

Control automático de posición para cajas acústicas en un sistema de audio 5.1

Ricardo Andrés Castañeda Perdomo, ricardocperdomo@gmail.com

Andrés Felipe Escobar Guzmán, felipe1368@hotmail.com

Tesis de grado presentado para optar al título de Ingeniero Electrónico

Director: Vladimir Trujillo Olaya, Doctor (PhD) en Ingeniería con énfasis en Ingeniería Eléctrica
y Electrónica



Universidad de San Buenaventura Colombia

Facultad de Ingenierías

Ingeniería Electrónica

Santiago de Cali, Colombia

Programa de ingeniería electrónica

2017

Nota de aceptación

Este trabajo de grado, en la modalidad proyecto de investigación, es aceptado como uno de los requisitos para obtener el título de ingeniero electrónico de la Universidad de San Buenaventura Cali

Ing. Vladimir Trujillo Olaya, PhD.

Ing. Erika Sarria Navarro

Ing. José Fernando Valencia Murillo, PhD

Santiago de Cali, 2017

Ficha de Resumen del proyecto de Grado

Título: Control Automático De Posición Para Cajas Acústicas En Un Sistema De Audio 5.1

Facultad: Ingeniería.

Programa: Electrónica.

Estudiantes: Ricardo Andrés Castañeda Perdomo.

Andrés Felipe escobar Guzmán.

Director: Ing. Vladimir Trujillo Olaya, PhD.

Áreas de Investigación: Automatización electrónica, control, sistemas de sonido 5.1, Acústica.

Fecha de Iniciación: Abril de 2015.

Dedicatoria

Dedicamos primeramente nuestro trabajo a Dios, por las oportunidades que nos ha puesto en el camino guiando nuestros pasos e iluminando nuestro sendero. De igual forma a nuestros padres, dedicamos esta tesis quienes han sabido formarnos en buenos valores, hábitos y sentimientos, ayudándonos a salir adelante y siempre buscando el buen camino.

Agradecimientos y Reconocimientos

Los autores de este documento expresamos nuestros agradecimientos y reconocimientos a:

- El profesor Vladimir Trujillo Olaya, nuestro director de tesis, quien nos guio en el desarrollo del trabajo de grado, por su apoyo durante todo el proceso de investigación que sin importar el momento estuvo presente, por entregarnos su conocimiento para llevar a buen fin el proyecto y por permitirnos trabajar bajo su guía y optimismo.
- El Profesor Carlos Mauricio Betancur, quien con su buena disposición nos asesoró durante el desarrollo del proyecto con su conocimiento, por prestarnos sus equipos para poder trabajar sin condición alguna más que hiciésemos un buen trabajo. nos impulsó y aconsejo a mejorar siempre.
- A Deysi Marín, por su fe en nosotros, su compañía y asesoría en cada una de las dudas que nos surgían en el documento por ayudarnos a estructurar un buen documento, una buena escritura, un buen contenido, darle orden y sentido a todo lo que quisiéramos plasmar así como su ayuda propia en redacción. Gracias por estar al pendiente de cada uno de los momentos en que teníamos la necesidad de avanzar siempre pensando que todo lo que lográramos sería lo mejor.
- Al cuerpo de docente del programa de ingeniería electrónica por siempre estar en disposición de atender a todas nuestras dudas e inquietudes que fueron de gran ayuda para lograr culminar el proyecto.

- A nuestros Familiares dentro y fuera del país por siempre tenernos en sus pensamientos apoyándonos durante todos y cada uno de nuestros logros por darnos fortaleza y ánimos para continuar y llegar a donde estamos hoy día.
- El director de programa Edgar Felipe Echeverry, por su optimismo y confianza depositada en nosotros y el proyecto, por estar pendiente del uso de los espacios y por atendernos en todo momento.

CONTENIDO

RESUMEN	12
ABSTRACT	13
1. INTRODUCCIÓN	14
1.1. ANTECEDENTES	14
1.2. MOTIVACION	15
1.3. OBJETIVOS	17
Objetivo General	17
Objetivos específicos del proyecto	17
1.4. ALCANCE	18
1.5. VIABILIDAD	18
1.6. CONTRIBUCIONES	18
2. MARCO DE REFERENCIAS	20
2.1. MARCO TEÓRICO	20
2.2. ESTADO DEL ARTE	24
3. MARCO EXPERIMENTAL	34
3.1. RECURSOS DISPONIBLES	34
3.2. CONSIDERACIONES DE DISEÑO EN SOFTWARE	37
3.2.1. Influencia del rango de distancias entre cajas acústicas y la audiencia	37
3.2.2. Referencias o señales de prueba	39
3.2.3. Algoritmos de ubicación de fuentes basados en:	41
3.2.4. Parámetros de inicialización.	46
3.2.5. Diagrama de bloques general	47
3.3. CONSIDERACIONES DE DISEÑO EN HARDWARE	48
3.3.1. Microcontrolador	48
3.3.2. Etapas del sistema embebido	51
3.4. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y UBICACIÓN DE CAJAS ACUSTICAS	57
3.4.1. Distribución espacial de las cajas acústicas	57
3.4.2. Ubicación de las cajas acústicas	61
4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	71
4.1. EVALUACIÓN DE LOS ALGORITMOS DE UBICACIÓN DE FUENTES BASADOS EN:	71
4.1.1. FFT	71
4.1.2. DFBF, TDE Y TDOA	73

4.1.3.	Selección de algoritmo de ubicación de fuentes.	74
4.1.4.	Comportamiento de la interfaz HMI.	74
4.1.5.	Comportamiento de las muestras recolectadas.	81
5.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	84
5.1.	CONCLUSIONES	84
5.2.	TRABAJOS FUTUROS	86
	BIBLIOGRAFÍA	87
	ANEXO A	90
	ANEXO B	93
	ANEXO C	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Configuración angular de un sistema de sonido 5.1	23
Figura 2. Distribución de espacios donde actúa cada caja acústica	23
Figura 3. Distribución de las cajas acústicas a la audiencia	23
Figura 4. Diagrama de sistema beamforming	25
Figura 5. Tiempo de retardo para la estimación de la propagación de la onda	26
Figura 6. Arreglo de tres micrófonos.....	27
Figura 7. Arreglo de cuatro micrófonos	28
Figura 8. Dirección de estimación de fuente.	28
Figura 9. Ubicación de fuentes con 2 micrófonos o con arreglo.....	29
Figura 10. Ubicación de fuentes de ruido a diferentes grados	30
Figura 11. Cruces de potencias espectrales cruzadas como respuestas.....	31
Figura 12. Grafico método GCC.....	32
Figura 13. Grafico método PHAT.....	33
Figura 14. Método Grid Search	33
Figura 15. Dimensiones y vista real del micrófono de prueba dbx RTA-M.....	35
Figura 16. Respuesta en frecuencia dbx RTA-M	35
Figura 17. Grafica polar de directividad de dbx RTA-M.....	36
Figura 18. Diagrama físico de la interfaz TASCAM US-366.....	37
Figura 19. Uso de micrófono independiente, prueba de audio.....	39
Figura 20. Representación del ruido rosa	40
Figura 21. Espectro de la señal de prueba a 1KHz	41
Figura 22. Amplitud de la señal captada en el eje axial	42
Figura 23. Amplitud de la señal captada a 45 grados a la izquierda del eje axial	43
Figura 24. Amplitud de la señal captada a 45 grados a la derecha del eje axial.....	43
Figura 25. Señales usadas en <i>finddelay</i>	44
Figura 26. Señales usadas en la correlación cruzada	45
Figura 27. Ubicación del punto donde la correlación es máxima.....	45
Figura 28. Diagrama general para ubicación de cajas acústicas	48
Figura 29. Diagrama de bloques de etapas	51
Figura 30. Diseño esquemático de fuente dual y alimentación.....	52
Figura 31. Conversor DC a DC ajustable.....	53
Figura 32. Circuito esquemático acople de señal 4Khz	54
Figura 33. Circuito esquemático con el microcontrolador	55
Figura 34. Módulo MP3 YX5300 UART	56
Figura 35. Circuito esquemático demultiplexores para audio y PWM	56
Figura 36. Servo motor HS-311 tomado de.....	57
Figura 37. Distribución espacial de las cajas acústicas con respecto al micrófono	59

Figura 38. Distribución espacial física vista frontal	60
Figura 39. Distribución espacial física vista lateral	60
Figura 40. Pedestal	61
Figura 41. Cilindros de papel.....	62
Figura 42. Bases de Mdf para el pedestal.....	62
Figura 43. Soportes de Mdf para el pedestal	63
Figura 44. Canaleta de aluminio para parte frontal del pedestal	63
Figura 45. Pedestales terminados	64
Figura 46. Base de control.....	64
Figura 47. Base con rodamiento en el centro.....	65
Figura 48. Eje central que une el sistema	65
Figura 49. Servomotor y palanca	66
Figura 50. Vista inferior de palanca y eje	66
Figura 51. Bases de control por ensamblar.....	66
Figura 52. Pedestal con base de control y caja acústica	67
Figura 53. Ubicación de las cajas acústicas en dirección central de la audiencia	68
Figura 54. Ubicación de las cajas acústicas en dirección a la derecha de la audiencia.	69
Figura 55. Ubicación de las cajas acústicas en dirección a la izquierda de la audiencia.....	70
Figura 56. Representación de la fila 3 en la Tabla 3.....	72
Figura 57. Prueba 1 señal pa y pb	73
Figura 58. Prueba n señal pg y ph	73
Figura 59. Pantalla de inicio	75
Figura 60. Pantalla principal.....	75
Figura 61. Activación del bluetooth	76
Figura 62. Menú desplegable.....	77
Figura 63. Opción Ajustar 5.1	77
Figura 64. Finaliza Ajustar 5.1	78
Figura 65. Opción Reajustar.....	79
Figura 66. Finaliza Reajustar "ok"	80
Figura 67. Finaliza Reajustar "malo"	80
Figura 68. Diagrama de flujo general parte 1	90
Figura 69. Diagrama de flujo general parte2	91
Figura 70. Diagrama de flujo de subrutina para el cálculo de FFT	92
Figura 71. Código para gráfica y reproducción de la señal de prueba	93
Figura 72. Código para la grabación de la señal de prueba	93
Figura 73. Generación del espectro mediante FFT.....	94
Figura 74. MATLAB función finddelay	95
Figura 75. Codificación de correlación cruzada en Matlab	96
Figura 76. Grabación de audio.....	97

Figura 77. Reproducción de la señal de prueba	97
Figura 78. Grabación de las señales	98
Figura 79. Correlación de la señales.....	99
Figura 80. Cajas acústicas posicionadas hacia el centro	100
Figura 81. Cajas acústicas posicionadas hacia la derecha	101
Figura 82. Cajas acústicas posicionadas hacia la izquierda.....	101
Figura 83. Distribución de tarjetas del sistema embebido.....	102
Figura 84. Conexiones internas del sistema embebido	102
Figura 85. Vista frontal del prototipo	103
Figura 86. Vista trasera del prototipo	103
Figura 87. Conexión del sistema 5.1 al prototipo.....	104
Figura 88. Vista frontal de la conexión al prototipo	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tabla Comparativa Microcontroladores DSP	50
Tabla 2: datos recolectados en 3 pruebas para tres posiciones	71
Tabla 3 datos recolectados en 5 pruebas para 5 posiciones	72
Tabla 4. Punto de referencia al centro	81
Tabla 5. Punto de referencia a la derecha.....	82
Tabla 6. Punto de referencia a la izquierda	82
Tabla 7. Costos del proyecto	106

RESUMEN

La implementación de un sistema embebido que sirva como aporte en la automatización de sistemas de sonido 5.1, empleados en la ambientación de espacios está basado en la hipótesis de cuál es la mejor manera de controlar la posición de las cajas acústicas para proveer sonido en un plano donde el sonido directo prima ante las reflexiones del mismo, para ello se planteó un método basado en el análisis espectral de un tono puro, del cual se obtienen dos parámetros su frecuencia y su amplitud.

