

RAE

1. **TIPO DE DOCUMENTO:** trabajo de grado para optar título de ingeniería de sonido
2. **TÍTULO:** Diseño y construcción de un prototipo para la aplicación de la técnica Wave Field Synthesis
3. **AUTORES (ES):** Alexandra Urzola Mendoza, Cristian Rodríguez Rangel, Kelly Melissa Arias Saucedo
4. **LUGAR:** Bogota
5. **FECHA:** 24/04/2017
6. **PALABRAS CLAVE:** Desarrollo, Wave Field Synthesis, prototipo,
7. **DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO:** El objetivo principal de este Proyecto es diseñar y construir un prototipo para la aplicación de la técnica Wave Field Synthesis; para esto se realiza una revisión bibliográfica basando el Proyecto en anteriores estudios en los que personas fueron expuestas a dicho Sistema y así conocer la percepción Sonora de las personas frente a la técnica Wave Fiel Synthesis. Es el presente trabajo se muestra el diseño y construcción del prototipo, además de las mediciones objetivas y subjetivas que se realizaron para comprobar que dicho Sistema cumple con los objetivos propuestos.
8. **LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:** Línea de investigación de la USB: Tecnologías actuales. Sub línea de Facultad de Ingeniería: Análisis y Procesamiento de señales. Campo Temático del Programa: Audio, DSP, electrónica y diseño
9. **METODOLOGÍA:** Definido de carácter experimental, ya que se pretende conocer la percepción Sonora que tienen los individuos expuestos a la técnica Wave Field Synthesis.
10. **CONCLUSIONES:** Para la reproducción de la técnica Wave Field Synthesis es necesario utilizar un arreglo lineal de altavoces, el cual se capaz de alcanzar una cobertura de mínimo 80° en el área de audiencia, un nivel de presión sonora suficiente para que los oyentes perciban con

**un nivel adecuado los sonidos que se reproducen en la escena acústica. Además, es necesario utilizar un software que permita ubicar las fuentes virtuales en dicho punto del área de audiencia, la posición de las fuentes virtuales se logra con un retraso y amplitud determinados. Para lograr la correcta reproducción de las fuentes virtuales se debe tener en cuenta la caracterización del sistema por medio de las pruebas objetivas (ILD, ITD, cobertura y sensibilidad) del arreglo lineal.**

**UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA  
FACULTAD DE INGENIERÍA DE SONIDO**



**ALEXANDRA URZOLA MENDOZA  
CRISTIAN RODRÍGUEZ RANGEL  
KELLY MELISSA ARIAS SAUCEDO**

**UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA DE SONIDO  
BOGOTÁ D.C  
2017**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO PARA LA APLICACIÓN DE  
LA TÉCNICA WAVE FIELD SYNTHESIS**

**ALEXANDRA MENDOZA URZOLA  
CRISTIAN RODRÍGUEZ RANGEL  
KELLY MELISSA ARIAS SAUCEDO**

**Trabajo presentado como requisito para optar por el título de profesional  
en Ingeniería de Sonido  
Director: Dr. Marcelo Herrera Martínez**

**UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA DE SONIDO  
BOGOTÁ D.C**

**2017**

Nota de Aceptación

---

---

---

---

Presidente del Jurado

---

Jurado

---

Jurado

Bogotá, Febrero 24 de 2017

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, quien renovó nuestras fuerzas y recursos cada día para mantenernos firmes durante este gran esfuerzo que significó nuestra carrera de Ingeniería de Sonido.

A nuestros padres, una vez más, por el apoyo incondicional y estímulo constante que posibilitaron la conquista de nuestra formación profesional.

A nuestros tíos y hermanos, pues han sido una gran inspiración tras este objetivo tan significativo para nuestras vidas.

Al profesor Marcelo, por su gran ayuda y dedicada colaboración al habernos brindado la consultoría y soporte necesarios en este último trabajo de investigación, de manera amable y considerada.

También queremos agradecer al profesor Manuel Torres, por guiarnos y brindarnos su conocimiento para poder realizar un buen trabajo ingenierilmente.

No existen palabras para corresponder al aporte brindado por la directiva, profesores y personal de la Universidad San Buenaventura, queremos que sientan todos que el objetivo logrado también es de ustedes y que la energía que nos ayudó a conseguirlo fue su apoyo.

Le dedicamos esta tesis a una persona que creyó en nosotros desde el comienzo del desarrollo de este proyecto. En memoria al ingeniero William Ferney Romo Martínez

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	14
1.1. Estado del arte .....	14
1.1.1. Sistemas de reproducción de audio con altoparlantes .....	14
1.1.2. Sistemas de reproducción de audio con audífonos.....	22
1.1.3. Investigaciones realizadas implementando la Wave Field Synthesis.....	22
1.2. Descripción y formulación del problema .....	25
1.3. Justificación.....	27
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	27
2.1. OBJETIVO GENERAL .....	27
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	27
<b>3. DISEÑO METODOLÓGICO</b> .....	28
3.1. Enfoque de la investigación.....	28
3.2. Variables.....	29
3.2.1 Variables Operacionales .....	29
3.2.2. Variables Conceptuales.....	29
3.3. Hipótesis .....	29
<b>4. MARCO CONCEPTUAL</b> .....	29
4.1 Aspectos Teóricos.....	29
4.1.1 Percepción auditiva .....	29
4.1.2 Audición espacial .....	30
<b>5. MARCO TEÓRICO</b> .....	31
5.1. Localización sonora .....	31
5.2. Diferencias Interaurales ITD (Diferencia Interaural de Tiempo) e ILD (Diferencia Interaural de Nivel) .....	32
5.3. ILD (Diferencia Interaural de Nivel).....	35
5.4. ITD (Diferencia Interaural de Tiempo).....	36
5.5. Wave Field Synthesis .....	37
5.5.2. Alias espacial .....	42
5.5.3. Método del domino del tiempo .....	43
5.5.4. Errores de amplitud .....	45

5.5.6. Efectos de truncamiento .....	46
5.6. Eficiencia electroacústica de un altavoz .....	46
6. DESARROLLO INGENIERIL .....	49
DIAGRAMA DE BLOQUE DEL PROYECTO: CAPÍTULO 1 .....	49
6.1. Medición de Respuesta en Frecuencia .....	50
6.2. Medición de sensibilidad.....	51
6.3. Amplificador utilizado .....	52
DIAGRAMA DE BLOQUE DEL PROYECTO: CAPÍTULO 2 .....	55
6.4. Ejecución de la programación y construcción del prototipo.....	56
6.4.1. Diseño de las cajas acústicas .....	56
6.4.1. Programación de Aplicación informática (objetivo 2) .....	61
6.5. Cálculos teóricos.....	67
6.5.1. Potencia acústica.....	67
6.5.2. Frecuencia aliasing.....	67
DIAGRAMA DE BLOQUE DEL PROYECTO: CAPÍTULO 3 .....	69
6.6. Cobertura .....	70
6.6. Medición de la Diferencia Interaural de Intensidad y Tiempo.....	71
6.7. Protocolo de medición de las pruebas subjetivas de la percepción sonora del prototipo.....	73
6.7.1. Evaluación de la cobertura del área de audiencia.....	73
6.7.2. Test de localización sonora por grados .....	74
6.7.3. Test de ubicación sonora en diferentes distancias.....	76
6.7.4. Test de distintas configuraciones de atenuaciones y retardos.....	80
6.8. Adquisición de datos de la medición objetiva de la Diferencia Interaural de Tiempo e Intensidad .....	83
6.8.1. Diferencia Interaural de Tiempo.....	83
6.8.2. Diferencia Interaural de Nivel.....	84
DIAGRAMA DE BLOQUE DEL PROYECTO: CAPÍTULO 4 .....	86
7. Análisis teóricos y estadísticos.....	88
7.1. Evaluación de la cobertura del área de audiencia (objetivo 1) .....	88
7.2. Respuesta en Frecuencia (objetivo 3).....	93
7.2.1 Respuesta en Frecuencia de cada caja individual .....	93



7.2.3. Respuesta en Frecuencia del arreglo lineal .....	94
7.3. Cobertura (objetivo 3).....	96
7.4. Diferencia Interaural de Tiempo e Intensidad (objetivo 3) .....	98
7.4.1. Diferencia Interaural de Tiempo.....	98
7.4.2. Diferencia Interaural de Intensidad.....	100
7.5. Potencia acústica (objetivo 3).....	105
7.6 Encuestas subjetivas sobre la percepción sonora del prototipo (objetivo 4) ...	107
7.6.1 Test de localización sonora en diferentes distancias .....	107
7.6.1.1. Profundidad (Eje y) .....	107
7.6.1.2. Desplazamiento horizontal (Eje x) .....	111
7.6.3. Test de localización sonora por grados .....	114
7.6.3.1. Análisis a 90 grados (Ubicación de la cabeza del oyente) .....	116
7.6.3.2. Análisis a 0 grados (ubicación de la cabeza del oyente) .....	121
7.6.4. Test de distintas configuraciones de atenuaciones y retardos.....	126
8. CONCLUSIONES .....	130
9. RECOMENDACIONES.....	133
10. BIBLIOGRAFÍA.....	134
12. ANEXO A .....	138
13. ANEXO B .....	146

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1:Imagen phantom: a) Centrada, b) Ubicada hacia la derecha	14
Figura 2:Esquema del sistema cuorafónico	16
Figura 3:Esquema del sistema 5.1	17
Figura 4:Diagrama del sistema 7.1	17
Figura 5:Diagrama del sistema 10.2	18
Figura 6:Esquema de un sistema Ambisónico	19
Figura 7:Esquema de un método VBAP	19
Figura 8:Esquema de un sistema ambiofónico	20
Figura 9:Esquema de la técnica Wave Field Synthesis	21
Figura 10:Plano espacial del oyente con respecto a la posición de la fuente	32
Figura 11:Diferencia Interaural de Nivel	35
Figura 12:Diferencia ITD. El sonido de la fuente sonora A llega al mismo tiempo a ambos oídos	36
Figura 13:Principio de Wave Field Synthesis.	38

Figura 14:Cortina Acústica, representación de la escena registrada por micrófonos, y a la vez reproducidos por altavoces	39
Figura 15:Geometría utilizada en los fundamentos físicos de la WFS	40
Figura 16:Esquema de la teoría de Wave Field Synthesis	41
Figura 17:Geometría utilizada para el dominio de derivación al momento de la región no-aliasing de las fuentes focalizadas.	44
Figura 18: Recomendación dada por el software para las dimensiones de la caja.	59
Figura 19: Grados utilizados en la medición del arreglo WFS	98

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1:Parámetros Thiele-Small	56
Tabla 2:Coordenadas de la medición del ITD e ILD	72
Tabla 3:Pajarito solo	76
Tabla 4:Pajarito con cascada ( $x=90$ , $z=200$ )	76
Tabla 5:Pajarito con ruido blanco ( $x=90$ , $z=200$ )	76
Tabla 6: Configuración A	81
Tabla 7:Configuración B	81
Tabla 8: Configuración C	82
Tabla 9:Coordenadas del test de área de audiencia	88
Tabla 10:Fuente virtual 1	88
Tabla 11: Fuente virtual 2	89
Tabla 12:Fuente virtual 3	90
Tabla 13: Fuente virtual 4	91
Tabla 14: Ángulo de cobertura para las frecuencias del arreglo lineal.	96
Tabla 15: Resultados de la medición del punto 1	99
Tabla 16: Resultados de la medición del punto 2	99
Tabla 17: Resultados de la medición del punto 3	99
Tabla 18: Resultados de la medición del punto 4	100
Tabla 19: Resultados de la medición del punto 5	100
Tabla 20:Cálculos de rendimiento y potencia acústica con base en a las mediciones de la sensibilidad	105
Tabla 21:Porcentajes de la eficiencia de un altavoz y su sensibilidad en su relación.	106
Tabla 22:Rango de ubicación de las fuentes virtuales	107
Tabla 23: Valores de localización de profundidad para la fuente "Pajarito"	107
Tabla 24: Valores de localización de profundidad para la fuente "Pajarito con cascada"	108
Tabla 25: Valores de localización de profundidad para la fuente "Pajarito con ruido blanco"	109
Tabla 26:Rango de ubicación de las fuentes virtuales en el eje x	111
Tabla 27: Valores de localización de desplazamiento horizontal para la fuente "Pajarito"	111
Tabla 28: Valores de localización de desplazamiento horizontal para la fuente "Pajarito con cascada"	112
Tabla 29: Valores de localización de desplazamiento horizontal para la fuente "Pajarito con ruido blanco"	113
Tabla 30:Posición de la fuente virtual: Izquierda	117
Tabla 31:Posición de la fuente virtual en el centro	118

Tabla 32: Posición de la fuente virtual en la posición derecha del arreglo	118
Tabla 33: Posición de la fuente virtual en el centro al fondo	119
Tabla 34: Posición de la fuente virtual en el extremo izquierdo del arreglo	120
Tabla 35: Posición de la fuente virtual en la izquierda	121
Tabla 36: Posición de la fuente virtual en el centro	122
Tabla 37: Posición de la fuente virtual en la derecha del arreglo	123
Tabla 38: Posición de la fuente virtual en el extremo izquierdo	124
Tabla 39: Posición de la fuente virtual en el centro al fondo del arreglo	125
Tabla 40: Promedios finales de las pruebas	129

## LISTA DE GRAFICAS

Grafica 1: Respuesta en frecuencia del altavoz con caja y sin caja	57
Grafica 2: Predicción de la respuesta en frecuencia de las cajas acústicas	59
Gráfica 3: Promedio de la señal de barrido logartímico senoidal (Log Sine Sweep)	86
Grafica 4: Resultados de la fuente virtual 1	89
Grafica 5: Resultados de la fuente virtual 2	90
Gráfica 6: Resultados de la fuente virtual 3	91
Grafica 7: Resultados de la fuente virtual 4	92
Gráfica 8: Respuesta en frecuencia de las 6 cajas	93
Gráfica 9: Respuesta en Frecuencia en 1/3 banda de octava del arreglo lineal de las cajas acústicas visualización desde 80 Hz a 16 kHz	94
Gráfica 10: Respuesta en Frecuencia en 1/3 banda de octava del arreglo lineal de cajas acústicas mostrada desde 80 Hz a 4 kHz	95
Gráfica 11: Respuesta en frecuencia en 1/3 banda de octava del arreglo lineal de cajas acústicas mostrada en Smaart Live.	95
Gráfica 12: Patrón polar del arreglo lineal de 6 altavoces	97
Grafica 13: ILD para la primera posición de fuente virtual	101
Gráfica 14: ILD para la segunda posición de fuente virtual	102
Gráfica 15: ILD para la tercera posición de fuente virtual	103
Gráfica 16: ILD para la cuarta posición de fuente virtual	104
Gráfica 17: ILD para la quinta posición de fuente virtual	105
Gráfica 18: Resultados de localización de profundidad para la fuente "Pajarito"	108
Gráfica 19: Resultados de localización de profundidad para la fuente "Pajarito con cascada"	109
Gráfica 20: Resultados de localización de profundidad para la fuente "Pajarito con ruido blanco"	110
Gráfica 21: Resultados de localización de desplazamiento horizontal para la fuente "Pajarito"	112
Gráfica 22: Resultados de localización de desplazamiento horizontal para la fuente "Pajarito con cascada"	113
Gráfica 23: Resultados de localización de desplazamiento horizontal para la fuente "Pajarito con ruido blanco"	114
Gráfica 24: Promedios de las fuentes virtuales en la posición Izquierda del arreglo	116
Gráfica 25: Promedios de las fuentes virtuales en la posición central del arreglo	117
Gráfica 26: Promedios de las fuentes virtuales en la posición derecha del arreglo	118

<b>Gráfica 27:Promedios de las fuentes virtuales en la posición centro al fondo del arreglo</b>	<b>119</b>
<b>Gráfica 28:Promedios de las fuentes virtuales en la posición extremo izquierdo del arreglo</b>	<b>120</b>
<b>Gráfica 29:Promedios de las fuentes virtuales en la posición Izquierda del arreglo</b>	<b>121</b>
<b>Gráfica 30:Promedios de las fuentes virtuales en la posición central del arreglo</b>	<b>122</b>
<b>Gráfica 31:Promedios de las fuentes virtuales en la posición derecha del arreglo</b>	<b>123</b>
<b>Gráfica 32:Promedios de las fuentes virtuales en la posición extremo izquierdo del arreglo</b>	<b>124</b>
<b>Gráfica 33:Promedios de las fuentes virtuales en la posición centro al fondo del arreglo</b>	<b>125</b>
<b>Gráfica 34:Comparación de las configuraciones A-B, diagrama circular</b>	<b>126</b>
<b>Gráfica 35:Comparación de las configuraciones A-B, diagrama de barras</b>	<b>126</b>
<b>Gráfica 36:Comparación de las configuraciones B-C, diagrama circular</b>	<b>127</b>
<b>Gráfica 37:Comparación de las configuraciones B-C, diagrama de barras</b>	<b>127</b>
<b>Gráfica 38:Comparación de las configuraciones A-C, diagrama circular</b>	<b>128</b>
<b>Gráfica 39:Comparación de las configuraciones A-C, diagrama de barras</b>	<b>128</b>

## **INTRODUCCIÓN**

De acuerdo con Pueo, “los sistemas de reproducción de sonido espacial, han evolucionado desde el primer sistema estereofónico en 1960”<sup>1</sup>. El plano de la zona de escucha para estos sistemas es limitado, ya que el punto “sweet spot” se da cuando se ajustan las perillas del balance de los diferentes canales de altavoces para que al incorporarse se produzca la direccionalidad deseada en los oídos del oyente. Consecuentemente, esta cualidad de reproducción está asegurada solamente en la posición adecuada.

Para la reproducción espacial con auriculares (audífonos), el modelo esférico, es decir la combinación entre la Diferencia Interaural de tiempo o ITD (del inglés, Interaural Time Difference), y la Diferencia Interaural de Nivel o ILD (del inglés, Interaural Level Difference) permiten reconstruir un sonido espacial adecuado. Sin embargo, un método más exacto, consiste en la caracterización de los filtros de transferencia de la cabeza (HRTFs), los cuales llevan la información del camino de propagación sonora que va desde la fuente hasta los oídos.

---

<sup>1</sup> Pueo Ortega., B Analysis and Enhancement of Multiactuator Panels for WFS Reproduction.Citado por Ezequiel Gutiérrez H. Programa para reproducción de sonido multicanal en tiempo real y síntesis de frentes de onda (WFS). *Universidad Nacional Autónoma de México. p.10*

Por esta razón, los diseñadores de dispositivos de audio han tenido la necesidad de dar mayor sensación de espacialidad para brindar una mejor experiencia al usuario. Estos sistemas están pensados para la aplicación en la industria de video juegos, cine y televisión, banda sonora, entre otros. Debido a esta necesidad se han empezado a desarrollar nuevas técnicas en las cuales esta característica de espacialidad sonora proceso mediante el cual un sonido es manipulado para generar en el oyente la sensación de estar moviéndose en un espacio real o virtual.

Estas nuevas técnicas se basan en el mismo principio físico de las investigaciones desarrolladas para ampliar la zona de escucha, como lo son: El paneo o estéreo y las de tipo envolvente (Surround) o estándar 5.1, Ambisonics, y VBAP (Vector Based Amplitude Panning) entre otras.

Otra técnica en la que la sensación de espacialidad es completa es la del sistema binaural, pero la implementación es muy poco viable debido a que esta funciona únicamente usando audífonos, o en situaciones en donde el medio no afecte la señal de audio, aspecto que no se ha podido resolver aún.

Debido a que estos sistemas tienen deficiencias, las nuevas investigaciones en este campo no se han detenido, impulsadas por la demanda de mejora en la calidad de la imagen sonora en el oyente. Un ejemplo de estas nuevas investigaciones es la técnica de Wave Field Synthesis, la cual fue inventada por la Universidad Instituto Delft (Holanda), y desarrollada por Fraunhofer IDMT. Se ha continuado el desarrollo en la última década por la comunidad científica, con mayor interés el científico Vorländer desde el año 2008.

Como el autor Vorländer afirma, “el método WFS es más preciso para la reproducción de campo de sonido, siendo una aproximación del campo de sonido espacial, que permite ampliar el sweet spot”<sup>2</sup>

La descomposición de onda se logra mediante el análisis de las señales en un conjunto de micrófonos. De acuerdo con el principio de Huygens, los puntos en los que las presiones sonoras se registraron a las posiciones de los micrófonos pueden ser interpretados como fuentes primarias. En el campo de ondas se reconstruye mediante el envío de ondas a partir de estos puntos. Esto ilustra la etapa de análisis de campo de ondas de síntesis

---

<sup>2</sup> Vorländer, Michael. Virtual Acoustic: Opportunities and limits of spatial sound reproduction for audiology. Investigation of Technical Acoustics, RTWH Aachen University, 2008. P.414.

# 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

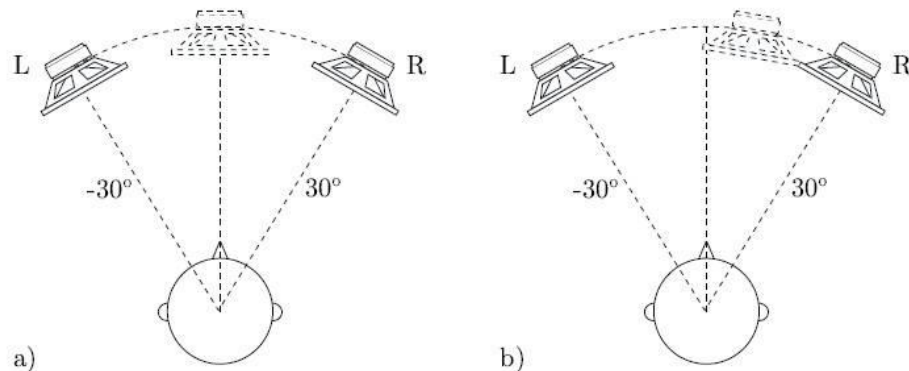
## 1.1. Estado del arte

### 1.1.1. Sistemas de reproducción de audio con altoparlantes

En los sistemas de reproducción de audio con altoparlantes que están implementados actualmente, se tiene una fácil interpretación de la posición de la fuente, aunque dicha interpretación depende directamente de la posición del oyente, lo cual genera sólo un pequeño campo de escucha correcta al que se le conoce como 'sweet spot'. Es por esto que los oyentes que estén fuera de este campo no podrán interpretar correctamente la ubicación de la fuente virtual. Estos sistemas son:

**Sistema estéreo:** La técnica estéreo está basada en el efecto phantom, el cual establece que el cerebro interpreta la diferencia interaural de tiempo (ITD, Interaural Time Difference) y la diferencia interaural de nivel (ILD, Interaural Level Difference), las cuales proporcionan información para localizar una determinada fuente sonora en el plano horizontal.

**Figura 1:** Imagen phantom: a) Centrada, b) Ubicada hacia la derecha



Tomado de: Pérez, S. (2009). Contribución a la implementación de sistemas de Wave Field Synthesis. p.15. Recuperado de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/6685/tesisUPV3145.pdf>.

a) Los dos altavoces tienen el mismo nivel y la misma fase, por lo cual el oyente tendrá la percepción de tener una fuente en el centro, fuente que no existe físicamente.

b) Se tiene que el altavoz de la derecha tiene mayor nivel, aunque tienen la misma fase, el cerebro interpreta que la fuente está un poco a la derecha. Como se puede observar el efecto sólo se da en estas ubicaciones, pues si el oyente se mueve o los altavoces cambian de posición este efecto se verá anulado.

**Cuadrafonía:** Es un sistema capaz de reproducir cuatro señales de audio (Left Front (LF), Right Front (RF), Left Back (LB) y Right Back (RB)) ubicados a 90° y en cada esquina de la sala de escucha. Dichas señales son independientes unas de las otras (para cada canal).

“En la matriz SQ, las señales codificadas se llaman total izquierdo (Lt) y total derecho (Rt). Matemáticamente se expresan de la siguiente manera<sup>3</sup>:

$$\begin{aligned}L_t &= L_f + 0.7R_b - j0.7L_b \\R_t &= R_f - 0.7L_b + j0.7R_b\end{aligned}$$

"j" significa que la señal ha sido desfasada en 90 grados.

Al pasar este par de señales por un decodificador SQ, se obtendrán cuatro señales que se aproximan a las entradas originales:

$$\begin{aligned}L_f' &= L_f + 0.7R_b - j0.7L_b \\R_f' &= R_f - 0.7L_b + j0.7R_b \\L_b' &= L_b - 0.7R_f + j0.7L_f \\R_b' &= R_b + 0.7L_f - j0.7R_f\end{aligned}$$

Lf se refiere a la señal original antes de la codificación, Lf 'se refiere a la misma señal después de la decodificación”.

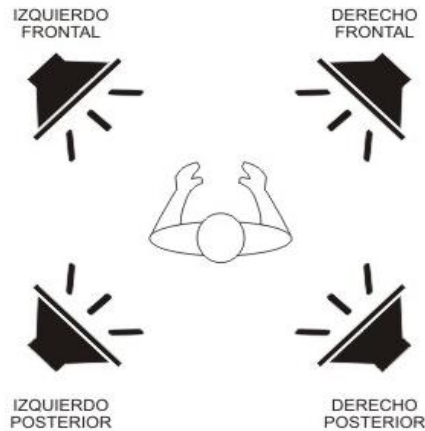
Un sistema cuadrafónico posee cuatro canales para reproducir el sonido. Al tener esta configuración de altavoces, se produce la sensación de un sonido de 360°.

La cuadrafonía fue el primer sistema de sonido envolvente y el predecesor de la técnica Dolby Surround. El sistema cuadrafónico tenía el siguiente esquema:

---

<sup>3</sup> <http://www.4channelsound.com/encode.htm>

**Figura 2:**Esquema del sistema cuadrafónico



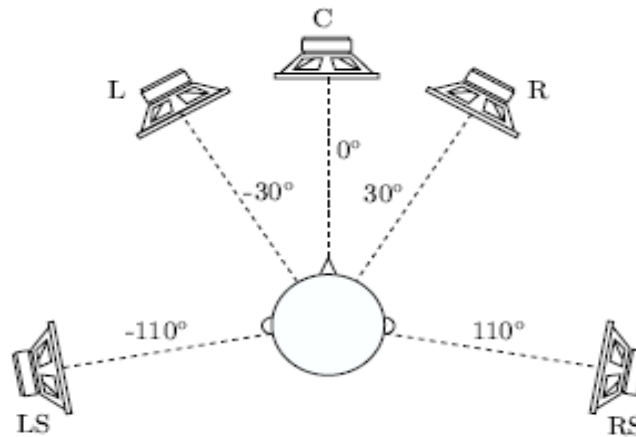
Tomado de: <http://musitronic.blogspot.com.co/2009/07/sonido-cuadrafonico.html>

Este formato tuvo vigencia entre los años 1969 y 1980, y su período de vida comercial fue corta ya que tenía problemas de incompatibilidades con otros sistemas, además los formatos de audio cuadrafónico eran más caros de producir que los de un sistema estéreo.

**Sistema envolvente 5.1:** La técnica 5.1 se basa en el efecto phantom utilizado en el sistema estéreo, con la diferencia que se agregan más altavoces para expandir el ángulo de escucha, para pasar de 60° a 360°. Debido a que este sistema está basado en la misma teoría, 'El efecto phantom', se tiene la misma limitación en cuanto a la posición del oyente. Esta pequeña área de audiencia en donde se escucha correctamente es conocida como 'sweet spot'.

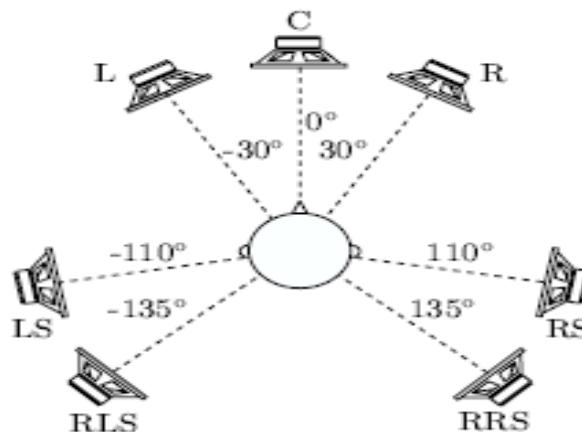


**Figura 3:**Esquema del sistema 5.1



**Sistema 7.1:** Al sistema anteriormente mencionado, se le han ido sumando canales para mejorar la sensación que tiene el oyente al escuchar dichos sistemas, es decir la de sentirse inmerso en el mismo. La mejora que presenta el sistema frente al anterior es que tienen una resolución mejor en la recreación de fuentes sonoras traseras, sin embargo, el “sweet spot” sigue siendo un margen muy cerrado de escucha en cuanto al arco que se tiene debido a los canales L y R.

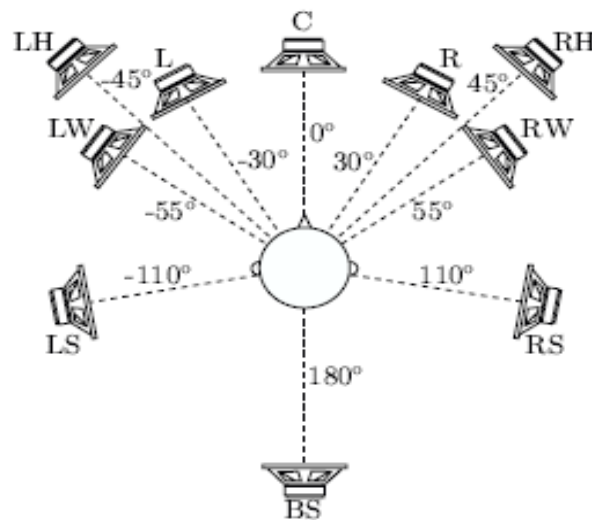
**Figura 4:**Diagrama del sistema 7.1



**Sistema 10.2:** Dicho sistema ha surgido para tratar de mejorar la percepción sonora al igual que los sistemas anteriores. “Los canales añadidos son LW, RW, BS, LH, RH más un canal LFE adicional y su distribución está centrada principalmente en la

parte delantera de la escena al contrario que en los sistemas 6.1 y 7.1 en los que únicamente se añaden canales en la parte trasera”<sup>4</sup>. Los canales LW y RW permiten una resolución mayor a la hora de localizar fuentes sonoras delanteras, además se utilizan para introducir reflexiones laterales lo cual hace que la sensación de espacialidad se incremente. Al añadir el canal trasero BS como en el sistema 7.1, se busca que la localización de fuentes sea mejor en la parte trasera, mientras que LH y RH son elevados 45°, lo cual permite que este efecto se perciba en la parte delantera de la escena.

**Figura 5:**Diagrama del sistema 10.2

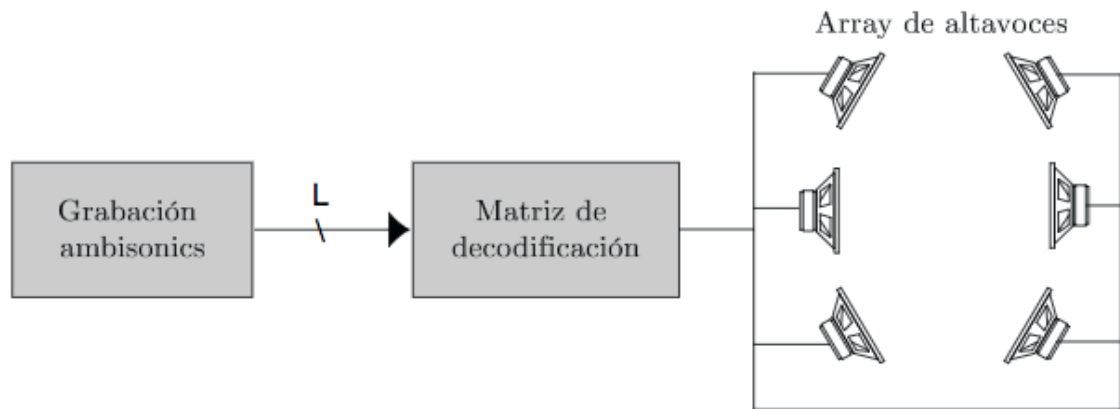


**Ambisonics:** Es una técnica de reproducción de sonido la cual se basa en las técnicas de grabación de microfónica para reconstruir el campo sonoro. Para registrar una escena sonora tridimensional emplea cuatro micrófonos, uno omnidireccional y tres bidireccionales, el primero registra la presión y los otros tres el gradiente de presión en cada eje (X, Y, Z). Al almacenar estos cuatro valores, cada uno en una pista, se obtiene el formato Ambisonics de primer orden, comúnmente denominado Ambisonics B o B-format. Al contrario de los sistemas basados en el estéreo, la reproducción no es asignación canal-altavoz. En este caso el equipo reproductor debe conocer la posición de los altavoces y determinar qué debe reproducir cada uno de ellos para que, en el punto donde se encuentra el

<sup>4</sup> Pérez, S. (2009). Contribución a la implementación de sistemas de Wave Field Synthesis. Recuperado de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/6685/tesisUPV3145.pdf>.

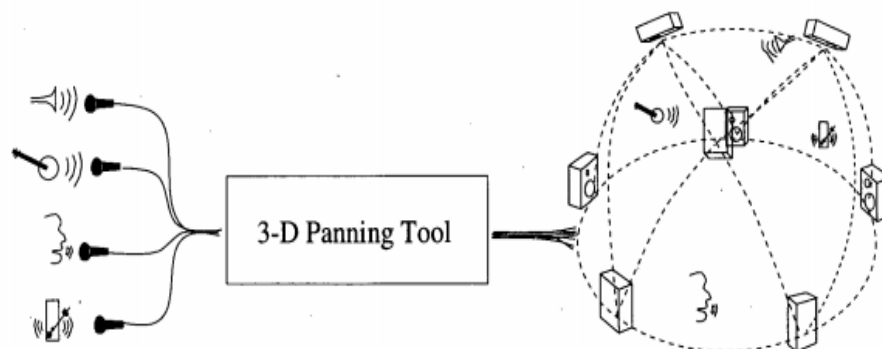
oyente, la presión y los tres gradientes de velocidad coincidan con los registrados, esto es, el equipo reproductor necesita decodificar la señal codificada con Ambisonics al reproducir la escena. Sin embargo, el mayor inconveniente de Ambisonics es que necesita un arreglo de altavoces regular.

**Figura 6:** Esquema de un sistema Ambisónico



**Vector Base Amplitude Panning (VBAP):** Es un método que consiste en el posicionamiento de fuentes virtuales en direcciones arbitrarias a partir de una configuración de múltiples altavoces. En este método, el número de altavoces puede variar, y pueden colocarse en configuraciones de 2D y 3D. Con la técnica VBAP es posible la recreación de fuentes virtuales, con un grado de especialización satisfactorio.

**Figura 7:** Esquema de un método VBAP

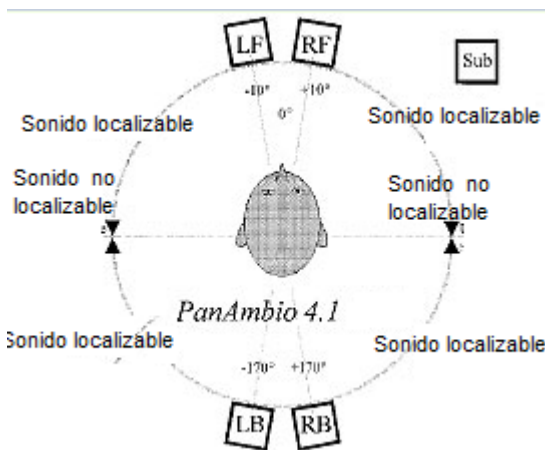


*Figura. Esquema de VBAP aplicado para 3D.*

Tomado de <http://lib.tkk.fi/Diss/2001/isbn9512255324/article1.pdf>

**Ambiofonía:** Es un método que utiliza procesamiento digital de señales (DSP) y dos altavoces directamente en frente del oyente con el fin de mejorar la reproducción de sonido estereofónico y el sistema 5.1. La característica principal de este método, es que elimina la comunicación cruzada (las señales provenientes de cualquier altavoz alcanzan no solo el oído involucrado, sino también el oído opuesto, lo cual hace que se produzca una distorsión en el timbre de las voces centrales y crea reflexiones tempranas falsas debido al retraso del sonido que alcanza el oído opuesto). Al usar la Ambiofonía, las imágenes auditivas pueden extenderse, completamente hacia los lados,  $\pm 90^\circ$  a la izquierda y a la derecha, dependiendo de la acústica y del grado en que la grabación haya capturado las diferencias interaurales de nivel (ILD) y las diferencias interaurales de tiempo (ITD).

**Figura 8:** Esquema de un sistema ambiofónico



Tomado de: [http://www.ambiophonics.org/Tutorials/OneKey\\_1.html](http://www.ambiophonics.org/Tutorials/OneKey_1.html)

**Wave Field Synthesis:** Es una técnica relativamente nueva que fue introducida por primera vez en los años cincuenta, debido a limitaciones tecnológicas sólo se implementó teóricamente. Una de estas limitaciones es el funcionamiento de los altavoces de la época, en donde su tamaño era mucho mayor que los actuales haciendo que su separación entre si fuese más de la deseada y su respuesta en frecuencia era mucho más limitada. En la última década esta técnica fue retomada debido a que esas limitaciones tecnológicas fueron superadas, limitaciones como lograr sistemas de altavoces con respuesta en frecuencia plana, o altavoces físicamente más viables para la instalación, además del procesamiento digital de señales que se han visto mejorados en gran medida. Esta técnica está basada en

el principio de Huygens, el cual consiste en la reconstrucción de un frente de onda por medio de infinitas fuentes puntuales, por lo que se implementa un arreglo de altavoces con la mayor cantidad de altavoces posibles para una mayor aproximación al frente de onda que se quiere reconstruir. A diferencia de los sistemas que funcionan bajo el efecto phantom, esta técnica da la libertad al oyente para situarse en diferentes puntos de la sala sin perder la capacidad de poder reconocer correctamente la posición de la fuente virtual, fuente que es simulada por medio del arreglo de altavoces.

**Figura 9:** Esquema de la técnica Wave Field Synthesis

*Las fuentes virtuales se colocan en el espacio, haciendo que todos los oyentes las perciban con fidelidad espacial.<sup>5</sup>*

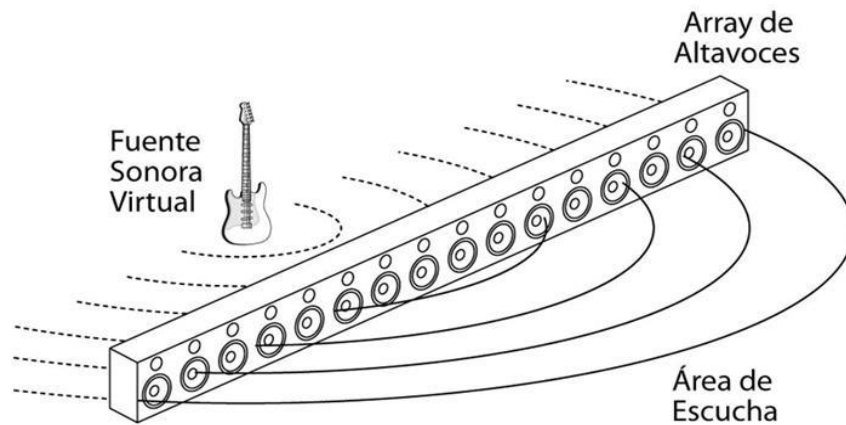


Imagen tomada de "<http://www.juanrivassonido.com/sistemas-y-entornos-sonoros/>"

---

<sup>5</sup> Maximo-Cobos, & Jose J.López. (2007). *Técnicas de separación de fuentes sonoras aplicadas a la resíntesis de escenas acústicas 3D*

### 1.1.2. Sistemas de reproducción de audio con audífonos

**Sistemas binaurales:** Los sistemas binaurales reconstruyen las señales que llegan a los oídos del oyente, señales provenientes de una escena sonora. Este sistema es capaz de proporcionar los valores de ILD e ITD. El uso de dichos valores no permitía localizar una fuente sonora en elevación, por lo tanto, se implementó la función de transferencia relativa a la cabeza “Head Related Transfer Function, HRTF”. La HRTF tiene en cuenta los siguientes aspectos: “Las funciones de transferencia HRTF (Head Related Transfer Function) matemáticamente describen el efecto combinado del oído, cabeza y torso sobre los sonidos procedentes de una determinada posición. Las HRTF captan todas las señales físicas ayudando a la localización de la fuente y son diferentes para cada persona, tomando en cuenta las medidas de pabellón auditivo, cabeza y torso, ya que no todos tenemos las medidas”<sup>6</sup>. Para captar dichas funciones de transferencia (HRTF) se utiliza una cabeza binaural construida con materiales de propiedades similares a una cabeza humana real, se posicionan dos micrófonos en los oídos de la cabeza, de esta manera la captura de los micrófonos es tal cual la señal que llegaría al oído humano real. Se tiene que esta técnica funciona muy bien con respecto a la sensación del oyente y no depende de suposición en lo absoluto. Solo tiene una limitación, en donde no se han encontrado soluciones viables. Esta técnica solo funciona eficientemente cuando se utiliza a través de audífonos, pues si esta señal se reproduce en una sala o espacio, esta se verá modificada por el entorno, aun si se supone que esta sala no tiene ningún tipo de reflexión.

### 1.1.3. Investigaciones realizadas implementando la Wave Field Synthesis

El presente estado del arte, busca investigar hasta donde han llegado las investigaciones previas en cuanto a los temas centrales de dicha técnica; que se constituyen en un punto de partida para que este estudio realice un avance más en la construcción del conocimiento frente al uso de la técnica de Wave Field Synthesis. A continuación, se describen cronológicamente las investigaciones que han indagado sobre dicha técnica.

La primera, es una investigación titulada “*Especialización sonora con Wave Field Synthesis y Vector Base Amplitude Panning, estudio comparativo*”, publicado por La Universidad Politécnica de Valencia en febrero de 2013. Pablo Gutiérrez Parara realiza un estudio, mediante un test que compara la capacidad de reproducción de

---

<sup>6</sup> Armenta Flores (2011). *Diseño y construcción de una cabeza binaural. Tesis doctoral. Escuela superior de Ingeniería mecánica y eléctrica.*

la distancia sonora de los sistemas WFS y VBAP; en la prueba se evalúan ciertos parámetros (distancias, tipo de sonido, ángulo de escucha y reverberación) para finalmente estudiar diferencias en la reproducción de distancia de los dos sistemas, a partir de esto, pudo determinar que el tipo de sonido es determinante en la percepción de la distancia, y se obtuvieron mejores resultados cuando los sonidos son impulsivos. Además, la técnica de WFS es capaz de reproducir mejor que VBAP la distancia sonora para otro tipo de sonidos que no sean impulsivos.

La segunda investigación, “*Wave Field Synthesis in three dimensions by multiple line arrays*”, publicada por la Universidad de Miami en mayo del 2011 fue realizada por Matthew N. Montag. En dicho proyecto se construyó un arreglo lineal de bajo costo y creó un código abierto que permite la ubicación de fuentes virtuales en el área de audiencia real. Con dicho trabajo, se pudo validar el método propuesto (síntesis sonora en tres dimensiones por múltiples arreglos lineales), lo cual se comprobó mediante varias pruebas de audición en las cuales los oyentes no se equivocaron al focalizar las fuentes virtuales.

