales ahora sí se podía modificar diversos parámetros para conseguir el efecto de reverberación deseado por el usuario, se usaron masivamente en el área musical y audiovisual. La llegada

del audio digital también permitió el desarrollo de *plug ins*, como por ejemplo, efectos de reverberación programados (Marui., 2007).

El primer algoritmo programado de reverberación fue implementado en los años setentas, consistió en un *delay* cuya salida se retroalimenta a la entrada con variaciones de ganancia (Schroeder., 1962). Este simula el efecto de la reflexión del sonido sobre una única superficie.

A pesar de que esta tecnología cumplía con las exigencias del audio profesional, las reverberaciones algorítmicas en *plug ins*, a criterio de los eruditos del audio, carecían de naturalidad y fidelidad al ambiente que decían simular. Es así que se provoca la unión de: la acústica en recintos, los sonidos impulsivos, la teoría matemática y computacional de la convolución (Brice., 2001).

Desde el siglo XX se reconoce a la acústica como una ciencia y se desarrollan conceptos propios de la física del sonido. Con ello nace la evaluación de recintos, la construcción de los mismo con normas técnicas y mejoras (Long., 2014). Concretamente se ha demostrado que la propagación del sonido, dentro de un espacio finito, tiene como consecuencia la reflexión que se genera a partir de la incidencia de una onda sonora sobre los elementos del mismo (Nathan., 1998).

Los sonidos impulsivos son una implementación conceptual y práctica para la evaluación de recintos, estos cualitativamente son cortos y con una alta carga de intensidad sonora. Su existencia deriva en la concepción de la respuesta al impulso, la cual desarrolla que la correlación entre los sonidos impulsivos y sus fuentes es realmente congruente, ya que a pesar de la existencia de ruidos adicionales y distractores, la impresión sensorial del comportamiento de la onda no se estropea (Benade., 1990). También, que cada composición de materiales dentro de un área termina siendo como una huella sonora única (Olson., 1967).

Matemáticamente las ondas sonoras dentro de la acústica teórica son descritas por las Series de Fourier. J.B Fourier desarrolló la relación de las ondas sonoras sobre el tiempo, donde una señal de cierta frecuencia cuenta con amplitud y periodo las cuales dependen del tiempo. Todo esto descrito en las funciones exponenciales imaginarias, las cuales salen de la suma de senos y cosenos. (Brice,. 2001)

La mayoría de la tecnología del audio digital esta fundamentada en las Series de Fourier y el Teorema de Nyquist, el cual describe como las ondas sonoras logran ser traducidas a lenguaje digital por medio de la conversión analógica/digital (Thompson,. 2018). En 1999, gracias a todo este desarrollo teórico y la implementación del procesamiento digital de señales en base a la convolución, la empresa Sony implementan el DRE S777, un *hardware* que permitía procesar dos señales por medio de la convolución, logrando un efecto de reverberación realmente fiel al entorno que describía el impulso y sus ajustes. La unidad tenía un repositorio de la respuesta al impulso (logrado por un barrido frecuencial dentro de las locaciones) con diferentes ajustes en un CD-ROM (Brice,. 2001).

En la actualidad una de las reverberaciones por convolución más potentes del mundo es Altiverb, de la casa comercial de audio profesional Audio Ease. El real potencial de este *software* como *plug in*, es que su interface además de permitir modificar los típicos parámetros de una reverberación permite elegir diferentes posiciones del recinto que se desee. En su biblioteca de respuesta al impulso tiene a la sala de conciertos Sydney Opera House, un Jumbo Jet e incluso la Catedral de Notre Dame. Además, tiene un manual de cómo grabar impulsos propios para usarlos inmediatamente (Theodore,. 2004).

1.2. Justificación

Las reverberaciones por convolución son reconocidas en el mundo del audio profesional porque han logrado digitalizar la sonoridad de espacios únicos por su acústica característica, gracias al registro de la respuesta al impulso de dichos lugares.

Esta investigación busca identificar si tienen o no identidad sonora las estructuras arquitectónicas con su composición de materiales basadas en la tendencia colonial y neogótica de dos iglesias representativas de Quito. En base a la evaluación de los recintos y la obtención de la respuesta al impulso, mediante procesos técnico sustentados.

También, determinar si este proyecto puede ser utilizado como una herramienta auditiva, con el fin de aportar de otra forma al patrimonio cultural y a la producción audiovisual o musical.

1.3. Alcance

Crear archivos de audio en formato wav con el registro de la respuesta al impulso (IR) de la reverberación que posee el interior de las iglesias Basílica del Voto Nacional y San Francisco. Los cuales cumplan estándares técnicos que exige la reverberación por convolución del *plug in* IR Live y que sean aptos para lograr correctamente el proceso convolutivo, todo ejecutado en el *software* Pro-Tools.

Se harán también grabaciones *in situ* para posteriormente realizar una comparación y análisis de la calidad resultante del proyecto, donde las muestras sean evaluadas auditivamente por un grupo representativo de profesionales del audio en la ciudad de Quito.

De esta forma se abarcan áreas específicas de electroacústica, entrenamiento auditivo y producción musical que serán de utilidad a la hora de obtener una mejor percepción subjetiva de la potente herramienta que es la reverberación por convolución y su participación en el audio profesional.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Comprobar que existe identidad sonora en la estructura arquitectónica de un recinto, procesando la respuesta al impulso en una reverberación por convolución y el análisis por percepción subjetiva mediante la escucha de ingenieros de sonido y productores musicales.

1.4.2. Objetivos específicos

- Obtener el sonido de la reverberación característica en la estructura arquitectónica de las iglesias: San Francisco y la Basílica del Voto Nacional.
- Generar archivos de la respuesta al impulso (IR) en formato wav con el fin de ser procesados por el *plug in* de reverberación por convolución, IR Live de la casa comercial Waves .
- Evaluar mediante una comparación auditiva y gráficos espectrales las propiedades de la reverberación que poseen las iglesias: San Francisco y la Basílica del Voto Nacional.

2. Capítulo II: Marco teórico

2.1. Procesamiento digital de señales

El procesamiento digital de señales (PDS) hace referencia al manejo y manipulación de información donde se clasifican diferentes tipos de señales y sistemas matemáticos.

Para comprender mejor el funcionamiento y definir las tareas que puede realizar el PDS, se precisa de la conceptualización de señal y sistemas.

2.1.1. Notación de sistema

La correlación que existirá en un sistema está basado en variables de entrada, salida y procesamiento (correspondencia o transformación).

Por lo tanto, el sistema se denota:

$$y(n) = H[x(n)] \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde:

$y(n)$: conjunto de salida.

$x(n)$: conjunto de entrada.

H : operador.

El conjunto de entrada como señal $x(n)$ sufre una transformación y se convierte en la señal $y(n)$, como se observa en la figura 1, el operador H de la ecuación (1) expresa transformación:

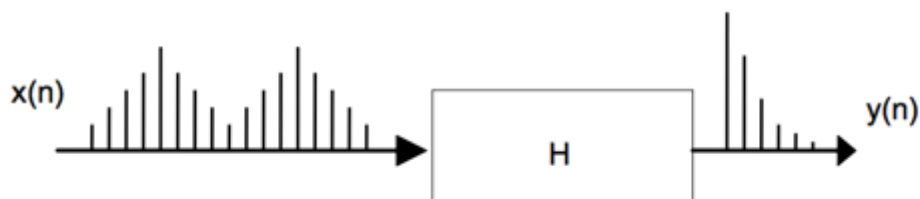


Figura 1. Representación de un sistema en forma entrada salida.

Tomado de Escobar, 2008.

2.1.2. Notación de señales

Una señal es una magnitud física escalar la cual depende del tiempo, espacio y del tipo. Una señal matemáticamente puede ser expresada según los términos de una función con una o más variables independientes. En este caso continuas, según su naturaleza se definen para todo tiempo t .

2.1.2.1. Señales para evaluación

Acústicamente las señales se definen como presión sonora. Y se clasifican:

- Señal de impulso unitario (*Delta Dirac*): son propias de los sistemas de dominio discreto y continuo, por la combinación lineal de impulsos escalados y desplazados sobre el tiempo. Se puede generar un análisis matemático de cualquier sistema LTI (Lineal de tiempo invariante) en término de su respuesta al impulso. Acústicamente es una señal de espectro plano para el oído.
- Señales deterministas (*Sweep tone*): son señales de contenido espectral y nivel parcialmente constante por un largo periodo de tiempo, se pueden escribir únicamente mediante una expresión matemática explícita, como: tabla de datos o una regla definida con precisión.

2.2. Convolución

La convolución es una operación matemática usada en el análisis de sistemas lineales, representa la suma de productos. Es considerada una operación básica en el procesamiento digital de señales (PDS).

Matemáticamente la convolución se expresa como:

$$y[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} (x[k]h[n - k]) \quad \text{Ecuación (2)}$$

Opera entre tres variables de evaluación: señales de entrada, la respuesta al impulso y la señal de salida:

$$y[n] = x[n] * h[n] \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde:

$x[n]$: señal de entrada.

$y[n]$: señal de salida.

$h[n]$: señal de respuesta al impulso.

Dicha ecuación determina la transformada si se conoce la respuesta al impulso. Y así se da paso a que esta operación matemática se convierta en un algoritmo para un sistema digital.

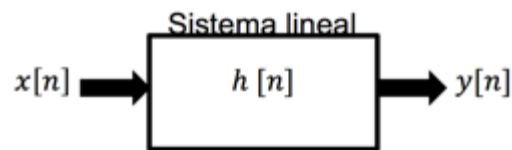


Figura 2. Representación de convolución.

2.2.1. Respuesta al impulso

Se denomina así al comportamiento del sistema resultante a la excitación de un impulso unitario o función delta.

Matemáticamente es representada por $h[n]$ como se especifica en la ecuación (3), y esto sólo sucederá mientras las condiciones iniciales sean cero.

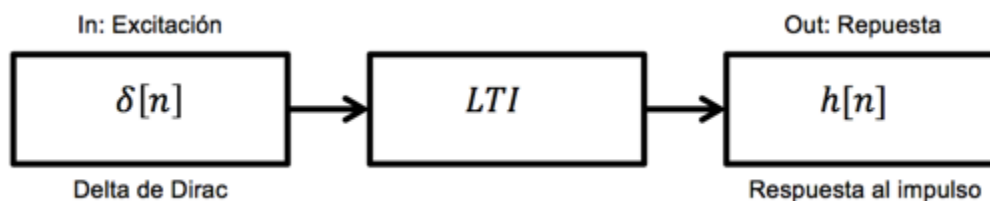


Figura 3. Representación de respuesta al impulso.

2.2.2. Propiedades de la convolución

Las propiedades de los agentes de convolución son:

- Conmutativa

$$f \times g = g \times f \quad \text{Ecuación (4)}$$

- Asociativa

$$f \times (g \times h) = (g \times f) \times h \quad \text{Ecuación (5)}$$

- Distributiva

$$f \times (g + h) = (g \times f) + (f \times h) \quad \text{Ecuación (6)}$$

- Asociativa con multiplicación escalar

$$a(f \times g) = (af) \times g = f \times (ag) \quad \text{Ecuación (7)}$$

Donde a se representa todo número complejo.

- Teorema de convolución

$$F(f \times g) = (F(f)) \cdot (F(g)) \quad \text{Ecuación (8)}$$

Donde F pertenece a la Transformada de Fourier.

- Convolución con Delta de Dirac

$$\begin{aligned} f(t) \times \delta(t) &= f(t) && \text{Ecuación (9)} \\ f(t) \times \delta(t - t_0) &= f(t - t_0) \\ f(t - t_1) \times \delta(t - t_0) &= f(t - t_0 - t_1) \\ \delta(t - t_1) \times \delta(t - t_2) &= \delta(t - t_1 - t_2) \end{aligned}$$

2.3. Transformada rápida de Fourier

Es un algoritmo que permite transformar la señal digital que se encuentra en el dominio del tiempo al dominio en frecuencia, y así conocer el espectro de la función.

Se puede usar para cualquier respuesta en sistemas LTI, con el fin de obtener su función de transferencia, la misma que se describe matemáticamente así:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{kn} \quad \text{Ecuación (10)}$$

Donde W_N^{kn} es un factor complejo (*twiddle factor*), $e^{\frac{-jnk2\pi}{N}}$.

La TRF no es más que la reducción de procesos de la transformada discreta de Fourier mediante un mapeo multidimensional de los índices de las entradas y

salidas, donde se explotan las propiedades de simetría expresada en la ecuación (11) y periodicidad en la ecuación (12), de las matrices para la optimización de multiplicaciones y adiciones que tiene un sistema complejo. Como único requisito se debe mantener el número de puntos en la serie y N debe ser potencia de 2, pues el sistema es reducido a $N \log_2(N)$.

$$W_N^{\left(k+\frac{N}{2}\right)} = -W_N^k \quad y \quad X(k) = X(N - k) \quad \text{Ecuación (11)}$$

$$W_N^{(k+N)} = W_N^k \quad y \quad X(k) = X(N + k) \quad \text{Ecuación (12)}$$

2.4. Filtros de fase lineal

Los filtros digitales de respuesta impulsiva finita FIR, permiten obtener una salida resultante a partir de entradas del presente y pasado, basado en el estímulo del impulso. La denominación se justifica por la respuesta finita del mismo.

Dada la convolución de señales, se dispone la salida $y(n)$ gracias a la entrada $x(n)$ y la respuesta al impulso $h(n)$:

$$y[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} (x[k]h[n - k]) \quad \text{con } h(k) = \begin{cases} 0, & k < 0 \\ h(k), & 0 \leq k < N \\ 0, & k \geq N \end{cases} \quad \text{Ecuación (13)}$$

Debido a las disposiciones de la expresión matemática resultante, se tienen nuevas condiciones de frontera en la sumatoria:

$$y[n] = \sum_{k=0}^{N-1} (x[k]h[n - k]) \quad \text{Ecuación (14)}$$

Demostrando de esta manera que los coeficientes pertenecen a la respuesta del impulso y su dominio es finito.

Una de las características más representativas de los sistemas FIR se da al momento de manipular y cambiar la magnitud sin alterar o invertir la fase, y viceversa. Es decir, en ningún momento la magnitud y la fase se relacionan, siendo siempre variables independientes.

2.5. Tiempo de reverberación

T ó T_{60} , es el tiempo que transcurre para que la energía sonora decaiga 60 [dB], es decir, llegue a ser de 6 a 10 veces menor que el valor inicial. Propiamente es una reacción a la forma en que un recinto ha sido excitado hasta alcanzar su estado estacionario, donde la acumulación de energía radiada del impulso sonoro dado sea igual a la energía absorbida por los materiales existentes dentro del entorno total de la sala.

Matemáticamente puede ser calculado por distintas teorías basadas en fórmulas que toman en cuenta diversos parámetros implícitos en un recinto, como la velocidad del sonido, dimensiones de las superficies y coeficiente de absorción de los materiales de la sala.

Cada sala, ya sea muy grande, media o pequeña, posee un tiempo único, que depende propiamente de los materiales absorbentes ó del alto nivel de reflexión que tenga sus superficies. Un recinto que genera muchas reflexiones tendrá un T grande. Si, en cambio, el recinto esta hecho a base de materiales con un coeficiente de absorción alto, las ondas sonoras serán acogidas por el material permitiendo la existencia de pocas reflexiones y el sonido se extinguirá rápidamente, por lo cual el T será pequeño.