El análisis espectral de la señal se realiza mediante procesamiento digital de señales obteniendo la grabación y digitalización del tono puro y realizando su transformada rápida de Fourier (FFT), dando como resultado su amplitud y frecuencia, esto se realiza en cada posición y para cada caja acústica. En este caso, las amplitudes para cada posición de la caja acústica se discriminarán y se compararan dejando así la amplitud más alta obtenida por la grabación que a su vez representará el plano más directo entre el oyente y el altavoz.

El proceso de control está basado en un estímulo (tono puro) y respuesta (movimiento de la caja acústica) cada estímulo será realizado mediante el uso de un tono puro de 4KHz, el cual será grabado y analizado mediante FFT y dando como respuesta la ubicación de las cajas acústicas mediante el control de los motores ubicados en los pedestales que las soportan, los cuales rotaran según un rango predeterminado angularmente haciendo así un barrido del espacio con el fin de identificar el sonido directo que representara a su vez la mayor magnitud de la señal.

Cabe resaltar que de acuerdo a la revisión bibliográfica realizada este estudio de investigación es pionero en el área y presenta como resultado una herramienta útil para el procesamiento de señales de audio ampliadas a sistemas embebidos, siendo una alternativa objetiva en el análisis de identificación de fuentes en el espacio. Además de lo alcanzado se proponen aspectos que pueden abordarse en trabajos futuros a partir de lo presentado.

Palabras claves: caja acústica, eje axial, FFT, nivel de presión sonora.

ABSTRACT

The embedded system implementation is useful as a contribution in the 5.1 sound systems automation which is used in the adjustment of spaces, where the hypothesis is based on which is the best way of controlling the acoustic boxes position to provide the sound in a plane where the direct sound is the most important on the reflections of the sound waves. In this case, it is proposed a method in which the spectral analysis of a pure tone and it is obtained the frequency and magnitude.

The spectral analysis of a signal is performed using the digital signal processing, where the signal is a pure tone and it is recorded and digitalized and then a Fast Fourier Transform (FFT) is computed, obtaining its frequency and magnitude, this is carried out on each position of the acoustic box. In this case, the magnitude of the signal on each position is compared, and the bigger magnitude of the recorded signal will represent the direct plane of the sound among the listener and the acoustic box.

The control process is based on a stimulus (pure tone) and the response (movement of the acoustic box), where each stimulus will be performed by using a 4KHz-pure tone, which will be recorded and then analyzed by the computation of the FFT and its response will be the angular position of the acoustic box with the control of the motors located under the acoustic box.

It is important to mention that the review of references in this project is pioneer in the academic area and presents as a result a useful tool for the digital signal processing in audio using embedded systems, becoming in an alternative in the sound sources location. Besides, it is proposed future works from this project.

keywords: acoustic box, axial axis, FFT, sound pressure level.

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo de grado presenta la implementación de un prototipo que realiza un ajuste previo de la directividad del sonido controlando la posición de cajas acústicas en un sistema de audio 5.1, lo cual permite mejorar el entorno acústico ofrecido por el sistema, garantizando el mejor nivel de presión sonora en la audiencia y generando un sonido más tridimensional y con mayor fidelidad.

La búsqueda para el desarrollo de este proyecto hace parte del aporte a la automatización y diseño de sistemas embebidos para sistemas de sonido de la Universidad de San Buenaventura Cali.

Las siguientes secciones describirán los antecedentes del proyecto, la motivación, los objetivos de proyecto, contribuciones y viabilidad.

1.1. ANTECEDENTES

En la actualidad, la búsqueda constante para generar alternativas en el diseño de sistemas de sonido *surround* se basa en lograr producir en la audiencia un efecto envolvente y tridimensional del entorno mediante la adecuada distribución de cajas acústicas.

En este caso, los sistemas de sonido multicanal se diseñan con el fin de obtener un efecto que vaya más allá del sonido estéreo, para lo cual existen diferentes sistemas de sonido multicanal que logran una envolvente mucho más tridimensional como el sistema de sonido 5.1, el cual consta de 6 monitores distribuidos espacialmente en torno a una audiencia o eje central, su distribución radial como espacialmente debe estar justamente acomodada y direccionada para que en cada punto de la audiencia se tenga el mejor entorno acústico posible.

En el sistema de sonido 5.1 y en cada uno de los sistemas de sonido *surround*, se tienen parámetros específicos para la ubicación de cada uno de los monitores. Para lograr que el sistema 5.1 sea lo más fiel posible para generar un entorno acústico es necesario que cada monitor cumpla

su función específica lo cual conlleva a la necesidad de posicionarlo exactamente ante la audiencia. Generalmente, la ubicación de estos se hace manualmente basándose en estimaciones de su posición y guiado a un entorno fijo ante diferentes condiciones de la audiencia.

En cuanto se refiere a sistemas de sonido multicanal 5.1, no se ha avanzado en torno a la automatización de procesos que facilitan la solución de problemas de confort acústico, siendo estos de suma importancia en la actualidad en cuanto a exigencias de calidad del sistema. Lo anterior nos lleva a realizar la siguiente pregunta de investigación ¿Cómo podemos automatizar un sistema de audio 5.1 para buscar la mejor posición de las cajas acústicas y obtener el mejor nivel de presión sonora en la audiencia?

1.2. MOTIVACION

Es bien sabido que la fidelidad de un sistema de reproducción de sonido se ve muy afectada por el entorno en el cual los altavoces son colocados. La interacción de un altavoz y un espacio varía con la posición del altavoz, la posición del oyente, la geometría de la sala y el mobiliario. Dispositivos físicos que ayudan a modificar la respuesta de una sala son ampliamente utilizados en auditorios, pero son grandes e indeseables para entornos domésticos. [1]

En la literatura se encuentran pocos artículos que aborden el tema de mejoramiento de la calidad del sonido en espacios. Ropper y Collins dice en su artículo: “Ha habido muchos avances en la grabación de sonido, técnicas, electrónica de consumo y diseño de altavoces;... debido a que la acústica varía con la habitación, posiciones de los altavoces y del oyente, es un complejo problema que hacen de las soluciones analógicas algo inadecuado... El objetivo es cambiar el sonido en la posición del oyente”. [2]. En este artículo se realiza la localización de fuentes usando arreglo de micrófonos.

Además, en formatos discretos de sonido 5.1 surround, la dirección de una fuente de sonido normalmente es formada por la ley de paneo por parejas que usa la diferencia de nivel entre dos cajas acústicas adyacentes. Sin embargo, esta localización usando la ley de paneo por parejas de potencia no es suficiente para satisfacer la naturalidad de dirección percibida. [3]

Teniendo en cuenta lo anterior, en este trabajo de grado, se buscara la mejor posición de las cajas acústicas haciendo que el sistema embebido a diseñar interactúe con la posición de las cajas acústicas y ayude a mejorar la sensación de sonido para que esta sea más fiel sin importar el entorno en el cual estará ubicado el sistema de audio. Para llevar a cabo esto, se considerará la localización inicial del sistema de sonido 5.1 y la margen en grados que puede girar cada caja acústica.

Para lograr un sistema de localización de fuentes de sonido es necesario tener en cuenta que no se entrará a modificar las señales obtenidas por el sistema, sino que se remitirá a la toma de muestras en el espacio o perímetro donde estará ubicada la audiencia o bien sea un solo oyente para ser analizadas por el sistema de control de posición basándose en la ubicación de las cajas acústicas y en los datos obtenidos de la muestra.

1.3. OBJETIVOS

Objetivo General

Diseñar un sistema de Control automático de posición para cajas acústicas en un sistema de audio 5.1.

Objetivos específicos del proyecto

- Investigar diferentes métodos de localización de fuentes sonoras para la automatización de sistemas de audio 5.1 y el comportamiento de los sistemas de audio 5.1.
- Seleccionar los algoritmos de mejor desempeño para la localización de fuentes sonoras y determinar cuál es la mejor manera de controlar la posición de una caja acústica para un sistema de audio 5.1.
- Diseñar el sistema embebido para el control automático de posición para cajas acústicas en un sistema de audio 5.1.
- Realizar pruebas de sonido, recolección y análisis de datos del comportamiento del sistema de posición.
- Escribir el documento final y un artículo de investigación referente a la automatización de sistemas de audio 5.1.

1.4. ALCANCE

El proyecto de investigación planteado pretende implementar un sistema de control de posición para cajas acústicas de un sistema de audio 5.1, con el fin de aportar a la automatización de sistemas de audio que emplean sonido *surround* y para ello se pretende llevar a cabo:

- Recolección de señales de prueba que garanticen la posición de la audiencia.
- Verificación de las posiciones iniciales de las cajas acústicas del sistema de audio 5.1.
- Validación del posicionamiento de las cajas acústicas a partir de las muestras recolectadas previamente.
- Uso de software con interfaz gráfica que permitirá aplicar cada uno de los pasos de la metodología propuesta en el presente estudio.

1.5. VIABILIDAD

El proyecto es viable, debido a que aborda una temática actual que involucra el desarrollo de sistemas de sonido y automatización de sistemas embebidos, ambas áreas de profundización del énfasis del programa, base que permitirá hacer el proyecto mucho más fuerte, además el proyecto cuenta con expertos en el área de sonido, sistemas de audio, acondicionamiento de sonido, ambientación de audiencias, procesamiento de señales y control, para generar así una metodología interdisciplinaria.

1.6. CONTRIBUCIONES

El presente estudio desarrolla una metodología que se fundamenta en el procesamiento de señales de prueba aplicadas a sistemas de control y sus principales contribuciones son:

- Metodología para ubicación de fuentes en el espacio
- Comparación de magnitudes a partir de señales de prueba procesadas mediante FFT
- Herramienta para la distribución de cajas acústicas en sistemas de audio 5.1.
- Presentación de un modelo basado en el ajuste previo para la distribución espacial de cajas acústicas aprovechamiento el plano directo del altavoz con respecto a la audiencia.

- Comparación de las pruebas en medios controlados acústicamente para la calibración del sistema de control y señales de prueba.

ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO

Este trabajo de grado se encuentra organizado de la siguiente forma:

El capítulo uno es el de INTRODUCCIÓN y en se presentan los antecedentes una motivación, objetivos generales y específicos, alcance, viabilidad y contribuciones que este trabajo de grado aporta.

En el capítulo dos se encuentra el MARCO DE REFERENCIAS y en él se despliega el marco teórico y estado del arte que envuelven el enfoque del proyecto, en el capítulo tres está ubicado el MARCO EXPERIMENTAL donde se realiza una breve explicación de los recursos disponibles, las consideraciones de diseño de software y de hardware del prototipo.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS es el capítulo cuatro, en él se discute lo que ha sido probado en el marco experimental y se arrojan los resultados obtenidos que replantarán el objetivo del proyecto, el capítulo cinco presenta las CONCLUSIONES y los posibles trabajos futuros.

Por último se ubican las referencias BIBLIOGRÁFICAS y los ANEXOS que guardan los datos de códigos y figuras para ampliar la información.

2. MARCO DE REFERENCIAS

2.1. MARCO TEÓRICO

Al abordar un proyecto basado en sistemas de audio *surround* (sistema 5.1.) es necesario mencionar a lo largo del documento diversos conceptos que harán parte de la temática del mismo, lo cual vuelve pertinente definirlos con el fin de facilitar su comprensión y aclarar su necesidad dentro del proyecto, cada concepto representa un punto de apoyo del cual se partirá para llevar a buen fin el desarrollo del proyecto a continuación se definirán algunos de estos conceptos:

2.1.1. dB:

El termino dB (Decibel o decibelio) no representa una unidad de medida, es la representación para indicar el uso de una relación logarítmica [4].

2.1.2. Sonido:

El sonido es una perturbación que viaja a través de algún fluido, como por ejemplo el aire, provocando una fluctuación de la presión atmosférica por encima y por debajo de su valor estático [5], esta perturbación es producida en el oído.

2.1.3. Nivel de presión sonora:

El nivel de presión sonora (SPL, sound pressure level) magnitud logarítmica que corresponde a:

Ecuación 1: Nivel de presión sonora (dB). P: presión sonora. Pref: presión de referencia.

$$\text{SPL(dB)} = 20 \log\left(\frac{P}{P_{\text{pref}}}\right) = 10 \log\left(\frac{P}{P_{\text{pref}}}\right)^2$$

Entendido por P el valor efectivo de la señal y Pref como la presión correspondiente al valor mínimo de presión.