La tercera investigación, “*El sonido envolvente en entornos audiovisuales inmersivos*”, publicado en abril de 2011, se incluyó sonido envolvente en la etapa de educación superior. Se sugirió la implementación de un tipo de instalación de inmersión aumentada a modo de laboratorio sensorial en la Universidad de Alicante, esta consistiría en un sistema de vídeo estereoscópico por polarización de la imagen mediante un proyector al efecto y un sistema de Wave Field Synthesis que envuelva al alumnado. Esta propuesta está en proceso, ya que es complicado proponer acciones genéricas por la espacialidad de los estudios que ofrece la Universidad.

La cuarta investigación “*Programa para reproducción de sonido 3D junto a imagen en un sistema de realidad virtual*”, es un proyecto que se llevó a cabo en la Universidad Autónoma de México por Hugo Ezequiel Gutiérrez en el 2010.

Este proyecto da a conocer el desarrollo de programas computacionales que han sido enfocados en la reproducción de sonido multicanal en tiempo real y a la implementación de la técnica Wave Field Synthesis. Dichos programas utilizan señales en vivo o grabadas, las cuales son enviadas a un arreglo lineal de ocho altavoces después de pasar por un procesamiento digital de señales. En dicha tesis se logra reproducir señales secuencialmente en los ocho altavoces del arreglo, la señal se puede emitir con un determinado ángulo respecto a la normal del arreglo. Además, al utilizar señales estereofónicas, permiten expandir el área de escucha, en comparación al sistema de dos canales, por lo tanto, la escucha de las fuentes

no depende de la posición del oyente. El sistema se puede emplear para reproducciones de mezclas estereofónicas de audio de alta calidad utilizadas para aplicaciones multimedia o en producciones musicales que requieran una amplia zona de escucha.

La quinta investigación se llevó a cabo en el 2009, por la empresa alemana Losono (pionera de los sistemas de la WFS comerciales), la cual instaló durante varios meses uno de sus sistemas en el club de techno berlinés Tresor. Para el sistema de Wave Field Synthesis se dividieron las señales en múltiples grupos de sonidos, para así procesarlos de forma individual. Robert Henke fue invitado para preparar un concierto aplicando dicha técnica, y según la opinión de las personas que asistieron al evento la técnica permite que los oyentes perciban efectos como escuchar fuentes detrás de su cabeza.

La sexta investigación, denominada “*Contribuciones a la implementación de sistemas de Wave Field Synthesis*”, publicada por la Universidad de Valencia en septiembre de 2009, realizó un estudio sobre la implementación de dicha técnica a partir de un completo sistema (software, arreglo y codificación de las señales). Con dicho estudio se pudo llegar a algunas de las siguientes conclusiones:

Se propuso una técnica que permite determinar de manera sencilla los altavoces que deben ser activados para simular una fuente sonora. Además, se realizó la comparación con otra técnica existente y se comprobó que evita la radiación en sentido contrario al avance del frente de onda.

Se propuso una técnica de mejora de la síntesis del campo sonoro en alta frecuencia. La técnica propuesta no permite reducir el aliasing espacial del campo sintético generado por WFS, pero si busca es sustituir esta parte del espectro por otra que no sufra de los efectos del aliasing. Como resultado final, lograron implementar un motor de renderizado de WFS en tiempo real con un único ordenador personal.

La séptima investigación, se llevó a cabo en julio de 2008 en Berlín. Se realizó la primera transmisión de la WFS en la catedral de Colonia en la sala de conferencias 104 de la Universidad técnica de Berlín, recreando un recital de órgano. La sala contiene el sistema de altavoces más grande con 2.700 altavoces de 832 canales independientes.

La octava investigación, es un proyecto titulado “*CARROUSO (Creating, assessing and rendering in real time of high quality audiovisual environment in MPEG-4*



*context*)”, llevado a cabo entre enero de 2001 y junio de 2003, por 10 miembros europeos de la industria, institutos de investigación y Universidades. El objetivo principal del proyecto es proporcionar una nueva tecnología que permite la transferencia de un campo de sonido, generado en un espacio real o virtual, a otro espacio en combinación con los datos visuales. Este se basa en la combinación de dos tecnologías innovadoras: La primera es el formato MPEG - 4, el cual ofrece codificación y métodos para la descripción de la escena de los entornos de audio 3D orientado a objetos. La segunda se basa en la técnica Wave Field Synthesis. Para cumplir con el objetivo de dicho proyecto fue necesario la grabación de sonidos secos provenientes de varias fuentes, un conjunto de micrófonos en combinación con sistemas de cámaras, las cuales se utilizan para capturar y determinar las posiciones de las fuentes de señal. Además de la grabación de las fuentes de sonido, los parámetros de las habitaciones se extrajeron de habitaciones mediante la grabación de las respuestas al impulso. Luego, estos datos obtenidos por el sistema de grabación son codificados, multiplexados y adaptados para la transmisión en formato MPEG- 4. Por último, la generación de un campo de sonido 3D se basa en el concepto de Wave Field Synthesis, que trabaja con generación de frentes de ondas utilizando conjuntos de altavoces. Esta técnica permite una representación exacta de la onda - campo original con sus propiedades temporales y espaciales naturales en todo el espacio de escucha.

La novena investigación, “*Integración de Sonido 3D junto a Imagen 3D en un sistema de realidad virtual*”, es un proyecto interno financiado por la Universidad de Valencia en 2002, luego financiado por la Generalitat Valenciana y finalmente por un proyecto del Plan Nacional de I+D. Este proyecto ha ido desarrollando un sistema completo de WFS con tecnología aportada por la Universidad. Para llegar a un sistema funcional, se construyó todo el software de procesamiento digital de señal que fuese capaz de gestionar la compleja maquinaria de cálculo y manejo de dispositivos que constituyen los sistemas de Wave Field Synthesis.

## **1.2. Descripción y formulación del problema**

La percepción auditiva espacial en el ser humano, determina como una persona usa la información auditiva para percibir características de las fuentes sonoras donde se registran variaciones de tono o altura de un sonido puede compararse con otros conocidos como alto o bajo, en intensidad se refiere a la distancia que se puede percibir un sonido, y el timbre es la cualidad mediante la cual se diferencian dos sonidos de igual frecuencia fundamental o (tono), intensidad, estas propiedades están presentes en el entorno: y permiten conocer qué evento está produciendo el

sonido, de dónde proviene, a que distancia y en qué dirección se encuentra la fuente que lo origina. En el cerebro se presenta una serie de procesos que ayudan a entender los eventos sonoros y diferenciarlos.

“Cuando se focaliza la fuente sonora, y es interpretada a través de diferencias temporales, es decir, que cuando llega el sonido por un oído (en sentido horizontal), el sonido primero estimulará -por lógica- al mismo oído derecho”<sup>7 8</sup>. Como dicen Material didáctico para estudiantes<sup>9</sup> Gómez Barquín<sup>10</sup> dicen, que se contempla como un “cruce” de información entre los dos tejidos de cada oído que se encuentran interconectados, esta información se puede interpretar como una tardanza, por otro lado, diferenciamos la intensidad del sonido, debido al cruce de información entre tejidos, diferenciando los niveles que llegan a ambos oídos. Esto es debido a que las neuronas encargadas, son sensibles a las diferencias interaurales, que después el colículo inferior traduce este mensaje como un mapeo auditivo: espacialidad auditiva, referido a la ubicación espacial.

Con los sistemas de reproducción que se manejan hoy en día, se intenta manipular características de las fuentes sonoras, de manera que se busca “engañar” al cerebro por medio de una fuente virtual y así dar la sensación de escuchar fuentes que físicamente no existen. Al referirnos a fuente virtual, se entiende como una fuente que no existe físicamente, pero que es reconstruida por medio de otras fuentes físicas que, si existen e interactúan entre sí, de este modo el cerebro interpreta que esta fuente virtual si existe.

### **Se tiene que:**

De acuerdo con lo anteriormente expuesto, llegamos a la siguiente pregunta problema:

---

<sup>7</sup> Material didáctico para estudiantes focalizado en Audiología Clínica. Vía Auditiva: Vía Aferente, 2014. Disponible de en: <http://audiologiaacademica.blogspot.com.co/2014/09/via-auditiva-via-aferente.html>

<sup>8</sup> Gómez Barquín., A. Sordera Centra., En: C.F.G.S Audiología protésica [en línea]. Disponible de en: <<http://eugdSPACE.eug.es/xmlui/bitstream/handle/123456789/210/Almudena%20G%C3%B3mez%20Barqu%C3%ADn.pdf?sequence=1>>.p. 5.

<sup>9</sup> Material didáctico para estudiantes focalizado en Audiología Clínica. Op. Cit.

<sup>10</sup> Gómez Barquín. Op. Cit.

¿Cómo mejorar la percepción sonora del oyente mediante la implementación de la técnica WFS en donde la sensación sonora del oyente no dependa de su posición en el área de audiencia

### **1.3. Justificación**

La percepción sonora del oyente es una característica importante a la hora de trabajar con sistemas de reproducción de sonido pues esto da al oyente una sensación de realismo. Una de las técnicas innovadoras que está relacionada a dicho término de espacialidad, es la Wave Field Synthesis (WFS), la cual proporciona una escena acústica a partir de señales que son enviadas por una fuente virtual, esto es una señal de audio, que a su vez va a ser reproducidas por medio de fuentes secundarias reales llamadas altavoces.

La técnica de WFS logra construir un campo sonoro en donde la fuente conserva su posición y el oyente puede situarse en cualquier espacio sobre el área de audiencia sin que la interpretación de la posición de la fuente cambie.

Teniendo en cuenta lo anterior, es preciso comprobar que tanto se modifica la percepción sonora con respecto del oyente y mediciones con equipos y/o estudiar la viabilidad de esta técnica, para una futura implementación y comercialización. Esto iniciaría una nueva era en el diseño de los dispositivos de reproducción sonora respecto a la espacialidad. Además, se establece un punto de partida para la implementación de sistemas en gran escala de tipo envolvente.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

Diseñar y construir un prototipo de sistema de reproducción sonora implementando el principio de Wave Field Synthesis que genere una misma sensación de espacialidad en los oyentes sin depender de la posición.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Implementar un arreglo de altavoces que abarque un área de audiencia de tres metros cuadrados (dieciocho personas aproximadamente), en donde la percepción de la fuente no dependa de la posición del oyente.

- Diseñar una aplicación informática en donde se tenga control de la fuente virtual ingresada por medio de una entrada mono y pueda ser ubicada en la escena acústica.
- Validar las características del sistema, ITD, ILD, respuesta en frecuencia, potencia acústica y cobertura.
- Realizar una encuesta en la cual las personas puedan dar una opinión subjetiva de la percepción sonora del prototipo.

### 3. DISEÑO METODOLÓGICO

#### 3.1. Enfoque de la investigación

El trabajo comienza con un estudio físico que permita asimilar los conceptos relacionados con el teorema de Huygens, aplicándose en la práctica la técnica de Wave Field Synthesis. Se pasará a un plano práctico comprobando por medio del desarrollo de un código, el cual contará con la funcionalidad de permitir manipular la fuente sonora virtual.

Se pretende sintetizar y reproducir sonido espacial con la técnica WFS, mediante un arreglo de altavoces para una audiencia, suprimiendo la zona preferente de escucha y permitiendo que el oyente pueda percibir la misma sensación sonora en cualquier punto. Los resultados obtenidos serán cuantitativos, validando las características ITD e ILD, respuesta en frecuencia, potencia acústica y cobertura, involucrando a diferentes personas para analizar las opiniones acerca de la percepción sonora. Esta es una primera aproximación de la implementación de WFS.

- ❖ **Fase de desarrollo inicial del proyecto** el objetivo es evaluar el estado de cada máquina adquirida, y prevenir inexactitud en las mediciones de cada objetivo de esta tesis.
- ❖ **Ejecución de la programación y construcción del prototipo** se muestra la explicación y el procedimiento del software de la WFS, aplicado en esta tesis, incluyendo el diseño de cada caja acústica.

- ❖ **Fase evaluación del estudio** se analizan los datos obtenidos de las mediciones de interés de esta investigación, agregando tablas y gráficas, y se reportan conclusiones.

## **3.2. Variables**

### **3.2.1 Variables Operacionales**

- Aporte energético de la sala medido en dB SPL.
- Cobertura sobre el área de audiencia medida en grados.

### **3.2.2. Variables Conceptuales**

- Rango en frecuencia de correcto funcionamiento.

## **3.3. Hipótesis**

- Es posible recrear una escena acústica en donde se pueda reconocer la posición de la fuente desde cualquier punto del área de audiencia, ampliando así el 'sweet spot'.

## **4. MARCO CONCEPTUAL**

### **4.1 Aspectos Teóricos**

#### **4.1.1 Percepción auditiva**

La percepción auditiva, es el resultado de la respuesta psicoacústica del sistema cognitivo humano a una serie de entradas de estímulos acústicos que llevan una información del ambiente, de los sucesos y acciones del ambiente y/o entorno. Si un sonido es más fuerte o más débil, si un sonido es agudo o grave, diferenciamos dos sonidos, que causen la misma sensación de intensidad y de altura tonal; lo que nos permite diferenciar los instrumentos musicales o el timbre característico de la voz de cada persona. El oído actúa como un codificador de los diferentes sonidos,

el cerebro, por su parte, analiza las señales codificadas para construir mentalmente la escena auditiva.

#### **4.1.2 Audición espacial**

En el ser humano, la audición se produce a través de dos canales independientes (los dos oídos). La información que el cerebro recibe de los dos oídos es diferente (salvo cuando están equidistantes de la fuente), estos están separados físicamente entre sí por un cuerpo opaco (la cabeza). Esta diferencia en la posición de los dos oídos es la que permite al cerebro la localización de la fuente sonora. Este recibe la información independientemente que luego el cerebro procesa comparando los impulsos nerviosos que produce cada sonido interpretando finalmente las características de las ondas sonoras. Este proceso demuestra cómo el ser humano escucha binauralmente.

Claudia A. & Oscar A. Ramos<sup>11</sup> describen que, en el sistema auditivo, la sensación tridimensional sonora está relacionada con la diferencia interaural de nivel (ILD) y la diferencia interaural de tiempo (ITD) que resulta de la información que recibe cada oído (fase de la señal). Es decir, la localización de los sonidos en el espacio se consigue con el procesamiento por separado de la información que recibe cada oreja, y consecuentemente la comparación de intensidad y fase entre ambas señales. Las estructuras de la oreja (pabellón auricular externo) forman filtros selectivos de dirección, dependiendo del origen del sonido. Todos estos factores, así como la reflexión, difracción hechas por el torso, los hombros y la cabeza, forman las funciones de transferencia del oído, características de ITD e ILD individuales, así como la HRTF, “Estas características se explicarán más adelante. Para resaltar estas características son únicas en cada persona ya que dependen de la forma de la pinna de cada uno, por lo tanto, la forma de percibir es el sonido es diferente y única de cada individuo”<sup>12</sup>.

---

<sup>11</sup> Claudia A. & Oscar A. Ramos. Audición Espacial En Ambientes Reverberantes”. Revista Interamericana de Psicología, 2003. pp. 373-382.

<sup>12</sup> Moncisbays Romero, Y. *Evolución Histórica y Nuevas Perspectivas con los pasajes Sonoros*. Licenciado en Diseño Gráfico. Universidad Nacional Autónoma, México, 2011.

## 5. MARCO TEÓRICO

### 5.1. Localización sonora

La localización del sonido se refiere a la habilidad que tiene el oyente de ubicar una fuente o evento sonoro en el espacio. “Está referida a la percepción de la posición de la fuente en el plano horizontal (azimut), sagital (elevación) y la percepción de su distancia relativa”<sup>13</sup>.

Masera, Morales & Moreno<sup>14</sup> aplican los estudios, realizados por Lord Rayleigh, en la teoría Dúplex, para determinar las características de la posición de la fuente sonora son: la diferencia interaural en el tiempo de llegada del sonido a los dos oídos, ITD (“Diferencia Interaural de Tiempo”), está también la Diferencia Interaural en el Nivel sonoro, ILD (“Diferencia Interaural de Nivel”), y se presenta el efecto de filtraje (depende de la posición de la fuente) que ocurre debido a la interacción del sonido con los pliegues del pabellón auricular, cabeza, torso y hombros, lo cual modifica el contenido espectral del sonido

La ITD e ILD determinan la posición en el plano horizontal y la información espectral contenida en el filtraje mencionado lo hace en el plano vertical. Específicamente la oreja, por poseer características morfológicas particulares para cada individuo, es una clave monoaural fundamental en la localización de fuentes sonoras ubicada en el plano medio sagital, que se extiende verticalmente a través de la mitad del cuerpo humano, dividiéndolo en dos segmentos iguales, el izquierdo y el derecho, en donde no existen diferencias binaurales.

Blauert afirma que “Los pliegues del pabellón reflejan algunos componentes en frecuencia y cuando la fuente cambia de posición con respecto a la cabeza, se producen cambios concomitantes en esas reflexiones, por ejemplo, se disminuye la intensidad de algunos componentes y se amplifican otras”<sup>15</sup>. En la figura 9 se muestra el sistema de coordenadas esféricas, por medio del cual podremos especificar los parámetros que tiene en cuenta el sujeto para ubicar una fuente de sonido.

---

<sup>13</sup> Blauert, J. Spatial Hearing: “*The Psychophysics of Human Sound Localization*”, Revised Edition. Cambridge, MA: The MIT Press, 1997, pp. 37-41.

<sup>14</sup> Nicolás A. Masera, Juan I. Morales & Ana M. Moreno. Claves Perceptuales sobre Direccionalidad y Espacialidad Del Sonido. Argentina: *Cátedra Fundamentos de Acústica y Electroacústica, Facultad Regional Córdoba*, 2011.

<sup>15</sup> Blauert., J. Ibid. pp. 50 – 60.

**Figura 10:** Plano espacial del oyente con respecto a la posición de la fuente

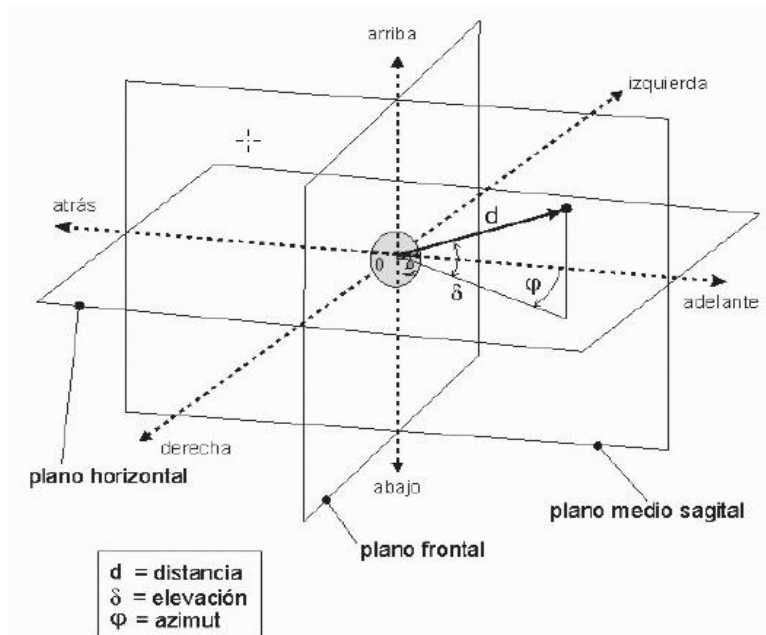


Fig.10. **a)** Distancia plano sagital (elevación), **b)** Plano horizontal (azimut).

Imagen tomada de: (Claudia A. & Oscar A. Ramos. "Audición Espacial En Ambientes Reverberantes". Revista Interamericana de Psicología, 2003, p.375).

La forma en la que percibimos los sonidos desde cualquier procedencia las podemos ubicar realizando ciertos movimientos de la cabeza hasta localizar su origen. Esto es debido a que tenemos un sistema activo (oídos), que se encargan de llevar esta traducción de señales, en impulso nervioso, que el cerebro capta y traduce el mensaje, de tal manera que respondemos moviendo la cabeza hasta ubicar su procedencia. Esta tesis está enfocada al plano horizontal y se utilizara un arreglo lineal para llevar a cabo las diferentes mediciones, para comprobar la teoría explicada en esta investigación.

## 5.2. Diferencias Interaurales ITD (Diferencia Interaural de Tiempo) e ILD (Diferencia Interaural de Nivel)



La diferencia interaural de nivel (ILD) es la diferencia de intensidad, en decibeles, que tiene la señal auditiva al llegar a cada oído cuanto esta proviene de una ubicación espacial con un azimut diferente de 0°. Esta diferencia de la intensidad recibida se produce principalmente por la absorción y reflexión (sombra acústica) que produce la cabeza sobre el sonido en su recorrido desde un oído al otro. La disminución en la intensidad producida por la sombra acústica de la cabeza del ángulo de incidencia con que este llegue al oyente. Cuando el sonido proviene desde el frente (azimut 0°), ambos oídos reciben la señal con la misma intensidad y la ILD es, por lo tanto, cero. A medida que la señal se desplaza hacia zonas con valores de azimut crecientes el valor ILD va aumentando gradualmente hasta alcanzar su valor máximo cuando el sonido llega con un ángulo de incidencia 90°. También ILD depende de la relación entre el tamaño de la cabeza y la longitud de onda de la señal<sup>16</sup>.

Lord Rayleigh presentó una teoría, todavía vigente bajo el nombre de Teoría Dúplex, “en la cual se postula que el ILD es el principal indicio que utilizamos para la ubicación espacial (en plano horizontal) de sonidos de frecuencias altas mientras que el ITD es el principal indicio en la ubicación espacial de frecuencias bajas”<sup>17</sup>.

Torres<sup>18</sup>, retoma a un término anterior “la sombra acústica responsable del ILD es producida principalmente por la difracción, reflexión y refracción del sonido cuando este choca con la cabeza del oyente (también influyen la forma del tronco y la oreja)”. Rayleigh explicó que, el hecho de que los tonos de baja frecuencia no provoquen ILD, se debe a que cuando la longitud de onda de la señal es igual o mayor que el diámetro de la cabeza el sonido se “curva” alrededor de la misma. Este proceso es conocido como difracción, y el resultado es que la sombra acústica disminuye (hasta desaparecer), y con ella los valores ILD. Estos estudios realizados por Rayleigh de la Teoría Dúplex, mostraron que el ILD es efectivo para señales con longitudes de onda que son menores que el diámetro de la cabeza del oyente y además que el ILD aumenta cuanto más chica la longitud de onda de la señal.

---

<sup>16</sup>Torres Viveros, J. (2009). *Aplicación De Técnica De Grabación y Mezcla Binaural Para Audio Comercial*. Maestro en Música con énfasis en Ingeniería de Sonido. Pontificia Universidad Javeriana, 2009, pp.29-30.

<sup>16</sup> Rayleigh, L. (1907). On our perception of sound direction. *Philosophical Magazine Series 6*, 13 (74), 214-232.

<sup>17</sup> Ibid. pp. 214-232.

<sup>18</sup> Torres.Op.cit., (2009).

La información que recogemos del ILD nos permite ubicar la procedencia en el azimut de sonidos de las frecuencias altas aproximadamente mayores a 1.5kHz, según los estudios realizados por Rayleigh. Sin embargo, no solamente somos capaces de ubicar la procedencia de sonidos de alta frecuencia, sino que podemos detectar la ubicación, en azimut de los sonidos a lo ancho de todo el espectro frecuencias audible, estos son debido que tenemos otro parámetro importante, que es posible detectar la ubicación en el contenido en baja frecuencia.

Para este tipo de ubicación de un sonido en el plano horizontal, relacionado con la diferencia temporal en la llegada de una señal sonora a cada oído cuando llega con valores de azimut diferentes a 0°. Este se le conoce como diferencia interaural de tiempo o ITD.

Como dice Calcagno<sup>19</sup>, el ITD, que es el tiempo que tarda la señal en llegar desde la fuente a cada oído es diferente: el oído que está más cerca de la fuente recibirá el sonido antes que el oído que se encuentra más lejos de ésta. Cuando el sonido proviene de un ángulo de azimut de 90°, el ITD tiene su valor máximo ya que la señal, luego de llegar al oído más próximo, de recorrer la distancia máxima (por el diámetro de la cabeza) para llegar al otro. Por el contrario, si la señal proviene desde el frente de la cabeza (azimut cero) la distancia desde la fuente a cada oído es la misma y el valor de ITD es cero. “Esta diferencia temporal es debido a la llegada del sonido de baja frecuencia, obtenida en momentos de fase de la onda sonora (diferencia sonora)”<sup>20</sup>.

Se realizaron varios experimentos en los cuales se activaban dos diapasones intercambiables, lo cual permitía estimular a cada oído con retardos temporales y de fase de la onda sonora. Calcagno<sup>21</sup>, Torres<sup>22</sup> sustentaron los trabajos realizados por Rayleigh demostró que, para tonos puros de frecuencias menores a 1000 Hz el ITD es muy efectivo para detectar la procedencia angular de sonidos en el plano horizontal. Pero cuando la frecuencia aumenta por encima aproximadamente de 1300 Hz el ITD se hace menos efectivo, y se muestra una reducción en su capacidad de reconocer la ubicación de la fuente (la imagen auditiva tiende a moverse hacia

---

<sup>19</sup> Calcagno, E. R. *Especialidad y estructura sonora en la música electroacústica*. Tesis de posgrado. Universidad Nacional de Quilmes, Bernal, Argentina, 2016.

<sup>20</sup> Rayleigh, L. (1907). Ibid. p. 218

<sup>21</sup> Calcagno, E. R. (2016). Ibid.

<sup>22</sup> Torres Viveros, J. (2009). Ibid

el centro de la cabeza). Esto genera confusión en la diferencia de fase ya que resulta difícil diferenciar.

### 5.3. ILD (Diferencia Interaural de Nivel)

Basado en el libro de Jaramillo<sup>23</sup> menciona que, la diferencia interaural de nivel es la variación de nivel de presión sonora que llega a ambos oídos, la cual se debe a las reflexiones y a la sombra acústica que produce la cabeza, lo cual disminuye la presión sonora que llega al oído opuesto del origen de dicho sonido.

$$ILD = I_{izq} - I_{der} \quad (1)$$

Que representa la intensidad de la señal que llega al oído izquierdo y derecho en la misma frecuencia.

**Figura 11:** Diferencia Interaural de Nivel



**Fig.11.** La señal emitida por la fuente sonora, ubicada a la derecha del oyente llega con mayor intensidad al oído derecho que es el más cercano; mientras que la señal que recibe el oído izquierdo es de menor intensidad debido a la sombra acústica provocada por la cabeza.

Imagen tomada de: (Padilla Ortiz, A. (2012). “Aplicación de tecnologías de sonido binaural para el mejoramiento de la calidad acústica en sistemas de comunicación móvil”, p. 11.)

<sup>23</sup> Jaramillo María., A. (2007). Acústica: ciencia Del sonido (pp-39). Colombia, Medellín. Fondo Editorial ITM.

#### 5.4. ITD (Diferencia Interaural de Tiempo)

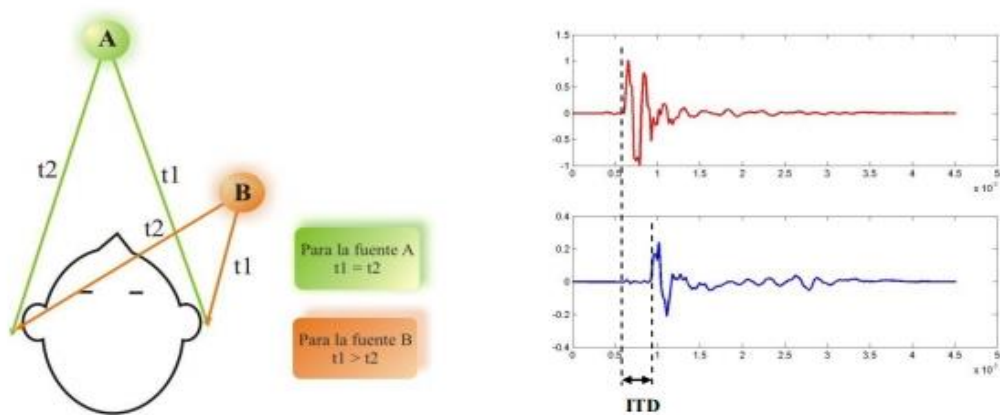
Como ya se mencionó, este hace referencia a que tan rápido llega el sonido a un oído con respecto al otro debido a la separación física entre ambos oídos.

Esta diferencia también se emplea como señal de localización azimutal. Dada por:

$$\Delta T = T_L - T_R \quad [ms] \quad (2)$$

Donde  $T_L$  y  $T_R$  son los retardos en la propagación de la fuente hacia los dos oídos a una frecuencia en particular.

**Figura 12:**Diferencia ITD. El sonido de la fuente sonora A llega al mismo tiempo a ambos oídos



**Fig.12.** El sonido de la fuente sonora A llega al mismo tiempo a ambos oídos; mientras que en el caso de la fuente B el sonido llega primero al oído derecho que al izquierdo. Las respuestas acústicas que se muestran en la parte derecha corresponden respectivamente a las señales que llegan a los oídos derecho e izquierdo desde la fuente B.

Imagen tomada de: (Padilla Ortiz, A. (2012). “Aplicación de tecnologías de sonido binaural para el mejoramiento de la calidad acústica en sistemas de comunicación móvil”, p. 9.)

Con base en las investigaciones de Gardner<sup>24</sup>, Padilla<sup>25</sup>, la forma de medir los parámetros de ITD e ILD, se realiza generando una señal impulso, que posteriormente va a ser captada por la cabeza binaural o Dummy Head, que compone la cabeza, orejas y torso humanos para la grabación de un ambiente sonoro.

### **5.5. Wave Field Synthesis**

Jens Ahrens (2012), resume claramente el concepto de WFS, definiéndolo como un “ensamble de fuentes de sonido elementales controladas de manera tal que, un campo sonoro con propiedades físicas específicas deseadas se recrea sobre un área extendida, que puede ser el plano o volumen”<sup>26</sup>.

La WFS es una técnica de reproducción de sonido que, con base en el principio de Huygens, reproduce un campo acústico dentro de un volumen a partir de las señales. El principio de Huygens es un mecanismo para representar la propagación de ondas, aplicable a ondas mecánicas en un medio material. Este principio establece que si una onda emitida por una fuente puntual con frecuencia  $f$ , en un instante de tiempo  $t$ , los puntos de los frentes de ondas pueden ser considerados como fuentes puntuales para la producción de ondas secundarias, lo que llamamos una onda esférica de la misma frecuencia.

---

<sup>24</sup> Gardner, B., Martin, K. *HRTF Measurements of a KEMAR Dummy-Head Microphone*. MIT Media Lab. Perceptual Computing – Technical Report 280, May, 1994.

<sup>25</sup> Padilla Ortiz, A. (2012). Aplicación de tecnologías de sonido binaural para el mejoramiento de la calidad acústica en sistemas de comunicación móvil. Doctora en Ingeniería Eléctrica. Universidad Nacional Autónoma de México.

<sup>26</sup> Ahrens, J. (2012). *Analytic Methods of Sound Field Synthesis* (Springer, Berlin/Heidelberg), p.49.

**Figura 13:** Principio de Wave Field Synthesis.

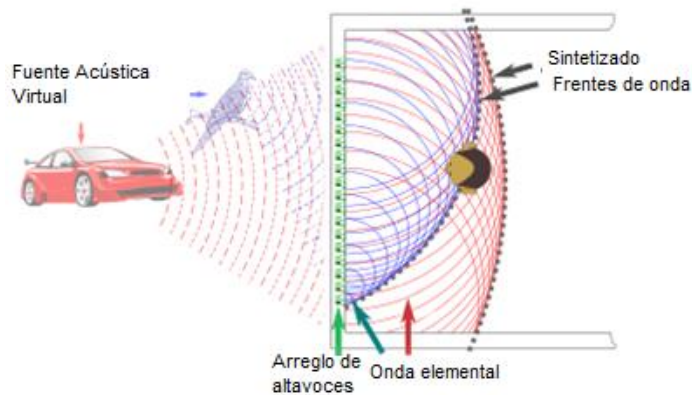


Imagen tomada de:

[https://www.google.com.co/search?q=wave+field+synthesis&biw=1242&bih=535&source=Inms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwilssXK193QAhUKcCYKHSUoDScQ\\_AUIBigB#imgrc=vG3ZdlzS0ZrpUM%3A](https://www.google.com.co/search?q=wave+field+synthesis&biw=1242&bih=535&source=Inms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwilssXK193QAhUKcCYKHSUoDScQ_AUIBigB#imgrc=vG3ZdlzS0ZrpUM%3A)

Berkhout & de Vries<sup>27</sup> proponen el concepto de “cortina acústica” para describir la WFS [Snow,1953]: Si delante de un escenario colocamos una cortina a modo de telón sobre la cual hubiera infinidad de micrófonos, seríamos capaces de registrar el sonido que viaja desde el escenario hasta el patio de asientos. Si ahora colocamos otra cortina sobre la cual hay dispuesto tantos altavoces como micrófonos teníamos en la cortina anterior, podríamos enviar el sonido registrado por cada micrófono a su altavoz correspondiente, con lo cual, al otro lado la segunda cortina estaríamos reconstruyendo la escena sonora original. Como se muestra en la figura 14.

<sup>27</sup> Berkhout, A. J.; De Vries, D. Acoustic Control by Wave Field Synthesis. JAES. Vol. 93, pp. 2765-2778, 1993.

**Figura 14:** Cortina Acústica, representación de la escena registrada por micrófonos, y a la vez reproducidos por altavoces

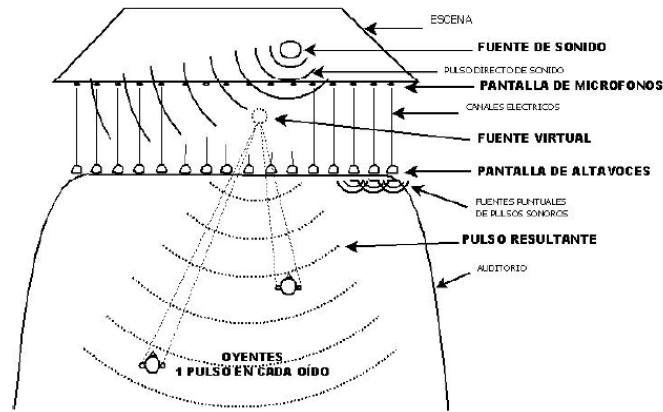


Imagen tomada de: Ezequiel Gutiérrez H. (2010). Programa para reproducción de sonido multicanal en tiempo real y síntesis de frentes de onda (WFS). *Maestro en ingeniería eléctrica. Universidad Nacional Autónoma de México.*

El enfoque del sonido espacial propuesto por Jens Ahrens está dividido en dos categorías que son las siguientes:

- Método relacionado con la cabeza (Transferencia de la cabeza, HRTF)
- Método relacionado con la sala (Estereofonía, Ambisonics, Síntesis de Campo de Sonido (Sound Field Synthesis))

Para esta investigación la explicación se centrará en la teoría de la Wave Field Synthesis.

### 5.5.1. Teoría

Considerando que una superficie envolvente simplemente conectada  $\partial\Omega$  de fuentes secundarias que encierra nuestro volumen objetivo  $\Omega$ , podemos formular la ecuación de síntesis en el dominio de la frecuencia como:

$$S(x, \omega) = \oint_{\partial\Omega} D(x_0, \omega) G(x - x_0, \omega) dA(x_0) \quad (3)$$

Fórmula propuesta por [Jens Ahrens, Rudolf Rabenstein & Sascha Spors].

Ahrens<sup>28</sup>, Poletti<sup>29</sup> proponen que  $D(x_0, \omega)$  representa la señal de activación de la fuente secundaria situada en el punto  $x_0 \in \partial\Omega$  y  $G(x - x_0, \omega)$  representa la función de transferencia espacial temporal de esa fuente secundaria. Utilizamos G porque esta función se puede interpretar como una función de Green's. El producto  $D(x_0, \omega) G(x - x_0, \omega)$  describe el campo sonoro que es evocado por la fuente secundaria considerada. La integral en toda la superficie  $\partial\Omega$  produce el campo del sonido sintetizado  $S(x, \omega)$  por la suma de todas las contribuciones de las fuentes de sonido elementales.

**Figura 15:** Geometría utilizada en los fundamentos físicos de la WFS

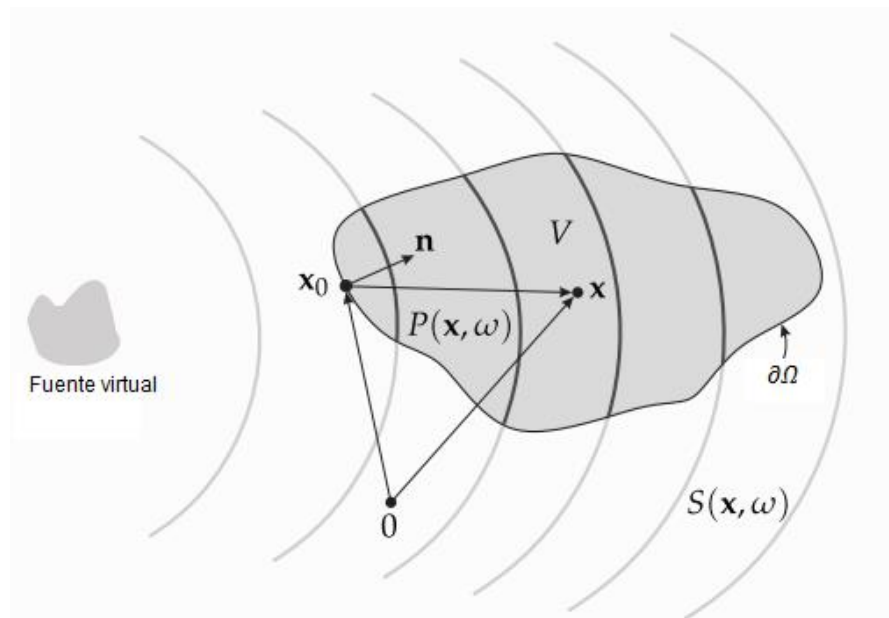


Imagen tomada de: < <http://sfstoolbox.org/en/latest/> >

Como se muestra en la figura 14, las fuentes secundarias en la superficie se llaman fuentes secundarias en el sonido de campo sintético (Sound Field Synthesis), equivalente al caso de los problemas de dispersión acústica. El potencial de una capa puede derivarse de la integral de Kirchhoff-Helmholtz. La idea del Campo Sonoro Sintético es resolver la integral respecto a  $D(x_0, \omega)$  para un campo sonoro deseado  $P(x, \omega) = S$ , que está contenido en  $V$ .

<sup>28</sup> Ahrens, J. Ibid. p. 218

<sup>29</sup> Poletti, M. A. (2005), "Three-dimensional Surround Sound Systems Based on Spherical Harmonics," Journal of the Audio Engineering Society 53(11), pp. 1004–1025.



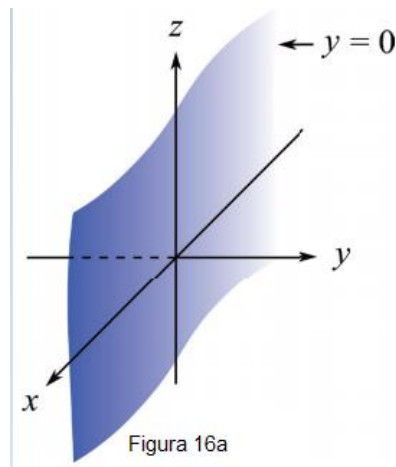
Hay varias maneras de derivar una solución implícita a la ecuación (3) que conllevan a resultados idénticos, todos los cuales parten de representaciones integrales bien conocida de campo sonoro (Berkhout, 1993; Sports et al., 2008). En este se eligió derivar la solución implícita vía de la integral de Rayleigh I. Esta derivación aparece en varias investigaciones a primera vista, pero existen otros métodos ajustables que demuestran la pericia de las aproximaciones aplicadas por Zotter & Spors<sup>30</sup>.

La integral de Rayleigh describe el campo sonoro  $P(x, \omega)$  en un semi-espacio en el fin de  $\Omega$  que está limitado por una superficie plana  $\partial\Omega$  y está dada por (Williams, 1999).

$$P(x, \omega) = \iint_{-\infty}^{\infty} \underbrace{-2 \frac{\partial}{\partial n} S(x, \omega) |_{x = x_0}}_{- D(x_0, \omega)} \cdot G(x - x_0, \omega) dx dy; \quad (4)$$

$$P(x, \omega) = S(x, \omega) \forall x \in \Omega \quad (4)$$

**Figura 16:** Esquema de la teoría de Wave Field Synthesis



La geometría se representa en la figura 16. Es una distribución plana y continua de fuentes secundarias. En otras palabras, la integral en (4) indica que podemos

<sup>30</sup> Zotter, F. and Spors, S. (2013), "Is sound field control determined at all frequencies? How is it related to numerical acoustics?" in Proceedings of the 52nd International Conference of the Audio Engineering Society (Guildford, UK), paper 1-3.

recrear perfectamente un campo sonoro  $S(x, \omega)$  que no tiene fuente en el semi-espacio en objeto  $\Omega$  si se manejara una distribución continua plana de fuente secundarias monopolo con una señal que es proporcional al gradiente  $\frac{\partial}{\partial n}$  direccional de  $S(x, \omega)$  evaluado a lo largo de la distribución de la fuente secundaria.

### 5.5.2. Alias espacial

La discretización del frente de ondas secundarias previsto por el principio de Huygens da como resultado uno de los problemas de mayor dificultad de solución: “El campo sonoro sintetizado se reconstruye al superponerse los campos sonoros generados por cada uno de los altavoces del arreglo. Esta superposición deja de ser correcta a partir de una determinada frecuencia; esto se producirá si la frecuencia máxima de la señal es mayor que la frecuencia de aliasing, de tal forma que si la señal se muestrea a una tasa menor que este valor; las frecuencias alias aparecerán en la forma de onda reconstruida debido a la ambigüedad en las fluctuaciones del nivel entre las muestras que surge en la señal discretizada”<sup>31</sup>.

En cuanto al análisis de las fuentes sonoras con respecto al movimiento, Bleda<sup>32</sup> afirma, “este efecto se acentúa con el movimiento de las fuentes sonoras ya que se modifica el patrón de interferencias generado. Donde más se agudiza, es con el movimiento del oyente ya que el moverse va recorriendo el patrón de interferencia”.

La distancia entre los transductores  $\Delta x$  (espaciados de modo que  $\Delta x$  es constante) define un muestreo en la frecuencia espacial para un campo de onda a nivel de grabación. Entonces el campo de onda reconstruido será físicamente correcto solamente hasta la frecuencia de Nyquist.

$$f_{nyq} < \frac{c}{2\Delta x} \quad 0 \quad \Delta x < \frac{\lambda_{min}}{2} \quad (28)$$

---

<sup>31</sup>Fernández, A., Merchel, S., Pesqueux, L., Rouaud, M., & Ordell, M. (2004). *Sound Reproduction by Wave Field Synthesis*. Faculty of Engineering and Science: Aalborg Universitet. P. 18.

<sup>32</sup> Bleda Pérez S. (2009). Contribuciones a la implementación de Sistemas de espacios Wave Field Synthesis. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.