2.6. Reverberación en dispositivos

La reverberación artificial es puramente musical se debe a la necesidad de recrear o dar una espacialidad a los diversos instrumentos que pueden existir dentro de una canción o composición sonora, además es parte de la concepción del almacenamiento y registro del audio analógico y digital.

Históricamente, la reverberación era un efecto implícito por los lugares de grabación y generalmente estaba descontrolado. Pero en 1947, la forma de adicionar el efecto se hacía en cámaras de eco o chamber reverb, una técnica de grabación creada por el ingeniero de sonido y productor Milton Tasker "Bill" Putnam, quien popularizó las habitaciones de distintos tamaños con materiales reflectantes donde una señal ya grabada por medio de un altavoz y era devuelta (registrada) la señal procesada por las propiedades reverberantes de la habitación, el resultado final, un audio enriquecido por la espacialidad de un recinto. De esta técnica también nace el primer sistema de envíos auxiliares y retornos.

Paulatinamente fueron diseñando otros dispositivos portables (*hardware*) como placas metálicas sometidas a resonar mediante voltaje con transductores electromagnéticos, patentado en los años sesentas por la marca Acustictronics. Nacen también los dispositivos a base de resortes implementados dentro de amplificadores de guitarra y piano fabricados por la marca Fender.

A la par de toda esta revolución de equipos, Manfred Schroeder programa la primera reverberación algorítmica artificial en los Laboratorio Bell. La cual sería mejorada por James A. Moorer, eran varias reverberaciones de Schroeder puestas en paralelo, seguidas finalmente por un filtro pasa bajos que supone la absorción del aire, lanzada al mercado por la compañía alemana Elektromesstechnik, con el nombre de la famosa reverberación EMT. Ya para los años setenta y gracias a su constante mejoramiento la serie EMT 140 fue la más usada dentro del mundo de la producción musical.

En la siguiente década se da paso a las reverberaciones digitales. Lexicon 224 y SST-282 Space Station de la casa Ursa Major lideraron el mercado pues simulaban diferentes espacios. Sin embargo, en el año 2000 llega a posicionarse la reverberación por convolución gracias a SREV1 de Yamaha.

El real boom llega cuando las DAWS permiten que las reverberaciones sean insertadas como un *plug in*, son *software* de alto nivel tecnológico, implementadas mediante algoritmos en procesadores de señales, *buffers*

circulares, operadores de líneas de retraso o por convolución en base a respuestas de impulso.

2.6.1. Tipos de reverberación

Los tipos de reverberación están clasificados según los diferentes materiales como: placas metálicas, resortes y tamaños con diversas características que puede tener un recinto.

- *Hall*: se refiere a un espacio angosto y largo que posee un tiempo de decaimiento extenso con muchas reflexiones.
- *Room*: simula un cuarto pequeño, tiende a tener características diversas gracias a los materiales. Generalmente tiene un corto tiempo de decaimiento.
- *Chamber*: llamada así porque simula los cuartos creados en estudios profesionales a base de varios materiales reflectantes como madera, ladrillo o metal. Generalmente son salas con 4 a 12 segundos de reverberación.
- *Plate*: supone la reverberación generada por una placa de metal grande con transductores electromecánicos. El primer modelo en el mercado es la EMT 140.
- *Spring*: hace referencia al efecto generado por un sistema de resortes y transductores electromecánicos.
- *Non-linear*: es una reverberación digital, se denominan así por las maneras inusuales e incluso abruptas en las que se puede manipular el tiempo de decaimiento.

2.6.2. Parámetros de reverberación artificial

A continuación se definen parámetros que tienen reverberaciones artificiales, como lo muestra la figura 4.

- *Size*: parámetro que logra variar el tamaño del recinto al que se desea simular. Su unidad está en metros cuadrados, en ciertas simulaciones se puede insertar el ancho o incluso la profundidad.
- *Damping*: es el coeficiente de amortiguamiento y sirve para modificar ciertas frecuencias, afectando directamente el tono o coloración que puede aportar la reverberación al audio al procesarlo.
- *Reverb time*: con este parámetro se puede manipular la duración de la reverberación, la unidad de tiempo que maneja es en milisegundos.
- *Early reflections*: logra modificar el tiempo que transcurre en ser escuchadas las primeras reflexiones también influye en la intensidad sonora de las mismas.
- *Mix Dry – Wet*: parámetro que permite variar la cantidad de la señal procesada, modificar *dry* (seco) mantiene el audio sin o con muy poco efecto y si se opta por *wet* (húmedo) la señal puede llegar a tener efecto en exceso.
- *Pre-Delay*: tiempo en milisegundos que puede existir entre la señal original y la señal procesada por la reverberación.
- *Decay*: permite modificar el tiempo de decaimiento de la reverberación y define cuan larga puede ser la cola de la reverberación del sonido procesado.

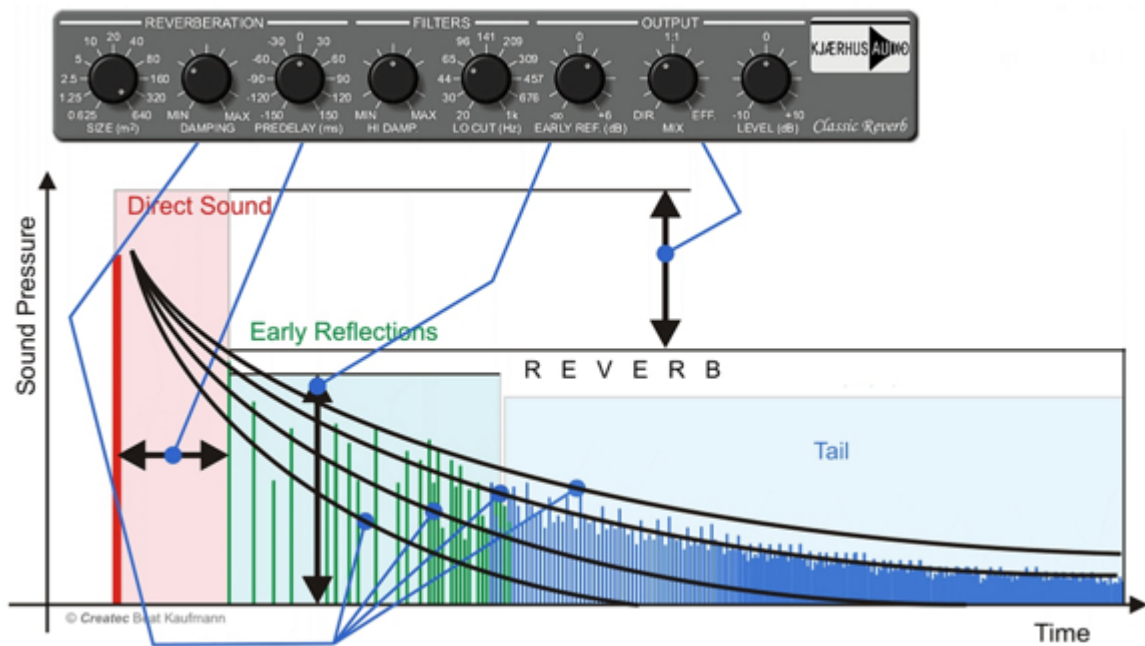


Figura 4. Relación gráfica y paramétrica de la reverberación.

Tomado de Beat Kaufmann, 2019.

2.7. Reverberación y convolución

En el audio digital la convolución permite digitalizar la reverberación de recintos gracias a la respuesta al impulso. Esta involucra dos señales de interés y al realizar el proceso convolutivo se obtiene una tercera señal nueva. Dando como resultado un sonido enriquecido por la espacialidad de un área.

A las reverberaciones algorítmicas les ha costado conservar la naturalidad de este fenómeno acústico, propio de los recintos con superficies reflectantes. Sin embargo, para este tipo de algoritmos el punto clave ha sido la fuerza de los archivos de la respuesta de impulso (IR) ya que ha logrado recrear distancias propiedades acústicas bastante naturales. Por tanto, los expertos afirman que si solo se usa la primera parte del IR (0-400 [ms] aprox.), se obtendrá una buena profundidad. El parámetro de *decay* se puede agregar la cola y terminar con una reverberación fastuosa.

Sus primeras apariciones en el mercado fue entre los años 1999 y 2000, Sony y Yamaha, compañías de audio profesional, lanzaron los primeros prototipos

de reverberación digital llamadas DRE S777 y SREV1. Desde el 2002 Audio Ease es el pionero con su potente creación Altiverb.

2.7.1. Altiverb

En el 2002 la empresa Audio Ease lanza al mercado Altiverb, el primer *software* de reverberación por convolución en tiempo real, se posicionó como un efecto pionero pues lograba una imagen sonora masiva, estéreo y envolvente. Pero además no abusa de la memoria de procesamiento, posee dos modos de operación disponibles; uno logra una menor carga del procesador a expensas de una latencia de alrededor de un segundo, mientras que el otro ofrece una latencia cero a expensas de una mayor carga del procesador. Como con todas las reverberaciones de convolución, cuanto más larga sea la cola de reverberación, más procesamiento se requiere. Por esta razón, se puede optar por truncar la cola para ahorrar energía de la CPU.

La versión Altiverb v2, puso a disposición un formato *plug in* que funcionaba con una llave iLok para mover el programa con mayor facilidad. Esta versión también habilitó un modo donde las reverberaciones traseras se suman en mono y luego se retrasan antes de ser alimentadas al altavoz central. Mejorando la utilidad de la reverberación en dos formatos *surround* básicos son mono-in, quad-out y stereo-in, quad-out.

Posee frecuencias de muestreo de 88,2 [kHz] o más. Aún así, puede ser usada en sesiones a cualquier frecuencia de muestreo, siempre que el tamaño del búfer esté configurado en un múltiplo de 256 muestras, aunque su procesamiento interno siempre se realiza a 44,1 [kHz] o 48 [kHz].

La tecnología de este producto también permite generar impulsos propios, gracias a Altiverb IR Pre-processor, este emite barridos sinusoidales, ráfagas de explosión o disparos de pistola de arranque. Al momento de adjuntar los archivos logrados, al igual que las reverberaciones por convolución de Waves, permite modificar ciertos parámetros para mejorar la respuesta al impulso y obtener una sonoridad de calidad.

2.7.2. IR Live

Software implementado por la marca Waves. IR Live está diseñado para ser usado en vivo (FOH), el proceso de convolución es en tiempo real, promete un procesamiento de baja latencia, formato compatible con los servidores DSP de SoundGrid y con la mayoría de consolas digitales.

Es parte de la serie de *plug ins* IR, por ende se pueden adjuntar las respuestas al impulso de las librerías de IR1 e IRL. Adicionalmente, es posible introducir impulsos propios y la interfaz posee parámetros para modificar el impulso, que permiten mejorar la calidad sonora.

3. Capítulo III: Metodología

3.1. Recintos

Los recintos seleccionados son dos iglesias emblemáticas declaradas patrimonio cultural de la ciudad de Quito. Son reconocidas a nivel mundial por su importancia histórica en el arte, la arquitectura e incluso de manera literaria.

3.1.1. Iglesia San Francisco

Es una estructura arquitectónica que permaneció en construcción durante 150 años, desde 1573 hasta 1960 . Su esencia arquitectónica es el estilo colonial barroco, conocida como el mayor monumento ecléctico de América.

El templo mayor, es el lugar de estudio del presente proyecto, posee una nave central elevada y geoméricamente su diseño interior se asemeja levemente a una cruz latina.

Sus dimensiones establecidas son: 70 metros de largo desde la fachada hasta el testero de la sacristía y 45 metros de ancho entre fachadas laterales. Las cúpulas más altas alcanzan los 10 metros.

Los cimientos de la estructura están hechos de una mezcla entre piedra y ladrillo mambrón. La arquitectura interior conformada por altares, columnas, arcos y cúpulas, tallados en madera (cedro específicamente) estilo mudéjar, recubiertos con laca, pintura y los altares tiene un recubrimiento de lámina de oro fina.



Figura 5. Interior del interior del templo mayor de la iglesia San Francisco.

3.1.2. Iglesia Basílica del Voto Nacional

Templo concebido en estilo neogótico, inició su construcción en 1883 y fue entregada en el año de 1924.

La iglesia principal geométricamente es un cruz latina, cuenta con una nave central de 140 metros de largo tomado desde la puerta frontal hasta el altar trasero (tiene dos altares). De fachada a fachada 35 metros de ancho y 30 metros de alto en cada cúpula, la parte interna más alta es el crucero que cuenta con 74 metros. Sin embargo, por fuera las dos torres custodias miden 115 metros de alto este dato hace que sea considerado el templo más grande de América.

El arquitecto francés Emilio Tarlier, inspiró el diseño de esta edificación religiosa en la Catedral de Notre Dame. Es completamente tallada en piedra y en su interior a lo largo de las columnas centrales se encuentran 14 estatuas de bronce, adicionalmente en los corredores laterales tiene 24 capillas votivas de 15 metros de alto por 10 de ancho.

Como es clásico de este estilo de iglesias, está custodiada por gárgolas, que en este caso, son esculturas de animales representativos de la fauna ecuatoriana.



Figura 6. Interior del interior de la Basílica del Voto Nacional.

3.2. Técnica de evaluación de los recintos

Este proyecto busca digitalizar, por medio de un *plug in* de convolución, la reverberación de dos iglesias del patrimonio cultural de Quito e identificar, subjetivamente, si poseen o pueden llegar a tener identidad sonora en base a su reverberación según la composición de los materiales en su interior y ser reconocidas como tal. Para esto, se debe evaluar las salas, recolectar audios

con la respuesta al impulso de estos recintos y así gracias a las propiedades convolutivas, extraer de manera fehaciente el sonido característico de estas edificaciones históricas.

Gerges (2001, p. 320) afirma que, para la teoría de rayos acústicos las reflexiones son el fenómeno natural más importante, ya que estas se dan por la incidencia de las ondas sonoras sobre las superficies. Concluye que la esencia para evaluar la calidad acústica de espacios cerrados es la respuesta impulsiva de la sala.

Por tal concepto, se busca documentación científica que muestre procesos técnicos para evaluar la reverberación de una sala. Con el fin de seguir estos estándares y lograr el objetivo.

Entre diversas normas de evaluación se encuentra el modelo estándar UNE-EN ISO 3382-1 (Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Salas de espectáculos). Este documento contiene la metodología y los requerimientos técnicos que se deben seguir si una sala es excitada por sonidos impulsivos.

3.2.1. Posiciones de fuente y micrófonos

Según la normativa la cantidad de posiciones depende del tamaño de las salas. Los recintos de este estudio tienen dimensiones realmente grandes. Pero como no se busca evaluar el tiempo de reverberación de la sala, sino grabar la respuesta al impulso, se eligió valores coherentes con el objetivo y con la disposición de los equipos.

Es así, que la cantidad de posiciones de micrófonos y fuente predispuestos es un híbrido entre lo descrito por la norma (Anexo 2) y el hecho de cubrir las necesidades del experimento.

Los puntos a seguir de la norma son:

- Colocar al menos dos posiciones de fuente.
- Siendo un rectángulo de grandes dimensiones es importante cubrir la mayor cantidad de espacio logrando que el patrón ejecutado sea de posiciones relevantes.
- Altura micrófono – piso: se mantiene un estándar de 1.5 metros, medidos desde la cápsula del micrófono al piso.
- Altura fuente – piso: estándar para los dos lugares 1.6 metros medido desde la superficie baja de la fuente hacia el piso.

