



**FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**

**GUÍA METODOLÓGICA PARA EL DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UN  
SISTEMA DE SONIDO EN VIVO**

**Autor**

**Rolan Eduardo Reyes Rojas**

**Año**

**2019**



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

GUÍA METODOLÓGICA PARA EL DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UN  
SISTEMA DE SONIDO EN VIVO

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

Profesor Guía  
Msc. Adrián Paúl Cabezas Yáñez

Autor:  
Rolan Eduardo Reyes Rojas

Año  
2019

## **DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA.**

“Declaro haber dirigido el trabajo, “Guía metodológica para el diseño y optimización de un sistema de sonido en vivo”, a través de reuniones periódicas con el estudiante Rolan Eduardo Reyes Rojas, en el semestre 201910, 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”.

---

Adrián Paúl Cabezas Yáñez

Master of creative industries (Music and sound)

CI: 171918954-8

## **DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR.**

“Declaro haber revisado este trabajo, “Guía metodológica para el diseño y optimización de un sistema de sonido en vivo”, del estudiante Rolan Eduardo Reyes Rojas, en el semestre 201910, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.

---

Christiam Santiago Garzón Pico  
Master en Acústica Arquitectónica y Medio Ambiental  
CI: 171364462-1

## **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”

---

Rolan Eduardo Reyes Rojas

C.I: 171987699-5

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer a Dios por permitirme levantarme cada día y sentirme bendecido, a mi familia por el apoyo incondicional en cada etapa de mi vida en especial a mis padres y mi esposa que han sido un pilar fundamental, a los profesores y mentores que fueron parte de mi formación dentro y fuera de las aulas.

A Christiam Garzón por motivarme e impulsarme a terminar mi carrera profesional.

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo de titulación a mis padres que siempre buscaron lo mejor para mi, a mi esposa que siempre me ha apoyado en cada proyecto que he emprendido, pero de manera especial a Elián, que siempre será mi motivación más fuerte.

## RESUMEN

El presente documento busca dar una guía efectiva y en corto tiempo a situaciones en las que, se necesita diseñar una solución para un sistema de sonido en vivo, ya sean grandes espectáculos o una simple conferencia. Se abarca los criterios de arreglos lineales, interacción de las fuentes entre si y con el entorno que las rodea, para ello se hablará de simulación y mediciones acústicas del sistema de altavoces en el recinto y las directrices para optimizarlo, como: niveles, retardos, ecualización. Verificando las mediciones obtenidas antes y después de dicha optimización.

Se realiza un breve recuento histórico para saber como nace la necesidad de hacer esta calibración, además de revisar los fundamentos teóricos que se ven involucrados, para así poder interpretar de mejor manera los datos obtenidos mediante los sistemas de medición de software FFT y así poder tomar decisiones acertadas sobre las correcciones que se necesitan en un sistema de altavoces.

Además, se observará mediante un ejemplo realizado en el Ágora de la Casa de la Cultura Ecuatoriana en la ciudad de Quito, la aplicación practica de los conocimientos que se explican en el documento.

Se busca con esto que cualquier profesional en el campo del audio pero con poca experiencia en el ámbito del refuerzo sonoro, pueda seguir los pasos adecuados en el diseño y calibración de cualquier sistema de sonorización, basándose en la presente guía.



## **ABSTRACT**

This document seeks to give effective guidance in a short time to situations in which a solution for a live sound system needs to be designed, for big shows or a simple conference. It covers the criteria of line arrays, interaction of the sources with each other and with the surrounding environment, we will talk about simulation and acoustic measurements of the speaker system in the venue and the guidelines to optimize it, such as: levels, delays, equalization Verifying the measurements obtained before and after the optimization.

A brief historical review is made to know the need to make this calibration, in addition to reviewing of the theoretical foundations involved, in order to better interpret the data obtained through the FFT software measurement systems and thus be able to take right decisions about the corrections needed in a speaker system.

In addition, the practical application of the knowledge explained in the document will be observed through an example in the Agora de la Casa de la Cultura Ecuatoriana in Quito.

It is sought with this that any professional in the field of audio but with little experience in the field of sound reinforcement, can follow the appropriate steps in the design and calibration of any sound system, based on this guide.

# ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes .....	1
1.2. Alcance .....	5
1.3. Objetivos .....	6
1.3.1. Objetivo General.....	6
1.3.2. Objetivos Especificos.....	6
2. MARCO TEÓRICO .....	7
2.1. Sistemas de refuerzo sonoro.....	7
2.1.1. Relaciones lineales y logarítmicas.....	7
2.1.2. Fase .....	8
2.1.3. Polaridad.....	9
2.1.4. Ley del inverso cuadrático .....	9
2.2 Herramientas de Medición .....	10
2.2.1. Análisis Logarítmico (RTA).....	10
2.2.2. Analizadores FFT .....	11
2.2.2.1 Frecuencia de muestreo.....	12
2.2.2.2 Longitud de tiempo/ FFT size .....	13
2.2.2.3 Fixed points per octave (FPPO).....	16
2.2.2.4. Función de ventana .....	17
2.2.2.4.1 Blackman – Harris .....	18
2.2.2.4.2. Blackman .....	18
2.2.2.4.3. Hann.....	19
2.2.2.4.4. Flat-Top .....	19
2.2.3. Función de Transferencia .....	20
2.2.3.1. Amplitud relativa .....	21
2.2.3.2. Fase relativa .....	22
2.2.3.3. Fase relativa vs Polaridad.....	23

2.2.3.4. Coherencia .....	24
2.2.3.4.1. Blanqueo por Coherencia .....	26
2.2.4. Respuesta de Impulso .....	27
2.2.4.1. Nivel Relativo.....	28
2.2.4.2. Tiempo relativo de llegada.....	28
2.2.4.3. Polaridad .....	29
2.2.4.4. Fase.....	29
2.2.4.5. Roll Off de alta frecuencia.....	29
2.2.5. Arreglos de cajas acústicas.....	29
2.2.5.1 Arreglos lineales .....	30
2.2.5.2 Arreglos de subgraves.....	31
2.2.5.2.1. Subgraves en línea.....	31
2.2.5.2.2. Gradiente .....	32
2.2.5.2.3. End Fire.....	33
<b>3. Diseño de Sistemas .....</b>	<b>34</b>
3.1. Simulación Acústica .....	34
3.2. Cobertura y colocación de las fuentes.....	35
3.3. Región de crossover acústico.....	36
<b>4. Propuesta metodológica para la optimización de sistemas de sonorización.....</b>	<b>36</b>
4.1. Esquema de conexión.....	37
4.2. Simulación acústica.....	38
4.3. Niveles.....	38
4.4. Medición y calibración del sistema.....	38
4.5. Retardos.....	41
4.6. Ecuación.....	44

4.7. Verificación de calibración.....	46
5. Conclusiones y recomendaciones. ....	49
5.1. Conclusiones.....	49
5.2. Recomendaciones.....	50
REFERENCIAS .....	51

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Diferencia de fase por distancia en grados de dos ondas. ....	8
<b>Figura 2.</b>	Respuesta de impulso positiva.....	9
<b>Figura 3.</b>	Gráfica de la ley del inverso cuadrático. ....	10
<b>Figura 4.</b>	RTA Audio Control SA-3051 .....	11
<b>Figura 5.</b>	Ejemplo de transformada de Fourier (FFT).....	12
<b>Figura 6.</b>	Señal continua vs señal discreta.....	13
<b>Figura 7.</b>	Ruido rosa con diferentes tamaños de FFT en Smart V8. ....	13
<b>Figura 8.</b>	Función de transferencia FFT y FFT FPPO .....	16
<b>Figura 9.</b>	Forma de onda de la función de ventana Blackman-harris.....	18
<b>Figura 10.</b>	Forma de onda de la función de ventana Blackman .....	18
<b>Figura 11.</b>	Forma de onda de la función de ventana Hann .....	19
<b>Figura 12.</b>	Forma de onda de la función de ventana Flat-top.....	19
<b>Figura 13.</b>	Proceso básico de una función de transferencia. ....	20
<b>Figura 14.</b>	Cilindro con las distancias en grados y su relación en dB .....	22
<b>Figura 15.</b>	Curva de fase de software Smart V8. ....	24
<b>Figura 16.</b>	Comportamientos de la gráfica de coherencia.....	26
<b>Figura 17.</b>	Blanqueo por coherencia en software Smart V8.....	27
<b>Figura 18.</b>	Lóbulos formados por la interacción de fuentes acústicas.....	30
<b>Figura 19.</b>	Arreglo en línea de subgraves. ....	32
<b>Figura 20.</b>	Arreglo gradiente con 3 subgraves. ....	33
<b>Figura 21.</b>	Arreglo End Fire. ....	34
<b>Figura 22.</b>	Simulación acústica del Ágora CCE, vista de cobertura y SPL. ....	35
<b>Figura 23.</b>	Esquema básico para medición de un sistema de sonorización.....	38
<b>Figura 24.</b>	Colocación del micrófono de medición en eje a la distancia de la zona de FOH.....	39
<b>Figura 25.</b>	Mediciones propuestas para el sistema en el Ágora CCE. ....	39
<b>Figura 26.</b>	Medición del punto 1 sin ningún proceso. (lado derecho).....	40
<b>Figura 27.</b>	Medición del punto 2 sin ningún proceso. (lado izquierdo). ....	41
<b>Figura 28.</b>	Simulación acústica de arreglo gradiente en la frecuencia de corte42	
<b>Figura 29.</b>	Arreglo gradiente de subgraves Adamson T21.....	42

<b>Figura 30.</b> Vista de la ventana de impulso en Smaart V8. ....	43
<b>Figura 31.</b> Desfase del sub con respecto al sistema LR. ....	43
<b>Figura 32.</b> Ejemplo de corrección de curva, Meyer Sound, Sf. ....	45
<b>Figura 33.</b> Procesador XTA DP448. ....	45
<b>Figura 34.</b> Criterios de ecualización según género musical. ....	46
<b>Figura 35.</b> Medición del punto 1 (R), con los ajustes en ecualización.....	47
<b>Figura 36.</b> Medición del punto 2 (L), con los ajustes en ecualización. ....	47
<b>Figura 37.</b> Medición del punto 4 (FOH), subgrave en fase con el sistema LR. ....	48
<b>Figura 38.</b> Medición del punto 3 (FOH), frontfill.....	48

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Relaciones lineales y logarítmicas .....	7
<b>Tabla 2.</b> Tamaño de FFT 256 para las 10 primeras frecuencias de 48 KHz. ...	14
<b>Tabla 3.</b> Tamaño de FFT 37268 para las 10 primeras frecuencias de 48 KHz.	15
<b>Tabla 4.</b> Tamaño de paso del FFT 4096 para 48000 Hz. ....	17
<b>Tabla 5.</b> Tabla de frecuencias ISO con longitud de onda en metros y su periodo. ....	23

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Antecedentes

Un sistema de sonido interactúa de forma distinta en un recinto y en otro, ya sea por las características arquitectónicas, por características internas del sistema electro-acústico o por factores externos como la temperatura y la presión atmosférica, es por ello no se debe asumir que un sistema electro-acústico ya se encuentra listo para su operación por el simple hecho de conectarlo, lamentablemente esto es muy común todavía en nuestro medio. Se deben tomar ciertas consideraciones y criterios para ajustar correctamente el sistema y de esta manera mejorar su respuesta en frecuencia y amplitud con dicho entorno, este proceso requiere examinar el comportamiento del conjunto “sistema-sala” y todo el recorrido de la señal, entendiendo la interacción de los diferentes subsistemas (left, right, front fills, out fills, subs, delays, etc), hasta llegar al oyente o a una audiencia ubicada en las diferentes partes del recinto, haciendo que su experiencia sonora sea lo más pareja posible en los diferentes puntos de la sala.

Van Veen, 2017 habla sobre la problemática de tener audiencia en zonas muy reflejantes, si es que en dichas zonas el nivel del sonido directo es casi idéntico al nivel de sonido reflejado, se crea un filtro de peine y es cuando la respuesta de frecuencia es poco favorable, en esta zona se ve afectada la inteligibilidad del sistema de audio y la relación señal ruido, además que si las trayectorias del sonido directo y reflejado son iguales, el filtro de peine empeora cada vez que las ondulaciones se cancelen directa o indirectamente (Ryan, 2011).

Desde la década de los 80's se empezaron a hacer las primeras mediciones y ajustes de los sistemas de sonorización de espectáculos o “Sonido en Vivo”, uno de los precursores fue Bob McCarthy en el año de 1978 empezó a hacer las primeras mediciones y ver que ocurría con los sistemas de audio, no fue sino hasta 1987 quien con Greatful Dead (banda estadounidense) logró medir y



ajustar un sistema de audio para un show en vivo, con ayuda de analizadores FFT y varios micrófonos de medición para hacer una comparativa entre un recinto vacío y su respuesta con un recinto lleno en pleno show y así contrastar sobre como cambiaba su respuesta.

McCarthy en 2017, hace un recuento histórico y explica cómo fue el ajuste del sistema de sistema de sonido en el primer tour en el año de 1978, el cual básicamente consistía en poner un track grabado en un cassette y corregir su respuesta con un ecualizador de 1/3 de octava, como segundo paso, se sentaba frente a la zona de FOH y con un micrófono Shure SM545 probaba su voz y nuevamente hacia los cambios en el ecualizador de 1/3 de octava. Las únicas variables que se podían ajustar eran los niveles de las vías del crossover y el EQ de sala.

Para principios de la década de los 80's el proceso se hacía ahora en 3 partes: Se utilizaba un analizador RTA en la posición de mezcla y se ajustaba visualmente el sistema de audio, luego se escuchaba el sistema con un track desde cassette y se hacían retoques al ecualizador de sala, finalmente se hacían los ajustes finales probando la voz con un SM58 de Shure.

En el año de 1984 se podría decir que empezó el desarrollo de los sistemas de medición que utilizamos actualmente empezando por el SIM de Meyer Sound Labs, donde Bob McCarthy con ayuda de Jhon Meyer lograron plasmar el proyecto del primer hardware y software de medición que además tenía la ventaja de ser multi-canal.

Fue en este punto donde se creó la necesidad de mantener un ambiente técnicamente controlado para que cada ingeniero de sala se preocupe netamente por hacer la parte artística del espectáculo garantizando la calidad y respuesta lineal del equipo.

Si bien el diseño y la optimización son procesos netamente técnicos es aquí donde se junta la ciencia, con el fundamento físico sobre la acústica, y el arte, que busca un resultado estético y agradable para la escucha de la audiencia en todos los puntos de la sala, para garantizar una respuesta óptima de todo el sistema, tomando en cuenta las características físicas y el propósito de la sala en la que se colocará el sistema electro-acústico, así como criterios de alineación temporal y de nivel de las distintas vías o subsistemas que conforman el gran sistema electro-acústico.

Para todo el análisis del sistema se necesitan hacer una pequeña anatomía como nos explica Anderson en 2015. Lo primero es la obtención de datos por mediciones las cuales obtendrán los datos eléctricos o acústicos. Un tipo de medición eléctrica es medir la entrada de un equipo electro acústico y compararla con la medición de su salida. Las mediciones acústicas se las tomará de los micrófonos de medición, dichos micrófonos necesitarán una entrada y un preamplificador en nuestra cadena de medición, estos micrófonos se caracterizan por tener una respuesta de frecuencia neutral y ser de patrón omnidireccional.

Una parte fundamental de todo el proceso es el diseño y simulación de el sistema de audio, ya que esto tendrá mayor o menor impacto en el correcto ajuste de un sistema, se debe tomar en cuenta la geometría del lugar, superficies reflectantes, zonas de audiencia, especificaciones técnicas del sistema, interacciones de las diferentes fuentes sonoras, directividad del espectro de frecuencia, entre muchos otros factores.

El diseño empieza con una moderación del recinto donde se va a trabajar con el sistema de audio, para esto se utiliza software de modelamiento acústico como por ejemplo Ease Focus de la compañía AMFG que es un software gratuito con un banco de datos de fabricantes y modelos, también muchos de los fabricantes desarrollan sus propios programas los cuales son más precisos ya que las mediciones las efectuar en sus laboratorios de medición.

En el software de modelamiento se coloca el tipo de altavoces, especificando marca, modelo, cantidad, dicho software entregará información visual de respuesta de frecuencia, nivel de presión sonora, visualización de zonas de audiencia, con toda esa información podremos hacer un diseño que pueda satisfacer todas nuestras necesidades técnicas según el tipo de espectáculo o según nuestros propios criterios.