Donde  $\lambda_{min}$  es la longitud de la onda más pequeña de interés y  $c$  es la velocidad del sonido. Por encima de la frecuencia de Nyquist, además del frente de onda reconstruido de manera correcta, cierta energía ondulatoria será emitida incorrectamente.

$$f_{al} = \frac{c}{2\Delta x |\text{sen}\alpha_{max}|} \quad (29)$$

Esto sucede ya que la separación entre las fuentes vendrá determinada por la separación de los altavoces y el ángulo de incidencia con respecto a la normal de la fuente virtual.

Donde  $c$  es la velocidad de propagación del sonido,  $\Delta x$  es la separación entre los altavoces y el  $\alpha_{max}$  ángulo de incidencia de la fuente virtual.

### 5.5.3. Método del domino del tiempo

Como dice Oldfield<sup>33</sup> acerca de este método, “para el caso de una disposición lineal de altavoces donde la fuente virtual no es situada en una formación circular, la forma de la región anti-aliasing se hace más compleja y se puede extender más allá del límite definido por la ecuación 29”.

La superposición del alias espacial de todas las fuentes secundarias produce un campo de onda compleja que no puede ser fácilmente definido por métodos geométricos, sin embargo, el campo de ondas todavía exhibe un círculo de la fuente virtual con un radio definido por la ecuación 29 en el que las contribuciones de alias no estarán presentes.

Como dice Oldfield<sup>34</sup>, “este círculo sólo define el área mínima alrededor de la fuente en la que no habrá contribuciones alias y por lo tanto se puede considerar un escenario del peor caso. En realidad, la región puede extenderse más allá de esta, particularmente en la dirección de la fuente”.

El autor Oldfield explica que este método debido a las limitaciones del enfoque geométrico para describir esta región es mucho más complejo; la región no-alias puede ser mejor clasificada utilizando un enfoque de dominio de tiempo similar a la

---

<sup>33</sup> Oldfield R. (2013). *The analysis and improvement of focused source reproduction with Wave Field Synthesis*. Acoustics Research Centre, University of Salford, Salford, UK.

<sup>34</sup> Ibid.

utilizada para las fuentes fuera de foco mirando las diferencias en los tiempos de llegada entre la energía directamente de las fuentes secundarias y la energía superpuesta a través de la posición de la fuente virtual para los altavoces consecutivos.

**Figura 17:** Geometría utilizada para el dominio de derivación al momento de la región no-aliasing de las fuentes focalizadas.

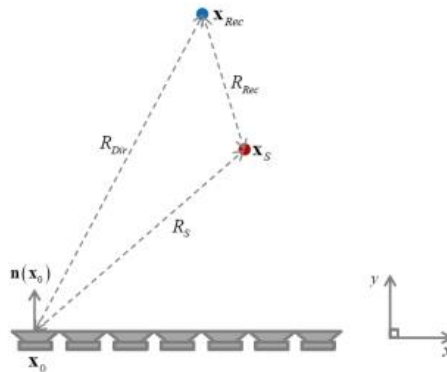


Imagen tomada de: (Oldfield,2013. “*The analysis and improvement of focused source reproduction with wave field synthesis.*”, p.117.)

“La geometría utilizada para esta derivación se da en la figura 16 con la distancia total,  $R_{Indirect}$  entre la fuente y el receptor a través de la fuente virtual como:”<sup>35</sup>

$$R_{Indirect} = R_S + R_{Rec} \tag{30}$$

“La diferencia de la ruta,  $\Delta R$  entre la ruta directa desde el altavoz al receptor y la ruta a través de la fuente virtual está dada como:”<sup>36</sup>

$$\Delta R = R_{Indirect} - R_{Direct} \tag{31}$$

Para calcular la condición de anti-aliasing, los valores relativos de  $\Delta R$  entre los altavoces se compararon a través del arreglo, si la diferencia máxima a través de todos los altavoces es superior a la longitud de onda de la fuente  $\lambda$ , entonces pueden esperarse contribuciones aliasing en el campo de la onda reproducida. Cuando esto se calcula para un punto dado en el espacio, es posible determinar si se puede o no

<sup>35</sup> Oldfield R. Ibid. p. 117

<sup>36</sup> Ibid. p. 117

esperar contribuciones de aliasing. Haciendo este cálculo para cada punto de la habitación se permite el trazado de un mapa de la región no alias. Este método también permite la determinación de una región no alias para separaciones irregulares de altavoces y geometrías complejas del arreglo<sup>37</sup>.

“La frecuencia aliasing espacial para una posición dada en el espacio de escucha para una fuente virtual dado,  $\psi$  por lo tanto se puede dar como:”<sup>38</sup>

$$f_{alias}(\mathbf{x}, \psi) = \frac{c}{\max \Delta R} \quad (32)$$

Oldfield<sup>39</sup> explica que esta ecuación permite que el trazado de la variación en la frecuencia de aliasing espacial a través del espacio de escucha para una posición determinada de la fuente. Esta es una herramienta útil ya que permite, en la inspección, la región de validez de una fuente enfocada y por debajo de una frecuencia dada de interés.

Oldfield dice que, “Si un oyente está en cualquier lugar fuera de esa región anti-aliasing se puede esperar que van a experimentar coloración en el campo de la onda reproducida; estos efectos son de coloración variante especialmente y por lo tanto se ven afectado por ambos movimientos de origen y de escucha.”<sup>40</sup>

#### 5.5.4. Errores de amplitud

Reducir el plano que contiene la distribución de las fuentes de sonido para la producción del campo de sonido sintetizado a una línea tiene dos consecuencias: La primera es que, tras simplificar la superficie de fuentes secundarias de una esfera a un plano, debido a la reducción a una línea de las fuentes secundarias partiendo del desarrollo matemático, se tendrá como resultado una reconstrucción correcta en el plano que contiene el arreglo de altavoces (fuentes secundarias). Si se sitúa el

---

<sup>37</sup> Oldfield R. Ibid. p. 117

<sup>38</sup> Ibid. p.117

<sup>39</sup> Oldfield R. (2013). Ibid.

<sup>40</sup> Oldfield R. Ibid., p. 117

arreglo de altavoces a la altura del oído se consigue que la localización de fuentes sonoras se lleve con normalidad.

Fernández, A., Merchel, S., Pesqueux, L., Rouaud, M., & Ordell, M<sup>41</sup> & Oldfield<sup>42</sup> en sus investigaciones dicen que en el caso de utilizar un arreglo de altavoces los cuales producen ondas cilíndricas en lugar de ondas esféricas, se producirían errores de amplitud en la reconstrucción del campo sonoro. Estos errores de amplitud tienen como origen la forma en que se expanden dichas ondas, existiendo una diferencia de +3dB al duplicar la distancia entre una onda cilíndrica y onda esférica, es decir un decaimiento de 3 dB en vez de 6 dB.

### **5.5.6. Efectos de truncamiento**

Oldfield<sup>43</sup> describe en sus trabajos los problemas que se presentan aplicando la técnica de la Wave Field Synthesis cuando la suma de un número finito de señales de altavoces. Este arreglo lineal finito puede ser mostrado como una ventana, a través de la cual la fuente virtual visible, o invisible, al escucha. Por lo tanto, existe un área que es iluminada por la fuente virtual, con una correspondiente área sombreada. Aplicando lo anterior, las ondas de difracción son originadas por los bordes del arreglo finito de altavoces. Esas contribuciones de margen de error aparecen como post-ecos (retrasos en el tiempo) para las fuentes virtuales y pre-ecos (adelantos en el tiempo) para las fuentes enfocadas.

### **5.6. Eficiencia electroacústica de un altavoz**

La eficiencia llamada rendimiento de un altavoz ( $\eta$ ) se define como la relación entre la potencia acústica que genera el altavoz para una potencia eléctrica necesaria para ello, en otras palabras, la eficiencia es una medida del rendimiento de la transducción electro-acústica.

La eficiencia de un altavoz nunca supera el 50% y generalmente es menor a 10%, sin embargo, en algunos casos llegan a este porcentaje, Pueo dice que “debido a que esta eficiencia de referencia puede aumentar al incrementar el valor  $Bl$ , lo cual significa disponer de un motor más potente o bien disminuir la resistencia eléctrica

---

<sup>41</sup> Fernández, A., Merchel, S., Pesqueux, L., Rouaud, M., & Ordell, M. (2004). Ibid.

<sup>42</sup> Oldfield R. (2013). Ibid.

<sup>43</sup> Ibid.

RE. Sin embargo, aumentar el área del diafragma para incrementar ( $\eta_0$ ) conlleva un aumento de la masa del diafragma”<sup>44</sup>.

### 5.6.1. Sensibilidad

Pueo la define “como el nivel de presión sonora a 1 metro de distancia en el eje de un altavoz montado en pantalla infinita, que se excita con potencia eléctrica a frecuencias medias. Alternativamente, en lugar de 1 vatio de potencia eléctrica, puede darse como tensión de 2.83 voltios. Si la impedancia nominal del altavoz es 8 Ohmios, las dos sensibilidades son equivalentes ya que  $\sqrt{8} = 2.83 V$  .”<sup>45</sup>

### 5.6.2. Potencia acústica

La potencia acústica es la cantidad de energía (potencia) radiada por una fuente determinada en forma de ondas por unidad de tiempo.

Este cálculo de la potencia acústica se basó en la eficiencia (rendimiento), ya que con éste se conoce cuántos Vatios acústicos son generados a la salida del altavoz, con respecto a la potencia eléctrica suministrada a su entrada. El valor que se reporta es el porcentaje de eficiencia o rendimiento.

“Eargle, J presenta que para calcular el rendimiento o eficiencia del altavoz se utilizó dicha ecuación que permite convertir la sensibilidad al rendimiento y viceversa, como se muestra en la siguiente ecuación”<sup>46</sup>:

$$S = 112 \text{ dB} + 10 \text{ Log}(\eta) \quad [\text{dB}] \quad (32)$$

$S = \text{Sensibilidad } [\text{dB}/W]$

$\eta = \text{eficiencia}$

- Borwick, J<sup>47</sup> presenta que el valor 112 dB SWL hace referencia a la media esfera, capaz de irradiar energía acústica a la mitad de una esfera sobre una superficie, es decir cuando  $Q=2$  y a 1 metro de distancia (factor de directividad). Tenemos que:

---

<sup>44</sup> Pueo, B. Ibid., p. 191

<sup>45</sup> Pueo, B. Ibid., p. 152

<sup>46</sup> Eargle, J Loudspeaker Handbook, second edition, Kluwer Academic Publisher, Boston, 2003. p.13.

<sup>47</sup> Borwick, J., Loudspeaker and headphones Handbook (3er ed.), Focal Press, Boston (2001).

$$L_w = 120 \text{ dB SPL} + 10 * \text{Log} \left( \frac{2}{4 * \pi * 1^2} \right) \quad (33)$$

$$L_w = 112 \text{ dB/SWL}$$

- Continuando, se despeja de la ecuación (32) el  $\eta$  para hallar la eficiencia a partir de las sensibilidades.

$$\eta = 10^{\frac{\text{SdB/w} - 112\text{dB/w}}{10}} * 100\% \quad (34)$$

- Ya obtenida la eficiencia de la ecuación (34), se procede de la ecuación (35) despejar la potencia acústica.

$$(\eta) = \frac{W_{\text{Potencia acústica}}}{W_{\text{Potencia eléctrica}}} * 100\% \quad (35)$$

$$W_{\text{Potencia acustica}} = \frac{\eta}{100 \%} * W_{\text{Potencia eléctrica}} \quad [W] \quad (36)$$

$$W_{\text{Potencia acústica}} = \text{Potencia acústica} [W]$$

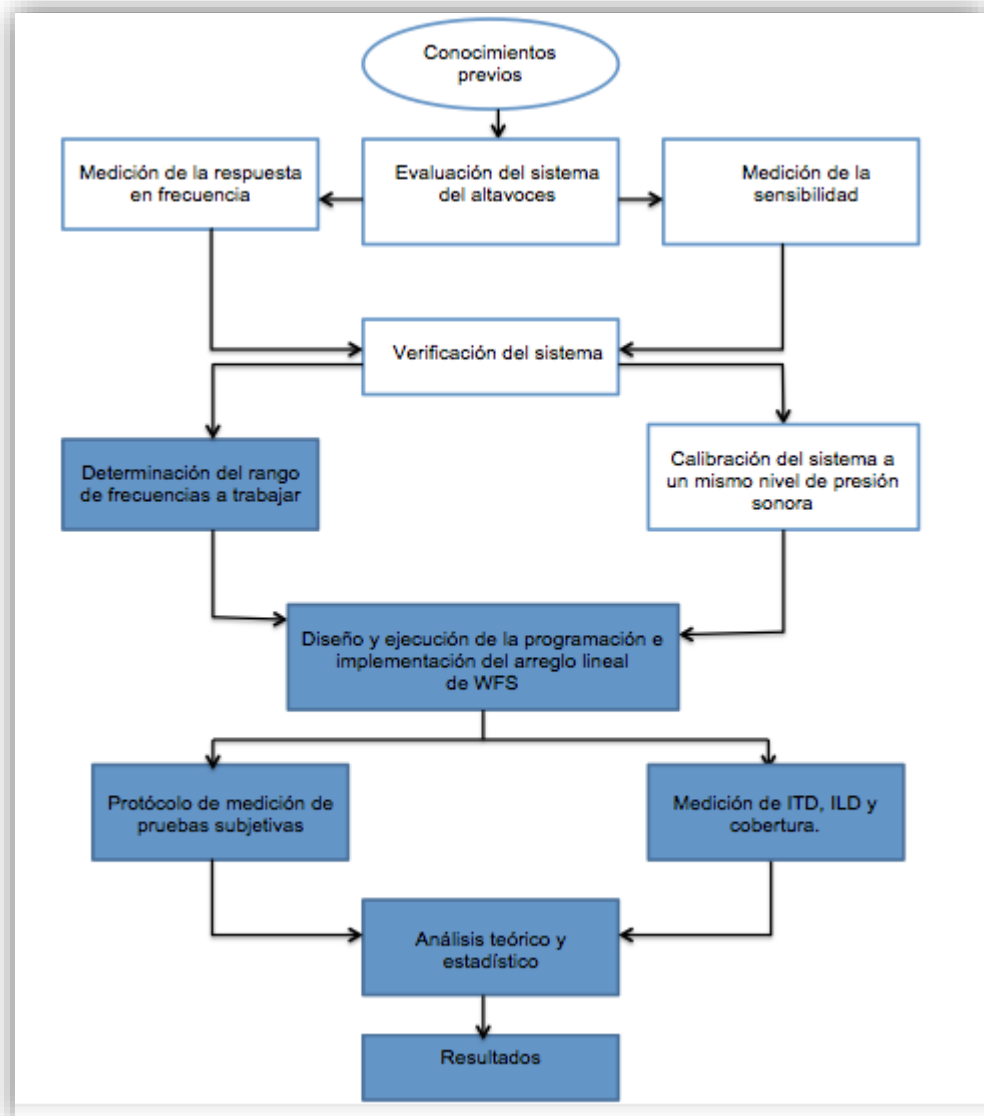
$$W_{\text{Potencia eléctrica}} = \text{Potencia eléctrica nominal RMS (fabricante)} [W]$$

$$\eta = \text{eficiencia}$$



## 6. DESARROLLO INGENIERIL

### DIAGRAMA DE BLOQUE DEL PROYECTO: CAPÍTULO 1

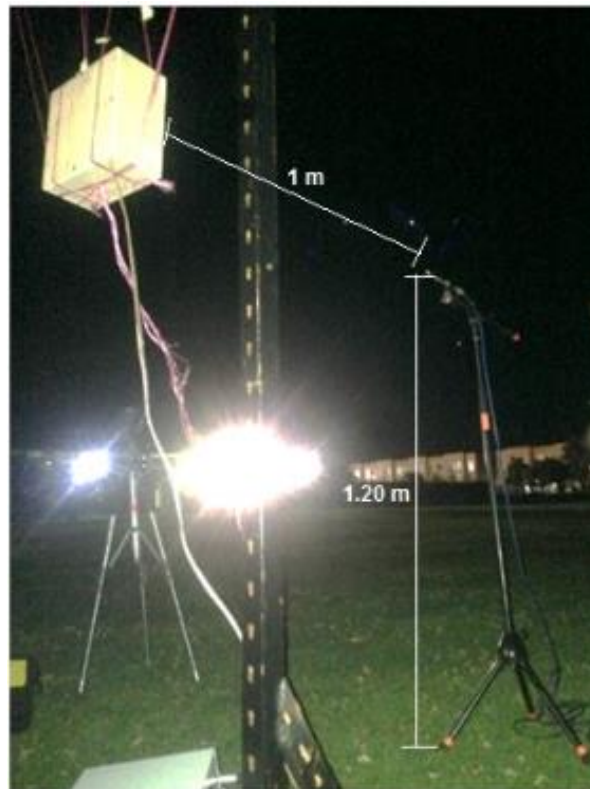


Para este capítulo 1 se midieron las cajas individualmente y el sistema armado (arreglo lineal). En ambos casos se usó el mismo procedimiento.

### 6.1. Medición de Respuesta en Frecuencia

Se midió la respuesta en frecuencia con ruido blanco, la cual contiene el mismo nivel de energía por cada frecuencia, lo que produce una densidad espectral que se muestra plana en un espacio de frecuencia lineal. Por lo tanto, es una ventaja ya que la respuesta en frecuencia de un sistema de audio se puede medir mediante una señal sin tener que realizar mediciones por cada frecuencia.

**Imagen 1:** Montaje de la medición de Respuesta en Frecuencia de cada caja acústica.



Como primera medida se calibró el sistema a -20 dBFS emitiendo un tono de 1000 Hz, se utilizó el software de Smaart Live en modo RTA usando el micrófono de medición TEF a una distancia de 1 metro del arreglo con una altura de 1.20 metros, y se emitió ruido blanco. Seguidamente se iban anotando los valores de la medición en tiempo real.

## 6.2. Medición de sensibilidad

Se siguió el siguiente procedimiento, se colocó el sonómetro en frente del altavoz a un metro de distancia a una altura de 1.20 metros, aplicando 2.83 voltios, cuya tensión se verificó con el osciloscopio (Voltaje pico-a-pico).

**Imagen 2:** Montaje de la medición de sensibilidad de una caja



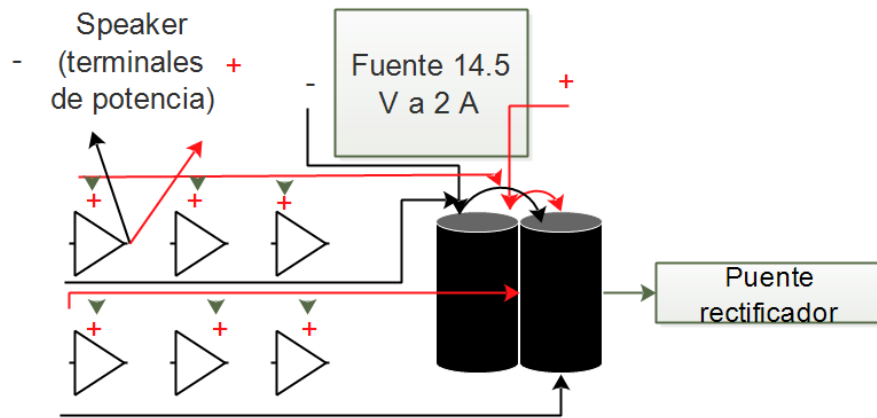
**Imagen 3:** Montaje de la medición de sensibilidad del arreglo lineal



### **6.3. Amplificador utilizado**

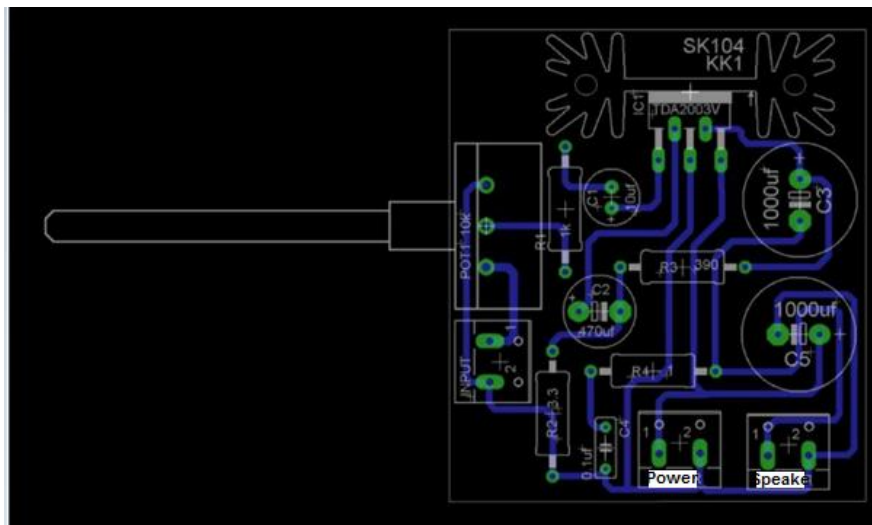
El TDA 2003 seleccionado proporciona 10 Vatios de potencia de salida con 0.15% de distorsión alimentado con 12 Voltios y 2 Ohmios de carga en salida; el rango de alimentación se encuentra de 8 a 18 Voltios (como se puede observar en el **Anexo B**). La alimentación que se utilizó para los (6) amplificadores TDA2003 fue de 14.5 voltios a 2 Amperios y 8 Ohmios de carga en salida, en la cual se requirió 1 Vatio de potencia para generar un nivel de presión sonora como se puede observar en los resultados de las mediciones de sensibilidad de cada altavoz en **la sección 7.5. Tabla 20.**

## Diagrama de conexión de la distribución de voltaje de los (6) TDA 2003



Como se puede observar en el diagrama de conexión, las señales de alimentación se distribuyen de manera equilibrada en el puente rectificador para los 6 TDA 2003.

## Diagrama esquemático del circuito TDA2003



**Imagen 4: Amplificador** con entradas de línea y de potencia de audio del amplificador.

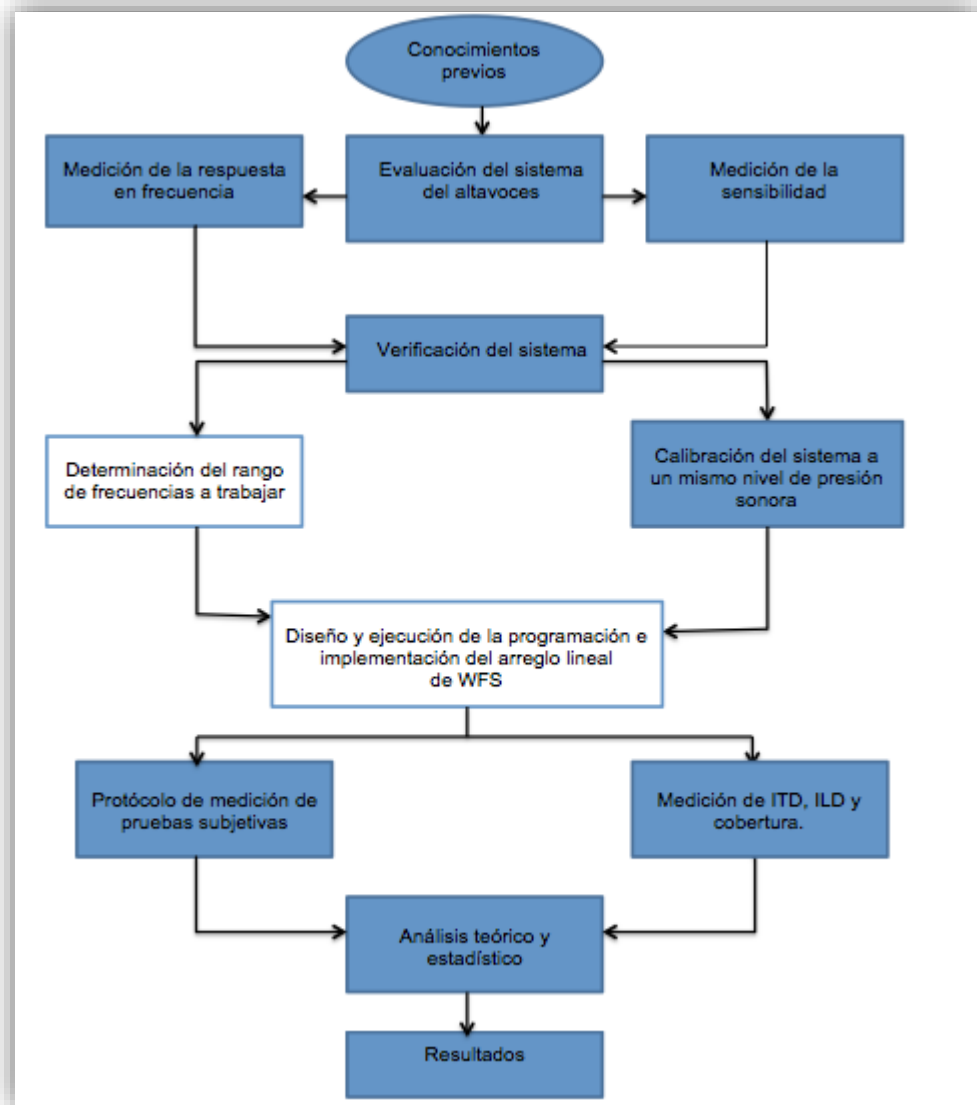


En la imagen 4 se observan las entradas de línea (entradas superiores), y las terminales entrada de potencia de audio (inferiores).

**Imagen 5: Producto final del amplificador.**



## DIAGRAMA DE BLOQUE DEL PROYECTO: CAPÍTULO 2



## 6.4. Ejecución de la programación y construcción del prototipo

### 6.4.1. Diseño de las cajas acústicas

Como primera medida se definió el rango de frecuencias a trabajar (500 Hz a 4000 Hz); se escogió tomando en cuenta el rango de frecuencias de la inteligibilidad de la palabra, ya que es el rango en cual se hará énfasis para dicho proyecto.

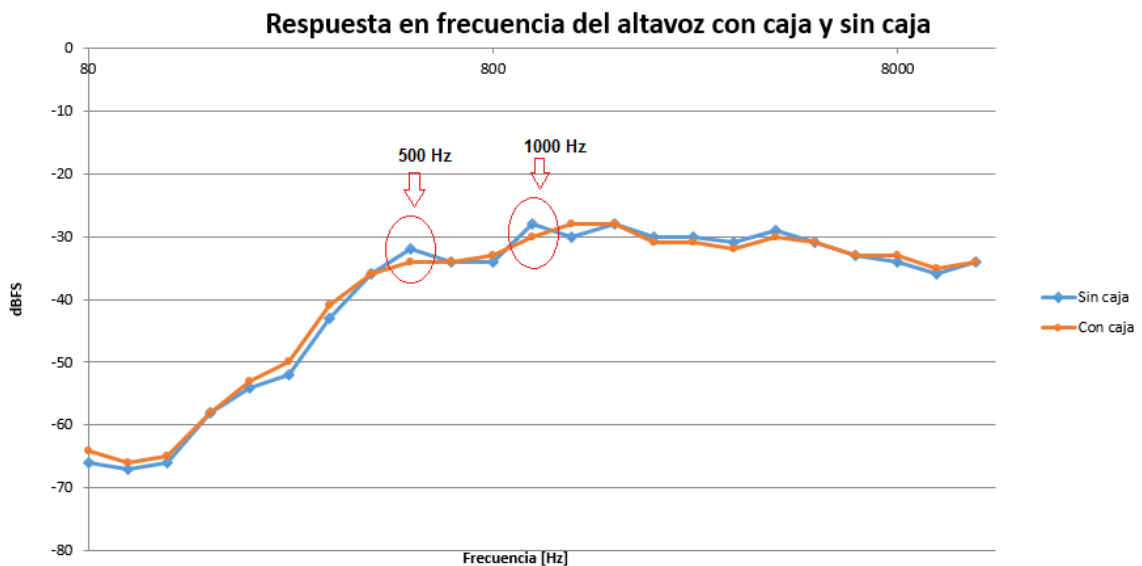
El altavoz escogido para reproducir dicho rango de frecuencias es un Mid-range Supertone 54MR-80<sup>a</sup> de 5.5" e impedancia de 8 Ohmios, el cual viene sellado de fábrica, es decir no necesita diseño de caja acústica. Sin embargo, se decidió realizar la medición de respuesta en frecuencia del altavoz para conocer el comportamiento en cuanto a dicho parámetro y además se realizó la medición de los parámetros Thiele-Small del mismo.

**Tabla 1:** Parámetros Thiele-Small

Parámetro	Valor	Unidad
$R_E$	7	$\Omega$
$F_S$	350	Hz
$Q_{MS}$	2,2	-
$Q_{ES}$	3,1	-
$Q_{TS}$	1,2	-
$X_{MAX}$	0,005	$m$
$S_D$	0,006	$m^2$
$V_{AS}$	4,8	L



**Grafica 1:** Respuesta en frecuencia del altavoz con caja y sin caja



Como se observa en la gráfica, la respuesta en frecuencia presenta algunos picos 400 Hz a 4000 Hz, es por esta razón que se decidió realizar el diseño de una caja acústica cerrada y observar el comportamiento de la respuesta en frecuencia del altavoz con caja. A pesar de que no es necesario colocar los altavoces en cajas, ya que las atenuaciones de los picos al colocar la caja no superan los 2 dB, se decidió dejar las cajas ya que brindan mayor soporte a la hora de reproducir el sistema Wave Field Synthesis.

Al realizar un arreglo lineal se logra un acoplamiento eficaz de fase, con lo cual se pretende que la distribución de la presión en función de la distancia sea lo más uniforme posible. Dicho fenómeno se consigue cuando cada transductor reproduce solo frecuencias cuya longitud de onda es grande comparada con la distancia que existe entre los centros de los altavoces. En este caso las frecuencias reproducidas por los altavoces son mayores a 300 Hz ya que se utilizaron altavoces de rango medio o Mid-range.

Para realizar dicho diseño, se tuvo en cuenta la predicción realizada con el software WinISD Beta, el cual a partir de los parámetros Thiele-Small calcula las dimensiones que debe tener la caja acústica. El software tiene en cuenta el  $V_{AS}$  para hallar el volumen de la caja. Este parámetro es calculado por el software y a partir de este, él hace una recomendación de las dimensiones que debe tener la caja. La

frecuencia de corte dada para las cajas acústicas teniendo en cuenta el  $V_B$  (volumen de la caja) y el  $V_{AS}$  (volumen de aire equivalente a la elasticidad de la suspensión del altavoz) es de 408,3 Hz. El software toma un  $QTC$  (Coeficiente de sobretensión de la caja en la frecuencia de resonancia) de 1.4, respetando que dicho factor sea mayor al  $Qts$  del altavoz. Por lo tanto:

$$F_c = \frac{QTC \times f_s}{Qts} = 408,3 \text{ Hz}$$

Como el volumen de la caja calculado por el software es de 2.5 *litros*, se toma en cuenta la siguiente fórmula para hallar las dimensiones:

Volumen de la caja ( $m^3$ ): *Alto x ancho x largo*

Por lo tanto, las dimensiones a tener en cuenta son las siguientes:

$$0.138 \text{ m} \times 0.220 \text{ m} \times 0.083 = 0.0025 \text{ m}^3$$

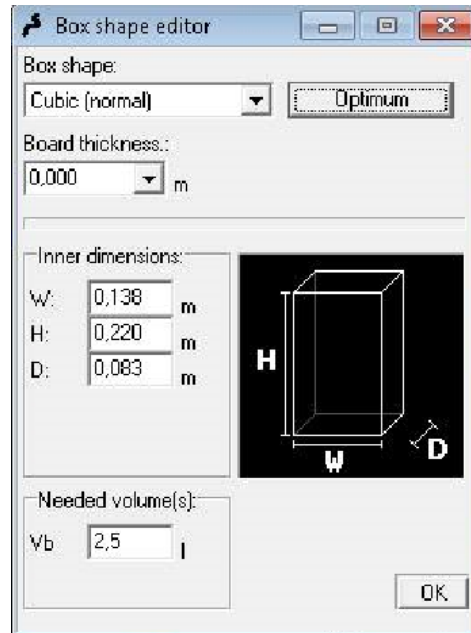
Al realizar la conversión a litros se tiene un volumen de 2.5 *l* teniendo en cuenta que:

$$1 \text{ l} \rightarrow 0.001 \text{ m}^3$$

$$x \text{ l} \rightarrow 0.0025 \text{ m}^3$$

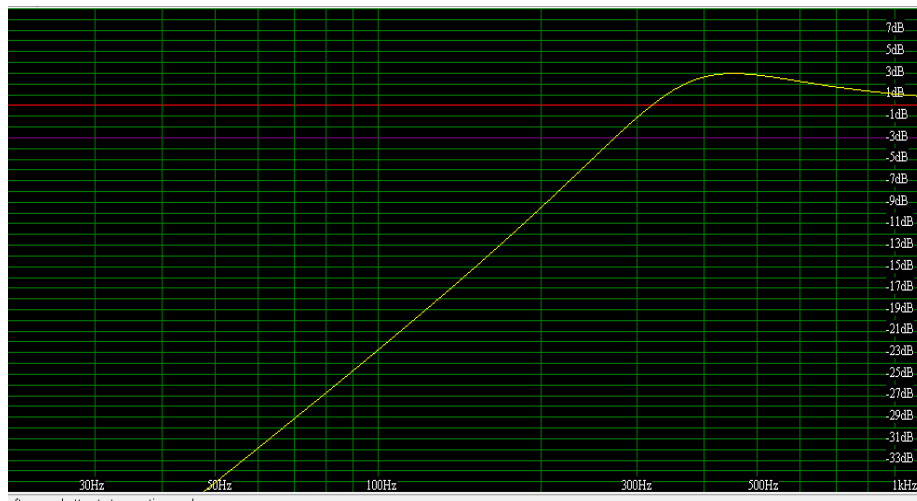
A continuación, se puede observar la predicción de la respuesta en frecuencia de la caja acústica.

**Figura 18:** Recomendación dada por el software para las dimensiones de la caja.



El software hace la predicción de la respuesta en frecuencia según el volumen y las dimensiones calculadas por el mismo.

**Grafica 2:** Predicción de la respuesta en frecuencia de las cajas acústicas



Como se menciona anteriormente, el  $Q_{tc}$  que se tiene en cuenta para realizar el diseño de la caja acústica es de 1.4 es decir se realiza un ajuste de tipo Chebyshev ( $Q_{TC} > 1/\sqrt{2}$ ), el cual presenta como ventaja que la respuesta en frecuencia no es

plana, sino que tiene un realce en un determinado rango de frecuencias, además subjetivamente “los sonidos que se perciben son cálidos, robustos y con cuerpo” <sup>48</sup>

Dichos resultados permiten observar la respuesta en frecuencia de la caja acústica y su frecuencia de corte la cual es 408.3 Hz. Se decidió tener este *QTC* en cuenta ya que como se puede observar en la gráfica, el sistema tiende a comportarse mejor en el rango de frecuencias de 408.3 Hz a 1 kHz; lo que se busca con dicho diseño es que el rango descrito anteriormente no sea plano, enfatizando el rango de frecuencias medias para la reproducción del sistema Wave Field Synthesis. De acuerdo a dicha predicción se realizó la construcción de la caja acústica, como se muestra a continuación.

**Imagen 6:** Producto final del diseño de una Caja Acústica



**Imagen 7:** Producto final del diseño del arreglo lineal WFS



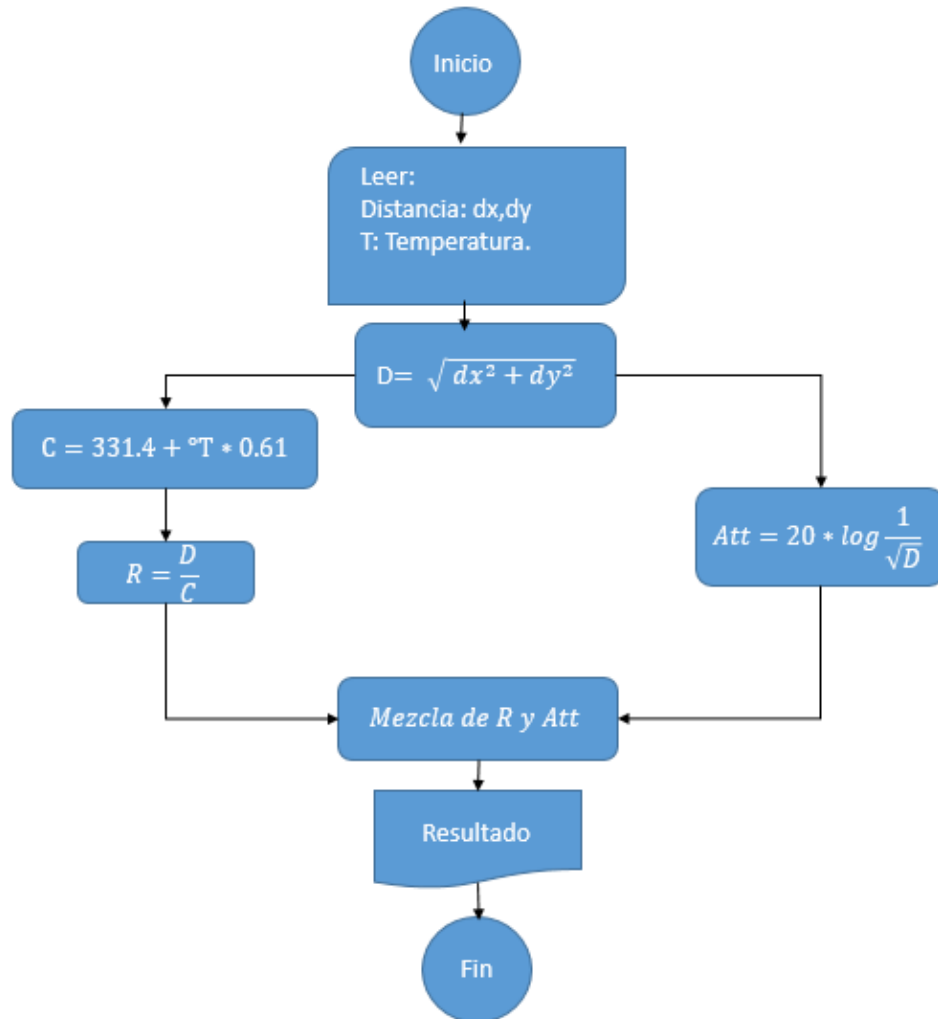
Se debe tener en cuenta que para que hubiera homogeneidad a la hora de la reproducción de nivel de presión sonora se realizó la calibración de cada caja dejándola a un mismo nivel de presión sonora.

---

<sup>48</sup> Pueo Basilio., O. & Romá Romero., M. Electroacústica, Altavoces y Micrófonos. Pearson Prentice Hall, Madrid, 2003. p.254.

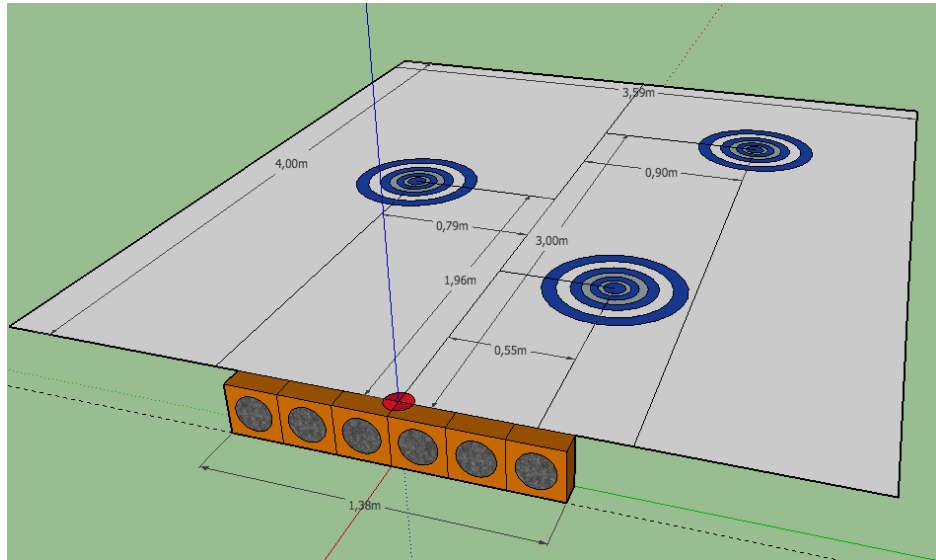
### 6.4.1. Programación de Aplicación informática (objetivo 2)

#### Diagrama de flujo del algoritmo



- Inicio.
- Calculo de las distancias dx, dy de la fuente virtual.
- Calculo de los tiempos de retardo.
- Se toma la diferencia relativa entre altavoces, así los tiempos de retardos definitivos seria la diferencia entre los altavoces y el de menor tiempo.
- Calculo de las atenuaciones.
- Las atenuaciones obtenidas de cada altavoz en relación a la distancia a la distancia para encontrar el tiempo relativo.
- Se mezcla cada retardo con cada atenuación.

**Imagen 8:** Coordenadas de punto de fuentes virtuales en el área de audiencia.



- Punto rojo representa el punto de referencia escogido.
- Círculos azules y blancos representan las fuentes virtuales.
  - Cuadro gris representa la sala virtual.
- Altavoces amarillos representan el arreglo lineal.

Para el cálculo de las distancias de utiliza la expresión:

$$D = \sqrt{x^2 + z^2}$$

- D es la distancia de la fuente virtual al punto de referencia.
- X es la coordenada en el eje x que se le asignó a la fuente virtual.
- Z es la coordenada en el eje z que se le asignó a la fuente virtual.

En el software de programación se expresa como:

**Imagen 9:** Deslizadores del eje x & y



Se puede observar la conexión, en donde los valores de los deslizadores (-120 y 199) se les hacen el siguiente proceso:

Se toma el valor absoluto para tener en cuenta únicamente magnitudes. Esto debido a que el punto de referencia está en el centro del arreglo, entonces para diferenciar si la fuente virtual está a la derecha o a la izquierda el deslizador toma valores positivos y negativos; sin embargo, para esta parte del cálculo no interesa saber si es derecha o izquierda, sólo interesa saber qué tan lejos está la fuente del punto de referencia y poder calcular esa distancia.

Una vez se tiene el valor absoluto de los dos deslizadores (imagen 14) se procede a elevar a la segunda potencia, sumar estos resultados y finalmente a este resultado aplicar la raíz cuadrada, o elevar a la 0.5 potencia, que es lo mismo.

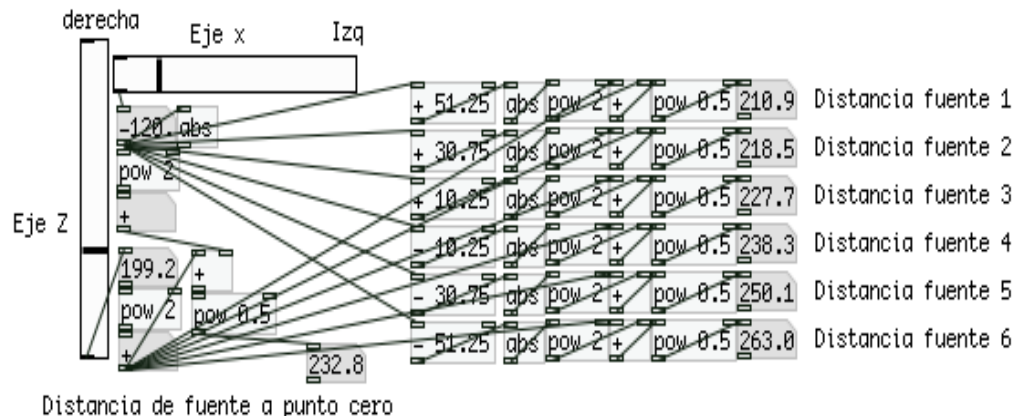
Esto resulta en la distancia de la fuente virtual al punto de referencia escogido (centro del arreglo).