3.2.2. Equipos

- Medidor láser
GLM100c de Bosh, margen de medición entre 0,5 a 100 metros. Con inclinómetro en 360 grados.
- *Laptop*
Mac portátil, procesador 2.6 [GHz] Intel Core i7, soporta el software Pro Tools, plataforma en donde se registrarán los audios.
- Interfaz
Focusrite Scarlett 18i20 (2nd Gen): interfaz de audio USB 2.0. Posee 18 entradas con ocho previos de micrófono Scarlett, 20 salidas, 8 entradas ADAT, 8 salidas de línea, 2 salidas de monitor principales y 2 salidas de auriculares. Loop de latencia realmente baja (2,74 milisegundos), frecuencia de muestreo hasta 192 [kHz] / 24 [bits]. Modo de sincronización *plug and play* con Pro Tools, Focusrite Creative Pack y Ableton Live Lite.

- Sonómetro

KASUNTEST KT202: medidor digital de ruido y nivel de sonido.

Estándar aplicado: IEC651 tipo 2, ANSI S1.4 tipo 2.

Fuente de sonido de calibración: 94 [dB] @ 1 [kHz]

Rango de medición: 30 ~ 130 [dBA]

Precisión: + 1.5 [dB]

Respuesta de frecuencia: 31.5 ~ 8.5 [KHz]

Resolución: 0.1 [dB]

Ponderación de frecuencia: A / C

Mostrar tiempo de actualización: 2 veces / segundo (RÁPIDO), 1 vez / segundo (LENTO)

Salida de señal de CC: 33 [mV / dB]

Velocidad de muestreo: RÁPIDO (125 [ms])/ LENTO (1 [s]).

- Micrófonos

MM1 de Beyerdynamic:

Utilidad: medición de niveles de presión de sonido y curvas de frecuencia.

Rango de frecuencia: 20 – 20000 [Hz].

Max. SPL (nivel de presión sonora): 128 [dB].

Característica direccional: omnidireccional.

Requiere alimentación de 12-48 [V] *phantom power*.

M60 FET Master Stereo Set:

Utilidad: captación sonora en formato *over heads*.

Rango de frecuencia: 20 - 5000 [Hz].

Max. SPL: 130 [dB].

Sensibilidad: 8.6 [mV/PA], ± 1 [dB].

Característica direccional: polaridad hipercardiode, omnidireccional.

Requiere alimentación de 12 - 48 [V] *phantom power*.

KU 100:

Utilidad: micrófonos estéreo, binaural, sonido 3D.

Rango de frecuencia: 20 - 20000 [Hz].

Max. SPL: 135 [dB].

Sensibilidad: 20 [mV/PA], ± 1 [dB].

Característica direccional: EAR

Requiere alimentación externa o *phantom power*.

- Amplificador AP602

De interés para el proyecto según lo especificado en la norma ISO3382-1 el amplificador cumple con las siguientes especificaciones técnica y propiedades de uso:

Margen operativo frecuencial en bandas de tercios de octava de 50 hasta 5000 [Hz].

Entrada de señal XLR (por la cual se envía el barrido sinusoidal desde una interfaz).

Indicadores de protección: PROT que indica sobrecarga, desbalance térmico. Y CLIP que significa la superación de valores máximos de tensión o corriente pico a la salida del amplificador.

Un ecualizador por octavas de frecuencia.

- Fuente omnidireccional BP012

Maneja niveles estandarizados y aprobados por las normas ISO140, ISO 10140, ISO 354, ISO 3382-1/-2.

Permite 600 [W] RMS de potencia y desarrolla hasta 123 [dB] de potencia acústica sobre las bandas de tercio de octava centrales.

El altavoz logra mantener la máxima potencia durante más de una hora. Radiación omnidireccional plana.

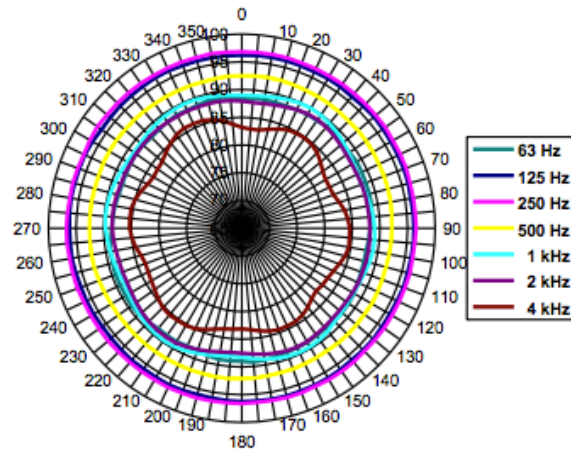


Figura 7. Diagrama de directividad para las bandas de tercio de octava.

Tomado de CESVA, 2019.

Todos los equipos antes descritos cumplen las exigencias técnicas que la norma describe (Anexo 1).

3.2.3. Método de respuesta impulsiva integrada

La evolución temporal de la presión acústica de una sala es provocada por la emisión de un impulso de Dirac. Sin embargo, en la praxis este tipo de señales no pueden ser reproducido como tal, conceptualmente son sonidos transitorios, por tanto se utilizan sonidos que asemejen.

Para este método es posible elegir dos tipos de impulsos integrados. El primero es una secuencia de longitud máxima (barrido frecuencial) y el segundo un sonido explosivo.

La norma hace referencia a que ambos tipos de fuente sonora deben mantener niveles de presión sonora sobre el ruido de fondo. Para el caso del barrido frecuencial se puede mantener niveles bajos para cuidar la fuente de emisión, es decir 35 [dB] por encima del ruido de fondo. Si el ruido de fondo supera estos niveles el recinto debe ser descartado.

Por otro lado, el impulso explosivo no tiene un nivel máximo pero debe tener la carga sonora necesaria para excitar las dimensiones del recinto.

Para finalizar, tomar en cuenta que ninguna de las etapas genere algún tipo de saturación ya que eso podría ensuciar o distorcionar los audios resultantes (Anexo3).

3.2.4. Método de grabación *in situ*

El experimento de este proyecto tiene una fuerte carga subjetiva, es decir, depende del criterio humano para ser evaluado.

Esta parte estará a cargo de las opiniones de los profesionales del audio que se desempeñan en las diferentes ramas del sonido, sólo en la ciudad de Quito. Esta delimitación espacial se debe a que para la realización de las encuestas se mantendrá un mismo sistema de escucha, con el fin de cerrar un poco la variante subjetiva.

Los micrófonos para estas grabaciones serán situados en los mismos puntos que se definan para los impulsos. En este caso la fuente es un músico, y de igual manera ocupará el lugar preestablecido para el caso.

3.3. Implementación

A continuación, se describe como se implementa el sistema que cubre todas las necesidades del experimento en la grabación y la de emisión de impulsos.

3.3.1. Cadena electroacústica

Se disponen varios tipos de interconexiones sencillas. Para todos los procesos realizados en este proyecto la cadena electroacústica sufre variaciones dependiendo de la necesidad para cada etapa.

Formato base: interconexión principal, la cual está implementada para emitir el del barrido frecuencial. Los equipos involucrados son:

- CESVA FP122: Amplificador AP602 y fuente BP012
- 4 micrófonos Beyerdynamic MM1
- Interfaz Focusrite Scarlett 18i20
- *Dummy Head* KU 100 Neumann
- Computador portátil

El corazón del sistema es la interfaz que intercomunica todos los dispositivos. Está conectada a la computadora portátil por medio de un cable USB-B 2.0, de esta se envía la señal programada, en DEMO Generator, del barrido frecuencial por un envío de línea físico. El mismo que llega al amplificador AP602 por una entrada denominada: *signal in put*.

Variación 1: la cadena es modificada para la grabación del impulso explosivo del globo, el envío de señal es desconectado y sólo quedan conectados los micrófonos MM1.

Variación 2: cadena para grabar el instrumento *in situ*, se desconectan los 4 micrófonos MM1 y se conectan las líneas del Dummy Head KU100, a demás un micrófono Telefunken M60 FET.

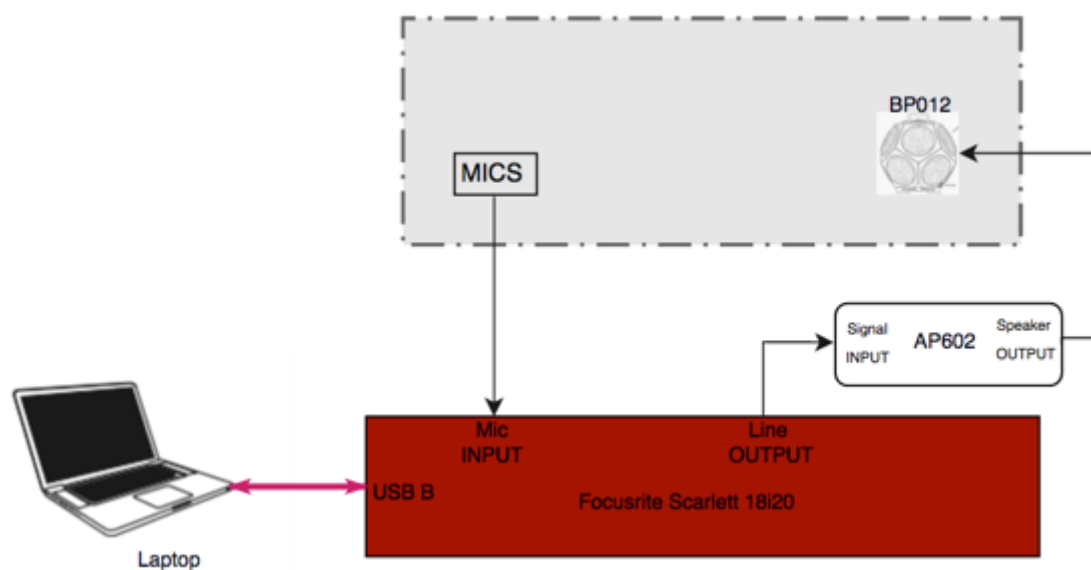


Figura 8. Cadena electroacústica del proyecto de investigación.

3.3.2. Barrido sinusoidal

El espectro frecuencial que debe lograrse es el estándar audible por el ser humano, es decir, 20 – 20000 [Hz].

En esta etapa se utiliza el sistema de CESVA FP122, donde el generador de ruido amplificado AP602 funciona como portador de señal y el altavoz omnidireccional BP012 emitió el barrido.

Se programó un barrido sinusoidal de 10 segundos que abarca de 20 a 21000 [Hz] por medio del *plug in* EMO Generator en Pro Tools.

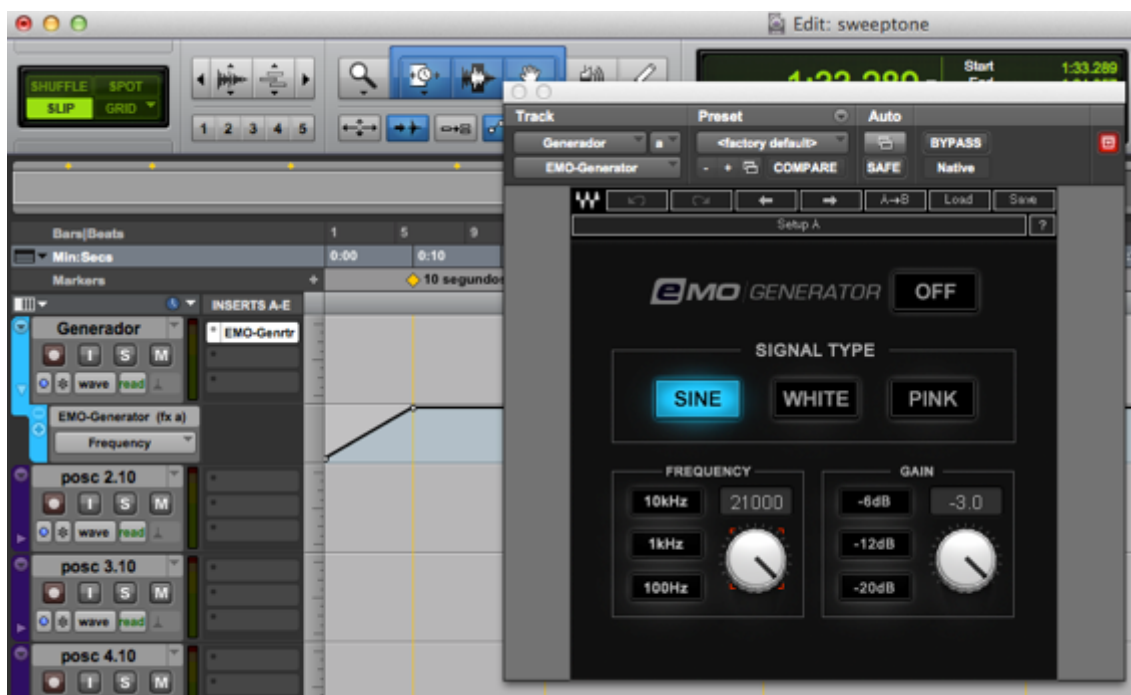


Figura 9. Automatización del generador de barrido frecuencial en Pro Tools.

Si bien los equipos tienen certificación y están aprobados en el documento de la norma guía, al momento de la práctica se hizo uso del ecualizador que posee AP602, por motivos de saturación entre 135 a 150 [Hz].

3.3.3. Impulso explosivo

Para generar este tipo de impulsos, se suele usar una pistola de arranque, pues tienen un margen de error y variación muy pequeño, sin embargo dentro de las estructuras no era posible usar este tipo de instrumento porque se debía cuidar del patrimonio cultural y en el Ecuador no es legal portar este tipo de armas.

Como solución se decidió usar globos, cuidando detalles como tamaño y grosor de látex, con la finalidad de conseguir la presión sonora necesaria y lograr un margen de error pequeño. Los globos fueron inflados con una máquina de aire medido para generar un estándar entre todos los que se iba a usar.

Cada globo de látex medía 30 centímetros y 1 micromilímetro de grosor, todos alcanzaron su máxima extensión y fueron medidos para comprobar que mantuvieran el estándar en cada una de las explosiones.

3.4. Evaluación de recintos

Los recintos serán evaluados con los procesos descritos en el apartado 3.2.

Importante aclarar que la fuente está representada por un círculo negro y los micrófonos por una equis negra como se observa en las figuras 10, 11, 12 y 13.

3.4.1. Evaluación Iglesia San Francisco

La estructura rectangular mide 70 metros de largo y 45 metros de ancho.

En el lugar únicamente no se permite el acceso al altar mayor por motivos protocolares y religiosos. Por tanto, se dispone del recinto de la siguiente manera:

Primera posición de fuente :

- La fuente se encuentra en el frente al altar mayor separado por 15 metros, de la puerta trasera a 55 metros de largo y centrado a lo ancho a 14 metros de pared a pared.
- A partir de este punto de referencia las posiciones de micrófono se estandarizan con una separación de 5 metros. En total se obtuvieron 8 posiciones de micrófono.
- La última posición de micrófono esta separa de la superficie más cercana por 10 metros.