El factor 20 (o 10) en la ecuación anterior de tal manera 1 dB corresponde aproximadamente a la mínima diferencia en el nivel de presión sonora necesaria para que el ser humano perciba dos sonidos con distinto volumen. [4].

2.1.4. Caja Acústica:

La caja acústica es un sistema compuesto por el altavoz y el recinto. Su respuesta es la combinación de ambos elementos. Estas surgen por la necesidad de evitar cortocircuito acústico en baja frecuencia. El efecto principal de “encerrar” el altavoz en un recinto es el aumento de la frecuencia de resonancia. [5]

2.1.5. Altavoz:

Un altavoz es un transductor que convierte señales eléctricas en acústicas, con una banda de frecuencias de trabajo limitadas.

Según la banda de frecuencias que reproducen, los altavoces pueden dividirse en woofer, midrange y tweeter, con geometrías y tamaños distintos [5].

2.1.6. Micrófono:

Un micrófono es un transductor que convierte señales acústicas en eléctricas. Sus características principales son la sensibilidad, la respuesta en frecuencia y la directividad, factor e índice de directividad. [5]

Los micrófonos se pueden diferenciar según su estructura en micrófonos de condensador (electrostático), dinámico, ribbon, piezoeléctrico y según el tipo los encontramos como micrófonos de campo libre y micrófonos de campo de presión.

2.1.7. **Efecto Hass:**

Cuando el sonido directo y el reflejado llegan con una separación inferior a 50 ms el oído humano los percibe como un único sonido e identificaremos su procedencia en base a la diferencia de los tiempos de llegada de cada sonido.

Por el contrario, si el sonido reflejado alcanza al oyente 50 ms después de la llegada del sonido directo, el oído lo percibirá como un eco, de esta manera se obtendría un desplazamiento “virtual” de las fuentes sonoras o instrumentos y la consiguiente distorsión de la escena sonora. Este fenómeno es conocido como efecto Hass, también llamado efecto de precedencia.

Basándonos en el efecto Hass, podemos deducir, que es de vital importancia la correcta situación de los altavoces y posición de escucha, en la Figura 1 se muestra la distribución angular en un sistema de sonido 5.1. De este modo podremos obtener una correcta imagen estereofónica, en Figura 2 se presenta la distribución espacial de las cajas acústicas en un recinto y la Fuente: representa la distribución de las cajas con respecto a la audiencia. [7].

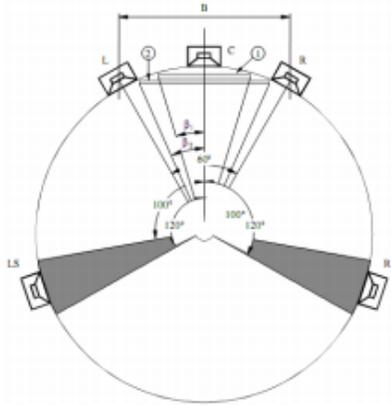


Figura 1. Configuración angular de un sistema de sonido 5.1

Fuente: [7]

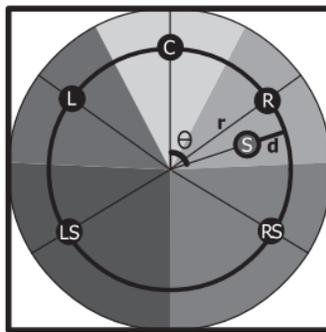


Figura 2. Distribución de espacios donde actúa cada caja acústica

Fuente: [8]

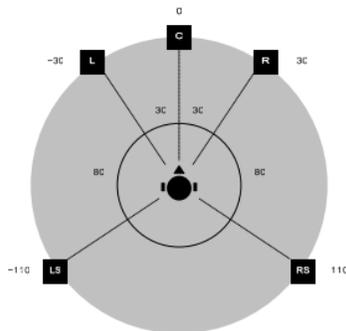


Figura 3. Distribución de las cajas acústicas a la audiencia

Fuente: [6]

2.2. ESTADO DEL ARTE

Uno de los puntos de partida más importantes que tiene el abordaje de todo proyecto es asentar la situación de este en el mercado o los avances dentro de la temática haciendo pertinente identificar que desarrollos matemáticos, algoritmos, sistemas y pruebas hay actualmente en el posicionamiento adecuado de las cajas acústicas para poder así garantizar el punto de partida del proyecto.

En este caso, se presentan algunos métodos para optimizar el posicionamiento de las cajas acústicas o fuentes de sonido.

2.2.1. *Vector Base Amplitude Panning(VBAP)*

El Vector Base Amplitude Panning (VBAP) es una extensión eficiente de técnicas de paneo de amplitud, es aplicado para las configuraciones de múltiples altavoces. En un plano horizontal alrededor del oyente, una fuente de sonido virtual en una determinada posición se crea mediante la aplicación de la tangente panning, ley entre el par más cercano de altavoz. [9]

2.2.2. *Multiple direction Amplitude Panning*

Si bien el VBAP ha sido el más usado desde que se planteó, en los sistemas de audio multicanal tiene problemas al momento de la dirección del sonido. En particular, la localización del sonido para la fuente virtual no varía suavemente en la dirección del hablante próximo. [10]

Lo que se propone en este método es una base de vectores de varios algoritmos de paneo de fuente virtual. Para generar la localización más estable de la panorámica de sonido, el algoritmo propuesto de paneo calcula las ganancias de paneo de amplitud utilizando formulación de base de vectores. Además, la función de control de ganancia no negativa y dependiente del ángulo es aplicada para evitar artefactos causados por aumentos de amplitud negativos. [10]

Este tipo de algoritmos se usa para poder generar fuentes virtuales y compararlas a las reales, teniendo en cuenta que las fuentes virtuales tienen propiedades únicas. El objetivo de las fuentes

virtuales es poder establecer la distancia y posición de los altavoces y simularlas en ambientes, sin embargo, esto requiere de espacios acondicionados y sus costos son elevados.

2.2.3. *The Direction Finding, Beam Forming (DFBF)*-Radiogoniometria, filtrado especial.

Para (armado de un sistema de barra de micrófonos para conferencia)

El arreglo de micrófonos de conferencia con DFBF es un procesador en tiempo real de audio diseñado con el fin de establecer un filtrado espacial acústico y la localización de fuentes de sonido de forma automática.

La ubicación de las señales de los micrófonos pueden ser modeladas como las réplicas retrasadas de la fuente donde la cantidad de retraso depende de la posición relativa física para un micrófono dado dentro del arreglo, El sistema **beamformer** (ver Figura 4) usa los pesos aplicados para acentuar una dirección particular espacial y maximizar la señal de salida. [11]

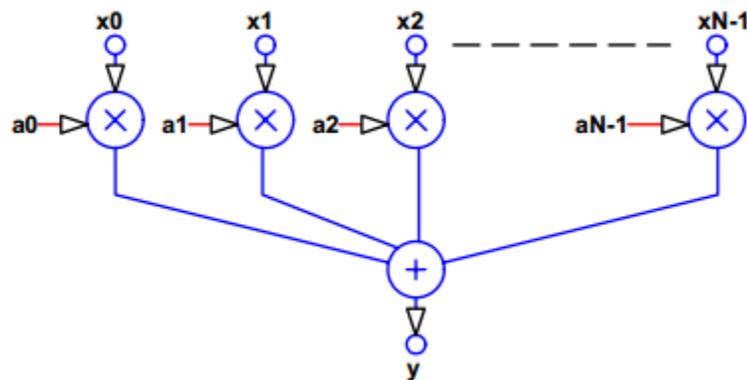


Figura 4. Diagrama de sistema beamforming

Fuente: [11]

La localización de fuentes de sonido requiere una valoración de varios parámetros establecidos en dos variables: ubicación relativa y distancia.

El sistema DFBF usa una simplificación al asumir al menos una distancia mínima de la serie *beamforming* al orador o fuente (ver Figura 5).

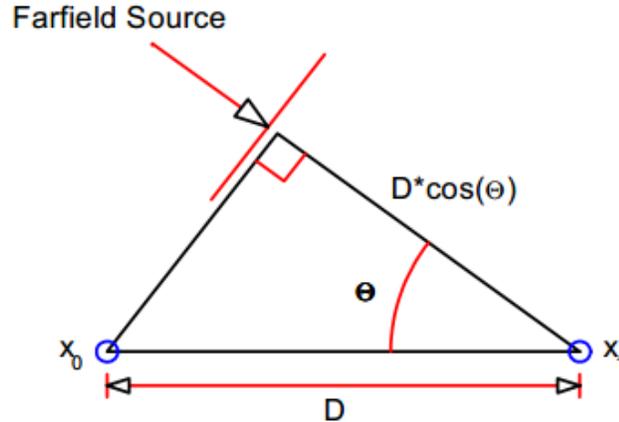


Figura 5. Tiempo de retardo para la estimación de la propagación de la onda
Fuente: [11]

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** al ubicar dos transductores separados or una distancia D , el retardo se reduce a una función trigonométrica.

2.2.4. Localización de fuentes de sonido aproximada por Arreglo de micrófonos

La estimación de retraso de tiempo (TDE) es un método utilizado para localizar objetivos dependiendo de la fuente de sonido; este método puede ser usado en sistemas de localización activos o pasivos. Los sistemas activos envían un pulso y reciben el eco para estimar el tiempo de retraso y localizar los objetivos; un ejemplo para este método es el sónar. Los sistemas pasivos usan el sonido de la fuente en sí mismo. En el sistema pasivo varios métodos podrían ser usados para localizar la fuente de sonido y se diferencian en las variables físicas que ellos suelen usar; son los algoritmos más usados para localizar fuentes de sonido dado que la valoración de retraso de tiempo representa una mayor simplicidad y exactitud. [12], estos métodos son divididos en tres categorías, que son:

- La diferencia de tiempo de llegada, donde los sistemas miden la diferencia de tiempo entre las señales recibidas por los micrófonos para localizar la fuente de sonido.

- La dirección de llegada, donde la diferencia de fase entre las señales es usada para localizar la fuente de sonido.
- La diferencia de tiempo de llegada, donde los sistemas miden la diferencia de tiempo entre las señales recibidas por los micrófonos para localizar la fuente de sonido. La dirección de llegada, donde la diferencia de fase entre las señales es usada para localizar la fuente de sonido.

Para la estimación se deben tener en cuenta las distancias que hay entre cada uno de los micrófonos y el punto P de la Figura 6, debido a los retrasos de la señal que se puedan presentar, se debe plantear alternativas o soluciones que nos permitan comprobar el comportamiento de las señales a reproducir hasta el punto P. [13]

La estimación de la localización de fuentes de sonido mediante la distribución de arreglos de micrófonos en los vértices de un triángulo equilátero o un cuadrado (ver Figura 7) puede “estimar el ángulo de la fuente acústica y la distancia que desde el origen al micrófono con diferentes retrasos que hay en la transmisión.” [13]

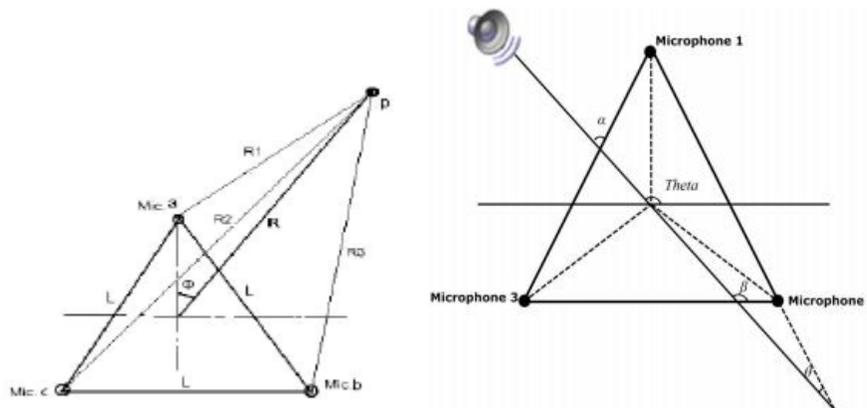


Figura 6. Arreglo de tres micrófonos

Fuente: [13], [12]

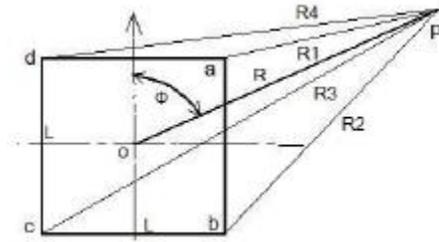


Figura 7. Arreglo de cuatro micrófonos

Fuente: [13]

2.2.5. Múltiples Fuentes acústicas en Salones

La localización de múltiples fuentes acústicas usando un arreglo de micrófonos y diferencia de tiempo de llegada (TDOA) y el algoritmo de posición hiperbólica basados en TODA, Ayudan a buscar el mejor rendimiento del sistema usando la estimación del tiempo de retardo. [14]. En la Figura 8, se observa la señal transmitida desde una misma fuente conectando 2 micrófonos donde M_j es el más cercano y M_i es el más lejano.