En este caso es:  $200 = \sqrt{120^2 + 199^2}$

Teniendo la distancia de la fuente virtual al punto de referencia se puede calcular la distancia de fuente virtual respecto a cada altavoz, pues se conocen las distancias del punto de referencia a cada altavoz, los cuales son valores reales y constantes ya que los altavoces no cambian de distancia de separación entre sí, ni con respecto al punto de referencia.

Para éste cálculo se hacen unas pequeñas correcciones en el eje x, en donde:

**Imagen 10:** Cálculos de las distancias para cada fuente secundaria



Las correcciones para cada altavoz son sumas o restas en el eje X, dependiendo de cada altavoz. Por ejemplo, se observa que desde el punto de referencia hasta el altavoz uno (1) existe una distancia de +51.25 cm. Y para el altavoz seis (6), una distancia de -51.25 cm. Este es el verdadero motivo de por qué se escogió el punto de referencia en el centro del arreglo, como se puede ver, al tener este punto en esta posición se forma un efecto simétrico, de espejo, que facilita de manera considerable los cálculos.

Una vez estas correcciones están hechas se repite el proceso explicado en el paso anterior,  $D = \sqrt{x^2 + z^2}$ . Teniendo como resultado la distancia de la fuente virtual respecto a cada uno de los 6 altavoces, es decir, se tienen 6 distancias diferentes.

A continuación, se utilizan estas distancias para calcular las atenuaciones y retrasos en tiempos aplicados para cada uno de los altavoces.

Para el retraso se utiliza la siguiente expresión matemática:

$$t = \frac{d}{v}$$

- t es el tiempo de retraso.
- d es la distancia de la fuente virtual al altavoz.
- v es la velocidad del sonido.

Pero antes de calcular el retraso se debe conocer la velocidad del sonido, la cual se calcula teniendo en cuenta la temperatura ambiente con la siguiente expresión:

$$v = 331.4 + ^\circ\text{C} * 0.61$$

- v es la velocidad del sonido en metros por segundo.
- $^\circ\text{C}$  es la temperatura ambiente en grados Centígrados.

Ahora que se tiene distancia y velocidad se procede a aplicar la expresión matemática mencionada anteriormente.

$$t = \frac{d}{v}$$



Se obtiene como resultado el retraso correspondiente para cada altavoz según la distancia de la fuente virtual con respecto a cada altavoz.

Para las atenuaciones:

Para el cálculo de las atenuaciones se utiliza la relación entre las distancias de cada altavoz. Es decir, esta relación de distancias da al mismo tiempo la relación entre las diferencias de nivel para cada altavoz.

Esta conclusión se obtiene de la siguiente expresión matemática:

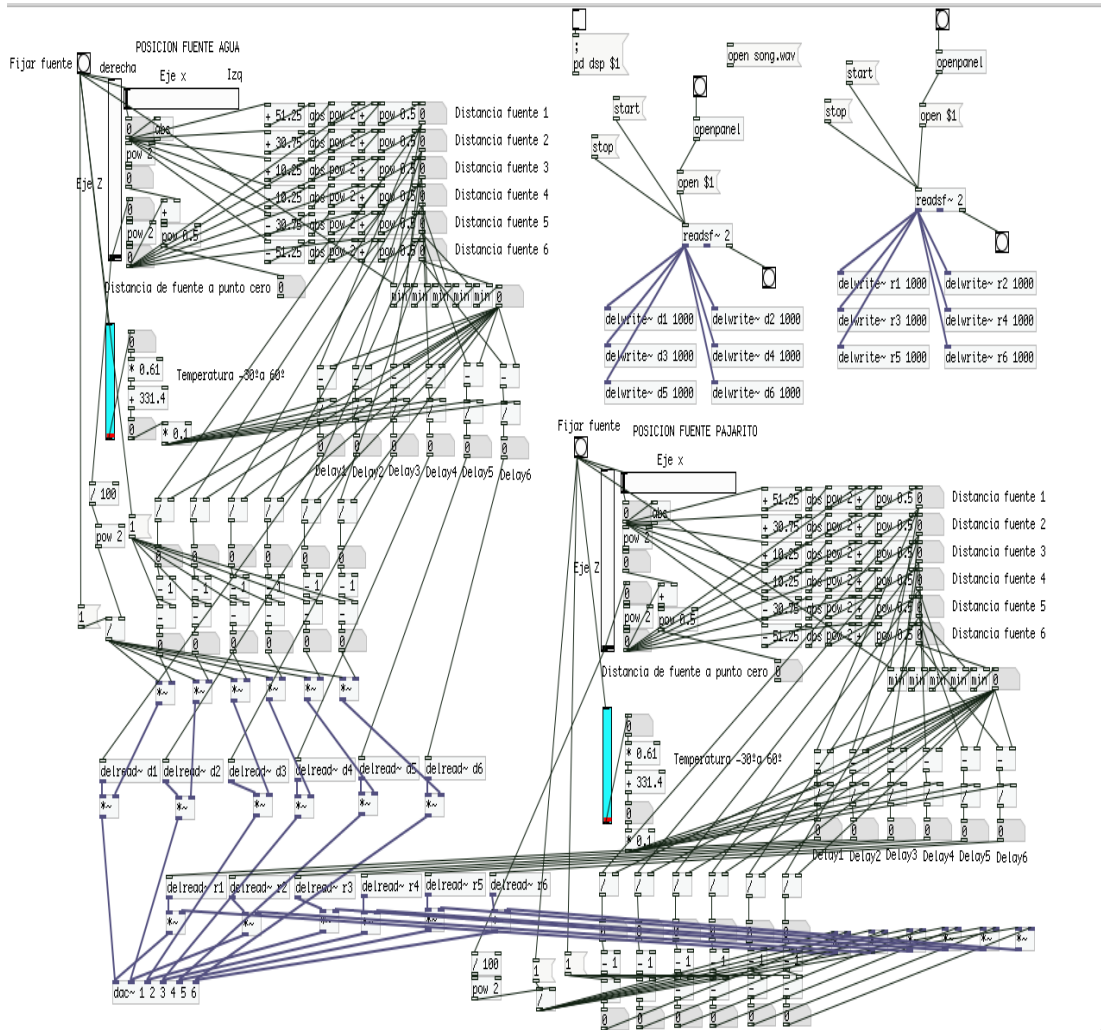
$$dB = 20 \log_{10} \left( \frac{d_1}{d_2} \right)$$

Las atenuaciones finales se dan en un factor de 0 a 1, ya que los niveles que maneja Pure Data son de esta manera, de 0 a 1. En donde 0 es silencio y 1 es el nivel máximo.

El significado de estos últimos factores es que por ejemplo el altavoz uno (1) tiene 0.986 veces el nivel del altavoz dos (2), el cual no tiene atenuación debido a que es el de mayor nivel respecto a los seis altavoces”. Este altavoz es el de mayor amplitud debido a que es el altavoz más próximo a la fuente virtual. Este proceso se repite para cada uno de los altavoces.

El código final del algoritmo en Pure Data implementado es:

Imagen 11: Aplicación informática en Pure Data



Además de todo el proceso anteriormente explicado se tienen los respectivos botones de carga y reproducción para las dos fuentes, a las cuales se les hace el mismo proceso, pero por separado. Es decir, el proceso es el mismo para todas las fuentes que se quieran utilizar, pero se hace por separado; es decir, se copia el mismo código, el mismo algoritmo para cada fuente. En esta imagen se observan solamente dos fuentes.

## 6.5. Cálculos teóricos

### 6.5.1. Potencia acústica

Para obtener la potencia acústica, se partió en convertir la señal eléctrica a acústica (nivel de presión sonora) como se han mencionado en procedimientos anteriores de **la sección 6.2** de esta medición de la sensibilidad, la cual obtendremos este valor inicial en el nivel de presión sonora. A continuación, para la obtención de la potencia acústica se aplicará las formulas mencionadas en **la sección 5.6.2**

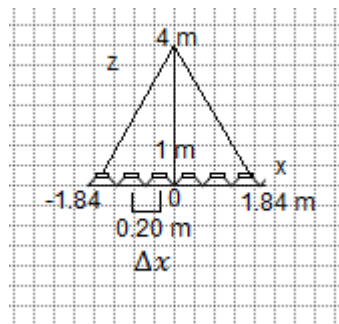
$$R = 10^{\frac{87 \text{ dB/w} - 112 \text{ dB/w}}{10}} * 100\% = 0.3 \%$$

$$W_{\text{Potencia acústica}} = \frac{0.3}{100 \%} * 60 \text{ Watt RMS} = 0.18 \text{ Watt Acústico}$$

Como se muestra en la en la **sección 7.5** y en **tabla 20 (Capitulo:4 análisis teóricos y resultados)** los resultados de la potencia acústica de cada altavoz y el arreglo lineal con su respectivo análisis.

### 6.5.2. Frecuencia aliasing

**Imagen 12:** Plano cartesiano del desplazamiento de la fuente virtual en x y z



Como se muestra en la imagen 19 el plano cartesiano del desplazamiento de la fuente virtual, en la profundidad Z en lejano del arreglo (4 m) y los más cercano (1 m), y en el eje X sus máximos (-1.84) y (1.84 m), estas medidas están en centímetros en el software. Para el cálculo se tuvo en cuenta donde  $c$  velocidad de propagación del sonido,  $\Delta x$  la separación de cada parlante, y la dirección de incidencia de la fuente virtual.

- Tengo la distancia 1 (1 m) y la distancia 2 (4m) con respecto a la profundidad

$$\frac{1m}{4m} = \frac{x}{1m}$$

$$x = 0.25m$$

- Obteniendo la dirección repartida en profundidad, la sumo, tanto en su eje negativo y positivo de X.

$$-1.84m + 0.25m = -1.59 m$$

$$1.84m + 0.25m = 2.09 m$$

- Ya teniendo los resultados de ambos extremos en conjunto con la profundidad restamos estas diferencias.

$$2.09m - 1.59m = 0.50 m$$

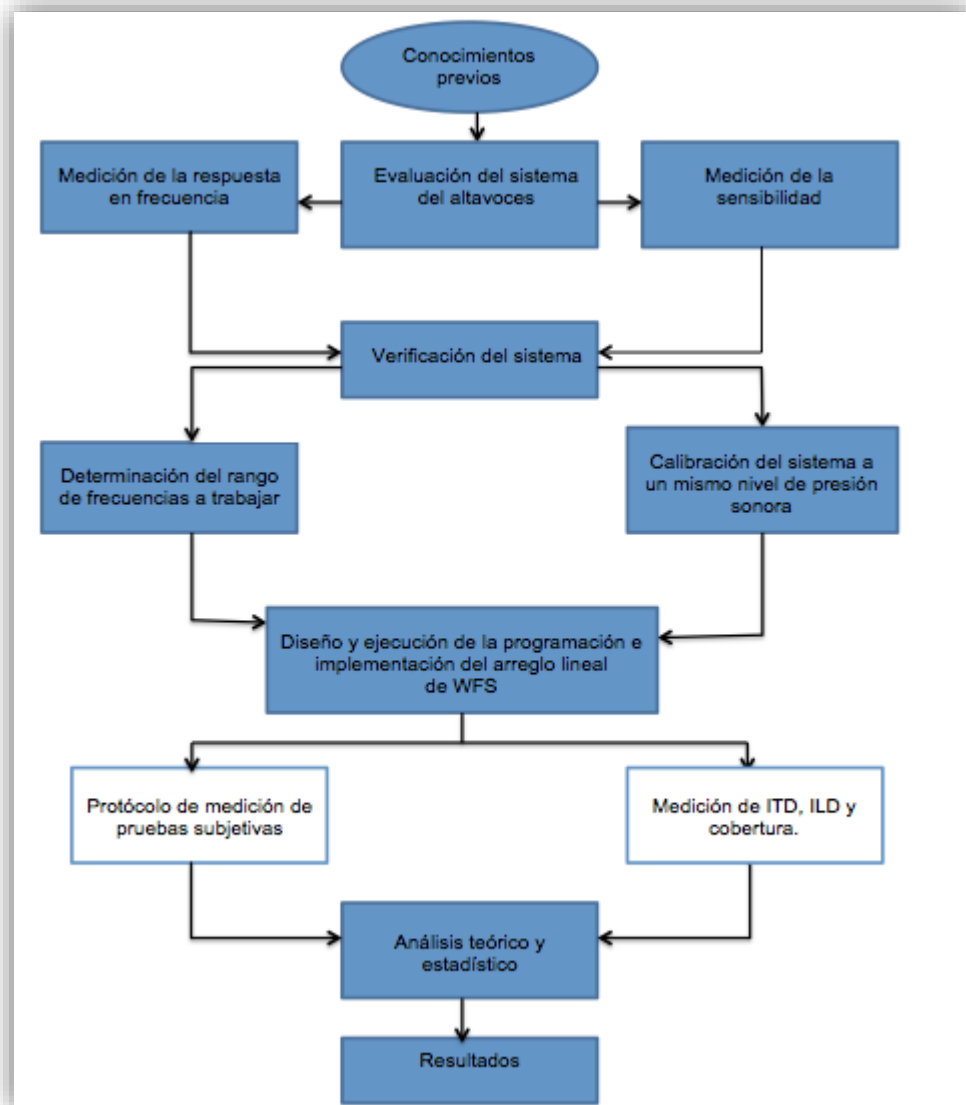
- Esta distancia obtenida será dividida por las medidas físicas del arreglo total que es de 1.38 m

$$\frac{0.50m}{1.38m} = 0.36$$

- Ahora para hallar la frecuencia aliasing se tiene las distancias entre altavoz 0.20m, este valor se multiplicará con la total distribución de la fuente virtual (0.36) a lo largo del arreglo.

$$f_{alias} = \frac{343 \frac{m}{s}}{0.36 * 0.20m} = 4763.88 Hz$$

### DIAGRAMA DE BLOQUE DEL PROYECTO: CAPÍTULO 3



## 6.6. Cobertura

Como primera medida se realizó una circunferencia polar cada 10 grados, la cual fue utilizada para medir el nivel de presión sonora. A continuación, se verificó que los niveles de cada altavoz (mismo SPL a 1 metro 1000 Hz para la calibración), se procedió a medir la directividad a 1 metro del arreglo para las frecuencias de 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz y 4 kHz para determinar el ángulo de cobertura para cada una de ellas. Como último paso se tiene en cuenta los resultados de directividad para cada frecuencia mencionada, los cuales se pueden observar en la **sección 9.3** con los respectivos ángulos de cobertura y la explicación detallada de cómo fueron obtenidos.

**Imagen 13:** Montaje de la medición de la directividad del arreglo lineal



## 6.6. Medición de la Diferencia Interaural de Intensidad y Tiempo

En esta medición se usó la cabeza binaural (Cortex 0.1 dB MK2b; especificaciones **Anexo A**) para medir estos parámetros; inicialmente se verificó que cada micrófono de ambas orejas estuviese recibiendo el mismo nivel, colocando al transductor en todo el centro del arreglo lineal, de tal manera que ambos canales conectados a la interfaz de audio (Presonus Studio Mobile), permitieran monitorear la señal entrante, visualizada en los medidores de nivel del software de audio Cubase 8.

Continuando con el proceso, se calibró el sistema emitiendo ruido blanco filtrado entre las frecuencias de 500 Hz a 4 kHz, a una distancia de 1 metro del arreglo lineal y altura 1.20 metros. Luego se procedió a colocar el sonómetro en el centro del arreglo, a cero grados del plano horizontal del arreglo lineal de WFS, con la misma distancia y altura mencionada, para así proceder con la medición real, haciendo el mismo procedimiento anterior.

**Imagen 13:** Montaje de la medición de la diferencia Interaural de Intensidad y Tiempo

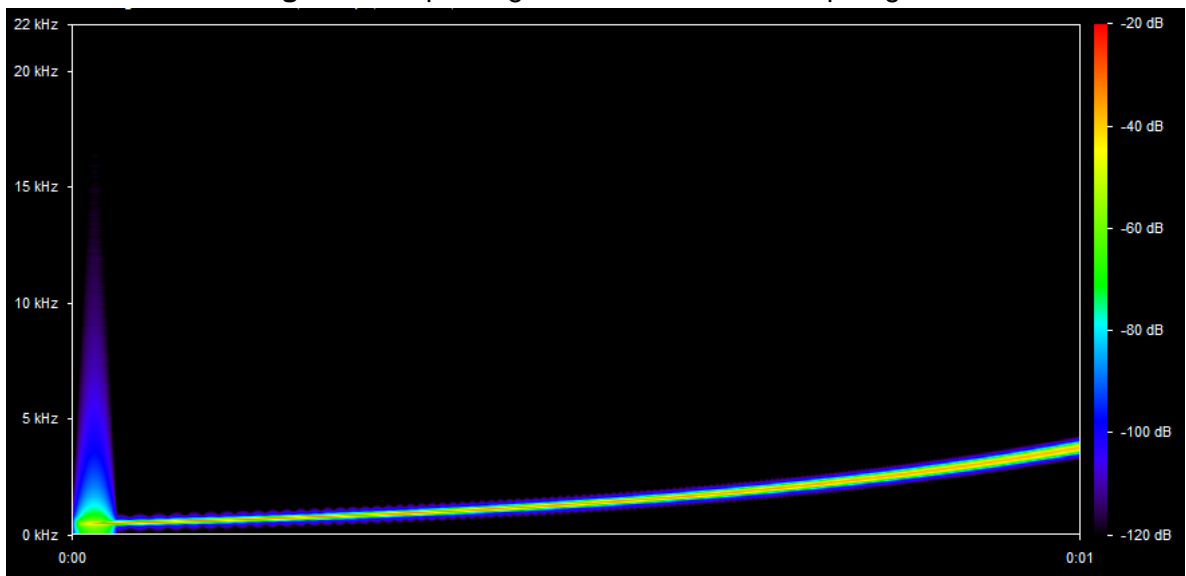


Para la medición de los parámetros de ILD e ITD se requiere un impulso para visualizar el momento instantáneo de la captura de la señal de audio; para este

propósito se creó una señal “Sweep Log.wav” filtrado de 500 Hz a 4 kHz de una duración de 1000 ms, del programa Demo NC-Tone Generator.

Para capturar la señal impulso proveniente del arreglo lineal, ubicadas en 5 coordenadas ingresadas en el software diseñado, se utilizó la cabeza binaural, grabando estos audios en Cubase. Se movió la cabeza binaural en -90, -75, -60, -45, -30, -15, 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90 grados. Para cada grado se utilizaron los 5 puntos de la fuente virtual móvil que contiene una señal de audio procesada que se envía a cada fuente secundaria.

**Imagen 14:** Espectrograma de la Señal Sweep Log.wav

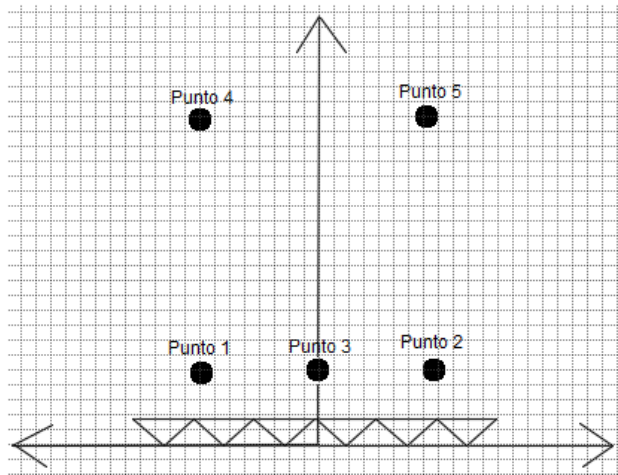


**Tabla 2:** Coordenadas de la medición del ITD e ILD

	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
X [cm]	-129	129	0	-130	130.7
Y [cm]	100	100	100	300.7	300.7



**Imagen 15:** Coordenadas visualizadas en el plano cartesiano



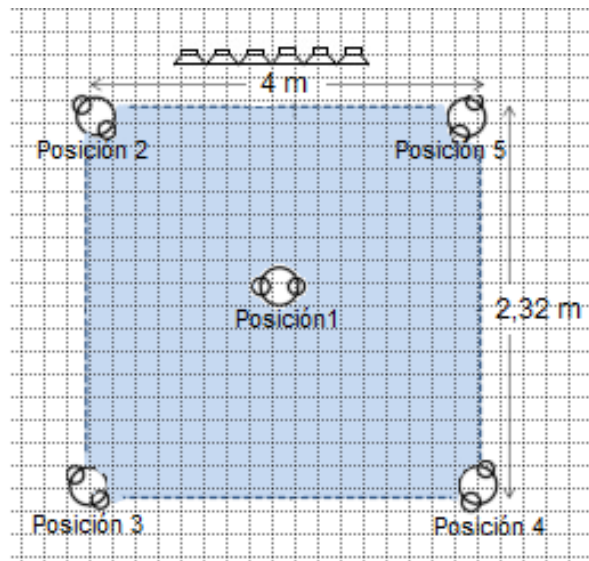
## **6.7. Protocolo de medición de las pruebas subjetivas de la percepción sonora del prototipo**

### **6.7.1. Evaluación de la cobertura del área de audiencia**

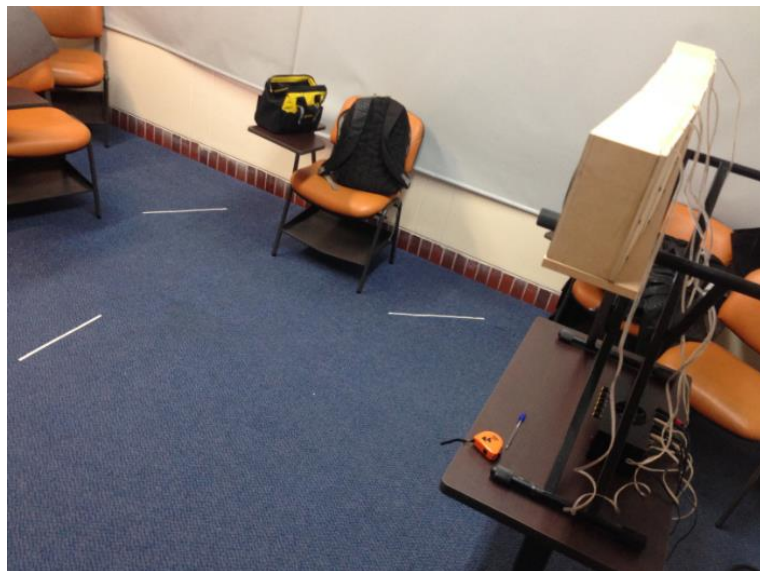
Para evaluar el área de audiencia de manera perceptual, se establecieron 5 posiciones separadas y distribuidas en frente al arreglo de altavoces, como se muestra en la imagen 19. Para validar la percepción sonora de la fuente virtual en diferentes posiciones del área de audiencia, se elaboraron encuestas en donde cada oyente daba su opinión en cada una de las diferentes posiciones escuchando las 4 coordenadas de fuente virtual. El formato de las encuestas se encuentra en el **Anexo B**.

Además, se realizó la medición de nivel de presión sonora cada vez que se duplica la distancia, con el sonómetro, teniendo en cuenta que se calibró el sistema de manera individualmente a 75 dB SPL; debido a que el ruido de fondo registrado fue de 45 dB SPL en el recinto, a partir de este valor se calibró el sistema individualmente. Se debe tener en cuenta que el arreglo lineal se ubicó a una altura de 1.65 m del piso.

**Imagen 16:** Posiciones del área de audiencia



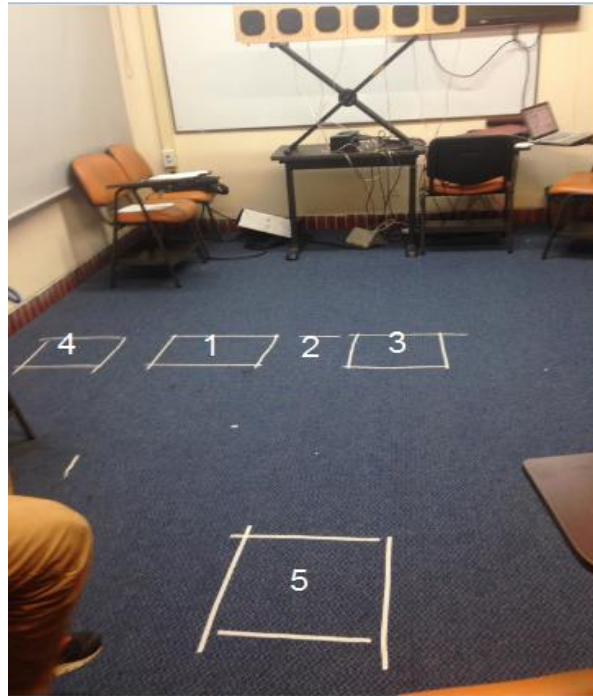
**Imagen 17:** Montaje del test del área de audiencia



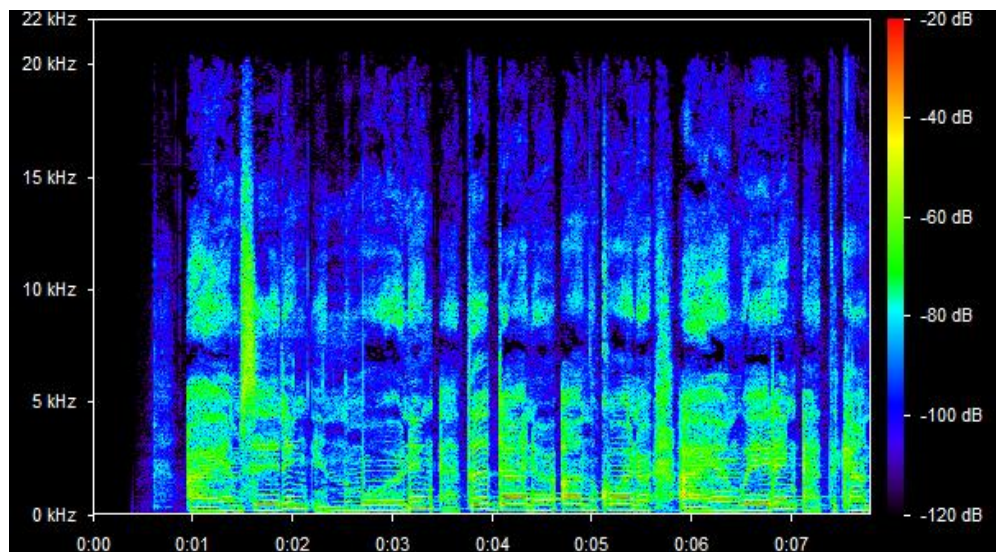
### 6.7.2. Test de localización sonora por grados

El procedimiento de la medición fue el siguiente: se escogieron 5 posiciones de oyente como se muestran en la imagen 29, que significan izquierda (1), centro (2), derecho (3), extremo de izquierdo (4), al fondo centro (5), en la que cada una se reproducía un audio de Suzanne Vega - Tom's Dinner, en "a capela", en la que se le enviaban 4 coordenadas de fuente virtual; cada oyente tenía que percibir la localización en cada una de estas y anotarla en el formato de la encuesta.

**Imagen 18:** Posiciones al frente del arreglo lineal



**Imagen 19:** Espectrograma del Audio Suzanne Vega - Tom's Dinner.wav



### 6.7.3. Test de ubicación sonora en diferentes distancias

Para este test cada participante se situó en el centro del arreglo lineal, para que tuviera más información procedente de los altavoces; se procedió a darles una sesión de entrenamiento para superar la confusión inicial y darles confianza, dejándolos a conocer el estímulo principal –“el pajarito”-, para todo el tipo de pruebas.

En las encuestas se utilizaron 3 audios, que principalmente era ubicaciones en distancias de profundidad -eje (Y)- y en derecha e izquierda de una escala establecida como se puede mostrar en la sección 9.3. El audio del pajarito -eje (X)- para la primera encuesta fue reproducido; el segundo audio se compone de un “pajarito” con una “cascada”, y finalmente un “pajarito” con “ruido blanco”, utilizando 8 fuentes virtuales dentro de estas pruebas.

**Tabla 3:** Pajarito solo

Eje	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6	Punto 7	Punto 8
x (cm)	184	0	-92	92	92	-184	0	-92
y (cm)	220	400	340	100	160	100	280	400

**Tabla 4:** Pajarito con cascada (x=90, z=200)

Eje	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6	Punto 7	Punto 8
x (cm)	92	-92	0	184	-184	0	-92	92
y (cm)	100	340	400	220	100	280	400	160

**Tabla 5:** Pajarito con ruido blanco (x=90, z=200)

Eje	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6	Punto 7	Punto 8
x (cm)	-92	0	92	92	-92	-184	92	0
y (cm)	340	400	100	220	400	100	160	280

Demostración de las Coordenadas de las fuentes virtuales usadas en este test:

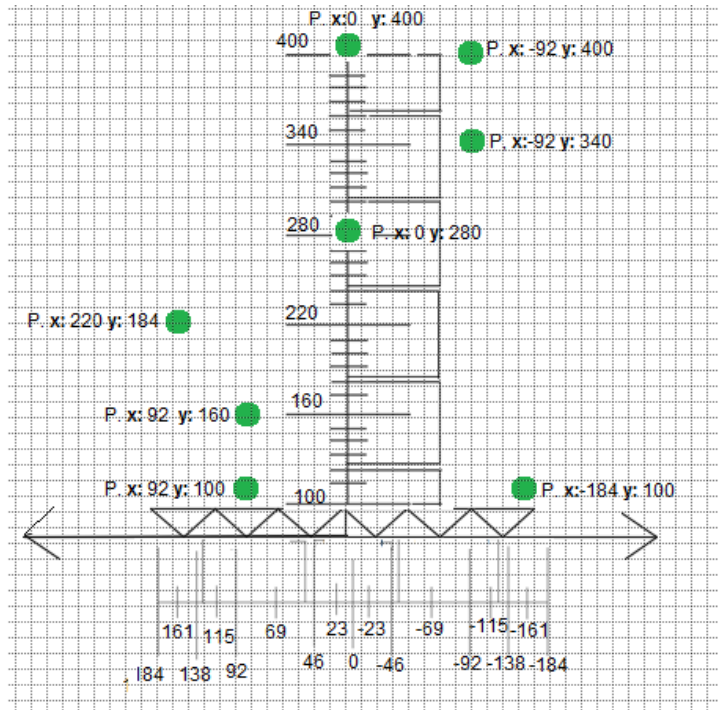
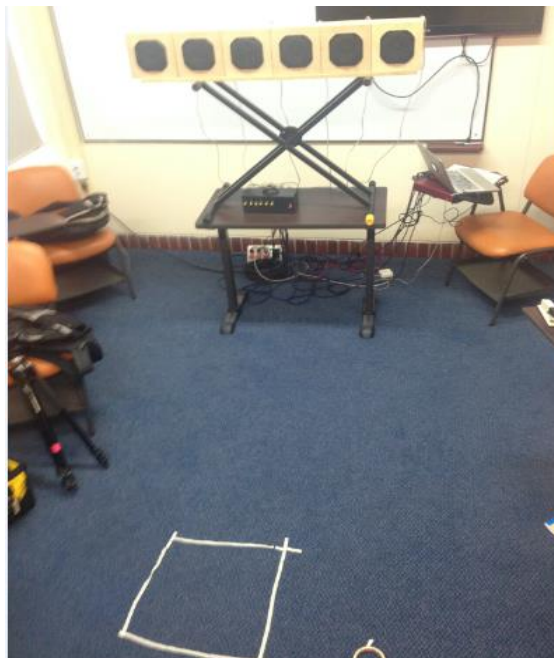
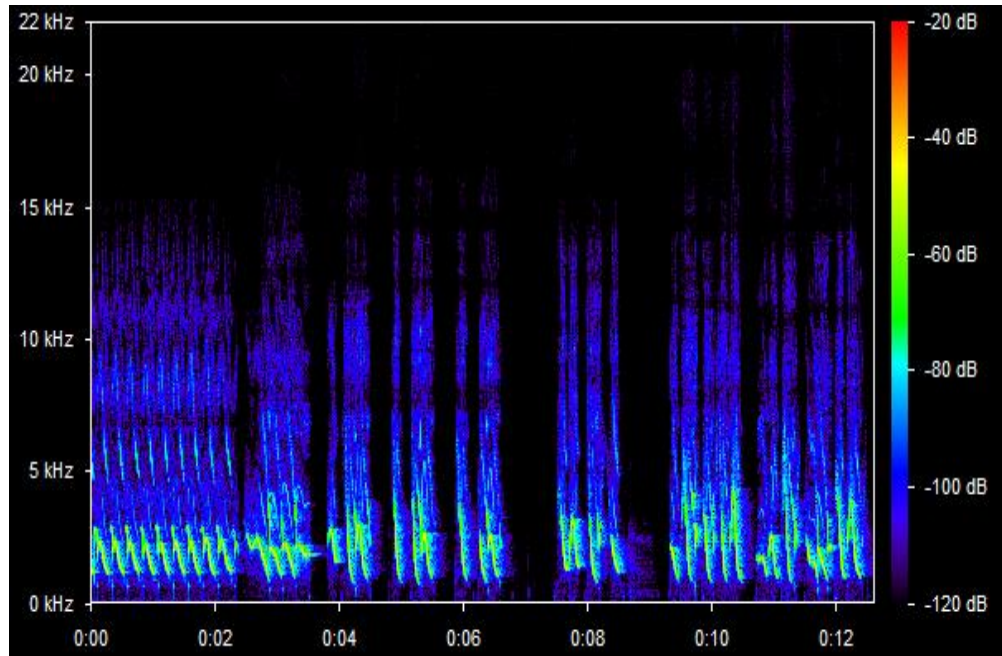


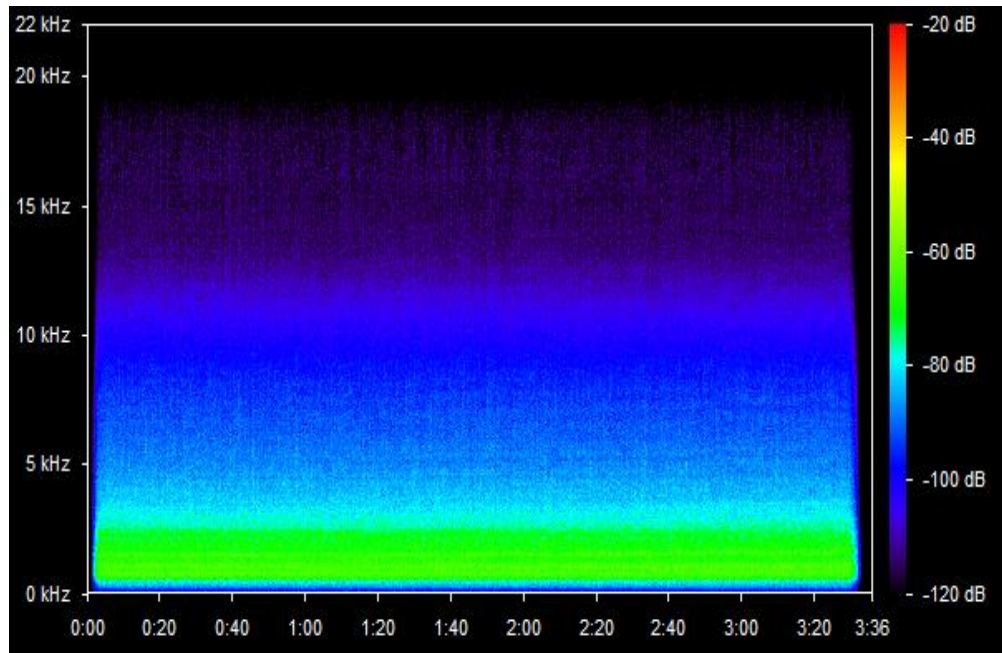
Imagen 20: Montaje del test de distancias



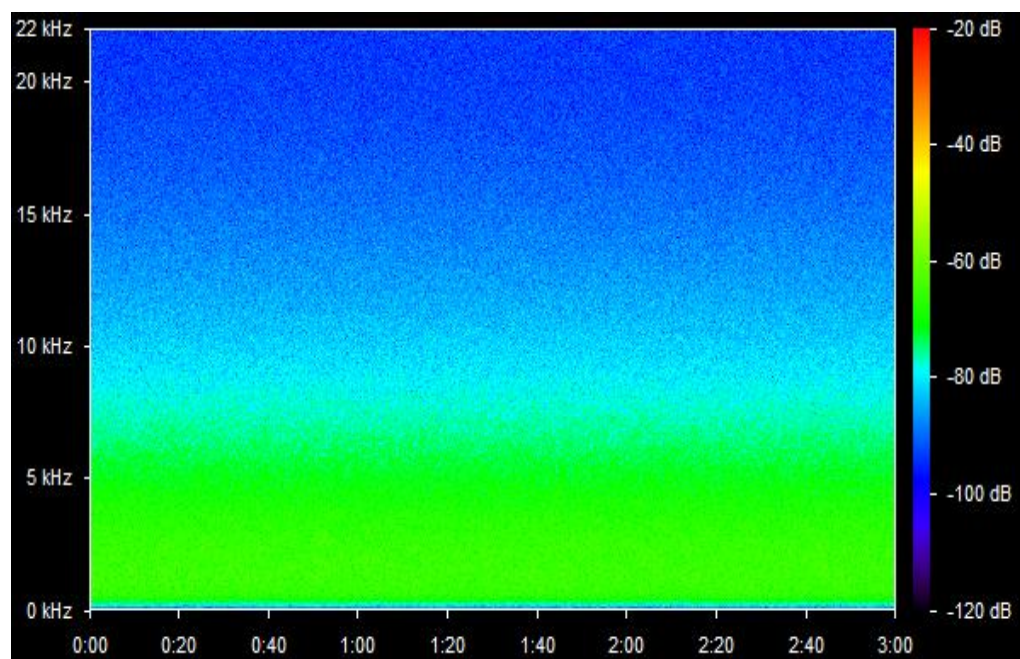
**Imagen 21:** Espectrograma audio pajarito.wav



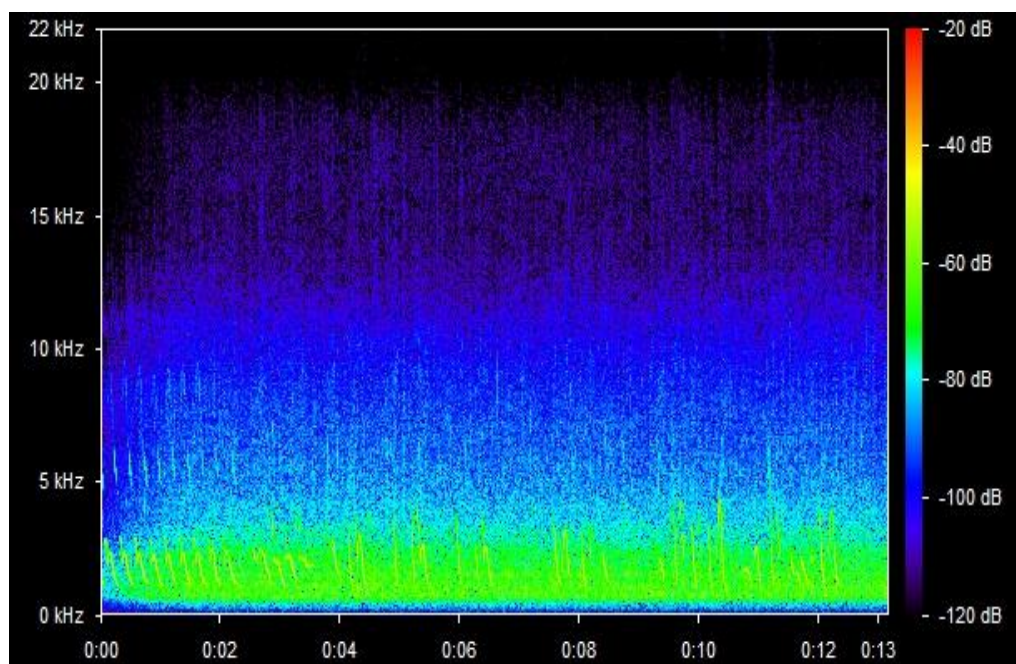
**Imagen 22:** Espectrograma cascada.wav



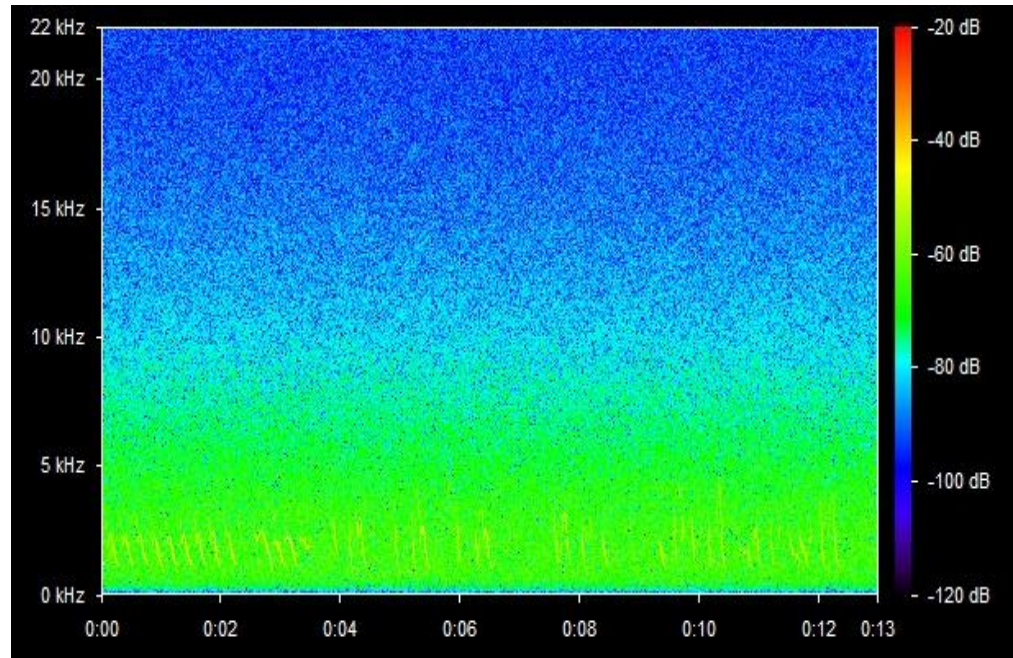
**Imagen 23:** Espectrograma ruido blanco.wav



**Imagen 24:** Espectrograma pajarito con cascada.wav



**Imagen 25:** Espectrograma pajarito con ruido blanco.wav



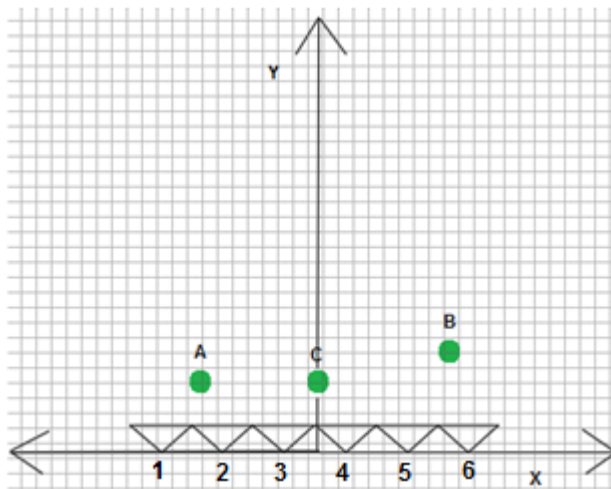
#### **6.7.4. Test de distintas configuraciones de atenuaciones y retardos**

El procedimiento de la medición fue el siguiente: se escogieron 3 distintas configuraciones de fuente virtual, para compararlas entre ellas en forma de encuesta para que cada oyente escogiera la mejor configuración de fuente virtual; cada oyente se podía desplazar alrededor del arreglo lineal analizando perceptualmente la fuente virtual. El audio de reproducción utilizado fue una grabación de unas castañuelas, “Castanets.wav”, de una duración de 11 segundos.