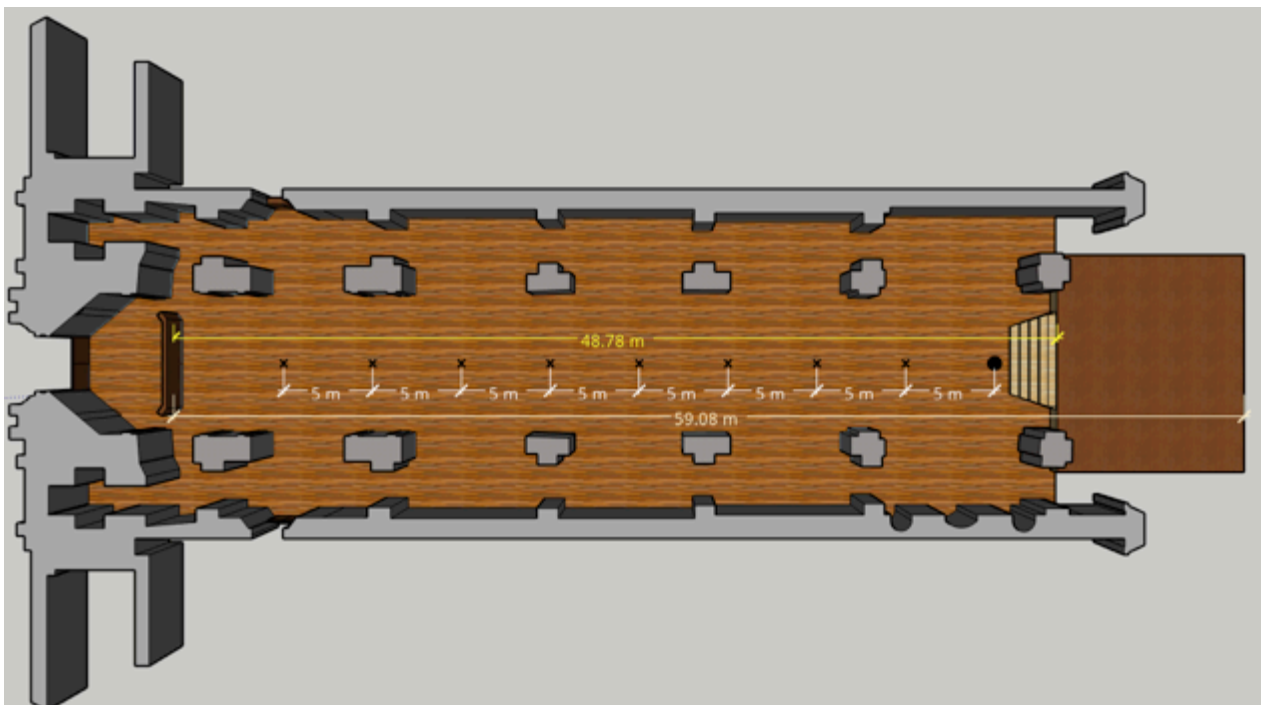


Figura 10. Planta: primera posición de fuente en la iglesia San Francisco de Quito.

Segunda posición de fuente :

- La fuente se encuentra a 6 metros de la puerta trasera y a 64 metros del altar y centrado a lo ancho a 14 metros entre pared a pared.

- A partir de este punto de referencia las posiciones de micrófono se estandarizan con una separación de 5 metros. Se mantiene la cantidad de posiciones de la primera etapa.
- La última posición de micrófono esta separa de la superficie más cercana por 21 metros.

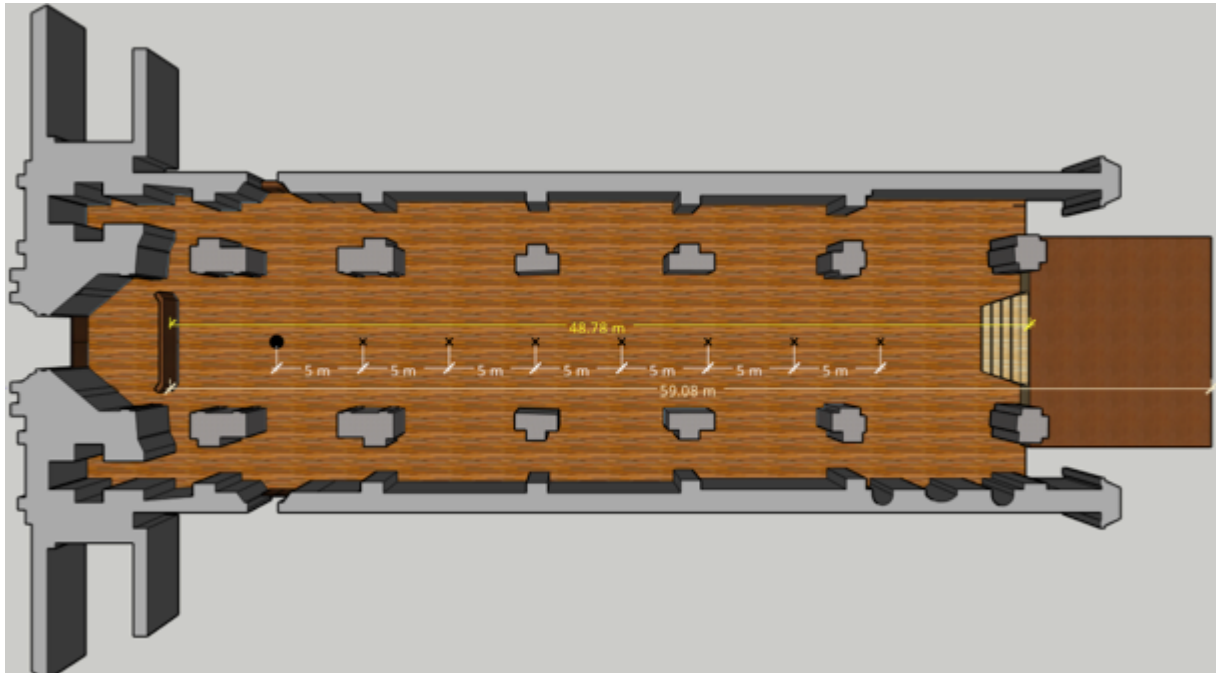


Figura 11. Planta: segunda posición de fuente en la iglesia San Francisco de Quito.

3.4.2 Evaluación Iglesia Basílica del Voto Nacional

La nave central Basílica del Voto Nacional forma una “cruz latina”, sin embargo en conjunto el recinto es un gran rectángulo.

Primera posición de fuente :

- La fuente se coloca en el altar central que se encuentra a un tercio del espacio total de la nave principal. Separada de la pared del altar

principal por 25 metros y de la puerta trasera a 100 metros de largo y centrada a lo ancho a 16 metros entre pared a pared.

- A partir de este punto de referencia las posiciones de micrófono se estandarizan con una separación de 5 metros. Como la fuente se encuentra en el tercio de iglesia se colocan 4 posiciones entre el altar principal y la fuente. En total se obtienen 13 posiciones de micrófono.
- La última posición de micrófono esta separa de la superficie más cercana por 7 metros cumpliendo la norma que al menos se mantenga una distancia de las superficies de 1 metro.

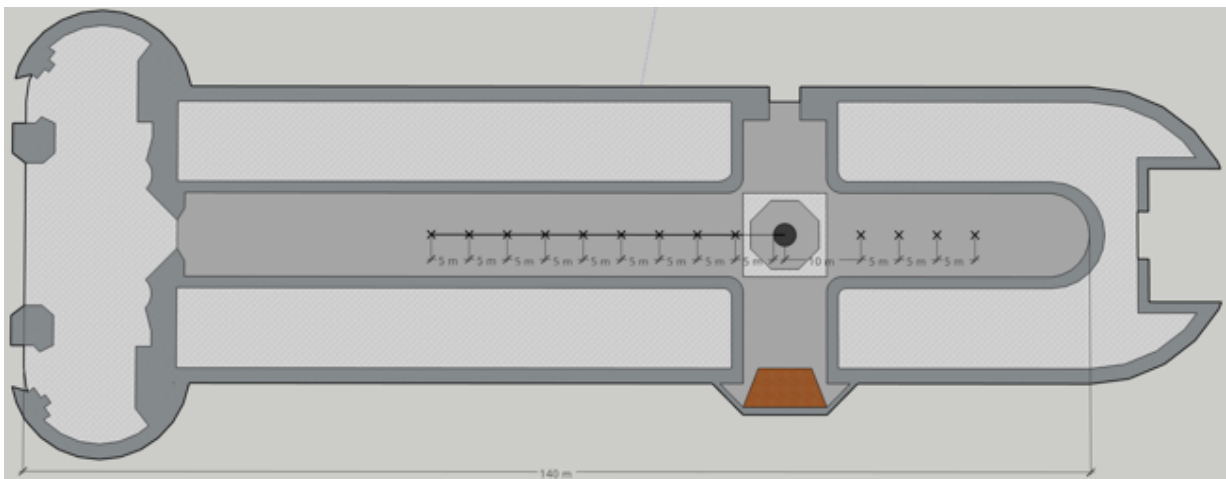


Figura 12. Planta: primera posición de fuente en la iglesia Basílica del Voto Nacional.

Segunda posición de fuente :

- La fuente se encuentra a 7 metros de la puerta trasera y a 130 metros del altar principal a lo largo y centrado a lo ancho a 16 metros entre pared a pared.
- A partir de este punto de referencia las posiciones de micrófono se estandarizan con una separación de 5 metros. Por motivos de disposición de cable para la segunda posición se resta dos puntos, por tanto tenemos 12 posiciones.

- La última posición de micrófono esta separa de la superficie más cercana a 21 metros. La norma exige que las fuentes estén separadas mínimo un metro.

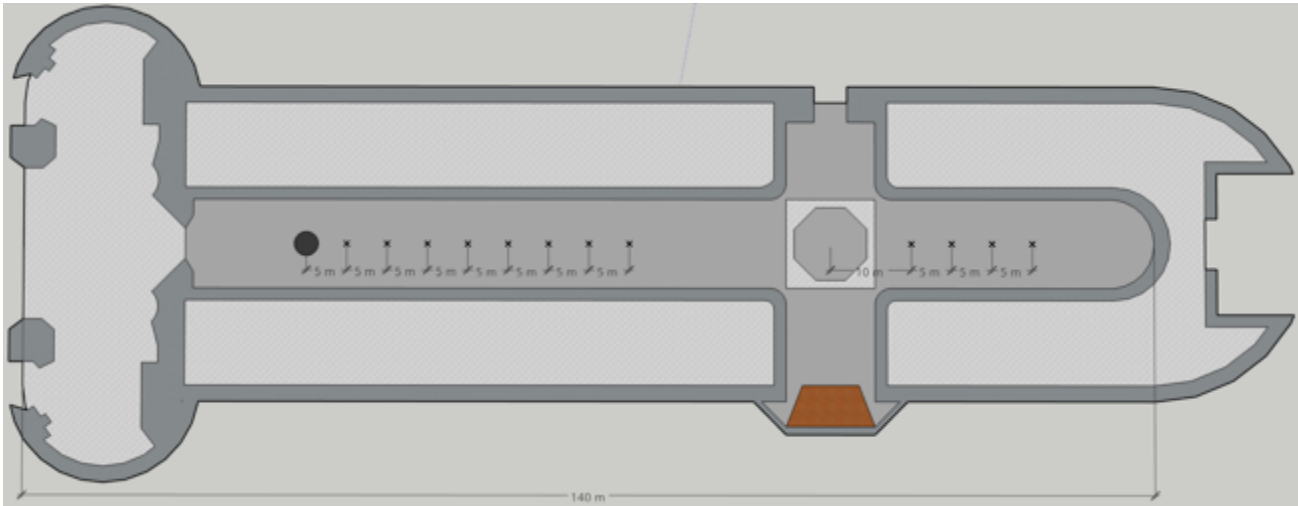


Figura 13. Planta: segunda posición de fuente en la iglesia Basílica del Voto Nacional.

Los planos de planta también hacen referencia a la posición donde se hicieron explotar los globos.

3.5. Procesamiento de señales

En este apartado se describirá como fueron tratados los audios resultantes de las grabaciones del experimento.

3.5.1. Parámetros técnicos estándar de audio

Para poder procesar adecuadamente los archivos se fijan 5 parámetros técnicos que debe cumplir los audios a ser procesados.

- La toma seleccionada debe tener un *headroom* de al menos 6 [dBFS] para evitar saturación o distorsión durante el proceso de convolución (Owsinski., 2013).

- Debe completar los 10 segundos de barrido.
- En caso de la explosión debe ser un audio con que contengan el decaimiento completo de las reflexiones de la sala.
- Debe ser un audio con la mayor cantidad de reflexiones sin distorsión o cancelaciones. Lo que se evaluó en el visor de espectro de iZotope RX7 mientras se limpiaba los audios.
- El nivel del impulso escogido debe permitir que el *set up* del *fader* master en los envíos auxiliares de la reverberación se queden en nivel nominal.

3.5.2. Obtención de archivos IR

En total se grabaron 40 audios, 15 en la iglesia de San Francisco y 25 en la Basílica del Voto Nacional. Los pasos para obtener la respuesta al impulso definitiva fueron los siguientes:

1. Clasificar los audios como útiles y descartados, según la cantidad de ruido o sonidos indeseados dentro de la grabación.
2. Examinar los audio útiles a detalle con el espectrograma y curva FFT, con el *plug in* FreqAnalyst Pro AAX, para procesar sólo los audios de la respuesta al impulso con mayor aporte de reflexiones inteligibles que caractericen el recinto estudiado.
3. Verificar que la cumpla valores estándar RMS con un nivel máximo -10 [dBFS] y mínimo alcance la nominal (Owsinski., 2013).
4. Limpiar cada *track* minuciosamente y no de manera invasiva en iZotope RX7.
5. Por último, prueba de calidad de convolución en el *plug in* IR Live.

Al final del tercer punto sólo nos quedamos con 5 audios de San Francisco y 7 de la Basílica.

3.5.3. Procesamiento de archivos IR

Al finalizar el proceso anterior, la cantidad de audios obtenidos fueron extraídos en formato wav, para adjuntarlos y probarlos uno por uno en el proceso de convolución del *plug in* IR live (figura 14), con todos los audios involucrados para realizar la encuesta subjetiva. En este punto también se hizo una comparativa con las grabaciones *in situ*, de manera que se utilicen los mismos puntos de captación.