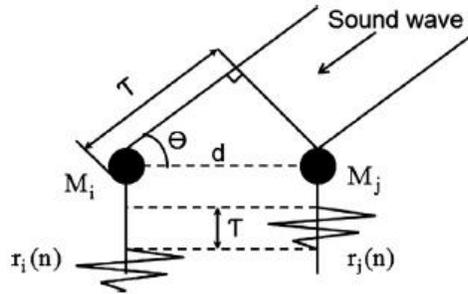


Figura 8. Dirección de estimación de fuente.

Fuente: [14]

Esto presenta un desfase en la señal debido a los tiempos de retraso de la señal con respecto al micrófono. El retardo de llegada puede ser estimado al encontrar el valor máximo de potencia usada entre los coeficientes de llegada basados en el método de fase espectral cruzada. El método CPSP localiza una fuente de sonido como un punto, estimando direcciones de sonido usando diferentes pares de micrófonos. [14]

La Figura 9 muestra los distintos métodos para ubicación de fuentes usando el método de fase espectral cruzada a partir de 2 micrófonos o un arreglo de micrófonos por pares.

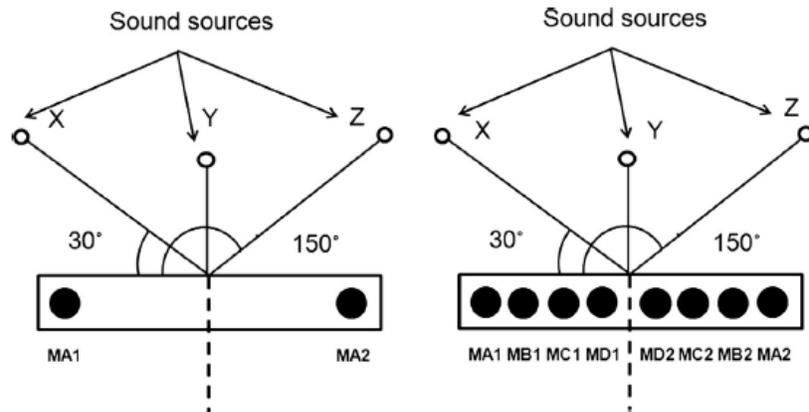


Figura 9. Ubicación de fuentes con 2 micrófonos o con arreglo

Fuente: [14]

En la Figura 9 se representa el método por un par de micrófonos en donde X, Y, Z son fuentes de ruido ubicadas en diferentes grados radialmente dados como eje del centro del par de micrófonos. ‘‘El método propuesto basado en promedio de los coeficientes de CPSP para diferentes pares de micrófonos no sólo suprime la correlación cruzada no deseada sino que también hizo hincapié en los picos en dirección correcta. La Figura 9 A y B muestran arreglos de micrófono utilizados en el método convencional y el propuesto. Pares de micrófonos MB, MC y MD dentro del par micrófono MA están dispuestos de tal manera que las posiciones centrales de los pares son las mismas que las posiciones centrales de MA1 y MA2.’’ [14]

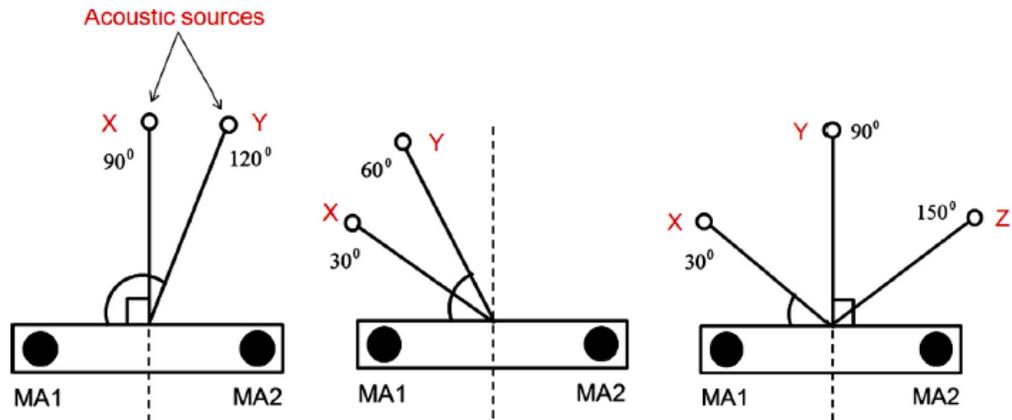


Figura 10. Ubicación de fuentes de ruido a diferentes grados

Fuente: [14]

En este caso, en la Figura 10 se muestra la disposición de los micrófonos y fuentes de sonido en un plano de dos dimensiones para casos específicos examinados, las señales $X(t)$, $Y(t)$ y $Z(t)$ son las señales de ruido blanco de banda ancha emitida por múltiples altavoces de potencia predefinida para generar un entorno controlado.

La estimación de retardo para dos fuentes de sonido no correlacionados se puede estimar con exactitud y precisión. [14]. Por lo tanto, el enfoque utilizado por los autores en el documento dio como resultado la localización de fuentes acústicas con una alta precisión, exactitud en entornos no acondicionados. Donde reverberaciones y efectos adicionales de ruido tienden a degradar el rendimiento de la estimación. En la Figura 11, se pueden observar los resultados prácticos de la investigación. Se puede observar que la función CPSP tiene picos en las direcciones correctas de las fuentes de sonido.

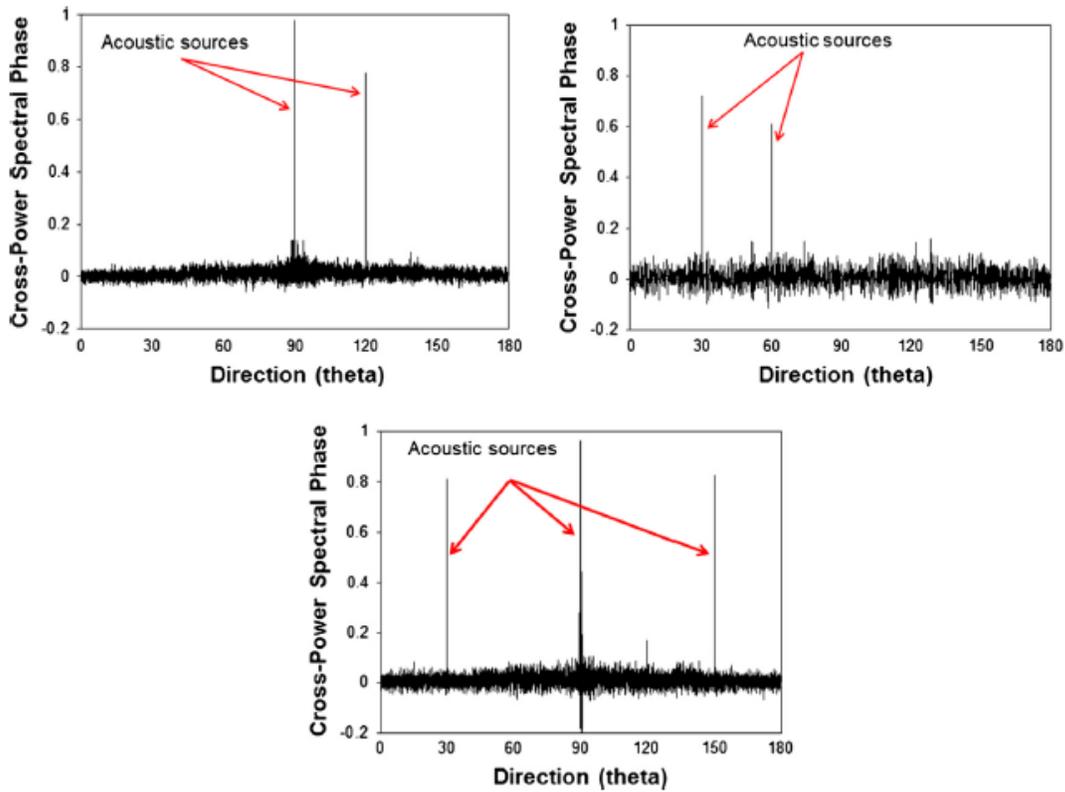


Figura 11. Cruces de potencias espectrales cruzadas como respuestas

Fuente: [14]

2.2.6. *Time Delay Estimation (TDE)*

Es una serie de algoritmos que se basan en estimar la posición de las fuentes por medio de la diferencia de los tiempos de llegada de las señales que provienen de los distintos micrófonos ubicados para poder estimar la posición de las fuentes.

2.2.7. **Correlación Cruzada (GCC)**

Al considerar la localización de fuentes por medio de arreglos de micrófonos ubicados en un eje horizontal donde se debe tener como referencia uno de estos, con lo cual se logra calcular el tiempo de retardo entre las señales que llegan de los distintos micrófonos usando una

aproximación por hiperboloides de los diferentes micrófonos y sus posiciones, este usa un filtro en cada señal antes de hacer las estimación del tiempo de retardo ver Figura 12. [15].

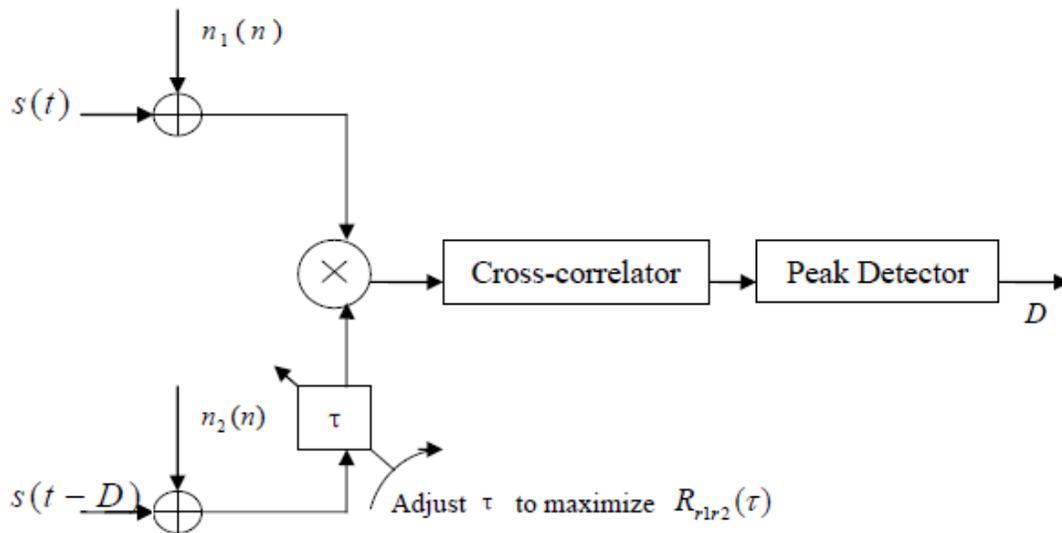


Figura 12. Grafico método GCC

Fuente: [15]

2.2.8. Transformación de Fase (PHAT)

Está basado en prevenir los errores que provienen de la correlación cruzada sobre la propagación de los picos de las señales, como se observa en la Figura 13, esta contiene el principio de la correlación, sin embargo, esta tiene otros elementos, el integrador genera una señal de ponderación con lo que hace que el sistema sea más robusto al ruido. [15]