A continuación, se mostrarán las coordenadas representadas por las configuraciones usadas y con sus respectivos parámetros acústicos provenientes de la fuente virtual.



**Imagen 26:** Coordenadas de la fuente virtual del test de configuraciones



Las tablas que se mostrarán con los retardos y atenuaciones de cada parlante; se tomará de izquierda a derecha el orden del primer altavoz como se muestra en la imagen 34.

**Tabla 6:** Configuración A

Altavoces #	Retardos (s)	Atenuaciones (dB)
1	0	1
2	0.12	0.89
3	0.83	0.77
4	1.30	0.64
5	1.79	0.51
6	2.30	0.37

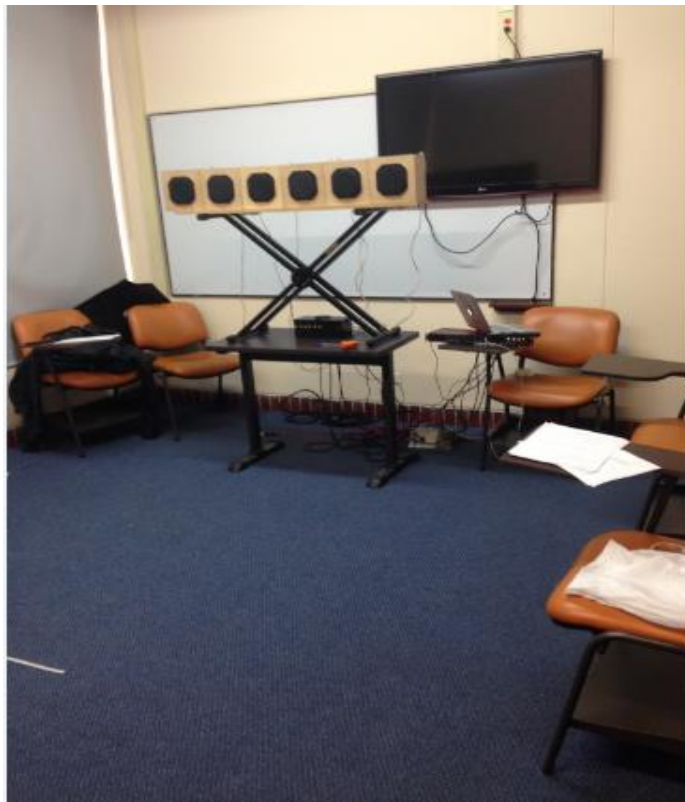
**Tabla 7:** Configuración B

Altavoces #	Retardos (s)	Atenuaciones (dB)
1	1.67	0.71
2	1.27	0.78
3	0.90	0.84
4	0.55	0.90
5	0.25	0.95
6	0	1.00

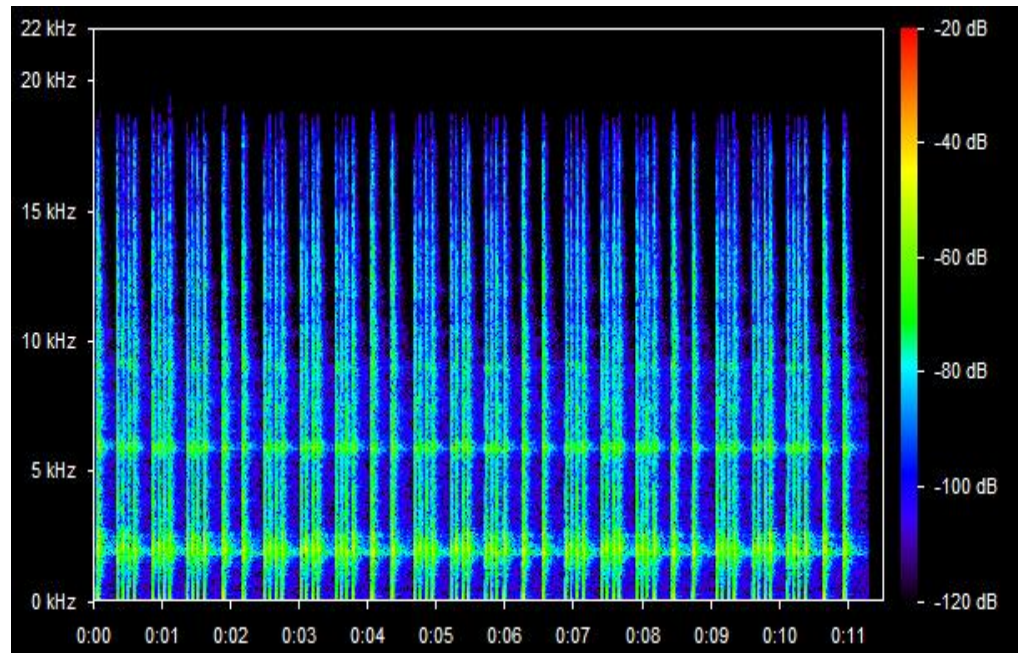
**Tabla 8:** Configuración C

Altavoces #	Retardos (s)	Atenuaciones (dB)
1	0.34	0.88
2	0.11	0.95
3	0	1
4	0	1
5	0.11	0.95
6	0.34	0.88

**Imagen 27:** Montaje del test de configuraciones



**Imagen 28:** Espectrograma de la señal de castañuelas “Castanets.wav”



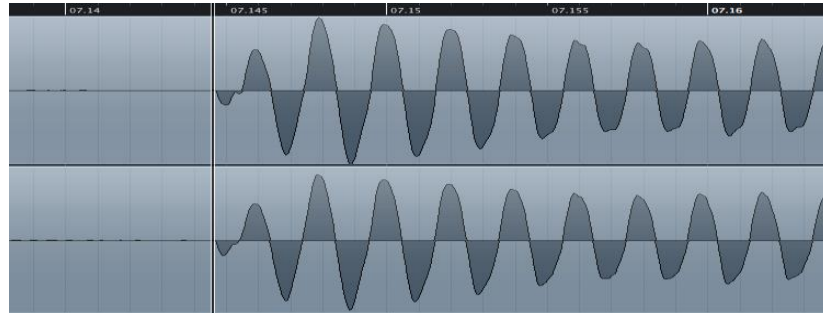
## **6.8. Adquisición de datos de la medición objetiva de la Diferencia Interaural de Tiempo e Intensidad**

Análisis de los audios obtenidos de la medición con la Cabeza Binaural, para obtener los resultados de ITD e ILD.

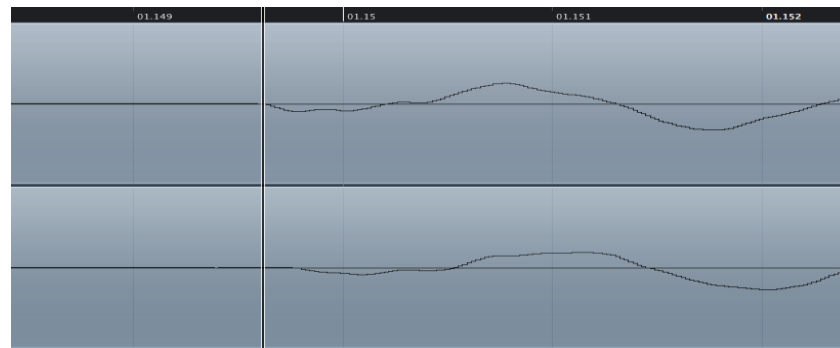
### **6.8.1. Diferencia Interaural de Tiempo**

Se tiene el canal L primer canal y el canal R segundo canal y se aplica la función “Zoom” hasta ver la diferencia entre un canal y otro.

**Imagen 29:** Obtención de datos de tiempos de ambos canales L y R



**Imagen 30:** Obtención de datos las diferencias de tiempos de ambos canales L y R.  
“Zoom de cada señal grabada”



Debido a que el tiempo es demasiado corto, para poder ser registrado con suficiencia por el software, se procede a medir la diferencia en muestras y luego como se tiene la frecuencia de muestreo -de 44100 muestras-, se obtiene la diferencia de tiempo entre una muestra y otra, es decir el ITD.

Como se muestra, a continuación, se determina el tiempo en milisegundos teniendo en cuenta la captura de muestras por segundo que realiza el software (44100).

$$\text{Tiempo en milisegundos} = \frac{\text{Muestras}}{44100} * 10$$

### 6.8.2. Diferencia Interaural de Nivel

Con esto se tiene el ITD para cada punto. Ahora para el ILD se va a usar otra herramienta, un vúmetro para calcular los valores picos de cada audio que contienen la información de cada punto.

indicador de nivel izquierdo (oreja izquierda), indicador de nivel izquierdo (derecha).

**Imagen 31:** Indicador de nivel del cubase 8

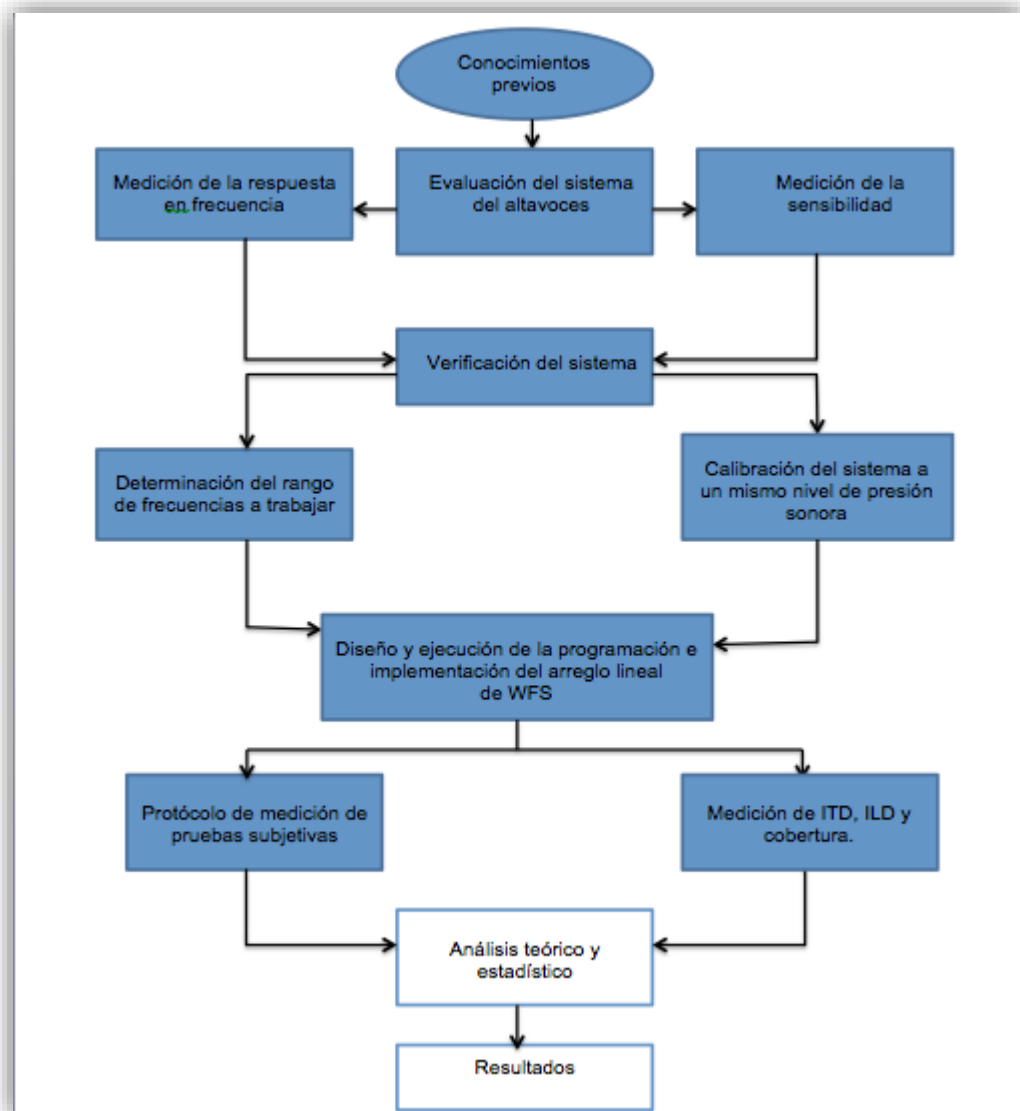


Para el procedimiento de adquisición de los datos de la energía emitida de las frecuencias de 500 Hz, 1 kHz ,2 kHz y 4 kHz, provenientes de un barrido logarítmico senoidal (Log Sine Sweep), se utilizó el Software EASERA 1.1.3 licencia de estudiante, usando como herramienta el cursor para hallar cada valor que mostraba el cuadro de “cursor:” (parte inferior izquierda) como se muestra en la gráfica 3 en unidades de dBFS.

**Gráfica 3:** Promedio de la señal de barrido logartímico senoidal (Log Sine Sweep)



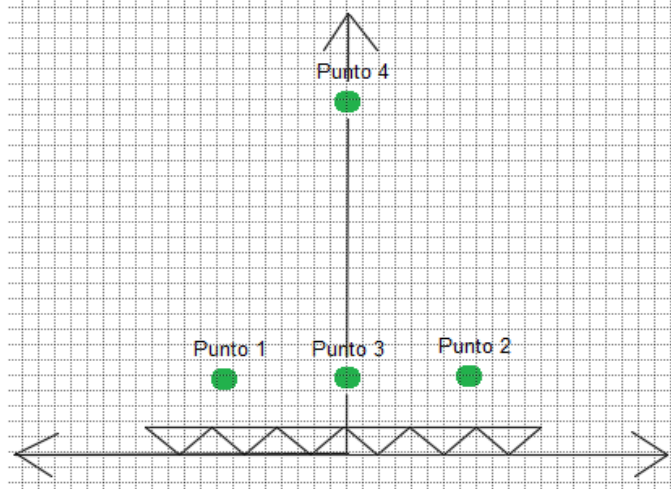
**DIAGRAMA DE BLOQUE DEL PROYECTO: CAPÍTULO 4**



## 7. Análisis teóricos y estadísticos

### 7.1. Evaluación de la cobertura del área de audiencia (objetivo 1)

**Imagen 32:** Coordenadas de las 4 fuentes virtuales



**Tabla 9:** Coordenadas del test de área de audiencia

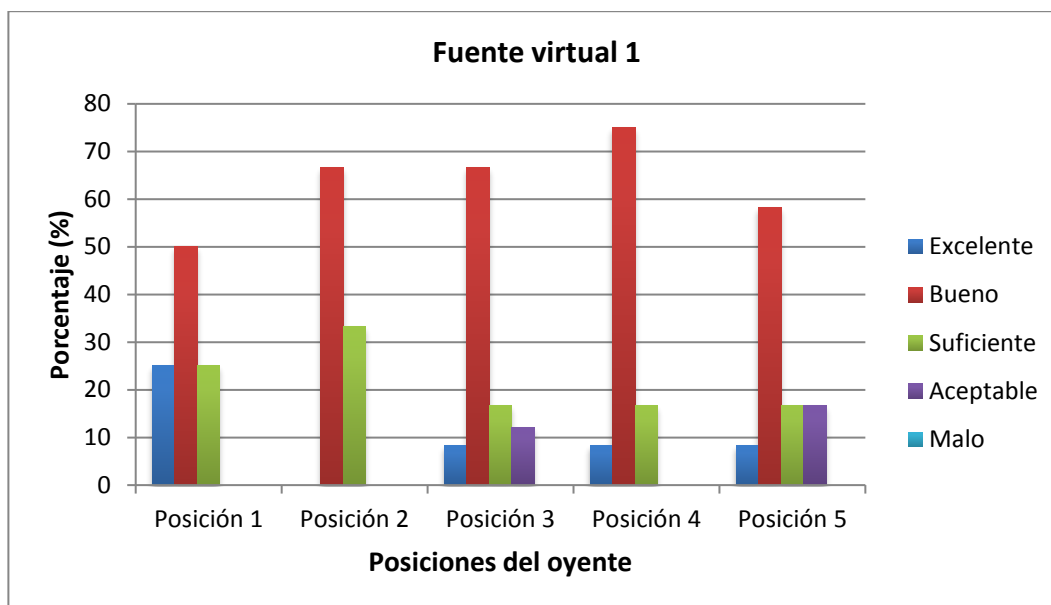
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
X [cm]	-129	129	0	-130
Y [cm]	100	100	100	300.7

**Tabla 10:** Fuente virtual 1

Respuesta	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4	Posición 5
Excelente	25	0	8.3	8.3	8.3
Bueno	50	66.7	66.7	75	58.3
Suficiente	25	33.3	16.7	0	0
Aceptable	0	0	12	0	16.7
Malo	0	0	0	0	0



**Grafica 4: Resultados de la fuente virtual 1**

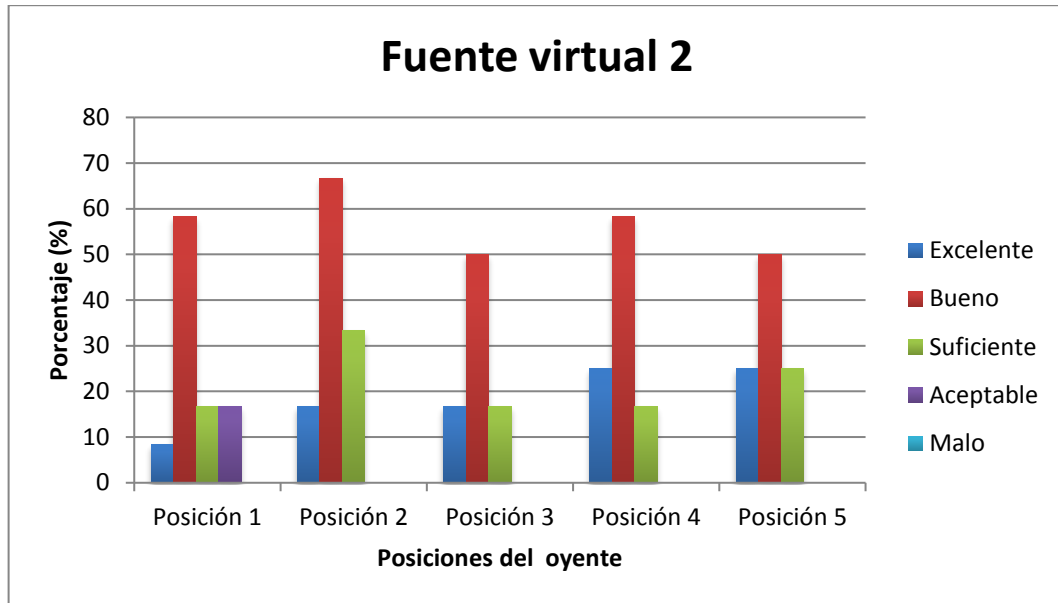


Como se puede observar, para esta ubicación de la fuente virtual (derecha y cerca del arreglo), los oyentes consideraron que la percepción de la ubicación de la fuente virtual es buena para las 5 posiciones ya que los resultados en porcentaje son mayores al 50 %, mientras que la población expresó que la percepción fue aceptable en menos de 20 %. Por lo tanto, se puede evidenciar que la percepción de la fuente fue correcta sin importar la posición de los oyentes en el cualquier punto del área de audiencia.

**Tabla 11: Fuente virtual 2**

Respuesta	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4	Posición 5
Excelente	8.3	16.6	16.7	25	25
Bueno	58.3	66.7	50	58.3	50
Suficiente	16.7	33.3	16.7	16.7	25
Aceptable	16.7	0	0	0	0
Malo	0	0	0	0	0

**Grafica 5: Resultados de la fuente virtual 2**

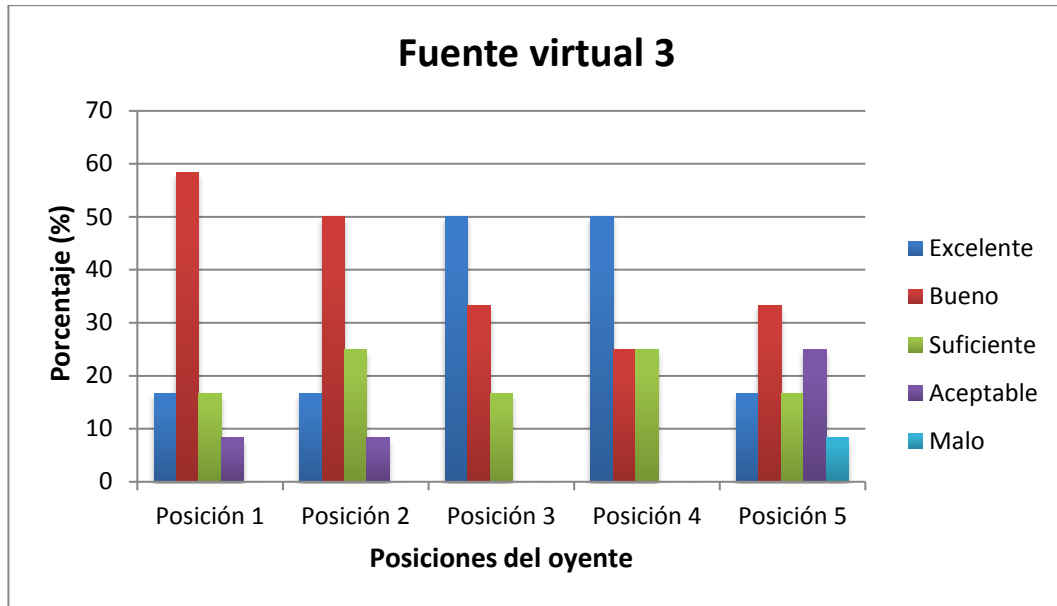


Para esta ubicación de fuente virtual (izquierda y cerca del arreglo), la población expresa con un 50 % que la percepción fue buena en todas las posiciones en el área de audiencia. Además, como se observa no hubo una mala percepción de la fuente virtual.

**Tabla 12: Fuente virtual 3**

Respuesta	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4	Posición 5
Excelente	16.7	16.7	50	50	16.7
Bueno	58.3	50	33.3	25	33.3
Suficiente	16.7	25	16.7	25	16.7
Aceptable	8.3	8.3	0	0	25
Malo	0	0	0	0	8.3

**Gráfica 6: Resultados de la fuente virtual 3**

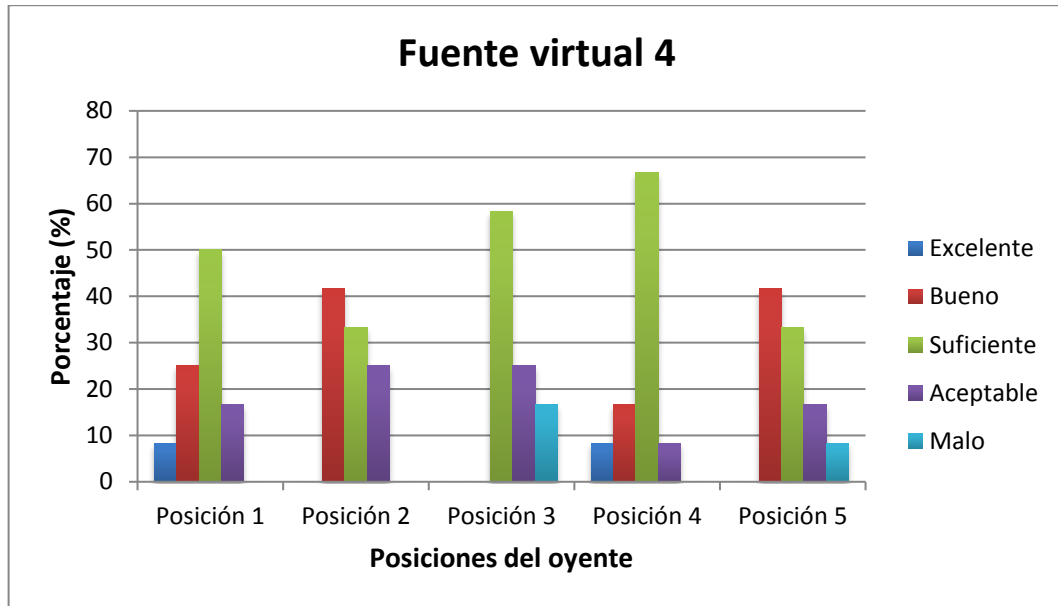


Para esta ubicación de fuente virtual (centro y cerca del arreglo), la población analizada determinó con un 50% que en la posición 1 y 2, la percepción de la fuente virtual fue excelente que para la posición 1 y 2 fue buena con más del 50 %, y sólo el 8.3 % de la población expreso que la percepción de la fuente no era agradable en la posición 5. Se debe tener en cuenta que estos puntos se encuentran cercanos a la ubicación de la fuente virtual como se puede observar en la imagen 1, logrando que para el oyente fuera más fácil la percepción de dicha fuente.

**Tabla 13: Fuente virtual 4**

Respuesta	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4	Posición 5
Excelente	8.3	0	0	8.3	0
Bueno	25	41.7	0	16.7	41.7
Suficiente	50	33.3	58.3	66.7	33.3
Aceptable	16.7	25	25	8.3	16.7
Malo	0	0	16.7	0	8.3

**Grafica 7: Resultados de la fuente virtual 4**



La población expuesta al sistema Wave Field Synthesis determinó que para esta ubicación de fuente virtual (centro y lejos del arreglo), la percepción de la fuente es la más confusa en comparación a las demás ya que su ubicación en el área de audiencia es la más difícil. Además, como se observa, para las posiciones 1, 3 y 4 más del 50 % de la población determine que la percepción es aceptable.

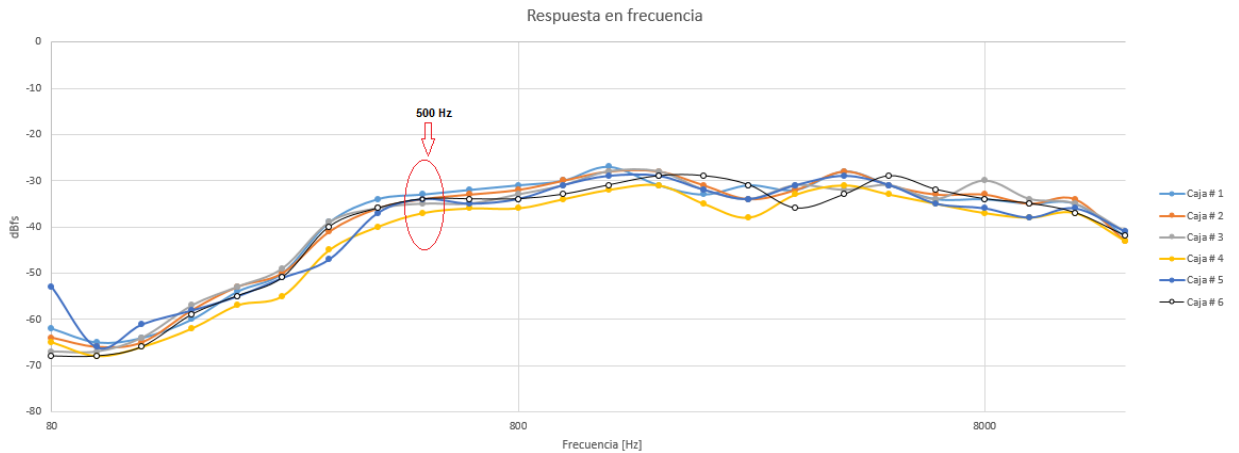
A modo complementario, se ubicaron las 12 personas como se puede apreciar en la siguiente foto, en esto se comprueba ya que los oyentes percibieron la fuente virtual en un mismo punto; esto demuestra que el sweet spot se amplía.



## 7.2. Respuesta en Frecuencia (objetivo 3)

### 7.2.1 Respuesta en Frecuencia de cada caja individual

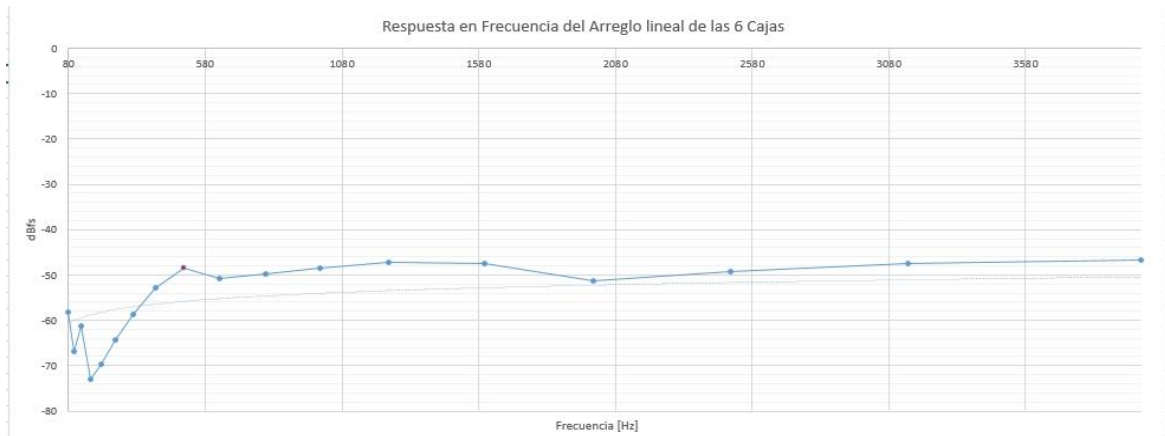
Gráfica 8: Respuesta en frecuencia de las 6 cajas



Los resultados de las gráficas de respuesta en frecuencia de 1/3 de octava de cada caja acústica, demuestran que su respuesta frecuencia útil comienza alrededor de 500 Hz como se muestra en la gráfica círculo rojo, esto permitió un acercamiento de cómo era el comportamiento de cada una, y determinar para qué frecuencias se iban a utilizar; para garantizar una misma y buena zona de trabajo de cada caja acústica, se escogió la zona trabajo con una mejor respuesta más plana.

### 7.2.3. Respuesta en Frecuencia del arreglo lineal

**Gráfica 9:** Respuesta en Frecuencia en 1/3 banda de octava del arreglo lineal de las cajas acústicas visualización desde 80 Hz a 16 kHz

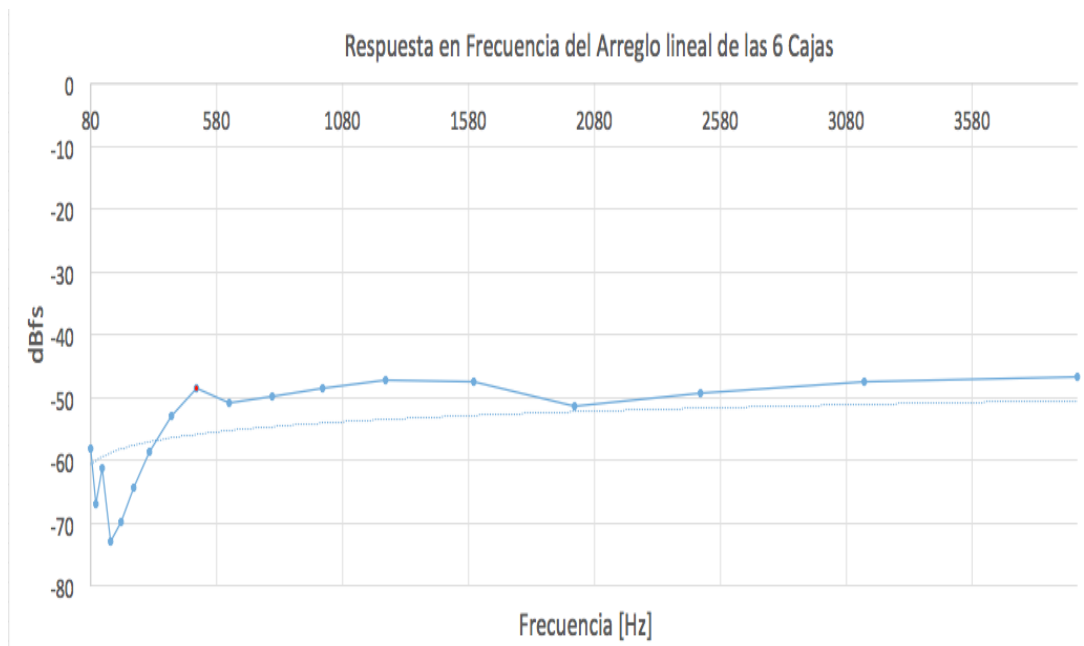


Como se muestra en la gráfica 9, la respuesta de este altavoz de medio rango inicia desde los 500 Hz, y en cuanto a las frecuencias altas, la curva empieza a decaer desde 8 kHz. Como se aprecia, esta respuesta en frecuencia no se parece a los del amplificador, en donde la gráfica es plana y sin picos ni valles; esta gráfica sí contiene estas variaciones normales de un altavoz.

Se puede observar también que existe una respuesta favorable en la banda de frecuencias que favorece a la inteligibilidad de la palabra, “esta banda se encuentra en el rango de los 250 Hz hasta 4 kHz.”<sup>49</sup>.

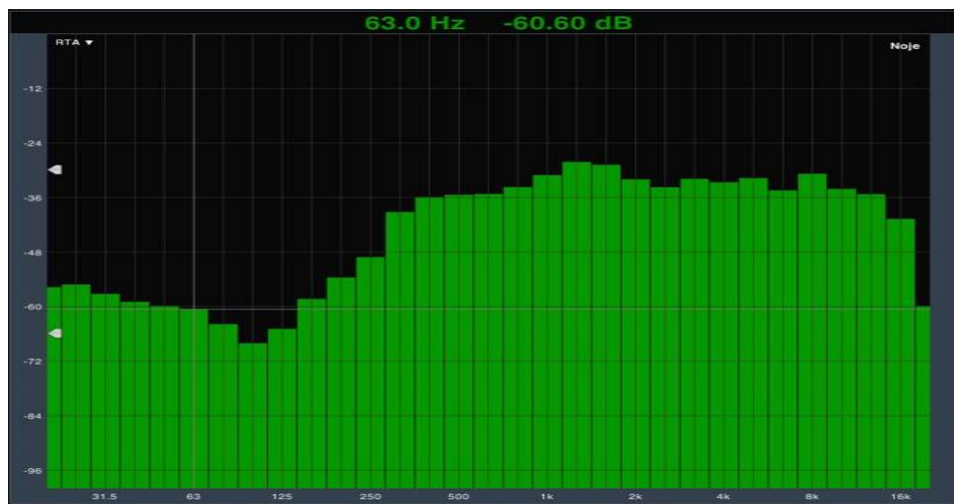
<sup>49</sup>Inteligibilidad de la palabra. [en línea]. Disponible en:  
<[http://www.academia.edu/17975150/INTELIGIBILIDAD\\_DE\\_LA\\_PALABRA\\_HABLADA](http://www.academia.edu/17975150/INTELIGIBILIDAD_DE_LA_PALABRA_HABLADA) > p.3

**Gráfica 10:** Respuesta en Frecuencia en 1/3 banda de octava del arreglo lineal de cajas acústicas mostrada desde 80 Hz a 4 kHz



Para esta gráfica 14 se hizo énfasis en las frecuencias de 500 Hz hasta la 4kHz, donde el arreglo lineal de medio rango presenta un comportamiento más plano y estable, demostrando pérdidas no mayores a -6dB, la única pérdida mayor se presentó de -4dBFS entre las bandas de 1,6 kHz y 2 kHz.

**Gráfica 11:** Respuesta en frecuencia en 1/3 banda de octava del arreglo lineal de cajas acústicas mostrada en Smart Live.



### 7.3. Cobertura (objetivo 3)

A continuación, se muestra el ángulo de cobertura para las frecuencias evaluadas en el sistema. Dichos ángulos se determinaron teniendo en cuenta la siguiente teoría: “Una de las más comunes es mediante patrones polares que nos indican el ángulo de cobertura de un altavoz mostrando el perímetro al cual la presión sonora cae -6 dB SPL.”<sup>50</sup>

A partir de lo anterior, según la gráfica 12 (**directividad**) se puede observar que para 500 Hz el ángulo de cobertura es de 130° (65° a cada lado del eje). Para 1 kHz el ángulo es de 90° (45° a cada lado del eje), para 2 kHz y 4 kHz el ángulo es de 80° (40° a cada lado del eje).

**Tabla 14:** Ángulo de cobertura para las frecuencias del arreglo lineal.

<b>Frecuencia (Hz)</b>	<b>Angulo de cobertura (°)</b>
500	130
1000	90
2000	80
4000	80

Como se puede observar en la tabla 14, los ángulos de cobertura del arreglo van disminuyendo a medida que aumenta la frecuencia, esto se debe a que las cancelaciones son mayores en frecuencias altas como se puede observar en la gráfica 18 “Patrón polar del arreglo lineal”. Se debe tener en cuenta que el análisis solo se realiza para 180° en la parte frontal del arreglo, ya que la parte trasera del mismo no es relevante para llevar a cabo la técnica.

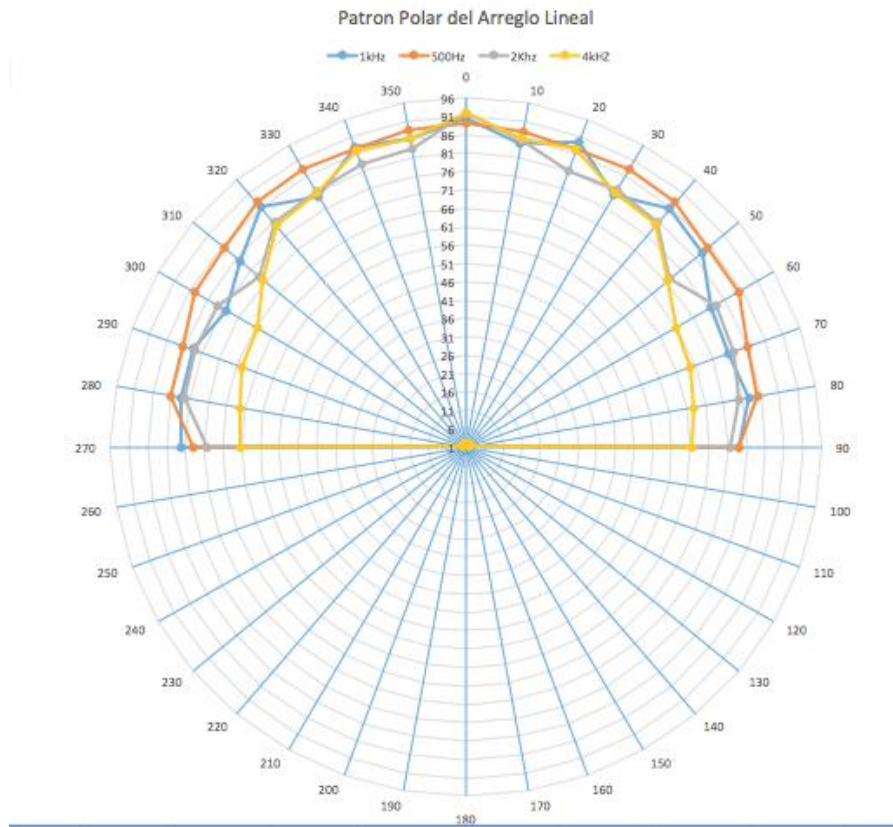
Por lo tanto, el arreglo permite abarcar la mayor parte en cuanto a la energía irradiada por el arreglo lineal, ya que como se mencionó anteriormente se tiene en cuenta los 180° de la parte frontal del arreglo y la cobertura menor alcanzada por el mismo es de 80° en las frecuencias de 2 kHz y 4 kHz.

---

<sup>50</sup> <http://soundcheck.com.mx/interaccin-acstica-y-su-aplicacin-en-arreglos-de-altavoces-parte-ii/>



**Gráfica 12:** Patrón polar del arreglo lineal de 6 altavoces



En 500 Hz se puede observar que para los lados laterales del arreglo entre los grados de 0 ° a 60° (parte lateral derecha) y entre 300° y 330° (parte lateral izquierda) hay interacción constructiva de los altavoces, es decir hay sumas energéticas en cuanto al nivel de presión sonora, mientras que para 70° y 290° hay interacción destructiva (cancelaciones), esto puede deberse a que en dichos grados se encuentra los extremos del arreglo lineal. El arreglo es omnidireccional para dicha frecuencia.

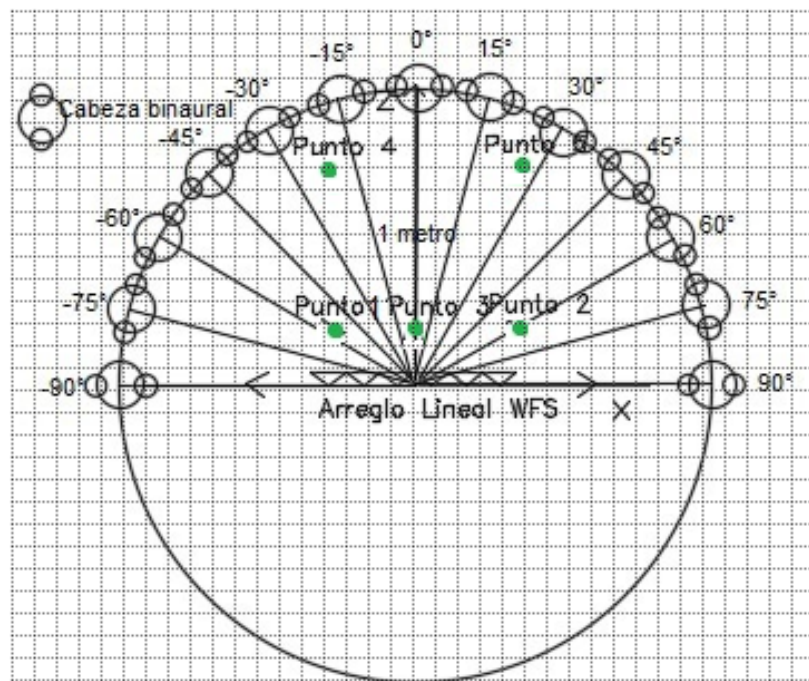
Para la frecuencia de 1 kHz se puede observar que se evidencian más cancelaciones que para la frecuencia de 500 Hz, en el margen de los grados de 0 a 40° se pueden ver las sumas energéticas más importantes, aproximadamente de 7 dB SPL entre los grados adyacentes y en los grados de 320° hasta 340°, con sumas energéticas de 8 dB. Mientras que para los grados de 30°, 300° y 330° se producen cancelaciones importantes ya que hay disminuciones de 5 dB SPL, 9 dB SPL y 10 dB SPL respectivamente con respecto a los grados consecutivos a estos.