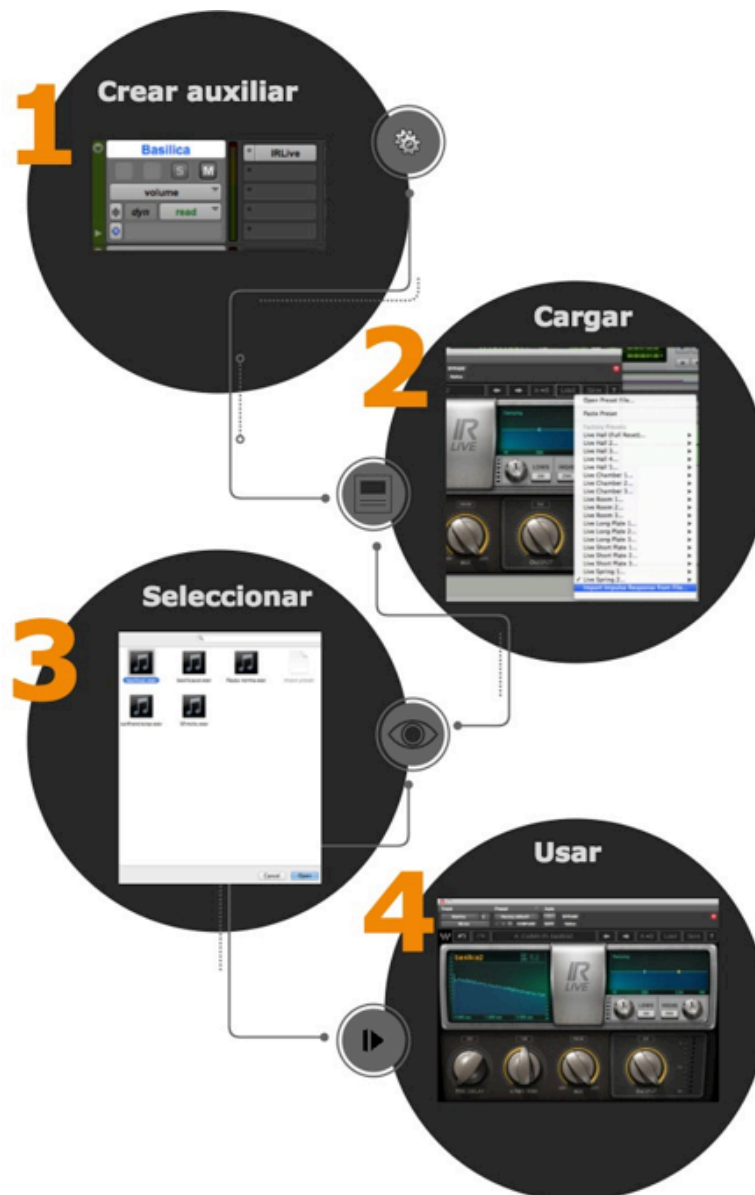


Figura 14. Proceso de carga de la respuesta al impulso en el *plug in* IR Live.

3.6. Diseño y aplicación de encuesta auditiva

Con el fin de realizar un análisis sobre los sonidos obtenidos, se realiza una encuesta auditiva, donde la experiencia profesional de quienes ejercen como productores musicales, ingenieros/as de grabación, mezcla y masterización juzguen con su criterio profesional y gusto subjetivo si el proyecto es satisfactorio, cumple su funcionalidad de efecto y aporta de alguna manera al audio profesional nacional.

Para esto primero se diseña una sesión en Pro tools, sencilla de entender y que respeta los flujos de señal para añadir efectos, como lo muestra la figura 15.



Figura 15. Sesión de la encuesta en Pro tools.

La mayoría de preguntas son de selección múltiple donde los encuestados deben dar cualidades técnicas según los parámetros de una reverberación. También hay preguntas donde por selección subjetiva deben elegir el sonido reverberante que más les gustó (véase Anexo 6).

3.6.1 Número de muestras

La encuesta debe ser evaluada por una cantidad de profesionales que realmente generen un *feedback* de aprendizaje e ideas claras. El número de muestras necesarias para tener resultados óptimos sale de la ecuación de Spiegel – Stephens:

$$n = \frac{\frac{z^2 * p(1 - p)}{e^2}}{1 + \left(\frac{z^2 * p(1 - p)}{e^2 N}\right)} \quad \text{Ecuación (15)}$$

Donde:

n : tamaño de la muestra.

N : tamaño de la población.

p : probabilidad de que el evento suceda.

z : puntuación z , valor que corresponda a la distribución de Gauss.

e : margen de error.

No existe un registro legal que contabilice a los profesionales que ejercen realmente las diferentes ramas del audio. Es así que para establecer un tamaño poblacional se realizó una encuesta de censo que permaneció activa por dos semanas, a la cual respondieron 123 personas y sólo 49 dejaron su contacto y su respuesta positiva sobre la disposición para realizar la encuesta de evaluación de este proyecto. Por tanto nuestro N fue fijado en 49.

La probabilidad se basa en la presunción de la hipótesis nula, la cual le da a p un valor de 0,5.

Para el valor de z se identifica afirmando el nivel de confianza, en este caso es 95 %, lo que le da un valor de 1,96.

Un margen de error pequeño ya que la confianza es alta, se acierta de la tabla un 15%, lo que le e será 0,15.

$$n = \frac{\frac{1,96^2 * 0,5(1 - 0,5)}{0,15^2}}{1 + \left(\frac{1,96^2 * 0,5(1 - 0,5)}{0,15^2 * 49}\right)} = 22,81 \quad \text{Ecuación (16)}$$

El valor de n demuestra que se debe encuestar a 23 profesionales de audio.

4. Capítulo IV: Análisis de resultados

4.1. Análisis de la respuesta en frecuencia

4.1.1. Impulso de San Francisco

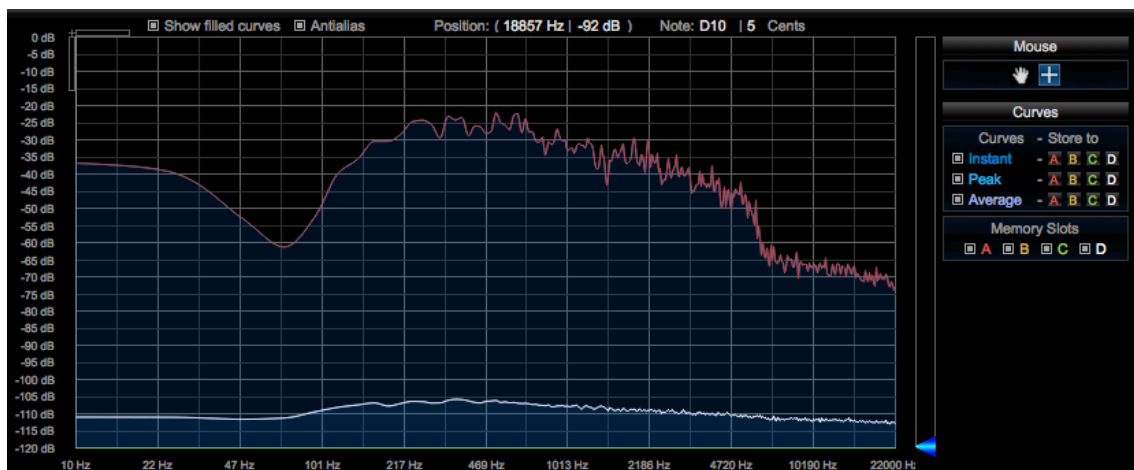


Figura 16. Gráfica del espectro de radiación del impulso de San Francisco.

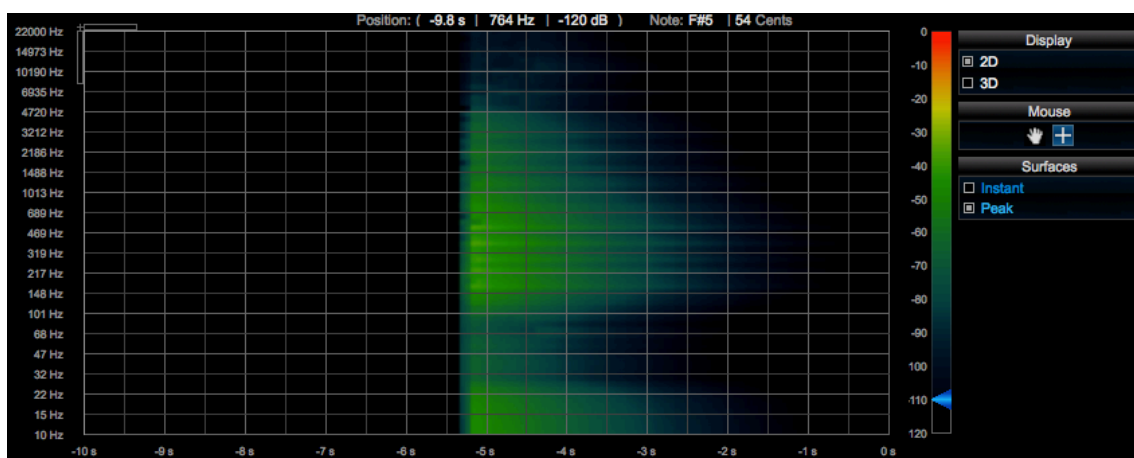


Figura 17. Gráfica del espectrograma en 2D de radiación del impulso de San Francisco.

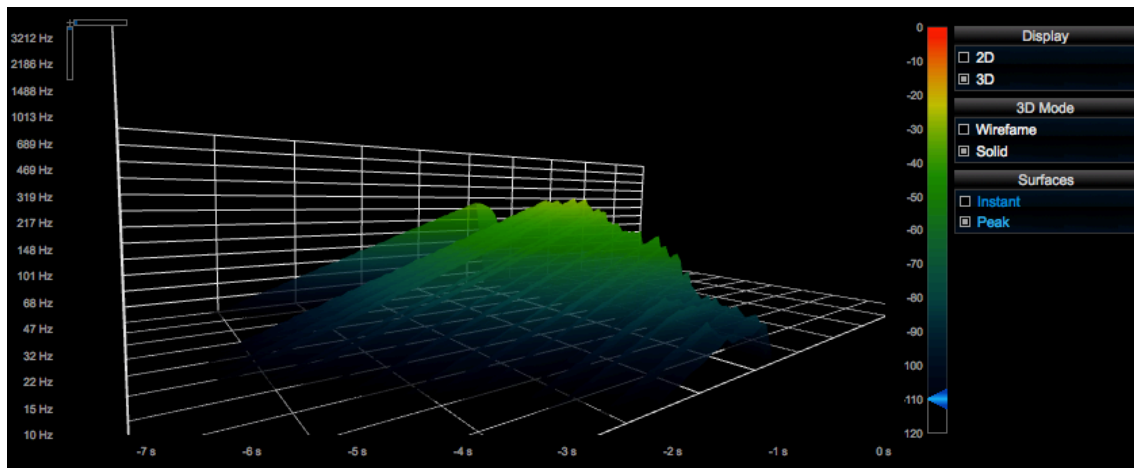


Figura 18. Gráfica del espectrograma en 3D de radiación del impulso de San Francisco.

El impulso que se utilizó para el proceso de convolución en San Francisco, fue grabado a 15 metros de la fuente, cuando esta se encontraba frente al altar mayor (Figura 10). También es importante aclarar que se analizará la respuesta al impulso lograda con la explosión de un globo.

Lo primero que se puede observar gracias a la gráfica FFT (figura 16), son los niveles de las diferentes frecuencias. Donde claramente se observa que las frecuencias bajas de 22 a 101 [Hz] y las altas 4720 a 22000 [Hz] tiene menor nivel ya que no alcanzaron un nivel mayor a -43 [dBFS], se infiere que el impulso explosivo del globo no posee la suficiente intensidad sonora en diferentes zonas del rango de frecuencia para excitar apropiadamente las frecuencias bajas, por tanto no pueden recorrer la longitud de onda necesaria estar presentes en el registro.

Por otro lado, en las frecuencias medias altas se aprecia niveles uniformes que se mantienen y decaen proporcionalmente. De 200 a casi 1000 [Hz] tiene el mayor nivel, alcanza -16 [dBFS]. Y desde 2500 [Hz] en adelante, el nivel es gradualmente bajo, oscila entre -35 a -70 [dBFS] pero en este caso se asume es por el volumen de la iglesia cubierta de materiales como madera, ladrillo mambróm, enlozado de cemento grueso y que no se percibe humedad. Esta composición puede crear una suma de los coeficientes de absorción alta

(Miyara, 2006) y de esta forma amortiguar las reflexiones, acortando el tiempo de reverberación, en San Francisco es de 1.5 segundos.

La sonoridad media (*average*), muestra el nivel promedio en que se extingue la señal, donde todas las frecuencias decaen linealmente con una pequeña cola que puede ser resonancia final entre 150 y 360 [Hz]. Así lo corrobora la gráfica del espectrograma en 2D y 3D (figura 17 y figura18).

4.1.2. Impulso de la Basílica del Voto Nacional

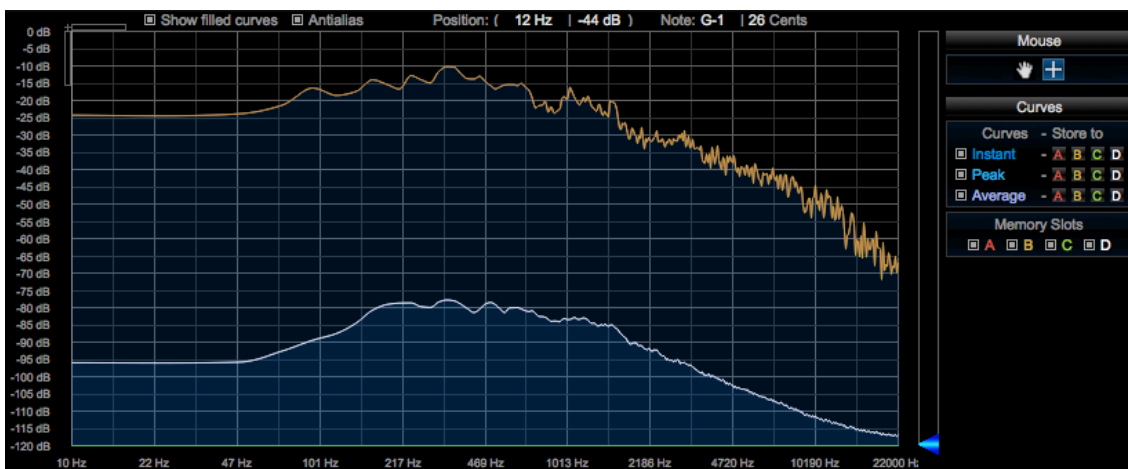


Figura 19. Gráfica del espectro de radiación del impulso de Basílica del Voto Nacional.

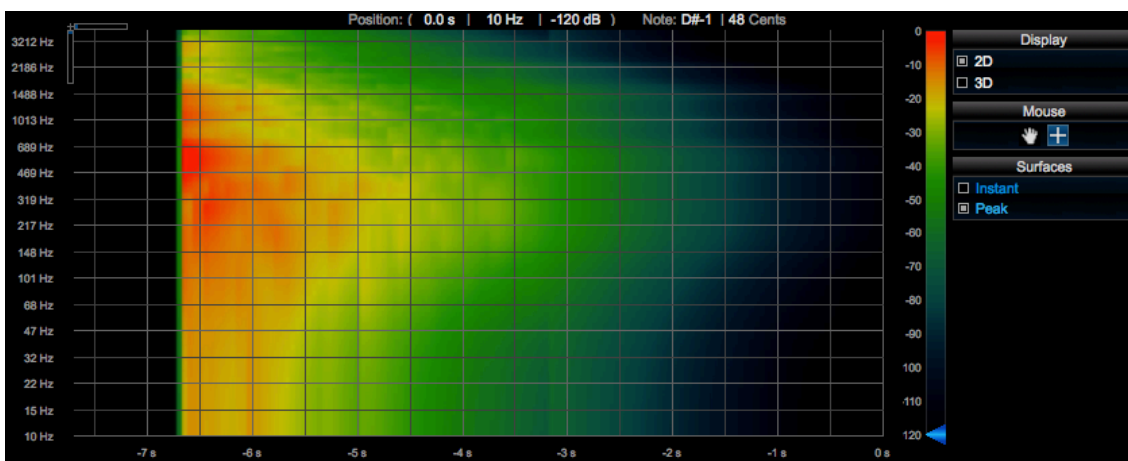


Figura 20. Gráfica del espectrograma en 2D de radiación del impulso de Basílica del Voto Nacional.