Una parte fundamental en el diseño es conocer los tipos de fuentes, su interacción y la física comprometida con ello, Olson en 1967 hace un análisis detallado de la física comprometida en los fenómenos acústicos y su relación con la música. Varias fuentes conjuntas de las mismas características se las conoce como arreglos lineales, en la actualidad se utilizan arreglos lineales verticales para aprovechar la directividad del espectro de frecuencia y las zonas de audiencia, también se utilizan arreglos lineales horizontales en fuentes de baja frecuencia o en fuentes tipo “point source”. Leerman en 2014, explica el concepto básico del diseño de arreglos de subgraves y su relación con las fuentes “full rango”. El subgrave es una fuente que reproduce frecuencias por debajo de los 250 Hz, un rango de operación usual podría ser de 30 Hz a 120 Hz.

Para llegar a cumplir correctamente la meta de tener un sistema coherente en frecuencia y nivel en toda la zona de audiencia, se necesita tener un conocimiento sobre la interacción de fuentes sonoras y cómo interactúan en conjunto con los diferentes recintos para crear el sistema sonoro óptimo, además se debe conocer las ventajas o limitantes que los sistemas de altavoces poseen. Todo esto lo podremos conocer mediante criterios de diseño, simulación acústica del entorno por medio de software del fabricante pero sobretodo de el análisis obtenido de las herramientas de medición de función de transferencia que se utilizaran para dichos propósitos (específicamente con la ayuda de uno de los software más utilizados en el mundo como lo es SMAART), los cuales requieren de cierto nivel de conocimiento técnico para poder ser interpretados de forma

correcta, con ello se puede hacer un diagnóstico sobre lo que está pasando con el sistema electro-acústico y como poder optimizarlo.

Rational Acoustics, propietario actual del software Smaart, ofrece una nueva versión que cuenta con muchas más ventajas que en sus versiones anteriores, simplificando el trabajo y mejorando la presentación de datos por parte del software, sin embargo hay que conocer cómo funciona y qué datos son posibles analizar para su interpretación, con ello podemos entender de mejor manera cómo interactúan los sistemas de sonido con el entorno acústico, ayudándonos a tomar decisiones acertadas y optimizando los recursos cuando se diseña un sistema de sonido (Reyes, 2010).

Con este trabajo de titulación lo que se busca es condensar este conocimiento, experiencias y formación obtenida dentro y fuera del país con los cursos de especialización sobre este tema, y que han sido obtenidos por 12 años de hacer espectáculos en vivo. Convirtiéndolo en una guía informativa, pero sobre todo práctica y metodológica de como se debería hacer el diseño de un sistema tomando en cuenta los diferentes criterios, llevándolo a la práctica y posterior contraste de las decisiones tomadas y de las mediciones obtenidas para corroborar el resultado esperado obtenido en el diseño y la simulación acústica.

## **1.2. Alcance**

La presente guía metodológica abarcará un breve recuento de áreas como el comportamiento de fuentes sonoras, teoría de arreglos lineales, analizadores FFT y función de transferencia además de entender el paso de la señal por la cadena electroacústica hasta su propagación en el recinto acústico, enfocado a sistemas de sonorización profesionales de empresas que presten estos servicios en el Ecuador. Se realizará la simulación y comprobación de los resultados obtenidos, contrastados con las mediciones de dicho sistema en el Ágora de la Casa de la Cultura Ecuatoriana, sin embargo, los criterios serán de carácter

global pudiendo aplicarlos en cualquier recinto y con los altavoces de cualquier fabricante.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo General**

Crear una guía metodológica para la medición, diseño y optimización de sistemas de sonorización en vivo a través de los diferentes criterios y herramientas que se utilizan actualmente a nivel global.

#### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Describir las herramientas necesarias para el análisis de un sistema de sonorización.
- Evaluar el comportamiento de los sistemas de sonorización en recintos con software provisto por los fabricantes y compararlo con las mediciones obtenidas en el recinto real mediante el uso de Smaart.
- Medir el comportamiento de los sistemas, antes y después de llevar a cabo el proceso de optimización.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Sistemas de refuerzo sonoro

#### 2.1.1. Relaciones lineales y logarítmicas

Se dice que existe una relación lineal entre dos valores, cuando al aumentar uno de ellos “n” veces, el otro valor aumenta de la misma manera. (Orellana, 2008).

$$\Delta n * A = \Delta n * B \quad (\text{ecuación 2.1})$$

Una relación logarítmica, por otro lado, es aquella que crece de manera exponencial. Las operaciones matemáticas relacionadas con sumas de niveles SPL son de este tipo.

Se puede hablar de relaciones entre valores lineales y logarítmicos para referirse a un mismo fenómeno físico. Como ejemplo a continuación se presenta una tabla con las relaciones en valores lineales y su recíproco logarítmico en niveles, esto nos ayudará como una especie de alfabeto para poder realizar cálculos rápidamente con sumas de niveles. (Kinsler, 2008)

Tabla 1.  
*Relaciones lineales y logarítmicas*

Lineal	Log
2	6dB
1.8	5dB
1.6	4dB
1.4	3dB
1.25	2dB
1.1	1dB
1	0dB
0.9	-1dB
0.8	-2dB
0.7	-3dB
0.6	-4dB
0.55	-5dB
0.5	-6dB

Una relación de 2:1 de SPL o de voltaje nos da como resultado una suma de 6 dB, mientras que, si la relación cae a la mitad, 0,5:1 se tiene una pérdida de 6 dB. Si la relación se mantiene en 1:1 no existirá ninguna suma o resta.

### 2.1.2. Fase

Es la posición relativa en el tiempo con respecto a otra onda, esta diferencia puede ser expresada en distancia, tiempo o grados. Cuando se suman dos ondas exactamente iguales en amplitud, frecuencia y tiempo, se dice que tienen una diferencia de fase de 0 grados.

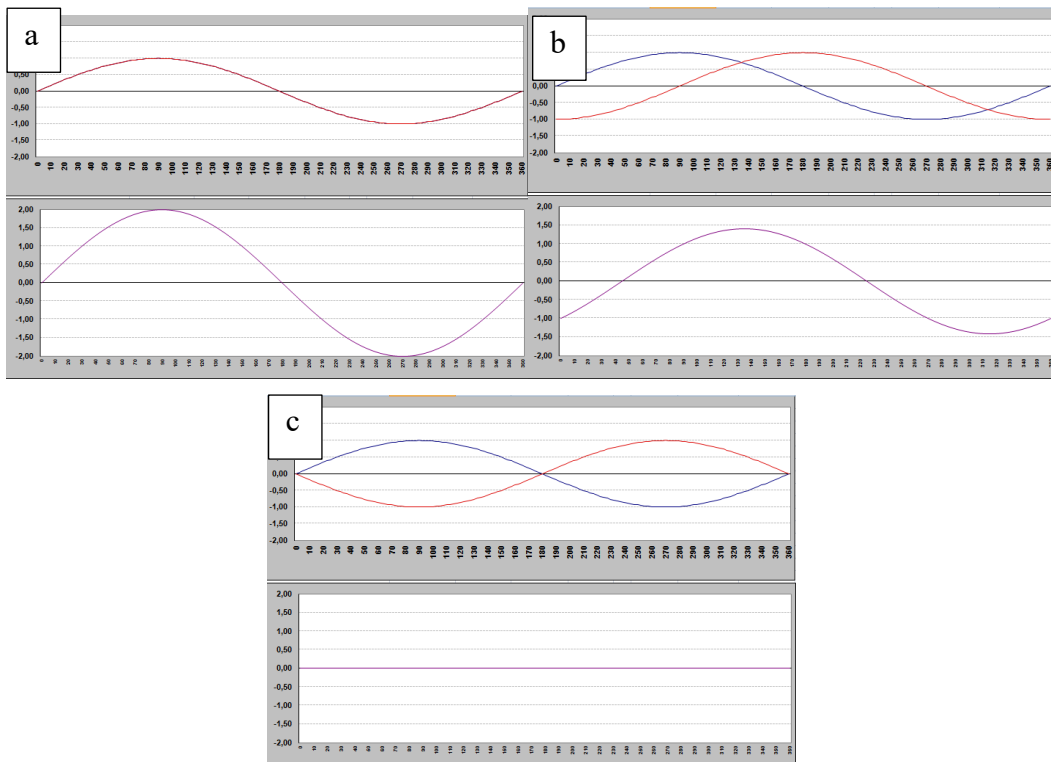


Figura 1. Diferencia de fase por distancia en grados de dos ondas.

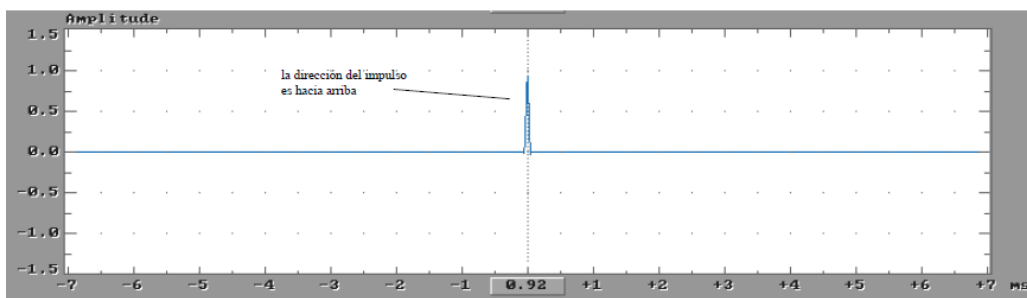
Tomado de (Meyer Sound, 2009)

- a) diferencia de fase 0 grados.
- b) diferencia de fase de 90 grados.
- c) diferencia de fase 180 grados.

### 2.1.3. Polaridad

Indica hacia donde ocurre el primer pico, ya sea este positivo o negativo, de la onda o en el caso de la propagación de una onda sonora en un medio elástico, indica si existe una compresión o descompresión de las partículas de aire.

Electrónicamente en un software de medición se representa a esta polaridad como un impulso, si el impulso es hacia arriba se evidencia que tiene polaridad positiva, si este impulso es hacia abajo se dice que se tiene polaridad negativa.



*Figura 2.* Respuesta de impulso positiva.

Tomado de (Meyer Sound, 2000, p.1.6)

### 2.1.4. Ley del inverso cuadrático

Hace referencia sobre una ley aplicada a los movimientos ondulatorios como la luz o el sonido, misma que indica, que dicho movimiento generado por una fuente puntual, se ve afectado en intensidad, en todas direcciones por igual. Disminuyendo de acuerdo con el cuadrado de la distancia a la fuente de emisión. En otras palabras más sencillas, cuando se dobla la distancia, el nivel de presión sonora resultante caerá 6 dB. (Digón y Ferrer, 2014)



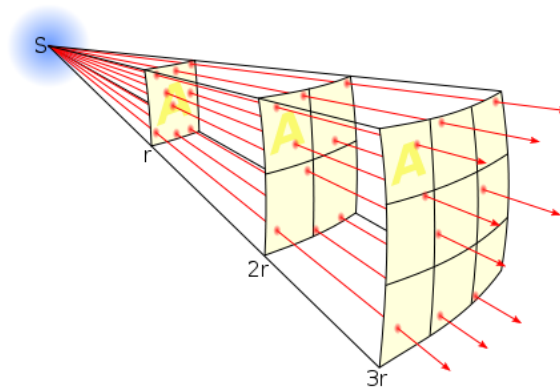


Figura 3. Gráfica de la ley del inverso cuadrático.

Tomado de (Digón, A. G., & Ferrer, P. 2014, p. 40.)

## 2.2 Herramientas de Medición

### 2.2.1. Análisis Logarítmico (RTA)

El RTA o *Real Time Analyzer* según sus siglas en inglés, fue uno de los primeros instrumentos de análisis para audio, el que tan solo contaba con un canal de entrada para el procesamiento de datos. Este servía para tener una idea de cuál es el componente espectral de la medición, su utilización empezó para el análisis de vibraciones, sin embargo fue muy utilizado en sus inicios para aplicaciones de refuerzo sonoro. (Deery, 2007).

Su funcionamiento era sencillo, se componía por un grupo de filtros pasabanda, los cuales se encontraban espaciados en paralelo por una escala logarítmica y se realizaban tomas de datos cada cierto tiempo.

La principal desventaja frente a los sistemas FFT posteriores fue como su nombre lo indica, *el tiempo*, como lo explica McCarthy en 2010, en su libro “Sistemas de Sonido: Diseño y Optimización”. Al no tener la capacidad de hacer una medición de fase (tiempo), no se puede constatar una suma por dos fuentes o la interacción entre el sonido directo y las múltiples reflexiones en una sala o

un ruido de fondo. Por estas razones un grave error era utilizar este tipo de herramienta para la ecualización de un sistema o de una sala.



Figura 4. RTA Audio Control SA-3051

### 2.2.2. Analizadores FFT

Al poseer el algoritmo desarrollado por Cooley y Tukey, se empezó a investigar en la manera de hacerlo práctico. En 1967 fue presentado el primer analizador FFT por la compañía “Time/Data Corporation” con su modelo “Time/Data 100”. El FFT trabaja con un número finito de muestras llamados en inglés *FFT Frames*, con los cuales se puede obtener una constante de tiempo  $TC$ , sabiendo la tasa de muestreo o *sample rate*. Dicha constante de tiempo es el lapso en el cual cada FFT Frame “observa” de manera continua la señal de entrada. Esto quiere decir que un valor alto de  $TC$ , dará como resultado mayores datos para ser procesados. (Welaratna, 1997).

$$TC = N_{FFT} SR \quad (\text{ecuación 2.2})$$

Donde:

$TC$  = Constante de tiempo FFT [s]

$N_{FFT}$  = FFT Size

$SR$  = Sample Ratio

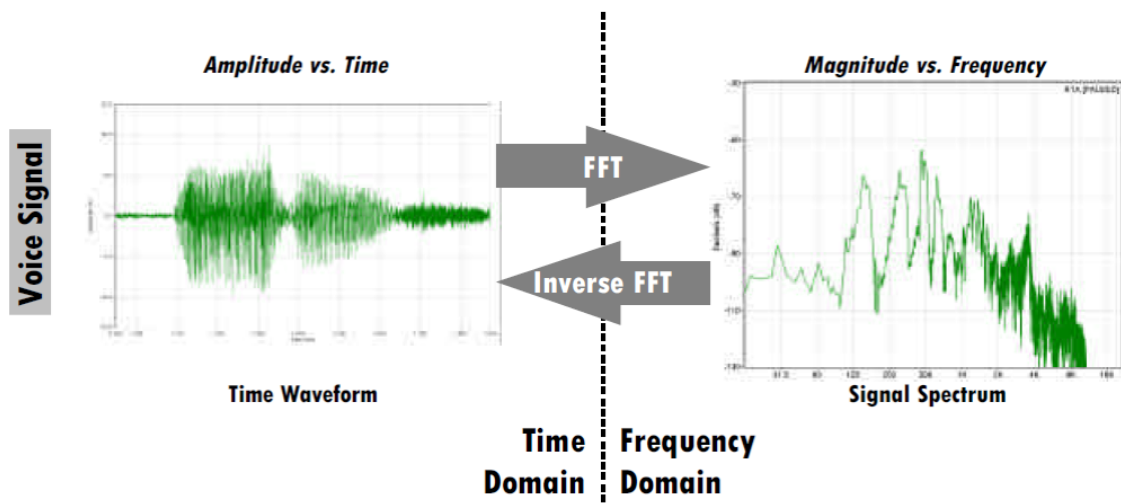


Figura 5. Ejemplo de transformada de Fourier (FFT)

Tomado de (Rational Acoustics, 2018).

### 2.2.2.1 Frecuencia de muestreo

Se llama así al número de tomas o muestras por unidad de tiempo que se toman de una señal continua o análoga, para obtener una señal discreta o digital, según el teorema de Nyquist, se dice que la frecuencia de muestreo debe ser el doble de la máxima frecuencia de la onda análoga que es considerada para el análisis, a esta frecuencia se la denominará *Frecuencia de Nyquist*.

Para el caso del audio se toma como dicha frecuencia a 44.1 KHz. Esto se dá, ya que el rango de la audición humana referencialmente es de 20 – 20 000 Hz, por ello se asegura en tener una resolución aceptable para dicho rango de frecuencias. (Osorio, 2008).

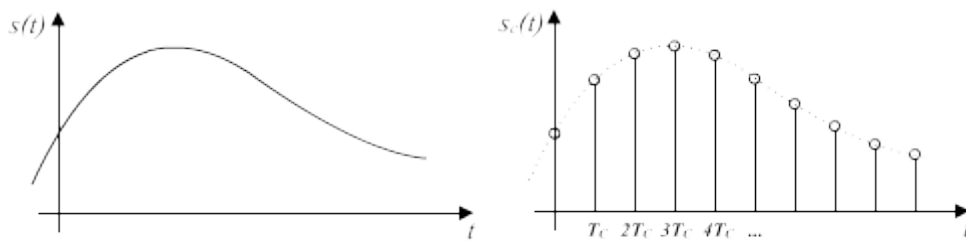


Figura 6. Señal continua (izquierda) vs señal discreta (derecha).