Para la frecuencia de 2 kHz existe un comportamiento similar al anterior ya que empiezan a observarse cancelaciones en los grados 20°, 50°, 310° y 350° con disminuciones de 9 dB como el anterior. Como se puede evidenciar el arreglo empieza a ser direccional hacia el ángulo de 0° (parte frontal del arreglo).

Para la frecuencia de 4 kHz se puede observar que en el margen de 0 a 40° hay sumas importantes (parte lateral derecha) con sumas de aproximadamente de 8 dB entre 0 y 20° y entre 320° y 340° (parte lateral izquierda) con sumas de aproximadamente de 6dB SPL. Mientras que se pueden observar que la cancelación considerable es la que hay en 350° con 7 dB SPL. Se puede observar que el comportamiento tiende a ser direccional hacia la parte frontal del arreglo.

#### 7.4. Diferencia Interaural de Tiempo e Intensidad (objetivo 3)

**Figura 19:** Grados utilizados en la medición del arreglo WFS



##### 7.4.1. Diferencia Interaural de Tiempo

Se muestran las tablas con los promedios de las mediciones de 3 repeticiones por cada punto. Se movió la cabeza binaural a diferentes grados en el plano horizontal y para varios puntos de la fuente virtual móvil, se observa que en cada tabla presentada los tiempos de arribo son cercanos y cortos unos entre otros, con

respecto a los grados. Por lo tanto, las diferencias interaurales de tiempo no son significativas a la hora de ubicar la fuente virtual móvil. “El rango efectivo del ITD está comprendido entre 0,005 y 1 [ms]”<sup>51</sup>

**Tabla 15:** Resultados de la medición del punto 1

Punto 1													
Grados	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	-90°	-75°	-60°	-45°	-30°	-15°
ITD [ms]	0.18	0.05	0.07	0.23	0.18	0.09	0.71	0.58	0.10	0.02	0.26	0.25	0.07

Para esta ubicación de la fuente virtual como se observa en la tabla 15 los tiempos son muy cercanos, excepto en los grados de 90° y -90°, donde la cabeza binaural se encuentra totalmente perpendicular a la fuente, lo cual representan sus máximas diferencias de tiempo, a pesar de estos dos puntos máximos en los demás grados mantiene estos tiempos menores.

**Tabla 16:** Resultados de la medición del punto 2

Punto 2													
Grados	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	-90°	-75°	-60°	-45°	-30°	-15°
ITD [ms]	0.31	0.20	0.20	0.18	0.05	0.14	0.53	0.66	0.20	0.16	0.16	0.09	0.25

Para esta ubicación de la fuente virtual se obtuvieron resultados muy parecidos a la anterior tabla 15, ya que estas coordenadas están desplazadas hacia los lados, que también tiene los mismos puntos máximos de diferencias tiempo en los grados de 90° y -90°.

**Tabla 17:** Resultados de la medición del punto 3

Punto 3													
Grados	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	-90°	-75°	-60°	-45°	-30°	-15°
ITD [ms]	0	0.06	0.09	0.23	0.07	0.23	0.51	0.53	0.20	0.18	0.20	0.25	0.05

En esta tabla 17 se obtuvieron los resultados con la diferencia de tiempo más cercanas a ceros, ya que esta fuente virtual se posiciona en el centro del arreglo. Sin embargo, se logran valores adecuados también en los puntos más críticos, es

<sup>51</sup> León Buitrón, J. (2003). Desarrollo de un software de procesamiento para obtener señales de audio binaurales a partir de señal de audio monofónicas. Tesis de grado. Universidad de las Américas. p. 38

decir donde se encuentra la cabeza perpendicular a la fuente en sus grados de 90° y 270°, hay una pequeña mejoría en los valores, ya que se hacen más cercanos a cero.

**Tabla 18:** Resultados de la medición del punto 4

Punto 4													
Grados	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	-90°	-75°	-60°	-45°	-30°	-15°
ITD [ms]	0.13	0.23	0.18	0.31	0.07	0.43	0.74	0.60	0.47	0.11	0.28	0.27	0.22

En esta tabla 18 la fuente virtual donde cuyas coordenadas están alejas en cuanto a profundidad (eje z) en la parte izquierda los arreglos obtuvieron diferencias pequeñas de tiempo a medida que aumenta sus grados, esta coordenada por ser las más aleja y posicionada en el extremo tuvieron las diferencias de tiempo más altas en los grados de 90° y 70°.

**Tabla 19:** Resultados de la medición del punto 5

Punto 5													
Grados	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	-90°	-75°	-60°	-45°	-30°	-15°
ITD [ms]	0.15	0.14	0.32	0.99	0.23	0.34	0.62	0.72	0.34	0.14	0.90	0.32	0.15

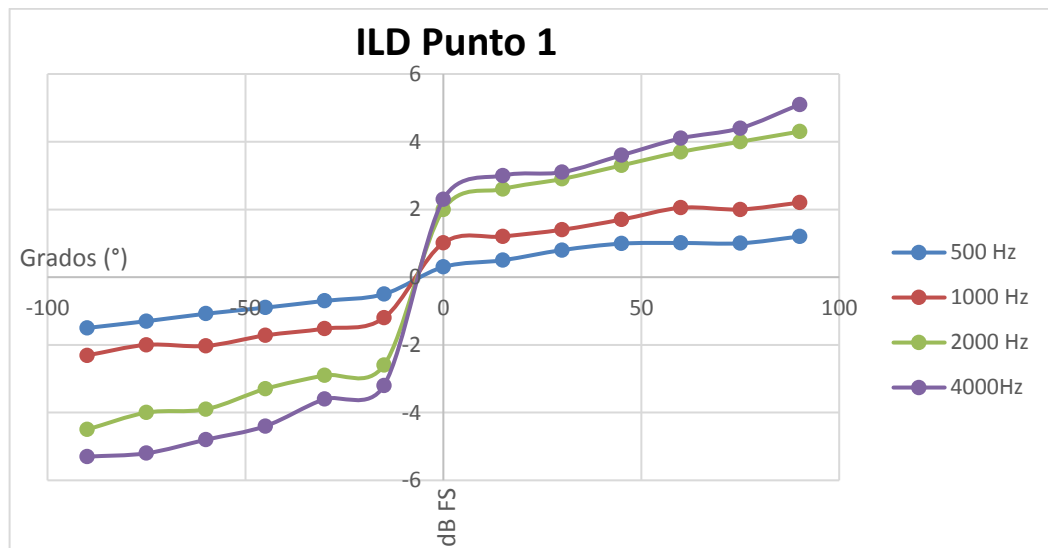
En esta tabla 19 la fuente virtual donde cuyas coordenadas están alejas en cuanto a profundidad (eje z) en la parte derecha del arreglo obtuvieron diferencias pequeñas de tiempo a medida que aumenta el valor de los grados; al igual que la tabla 18, en este sucede lo mismo, es decir, esta coordenada está posicionada al extremo derecho, y también alejada, por ello, los grados de 90° y -90° tienen las diferencias de tiempo altas.

#### 7.4.2. Diferencia Interaural de Intensidad

En las siguientes gráficas se indica el comportamiento del nivel de presión sonora según la posición de la fuente virtual dada en el software. Como se puede observar, a medida que aumenta el ángulo de incidencia y la frecuencia, aumenta la diferencia interaural de intensidad; Para 90°, para todas las frecuencias, la diferencia interaural de nivel es mayor, ya que alguno de los dos oídos de la cabeza binaural está perpendicular a la fuente y por lo tanto recibe mayor presión sonora. Esto de

fundamenta en el hecho que “ILD entre 1 y 2 dB corresponden a las mínimas variaciones perceptibles en el desplazamiento de las fuentes sonoras”<sup>52</sup>

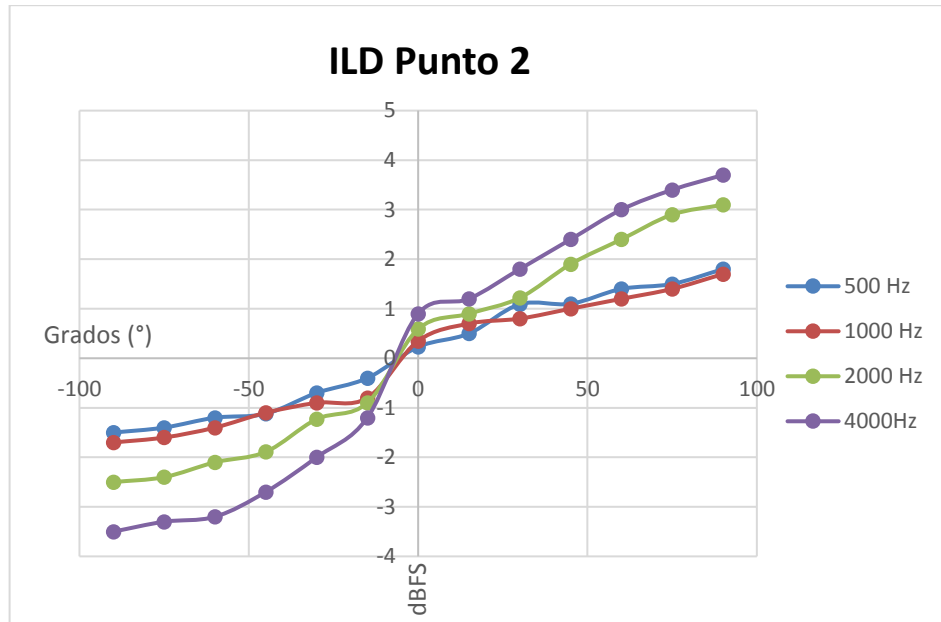
**Grafica 13:** ILD para la primera posición de fuente virtual



Como se puede observar, para las frecuencias de 500 y 1 kHz existen variaciones de menos de 2 dB (desde 0° a 75 °); estas variaciones no son significativas para decir que hubo desplazamiento de la fuente virtual, mientras que para las frecuencias de 2 kHz y 4 kHz las variaciones de nivel son de más de 2 dB: en estas frecuencias sí existe desplazamiento de la fuente y esto se hace más notorio desde 45 ° en adelante ya que se registra una mayor diferencia interaural de tiempo.

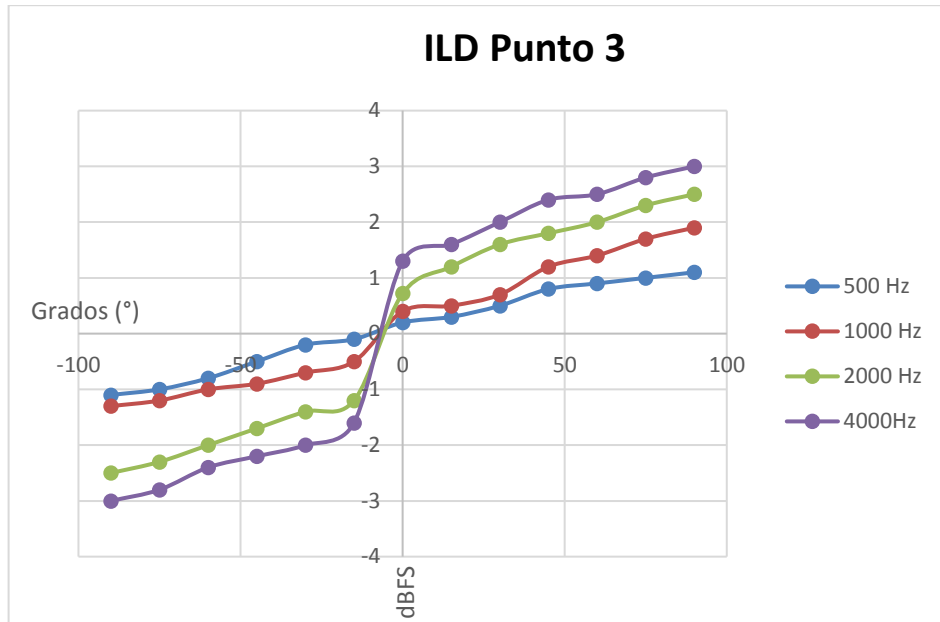
<sup>52</sup>Maggiolo D. Localización: disponible en < <http://www.eumus.edu.uy/docentes/maggiolo/acuapu/loc.html> >

**Gráfica 14:** ILD para la segunda posición de fuente virtual



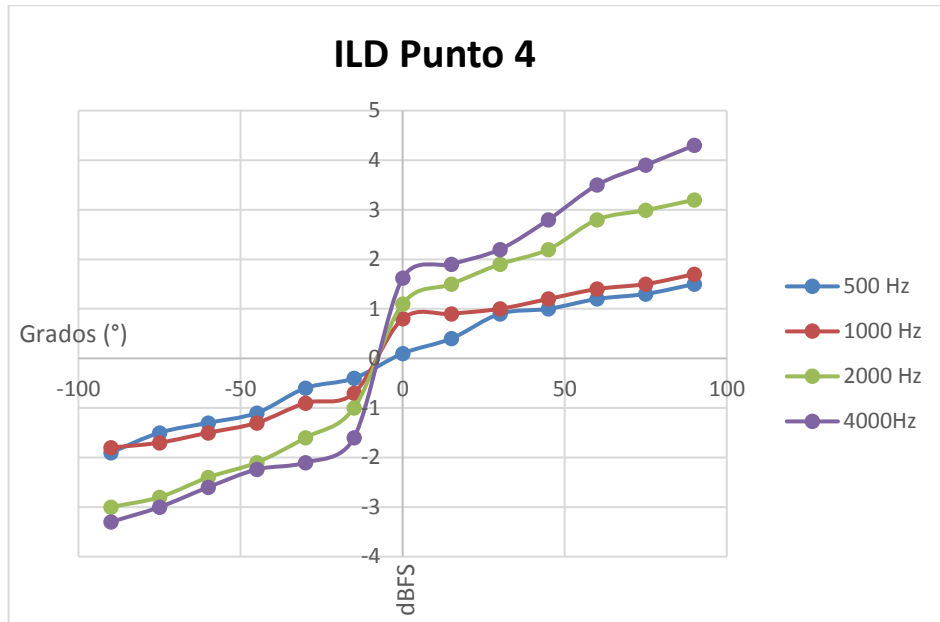
En esta gráfica se puede observar que el comportamiento es similar a la posición 1 de la fuente virtual, con la diferencia de que para las frecuencias de 500 y 1 kHz el desplazamiento de la fuente (variaciones de más de 2 dB) son notorias desde los 60 ° y que para las frecuencias de 2 kHz y 4 kHz estas variaciones de niveles de 2 a 4 dB son más notorias desde los 45° hasta los 90 ° (este último grado presenta la mayor diferencia interaural de tiempo para todas las frecuencias).

**Gráfica 15: ILD para la tercera posición de fuente virtual**



Como se puede observar para la tercera posición de la fuente virtual (en la mitad del arreglo) es el punto en el cual las variaciones de nivel de presión sonora son menores para las frecuencias de 500 y 1 kHz (menos de 2 dB) para los ángulos de  $-90^\circ$  a  $90^\circ$ , esto se puede deber a que este es el punto en el cual la cabeza binaural estaba ubicada al frente del arreglo es decir a  $0^\circ$ . Mientras que para la frecuencia de 2 kHz sí hay variaciones de 2 a 3 dB para los ángulos de  $60^\circ$  en adelante y para los ángulos de  $-60^\circ$  en adelante y para la frecuencia de 4 kHz estas variaciones se hacen notorias desde los  $30^\circ$  en adelante y desde los  $-30^\circ$  en adelante.

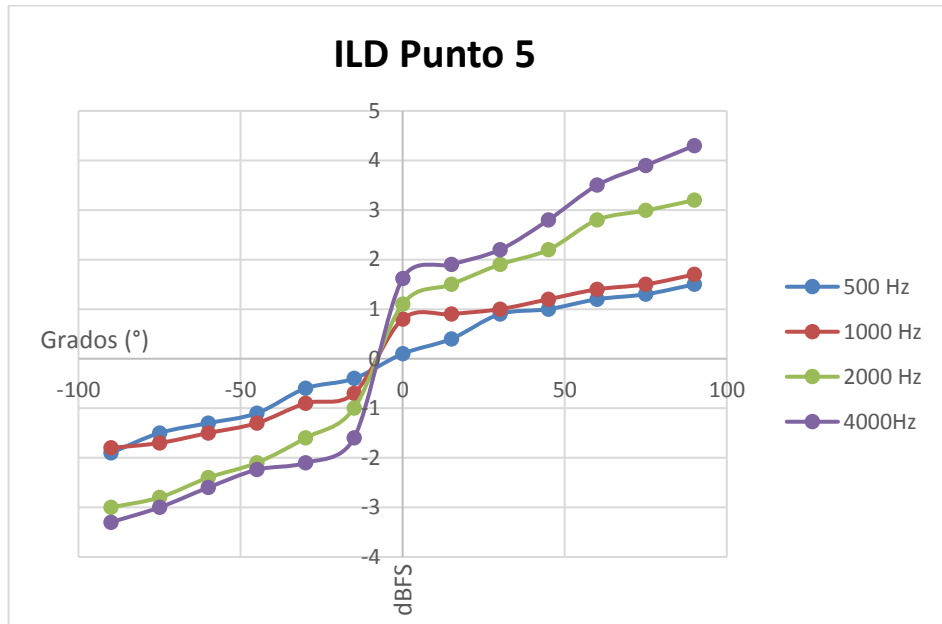
**Gráfica 16: ILD para la cuarta posición de fuente virtual**



Para este punto de posición de fuente, la localización de la fuente es más difícil para las frecuencias de 2 kHz y 4 kHz, ya que las variaciones de nivel de presión sonora son de más de 2 dB para los ángulos de 30° en adelante (para 4 kHz) y para -30° en adelante. Para la frecuencia de 2 kHz las variaciones mayores a 2 dB se dan desde los 45° en adelante y desde los -45° en adelante, haciendo que estas variaciones permitan tener un corrimiento de la fuente. Es decir, que para frecuencias altas la cabeza no percibe la fuente en una única posición.



**Gráfica 17: ILD para la quinta posición de fuente virtual**



Para la última posición de fuente virtual, se tiene un comportamiento muy similar al anterior ya que los cambios de variación de nivel de presión sonora se dan en los mismos grados que el anterior.

### 7.5. Potencia acústica (objetivo 3)

**Tabla 20:** Cálculos de rendimiento y potencia acústica con base en a las mediciones de la sensibilidad

Altavoces #(cajas)	dB/w a 1m (medidas)	Eficiencia %(calculada)	Potencia Acústica; (Vatios acústicos) (calculada)
1	87	0.3	0.18
2	87	0.3	0.18
3	85	0.2	0.11
4	87	0.3	0.18
5	87.2	0.3	0.19
6	87.2	0.3	0.19
Arreglo lineal # (6)	99.8	0.5	0.30

Cada altavoz de la misma marca cuenta con una potencia eléctrica nominal de 60 Vatios eléctricos RMS.

Los resultados medidos mostrados en la tabla 20 muestra la sensibilidad de cada parlante medido individualmente y el arreglo lineal formados por los mismos 6 altavoces. Donde el altavoz que recibe 1 Vatio de potencia eléctrica a 1 metro es capaz de obtener niveles de presiones sonoras altas, teniendo mayor rendimiento a sensibilidades altas.<sup>53</sup>El rango de sensibilidades altas esta de 85 dB/w a 1m a 90 dB/w a 1m.

Los valores de la tabla 20 hacen parte de este rango, quiere decir que estos altavoces con menor potencia eléctrica entran entre los valores altos de niveles de presión sonora.

Los valores de porcentaje obtenidos de 0.31%, 0.20%, 0.33% y 0.50%, describen el comportamiento individual de las fuentes y el comportamiento del arreglo está en los porcentajes mostrados en la tabla 21. Se observa que el altavoz tiene un buen rendimiento con relación a la razón de la potencia eléctrica suministrada, con respecto a la potencia acústica de la salida. En cuanto a la potencia esta mostrada de dos maneras: la presión sonora (sensibilidad), y la otra en relación a su eficiencia en %. Como se muestra, el significado de esto, en relación con el porcentaje, se asegura que, con un rendimiento 0.31% significa que por cada 60 Vatios eléctricos RMS suministrados en su entrada, proporciona 0.18 Vatios acústicos a su salida.

**Tabla 21:** Porcentajes de la eficiencia de un altavoz y su sensibilidad en su relación.

Datos del Altavoz		
Eficiencia	Porcentaje	Sensibilidad dB/w a 1m
0.2	20%	105 dB
0.1	10%	102 dB
0.05	5%	99 dB
0.02	2%	95 dB
0.01	1%	92 dB
0.005	0.5%	89 dB
0.002	0.20%	85 dB
0.001	0.1%	82 dB

<sup>53</sup> <http://www.pbspeakers.com/articles/Guide-to-Speaker-Specifications>.

Tabla tomada de: <<http://www.sengpielaudio.com/calculator-efficiency.htm>>

- Encuesta en la cual las personas puedan dar una opinión subjetiva de la percepción sonora del prototipo.

## 7.6 Encuestas subjetivas sobre la percepción sonora del prototipo (objetivo 4)

### 7.6.1 Test de localización sonora en diferentes distancias

#### 7.6.1.1. Profundidad (Eje y)

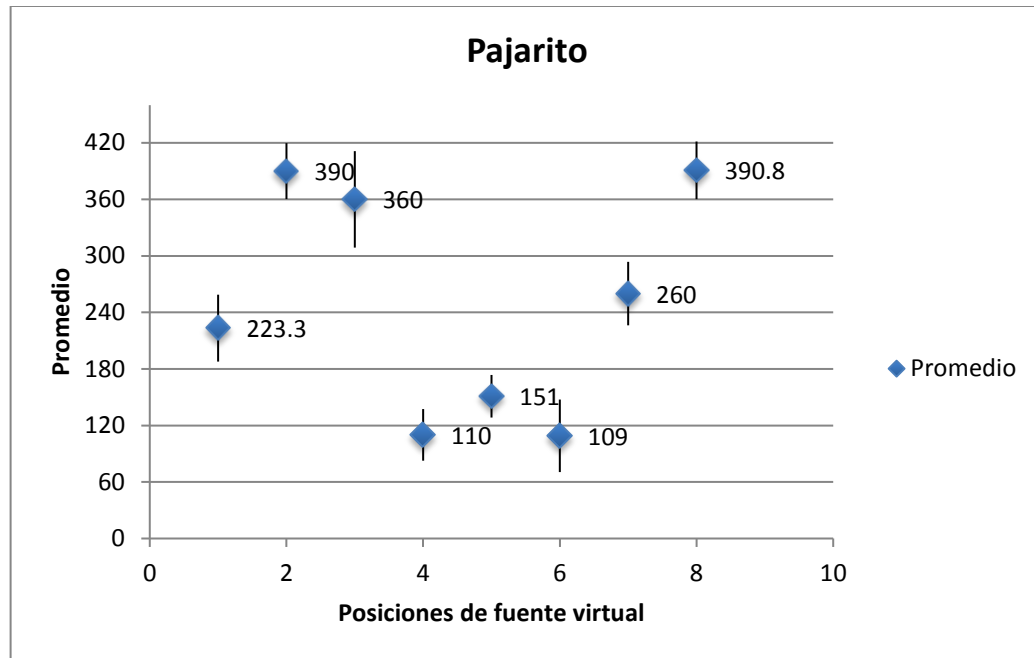
**Tabla 22** :Rango de ubicación de las fuentes virtuales

Distancias	Rango
Demasiado lejos	400 a 361
Muy lejos	360 a 301
Lejos	300a 241
Cerca	240 a 181
Muy cerca	180 a 121
Demasiado cerca	120 a 100

**Tabla 23:** Valores de localización de profundidad para la fuente “Pajarito”

Fuentes	Promedio	Desviación estandar
1	223.3	26.7
2	390	18
3	360	17.8
4	110	13.4
5	151	12.6
6	109	10.3
7	260	16.5
8	390.8	10.8

**Gráfica 18:** Resultados de localización de profundidad para la fuente “Pajarito”

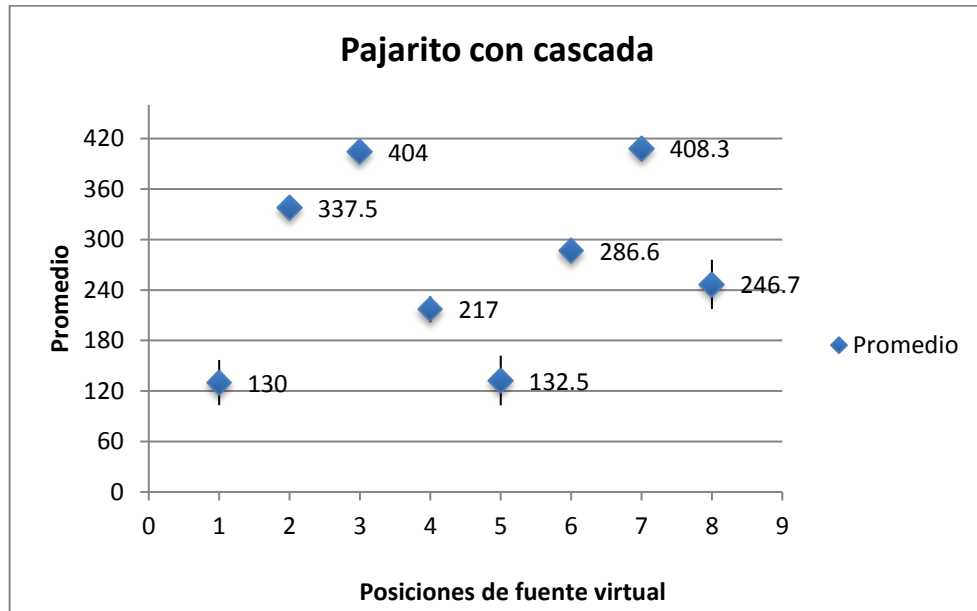


Como se puede observar, la población estimó que las profundidades de las 8 fuentes virtuales se encuentran en el rango correcto como lo indica la tabla 22, además se evidencia que las desviaciones estándar se encuentran en los rangos presentados en dicha tabla; la mayor desviación que se podría tener es de 59, ya que los rangos están separados por dicha cantidad. Sin embargo, se observa que para la fuente 3 la población analizada indicó que demasiado lejos y muy lejos entran en zonas de confusión para el oyente.

**Tabla 24:** Valores de localización de profundidad para la fuente “Pajarito con cascada”

Fuentes	Promedio	Desviación estándar
1	130	26.9
2	337.5	6.2
3	400	8.3
4	217	15.4
5	132.4	29.5
6	286.6	13.7
7	400	9.3
8	246.7	29.3

**Gráfica 19:** Resultados de localización de profundidad para la fuente “Pajarito con cascada”



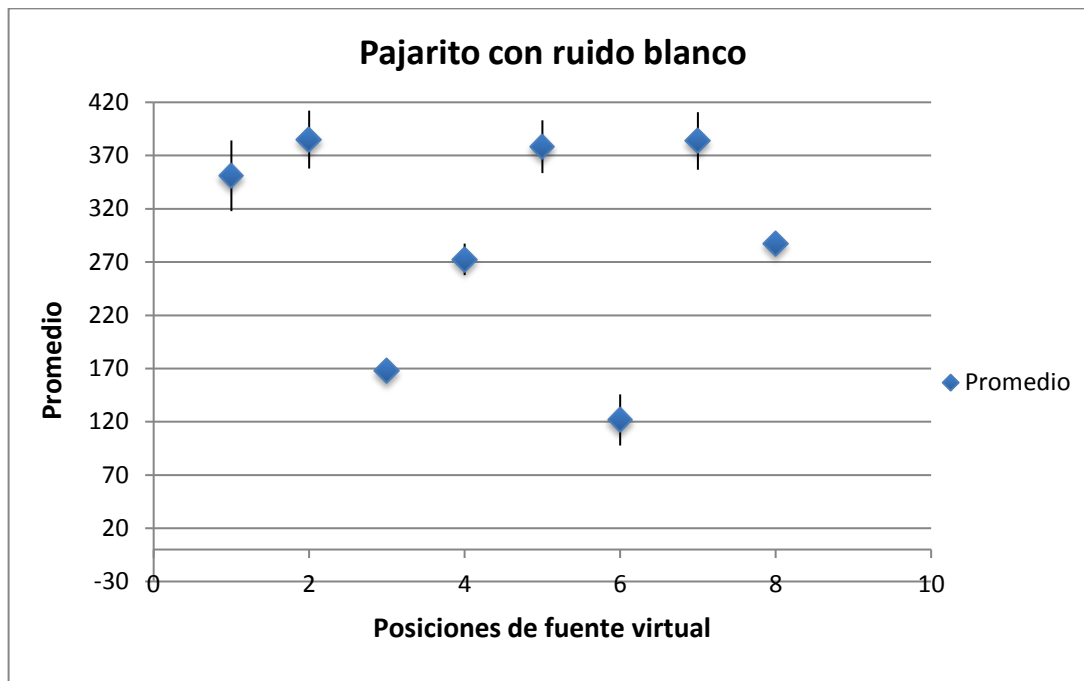
Como se puede observar, la población estimó que la profundidad de las fuentes virtuales 2, 3, 4, 6 y 7 se encuentran en el rango correcto como lo indica la tabla 22, y además la desviación estándar se encuentra en Sin embargo, se observa que para la fuente 1 y 5, la población indicó que la fuente virtual se encontraba en el rango “muy cerca”, y dicha fuente está ubicada en el rango “demasiado cerca”, es decir fue una zona difícil de diferenciar ya que ambos rangos se encuentran cercanos uno del otro. Para la fuente 8 la población indicó que la fuente estaba en el rango “lejos” y la fuente se encontraba en el rango “muy cerca”, esto se pudo deber a que la fuente de referencia que se usó se encontraba a una profundidad cercana (200) de la fuente en la que se ubicó el pajarito (160) produciendo un efecto de enmascaramiento.

**Tabla 25:** Valores de localización de profundidad para la fuente “Pajarito con ruido blanco”

Fuentes	Promedio	Desviación estándar
1	351	33.2
2	385	27.2
3	168	9.3
4	272.5	14.8
5	378.3	24.8
6	121.7	24
7	383.7	27

8	287.5	9.6
---	-------	-----

**Gráfica 20:** Resultados de localización de profundidad para la fuente “Pajarito con ruido blanco”



Como se puede observar, la población estimó que la profundidad de las fuentes virtuales 1, 2, 5 y 8 se encuentran en el rango correcto como lo indica la tabla 22, al igual que la desviación para cada una. Para la fuente 3, la población determinó que la fuente se encontraba en el rango “muy cerca”, y la posición original se encuentra en el rango “demasiado cerca”. En la fuente 4, la población determinó que la fuente estaba en el rango “lejos” y su posición original era en el rango “cerca” y esto se pudo deber a que la fuente de referencia pudo evitar el correcto reconocimiento de la fuente virtual pajarito. Por último, la fuente 7 fue difícil de reconocer para los oyentes ya que originalmente la fuente se encuentra en el rango “muy cerca” y la población determinó que estaba en el rango “demasiado lejos”, como se puede observar hubo enmascaramiento ya que la fuente de referencia (ruido blanco) al tener una densidad distinta para cada frecuencia pudo interferir en la escucha correcta de algunas frecuencias del audio del pajarito que tiene un rango de 500 Hz a 4000 Hz y el ruido blanco también.

### 7.6.1.2. Desplazamiento horizontal (Eje x)

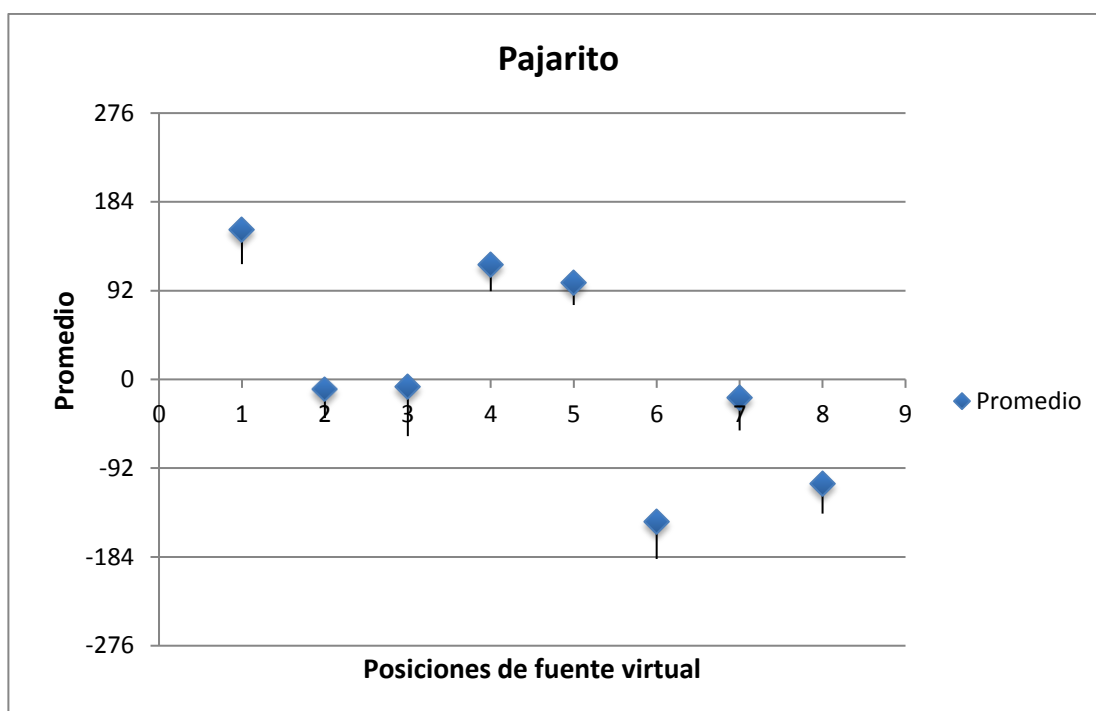
**Tabla 26:** Rango de ubicación de las fuentes virtuales en el eje x

Rangos de ubicación	
Extremo izquierdo	184 a 138
Izquierda	137 a 47
Centro	46 a -46
Derecha	-47 a -137
Extremo derecho	-138 a -184

**Tabla 27:** Valores de localización de desplazamiento horizontal para la fuente "Pajarito"

Fuentes	Promedio	Desviación estándar
1	155	35.5
2	-10.4	29.7
3	-7.6	51.2
4	118.8	27.4
5	99.7	22.6
6	-147.6	38.5
7	-19.2	33.7
8	-108.5	30.6

**Gráfica 21:** Resultados de localización de desplazamiento horizontal para la fuente “Pajarito”



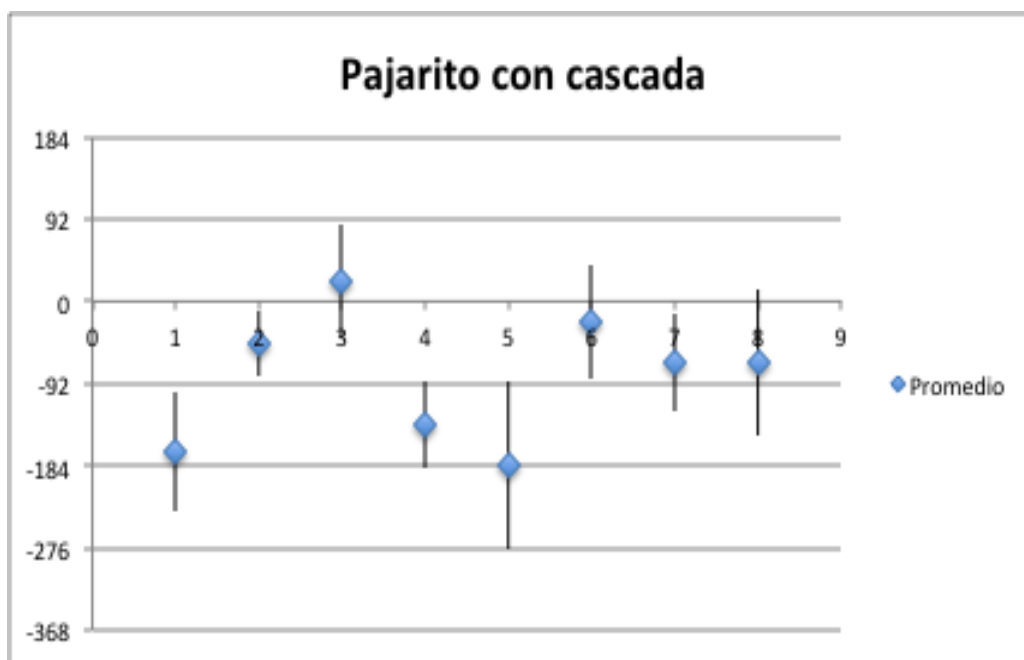
Como se puede observar, la población determinó que sólo para la fuente 3 hubo confusión al percibir la fuente en el eje x, ya que los oyentes determinaron que la fuente estaba en el rango del “centro” y su posición original estaba en el rango de la “derecha”, y esto se debe a que ambos rangos son cercanos uno del otro. Sin embargo, como se observa para las demás fuentes hubo una percepción correcta de la ubicación de las fuentes en los rangos determinados.

**Tabla 28:** Valores de localización de desplazamiento horizontal para la fuente “Pajarito con cascada”

Fuentes	Promedio	Desviación estándar
1	132.7	67.1
2	13.4	37.3
3	12	64.1
4	97.3	48.9
5	-36.4	94.3
6	-105.4	63.7
7	1.9	55
8	28.8	81.5



**Gráfica 22:** Resultados de localización de desplazamiento horizontal para la fuente “Pajarito con cascada”

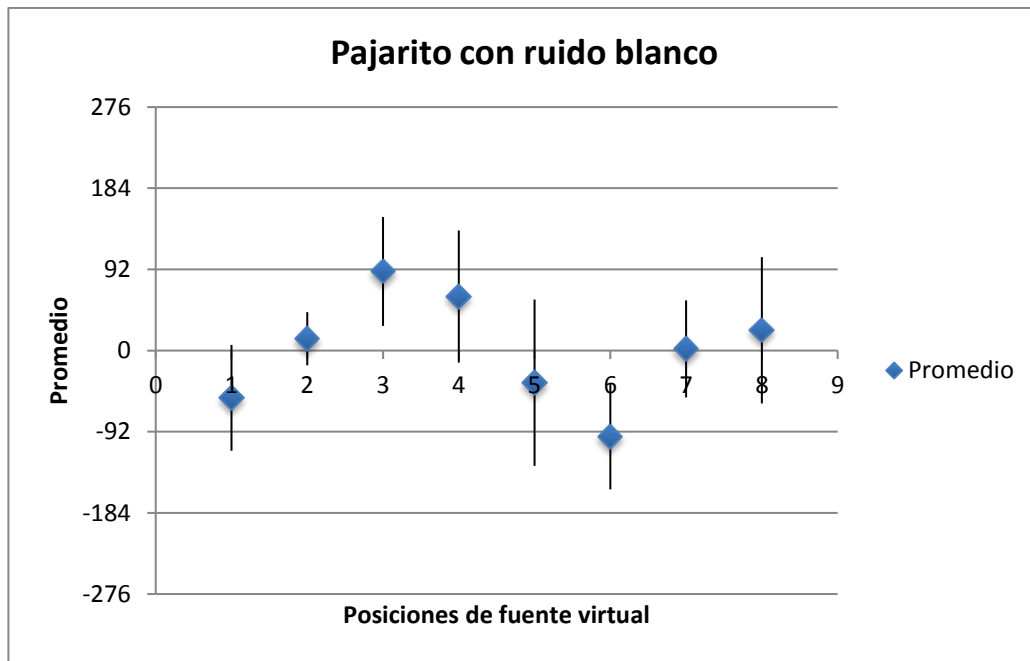


Para este experimento, la población analizada ubicó las fuentes desde la No. 1 a la No. 7 en los rangos correctos. Sin embargo, la ubicación de la fuente No. 8 fue confusa para los oyentes ya que el rango en el que la fuente estaba ubicada originalmente correspondía al “centro” con coordenada 0 en el eje x y la población la ubicó en el rango de la “derecha” con -69 en el mismo eje.

**Tabla 29:** Valores de localización de desplazamiento horizontal para la fuente “Pajarito con ruido blanco”

Fuentes	Promedio	Desviación estándar
1	-53.6	60
2	13.41	30.2
3	89.7	61.7
4	61.3	74.9
5	-36.4	94.3
6	-97.5	59.8
7	1.9	55
8	23	82.9

**Gráfica 23:** Resultados de localización de desplazamiento horizontal para la fuente “Pajarito con ruido blanco”



Para este experimento, la población determinó que la percepción de las fuentes números 1,2, 3, 4,5 y 8 fue correcta; se encuentra en el rango inicial de ubicación de las fuentes virtuales. Sin embargo, las fuentes No. 6 y No. 7 fueron ubicadas en el rango más cercano a los rangos originales, es decir la fuente No. 6 se encontraba inicialmente ubicada en el rango extremo derecho y la población ubicó la fuente en el derecho. Para la fuente No. 7, la cual estaba ubicada originalmente en el rango de la izquierda, perceptualmente fue ubicada por la población en el rango del centro. Al tener estos rangos cerca uno del otro, para los oyentes es difícil determinar con seguridad la ubicación correcta de las fuentes.

### 7.6.3. Test de localización sonora por grados

Para realizar el análisis de dicha prueba, se tienen en cuenta dos zonas de estudio:

Zona de decisión acertada: En esta zona se tienen en cuenta las personas que ubicaron la fuente entre 1° y 10° con respecto a la posición de la fuente virtual dada por el software.

Zona de decisión errada: En esta zona se tienen en cuenta las personas que ubicaron la fuente a más de 10° con respecto a la posición de la fuente virtual dada por el software.

“La zona de mayor precisión en la ubicación de la fuente sonora ocurre en la región cercana al punto ubicado justo enfrente del oyente. Es la zona donde un mínimo desplazamiento de la fuente produce una modificación en el evento auditivo. El límite inferior corresponde aproximadamente a un ángulo de 1°. Hacia los lados, este valor se incrementa de tres a diez veces.”<sup>54</sup>

Dicha zona de acierto está representada como el área rectangular (zona entre 1° y 10°).

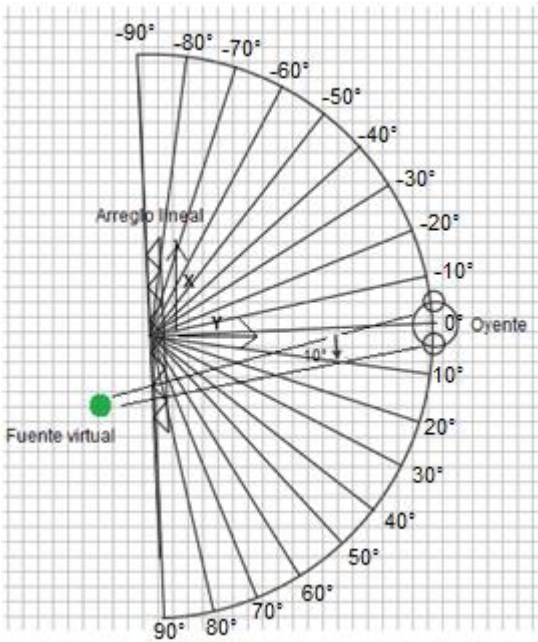
*Cabe aclarar que en las gráficas las palabras que dicen punto no representan un área abarcada por el punto de ubicación de la fuente virtual, sino que la fuente virtual es representada con el círculo como se da conocer a continuación en la imagen 20:*

***Leer antes del análisis:*** Además, como se puede observar a continuación se toman en cuenta los grados simétricamente, es decir que son positivos para la derecha del arreglo y negativos para la izquierda tomando en cuenta que la mitad del arreglo lineal está ubicado a 0 grados. Se sacó el promedio según la ubicación que haya dado cada oyente de la ubicación de la fuente virtual para los puntos descritos a continuación teniendo en cuenta dichos grados como se puede observar en el promedio de las tablas.