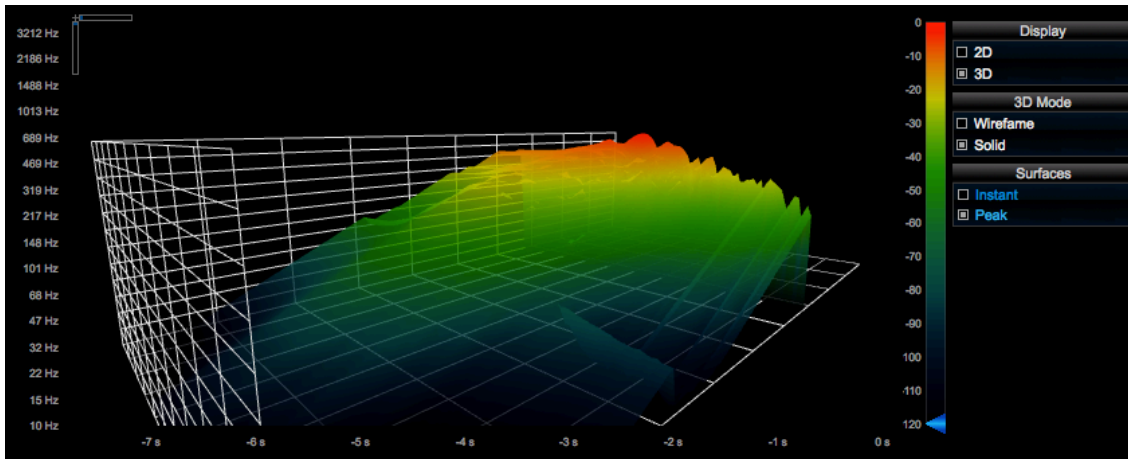


Figura 21. Gráfica del espectrograma en 3D de radiación del impulso de Basílica del Voto Nacional.

En este caso el audio logrado está a 10 metros de la fuente (figura 12) y del mismo modo que en el apartado anterior, se aclara que la respuesta al impulso se logró con la explosión de un globo.

A diferencia de la otra iglesia, la Basílica del Voto Nacional en su interior es completamente de piedra y materiales altamente reflectantes, como las estatuas de bronce en las columnas. Por este motivo el nivel de las frecuencias altas llega a ser -8 [dBFS], como se observa en la figura 19.

En la figura 20, el espectrograma nos muestra que desde 20 hasta 1488 [Hz], el nivel se mantiene por arriba de -6 [dBFS] e incluso superó la nominalidad. Esto se debe a los 5.2 segundos de reverberación del recinto. También, el largo del lugar aporta para que las ondas de las frecuencias bajas alcancen a desarrollarse e incluso generen resonancia.

Si se analiza con detalle la figura 21 las texturas de color azul y verde en la parte izquierda delantera y trasera, es posible afirmar la última inferencia en el párrafo anterior. Existe un nivel bajo constante por un segundo de las frecuencias medias altas y bajas. Que para nuestro oído al escuchar sólo el impulso ya no es perceptible pero en el proceso de convolución si es tomado en cuenta y esto hace que la reverberación se destaque por su resonancia mediosa y grave al mismo tiempo.

4.2. Tabulación y análisis de encuestas

La encuesta fue realizada a 25 profesionales del audio que ejercen en la ciudad de Quito. La figura 22, demuestra mayoría, con un 60%, a los ingenieros de mezcla, aclarar que 5 de estos netamente se dedican al audio para video (cine/TV). Y que la minoría es una persona se dedica profesionalmente a realizar *mastering*.

Pregunta 1. Profesión que ejerce en el audio

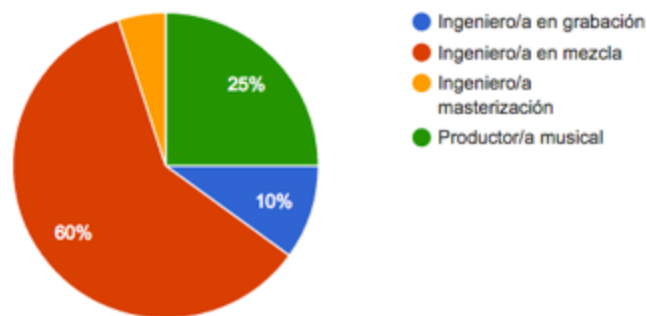


Figura 22. Cantidad de profesionales encuestados.

A continuación, se destacarán las preguntas que emitieron un resultado real para este proyecto.

La cuarta pregunta, por ejemplo, genera expectativa para la existencia del error subjetivo, pues el 32% (8 personas), no han usado reverberación por convolución.

Pregunta4: ¿Ha usado una o varias reverberaciones por convolución?

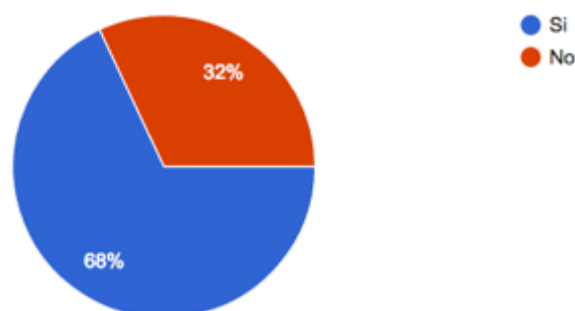


Figura 23. Valor de profesionales que no ha usado reverberación por convolución.

La encuesta inicia con la escucha comparativa, dando cualidades a las muestras, la primera está tratada por el *plug in* y la segunda es la grabación *in situ*. Al final de este apartado los encuestado debían elegir una de las dos muestras que les hayan gustado más.

En San Francisco, la primera muestra (audio procesado por el *plug in*), es la más optada con el 64%. Esta muestra tiene una reverberación controlada, bastante común y de uso musical.

Pregunta 7: Selección de muestra.

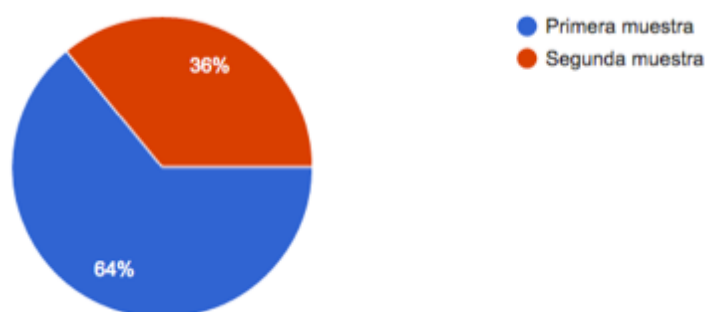


Figura 24. Selección de muestra iglesia San Francisco.

Sucede todo lo contrario en el caso de la Basílica, la grabación *in situ* es la más seleccionada pero es por el mismo motivo que en San Francisco, pues esta grabación aporta al sonido natural de la flauta y aunque la reverberación es grande tiene más control que la producida por la convolución.

Pregunta 10: Selección de muestra.

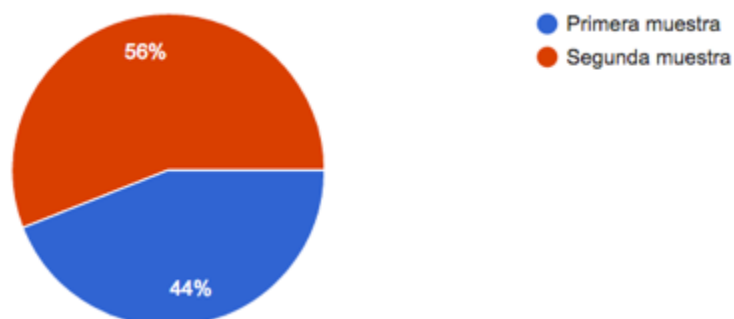


Figura 25. Selección de muestra iglesia Basílica del Voto Nacional.

Cuando la encuesta fue creada estas dos preguntas se pusieron de manera independiente, pues no se pensaba en que necesariamente tenían correlación. La primera pregunta hace referencia a si los impulsos le dan identidad a los lugares de los que fueron tomados y la segunda pide la confirmación de que estos aportan o no a la producción musical.

Sin embargo, para los encuestados la lógica funciona diferente y han demostrado, gracias a la igualdad de los resultados cuantitativos, que este apartado pudo haber sido uno sólo, creando una correcta y estrecha correlación entre sí. Concluyendo en que se genera una identidad sonora de los lugares propios del Ecuador, entonces aporta a la producción nacional.

Pregunta 14: En su opinión ¿Las librerías logradas para este *plug in* le dan identidad sonora a las iglesias San Francisco y Basílica del Voto Nacional?

Pregunta 15: En su opinión ¿Cree que este proyecto aporta a la producción musical nacional?

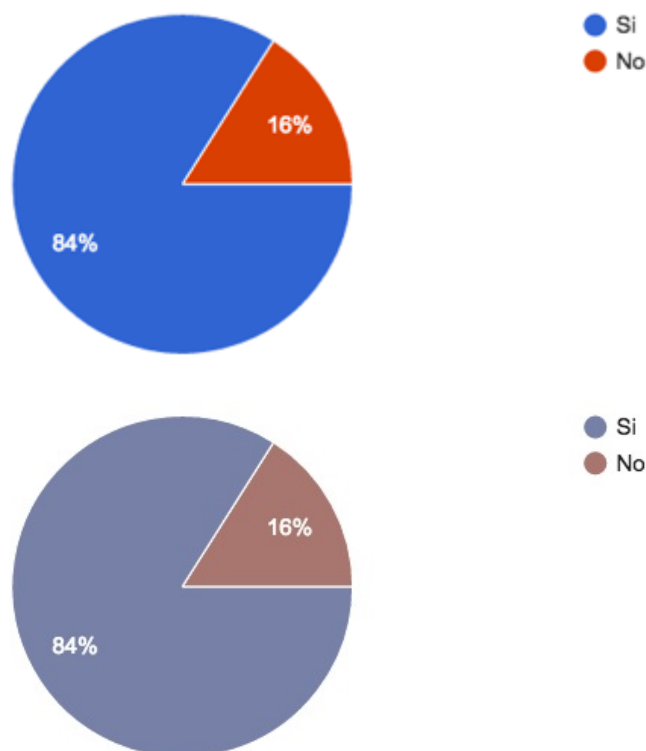


Figura 26. Respuesta de identidad sonora y aporte a la producción nacional.

Para finalizar con el análisis de los datos cuantitativos, se observa la tendencia creada por la selección de las reverberaciones según el uso en los instrumentos.

Como ya se mencionó antes, la reverberación lograda en San Francisco tiene tintes musicales y un enriquecimiento en frecuencias medias altas. En cambio, la Basílica tiene un uso más inclinado hacia el complemento espacial, debido a su nivel contundente en un amplio rango de frecuencias audible (20 – 1488 [Hz]). Así lo demuestra el resumen gráfico (figura 27).

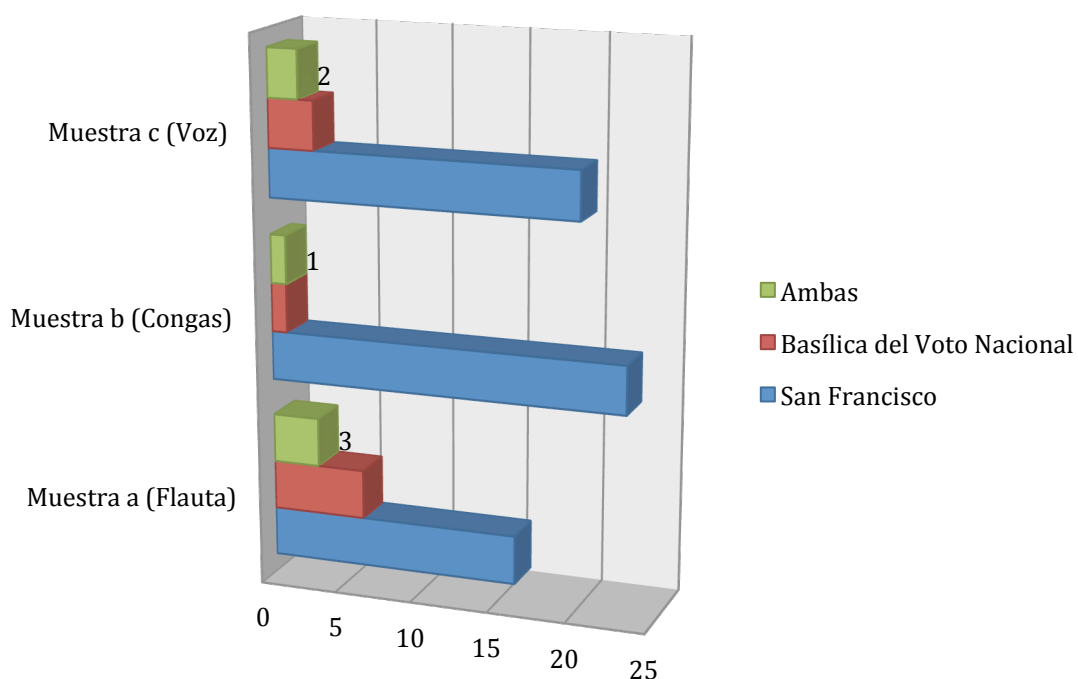


Figura 27. Valores de la preferencia comparativa de los audios procesados.

Las opiniones escritas por los encuestados son clasificadas como respuestas que se pueden cuantificar cualitativamente.

En la antepenúltima pregunta se les pide modificar la respuesta al impulso en el *plug in*. La consecuencia de la subjetividad en este caso, depende netamente de la educación auditiva y musical que tiene cada persona. Comprobado por los valores en la figura 28. Para generalizar las razones se tomaron palabras en común que tenían cada opinión escrita.

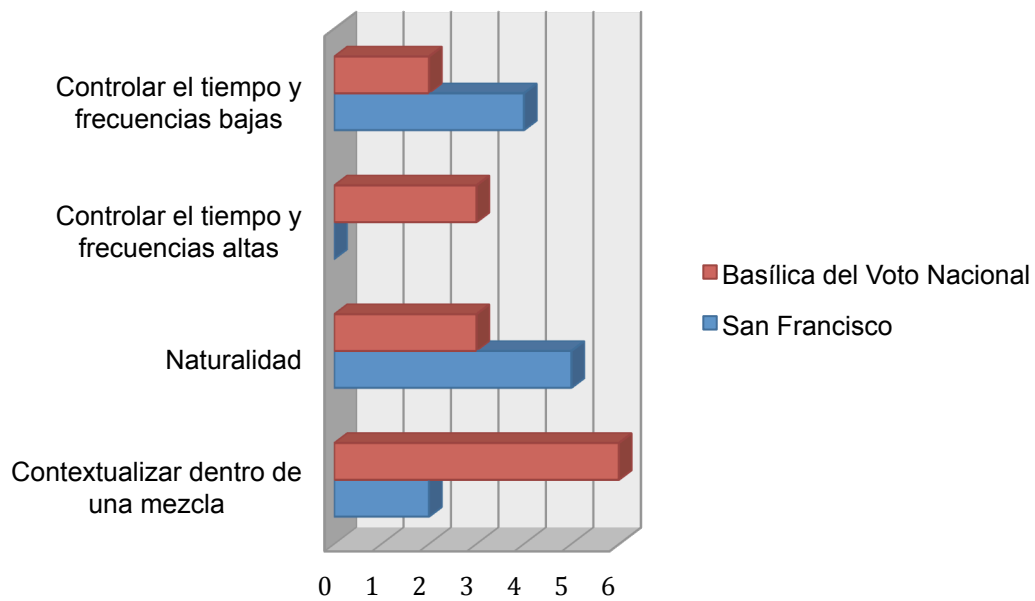


Figura 28. Razones de modificación de la respuesta al impulso.