Tomado de (Meyer Sound, 2009).

### 2.2.2.2 Longitud de tiempo/ FFT size

El FFT size está ligado a la resolución con la que se procesan los datos, un mayor tamaño proveerá un mayor número de datos, esto dará mayor precisión en los cálculos realizados.

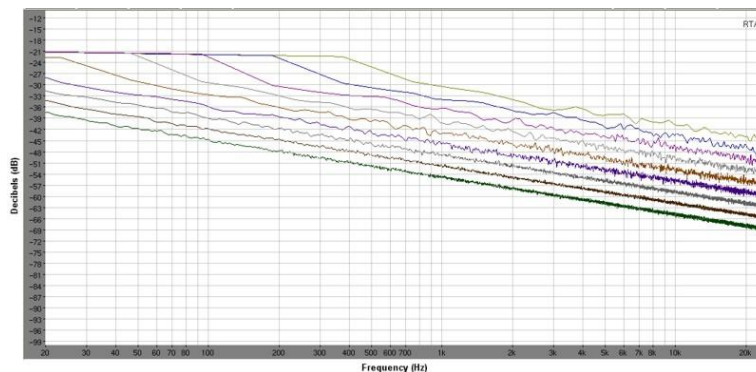


Figura 7. Ruido rosa con diferentes tamaños de FFT en Smart V8.

Como se puede observar en la gráfica anterior, se ha realizado el análisis de un ruido rosa con todos los tamaños de FFT, desde el más pequeño (marrón), hasta el más grande (verde), presentados en el software Smart. Cuanto mayor el tamaño del FFT mayor cantidad de datos procesados pero mayor tiempo va a requerir este procesamiento. Se puede observar en el gráfico anterior que al distribuir los datos que se encuentran en escala lineal en forma logarítmica, se

obtiene poca información en baja frecuencia y demasiada información en alta frecuencia.

Un ejemplo donde se tiene una señal cuya frecuencia de muestreo es de 48 KHz y un FFT size de 256. Se puede obtener el tiempo de duración de cada muestra al dividir:

$$\text{Single sample} = 1000 / 48000 \text{ (ms)} \quad (\text{ecuación 2.3})$$

Tiempo en que se toman las muestras:

$$\text{Length of time} = \text{Single sample} * \text{FFT size} \quad (\text{ecuación 2.4})$$

Y la resolución de frecuencia o ancho de banda (*BW*), en otras palabras los pasos entre una frecuencia y la siguiente en el FFT mediante:

$$\text{BW} = 1000 / \text{Length of time} \quad (\text{ecuación 2.5})$$

A continuación, se presentan dos tablas, para ver la comparación entre FFT size de 256 y 32768, para las 10 primeras frecuencias.

Tabla 2.

*Tamaño de FFT 256 para las 10 primeras frecuencias de 48000 Hz.*

S.R.	Single sample (ms)	FFT Size	Length of Time (ms)	BW (Hz)
48000 Hz	<b>0,0208333 ms</b>	256	<b>5,3333333 ms</b>	<b>187,500000 Hz</b>
	0,02 ms		5,33 ms	187,50 Hz
	0,0 ms		5,3 ms	187,5 Hz
		<b>2 decimals</b>	<b>1 decimal</b>	<b>NO decimals</b>
1th Freq	<b>187,5000000 Hz</b>	187,50 Hz	187,5 Hz	188 Hz
2nd Freq	<b>375,0000000 Hz</b>	375,00 Hz	375,0 Hz	375 Hz
3rd Freq	<b>562,5000000 Hz</b>	562,50 Hz	562,5 Hz	563 Hz
4th Freq	<b>750,0000000 Hz</b>	750,00 Hz	750,0 Hz	750 Hz

5th Freq	<b>937,5000000 Hz</b>	937,50 Hz	937,5 Hz	938 Hz
6th Freq	<b>1125,0000000 Hz</b>	1125,00 Hz	1125,0 Hz	1125 Hz
7th Freq	<b>1312,5000000 Hz</b>	1312,50 Hz	1312,5 Hz	1313 Hz
8th Freq	<b>1500,0000000 Hz</b>	1500,00 Hz	1500,0 Hz	1500 Hz
9th Freq	<b>1687,5000000 Hz</b>	1687,50 Hz	1687,5 Hz	1688 Hz
10th Freq	<b>1875,0000000 Hz</b>	1875,00 Hz	1875,0 Hz	1875 Hz

Adaptado de Meyer Sound, 2011.

Tabla 3.

*Tamaño de FFT 37268 para las 10 primeras frecuencias de 48000 Hz.*

S.R.	Single sample (ms)	FFT Size	Lenght of Time (ms)	BW (Hz)
48000 Hz	<b>0,0208333 ms</b>	32768	<b>682,6666667 ms</b>	<b>1,4648438 Hz</b>
	0,02 ms		682,67 ms	1,46 Hz
	0,0 ms		682,7 ms	1,5 Hz
	0 ms	32k	683 ms	1 Hz
		<b>2 decimals</b>	<b>1 decimal</b>	<b>NO decimals</b>
1th Freq	<b>1,4648438 Hz</b>	1,46 Hz	1,5 Hz	1 Hz
2nd Freq	<b>2,9296875 Hz</b>	2,93 Hz	2,9 Hz	3 Hz
3rd Freq	<b>4,3945313 Hz</b>	4,39 Hz	4,4 Hz	4 Hz
4th Freq	<b>5,8593750 Hz</b>	5,86 Hz	5,9 Hz	6 Hz
5th Freq	<b>7,3242188 Hz</b>	7,32 Hz	7,3 Hz	7 Hz
6th Freq	<b>8,7890625 Hz</b>	8,79 Hz	8,8 Hz	9 Hz
7th Freq	<b>10,2539063 Hz</b>	10,25 Hz	10,3 Hz	10 Hz
8th Freq	<b>11,7187500 Hz</b>	11,72 Hz	11,7 Hz	12 Hz
9th Freq	<b>13,1835938 Hz</b>	13,18 Hz	13,2 Hz	13 Hz
10th Freq	<b>14,6484375 Hz</b>	14,65 Hz	14,6 Hz	15 Hz

Adaptado de Meyer Sound, 2011.

Se puede observar que en el mayor FFT size, la resolución es mejor ya que el análisis FFT provee datos con un intervalo entre ellos de 1,46 Hz.

### 2.2.2.3 Fixed points per octave (FPPO)

Como se analizó anteriormente, al presentar los datos linealmente espaciados en función de la frecuencia que se encuentra en una escala logarítmica, se tiene muy poca información o puntos para el procesamiento de información, mientras que para alta frecuencia existen demasiados. Se podría compensar dicha situación siempre y cuando la escala de frecuencia sea lineal, sin embargo no sería nada útil y peor aún semejante a la forma de escucha del ser humano.

Si se incrementa el FFT size para que muestre mayor resolución en los datos de baja frecuencia, también aumentará el tiempo de respuesta y si se realiza esto al hacer la función de transferencia, se incrementará en número de reflexiones de la sala que entraría en la medición, haciendo que la misma se torne difícil de interpretar.

Para poder visualizar de mejor manera la respuesta de frecuencia en la función de transferencia, se utiliza un método llamado *Fixed points per octave (FPPO)*, que computa logarítmicamente la respuesta de frecuencia para utilizar un mayor FFT size en baja frecuencia y uno más corto en alta frecuencia (mejorando así la resolución). Rational Acoustics (2018).

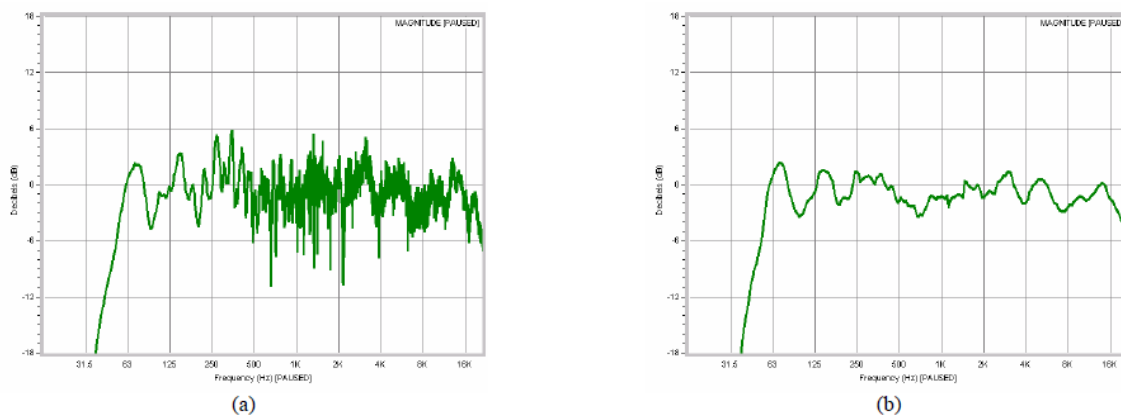


Figura 8. Función de transferencia FFT y FFT FPPO

Tomado de (Rational Acoustics, 2018)

a) Función de transferencia de altavoz utilizando 32K puntos de FFT

b) Función de transferencia del mismo altavoz utilizando 32K FPPO de FFT.

#### 2.2.2.4. Función de ventana

Es un método para minimizar el error que se tiene cuando en la medición existen datos entre los intervalos de frecuencia. Por ejemplo, si se tiene nuevamente una señal con un FFT size de 4096 se tiene una resolución de frecuencia de 11,72 Hz

Tabla 4.

*Tamaño de paso del FFT 4096 para 48000 Hz.*

S.R.	Single sample (ms)	FFT Size	Lenght of Time (ms)	BW (Hz)
48000 Hz	<b>0,0208333 ms</b> 0,02 ms	4096	<b>85,3333333 ms</b> 85,33 ms	<b>11,7187500 Hz</b> 11,72 ms

Adaptado de Meyer Sound, 2011.

Sin embargo, al realizar una función de transferencia para una medición eléctrica utilizando un tono puro (sin ningún armónico), que esté entre la primera y la segunda frecuencia, se obtendrá un error o discontinuidad en los bloques analizados que presentará el sistema de medición. (Ferrer, 2017).

Las principales funciones de ventana recomendadas por su menor distorsión y por ende menor error, para refuerzo sonoro son las siguientes:

En orden de mejor a peor para el proposito de mediciones electroacusticas

- Blackman-harris
- Blackmann
- Hann
- Flat top

A continuación, se muestran las gráficas de dichas funciones de ventana, tomadas de Wikipedia, 2018.



### 2.2.2.4.1 Blackman – Harris

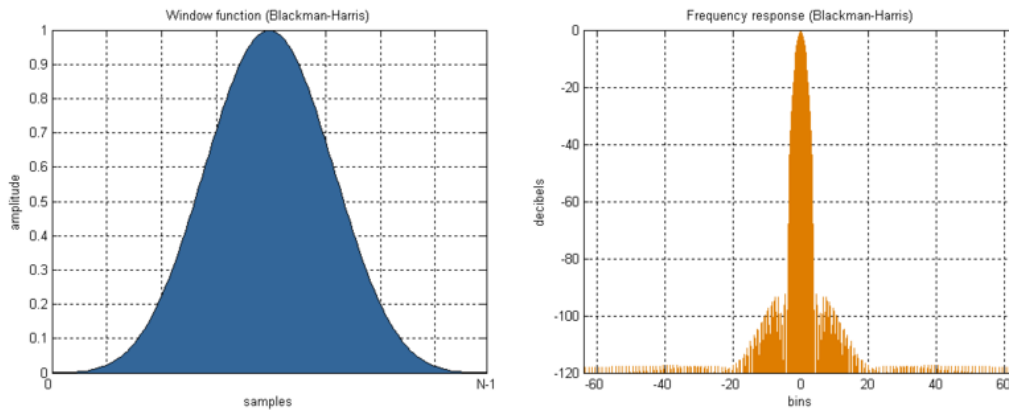


Figura 9. Forma de onda de la función de ventana Blackman-harris.

Tomado de (Wikipedia, 2018).

$$v(n) = a_0 - a_1 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) + a_2 \cos\left(\frac{4\pi n}{N-1}\right) - a_3 \cos\left(\frac{6\pi n}{N-1}\right) \quad (\text{ecuación 2.6})$$

$$a_0 = 0,35875; \quad a_1 = 0,48829; \quad a_2 = 0,14128; \quad a_3 = 0,01168$$

$$a_0 = 0,35875; \quad a_1 = 0,48829; \quad a_2 = 0,14128; \quad a_3 = 0,01168$$

$$a_0 = 0,35875; \quad a_1 = 0,48829; \quad a_2 = 0,14128; \quad a_3 = 0,01168$$

### 2.2.2.4.2. Blackman

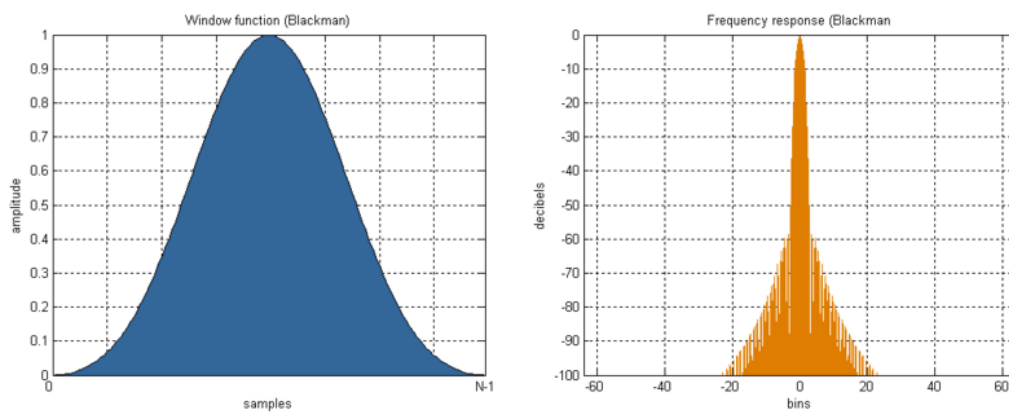


Figura 10. Forma de onda de la función de ventana Blackman.

Tomado de (Wikipedia, 2018).

$$v(n) = a_0 - a_1 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) + a_2 \cos\left(\frac{4\pi n}{N-1}\right) \quad (\text{ecuación 2.7})$$

$$a_0 = 0,42; \quad a_1 = 0,5; \quad a_2 = 0,08$$

### 2.2.2.4.3. Hann

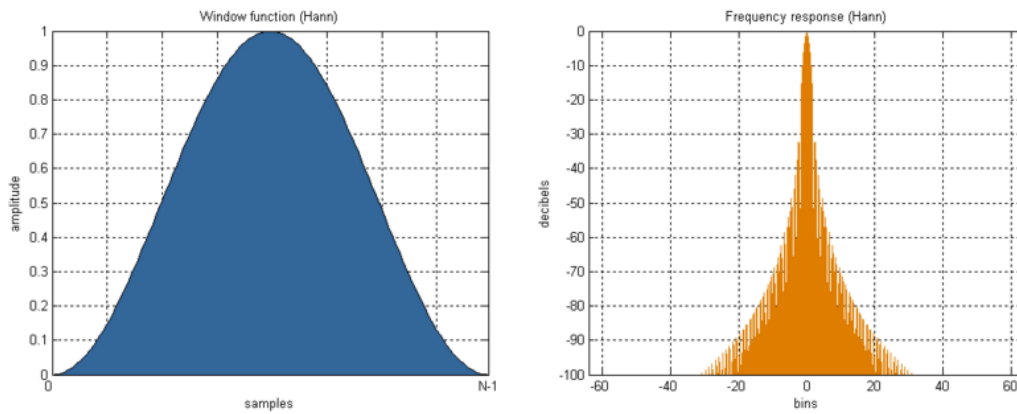


Figura 11. Forma de onda de la función de ventana Hann.