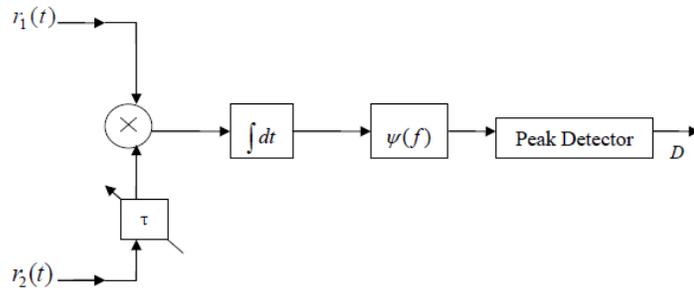


Figura 13. Grafico método PHAT

Fuente: [15]

2.2.9. Localización de fuentes usando método Grid Search

Actualmente, la mayoría de los modelos de sistemas no lineales buscan la optimización con funciones complejas, una de las soluciones a este problema es generar de forma secuencial posibles respuestas, este método se basa en la creación de caminos que contienen unas decisiones y la evaluación de los distintos caminos para poder llegar a una solución ver Figura 14. [16]

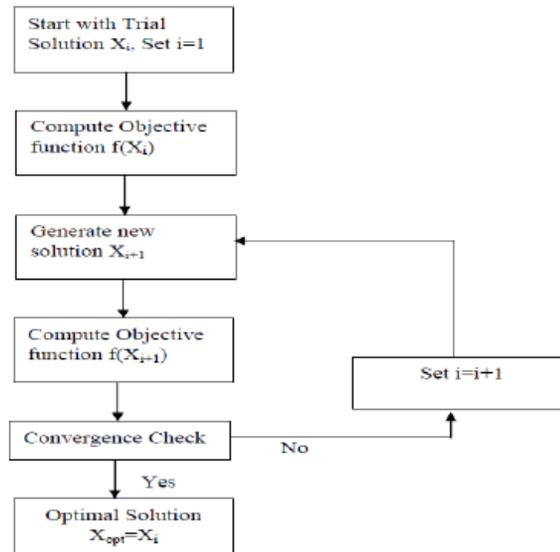


Figura 14. Método Grid Search

Fuente: [16]

3. MARCO EXPERIMENTAL

En este capítulo se presenta la descripción de los experimentos implementados con el objetivo de verificar el comportamiento de algunas técnicas y decidir a partir de los resultados aquellas que más se adecuen a la naturaleza de los datos empleados en el estudio. Inicialmente se dispondrá del conocimiento de los recursos disponibles para abordar las diferentes técnicas y así poder afrontar cada una de ellas, previo a esto se tomara como punto de partida la influencia del rango de distancias, los retardos de señal y el espectro de la señal en el posicionamiento de cajas acústicas. La tendencia que arroje la distribución de los retardos y dicho espectro nos dará la capacidad de evaluar cuál de los diferentes métodos propuestos tiene mejor desempeño para verificar el posicionamiento de las cajas acústicas. Por último se tendrá en cuenta la evaluación de los algoritmos de ubicación de fuentes a nivel de hardware.

3.1. RECURSOS DISPONIBLES

- Laboratorios de electrónica de la Universidad de San Buenaventura Seccional Cali.
- Recursos propios para la adquisición de dispositivos.
- Espacio laboratorio de sonido edificio Higuerones 2 universidad de san buenaventura seccional Cali
- Materiales presentes en el laboratorio:
- Micrófono de pruebas dbx RTA-M: La RTA-M cuenta con una respuesta en frecuencia plana de 20Hz hasta 20Khz ver Figura 16, garantizando así un mejor análisis de las señales capturadas por este, requiere una tensión de funcionamiento de 9V - 52V. [17] Además, es un micrófono omni-direccional ver Figura 17, ideal para optimizar la calidad del sonido independiente del entorno acústico,



Figura 15. Dimensiones y vista real del micrófono de prueba dbx RTA-M

Fuente: [17]

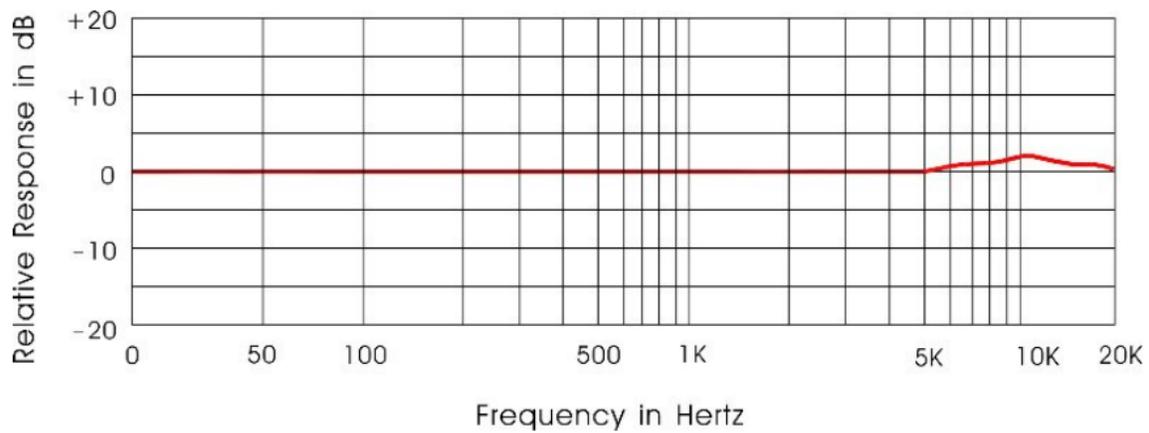


Figura 16. Respuesta en frecuencia dbx RTA-M

Fuente: [17]

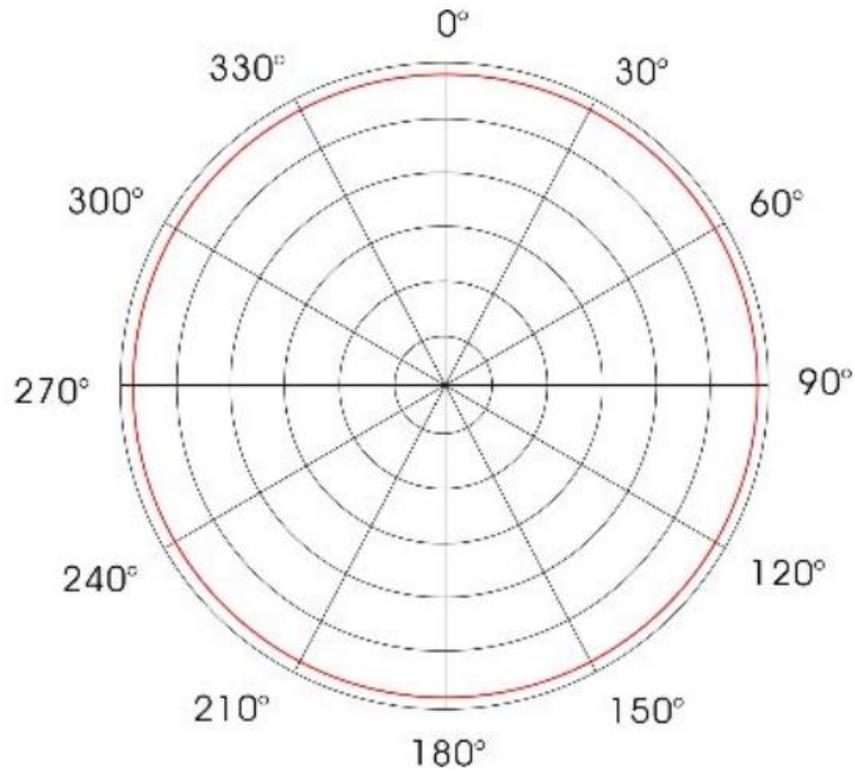


Figura 17. Grafica polar de directividad de dbx RTA-M

Fuente: [17]

- Interfaz de audio USB TASCAM US-366: este dispositivo será usado como interfaz de audio para la alimentación del micrófono dbx RTA-m y amplificador de audio para garantizar una mejor recepción de la señal que se estará grabando, la interfaz TASCAM cuenta con dos entradas para micrófono de las cuales se usará solo una con su respectiva salida (ver Figura 18).

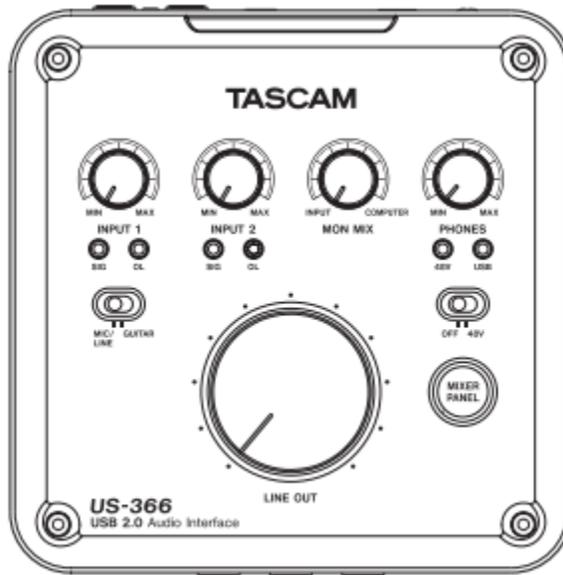


Figura 18. Diagrama físico de la interfaz TASCAM US-366

Fuente: [18]

3.2. CONSIDERACIONES DE DISEÑO EN SOFTWARE

Para la implementación de los algoritmos de ubicación de fuentes en el espacio DFBB, TDE y TDOA, FFT se utiliza Matlab como herramienta de desarrollo del software teniendo en cuenta el alto rango de funciones y algoritmos que ofrece Matlab para la adquisición de datos y análisis de señales y el uso de plataforma de interfaz GUIDE para el usuario.

Una vez establecido el algoritmo más eficiente pasaremos a dar uso del IDE MPLAB con el fin de trabajar el algoritmo sobre el lenguaje de programación C ya que permite la programación del microcontrolador dsPIC30F4011 de la familia Microchip que hará parte del sistema embebido.

3.2.1. Influencia del rango de distancias entre cajas acústicas y la audiencia

Con el fin de parametrizar los algoritmos de ubicación de fuentes se tendrán en cuenta la distancia existente entre una caja acústica y la audiencia basándose en:

- Micrófono o micrófonos
- sistema 5.1
- audiencia

Los micrófonos tendrán varias distribuciones en consideración dependiendo, de los resultados obtenidos se definirá la distribución más óptima para el algoritmo y su respuesta.

3.2.1.1. **Arreglo triangular**

Esta distribución constara de tres micrófonos los cuales estarán distribuidos un par en posición paralela a los extremos de la audiencia o una distancia máxima que separa las orejas si es un solo oyente. El tercer micrófono estará separado hacia el centro del primer par y formando un triángulo equilátero.

3.2.1.2. **Distribución 2 a 1**

Teniendo en cuenta que el frente de onda más importante es el directo se tendrá como micrófonos de ubicación espacial un par en posición paralela a los extremos de la audiencia o una distancia máxima de la separación de las orejas si es un solo oyente, el tercer micrófono dará la referencia de ubicación es decir que el tercer micrófono tendrá una ubicación en el mismo punto de la caja acústica y este definirá la distancia entre el tercer y cualquiera del par restante.

3.2.1.3. **Micrófono *independiente***

El micrófono representara un punto en el plano que está dispuesto para la distribución del sistema 5.1 y a su vez este se encontrara sesgado a un espacio determinado para la audiencia con el fin de optimizar el proceso de la toma de muestras ver Figura 19. La RTA se encontrara dispuesta en tres posiciones una inicial que será equidistante a las cajas acústicas traseras y también será equidistante a las frontales de este punto de desplazar hacia la derecha o izquierda dentro del límite establecido.



Figura 19. Uso de micrófono independiente, prueba de audio

3.2.2. Referencias o señales de prueba

3.2.2.1. Ruido rosa

Señal de prueba que se usara para pruebas iniciales de los algoritmos, ya que en consideración a que el proyecto está basado en mediciones de factores acústicos es la más adecuada por su contenido espectral, siendo una señal constante en la energía que transmite y su amplitud decae 3dB (tres decibeles) por octava. Esta señal de prueba fue grabada por medio del software Audacity con un tiempo de grabación de un minuto y fue guardado con una extensión WAV. En el Anexo B Figura 71.