---

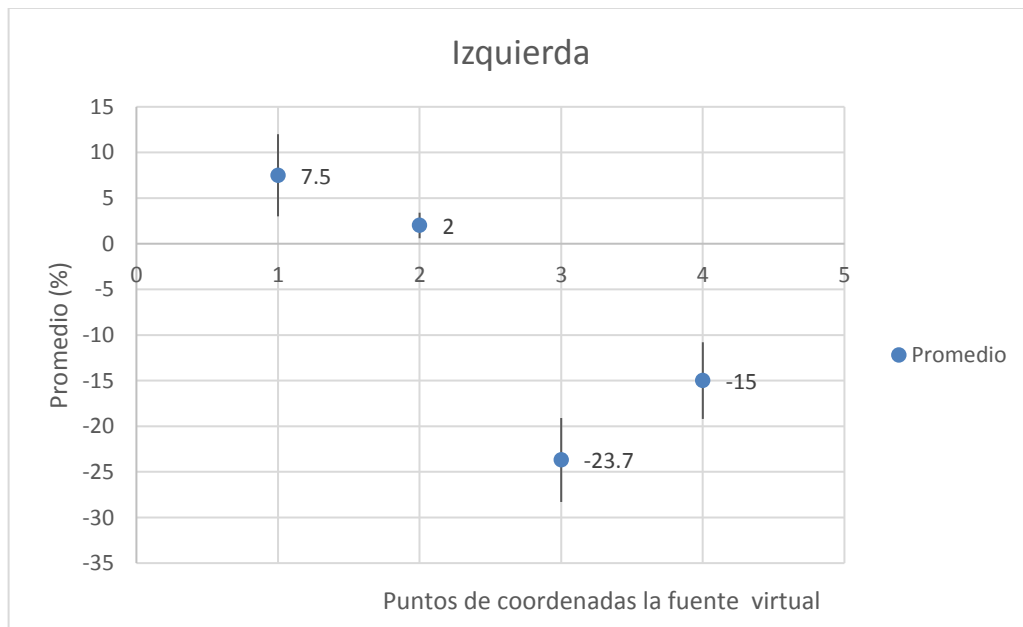
<sup>54</sup> Ledo Hernansanz, M. (2013). *Tecnología de Registro y Reproducción Sonora para entornos de realidad virtual*. Ingeniería Técnica de Telecomunicaciones: Especialidad en Sonido e Imagen. Universidad Politécnica de Madrid.

**Imagen 20:** Zona de acierto para ubicar la fuente virtual



### 7.6.3.1. Análisis a 90 grados (Ubicación de la cabeza del oyente)

**Gráfica 24:** Promedios de las fuentes virtuales en la posición Izquierda del arreglo

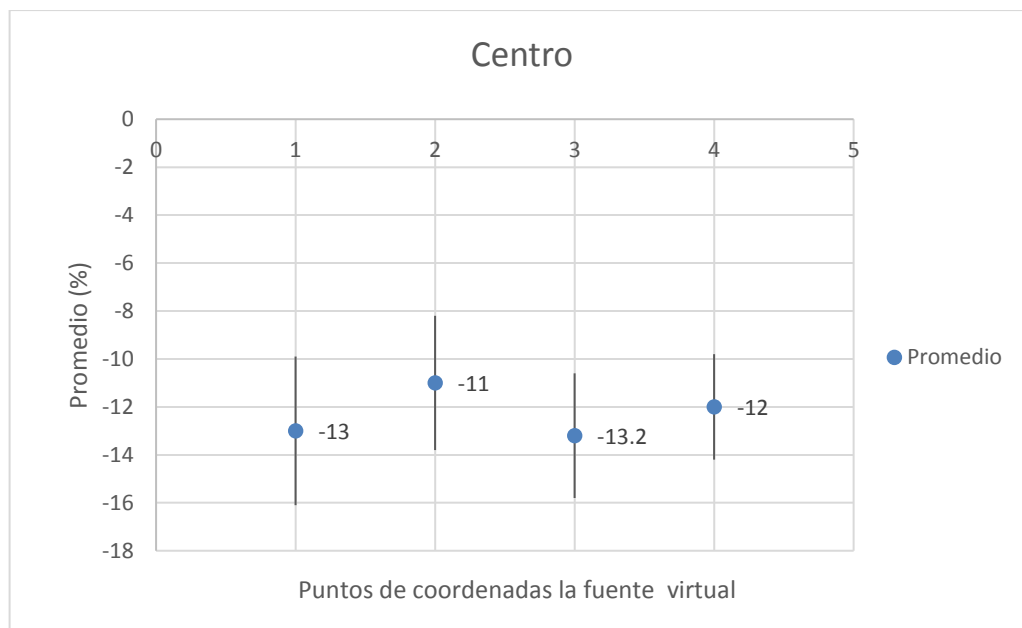


Como se puede observar en la tabla 30 y gráfica 28, no hubo desplazamiento de la fuente según la población analizada, ya que el valor mayor de desviación estándar es de 4.6 grados y como se indica en la sesión **10.6.1**. No hay desplazamiento de fuente si la percepción del oyente es mayor a 10 grados.

**Tabla 30:** Posición de la fuente virtual: Izquierda

Puntos	Promedio (grados)	Desviación estándar
1	7.5	4.5
2	2	1.4
3	-23.7	4.6
4	-15	4.2

**Gráfica 25:** Promedios de las fuentes virtuales en la posición central del arreglo

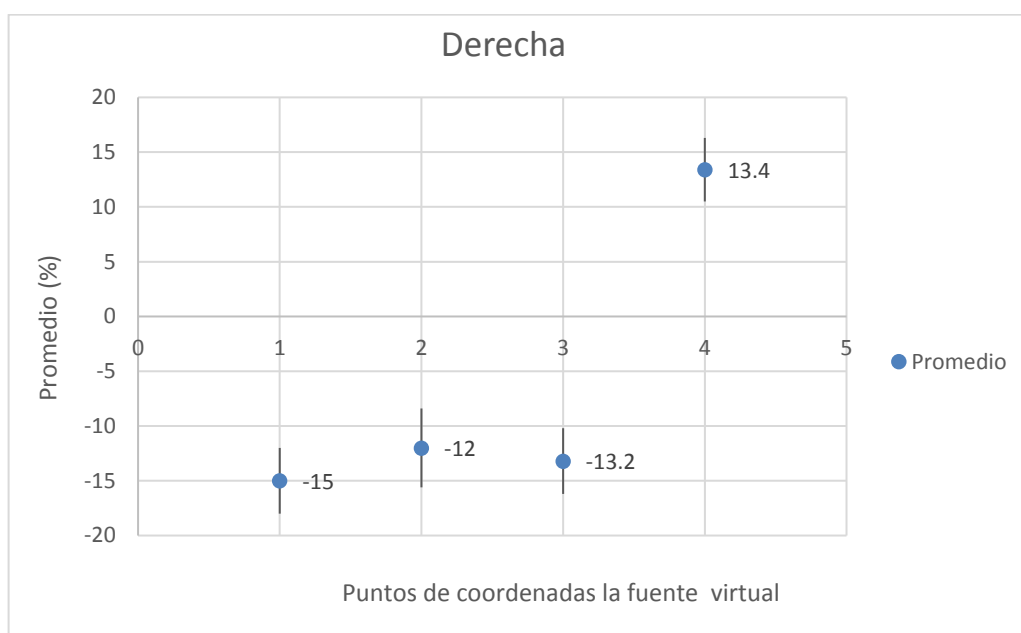


Como se puede observar en la tabla 31 y gráfica 29 los valores de desviaciones entre sí varían como máximo 0.5, es decir que para los oyentes fue fácil ubicar la fuente virtual en cada coordenada. Como se ha explicado anteriormente no hay variaciones mayores a 10 grados en la desviación estándar por punto de posición de la fuente virtual.

**Tabla 31:** Posición de la fuente virtual en el centro

Puntos	Promedio (grados)	Desviación Estándar
1	-13	3.2
2	-11	3.1
3	-13.2	2.7
4	-12	2.8

**Gráfica 26:** Promedios de las fuentes virtuales en la posición derecha del arreglo

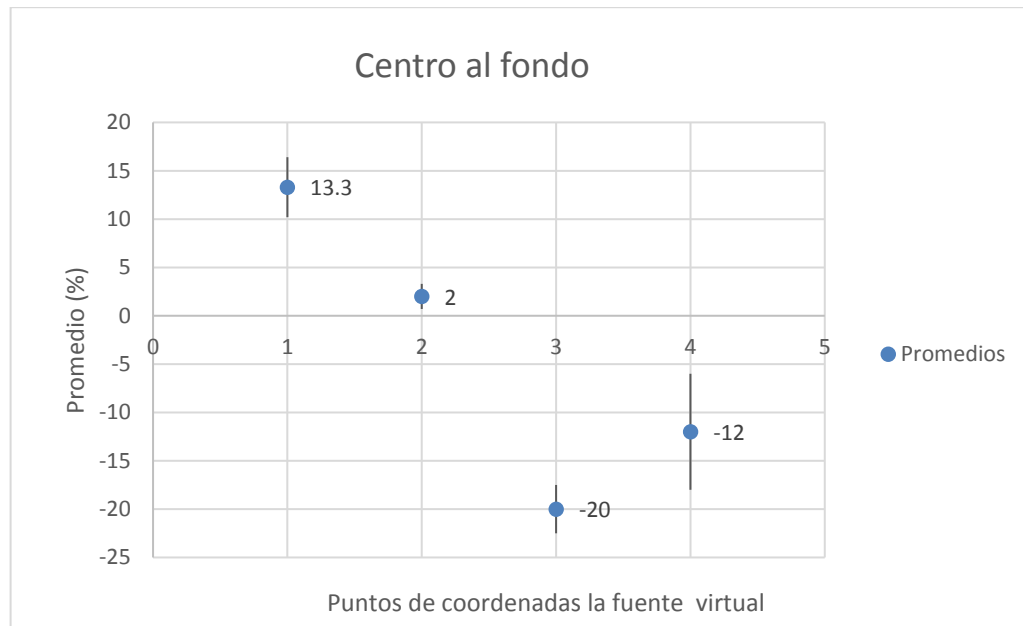


Como se puede observar tabla 32 y en la gráfica 30, los oyentes expuestos al sistema Wave Field Synthesis determinaron correctamente la ubicación de la fuente virtual. Esto se comprueba con los valores de Desviación Estándar dados para dicha posición (derecha) ya que no excede en ningún punto los 10 grados.

**Tabla 32:** Posición de la fuente virtual en la posición derecha del arreglo

Puntos	Promedio (grados)	Desviación Estándar
1	-15	3
2	-12	3.6
3	-13.2	3.2
4	13.4	2.9

**Gráfica 27:** Promedios de las fuentes virtuales en la posición centro al fondo del arreglo

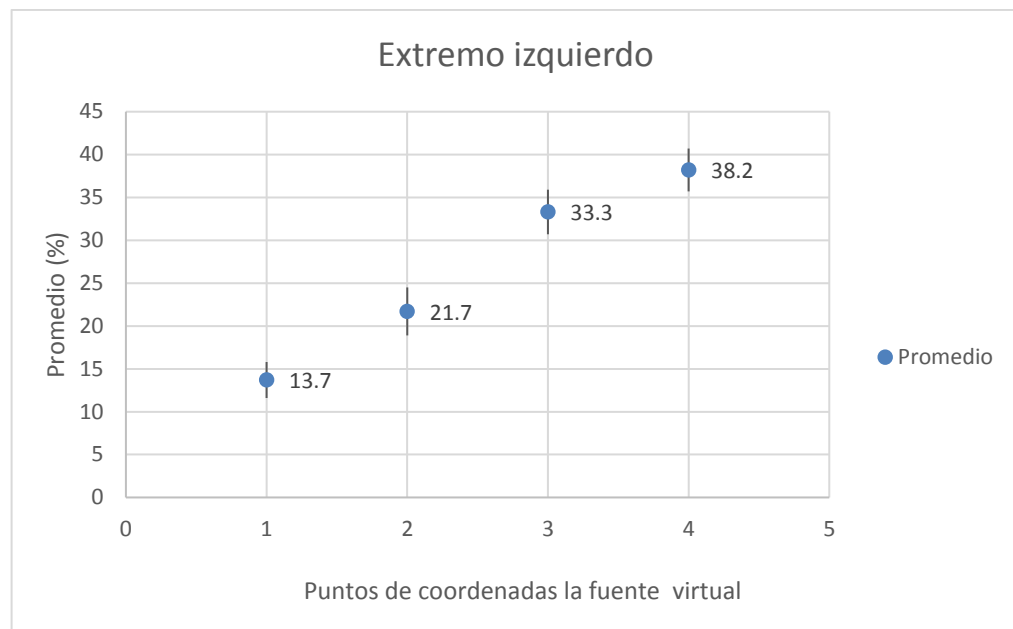


Como se puede observar tabla 33 y en la gráfica 31, para esta posición el punto que tuvo una desviación estándar mayor fue el punto 4 y se debe a que tanto como la posición de la fuente virtual y el oyente están alejados del arreglo. Sin embargo, no hay desplazamiento de la fuente virtual.

**Tabla 33:** Posición de la fuente virtual en el centro al fondo

Puntos	Promedio (grados)	Desviación Estándar
1	13.3	3.1
2	2	1.3
3	-20	2.5
4	-12	6

**Gráfica 28:** Promedios de las fuentes virtuales en la posición extremo izquierdo del arreglo



Como se puede observar en la tabla 34 y en la gráfica 32, en dicha posición (extremo izquierdo), los oyentes pudieron ubicar la fuente virtual de manera correcta, para los 4 puntos ya que ningún valor de desviación es mayor a 10 grados.

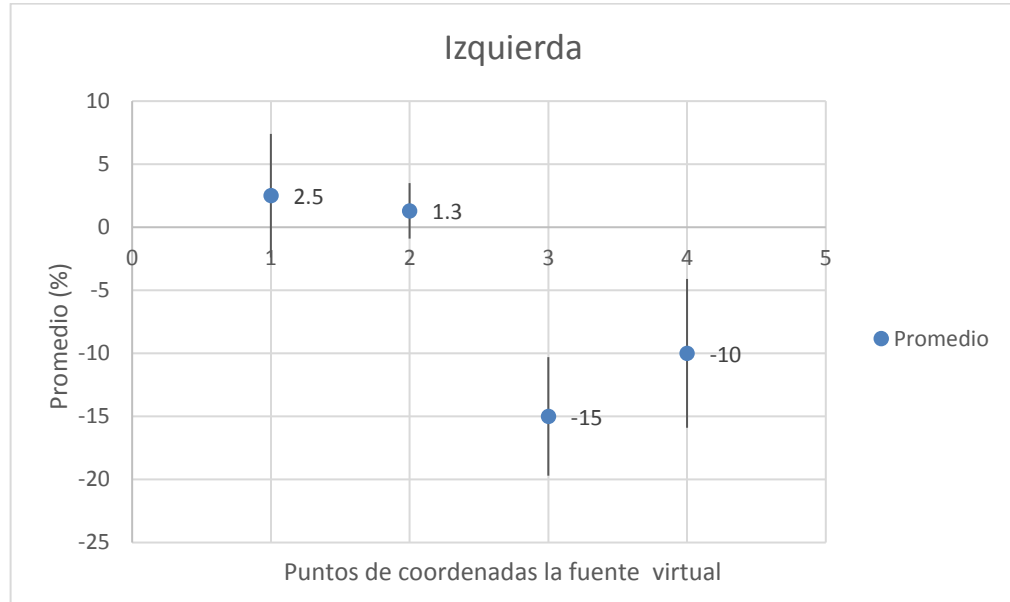
**Tabla 34:** Posición de la fuente virtual en el extremo izquierdo del arreglo

Puntos	Promedio (grados)	Desviación Estándar
1	13.7	2.1
2	21.7	2.8
3	33.3	2.6
4	38.2	2.5



### 7.6.3.2. Análisis a 0 grados (ubicación de la cabeza del oyente)

**Gráfica 29:** Promedios de las fuentes virtuales en la posición Izquierda del arreglo

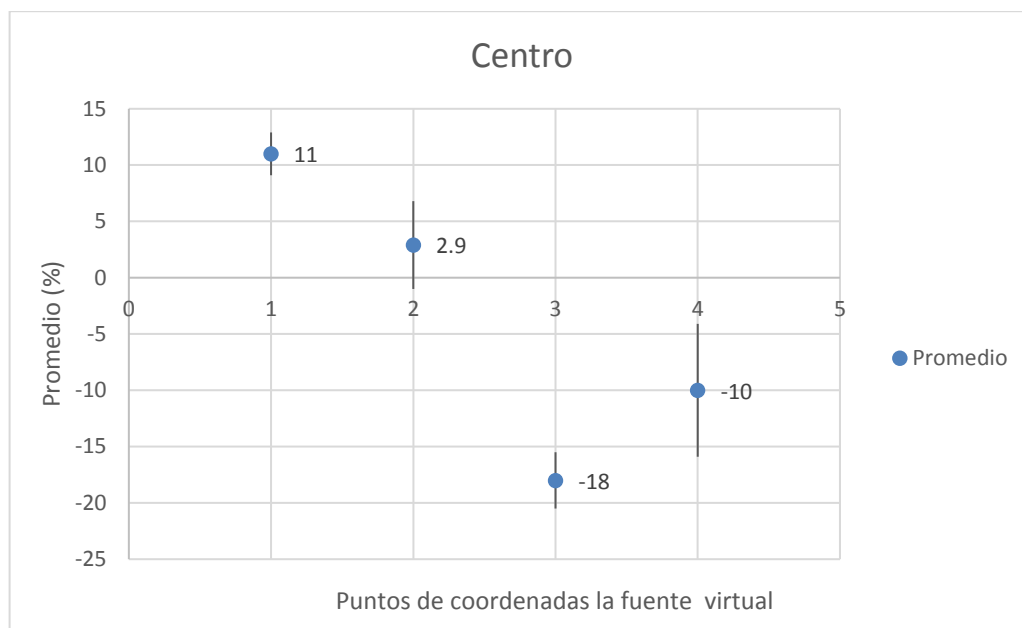


Como se puede observar en la tabla 35 y en la gráfica 33, para dicha posición, se puede observar que el mayor punto de desviación estándar obtenido fue el del punto 1 con 5.9 grados y a pesar de que no hay un corrimiento de la fuente virtual, este punto fue el más confuso para el oyente y se puede deber a que este punto era el más lejano del arreglo lineal.

**Tabla 35:** Posición de la fuente virtual en la Izquierda

Puntos	Promedio (grados)	Desviación Estándar
1	2.5	4.9
2	1.3	2.2
3	-15	4.7
4	-10	5.9

**Gráfica 30:** Promedios de las fuentes virtuales en la posición central del arreglo

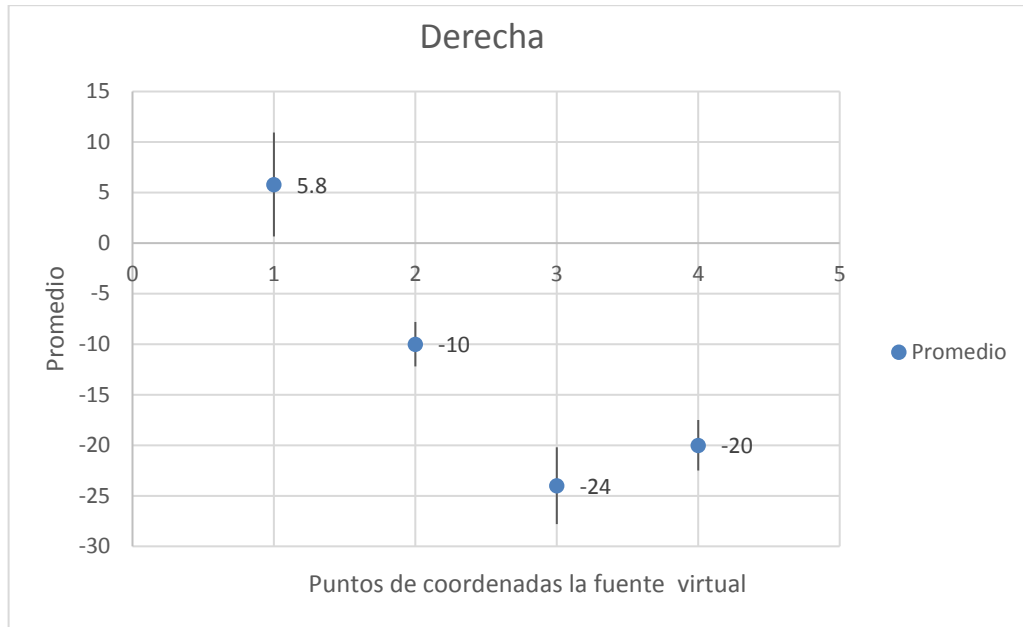


Como se puede observar en la tabla 36 y en la gráfica 30, el punto 4 presenta la mayor desviación estándar con un valor de 5.9 y se debe a que dicha coordenada es la más alejada del arreglo lineal. Sin embargo, en general la técnica funciona correctamente ya que las posiciones de fuente virtual no fueron percibidas por los oyentes con desplazamiento de las mismas, ya que las variaciones no son mayores a 10 grados.

**Tabla 36:** Posición de la fuente virtual en el centro

Puntos	Promedio (grados)	Desviación Estándar
1	2.5	4.9
2	1.3	2.2
3	-15	4.7
4	-10	5.9

**Gráfica 31:** Promedios de las fuentes virtuales en la posición derecha del arreglo

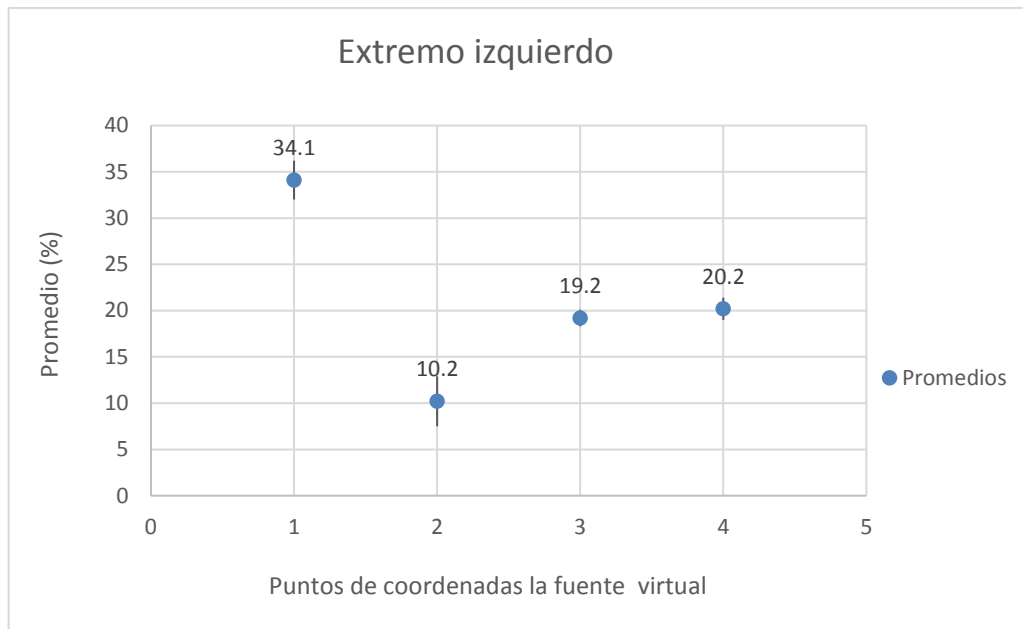


Como se puede observar en la tabla 37 y en la gráfica 35, el comportamiento en cuanto a la percepción sonora de los oyentes es similar al punto anterior.

**Tabla 37:** Posición de la fuente virtual en la derecha del arreglo

Puntos	Promedio (grados)	Desviación Estándar
1	11	1.9
2	2.9	3.9
3	-18	2.5
4	-10	5.9

**Gráfica 32:** Promedios de las fuentes virtuales en la posición extremo izquierdo del arreglo

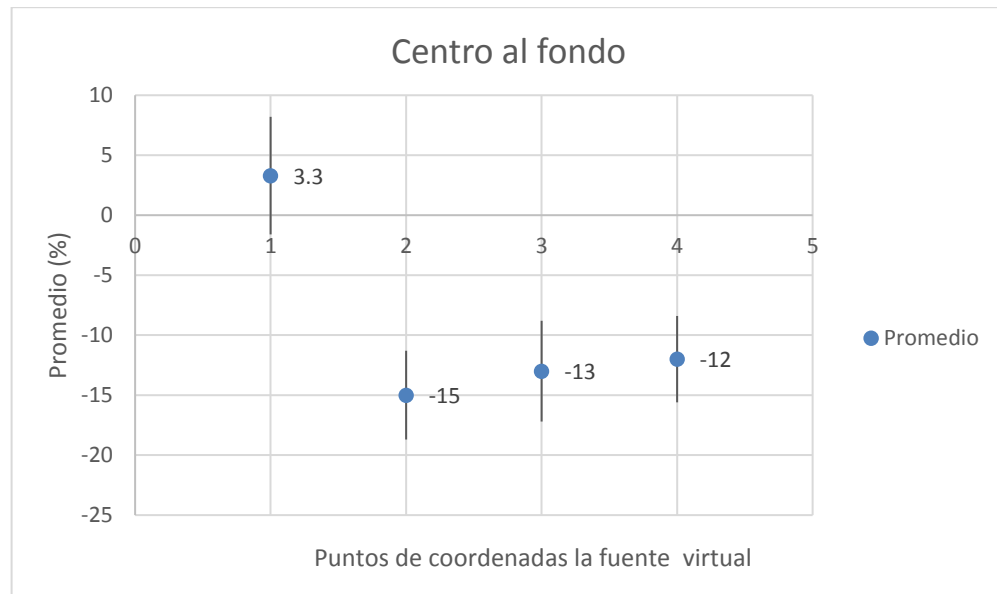


Como se puede observar en la tabla 38 y en la gráfica 36, para dicha posición (extremo izquierdo), las variaciones son muy insignificantes ya que la variación mayor es de 2.5 grados. Por lo tanto, en este punto se puede decir que el oyente tiene una adecuada percepción de la técnica ya que no hay desplazamiento de la fuente virtual en cada punto evaluado.

**Tabla 38:** Posición de la fuente virtual en el extremo izquierdo

Puntos	Promedio (grados)	Desviación Estándar
1	13.3	2.1
2	2	1.3
3	-20	2.5
4	-12	2.2

**Gráfica 33:** Promedios de las fuentes virtuales en la posición centro al fondo del arreglo



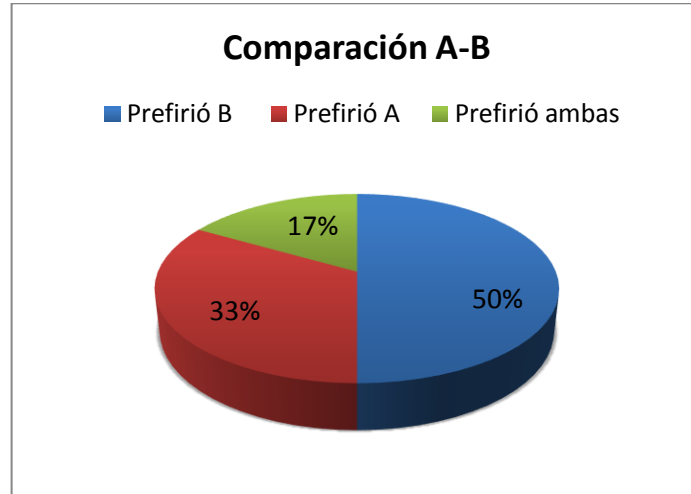
Como se puede observar en la tabla 39 y en la gráfica 37, para esta posición del oyente (centro al fondo), se puede notar que los valores de desviación estándar son mayores que en los anteriores puntos. Sin embargo, en ningún punto se da una variación mayor a 10 grados, por lo tanto, en dicho punto no hay una localización falsa de la fuente virtual.

**Tabla 39:** Posición de la fuente virtual en el centro al fondo del arreglo

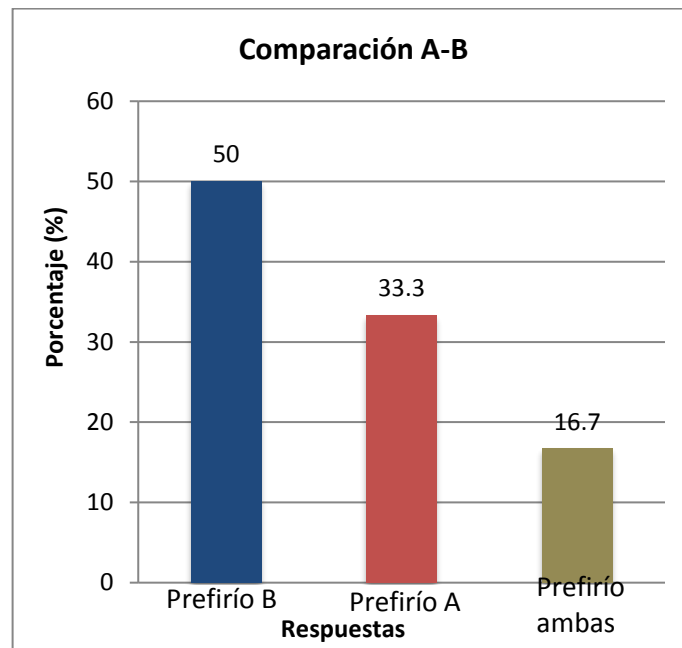
Puntos	Promedio (grados)	Desviación Estándar
1	3.3	4.9
2	-15	3.7
3	-13	4.2
4	-12	3.6

#### 7.6.4. Test de distintas configuraciones de atenuaciones y retardos

**Gráfica 34:** Comparación de las configuraciones A-B, diagrama circular



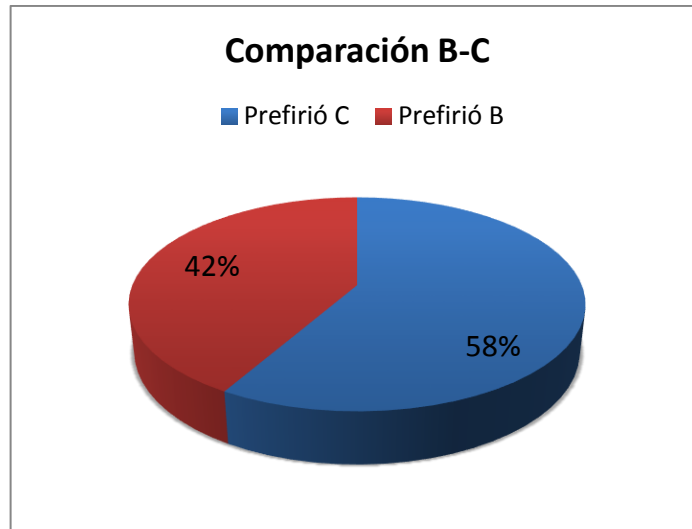
**Gráfica 35:** Comparación de las configuraciones A-B, diagrama de barras



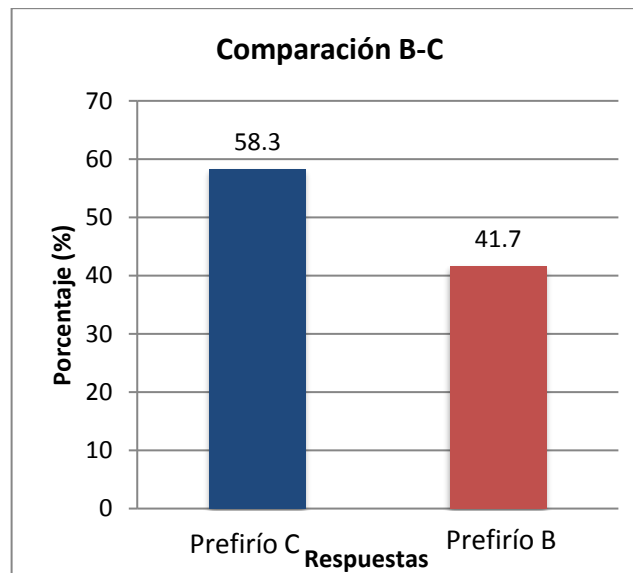
Como se pudo observar la población analizada prefirió la configuración B con un 50%, los retardos y atenuaciones que se presentan para esta configuración representan una posición a la izquierda y un poco alejado del arreglo lineal, por lo cual los oyentes sintieron un nivel agradable de la fuente virtual (castañuelas) en

cuanto a profundidad, además dicho audio hace que el oyente tenga la percepción de que este está involucrado en la zona como si una persona estuviera tocando las castañuelas en ese momento.

**Gráfica 36:** Comparación de las configuraciones B-C, diagrama circular



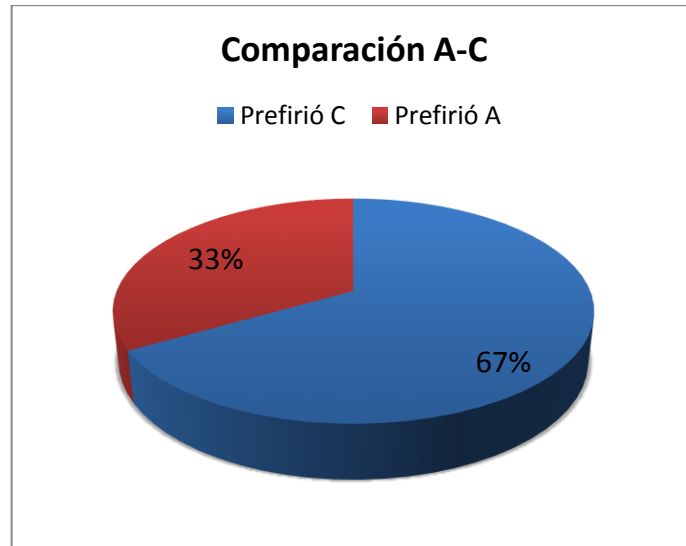
**Gráfica 37:** Comparación de las configuraciones B-C, diagrama de barras



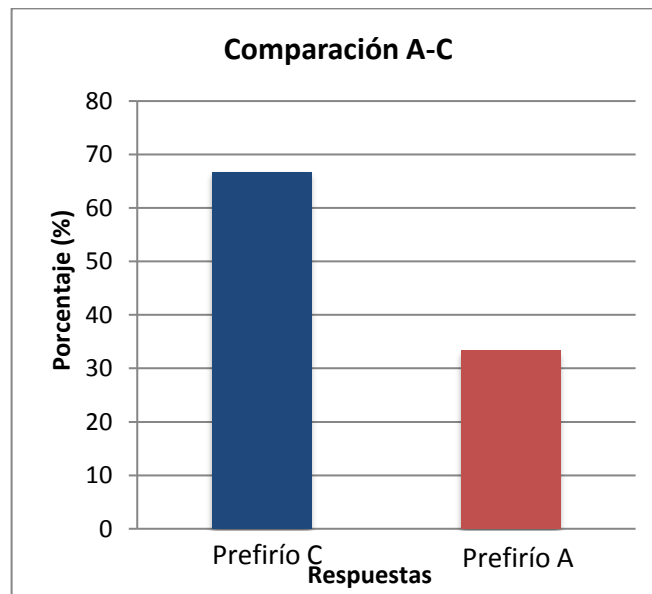
Para esta comparación, la población expuesta al sistema Wave Field Synthesis prefirió la configuración C con un 58.3 %, mientras que un 41.7 prefirió la B. Esto puede deberse a que la posición lograda por las atenuaciones y retardos para la

configuración C fue una posición al centro del arreglo y muy cerca al arreglo en profundidad.

**Gráfica 38:** Comparación de las configuraciones A-C, diagrama circular



**Gráfica 39:** Comparación de las configuraciones A-C, diagrama de barras



Por último, como se puede evidenciar la configuración C es la preferida de las 3 ya que como se dijo anteriormente la configuración C fue preferida a la B y esta última a la A. La configuración C presenta retardos y atenuaciones que hacen que la fuente



está ubicada en el centro y cerca al arreglo, además dicha posición hace que para el oyente sea fácil de localizar como se puede observar en el test de localización.

**Tabla 40:** Promedios finales de las pruebas

Configuración A	Configuración B	Configuración C
27.66%	36.33%	58.33%

## 8. CONCLUSIONES

- Como se pudo observar en las gráficas de análisis de área de audiencia, el 63,3% de la población expuesta al sistema expresó que la percepción para la primera ubicación de fuente virtual era buena; para la segunda ubicación el 56.7 % de la población determinó que la percepción de la fuente es buena, mientras que para la fuente No. 3 el 30,1 % de la población expresó que la percepción es excelente y un 40 % determinó que la percepción es buena y para la última posición de fuente virtual, el 48.3 % de la población expresó que era suficiente, es decir que como se evidencia la población expuesta se sintió cómoda a la hora de tener una percepción sonora de la fuente virtual en cualquier posición en los que ellos se ubicaran dentro del área de audiencia. De esta manera, se puede corroborar que la técnica Wave Field Synthesis implementada cubre un área de audiencia de  $8.1 \text{ m}^2$ . Como se muestra en la **sección 7.1 área de audiencia**.
- Además, según el área de cobertura que se puede observar en **sección 7.3**. la cobertura varía de  $130^\circ$  en 500 Hz y  $90^\circ$  en 4 kHz teniendo en cuenta que el mayor ángulo de evaluación es de  $180^\circ$ , lo que demuestra que se tiene una cobertura aceptable de la audiencia. Se debe tener en cuenta que el área de cobertura podría ser más grande si hay separación de las fuentes entre sí, pero también aparecerían más lóbulos de interacción destructiva (cancelaciones) haciendo que en ciertos puntos del área de audiencia sea más difícil la ubicación de la fuente virtual.
- Se desarrolló la aplicación informática cumpliendo con una fuente virtual móvil, aplicando conceptos como se demuestra en la **sección 6.4.1**. Con la aplicación de este mismo concepto, se llegaron a reproducir simultáneamente dos fuentes virtuales móviles; esta segunda fuente estática se utilizó como referencia para crear en el oyente una diferencia entre las dos fuentes, y la localización de la fuente móvil fuese más sencilla.
- El sistema presenta el mayor ángulo de cobertura en 500 Hz, ya que este es de  $130^\circ$  y representa un 72% del área total que se podría abarcar ( $180^\circ$ ); es decir que para esta zona de frecuencia se tiene una mayor zona en la que el oyente puede ubicar la fuente en comparación a las otras frecuencias (donde

se tiene un área de cobertura menor, de 90°). Para lograr una mejor localización de las fuentes virtuales por parte de los oyentes, se deben tener en cuenta los ángulos de cobertura del sistema. Estos resultados se pueden observar en la **sección 7.3**

- Se realizaron la medición de los parámetros de ITD e ILD para comprobar de manera objetiva que la técnica WFS expuesta en esta tesis cumple con lo estipulado. A partir de la calibración del sistema se realizaron las mediciones, y se obtuvieron los resultados esperados teniendo estas diferencias de cada parámetro muy significativas cercanas a cero donde no se percibe diferencias temporales en relación del tiempo y amplitud. Esto se puede verificar en la **sección 7.4.1 y sección 7.4.2**
- El sistema de altavoces de medio rango escogidos cumplieron con obtener una respuesta lo más plana posible, en su zona útil de trabajo que comienza desde los 500 Hz hasta los 4 kHz, esto permitiendo tener un buen rendimiento en la ejecución de la técnica de WFS.
- Las mediciones realizadas de la sensibilidad de cada altavoz y el arreglo lineal a un metro de distancia, en los resultados mostrados en la **sección 7.5**. presentan un nivel de presión sonora entre el rango de un buen rendimiento del sistema, el altavoz cumplió en reproducir niveles de presión altos que sobrepasaran el ruido de fondo, suministrándole poca potencia.
- Se demuestra mediante los resultados de la prueba subjetiva que la población analizada de Ingeniería de Sonido ubicó correctamente la fuente virtual en distintos puntos ubicados en el área de audiencia, ya que la desviación estándar mostrada para cada punto de posición de fuente tanto para el oyente ubicado a 90 y a 0 grados del arreglo no supera los 10 grados especificados para que haya un desplazamiento de 1 grado de la fuente virtual. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el punto 4 dado para la posición del oyente a 90 grados tuvo una variación de 6 grados, por lo cual representa el punto más confuso en el que la población ubicó la fuente virtual y se debe a la lejanía de la fuente virtual al arreglo lineal. Dicho resultado se puede observar en la tabla 33 de **la sección 7.6.3.1**.

- De las tres configuraciones evaluadas, la C tuvo más aceptación de un 58.33% de promedio final que la configuración A con un 27.66% y B 36.33% como se muestra en **la sección 7.6.4**. esto quiere decir que la percepción de los oyentes es más clara y agradable cuando la ubicación de la fuente virtual tiende a la mitad del arreglo. Por lo tanto, la configuración es favorable debido a que se percibe una mejor distribución de los retardos y atenuaciones como se ven en la tabla de la configuración C, es debido a que simétricamente obtienen este equilibrio.
- La población expuesta al experimento de percepción de profundidad de 8 fuentes sonoras expresó que fue más fácil reconocer el audio del pajarito sólo ya que como se puede observar en la gráfica 1, los oyentes ubicaron todas las fuentes virtuales dentro de los rangos de ubicación establecidos. En cambio, cuando se añade una fuente como el ruido blanco la población estima que es más difícil reconocer el rango correcto en que se encuentra la fuente y se evidencia en el reconocimiento de la fuente 7; este resultado puede estar influenciado debido a que el ruido blanco es utilizado para distinguir si una fuente se ve enmascarada por otro sonido y para este experimento se corroboró que fue así **como se muestra en la sección 7.6.1**.
- Al comparar la facilidad de percepción de los 2 audios (pajarito con cascada y pajarito con ruido blanco) se pudo observar que para la población es más fácil dar una ubicación correcta de la profundidad cuando escuchan fuentes naturales que cuando escuchan la fuente con ruido blanco y se debe al enmascaramiento que sufre la fuente del pajarito **como se muestra en la 7.6.1.1. gráfica 19 (pajarito con cascada) y en la gráfica 20 (pajarito con ruido blanco)**.
- La población expuesta al test de percepción sonora en el eje x, determinó que la ubicación correcta de las fuentes es más fácil cuando escuchan sólo una fuente y se pudo corroborar como se indica en la **gráfica 21 y tabla 28** que la población acertó en los rangos de las 8 fuentes virtuales presentadas. **como se muestra en la sección 9.6.1.2**.