Tomado de (Wikipedia, 2018).

$$v(n) = a_0 - a_1 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) \quad (\text{ecuación 2.8})$$

$$a_0 = 0,5; \quad a_1 = 0,5$$

### 2.2.2.4.4. Flat-Top

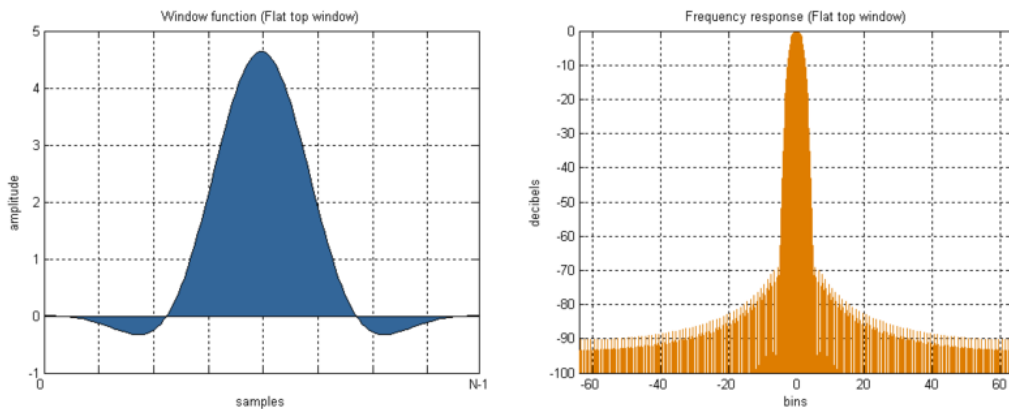


Figura 12. Forma de onda de la función de ventana Flat-top.

Tomado de (Wikipedia, 2018).

$$v(n) = a_0 - a_1 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) + a_2 \cos\left(\frac{4\pi n}{N-1}\right) - a_3 \cos\left(\frac{6\pi n}{N-1}\right) + a_4 \cos\left(\frac{8\pi n}{N-1}\right) \quad (\text{ecuación 2.9})$$

$$a_0 = 1; \quad a_1 = 1,93; \quad a_2 = 1,29; \quad a_3 = 0,388; \quad a_4 = 0,032$$

$$a_0 = 1; \quad a_1 = 1,93; \quad a_2 = 1,29; \quad a_3 = 0,388; \quad a_4 = 0,032$$

$$a_0 = 1; \quad a_1 = 1,93; \quad a_2 = 1,29; \quad a_3 = 0,388; \quad a_4 = 0,032$$

### 2.2.3. Función de Transferencia

La función de transferencia desde su explicación más sencilla, es la comparación de 2 o más señales de entrada con una señal de referencia, de esta manera al compararlas se podrá observar los cambios que ha tenido esta señal en el camino hasta el punto de medición o punto de salida.

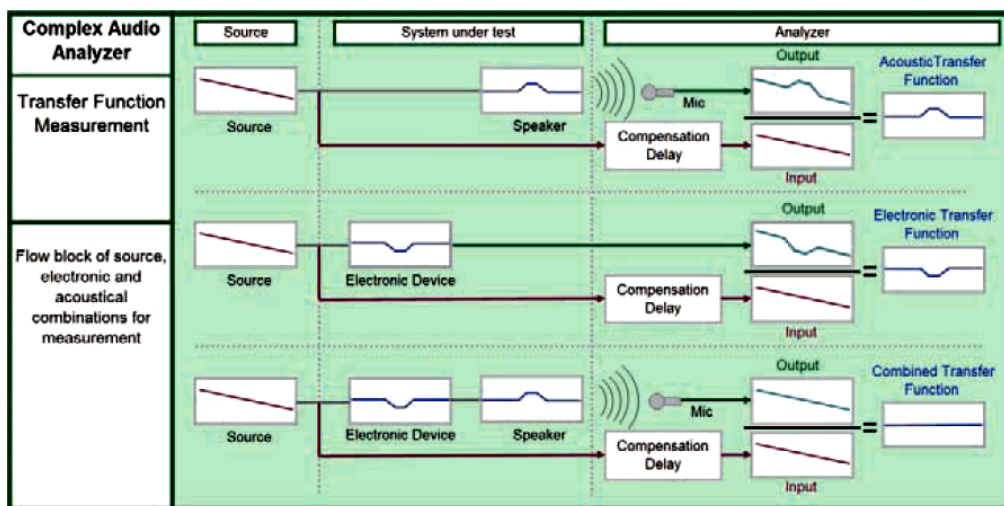


Figura 13. Proceso básico de una función de transferencia.

Tomado de (McCarthy, 2010, p. 405)

Una transmisión hipotéticamente perfecta mostrará una curva de la función de transferencia completamente plana en fase, nivel, frecuencia, etc.

El paso de una señal por la cadena electroacústica se ve afectada en mayor o menor grado, estos cambios con relación a nivel, ruido, tiempo que cada dispositivo integra a la señal de salida, pueden ser claramente expuestos gracias a la función de transferencia.

El funcionamiento básico que tiene la función de transferencia es el análisis FFT de dos señales, una de referencia o de entrada y una de la medición que queremos hacer o salida. Al conocer la señal de referencia, cualquier cambio que se presente será atribuido a la cadena que sigue al paso de la señal de entrada y será de interés conocerlo, como se puede observar en la figura 13.

Al comparar dicha entrada con la salida, se puede utilizar cualquier tipo de señal, no necesariamente ruido rosa, aunque esto es muy recomendable ya que tiene la misma cantidad de energía por bandas de octava en todo el espectro de frecuencias, el único requisito que se pretende de la señal de entrada es que presente el contenido espectral que se desea medir o conocer en la función de transferencia.

Según Henrik B. Herlufsen en 1984, existen cuatro consideraciones que debe cumplir el sistema de medición para que se obtenga una función de transferencia válida.

- **Lineal:** La función de transferencia no debe verse afectada si la señal de entrada aumenta en nivel.
- **Físicamente realizable:** El sistema no puede responder a una señal de entrada si esta aún no existe.
- **Invariable en el tiempo:** Las propiedades del sistema no deben variar con el paso del tiempo.
- **Estable:** El sistema deberá solo puede responder en un grado limitado cuando la señal de entrada sea finita.

### 2.2.3.1. Amplitud relativa

La función de transferencia de la amplitud es la medición del nivel relativo existente entre entrada (referencia) y la salida (medición) en función de la frecuencia.

$$\text{AmplituddeSalida} / \text{AmplituddeEntrada} = \text{AmplitudRelativa} \quad (\text{ecuación 2.10})$$

Se expresa comúnmente en dB, si las dos señales poseen la misma ganancia unitaria, el trazo de la amplitud estaría en el eje central (0 dB), si existe una ganancia la curva se desplazaría hacia el eje positivo o superior, si existe una pérdida se desplazaría hacia el eje negativo o inferior. Pero si la entrada y la salida crecen en ganancia proporcionalmente no existirá ningún cambio en la curva y el trazo se ubicaría en el eje de 0 dB.

### 2.2.3.2. Fase relativa

Es la medición del tiempo relativo existente entre las dos señales, entrada y salida. Para el caso no importa cuál sea la fase individualmente de cada una de ellas sino su variación en el tiempo entre ambas.

Si existe una distancia de 0 grados de diferencia entre la señal de medición y la referencia y no se tiene ninguna otra variación, se tendrá una suma de 6dB, ya que ambas señales poseen idénticas características, pero si la señal de medición se desplaza 180 grados con respecto a la referencia, estaríamos hablando de una cancelación total idealmente. Si se desplaza otros 180 grados, estaría en 360 grados de diferencia con respecto a la referencia, volvería a encontrarse en la zona de suma, sin embargo se encontraría con un ciclo de diferencia entre la medición y la referencia.

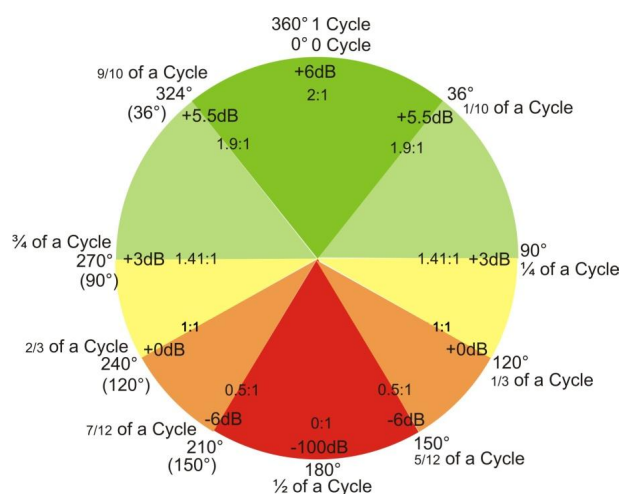


Figura 14. Cilindro con las distancias en grados y su relación en dB

Tomado de (McCarthy, 2010)

### 2.2.3.3. Fase relativa vs Polaridad

Hay que empezar por recalcar que polaridad y fase son dos conceptos completamente distintos, la polaridad es un indicador de dirección y es independiente de la frecuencia, si en la función de transferencia se muestra una polaridad positiva quiere decir que la medición y la referencia van hacia la misma dirección, polaridad no tiene nada que ver con el tiempo.

La fase relativa es dependiente de la frecuencia, ya que cada frecuencia tiene un ciclo y una longitud de onda distinta. Por esta razón se dice que las altas frecuencias se encuentran adelantadas con respecto a las bajas frecuencias, ya que una onda senoidal de 100 Hz tomará 10 ms en completar el ciclo, mientras que en el mismo lapso una onda de 1000 Hz completará 10 ciclos.

Tabla 5.

*Tabla de frecuencias ISO con longitud de onda en metros y su periodo.*

Frecuencia Hz	Wavelength (mt)	Periodo ms
20.000	0,017	0,050
16.000	0,021	0,063
12.500	0,027	0,080
10.000	0,034	0,100
8.000	0,043	0,125
6.300	0,054	0,159
5.000	0,068	0,200
4.000	0,085	0,250
3.150	0,108	0,317
2.500	0,136	0,400
2.000	0,170	0,500
1.600	0,213	0,625
1.250	0,272	0,800
1.000	0,340	1,000
800	0,425	1,250
630	0,540	1,587
500	0,680	2,000
400	0,850	2,500
315	1,079	3,175
250	1,360	4,000
200	1,700	5,000
160	2,125	6,250
125	2,720	8,000
100	3,400	10,000

80	4,250	12,500
63	5,397	15,873
50	6,800	20,000
40	8,500	25,000
32	10,794	31,746
25	13,600	40,000
20	17,000	50,000

Tomado de Meyer Sound, 2011.

Con estos conceptos claros se puede comprender e interpretar la curva de fase relativa, dicha curva presentará tres tipos de datos para su interpretación.

- Frecuencia: nos dirá el comportamiento en el tiempo de un rango en particular.
- Pendiente de la fase: mostrará cómo se encuentran las variaciones de tiempo en función del rango de frecuencias.
- Dirección de la pendiente: indicará el comportamiento sobre que tan retrasada o adelantada está la medición.

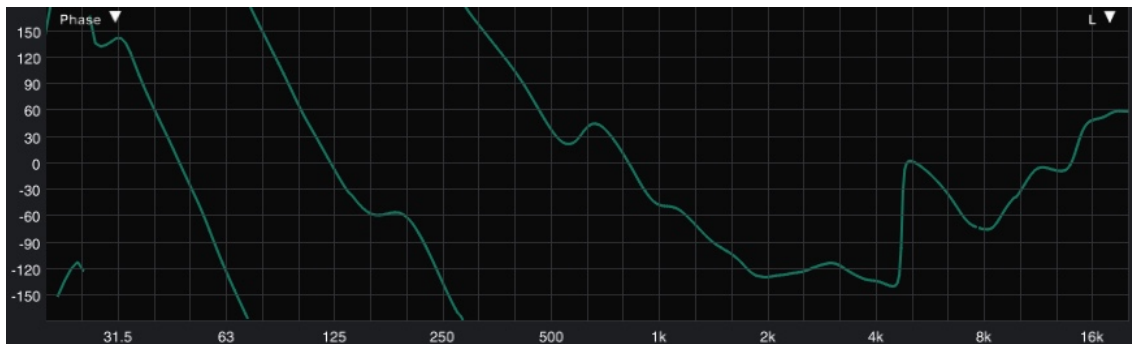


Figura 15. Curva de fase de software Smart V8.

Cuando se obtiene una curva completamente plana, nos indica que en todo el rango de frecuencias la entrada y la salida llegan al mismo.

#### 2.2.3.4. Coherencia

La coherencia provee un indicador de la estabilidad y la calidad en una medición de la respuesta de frecuencia y como su nombre lo indica, el trazo muestra la

relación entre la señal de referencia y la medición y que tan consistentes son los datos obtenidos por la medición, si bien no indica la relación señal ruido directamente está relacionado con la coherencia.

La definición de la función coherencia según Herlufsen en el 1984. Se indica como “el nivel a la salida relativo al nivel en la entrada”.

Esto quiere decir que tan relacionada o que tan lineal es el sistema en la salida con la entrada en la función de transferencia y esta en una escala de 0 a 1 (donde cero corresponde a 0% y 1 corresponde a 100%).

Imaginen un escenario hipotético en un recinto en el que está un sistema de amplificación, en donde tendremos la medición del sonido directo, el sonido proveniente de las demás fuentes, las reflexiones del lugar.

Es importante reconocer entre las señales causales y las no causales. Una señal causal mantendrá un patrón de coherencia similar en varias de las mediciones que se realicen, sea que tengan una coherencia alta o baja.

Mientras que la interacción de señales no causales dará como resultado que la coherencia no se estabilice y se necesite un mayor tiempo en la toma de datos para conseguir esa estabilidad.

Las fuentes de señales no causales pueden ser entre tantos ejemplos:

- Ruido de fondo
- Ruido de la audiencia
- Distorsión

Etc.



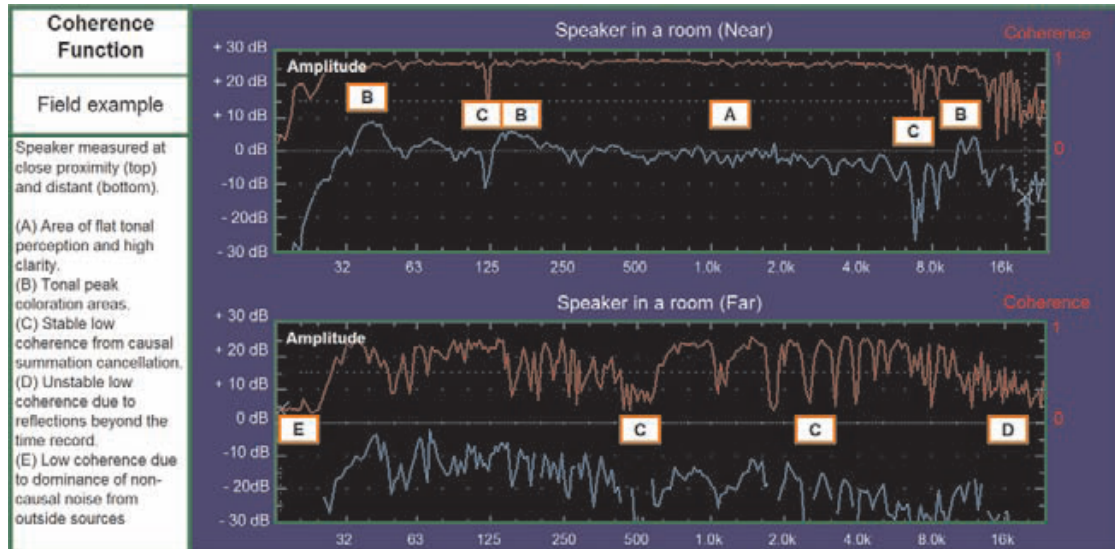


Figura 16. Comportamientos de la gráfica de coherencia.

Tomado de (McCarthy, 2010 p. 392)

#### 2.2.3.4.1. Blanqueo por Coherencia

El blanqueo por coherencia es una capacidad que tiene el software de medición para no mostrar datos cuya coherencia sea menor a un umbral establecido por el usuario. Esto ayuda a interpretar de mejor manera los trazos evitando lecturas incorrectas por datos erróneos que se puedan presentar por diferentes causas, ya sean reflexiones, mala calibración de equipo de medición, ruido de fondo, etc.