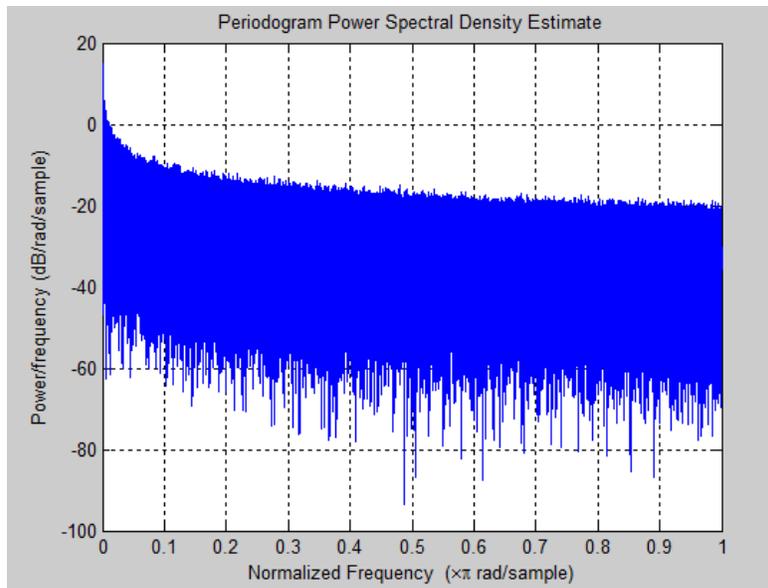


Figura 20. Representación del ruido rosa

Fuente: software MATLAB

3.2.2.2. Tonos puros

Los tonos puros son señales con una única frecuencia, amplitud y parámetros controlados como descritos por una ecuación matemática dando así la facilidad de entender su comportamiento en el sistema, dicha componente frecuencial será el objeto de estudio en el algoritmo, en la Figura 21 se aprecia el espectro de un tono puro centrado en 1KHz.

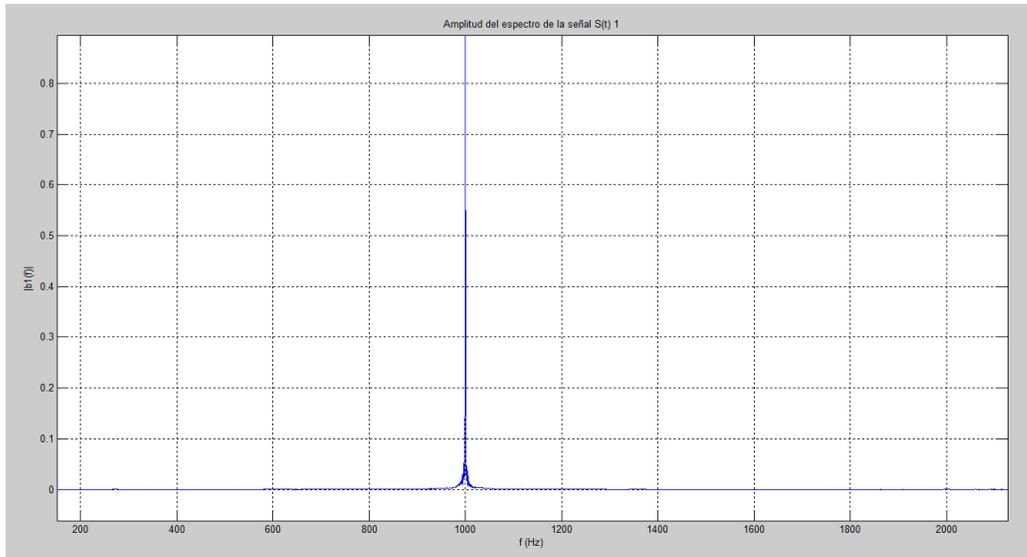


Figura 21. Espectro de la señal de prueba a 1KHz

Fuente: software MATLAB

3.2.2.3. Grabación de la señal de prueba

Como parámetros de grabación sobre la plataforma MATLAB, una frecuencia de muestreo de 44100 Hertz a 16 bits y la señal será grabada de forma monofónica en un .WAV como se puede apreciar en el Anexo B Figura 72, En la Figura 73 se aprecia el proceso para la generación del espectro de la señal grabada como se describió anteriormente.

3.2.3. Algoritmos de ubicación de fuentes basados en:

A continuación se presentaran los algoritmos más relevantes para el posicionamiento de las cajas acústicas y así determinar cual tiene mayor relevancia.

3.2.3.1. Análisis espectral en amplitud por FFT

Descripción de la prueba experimental.

La transformada rápida de Fourier ofrece una forma eficiente para la representación de señales en el dominio del tiempo interpretarlas en el dominio de la frecuencia, debido a esto la FFT facilita encontrar la similitud entre tonos puros por su contenido espectral, en este caso el factor de interés para el sistema está dado por la amplitud máxima entregada por el sistema en la frecuencia de dicha señal de prueba.

Mediante el uso de este método se logra obtener una respuesta directa entre la señal y el sistema, se aplica un estímulo generado al altavoz con una señal de 1KHz la cual es grabada y pasada por la FFT entregando su respuesta espectral ver Figura 21.

Gracias a la directividad asociada al uso de tonos puros es posible medir la frecuencia de la señal usando métodos basados en FFT, el cual ayuda a discriminar la respuesta tanto en magnitud como en frecuencia de un sistema.

El resultado obtenido en la Figura 22, Figura 23 y Figura 24 nos demuestra la existencia de un nivel de presión mayor en el eje axial que en los valores adyacentes a este.

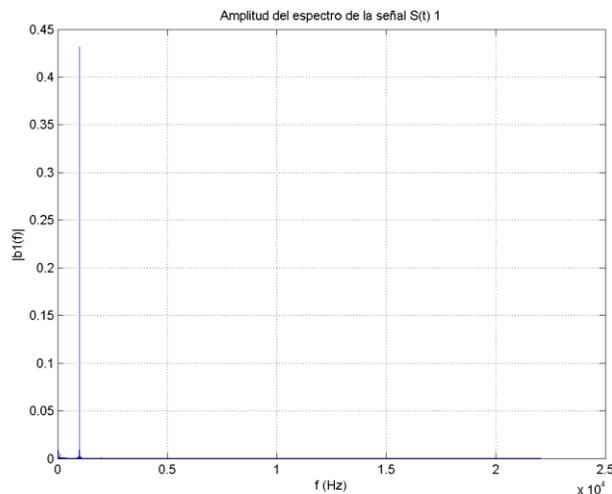


Figura 22. Amplitud de la señal captada en el eje axial

Fuente: software MATLAB

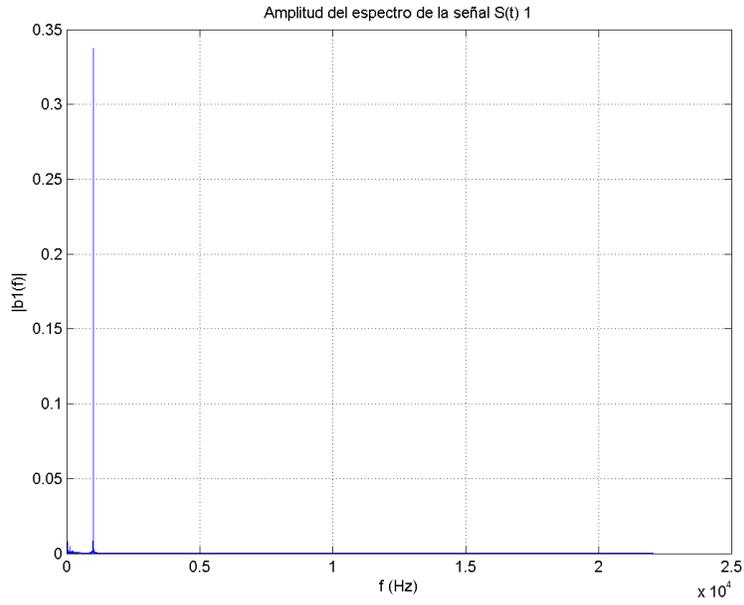


Figura 23. Amplitud de la señal captada a 45 grados a la izquierda del eje axial

Fuente: software MATLAB

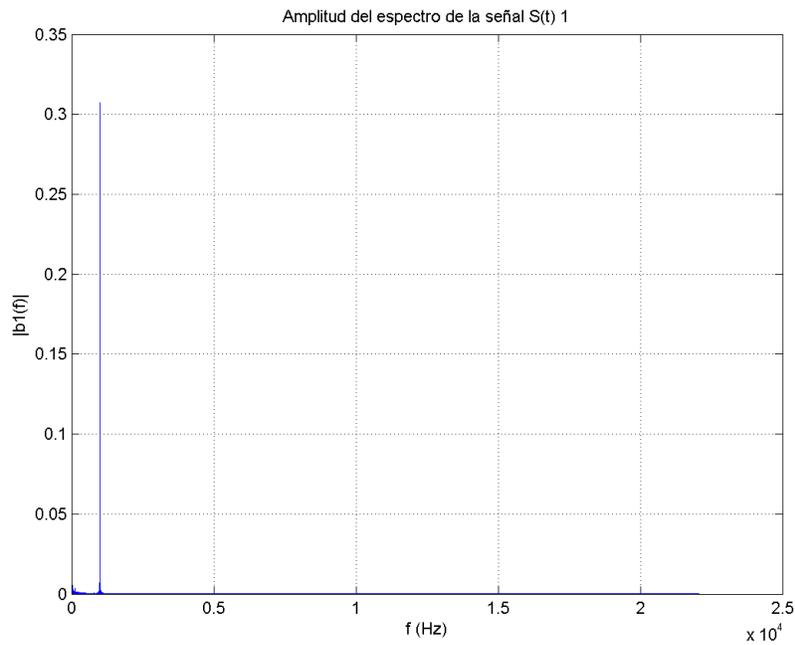


Figura 24. Amplitud de la señal captada a 45 grados a la derecha del eje axial

Fuente: software MATLAB

3.2.3.2. Ubicación de fuente mediante DFBB, TDE y TDOA

Descripción de la prueba experimental

- El primer algoritmo se verificó con la intención de identificar el delay que existe entre dos señales $s1$ y $s2$ basándose en la estimación de tiempo de llegada mediante la función `finddelay()` de Matlab que retorna un estimado del delay entre dichas señales, si $s2$ se retrasa con respecto a $s1$ el delay es positivo si $s2$ se adelanta respecto a $s1$ el delay es negativo, la estimación del delay está basado en la correlación cruzada.

Del algoritmo obtenemos como resultado que el tiempo de retardo entre las dos señales es de 400 muestras de delay 0.0488 s ver Anexo B Figura 74. El análisis de este algoritmo se realizó usando la señal de prueba de Matlab llamada *gong* [19].

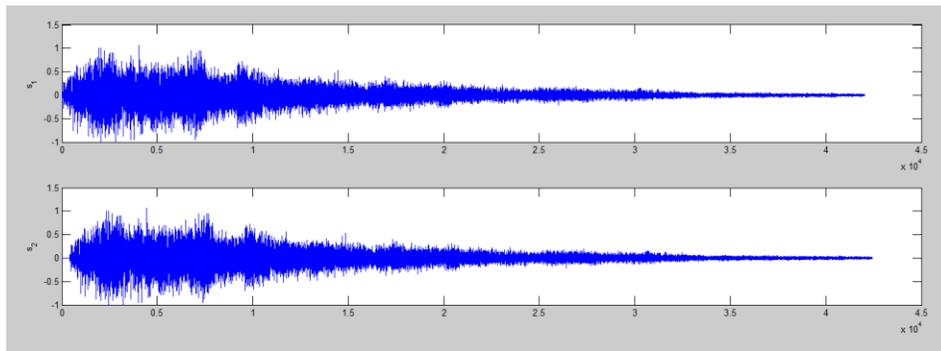


Figura 25. Señales usadas en *finddelay*

Fuente: software MATLAB

- La correlación cruzada es un método usado para el análisis de señales el cual nos ofrece la versatilidad de entregarnos el tiempo de retardo máximo entre las señales a analizar arrojado en dos vectores r y l del cual se extrae el punto donde el desfase es máximo y el tiempo de delay entre las señales.

En el Anexo B Figura 75 se observa como resultado que el tiempo de retardo entre las dos señales es de 400 muestras de delay 0.0488 s. El análisis de este algoritmo se realizó usando la señal gong.