Para concluir con el análisis de las encuestas, se resaltan tres respuestas que divergen de nuestros objetivos pero que aportan con una crítica constructiva. En primer lugar la opinión de un ingeniero de mezcla, que ha participado de proyectos musicales nacionales e internacionales.

“Creo que más se podría usar como material didáctico y de entrenamiento que para el hecho de producción musical nacional. Puede ser una gran guía para luego enfocarla en la producción. Interesante enfoque.”

Para él, este proyecto no aporta a la producción musical nacional pero si puede convertirse en una herramienta de uso didáctico. Es decir, se abre un abanico de posibilidades para darle uso a este material tal cual se ha logrado.

La segunda opinión a ser resaltada es del diseñador de sonido para cine y docente en el instituto de cine INCINE.

“No soy productor musical, soy diseñador de sonido en cine. Y como tal, encuentro interesante la reverberación obtenida en la Basílica por que

es extremadamente larga (y no existen muchas reverberaciones tan largas en el mercado de reverberaciones de convolución) y porque tiene esa resonancia aguda que puede ser utilizada expresivamente. Cuando escojo una reverberación de convolución, no me importa dónde fue tomada la muestra, no le encuentro sentido. Lo importante es el resultado.”

La visión de este profesional, sugiere la posibilidad de generar otro mercado. Registrando la respuesta al impulso netamente por simular espacios con un tipo acústica irregular o incluso de mala calidad. Ya que eso podría darle la oportunidad a un diseñador de sonido de ser mucho más creativo y abrir una puerta para facilitar el trabajo.

El resto de opiniones afirman el logro del proyecto. Lo que confirma que la meta se cumplió (figura 26) e incluso tiene proyecciones positivas y nuevas.

5. Proyecciones

A futuro y con todo lo aprendido gracias a la retroalimentación recibida por parte de los profesionales entrevistados, se redirigirá el enfoque del proyecto. Principalmente, modificaciones para lograr una reverberación que realmente tenga el potencial de un efecto de espacialidad, es decir, conseguir y hacer una reversión de las grabaciones de estos impulsos en formato estéreo 5.1, 7.1 y 3D up mixer.

Crear una biblioteca, de lugares emblemáticos con características acústicas extremas, que salgan fuera de lo común. Sonidos que puedan ser explotados por quienes generalmente usan más las reverberaciones por convolución, es decir, enfocar el producto hacia la parte audiovisual, donde tiene más potencial. Así, aportar en otras ramas como el diseño sonoro y la postproducción de audio para video. Como posibilidades tenemos, el Pailón del diablo desde el estrecho del tren, Cavernas Jumandy, Piramides de Cochassquí, por mencionar algunos lugares emblemáticos con acústicas distintas.

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

Objetivamente se confirma que la respuesta al impulso es el reflejo de los materiales y la geometría de las dos iglesias, dando identidad sonora basada en estos principios, así lo afirma Olson (1967, p.n 234). San Francisco, por ejemplo, obtiene como resultado una reverberación controlada con realce en frecuencias entre 200 a 1000 [Hz], la composición de materiales y dimensión del lugar disminuyen las reflexiones y el decaimiento es más rápido dando como resultado un tiempo de reverberación corto de 1.5 segundos como se muestra en la figura 16. En cambio, la Basílica tiene una reverberación muy presente en el rango de 20 a 1488 [Hz], esto gracias a que los materiales son más rígidos como la piedra, el bronce de las estatuas; también influye el gran tamaño de sus ventanales y cúpulas, por lo que el decaimiento en esta sala es muy lento lo que implica un tiempo de reverberación de 5.2 segundos.

Otra característica a resaltar son los tipos de resonancia que se percibe al escuchar el resultado de la convolución de los impulsos. San Francisco posee una resonancia entre 55 a 350 [Hz] como se observa en la figura 18 y la Basílica entre 450 a 1500 [Hz], la misma que fue etiquetada, según los encuestados, como un poco descontrolada y así lo afirma la figura 20 pues el tiempo de resonancia tiene más duración.

Dentro del análisis por percepción subjetiva, es posible comprender que cada ser humano percibe según el crecimiento autónomo a partir de los conocimientos adquiridos. La escucha de ingenieros de sonido y productores musicales, afirmó que las iglesias tienen una sonoridad característica, haciendo referencia a las dimensiones y el conjunto de materiales; también hubo quienes lo afirmaron gracias al reconocimiento del lugar por su memoria auditiva.

La satisfacción de los encuestados con el proyecto es alta, tanto que al momento de darles la oportunidad de modificar la respuesta al impulso, la mayoría sólo buscó contextualizar y posicionar el instrumento procesado dentro

de una supuesta mezcla, usando las propiedades de los archivos logrados (figura 28).

Cualitativamente las reverberaciones quedaron clasificadas según sus tiempos de reverberación resultantes. Es así que, San Francisco es una reverberación corta, genera una espacialidad mediana y que aporta color al instrumento porque destaca el carácter tímbrico del instrumento, en este caso el sonido de la flauta traversa que es el audio de referencia. Por este motivo es la más seleccionada por los encuestados que se dedican al audio profesional enfocado en la música. En cambio, la Basílica del Voto Nacional es una reverberación larga que permite percibir una espacialidad muy grande pero no aporta al sonido del instrumento por la resonancia moderadamente descontrolada en frecuencias altas que ya mencionamos anteriormente, sin embargo, quienes la escogieron la reverberación de esta iglesia argumentaron que es muy útil para lograr la espacialidad de un recinto e incluso podrían modificar la resonancia aguda para generar sensaciones.

En la parte experimental, previo el proceso de registrar la respuesta al impulso, es de suma importancia analizar detenidamente todo lo que se escucha dentro del recinto y así buscar una solución para evita que los sonidos externos al impulso ensucie las tomas de audio. Con el fin de no descartar información importante.

La técnica de barrido frecuencial permite obtener una mejor respuesta al impulso, ya que excita la sala en todas las frecuencias audibles (20 - 20000[Hz]). En este caso ambos recintos tenían demasiados sonidos externos, solamente fue posible limpiar de manera adecuada las grabaciones de la explosión del globo (véase Anexo 5), ya que indistintamente de cuanto se analizara el espectro, siempre quedaban partes del barrido mezclados con otros sonidos y al momento de procesarlos por el *plug in* la convolución era inestable, dando como resultado una reverberación con pequeñas retroalimentaciones.

El método del impulso explosivo, funcionó esencialmente porque en el espectrograma se observa claramente como el ruido exterior ni siquiera toca el registro de la onda sonora de la respuesta al impulso incluso el segmento del decaimiento esta libre de este sonido, pues era un ruido característico entre 20 a 95 [Hz] (véase Anexo 5) y fue sencillo limpiarlo con la herramienta Spectral De-Noise de iZotope RX7. Una vez que pasaron esta etapa fue posible cargar la respuesta al impulso logrado en el *plug in* IR Live y gracias a sus cualidades como *software* implementado para el sonido en vivo, los filtros que posee normalizaron sin problema los 1,5 y 5,2 segundos de reverberación. Concluyendo en un proceso exitoso.

Para terminar, es importante cumplir los estándares técnicos de una norma de evaluación acústica y cuidar durante todo el proceso las exigencias que imponen el audio profesional, en este caso los especificados en el apartado 3.5.1.

A futuro la implementación de otros procesos técnicos, como un software de predicción, nos permitirán optimizar y dar paso a un producto mejorado. Y lograr otros formatos del impulso como: estéreo, binaural e incluso en 5.1

6.2. Recomendaciones

A pesar de que el proyecto en gran parte logró su cometido es importante aclarar las mejoras posibles que se pueden hacer en los procesos aquí desarrollados.

En primer instancia, se aconseja aumentar el tiempo de análisis del recinto, realizar un estudio propiamente acústico. Si se logra hacer el trazado de rayos es posible conocer a ciencia cierta el comportamiento de los materiales del recinto, se podría encontrar el lugar preciso donde las reflexiones son claras e incluso aportan sonoramente a la respuesta del impulso, optimizando recursos y además evitando una gran cantidad de grabaciones.

En la parte experimental, los audios captados con el barrido de frecuencia no fueron usados debido a que las grabaciones estaban contaminadas por ruido eléctrico y de construcción, así que es importante al momento del *scouting* de la locación, hacer una lista de los diferentes tipos de ruido, prever una solución y en caso de ser maquinaria pedir anticipadamente que sea apagada.

Es recomendable cuidar las cualidades que debe cumplir un micrófono, en este tipo de proyectos esto hace que se tenga un mejor resultado. Como se busca captar la respuesta al impulso y la sonoridad del recinto, lo principal es que la polaridad sea omnidireccional pues así se capta en todas las direcciones. La sensibilidad debe cuidarse según la etapa de experimentación. En este proyecto para captar la respuesta al impulso se utilizó un micrófono de medición que posee una sensibilidad entre 20 a 20000[Hz] y para la etapa de grabación del instrumento *in situ* se eligió un micrófono con menor sensibilidad que se encuentre entre 20 a 5000[Hz], pues se buscaba que sólo sea captado el instrumento adecuadamente. Y por último el nivel de SPL máximo entre 130 y 146 [dB] para evitar distinción o saturación.

Durante la investigación previa a la realización del proyecto, la selección de *plug ins* fue el más extenso. Pues en la actualidad existen muchísimos *software* desarrollados. Se recomienda basar el criterio de selección en los recursos disponibles y asegurarse que permite cargar impulsos propios. Si aún no está listo para hacer una inversión por este tipo de programas, existen reverberaciones gratuitas o en versión demo, por supuesto con sus respectivas limitaciones. SIR es una de las reverberaciones gratuitas y funciona excelente, el único inconveniente es que sólo está disponible para Windows. También esta la llamada Reaverb, aunque es propia de la DAW Reaper, en Windows es posible usarla con cualquier otra plataforma como un *plug in* VST.

Pero si por otra parte es posible hacer una inversión, se recomienda de primera mano experimentar con Altiverb, que posee incluso un apartado donde se muestran los pasos a seguir la para obtener la respuesta al impulso según sus propios estándares, lo que asegura la calidad de la respuesta al impulso.

Por último, si se está generando archivos que podrían pertenecer a una librería de reverberación, no es suficiente lograr el impulso en mono, pues para generar la espacialidad adecuada debemos también poner a disposición la versión del impulso en estéreo y tener los dos formatos básicos.

REFERENCIAS

- Alien, J. B., & Barkley, D. A. (1978). Método de imagen para simular eficientemente la acústica de salas pequeñas". Acoustics Research Department, Laboratorios Bell, (6).
- Alonso, G., Budde, L., & Zannier, M. R. (2012). Síntesis de respuesta impulsiva de recintos a través del método de trazado de rayos.
- Benade, A. H. (1990). *Fundamentals of musical acoustics*. Courier Corporation.
- Berrío Bernal, J. D. (2012). Plug in VST de reverberación basado en el modelo de fuentes imagen, 12.
- Brice, R. (Segunda edición). (2001). *Music Engineering*. Newnes. Recuperado el 28 de noviembre del 2019 de <https://www.scribd.com/read/282481631/Music-Engineering#>
- Burgess, R. J. (2014). *The history of music production*. Oxford University Press.
- Cetta, P. (2003). Modelos de localización espacial del sonido y su implementación en tiempo real. *Altura–Timbre–Espacio*. Cuaderno, (5).
- Christensen, K. B., & Lund, T. (1999). Simulación de sala para películas multicanal y música: una preimpresión de la sociedad de la ingeniería de audio.
- De Man, B., McNally, K., & Reiss, J. D. (2017). *Perceptual evaluation and analysis of reverberation in multitrack music production*. *Journal of the Audio Engineering Society*.
- Ferreyra, S. P., & Ramos, O. A. (2007). Análisis físico-acústico espacial de respuestas impulsivas de un recinto con alta dispersión sonora obtenidas por métodos indirectos. *Mecánica Computacional*, 26, 3-14.
- Gerges, S. N. (2001). *Ruido: Fundamentos y Control*.

- Gibbs, B. M., & Jones, D. J. (1972). Un método de imagen simple para un enclosure. *Acustica* 26(1),10-19.
- James, G., & Burley, D. (2002). *Matemáticas avanzadas para ingeniería*. Pearson Educación.
- Long, M. (Segunda edición). (2014). *Architectural Acoustics*. Elsevier. Recuperado el 28 de diciembre del 2019 de <https://www.scribd.com/read/282548529/Architectural-Acoustics#>
- M. Biembengut, Modelaje matemático en la enseñanza de Matemática en la Ingeniería: posibilidades y dificultades, *Ingenium*, vol16, n.31, pp.71-92, mayo, 2015.
- Mauri, A., (2007). Categorías Perceptivas de Reverberación Artificial para la Reproducción de Auriculares de Música., *AES*, 10.
- Mercé, J., & Gallegos, J. (2011). *San Francisco una historia para el futuro*. Recuperado el 28 de diciembre del 2019 de <https://issuu.com/inpc/docs/snfcolibrofinal>
- Miyara, F. (2006). *Acústica y sistemas de sonido* (pp. 44-57). Universidad Nacional de Rosario.
- Nathan, J. (1998). *Back to basics audio*. Elsevier. Recuperado el 15 de octubre del 2019 <https://www.scribd.com/read/282484770/Back-to-Basics-Audio#>
- Norma, U. N. E. EN ISO 3382-1: 2010. *Tiempo de reverberación en recintos*.
- Olson, H. F. (1967). *Music, physics and engineering* (Vol. 1769). Courier Corporation. Recuperado el 21 de diciembre del 2019 de <https://www.scribd.com/read/271631871/Music-Physics-and-Engineering#>
- Owsinski, B. (2013). *The mixing engineer's handbook*. Nelson Education.

- Owsinski, B. (2013). *The recording engineer's handbook*. Nelson Education.
- Sáenz, A. L. (2007). Sobre la transformación Tiempo-Frecuencia y la aplicación del proceso de convolución a la dinámica de sistemas físicos. *Aplicaciones acústicas. Revista de acústica*, 38(1), 7-13.
- Savage, S. (2011). *The art of digital audio recording: A practical guide for home ans studio*. Oxford University Press. Recuperado el 26 de diciembre del 2019 de <https://books.google.com.ec/books?id=987Kz87-TygC&lpg=PT106&dq=chamber%20reverb%20room%20history&pg=PT107#v=onepage&q=chamber%20reverb%20room%20history&f=false>
- Theodore, M. (2004). Software de reverberación de Altiverb. Recuperado el 20 de octubre del 2019 de https://www.jstor.org/stable/3681839?read-now=1&seq=2#page_scan_tab_contents
- Thompson, D. M. (2018). *Understanding audio: getting the most out of your project or professional recording studio*. Hal Leonard Corporation. Recuperado el 27 de septiembre del 2019 <https://www.scribd.com/read/365887244/Understanding-Audio-Getting-the-Most-Out-of-Your-Project-or-Professional-Recording-Studio#>
- Timón Ribagorda, M. (2019). Algoritmo generador de espacios asociados a cadencias tonales.
- Velasco, M. (2014). Emulating the sound of analog reverb and delay units using fast convolution, *Master of Desing Science*, 34, 10.