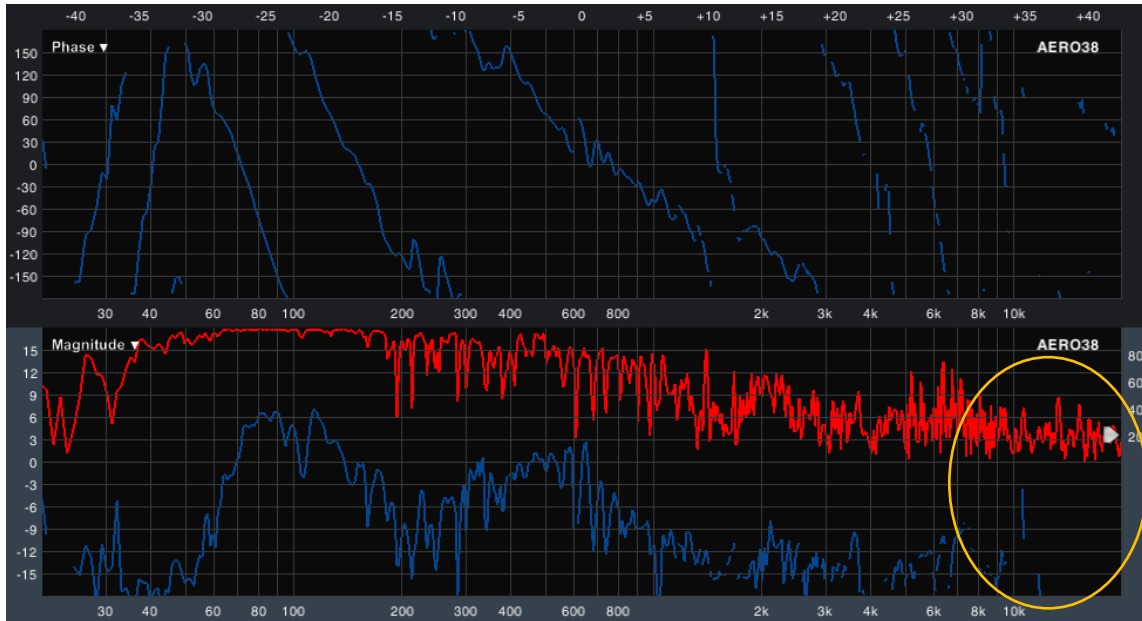


Figura 17. Blanqueo por coherencia en software Smart V8.

#### 2.2.4. Respuesta de Impulso

La respuesta de impulso es otra forma de presentar los datos de la respuesta de un sistema, tal como nos muestra una vista de magnitud y de fase relativa en la función de transferencia, dándonos otra perspectiva para analizar los datos. Dichos datos del sistema analizado son presentados en el dominio del tiempo, si bien no existe un eje en el dominio de la frecuencia, los datos de frecuencia se encuentran implícitos en la respuesta de impulso, lo mismo ocurre con la fase.

En otras palabras, la respuesta de impulso nos muestra cual es la respuesta del sistema en el tiempo y como interactúa este con el medio al emitir un solo impulso perfecto. Al ser parte de la función de transferencia, la comparación se la puede hacer con cualquier señal que contenga el rango de frecuencias que queremos analizar (ruido, música, etc.).

Mientras que, en la respuesta de frecuencia relativa, podemos observar la suma de frecuencias o nivel en cierto rango por las reflexiones existentes en un lugar, en la respuesta de impulso podemos ver en detalle cada reflexión que ha sido captada por la medición en el orden de llegada, así podemos identificar al sonido

directo de las múltiples reflexiones y las características de estas reflexiones, como amplitud, polaridad, tiempo de llegada y hasta ruido de fondo. De esta manera también podemos observar gráficamente el T60 (*tiempo de reverberación*) de la sala.

Existen tres tipos de presentación de datos en la respuesta de impulso, lineal, logarítmica y ETC. Para medir dispositivos o aparatos electroacústicos se utiliza la vista lineal de la respuesta de impulso.

Existen 5 propiedades que podemos discernir gracias a la respuesta de impulso de un dispositivo puesto en medición:

- Tiempo relativo de llegada
- Nivel relativo
- Polaridad
- Fase del retardo
- Roll Off de alta frecuencia

#### **2.2.4.1. Nivel Relativo**

Si existe un valor igual a 1 o -1 no ha existido ningún cambio en el impulso (el dispositivo tiene una ganancia unitaria), pero si existe un valor mayor o menor a 1 o -1 puede existir una ganancia o atenuación en algún punto y de esta manera varía la medición obteniendo una variación en la respuesta del dispositivo.

#### **2.2.4.2. Tiempo relativo de llegada**

Se puede observar la relación en tiempo que existe en la entrada del aparato vs la salida del mismo, si existe algún tipo de retraso entre estos. En aparatos digitales existe notoriamente un retraso de la salida en relación con la entrada dado por el tiempo que toma la conversión analógica – digital y viceversa, a este retraso se lo conoce como latencia digital.

Si existe un retraso en la salida el impulso irá más hacia la derecha centrándose y mostrando la diferencia de tiempo en ms existente. Sin embargo, si la gráfica muestra que la salida se encuentra adelantada a la entrada (cosa que es físicamente imposible, pero teóricamente posible), el impulso se irá hacia la izquierda.

En una sala esto nos presentará el sonido directo y los ecos o reflexiones que se generan en el tiempo, apreciando las diferencias de tiempo entre el sonido directo y cada una de estas reflexiones.

#### **2.2.4.3. Polaridad**

En la medición de impulso de un dispositivo podremos apreciar la polaridad de respuesta que entrega este a su salida, según si el impulso está hacia arriba (polaridad positiva) o hacia abajo (polaridad negativa o invertida). Smaart V8, 2018.

#### **2.2.4.4. Fase**

Si todas las frecuencias se encuentran alineadas en fase se mostrará un impulso perfecto hacia una dirección, pero si existen diferencias de fase en el rango de frecuencias, el impulso presentado en la medición será modificado horizontalmente haciéndolo más ancho o estirado.

#### **2.2.4.5. Roll Off de alta frecuencia**

Podemos observar que si el dispositivo no tiene atenuación en alta frecuencia, el impulso será una línea definida en una dirección, pero si existe una pérdida en alta frecuencia, el impulso se verá afectado en su amplitud proporcionalmente a la caída en alta frecuencia.

#### **2.2.5. Arreglos de cajas acústicas**

### 2.2.5.1 Arreglos lineales

Los arreglos lineales son aquellos cuyas fuentes están agrupadas formando una línea, ya sea esta horizontal o vertical, dichas fuentes forman patrones de interacción. Dichos patrones se dan cuando existen dos o más fuentes sonoras cuyas ondas se propagan e interactúan con las demás fuentes, esto creará una forma de interacción dependiendo de la distancia entre las fuentes y la frecuencia a reproducirse.

Como se conoce, la alta frecuencia es mucho más directiva que la baja frecuencia, que tiende a ser omnidireccional. Harry Olson en 1960, demostró cómo se comportan estas interacciones idealmente entre dos fuentes omnidireccionales, notándose zonas de interacción positiva (suma) y zonas de interacción negativa (resta o cancelación).



Figura 18. Lóbulos formados por la interacción de fuentes acústicas.

Tomado de (Olson, 1960 p. 35)

A estas zonas de suma se las conoce como lóbulos y muestran la máxima suma y los ciclos de distancia existentes entre las fuentes según su frecuencia.

Actualmente el tipo de sistemas de arreglo en línea vertical es el más utilizado a nivel mundial, ya que así se optimiza las zonas de cobertura, al una o varias cajas para una zona de audiencia específica, minimizando las interacciones y

por ende minimizando los filtros de peine que pudieran existir en las zonas de interacción de las fuentes. (Ureda, 2004)

### **2.2.5.2 Arreglos de subgraves.**

Por mucho tiempo se utilizó en los sistemas de refuerzo sonoro los subgraves en una configuración L-R bajo los clústeres de los sistemas principales estéreo, esta técnica si bien da una mayor presión acústica en la zona donde se forma un triángulo equilátero, al regirse a los mismos fenómenos antes mencionados por Olson en 1960, se crearán zonas donde existan sumas y cancelaciones, según su distancia y la frecuencia a reproducirse.

Si bien es cierto no va a existir una zona de cobertura perfecta en todas las zonas de audiencia y en todas las frecuencias, se trata de homogeneizar lo mejor posible la experiencia de escucha de la audiencia.

Para mejorar la interacción de éstas fuentes se utilizan varios diseños de arreglos de tipo lineal entre los cuales se encuentran: línea de subgraves, arco, end fire y gradiente.

#### **2.2.5.2.1. Subgraves en línea.**

La separación máxima lateral viene dada por la frecuencia máxima del punto de corte, y será de  $2/3\lambda$  o 240 grados, de la frecuencia máxima que estas fuentes van a reproducir. Al incrementar dicha distancia obtendremos muchas más cancelaciones. (Olson, 1960).



*Figura 19.* Arreglo en línea de subgraves.

#### **2.2.5.2.2. Gradiente**

En el arreglo de subgraves tipo gradiente, también conocido como arreglo cardioide, su busca generar una cancelación acústica por medio de la interacción de varias fuentes, por lo general de 2 o 3 subgraves.

Olson, en 1973 expone este fenómeno donde la cancelación se obtiene al separar uno de los subgraves física o electrónicamente hasta una distancia de  $1/4\lambda$  buscando la máxima suma acústica para luego invertir la polaridad de una de las fuentes (la más cercana al escenario), y así generar la mayor cancelación acústica en la parte posterior del arreglo.

Este tipo de arreglo se lo puede realizar con 2 arreglos en línea paralelos, fuentes agrupadas, etc. pero todos se generan de este mismo principio.



*Figura 20.* Arreglo gradiente con 3 subgraves.

### **2.2.5.2.3. End Fire**

Este tipo de arreglo se compone de varias fuentes, y es el más complejo de todos en el procesamiento ya que se requerirá poder procesar cada fuente con ajustes de retraso.

Lo que se busca es generar tal como el gradiente una directividad en la presión de baja frecuencia y poder ajustar el lóbulo de cobertura, generalmente se lo realiza con 4 sub graves apuntando a la zona de audiencia, estos deben estar a una distancia de  $1/4\lambda$  y por medio de retraso en cada fuente se busca situarlos en “el mismo espacio físico” con esto se logra mayor suma y directividad en la parte delantera y cancelación en la parte trasera, mientras más alta la frecuencia de reproducción este arreglo será más direccional.

Se utiliza en situaciones donde se debe llegar a una distancia considerable del arreglo, por esto se lo conoce comúnmente como un arreglo de tiro largo.





Figura 21. Arreglo End Fire.

### 3. DISEÑO DE SISTEMAS

#### 3.1. Simulación Acústica

Se procederá a hacer el diseño según los requerimientos específicos que tenga cada recinto y según el tipo de altavoces que se tengan disponibles. Nos centraremos en la simulación acústica del software de fabricante para el diseño de arreglos en línea, para el caso de estudio presente utilizaremos el Software BluePrint 1.2.1 de Adamson Engineering, para la simulación del recinto y el comportamiento de los altavoces Y18 de dicho fabricante, en este recinto.

Lo primero es generar un plano del recinto y sus zonas de audiencia, para esto debemos tener a la mano las medidas del recinto. Se realizó una visita técnica al Ágora de la Casa de la Cultura Ecuatoriana para obtener medidas, en el software BluePrint se ingresó las dimensiones del recinto.

Se debe insertar el número de cajas que sea necesario para poder cubrir la zona de audiencia en dicho recinto, se puede observar en la siguiente gráfica que se utilizará 12 altavoces por lado para cubrir esta zona.

Se recomienda en general que las angulaciones de los altavoces sean progresivas, de arriba hacia abajo, así se tendrá un mayor número de altavoces trabajando a mayor distancia, mientras que más angulación cerca para distribuir la presión sonora y no exista un exceso de SPL en la zona cercana al PA.

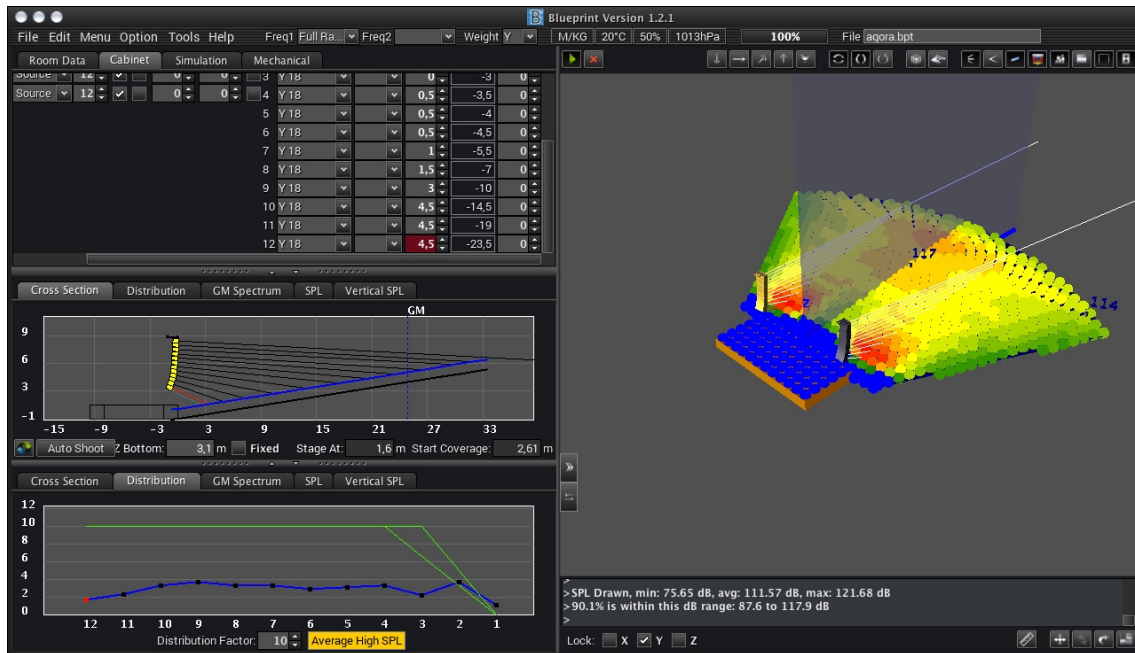


Figura 22. Simulación acústica del Ágora CCE, software BluePrint, vista de cobertura y SPL.

### 3.2. Cobertura y colocación de las fuentes.

En el diseño para el recinto utilizaremos los altavoces del fabricante canadiense Adamson con sus modelos Y18, Y10, T21.

La distribución será:

- 12 Y18 x lado para L-R.
- 4 Y10 para Frontfill.
- 6 T21 para Subs.

El arreglo de Sub graves a utilizar será de tipo gradiente para minimizar la presión en baja frecuencia del escenario, por limitaciones del recinto se utilizarán 2 arreglos gradientes, cada uno bajo el clúster L y R.

Los clústeres L y R están separados por una distancia de 16m y el ángulo de cobertura de los altavoces Y18 es de 100 grados en horizontal, para cubrir la zona que quedaría fuera de esta cobertura cercana al escenario utilizaremos 4 Y10 separadas 2.91 metros.

### **3.3. Región de crossover acústico.**

Esta región es la zona donde interactúan las fuentes, en el caso de un LR, será la zona donde dichas coberturas se empiecen a cruzar, formando así una nueva cobertura donde existirán sumas o cancelaciones según la configuración de las fuentes, tiempos de llegada diferentes en el espectro de frecuencia o alteraciones en el recinto y hasta influencia del entorno en temperatura, viento o humedad relativa. (Davis & Patronis, 2006)

En el documento Referencias de Diseño, Meyer Sound escrito por McCarthy en 1997, se hace referencia a varios tipos como:

- **Acoplamiento:** cuando existe una suma máxima y una cancelación mínima.
- **Combinación:** cuando existe una suma moderada pero el grado de cancelación todavía es menor.
- **Cancelación:** cuando existe un mayor grado de cancelaciones que suma acústica.

## **4. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS DE SONORIZACIÓN.**

Basándose en la teoría anteriormente expuesta, se hace una propuesta a continuación, de una serie de pasos a seguir para la optimización de un sistema de sonorización para espectáculos en vivo, estos pasos serán aplicables en sistemas pequeños a grandes y en diferentes recintos, a veces se podrá variar el número de mediciones por las zonas de audiencia como balcones, graderíos

o por la implementación de un mayor número de subsistemas: outfills, delays, entre otros, sin embargo siempre se manteniendo la misma metodología descrita a continuación.

#### **4.1. Esquema de conexión.**

Para realizar la optimización del sistema necesitamos de las siguientes herramientas:

- Micrófono de medición.
- Interfaz de audio de al menos 2 canales de entrada.
- Generador de señal de referencia (se lo hará desde la consola de FOH).
- Computadora con software de análisis FFT.
- Cables de interconexión entre dispositivos.

El micrófono se conecta en uno de los canales de la interfaz de audio, este canal se lo denominará medición, mientras que al segundo canal deberá ingresar el ruido rosa que se tomará como referencia. La señal de referencia deberá ser generada idealmente de una matriz desde la consola o desde algún dispositivo que generador de señal, que entre en un canal de la consola. Siempre se debe tomar una salida de la consola, ya que está es la encargada de manejar todas las señales de salida para el sistema, así será una referencia con las mismas características.