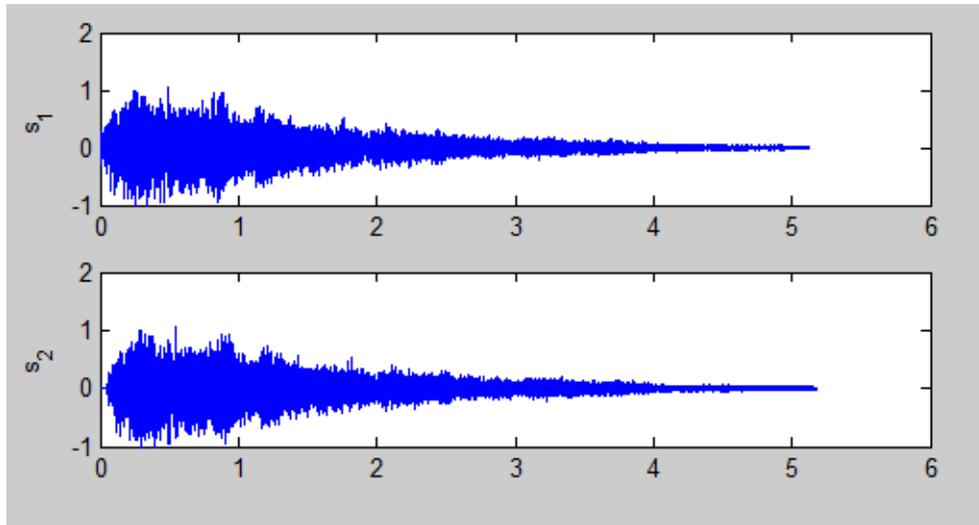


Figura 26. Señales usadas en la correlación cruzada

Fuente: software MATLAB

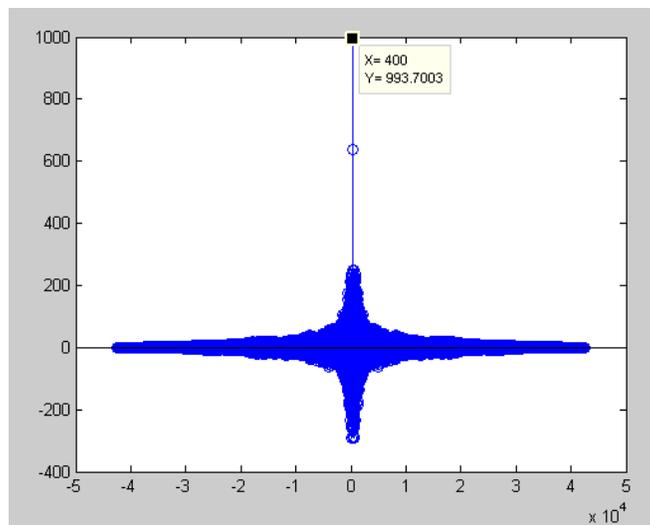


Figura 27. Ubicación del punto donde la correlación es máxima

Fuente: software MATLAB

3.2.3.3. **Grabación de señales**

Descripción de la prueba experimental

La grabación de señales y la calidad de estas dependerá de lo que se desee trabajar, la correlación es un método para el análisis de señales lo cual exige una buena calidad en las mismas a lo cual se definieron los siguientes como parámetros de grabación, una frecuencia de muestreo de 44100 Hertz a 16 bits y la señal será grabada de forma monofónica en un archivo .WAV como se puede apreciar en el Anexo B Figura 76.

3.2.3.4. **Uso de la grabación para generar algoritmo de correlación cruzada**

La implementación de los algoritmos de finddelay y correlación cruzada junto al de grabación nos da como resultado un conjunto que será la base del algoritmo final de ubicación de fuentes en el espacio basado en DFBD, TDE Y TDOA este algoritmo contara con tres etapas fundamentales: la primera será la etapa de reproducción de la señal de prueba, ver Anexo B Figura 77; la segunda será la de grabación de la señal de prueba, ver Anexo B Figura 78 y; la tercera constara del análisis de la correlación entre estas para obtener así el retardo de llegada, ver Anexo B Figura 79.

3.2.4. **Parámetros de inicialización.**

Con el fin de establecer los parámetros iniciales para el funcionamiento del sistema se tuvo en cuenta las características de la prueba y su comportamiento, dado que se desea trabajar con señales de audio es necesario tener una alta calidad tanto en la reproducción como en la grabación de dichas señales, para el caso puntual de la señal de prueba de 4KHz se realizó la siguiente parametrización.

Como primer parámetro se definió la frecuencia de muestreo como:

Ecuación 2. Teorema de muestreo

$$F_m \gg 2 * f_{prueba}$$

De la ecuación dos tenemos en cuenta que la frecuencia de muestreo debe ser mayor que al menos dos veces la frecuencia de la señal de prueba dado esto se decidió trabajar con una frecuencia de muestreo de 40KHz.

Esta señal de prueba pasara por la transformada rápida de Fourier basada en el compilador C30, esta tiene la característica de ser compleja y está definida como (FFTComplexIP *computes the Discrete Fourier Transform of a source complex vector in place*). FFTComplexIP trabaja con parte real y parte imaginaria, debido a las necesidades del estudio en las cuales se usa una señal pura, al calcular el valor de la magnitud de su transformada discreta de Fourier, solo se tiene en cuenta el valor absoluto de la parte real.

Los *twiddle factors* son coeficientes trigonométricos que se operan con los datos durante la ejecución de la FFT, este vector tiene un valor para cada una de las muestras utilizadas para llegar al resultado de la transformada de Fourier, están separados por un Angulo definido y también por un número de muestras, para el estudio se decidió trabajar con la mayor cantidad de puntos posibles que soporta el hardware dejando como vector de *twiddle factors* 256 puntos.

3.2.5. Diagrama de bloques general

El proceso que se lleva a cabo para la ubicación de las cajas acústicas está determinado por la reproducción de una señal de prueba específica la cual se diseñó como un tono puro de 4KHz. Esta señal de prueba será reproducida y direccionada hacia un transductor (micrófono RTA-M) cuya salida será la señal que pasa por un análisis espectral con el fin de identificar su magnitud, dicha magnitud será guardada y comparada en 5 instantes diferentes de las cuales la mayor será tomada como el valor representativo en el cual la caja acústica está mirando el micrófono en un plano directo, ver Figura 28.

Para el proceso de diseño del prototipo es necesario tener en cuenta que los sistemas de audio 5.1 cuenta con 6 cajas acústicas de las cuales la caja frontal representa una posición única con respecto a la audiencia y el subwoofer se considera una fuente omnidireccional por lo cual estas dos cajas acústicas no serán consideradas para controlar su posición.

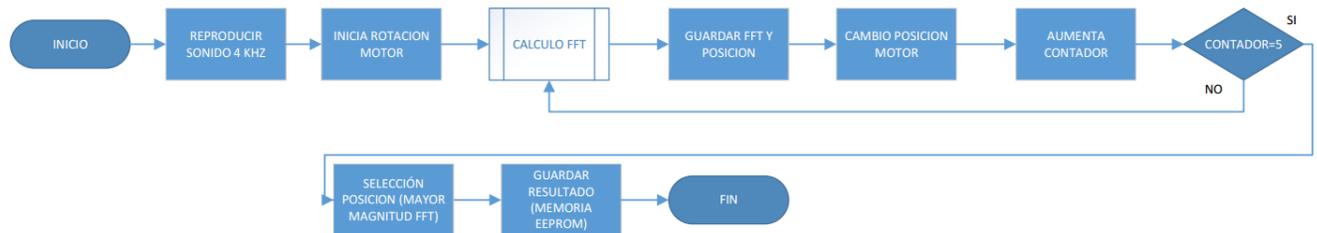


Figura 28. Diagrama general para ubicación de cajas acústicas

En el diagrama anterior podemos ver el comportamiento del sistema y sus principales características. Las etapas para llevar a cabo la ubicación de las cajas acústicas son repetitivas en las cuatro cajas por lo tanto dicho proceso es el mismo en las cajas frontales y en las traseras, sin embargo dentro de cada una se tendrá en cuenta que será almacenado los resultados de la FFT y posición donde represente el mayor nivel de presión sonora de forma independiente en cada caja acústica. Para ampliar el funcionamiento ver Anexo A Figura 68, Figura 69 y Figura 70.

3.3. CONSIDERACIONES DE DISEÑO EN HARDWARE

3.3.1. Microcontrolador

Los *digital signal controllers* (DSC) son microcontroladores desarrollados para la manipulación de señales de información para poder modificarla o manipularla según sea la aplicación. Se caracterizan por la representación en el dominio del tiempo discreto, en el dominio frecuencia discreta, u otro dominio discreto de señales por medio de una secuencia de números o símbolos y el procesado de esas señales. [20]

Para estos, existen diferentes fabricantes con sus respectivas características:

3.3.1.1. **Microchip**

Algunos microcontroladores que son diseñados especialmente para el manejo de señales, tienen diferentes características que lo diferencian entre sí, donde se resalta la robustez y su diseño está enfocado en el procesamiento digital de señales. En este caso, las familias de dsPIC30F y dsPIC33F comparten estas características.

3.3.1.2. **Texas Instruments**

Han desarrollado los DSC con 32 bits con capacidad de trabajar en procesos donde el tiempo sea crítico para las operaciones, su alta capacidad y su manejo eficiente de energía tienen gran relevancia, presentan gran variedad de lenguajes de programación y soporte de Sistemas operativos especializados en diferentes actividades que se requiera.

3.3.1.3. **MXP**

El MC56F84xxx se basa en un nuevo diseño de núcleo DSP de 32 bits. Es el controlador de señal digital más rápida del mercado, ofreciendo excepcional precisión, sensores y controles para la conversión digital de potencia más eficiente y aplicaciones avanzadas de control de motores. El MC56F84xxx incluye precisión de alta velocidad y periféricos avanzados.

Esta familia de Microcontroladores, también presenta una subdivisión de ellos según sea la aplicación que se requiera.

A partir de estos tres fabricantes, se hace una relación de sus productos en donde se compara la relación de la velocidad de procesamiento y sus distintos módulos de conversión que se muestra a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1. Tabla Comparativa Microcontroladores DSP

Fabricante	Device	Clock Speed (MHz)	Flash (kB)	PWM Chaneles, Resolution Duty Cycle
Microchip	dsPIC30F	30	6-144	4-8(16 bits, 1 or 16,5 ns depending on part)
	dsPIC33F	40	12-256	up 18 PWM (16 bits, 12,5ns)
	dsPIC33E	70	64-512	up 16 PWM (16 bits,8,32ns)
Texas instruments	TMs320F28x	60-150	32-512	16 PWM (13 bits, 150 ps)
	TMS320LF240x	40	16-64	7-16 PWM (11 bits, 150 ps)
MXP	MC56F83x	60	48-280	12 PWM (15 bits, 10 ns)
	MC56F80x	30	12-64,	5-6 PWM (15 bits, 10 ns)
	MC56F81x	40	40-572	12 PWM (15 bits, 10 ns)

Fuente: [21] [22] [23]