## 9. RECOMENDACIONES

- El número de altavoces puede ser aumentado de modo que la zona de audición pueda ser mayor y pueda encontrarse un número óptimo que cumpla con un compromiso adecuado de calidad y mejora respecto a la estereofonía normal.
- Se pueden variar las distancias entre altavoces para aumentar el ángulo de cobertura del arreglo lineal, pero se deben realizar en lo posible mediciones para corroborar cómo se comporta la energía en zonas de lobulaciones en los cuales haya sumas energéticas o cancelaciones. Esto, para determinar de qué manera el arreglo lineal puede comportarse lo más homogéneamente posible para permitir una mejor localización de fuentes virtuales.
- También se debe tener en cuenta, que al aumentar la separación entre altavoces el rango efectivo en el que actuará la técnica se verá reducido debido a la frecuencia aliasing, es por esto que se deben realizar simulaciones para conocer hasta qué punto se deben separar los altavoces.
- El recinto en el cual se lleve a cabo la técnica, debe estar tratado acústicamente para evitar reflexiones no deseadas que pueden contribuir a tener una focalización falsa de las fuentes virtuales debido a las amplitudes de las mismas.
- Si se quiere ampliar más el arreglo se debe considerar que los cálculos deben ser los correctos en cuanto a retardos y atenuaciones, para llegar a recrear una determinada fuente con el sistema de Wave Field Synthesis (software y arreglo lineal). Tener en cuenta al aumentar el número de altavoces requiere más cálculos y demandan más trabajo de maquina sino se tienen los equipos especializados
- Garantizar una estabilidad en la alimentación de la potencia, para usar simultáneamente de varios canales de audio, y así evitares alguna alteración del envío de las señales de audio debió a la corriente.
- La investigación que se realizó en este trabajo de grado permite expandir sobre un nuevo rumbo del futuro del sonido espacial. El interés de la industria audiovisual y de los medios sobre esta tecnología pronosticada por muchos

años de desarrollo y trabajo continuo en este tipo de sistemas de sonido. En general, la evolución de la mezcla y escucha de audio se orienta hacia un aumento de calidad en la generación y reproducción del sonido, buscando cada vez fidelidad y realismo, esto se ha ido consiguiendo incrementando la calidad y también la espacialidad del sistema de sonido.

- Por medio de este tipo de investigación se podría implementar este tipo de sistema como un sistema de entrenamiento militar, en la cual cada individuo por medio de localización sonora identificar los diferentes tipos de sonidos y su localización en su plano horizontal, de tal manera que se pueda recrear de varios tipos de sonidos provenientes de un ambiente hostil.
- Teniendo una fuente de referencia hace que la percepción en el eje y (profundidad) de los oyentes sea mejor, ya que le permite al oyente tener una relación entre ambas fuentes.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

Pueo Ortega. B Analysis and Enhancement of Multiactuator Panels for WFS. Reproduction. Citado por Ezequiel Gutiérrez H. Programa para reproducción de sonido multicanal en tiempo real y síntesis de frentes de onda (WFS). En: Revista Interamericana de Psicología, 37, (2), pp. 373-382.

Ezequiel Gutiérrez H. (2010). Programa para reproducción de sonido multicanal en tiempo real y síntesis de frentes de onda (WFS). Maestro en ingeniería eléctrica. Universidad Nacional Autónoma de México.

Vorländer, Michael. Virtual Acoustic: Opportunities and limits of spatial sound reproduction for audiology. Investigation of Technical Acoustics, RTWH Aachen University, 2008. P.414.

Pérez, S. (2009). Contribución a la implementación de sistemas de Wave Field Synthesis. Recuperado de:

<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/6685/tesisUPV3145.pdf>.

Maximo-Cobos, & Jose J.López. (2007). Técnicas de separación de fuentes aplicadas a la resíntesis de escenas acústicas 3D.

- Armenta Flores (2011). Diseño y construcción de una cabeza binaural. Tesis doctoral. Escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica.
- Material didáctico para estudiantes focalizado en Audiología Clínica. (2013). Vía Auditiva: Vía Aferente. Disponible de en: <http://audiologiaacademica.blogspot.com.co/2014/09/via-auditiva-via-aferente.html>
- Gómez Barquín., A. Sordera Centra., En: C.F.G.S Audiología protésica [en línea]. (16/06/2016). Disponible en: <http://eugdSPACE.eug.es/xmlui/bitstream/handle/123456789/210/Almudena%20G%C3%B3mez%20Barqu%C3%ADn.pdf?sequence=1> > [citado en 8 de noviembre de 2016]
- Claudia A. & Oscar A. Ramos. (2009). (2003). Audición Espacial En Ambientes Reverberantes. En: Revista Interamericana de Psicología, 37, (2), pp. 373-382.
- Moncibays R., Y. (2011). Evolución Histórica y Nuevas Perspectivas con los pasajes Sonoros. Licenciado en Diseño Gráfico. Universidad Nacional Autónoma, México.
- Blauert, J. (1997). Spatial Hearing: "The Psychophysics of Human Sound Localization", Revised Edition. Cambridge, MA: The MIT Press.
- Nicolás A. Masera, Juan I. Morales & Ana M. Moreno. (2011). Claves Perceptuales sobre Direccionalidad y Espacialidad Del Sonido. Argentina: Cátedra Fundamentos de Acústica y Electroacústica, Facultad Regional Córdoba.
- Torres Viveros, J. (2009). Aplicación De Técnica De Grabación y Mezcla Binaural Para Audio Comercial. Maestro en Música con énfasis en Ingeniería de Sonido. Pontificia Universidad Javeriana
- Rayleigh, L. (1907). On our perception of sound direction. Philosophical Magazine Series 6,13 (74), 214-232.

- Calcagno, E. R. (2016). "Especialidad y estructura sonora en la música electroacústica". Tesis de posgrado. Universidad Nacional de Quilmes, Bernal, Argentina
- Gardner, B., Martin, K. HRTF Measurements of a KEMAR Dummy -Head Microphone. MIT Media Lab. Perceptual Computing – Technical Report 280, May 1994.
- Padilla Ortiz, A. (2012). Aplicación de tecnologías de sonido binaural para el mejoramiento de la calidad acústica en sistemas de comunicación móvil. Doctora en Ingeniería eléctrica. Universidad Nacional Autónoma de México
- Ahrens, J. (2012)., Analytic Methods of Sound Field Synthesis (Springer, Berlin/Heidelberg), pp. 1-299. Ahrens J. (2014)" Challenges.
- Berkhout, A. J; De Vries, D. Acoustic Control by Wave Field Synthesis. JAES. Vol. 93, pp. 2765-2778, 1993.
- Poletti, M. A. (2005), "Three-dimensional Surround Sound Systems Based on Spherical Harmonics," Journal of the Audio Engineering Society 53(11), Journal Audio Engineering Society 53(11), pp.1004-1025
- Zotter, F. and Spors, S. (2013), "Is sound field control determined at all frequencies? How is it related to numerical acoustics?", in Proceedings of the 52nd International Conference of the Audio Engineering Society (Guildford, UK), paper 1-3.
- Fernández, A., Merchel, S., Pesqueux, L., Rouaud, M., & Ordell, M. (2004). Sound Reproduction by Wave Field Synthesis. Faculty of Engineering and Science: Aalborg Universitet.
- Bleda Pérez S. (2009). Contribuciones a la implementación de Sistemas de espacios Wave Field Synthesis. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- Oldfield R. (2013). The analysis and improvement of focused source, reproduction with wave field. synthesis. Acoustics Research Centre. Salford, Salford, UK.



Kevin Davis. (2013). **Sound Localization I: Physical Cues**. Lectures from Brain and Cognitive Sciences, University of Rochester.

Pueo Basilio., O. & Romá Romero., M. Electroacústica, Altavoces y Micrófonos. Person Prentice Hall, Madrid, 2003.

Tontechnik-Rechner-Sengpielaudio. Loudspeaker Efficiency Vs Sensitivity [en línea]. Disponible en: < <http://www.sengpielaudio.com/calculator-efficiency.htm>>.

Tontechnik-Rechner-Sengpielaudio. Compare Sound Power, Sound Pressure, and Sound Intensity in a distance from the sound source [en línea]. Disponible en: < <http://www.sengpielaudio.com/calculator-soundpower.htm>>

Interacción acústica y su aplicación en arreglos de altavoces- parte II. [en línea]. (28/11/2008). S Audiología protésica [en línea]. (28/11/2008). Disponible en: < <http://soundcheck.com.mx/interaccin-acstica-y-su-aplicacin-en-arreglos-de-altavoces-parte-ii/> >

León Buitrón, J. (2003). Desarrollo de un software de procesamiento para obtener señales de audio binaurales a partir de señal de audio monofónicas. Tesis de grado. Universidad de las América.

Maggiolo D. Localización [en línea]. Disponible en: <<http://www.eumus.edu.uy/docentes/maggiolo/acuapu/loc.html> >

Sherlock Ohms. Guide to Speaker Specifications (2/05/2006). Disponible en: <<http://www.psbspeakers.com/articles/Guide-to-Speaker-Specifications> >

Intangibilidad de la palabra. [en línea]. Disponible en: <[http://www.academia.edu/17975150/INTELIGIBILIDAD\\_DE\\_LA\\_PALABRA\\_HABLADA](http://www.academia.edu/17975150/INTELIGIBILIDAD_DE_LA_PALABRA_HABLADA) >

## 12. ANEXO A

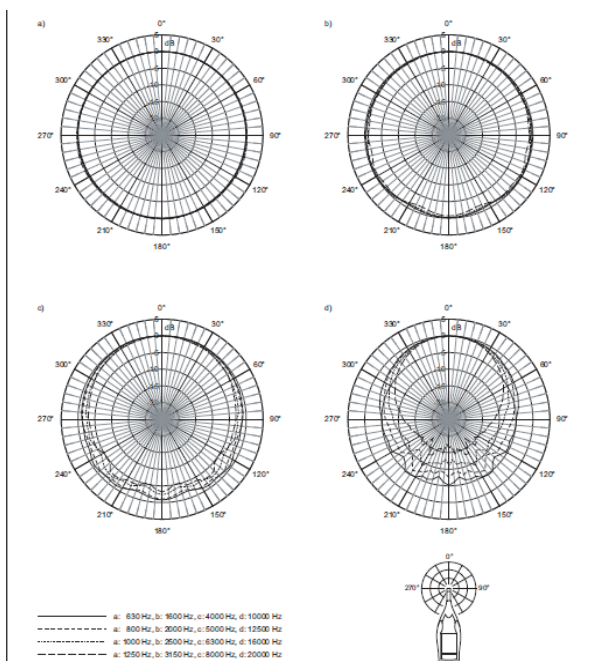
Especificaciones de los equipos de medición usados en esta investigación.

Categorías.

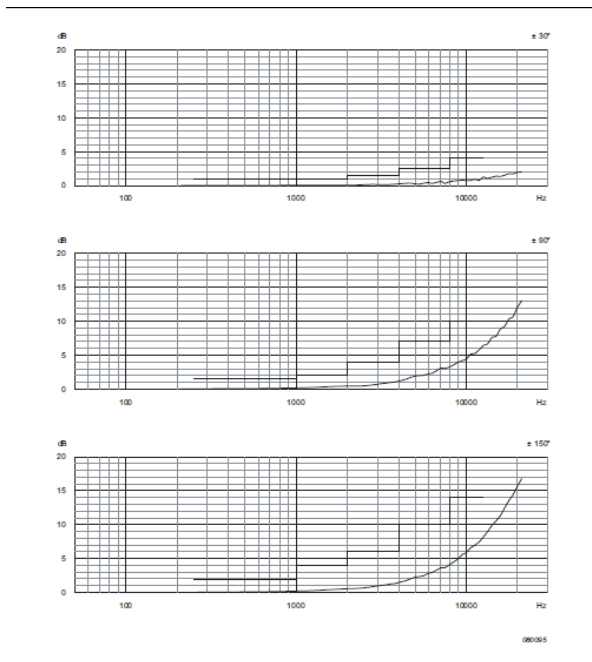
**Equipos:**

**Sonómetro:** Brüel & Kjaer, Hand-held Analyzer Types 2250, 2250-L and 2270 With Microphone Type 4189.

**Imagen 42:** Respuesta de directividad del Micrófono Tipo 4189, Preamplificador de micrófono ZC-0032 y el analizador con el preamplificador de micrófono montado directamente en el analizador, medido en un plano paralelo a la pantalla ya lo largo del eje del micrófono.



**Imagen 43:** Variaciones de sensibilidad para el tipo de micrófono 4189 y el preamplificador de micrófono ZC-0032 con el preamplificador de micrófono conectado a un cable de extensión de micrófono, con ángulos de incidencia de sonido dentro de  $\pm 0^\circ$  desde la dirección de referencia.



**Imagen 44:** Pistófono para calibración del sonómetro Brüel & Kjaer,

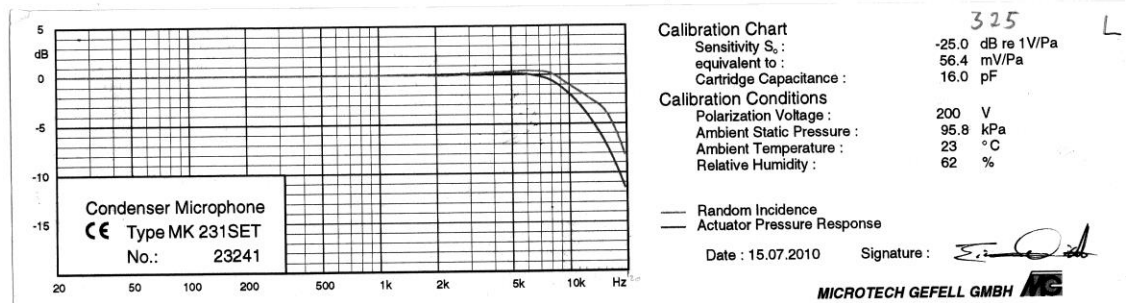
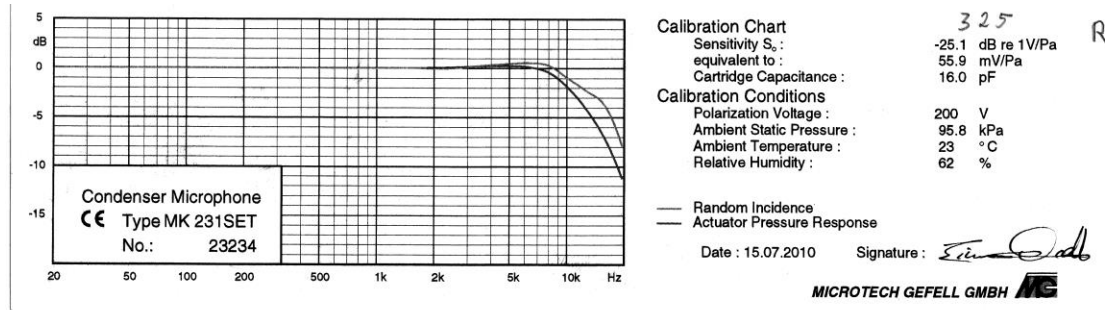
## PRODUCT DATA

### Sound Calibrator Type 4231

*Sound Calibrator Type 4231 is a handy, portable sound source for calibration of sound level meters and other sound measurement equipment. The calibrator is very robust and stable, and conforms to EN/IEC 60942 (2003) Class LS and Class 1, and ANSI S1.40-2006.*

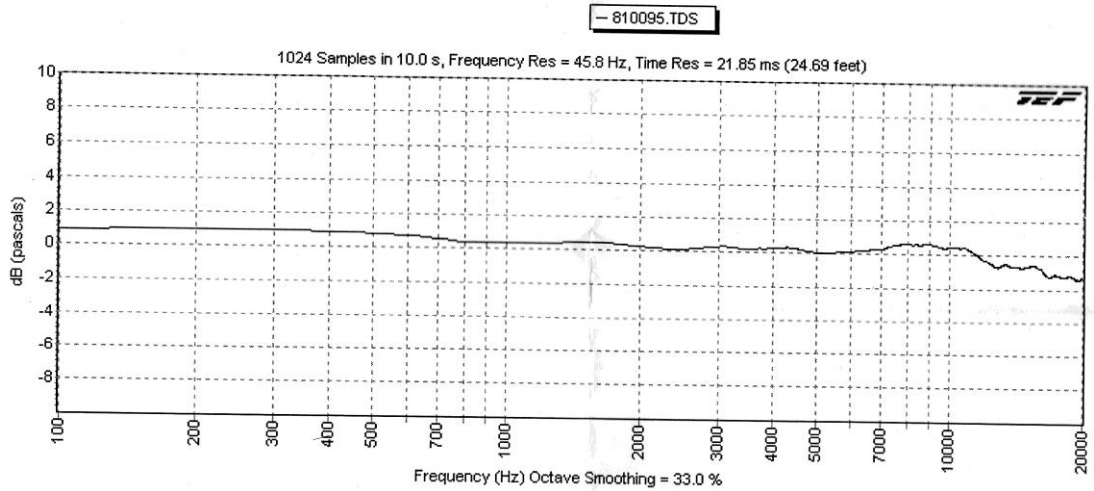


**Imagen 45:** Respuesta en frecuencia y especificaciones de la Cabeza Binaural  
Cortex 0.1 dB MK2b



**Imagen 41:** Micrófono de medición TEF

CAL DUE 06/04/11  
 6/4/2010 5:08:54 AM GOLDLINE NB CP  
 sensitivity 7.5 mv/pa



**TDA 2003 amplificador operacional:** Imágenes de las especificaciones de la hoja Datasheet disponible en:

<<http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/SGSThompsonMicroelectronics/mXutuqt.pdf>>

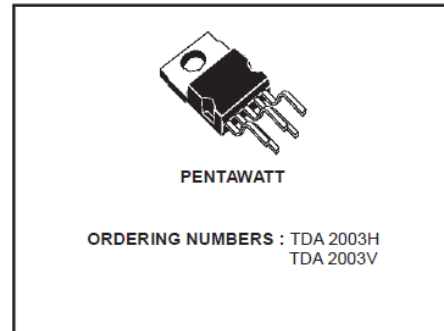
**DESCRIPTION**

The TDA 2003 has improved performance with the same pin configuration as the TDA 2002.

The additional features of TDA 2002, very low number of external components, ease of assembly, space and cost saving, are maintained.

The device provides a high output current capability (up to 3.5A) very low harmonic and cross-over distortion.

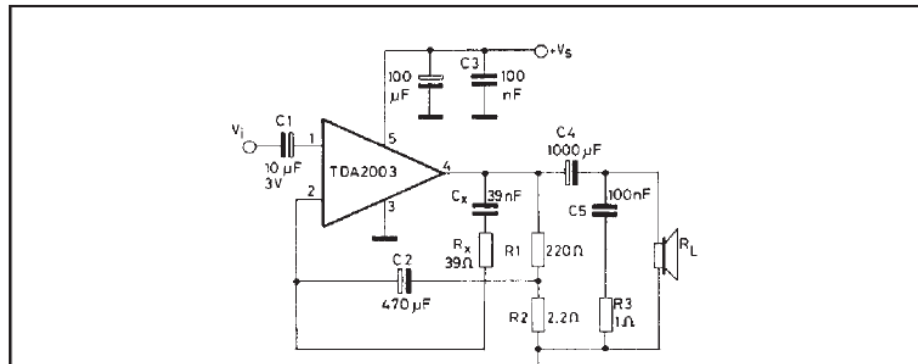
Completely safe operation is guaranteed due to protection against DC and AC short circuit between all pins and ground, thermal over-range, load dump voltage surge up to 40V and fortuitous open ground.



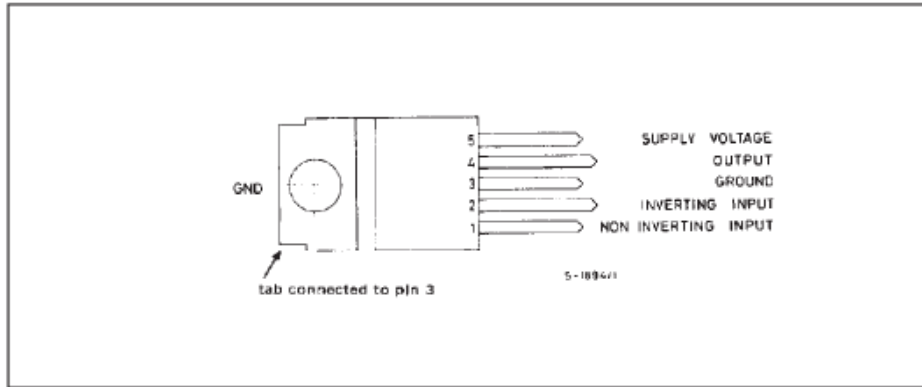
**ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS**

Symbol	Parameter	Value	Unit
$V_s$	Peak supply voltage (50ms)	40	V
$V_s$	DC supply voltage	28	V
$V_s$	Operating supply voltage	18	V
$I_o$	Output peak current (repetitive)	3.5	A
$I_o$	Output peak current (non repetitive)	4.5	A
$P_{tot}$	Power dissipation at $T_{case} = 90^\circ C$	20	W
$T_{stg}, T_j$	Storage and junction temperature	-40 to 150	$^\circ C$

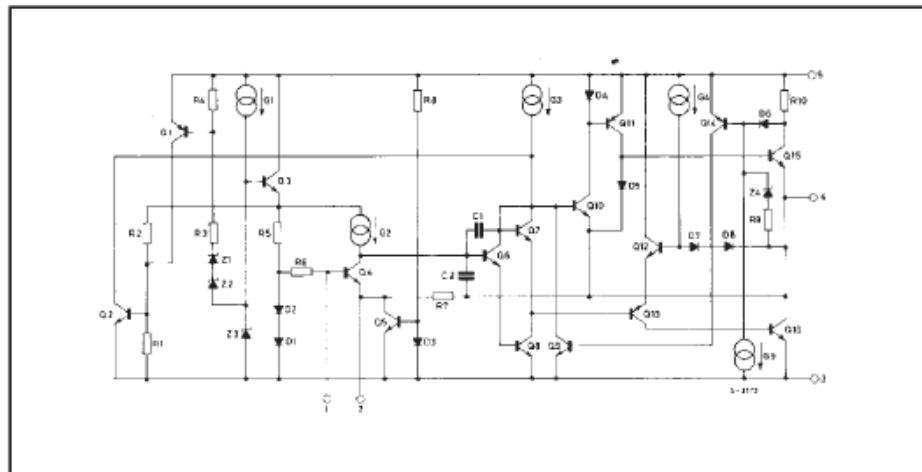
**TEST CIRCUIT**



**PIN CONNECTION (top view)**



**SCHEMATIC DIAGRAM**



THERMAL DATA

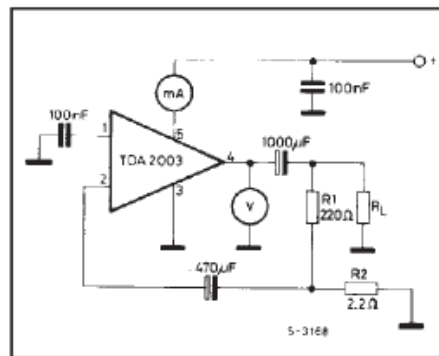
Symbol	Parameter	Value	Unit
$R_{th-j-case}$	Thermal resistance junction-case	max 3	°C/W

2/10

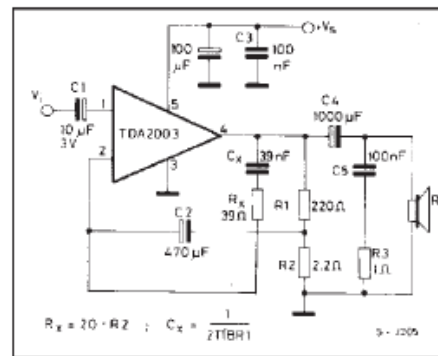


TDA2003

DC TEST CIRCUIT



AC TEST CIRCUIT



ELECTRICAL CHARACTERISTICS (  $V_s = 14.4V, T_{amb} = 25^\circ C$  unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
--------	-----------	-----------------	------	------	------	------

DC CHARACTERISTICS (Refer to DC test circuit)

$V_s$	Supply voltage		8		18	V
$V_o$	Quiescent output voltage (pin 4)		6.1	6.9	7.7	V
$I_d$	Quiescent drain current (pin 5)			44	50	mA

AC CHARACTERISTICS (Refer to AC test circuit,  $G_v = 40$  dB)

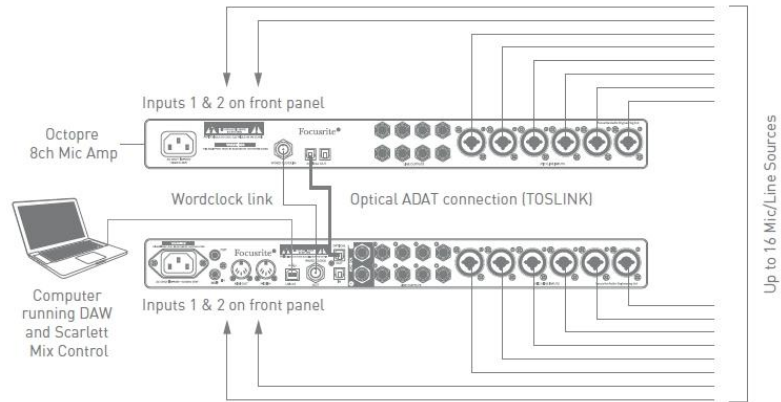
$P_o$	Output power	$d = 10\%$ $f = 1$ kHz	$R_L = 4\Omega$ $R_L = 2\Omega$ $R_L = 3.2\Omega$ $R_L = 1.6\Omega$	5.5 9	6 10 7.5 12	W W W W
$V_{i(rms)}$	Input saturation voltage			300		mV
$V_i$	Input sensitivity	$f = 1$ kHz $P_o = 0.5W$ $P_o = 6W$ $P_o = 0.5W$ $P_o = 10W$	$R_L = 4\Omega$ $R_L = 4\Omega$ $R_L = 2\Omega$ $R_L = 2\Omega$		14 55 10 50	mV mV mV mV

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (continued)

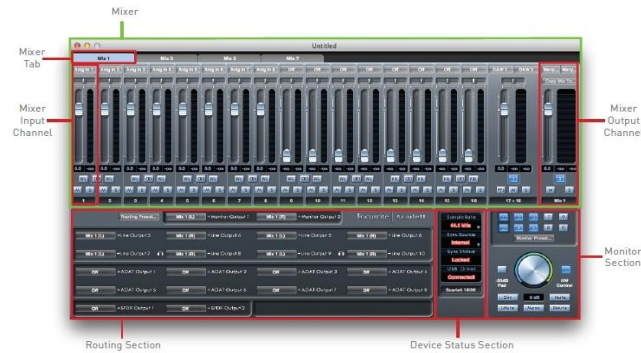
Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
B	Frequency response (-3 dB)	$P_o = 1W$ $R_L = 4\Omega$	40 to 15,000			Hz
d	Distortion	$f = 1 \text{ kHz}$ $P_o = 0.05 \text{ to } 4.5W$ $R_L = 4\Omega$ $P_o = 0.05 \text{ to } 7.5W$ $R_L = 2\Omega$		0.15 0.15		% %
$R_i$	Input resistance (pin 1)	$f = 1 \text{ kHz}$	70	150		$k\Omega$
$G_v$	Voltage gain (open loop)	$f = 1 \text{ kHz}$ $f = 10 \text{ kHz}$		80 60		dB dB
$G_v$	Voltage gain (closed loop)	$f = 1 \text{ kHz}$ $R_L = 4\Omega$	39.3	40	40.3	dB
$e_n$	Input noise voltage (0)			1	5	$\mu V$
$i_n$	Input noise current (0)			60	200	$\mu A$
$\eta$	Efficiency	$f = 1 \text{ Hz}$ $P_o = 6W$ $R_L = 4\Omega$ $P_o = 10W$ $R_L = 2\Omega$		69 65		% %
SVR	Supply voltage rejection	$f = 100 \text{ Hz}$ $V_{\text{ripple}} = 0.5V$ $R_o = 10 \text{ k}\Omega$ $R_L = 4\Omega$	30	36		dB

(0) Filter with noise bandwidth: 22 Hz to 22 kHz

**Focusrite Scarlett 18i20 especificaciones: Imágenes de las especificaciones de la interfaz de audio.**



The Scarlett MixControl GUI (Graphical User Interface) will appear as shown below (Mac version illustrated).





### Scarlett 18i20 Performance Specifications

Configuration	
Inputs	18: analogue (8), S/PDIF (2), ADAT (8)
Outputs	20: analogue (10), S/PDIF (2), ADAT (8)
Mixer	Fully assignable 18-in/16-out mixer
Digital Performance	
A-D Dynamic Range	105 dB CCIR-RMS (all inputs)
D-A Dynamic Range	103 dB CCIR-RMS (line outputs)
Supported sample rates	44.1 kHz, 48 kHz, 88.2 kHz & 96 kHz
Clock jitter	<250 ps
Microphone Inputs	
Frequency Response	20 Hz ± 0.5 dB, 20 kHz ± 0.1 dB (min. gain)
THD+N	0.001% (1 kHz, -1 dBFS, 20 kHz BW)
Noise E1N	-122 dBu CCIR-RMS (measured at 60 dB of gain with 150 ohm termination)
Maximum input level	+8 dBu (without pad)
Line Inputs	
Frequency Response	20 Hz - 20 kHz ± 0.1 dB
THD+N	0.007% (1 kHz, -1 dBFS, 20 kHz BW)
Noise (NiPoS)	-105 dBFS CCIR-RMS (measured at min. gain with 50 ohm termination)
Maximum input level	+29 dBu
Instrument Inputs	
Frequency Response	20 Hz - 20 kHz ± 0.1 dB
THD+N	0.007% (1 kHz, -1 dBFS, 20 kHz BW)
Noise (NiPoS)	-103 dBFS CCIR-RMS (measured at min. gain)
Maximum input level	+8 dB (without pad)
Line Outputs 1 & 2	
Maximum Output Level (0 dBFS)	+16 dBu, balanced
THD+N	0.001% (1 kHz, -1 dBFS, 20 kHz BW)

### Physical and Electrical Characteristics

Analogue Inputs Inputs 1 & 2	
Connectors	Neutrik XLR Combo: Mic/Line/Inst, on front panel
Mic/Line switching	Automatic
Line/Instrument switching	2 x front panel switches
Phantom power	Shared +48 V phantom power switch for inputs 1 to 4
Analogue Inputs 3 to 8	
Connectors	Neutrik XLR Combo: Mic/Line, on rear panel
Mic/Line switching	Automatic
Phantom power	Shared +48 V phantom power switch for inputs 1 to 4, and 5 to 8
Analogue Outputs	
Main outputs	10 x balanced 1/4" TRS jacks (on rear panel)
Stereo headphone outputs	2 x 1/4" TRS jack on front panel
Main monitor output level control	On front panel
Headphones level controls	
Other I/O	
ADAT I/O	2 x TOSLINK optical connectors; 8 channels @ 44.1/48 kHz
S/PDIF I/O	2 x phono (RCA), can be re-assigned to ADAT ports in software
Word clock output	BNC connector
USB	1 x USB 2.0 Type B connector
MIDI I/O	2 x 5-pin DIN sockets
Weight and Dimensions	
W x D x H	482 mm x 265 mm x 45 mm (1U)
Weight	3 kg

### 13. ANEXO B

#### Tiempo de reverberación (RT)

El recinto escogido tiene un volumen de  $66.5 m^3$  y las siguientes dimensiones:

Ancho: 4 metros  
Largo: 5.6 metros  
Alto: 2.97 metros

Se realizó la respectiva medición de tiempo de reverberación teniendo en cuenta las condiciones especificadas en la norma ISO 3382:1997 la cual sugiere una distancia de 1 metro desde cualquier superficie a los puntos de medición con una única posición de fuente, dos posiciones de micrófono y tres mediciones por cada posición. Durante la medición se implementó un dodecaedro como fuente omnidireccional, el micrófono de medición TEF, una interfaz de audio, un sonómetro tipo 1 Svantek y una señal de barrido logarítmico de 3 segundos de duración.

La tabla No. 41 presenta el promedio final de RT30 para el rango de frecuencias por banda de octava de 125 Hz a 4000 Hz. Los datos completos para dicha medición se pueden observar en el anexo B.

**Tabla 41:** Promedio de tiempo de reverberación por banda de octava

Frecuencia (Hz)	Promedio (s)
125 Hz	0.7
250 Hz	0.6
500 Hz	0.8
1000 Hz	0.7
2000 Hz	0.7
4000 Hz	0.6
8000 Hz	0.5

Promedio total: 0.65 s

Se debe tener en cuenta que no hay una norma que especifique el rango de tiempo de reverberación en el que el recinto en el que se utilice el sistema de Wave Field Synthesis deba estar. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el tiempo de reverberación sea bajo para que no haya una coloración adicional del sonido e influya en la percepción de los oyentes. Para esto se tomó en cuenta, el tiempo de

reverberación que debe tener el recinto en el que se hicieron las pruebas subjetivas (aula de proceso enseñanza-aprendizaje) y los valores recomendados para dichas aulas:

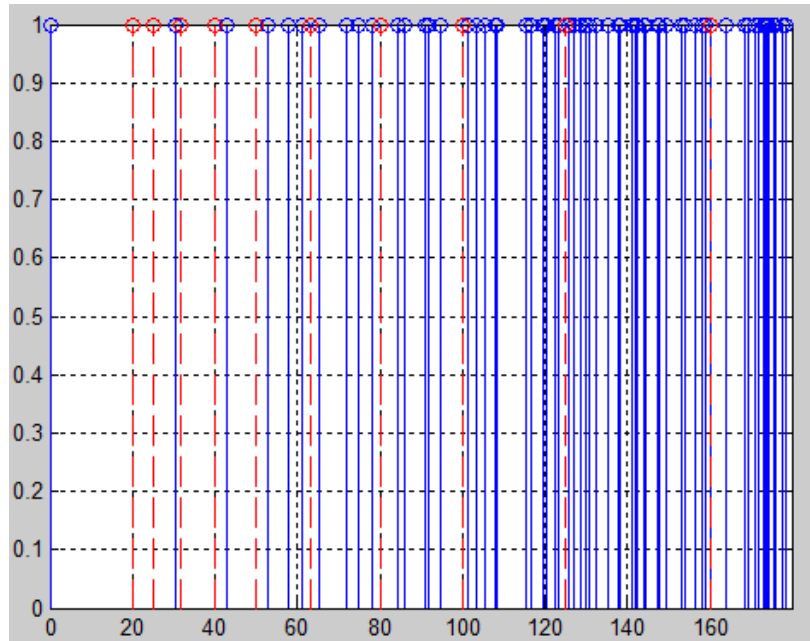
**Tabla 42:** Tiempo de reverberación recomendados para aulas.

Criterio	Volumen, V [m <sup>3</sup> ]	Frecuencia [Hz]		
		500	1000	2000
ANSI 12.60	$V \leq 283$	0,6	0,6	0,6
ANSI 12.60	$283 \leq V \leq 566$	0,7	0,7	0,7
NBR 12179	$150 \leq V \leq 300$	0,5 - 0,7	0,5 - 0,7	0,5 - 0,7
WHO 2001	$V \leq 250$	0,4 - 0,7	0,4 - 0,7	0,4 - 0,7
WHO 2001	$V > 250$	0,6 - 1,2	0,6 - 1,2	0,6 - 1,2
Carrión, 2001	$100 \leq V \leq 10.000$	0,8 - 1,0	0,8 - 1,0	

El recinto anterior tiene un volumen de  $66.5 \text{ m}^3$ .

Para obtención de los cálculos de los modos del recinto se utilizó un programa en Matlab hecho en los cursos acústicos vistos durante nuestro periodo académico. Para los cálculos se ingresó el largo, ancho, alto y el tiempo de reverberación con un promedio 0.6 s del recinto presentado anteriormente.

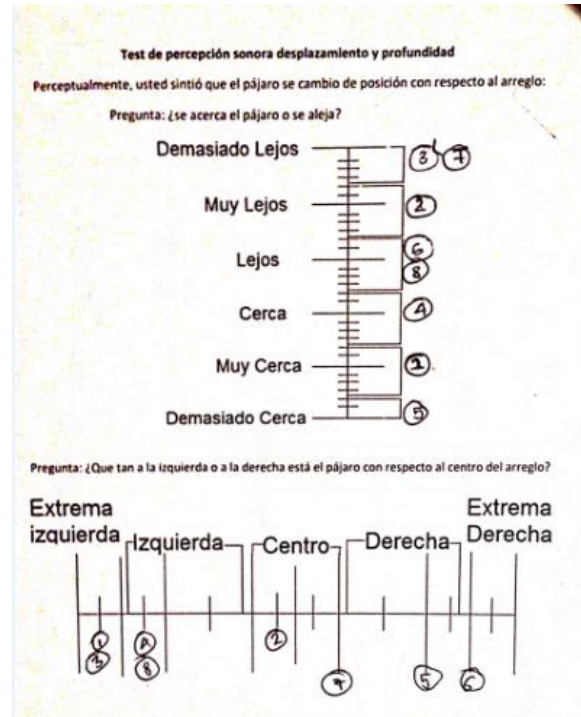
**Grafica 29:** Modos del recinto donde se realizaron las pruebas subjetivas



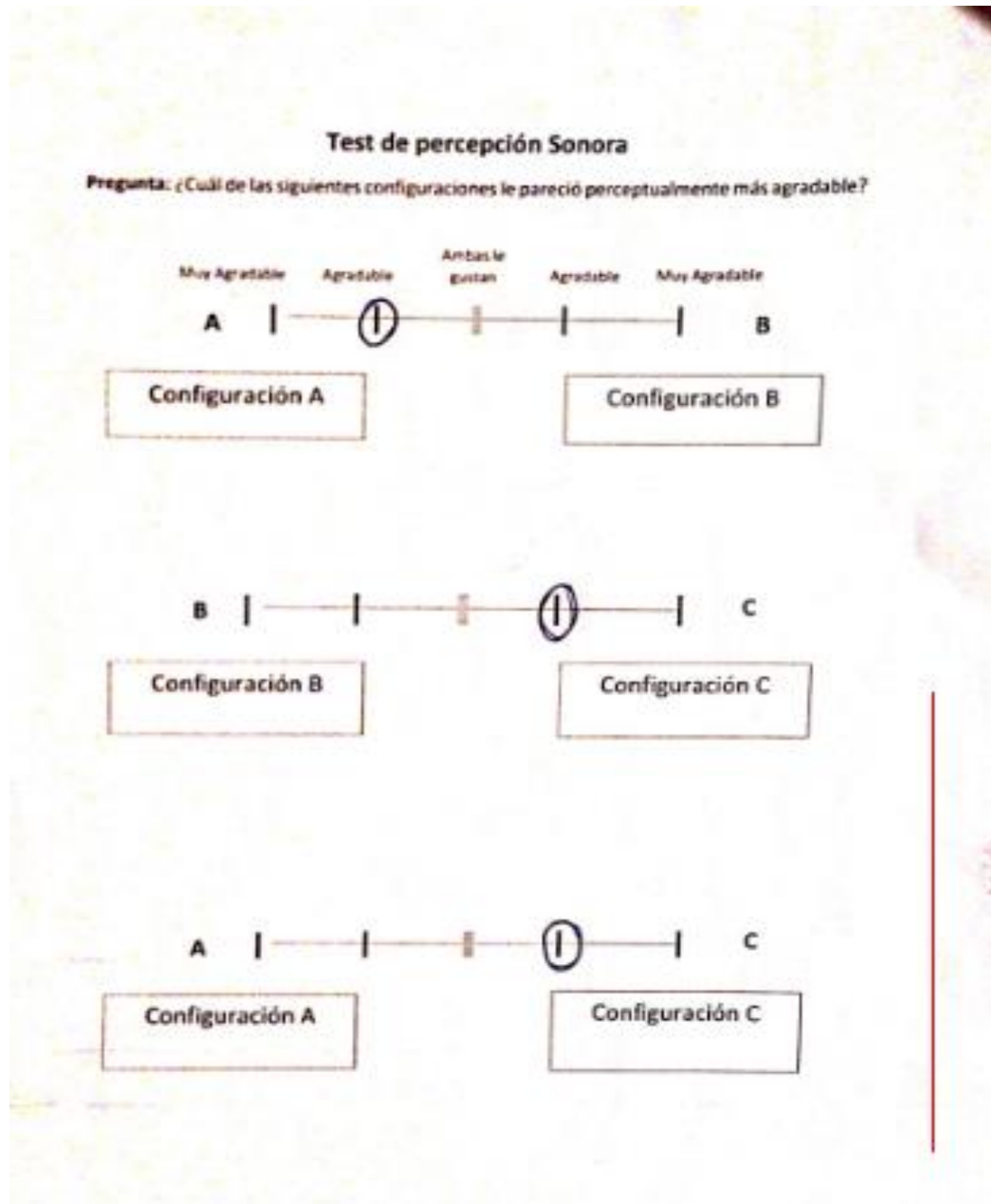
Como se puede observar en la gráfica anterior los modos del recinto (líneas de color rojo) no superan la frecuencia de 160 Hz, es decir no se tienen en cuenta ya que el rango en el cual se implementó la técnica es de 500 Hz a 4000 Hz.

## Encuestas de cada test

### Test de distintas configuraciones de atenuaciones y retardos



## Test de distintas configuraciones de atenuaciones y retardos



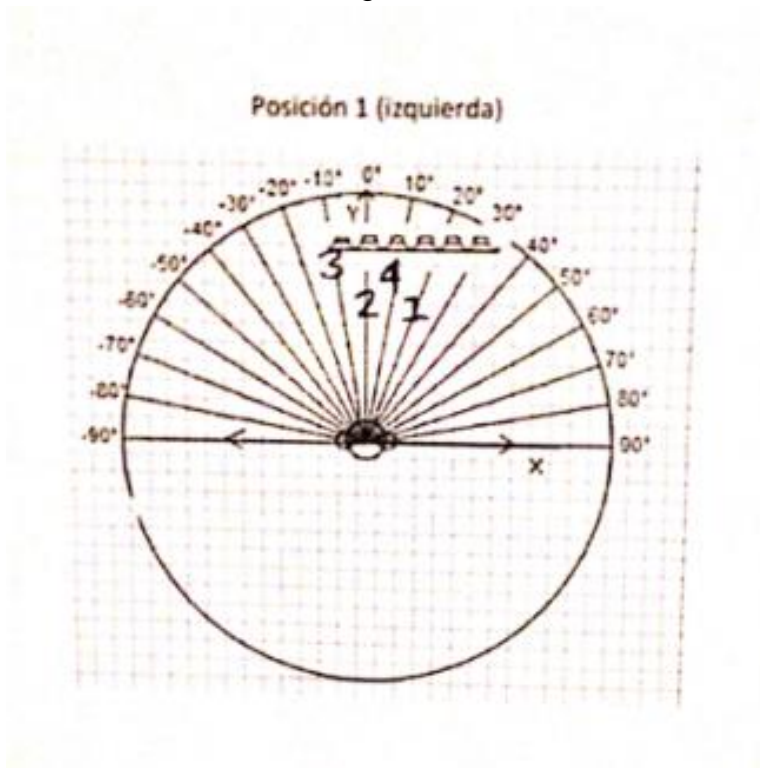
## Test del área de audiencia

**Test area de audiencia**

**Pregunta:** ¿Cómo le pareció perceptualmente el arreglo lineal en cada uno de los siguientes puntos?

Diagram illustrating a perceptual test for a linear arrangement. The test consists of six rectangular segments arranged horizontally. Below the segments are four vertical Likert scales, each with five levels: Excelente, Bueno, Suficiente, Aceptable, and Malo. Each scale has a small circle to its left or right, and a tick mark on the vertical line indicating a rating. The top-left scale has a tick mark at 'Bueno'. The top-right scale has a tick mark at 'Excelente'. The middle scale has a tick mark at 'Suficiente'. The bottom-left scale has a tick mark at 'Bueno'. The bottom-right scale has a tick mark at 'Excelente'.

Test de localización sonora por grados  
0 grados



90 grados