Se debe configurar el software de medición para que haga la función de transferencia entre estas dos señales, donde se apreciará la variación existente en el transcurso de la señal de entrada y la salida por los altavoces más la interacción del recinto.

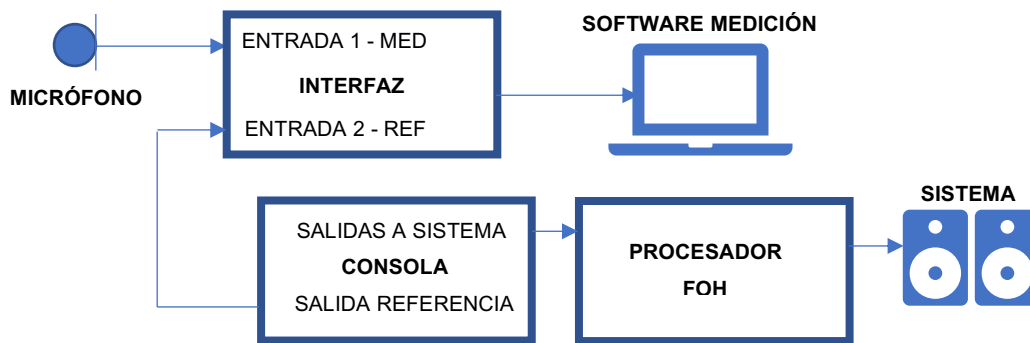


Figura 23. Esquema básico para medición de un sistema de sonorización

## 4.2. Simulación acústica.

Se parte de un diseño y una simulación acústica del recinto y los altavoces como se ha planteado anteriormente con las directrices dadas en el capítulo anterior. Después de tener la simulación obtenida del software de fabricante se procederá a hacer el montaje de la manera propuesta. Cuando el sistema está montado, se realiza las primeras mediciones de cada subsistema (L, R, Sub, Front), para poder apreciar si existe algún error o falencia, ya sea por componentes en mal estado, cables en polaridad invertida, etc.

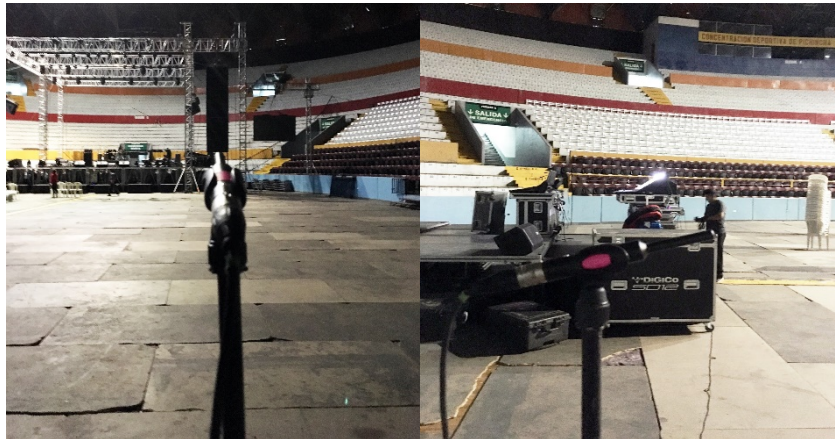
## 4.3. Niveles.

Se debe buscar que sistema principal tenga el nivel correcto y el mismo entre L y R, para que exista una suma correcta, según requerimientos técnicos de varios riders, generalmente se solicita una presión sonora de al menos 105 dB SPL en la posición de FOH.

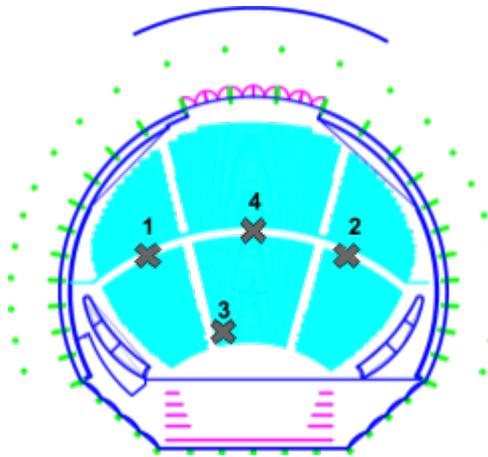
Para la calibración del nivel en el software de medición Smart se procede a manejar las ganancias de entrada y de salida en la vista de espectro, para que éstas se muestren parejas y los medidores de intensidad estén mostrando un nivel de entrada similar.

## 4.4. Medición y calibración del sistema.

Se propone hacer una medición de cada clúster L, R, en eje, esto quiere decir justo frente a cada arreglo lineal, pero a la misma distancia que se encuentra la consola de FOH que idealmente se encontrará cercana al centro de la sala. De esta manera se minimizará el efecto de las reflexiones del recinto y se obtendrá una medición con una mejor respuesta en coherencia.



*Figura 24.* Colocación del micrófono de medición en eje a la distancia de la zona de FOH.



*Figura 25.* Mediciones propuestas para el sistema en el Ágora CCE.

En el primer punto de medición propuesto se debe ajustar los niveles de medición y referencia, además de ajustar el retardo aplicado a la referencia, ya que existirá una latencia por la transducción y por la distancia que existe entre el micrófono y el sistema a medir.

En la segunda medición, se hace el ajuste del retardo, pero no se varía las ganancias de los niveles, de esta manera se puede observar si existe una diferencia en dB entre los clústeres L y R.

Ahora que se tienen las mediciones del sistema principal L-R se procede a tomar un lado como referencia, esto se decide buscando cual de los 2 se comporta mejor con la linealidad que se busca.

Se debe marcar todos los puntos de medición, ya que nos servirá después para verificar nuestra optimización en los mismos puntos de referencia. Se debe tomar un lado como referencia, según el que mejor se acerque a la linealidad que se busca.

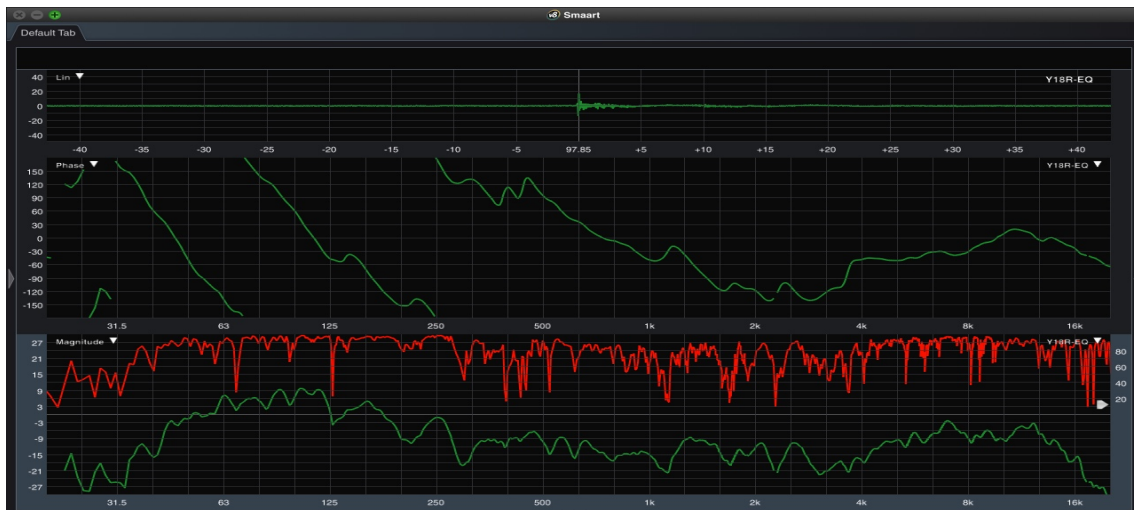


Figura 26. Medición del punto 1 sin ningún proceso. (lado derecho).

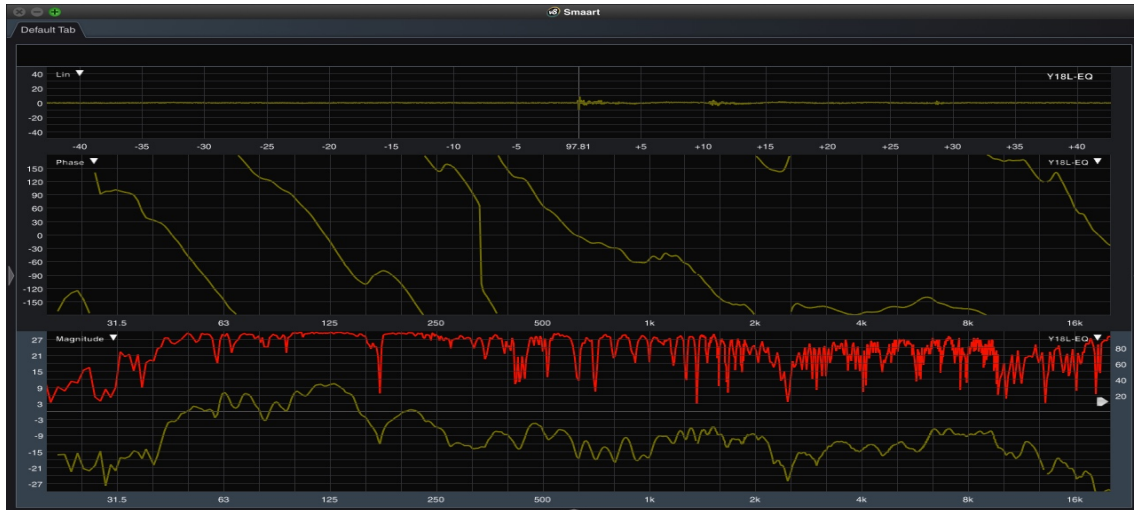


Figura 27. Medición del punto 2 sin ningún proceso. (lado izquierdo).

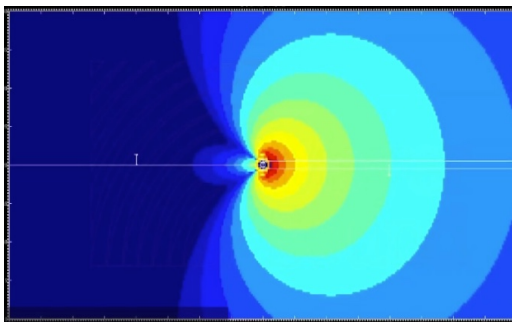
#### 4.5. Retardos.

En el caso de estudio se utilizó un arreglo de subgraves tipo gradiente en bloque, en donde el subgrave central va con el frente hacia el escenario. Primero se deberá crear dicho arreglo para poder tratarlo como un solo bloque.

Se ubica el micrófono a una distancia de 1 m aproximadamente y se mide los 2 subgraves que su frente está hacia el público, esta medición se almacena en una memoria, luego se debe repetir el proceso, solo para el sub que está en dirección al escenario. De esta manera se busca en ajustar por medio de retardo este último hasta crear la suma ideal, para ello se deberá observar la curva de fase del software de medición que en el caso de estudio es Smart, se añade retardo hasta que las curvas se superpongan.

Es muy importante que para que la cancelación o la máxima suma exista, el nivel de los subgraves delanteros con relación al trasero debe ser la misma, sino es así hay que compensar el nivel del sub trasero. Una vez que se obtiene la máxima suma, se debe invertir la polaridad para así obtener en la parte trasera la máxima cancelación acústica.





*Figura 28.* Simulación acústica de arreglo gradiente en la frecuencia de corte.



*Figura 29.* Arreglo gradiente de subgraves Adamson T21.

Ahora que se tiene el arreglo configurado, se puede tratar este conjunto como uno solo.

Se debe colocar el micrófono en el punto de referencia 4, frente a la consola de sala FOH, que de manera ideal está equidistante de ambos clústeres L-R. En este punto se tomará una medición de referencia del sistema principal, se puede verificar por medio de la vista de impulso de la función de transferencia que los 2 clúster lleguen al micrófono de medición al mismo tiempo, viendo un solo impulso de mayor magnitud, si se observa 2 impulsos de la misma magnitud, se deberá ir moviendo el micrófono hasta que se vea un solo impulso, allí es donde se indica que los 2 clústeres llegan al mismo tiempo. Esta medición como las anteriores se deberán ajustar los niveles de entrada, retardo del software y se la almacenará en memoria.



Figura 30. Vista de la ventana de impulso en Smart V8.

Para ajustar el sub vs el sistema principal, se deberá medir el sub en el punto 4 y veremos casi siempre una diferencia en retardo, esto se produce por la diferencia en distancia que generalmente existe entre el sistema principal colgado y los subgraves al estar en piso generalmente.

Se puede notar dicha diferencia en la curva de fase de nuestro programa de medición, a mayor grado de pendiente, mayor retardo tiene. Por medio de retardo se ajustan las pendientes que se encuentran en el punto de corte entre el sistema principal L-R y los subgraves.

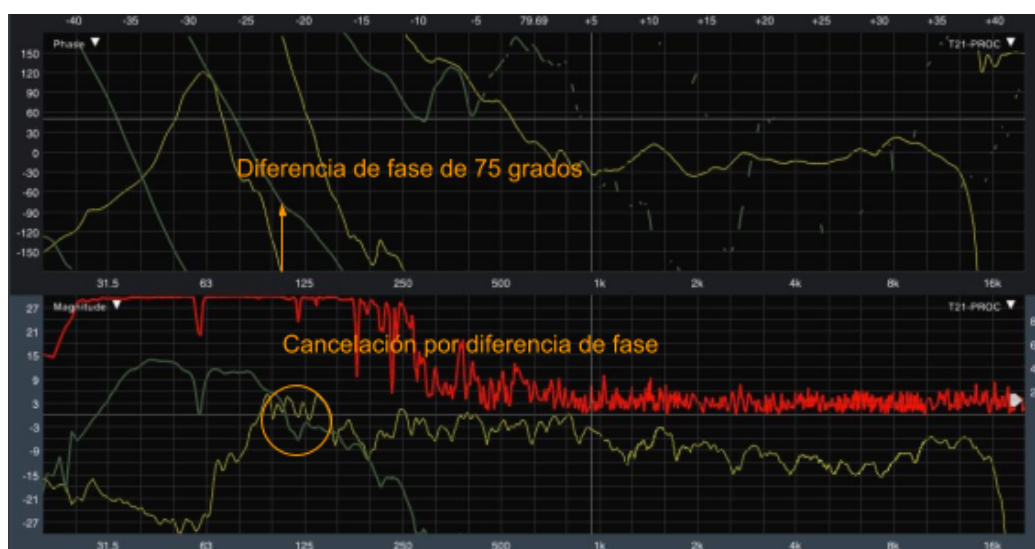


Figura 31. Desfase del sub con respecto al sistema LR.

Idealmente la curva de fase se tiene que superponer en la zona de punto de corte, para ello se introduce un retardo en la vía que menos retardo posea según el software, en este caso es el subgrave, como podemos observar en el gráfico anterior. Se introduce un retardo hasta que las pendientes sean iguales y se superpongan en el punto de cruce existente entre el sub y el L-R y sus alrededores. Sin embargo, hay ocasiones en las que, al intentar igualar por medio de retardo, la pendiente del subgrave es igual a la del sistema principal, pero está paralela, se podrá observar que tiene una diferencia de 180, entonces se procederá a invertir la polaridad de la señal de subgrave y se podrá apreciar que ahora la curva se superpone.

Para hacer el ajuste de tiempo del frontfill, existe una manera rápida. Se deberá colocar el micrófono en la posición 3, que es donde interactúan el sistema principal y el frontfill. Se hace una medición de referencia solamente del sistema principal tomando el retardo entre la referencia y la medición como es usual y se la guarda en la memoria. Ahora se deberá realizar una medición solamente del frontfill, al buscar el retardo para la medición se observará una diferencia de tiempo entre la medición anterior, esta diferencia que existe entre el sistema principal y el frontfill, se deberá insertar en el procesador de FOH a la salida del frontfill, y se deberá verificar la polaridad para que sume con el sistema principal.

#### **4.6. Ecualización.**

Al tener el lado de referencia, se debe colocar el micrófono nuevamente en el punto de medición inicial de dicho lado. Por medio de filtros y ecualización se debe crear una respuesta de frecuencia plana en la zona de 1 KHz hasta 12 KHz, bajo 1Khz hasta los 100Hz se deberá tener una pendiente que tenga 6 a 8 dB, mientras que el nivel del subgrave deberá tener entre 10 y 12 dB de diferencia con la zona de 1KHz. En la imagen a continuación se puede apreciar como debería ser el ajuste para obtener la curva deseada.