ANEXOS

Anexo 1. Descripción de requerimientos técnicos de la norma UNE-EN ISO 3382-1:2009

A.3.1 Fuente

Conviene que la fuente y el equipo asociado puedan radiar una señal de nivel suficiente en todas las bandas de octava comprendidas entre 125 Hz y 4 000 Hz, para que se pueda obtener un rango de decrecimiento adecuado en cada banda de octava. La fuente debe ser lo más omnidireccional posible (véase 4.2.1).

Para los ensayos relativos a las condiciones acústicas con un orador humano, se puede utilizar una fuente cuya directividad esté próxima a una cabeza humana. Las cabezas artificiales que cumplan con la referencia [6] se pueden utilizar sin verificación explícita del modelo de directividad.

A.3.2 Micrófonos

Para todas las medidas, se debería utilizar un micrófono omnidireccional para medir la respuesta impulsiva.

Para los valores de J_{LF} , se requiere también un micrófono bi-direccional de respuesta en ocho y conviene calibrar, en campo libre, las sensibilidades relativas del micrófono omnidireccional y del micrófono bi-direccional de respuesta en ocho en la dirección de sensibilidad máxima.

Para los valores de G , se debe calibrar la sensibilidad del micrófono omnidireccional.

A.3.3 Respuestas impulsivas

Las respuestas impulsivas en bandas de octava son necesarias para el cálculo de todas las magnitudes. Se pueden obtener utilizando una fuente impulsiva, como un arma de fuego cargada con cartuchos sin balas o mediante técnicas más complejas que requieren el cálculo de la respuesta impulsiva a partir de los diferentes tipos de señales radiadas por altavoces. Si la respuesta impulsiva obtenida no se puede reproducir con exactitud, entonces conviene hacer el promedio de varias mediciones repetidas en la misma posición.

Las armas de fuego cargadas con cartuchos sin balas se pueden modificar para que sean lo más omnidireccionales posible, pero estas no producen respuestas impulsivas exactamente reproducibles. Estas armas de fuego pueden producir niveles sonoros muy elevados que permiten obtener un rango dinámico amplio, pero puede dar lugar a efectos no lineales cerca del arma.

Los métodos que utilizan altavoces como fuente están limitados por la respuesta en frecuencia y por la directividad del altavoz. La respuesta en frecuencia promedio puede, en cierta medida, corregirse, pero las variaciones con la dirección no se pueden eliminar y pueden volverse importantes a frecuencias elevadas. El uso de un altavoz para emitir diversas señales impulsivas es generalmente poco ventajoso, porque el rango dinámico de las respuestas impulsivas resultante está limitado, a menos que se promedien de manera sincrónica muchas respuestas impulsivas. El cálculo de la intercorrelación entre la señal de emisión y la señal de recepción puede aportar respuestas impulsivas con un buen rango dinámico y una buena inmunidad al ruido (véase la Norma ISO 18233). El uso de la transformada rápida de Hadamard y de las secuencias de longitud máxima (MLS) constituye un método de tipo correlación ventajoso^[14]. Otras señales con un amplio espectro liso, tales como las señales moduladas linealmente en frecuencia, también se pueden utilizar con éxito.

Anexo 2. Descripción de las posiciones de la norma UNE-EN ISO 3382-1:2009

A.4 Posiciones de medición

Las diferentes magnitudes medidas no son propiedades estadísticas del conjunto del auditorio y variarán de forma sistemática de un asiento a otro. Por lo tanto, es importante incluir un número adecuado de posiciones de la fuente y del receptor para caracterizar la totalidad de la sala.

Generalmente, se deberían utilizar un mínimo de tres posiciones de la fuente en la escena. En salas con grandes escenarios o fosos de orquesta, se deberían utilizar más posiciones de la fuente. En los pequeños anfiteatros, donde la fuente normal tiene únicamente una ubicación en el recinto, sería aceptable una única posición de la fuente.

La fuente debería estar situada en posiciones representativas de las utilizadas por los intérpretes en la sala. Dado que la mayoría de salas son simétricas con respecto al eje central, las posiciones del receptor se pueden disponer solamente en un lado de la sala con las posiciones de la fuente situadas de forma simétrica con respecto al eje central. De esta forma, podría haber una posición de la fuente central, con otras posiciones de la fuente a distancias iguales a izquierda y derecha del eje central. Se recomienda una altura de la fuente de 1,5 m, para evitar una modificación de baja frecuencia de la potencia de salida de la fuente en el rango de frecuencias de medición.

Si la directividad de la fuente está próxima a los límites mínimos indicados en la tabla 1, se debería repetir la medición en al menos tres orientaciones diferentes de la fuente en total. Los parámetros resultantes de los diferentes ángulos de la fuente se deberían promediar aritméticamente.

En función del tamaño de la sala, se deberían utilizar un mínimo de 6 a 10 posiciones representativas del micrófono. La tabla A.2 indica el número mínimo de posiciones de recepción recomendado. Las posiciones del receptor se deberían repartir de manera uniforme sobre toda la zona de asientos del público. Cuando una sala está separada en varias zonas, como palcos o zonas bajo los palcos, serán necesarias más posiciones de recepción.

El micrófono se debería colocar a una altura de 1,2 m por encima del suelo en las ubicaciones de los asientos del público, para corresponder a la altura de los oídos de un oyente sentado.

Las posiciones de la fuente y del receptor y las alturas se deberían anotar junto con los resultados. Además, se deberían anotar las condiciones del escenario, tales como la presencia de sillas y atriles, porque producirán efectos medibles en los resultados.

Tabla A.2 – Número mínimo de posiciones del receptor en función del tamaño del auditorio

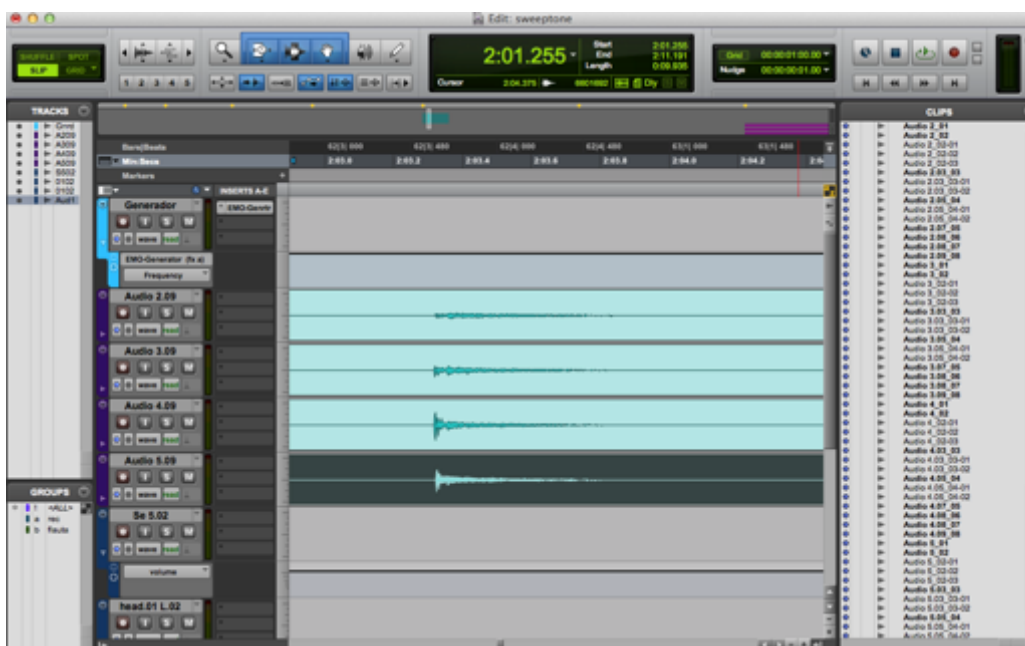
Número de asientos	Número mínimo de posiciones de micrófono
500	6
1 000	8
2 000	10

Anexo 3. Medida de precaución ante la saturación

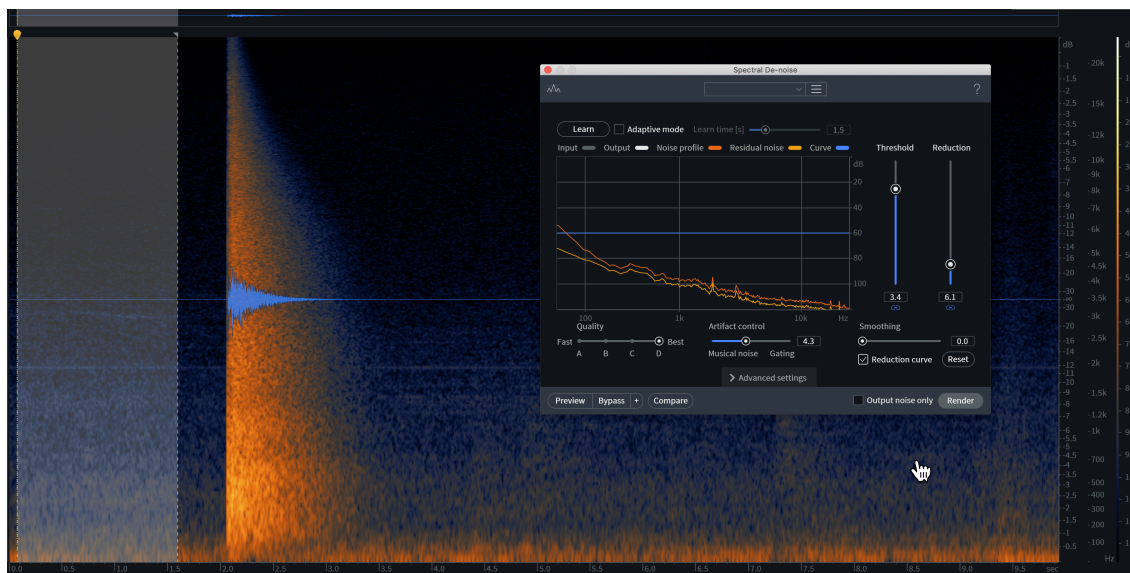
4.2.2.5 Sobresaturación

No se debe admitir ninguna sobresaturación en ninguna fase del equipo de medición. Cuando se utilizan fuentes acústicas impulsivas, se deben utilizar dispositivos indicadores de niveles de pico para detectar las sobresaturaciones.

Anexo 4. Estructura de la sesión de Pro tools de las tomas captando la respuesta la impulso de este proyecto.



Anexo 5. Audio en iZotope preparado para ser depurado



Anexo 6. Preguntas de encuesta.

Reverberación por convolución, iglesias: Basílica del Voto Nacional y San Francisco

A continuación una serie de preguntas que buscan tener una opinión del usuario sobre la reverberación por convolución basada en la acústica de dos iglesias representativas de la ciudad de Quito.

Profesión que ejerce relacionado al audio *

- Ingeniero/a en grabación
- Ingeniero/a en mezcla
- Ingeniero/a masterización
- Productor/a musical

Conoce en persona la Basílica del Voto Nacional *

- Si
- No

Conoce en persona la Iglesia San Francisco *

- Si
- No

¿Ha usado una o varias reverberaciones por convolución? *

- Si
- No

Cualidades de muestras de audio

A continuación escuchará muestras de audio de grabaciones in situ y grabaciones procesadas en la reverberación por convolución.

Iglesia San Francisco

A continuación escuchara dos audios, un audio seco y otro procesado.

Primera muestra, es: *

- El decaimiento de la reverberación es largo
- El decaimiento de la reverberación es corto
- Añade color
- Añade espacialidad
- Aporta sonoramente al instrumento

Segunda muestra, es: *

- El decaimiento de la reverberación es largo
- El decaimiento de la reverberación es corto
- Añade color
- Añade espacialidad
- Aporta sonoramente al instrumento

...

Selección de muestra

- Primera muestra
- Segunda muestra

Comparativa sobre las muestras de audio procesadas

A continuación se hará una comparación subjetiva de las reverberaciones obtenidas por convolución de cada iglesia, según la diferencia de instrumento.

Muestra a (Flauta) *

- San Francisco
- Basílica del voto Nacional

Muestra b (Congas) *

- San Francisco
- Basílica del voto Nacional

Muestra c (Voz) *

- San Francisco
- Basílica del voto nacional

Parámetros

A continuación, según su criterio puede modificar cualquier parámetro de la reverberación que sugiera mejora al audio.

¿Qué parámetros modificó? *

Pre Delay

x REV TIME

Dry/Wet

Output

LOWS

HIGHS

En su opinión: ¿Que buscaba lograr al modificar los parámetros? *

Texto de respuesta corta

En su opinión ¿Las librerías logradas para este plug in le dan identidad sonora a las iglesias San Francisco y Basílica del Voto Nacional?

Si

No

En su opinión ¿Cree que este proyecto aporta a la producción musical nacional?

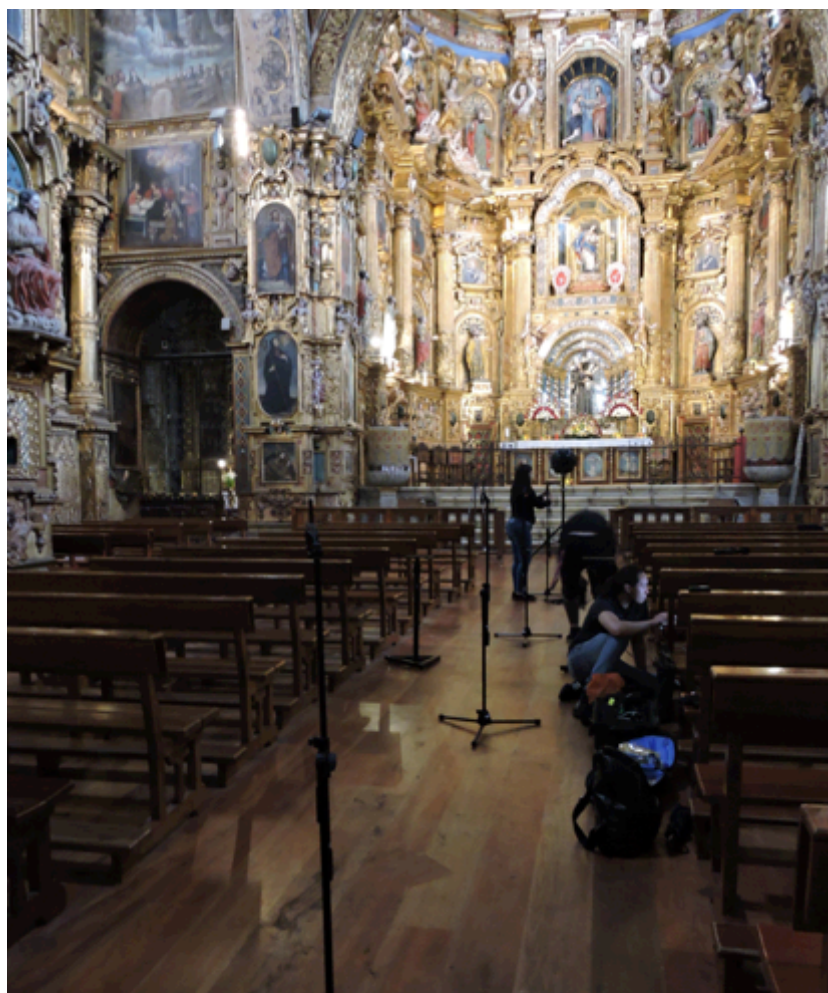
Si

No

¿Por qué? *

Texto de respuesta larga

Anexo 7. Experimento en la iglesia San Francisco





Anexo 8. Experimento en la iglesia Basílica del Voto Nacional.