Figura 32. Ejemplo de corrección de curva.

Tomado de Meyer Sound, Sf.

Los filtros y ecualización serán hechos en un ecualizador paramétrico, se deberán ingresar en el procesador de FOH de preferencia, si no es posible tener un procesador de sala se podrá hacer la ecualización destinando una salida en consola y procesando en esta. Para el ejemplo de este documento se lo realiza en un procesador XTA DP448.



Figura 33. Procesador XTA DP448.

A continuación, se presenta varios criterios de ecualización para los géneros musicales más comunes. Utilizaremos la curva de ecualización azul, esta curva de ecualización se sentirá “plana” y agradable a la escucha, esto se debe porque a cierto nivel nuestro oído percibe de manera distinta el espectro de frecuencia. Tendremos que hacer que nuestro sistema se asemeje a este tipo de curva por medio de los filtros ingresados en el procesador o consola.



Figura 34. Criterios de ecualización según género musical. Meyer Sound, Sf.

Una vez optimizado el lado que servirá de referencia se deberá ajustar mediante el mismo procedimiento, se intentará crear un clon con el lado opuesto, de manera similar.

La ecualización del frontfill se deberá hacer de la misma manera, pero con el sistema principal abierto, dando al conjunto L-R y frontfill el mismo tipo de curva.

#### 4.7. Verificación de calibración.

Se deberá verificar la calibración del sistema primero auditivamente, recorriendo el recinto y corroborando la cobertura del sistema en dicho recinto, en el caso de que se requiera hacer algún reajuste en la respuesta de frecuencia del sistema ya por gusto del ingeniero de mezcla, esto se lo realizará desde los ecualizadores gráficos en el procesador o en la consola de sala. Se podrá verificar también de manera visual en los puntos de medición inicial.

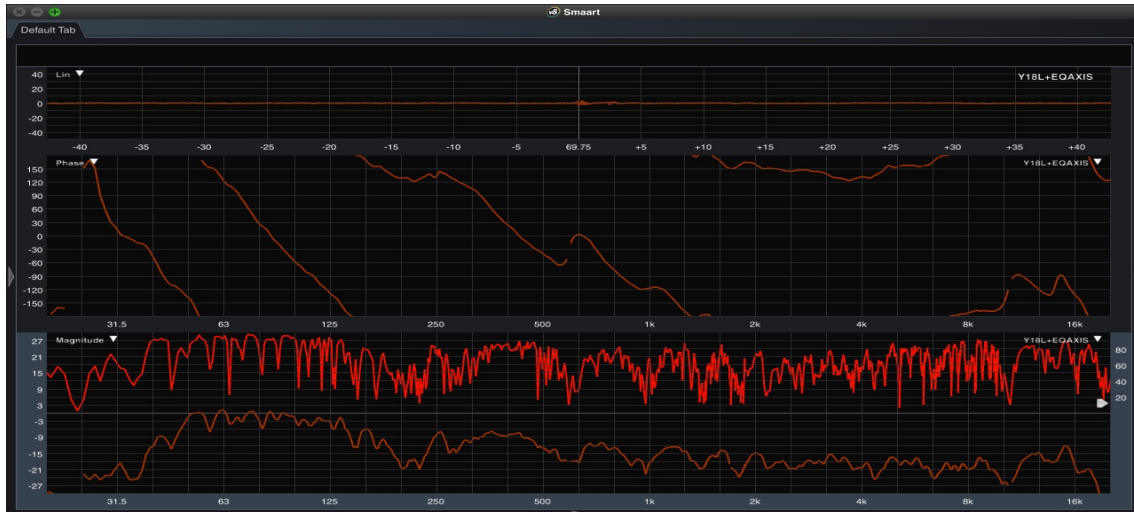


Figura 35. Medición del punto 1 (R), con los ajustes en ecualización.

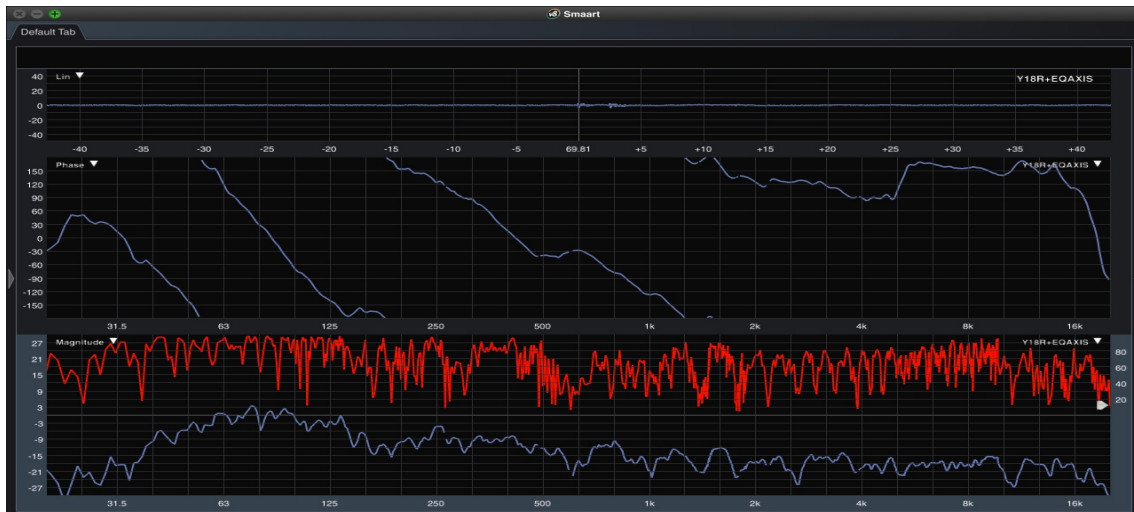


Figura 36. Medición del punto 2 (L), con los ajustes en ecualización.

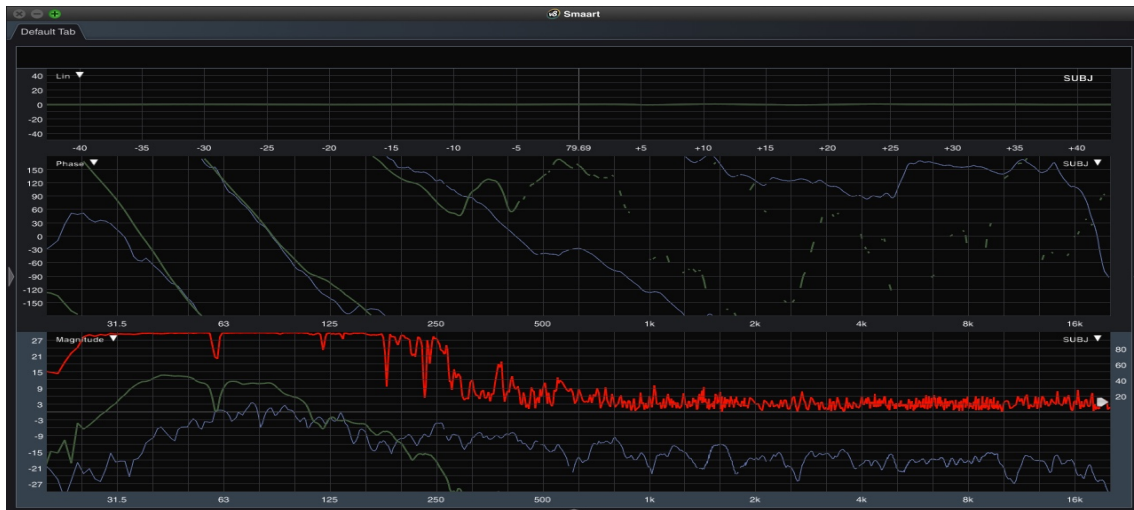


Figura 37. Medición del punto 4 (FOH), subgrave en fase con el sistema LR.



Figura 38. Medición del punto 3 (FOH), frontfill.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

### 5.1. Conclusiones

En un concierto existen muchos factores que pueden influenciar en la calidad del audio que llega a los oyentes, sin embargo, se debe buscar siempre que el sistema de audio aporte de forma adecuada y que se convierta en un aliado del ingeniero de mezcla, para que este solamente se preocupe en la estética y el arte de la música ejecutada y no en los problemas técnicos que por desconocimiento o negligencia se puede dar en un espectáculo. El audio puede ser hasta cierto punto muy subjetivo para las personas que asisten a un concierto, sin embargo, en mi experiencia profesional he podido apreciar la diferencia entre un equipo bien ajustado y uno que no lo está. Cuando el público en todo el recinto responde de mejor manera al “mensaje musical” es porque se escucha bien, esto quiere decir que hay un adecuado nivel, que no es demasiado para causar daño auditivo, pero que tampoco que se enmascara con el ruido de fondo de las personas presentes, un buen manejo del rango de frecuencias e inteligibilidad de la palabra, en todas las zonas de audiencia. Todo esto se da solo si el sistema se encuentra optimizado.

Se realizó una simulación acústica con el modelo de altavoces que se tenía disponibles para el ejemplo, aquí se aprecia el número de altavoces requerido para tener una cobertura óptima, a veces se podrá requerir un mayor número de altavoces por una mejor cobertura de la zona de audiencia más no por presión sonora, como fue en el caso del ejemplo, es así que se deberá atenuar el sistema para no exceder los límites y causar un daño auditivo a los asistentes, también se puede apreciar de manera visual mediante las capturas de pantalla de Smart 8.3, las falencias que tenía el sistema antes de realizar la optimización y después de optimizarlo, mejorando sustancialmente su respuesta de frecuencia y eliminando las cancelaciones existentes por las diferencias de tiempo entre los componentes del sistema, como los subgraves.



Un mayor número de mediciones requerirá más tiempo y no necesariamente quiere decir que se tendrá mejores elementos para tomar las decisiones. Es mejor tomar puntos importantes como el FOH además de los centros de la zona de audiencia.

## **5.2. Recomendaciones**

Se debe cuidar cada eslabón de nuestra cadena electroacústica para lograr un buen resultado final, se deberá verificar el estado de todos los componentes involucrados en nuestras mediciones, buenos altavoces, buenas conexiones, buen procesamiento, buen sistema de medición, buena colocación de los altavoces, también será de vital importancia escuchar el sistema antes y después de la optimización que se realiza con el software de medición, ya que siempre los retoques finales y la última decisión vendrán dadas por el criterio y gusto de nuestros oídos, pues a pesar de las bondades de la tecnología, la música y el audio siguen siendo un arte.

Cada situación en el campo de la optimización es muy particular, ya que cada sitio es distinto y cada altavoz se comporta de manera distinta, inclusive un mismo sistema en un mismo lugar no se comportará igual todo el tiempo, ya que las condiciones siempre serán cambiantes. Por esta razón no hay que dar nada por sentado y siempre dar un trato prioritario al diseño y la optimización para poder entregar un audio de calidad a los oyentes.

Como recomendación final está el poder practicar con esta guía, en todos los lugares posibles y con todos los equipos posibles, para así poder desarrollar una mejor destreza y realizar una optimización de manera rápida pero eficaz.

## REFERENCIAS

- Anderson, J. (2015). Anatomy of a system measurement rig. ProSoundWeb recuperado el 2 de diciembre de 2018 de [https://www.prosoundweb.com/topics/sound\\_reinforcement/anatomy\\_of\\_a\\_system\\_measurement\\_rig\\_probes\\_preamps\\_processors/2/](https://www.prosoundweb.com/topics/sound_reinforcement/anatomy_of_a_system_measurement_rig_probes_preamps_processors/2/)
- Davis, D., & Patronis, E. (2013). *Sound system engineering*. Londres, Reino Unido, Focal Press.
- Deery, J. (2007). The “Real” History of Real-Time Spectrum Analyzers. *Sound and Vibration*, recuperado el 4 de diciembre de 2018 de <http://www.sandv.com/downloads/0701deer.pdf>.
- Digón, A. G., & Ferrer, P. (2014). *Configuración y ajustes de sistemas de sonido: Curso práctico*. Altaria.
- Ferrer, P. (2017). *Curso Transmisión y Análisis FFT (Parte 2)*. Recuperado el 2 de diciembre de 2018 de <http://educasound.com/wp-content/uploads/2017/06/ANALISIS-FFT-.pdf>.
- Herlufsen, H. (1984). Dual channel FFT analysis (Part II). *Technical Review*. Recuperado el 29 de noviembre de 2018 de <http://www.bksv.com/doc/bv0014.pdf>
- Kinsler, L. E. (2008). *Fundamentos de acústica*, México D.F. México, Limusa.
- Leerman, Craig. (2014). *Moving Air: Inside Subwoofer Designs & Configurations*. ProSoundWeb, Recuperado el 29 de noviembre de 2018 de [https://www.prosoundweb.com/channels/live-sound/moving\\_air\\_inside\\_subwoofer\\_designs\\_configurations/](https://www.prosoundweb.com/channels/live-sound/moving_air_inside_subwoofer_designs_configurations/)
- McCarthy, R. (1997). *Referencias de Diseño de Meyer Sound Volumen 1 Sonorización*. Berkeley, Estados Unidos, Meyer Sound Labs.
- McCarthy, R. (2010). *Sound systems: Design and optimization: Modern techniques and tools for sound system design and alignment*. Londres, Reino Unido, Focal Press/Elsevier.
- McCarthy, R. (2017). *Spatial Pursuits: The Evolution Of Large-Scale Sound System Optimization*. ProSoundWeb Recuperado el 4 de diciembre de 2018 de

- <https://www.prosoundweb.com/channels/live-sound/spatial-pursuits-the-evolution-of-large-scale-sound-system-optimization/>
- Meyer Sound. (2000). *Guía para optimizar sistemas de sonorización*. Berkeley, Estados Unidos, Meyer Sound.
- Meyer Sound. (2009). *Fundamentals of system design, implementation and optimization*. Berkeley, Estados Unidos, Meyer Sound.
- Olson, H. E. (1960). *Elements of acoustical engineering*. New York, Estados Unidos, D. Van Nostrand Company.
- Olson, H. E. (1967). *Music, physics and engineering*. New York, Estados Unidos, Dover Publications.
- Olson, H. E. (1973). New Jersey, Estados Unidos, *Gradient Loudspeakers*. RCA Laboratories.
- Orellana, L. (2008). *Análisis de regresión*. Recuperado el 8 de diciembre de 2018 de [http://www.dm.uba.ar/materias/estadistica\\_Q/2011/1/clase%20regresion%20simple.pdf](http://www.dm.uba.ar/materias/estadistica_Q/2011/1/clase%20regresion%20simple.pdf).
- Osorio, J. (2008). *Fundamentos y Aplicación del muestreo en señales ubicadas en las bandas altas del espectro*. *Scientia et Technica*, Universidad Tecnológica de Pereira, septiembre 2008. P. 37.
- Reyes, E. (2010). *Aplicaciones del software SMAART para diseño y optimización de sistemas de sonido*. SONAC, (1), p. 69-74
- Ryan, T. (2011). *The Effects of Multiple Arrivals on the Intelligibility of Reinforced Speech*. Recuperado el 3 de diciembre de 2018 de <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=15990>
- Rational Acoustics. Recuperado el 22 de noviembre de 2018 de <http://www.rationalacoustics.com/download/Smaart-v8-User-Guide.pdf>.
- Smaart (8.3) [Software]. (2018). Recuperado el 22 de noviembre de 2018 de <http://www.rationalacoustics.com>
- Ureda, M.S. (2004), Analysis of Loudspeaker Line Arrays, *Journal of the audio engineering society* Volume 52 number 5, pág 467.
- Van Veen, M. (2017). *To Delay or Not? That Is The Question*. *ProSoundWeb* Recuperado el 6 de dicmbre de 2018 de

[https://www.prosoundweb.com/channels/live-sound/to\\_delay\\_or\\_not\\_that\\_is\\_the\\_question/](https://www.prosoundweb.com/channels/live-sound/to_delay_or_not_that_is_the_question/)

Ventana (Función) (s.f.). *En Wikipedia*. Recuperado el 17 de marzo, 2018.

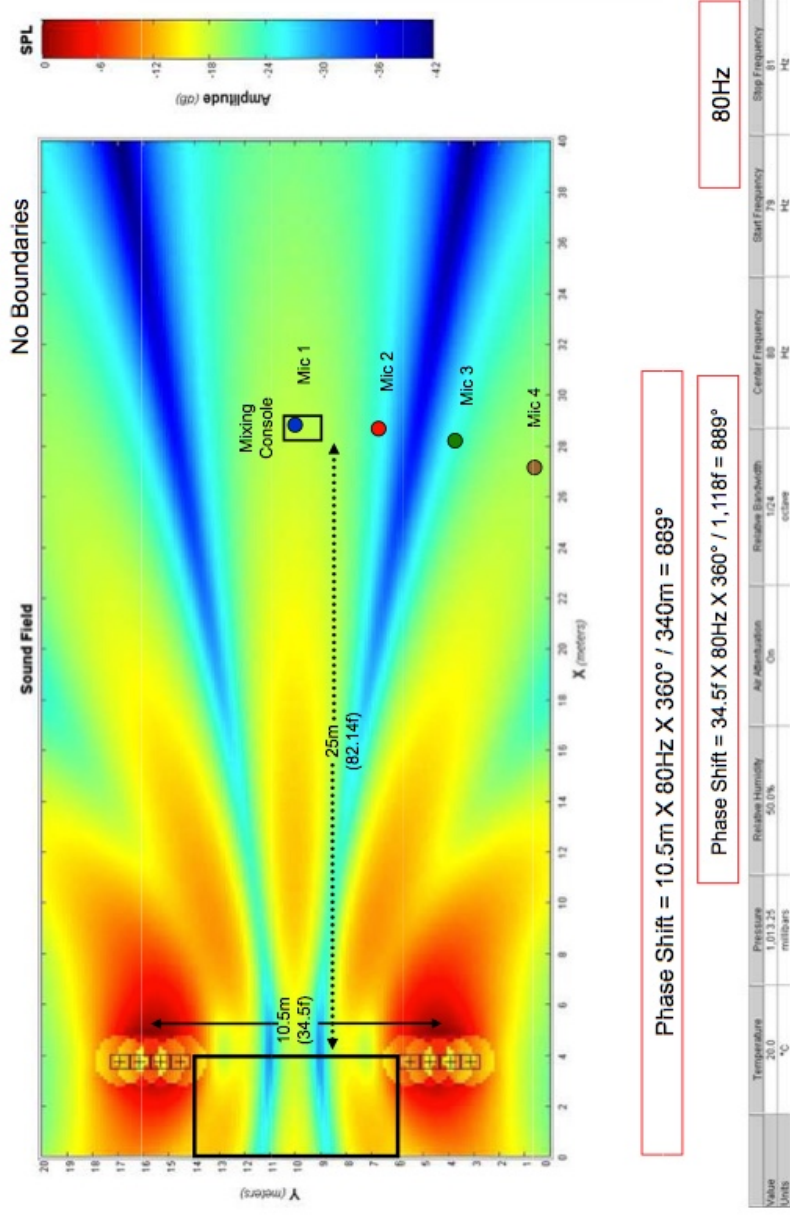
[https://es.wikipedia.org/wiki/Ventana\\_\(funci3n\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Ventana_(funci3n))

Welaratna, S. (1997). *Thirty Years of FFT Analyzers*. Data Physics Recuperado el 12 de diciembre de 2018 de [http://www.dataphysics.com/30\\_Years\\_of\\_FFT\\_Analyzers\\_by\\_Sri\\_Welaratna.pdf](http://www.dataphysics.com/30_Years_of_FFT_Analyzers_by_Sri_Welaratna.pdf).

## ANEXOS

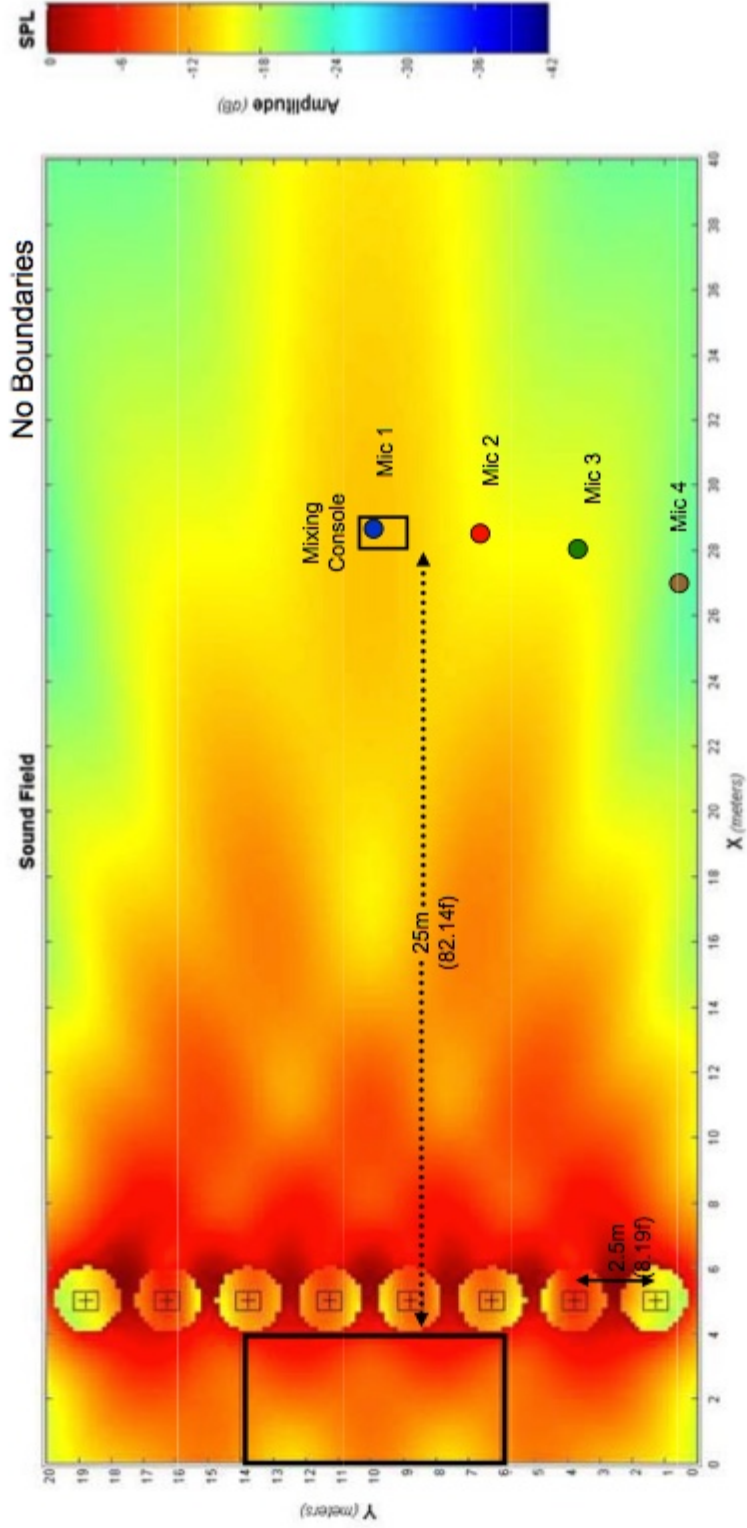
# ANEXO 1

## Typical Configuration using Subwoofers



# ANEXO 2

## Straight Line Configuration



Phase Shift =  $2.5\text{m} \times 80\text{Hz} \times 360^\circ / 340\text{m} = 211^\circ$

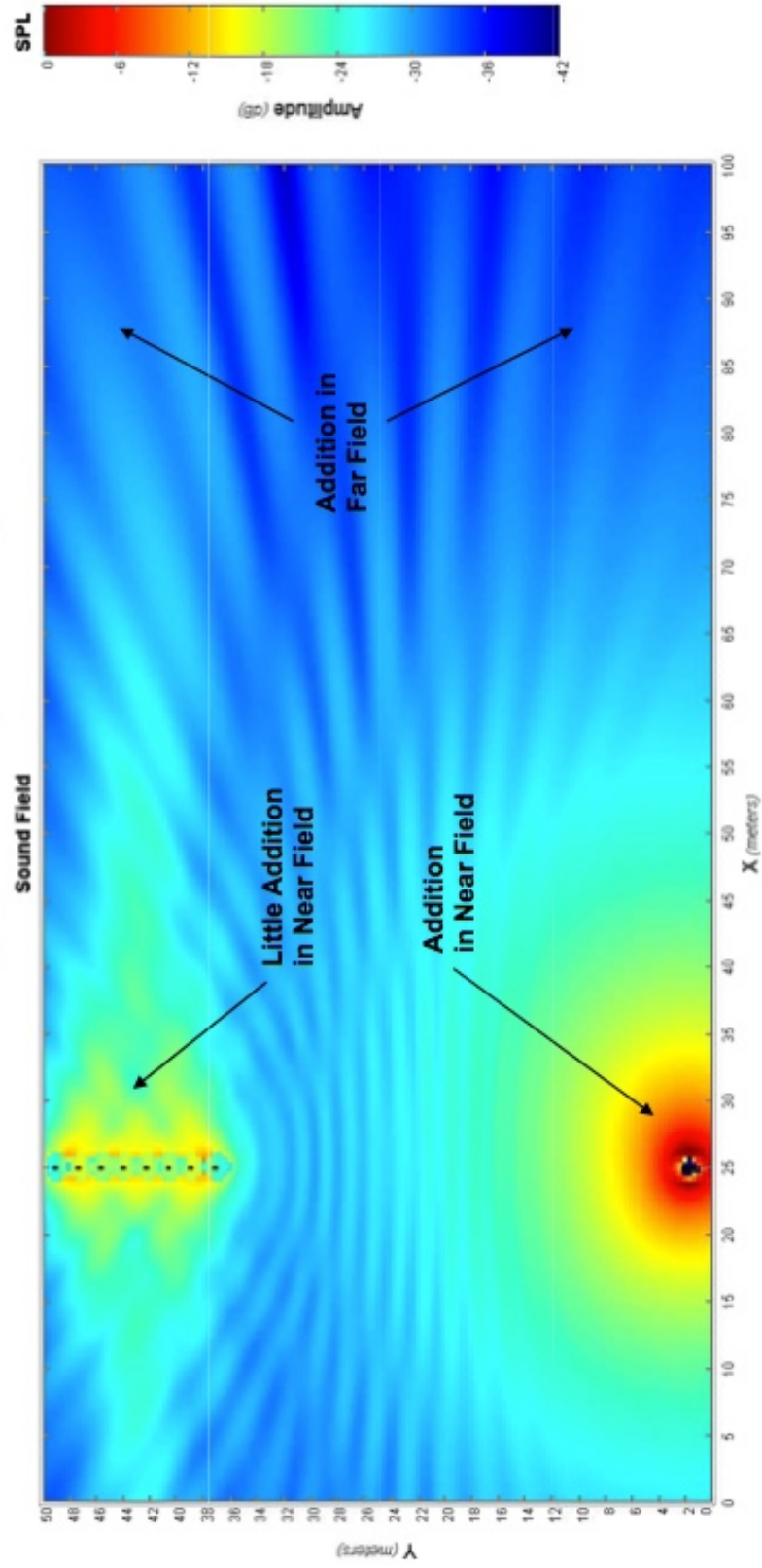
Phase Shift =  $8.19\text{f} \times 80\text{Hz} \times 360^\circ / 1,118\text{f} = 211^\circ$

80HZ

Value	Temperature	Pressure	Relative Humidity	Air Absorption	Relative Bandwidth	Center Frequency	Start Frequency	Stop Frequency
Units	°C	millibars	50.0%	0m	octave	80 Hz	79 Hz	81 Hz

# ANEXO 3

## Block vs Line

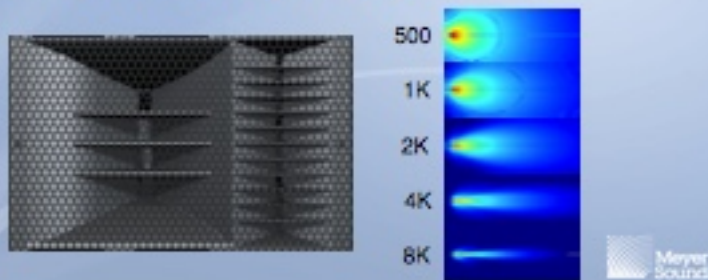




## ANEXO 4

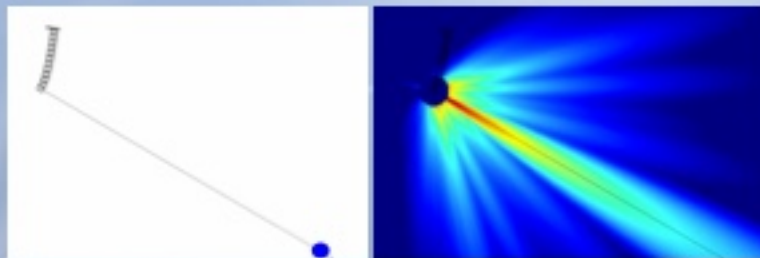
### High Frequency Behavior:

- The high frequency section in each cabinet acts as its own small line array in the high frequencies.

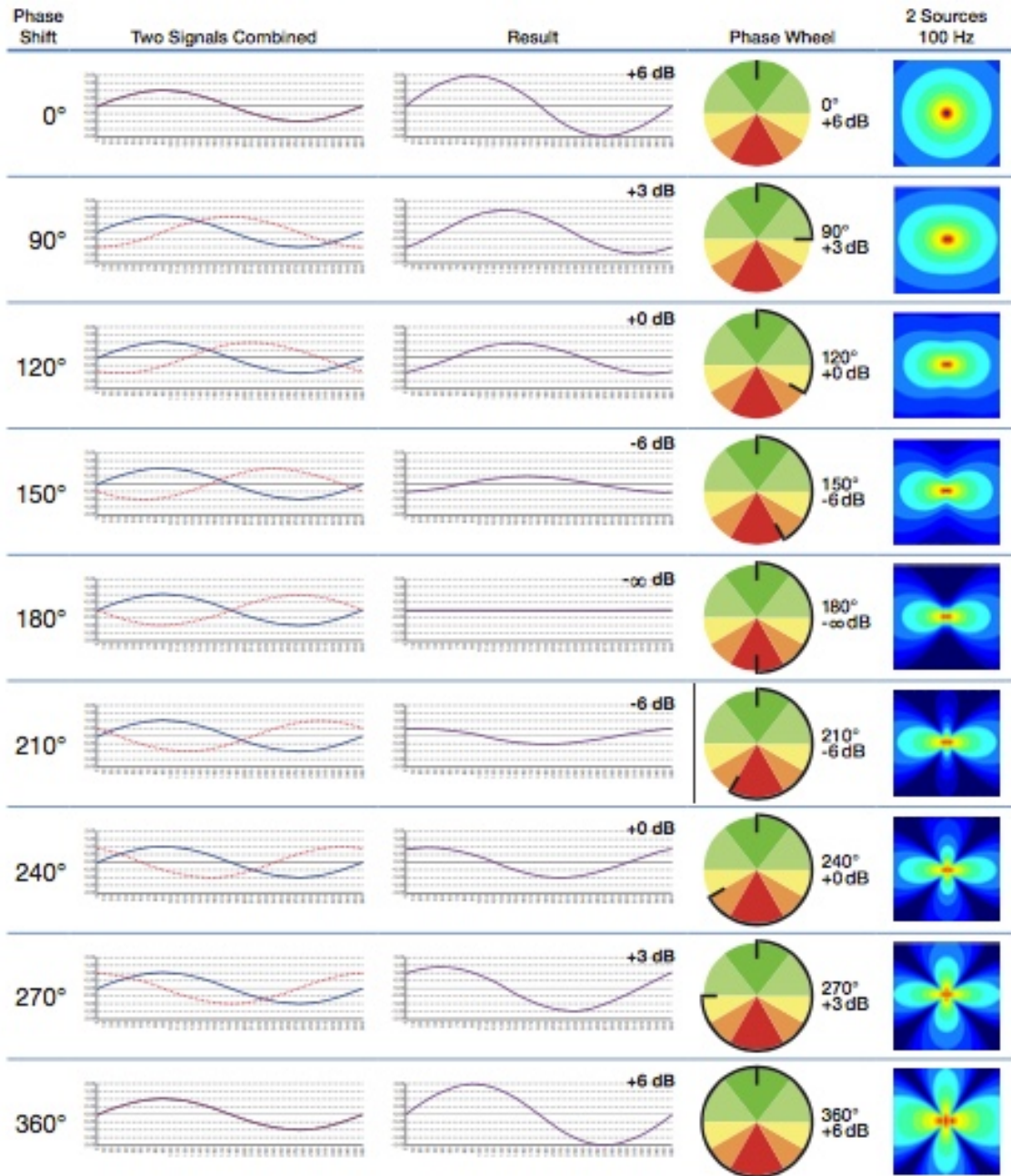


### Narrow vertical coverage pattern:

- Isolates the high frequency energy from other elements in the array
- Minimizes destructive interference in the high frequencies



# ANEXO 5



# ANEXO 6