3.3.2. Etapas del sistema embebido

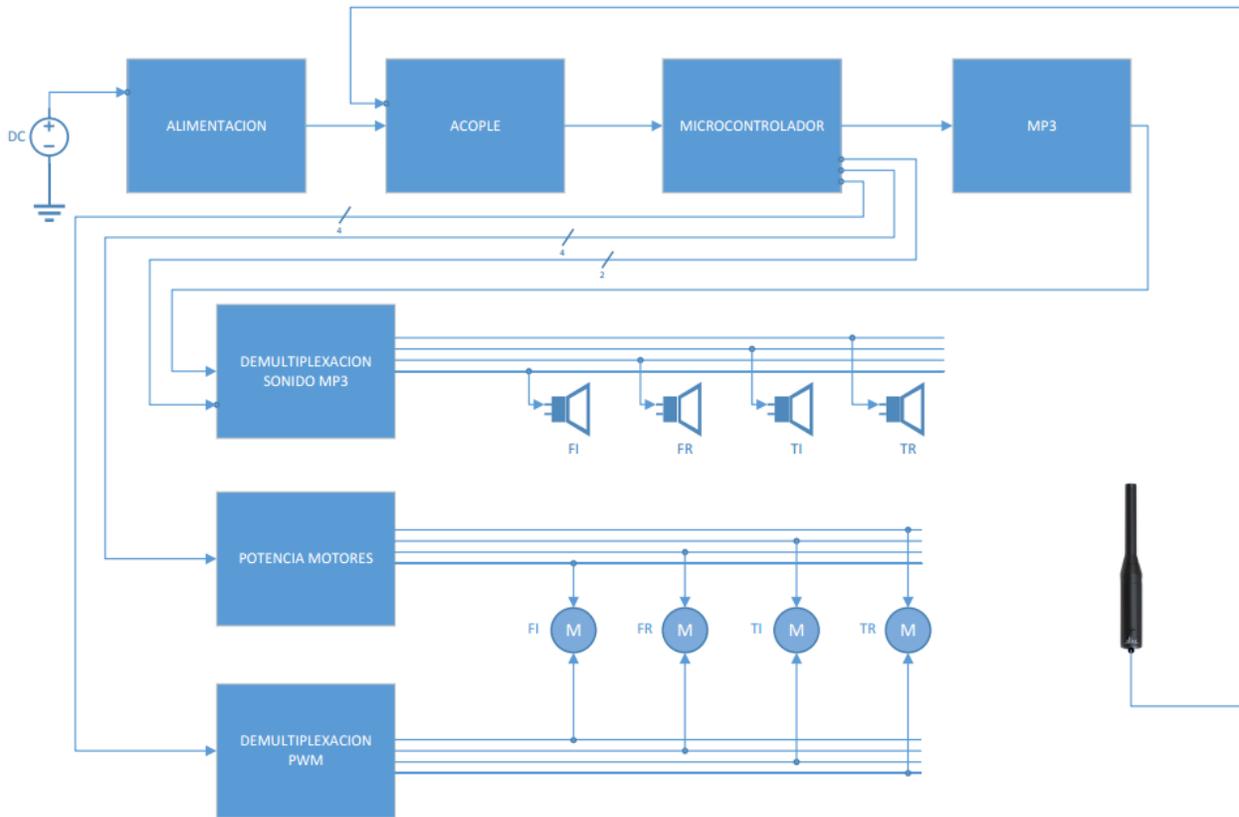


Figura 29. Diagrama de bloques de etapas

Para la etapa de control se debe elegir ciertas características que son limitadas por los microcontroladores y es la manipulación de señales que permitan el movimiento de algún actuador. Se debe tener en cuenta las comunicaciones que estos presentan para hacer la transmisión de la señal de control a los actuadores correctamente.

Entre el sistema embebido y los servomotores se decidió comunicarlos de manera cableada siguiendo la misma línea de las cajas acústicas con una distancia aproximada de 5m para los servomotores traseros y de 3m para los frontales en la Figura 29 se pueden identificar las conexiones existentes entre las etapas del sistema embebido y las líneas hacia los servomotores, micrófono y cajas acústicas en el Anexo C la Figura 87 y Figura 88 se presentan las conexiones

cableadas entre las bases de control y el prototipo y en el Anexo C la Figura 83 y Figura 84 presentan las conexiones internas y la distribución de las tarjetas del sistema embebido y el prototipo, en el Anexo C (ver Tabla 7) se pueden ver los costos de materiales del prototipo y el proyecto en general.

El sistema diseñado tiene una etapa de alimentación la cual permite contar con tres tipos de alimentación que son: la fuente dual, fuente para nivel de DC y fuente para alimentación del microcontrolador y demás integrados.

La fuente dual toma un voltaje de entrada entregado por el cargador. Este voltaje de entrada se separa en dos voltajes iguales y opuestos es decir entrando 15V entrega +7.5V, tierra (tierra virtual) y -7.5V ver

, este voltaje dual será el encargado de alimentar la etapa donde está el microcontrolador con 5V ver Figura 33 y los demultiplexores con +7.5V y -7.5V ver Figura 35.

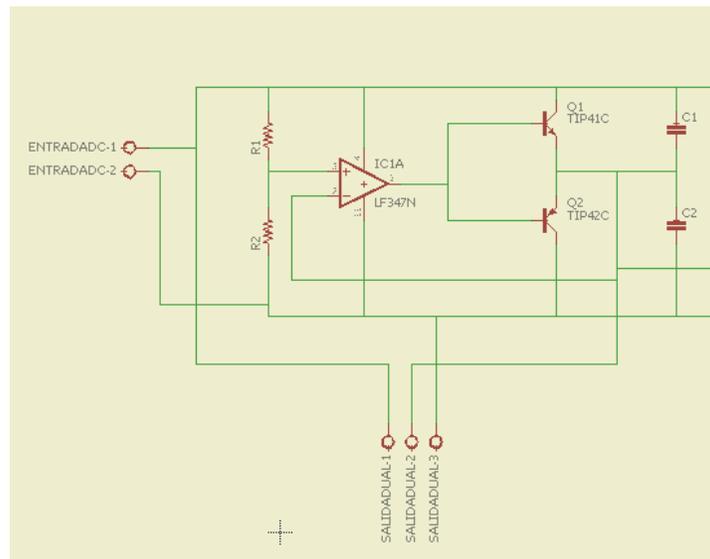


Figura 30. Diseño esquemático de fuente dual y alimentación

En la imagen anterior podemos apreciar el proceso de entrada de la alimentación del sistema embebido y su salida dual como se mencionó anteriormente.

De igual forma la entrada de alimentación para el microcontrolador está regulado a 5 voltios mediante el uso de un conversor de DC a DC regulado con un LM2596S 1.23V- 37V Vout. [24]



Figura 31. Conversor DC a DC ajustable

Fuente: [25]

El microcontrolador DSPIC30F4011 tiene como función realizar todos los procesos matemáticos y de control para el proyecto, este tiene bajo su mando la recepción de la señal de prueba que previamente ha sido pasada por un offset de 2.5V. La señal de prueba pasa por una etapa acople para tener una escala positiva y evitar valores negativos de dicha señal, garantizando que el ADC reciba únicamente valores positivos en su entrada (ver Figura 32), El offset es regulado con un LM2596S.

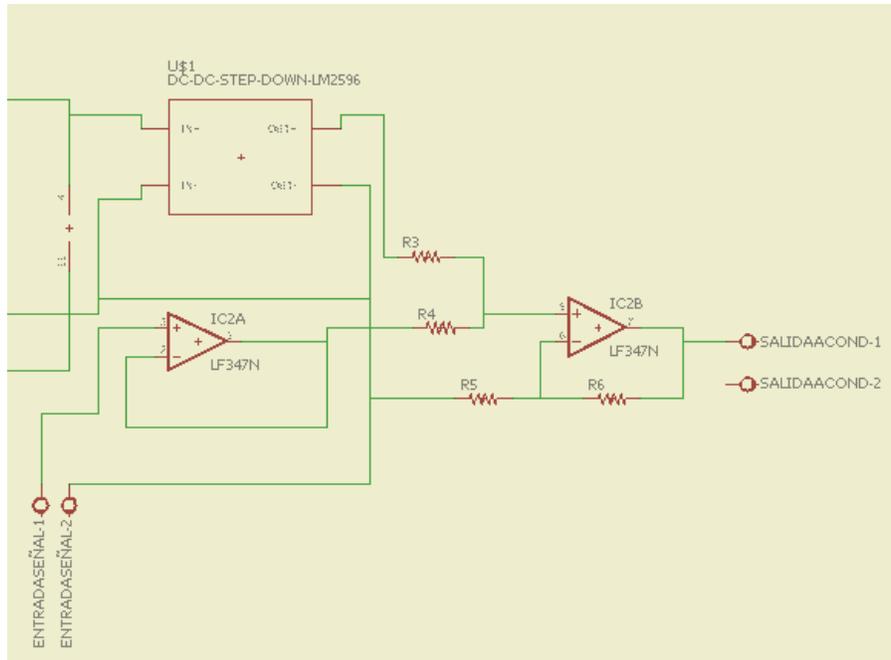


Figura 32. Circuito esquemático acople de señal 4Khz

El microcontrolador se encarga de enviar las señales de control a:

- Demultiplexación de la señal de prueba.
- Demultiplexación de PWM para los servomotores.
- Encendido de los motores controlados por transistores.
- Activación de la reproducción de la señal de prueba.
- Envío de datos por Bluetooth.

Las anteriores son las principales tareas que debe ejecutar el microcontrolador ver Figura 33.

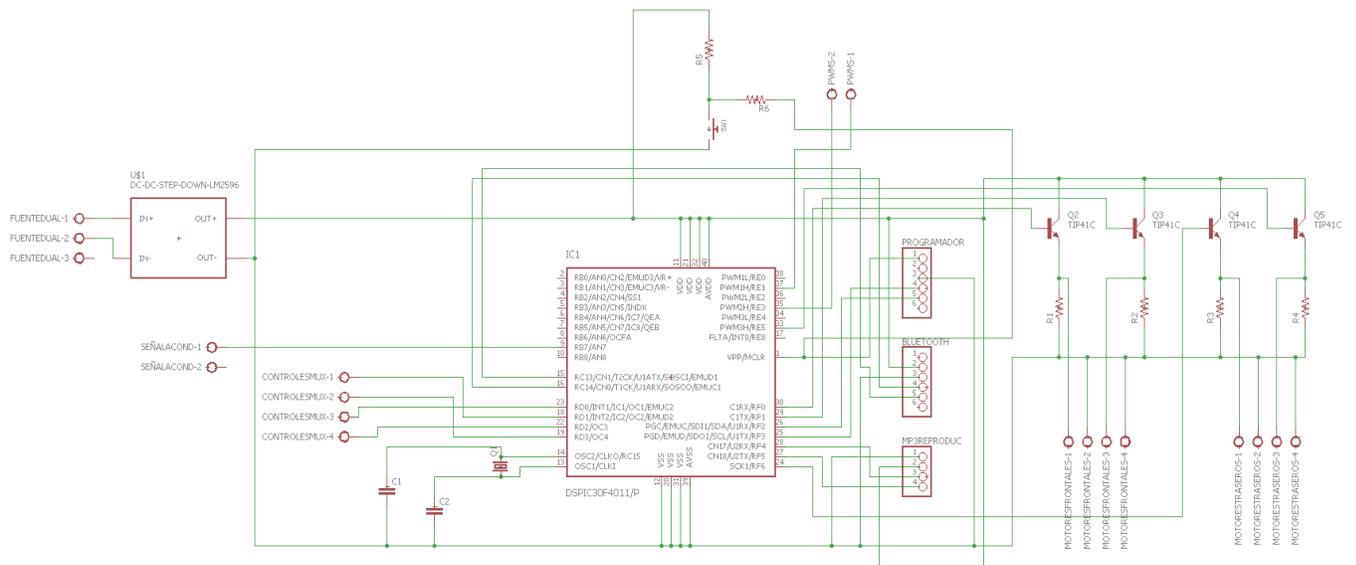


Figura 33. Circuito esquemático con el microcontrolador

La conexión del módulo Bluetooth HC-05 a la tarjeta se realizó mediante comunicación UART de 6 pines ver Figura 33. La programación del DSPIC se realizó mediante comunicación serial utilizando 6 pines en la tarjeta ver Figura 33.

La señal de prueba es entregada mediante un módulo mp3 YX5300, (ver Figura 34) el cual se conectó por comunicación UART de cuatro pines, (ver Figura 33) pasando directamente a la tarjeta de demultiplexación donde entra a un demultiplexor análogo de 1 a 4 distribuye la señal de la siguiente manera: la entrada Y (corresponde al pin número 3 del demultiplexor superior ver Figura 35) recibe la señal de prueba del módulo MP3, teniendo en cuenta que el orden de los bits de control, el bit más significativo es B (corresponde al pin número 9 del demultiplexor superior ver Figura 35) y A (corresponde al pin número 10 del demultiplexor superior ver Figura 35) el menos significativo usando las cuatro salidas (corresponden a los pines 1, 2, 4, 5, ver Figura 35) que serán distribuidas a las cajas acústicas según corresponda (ver Figura 35)



Figura 34. Módulo MP3 YX5300 UART

Fuente: [26]

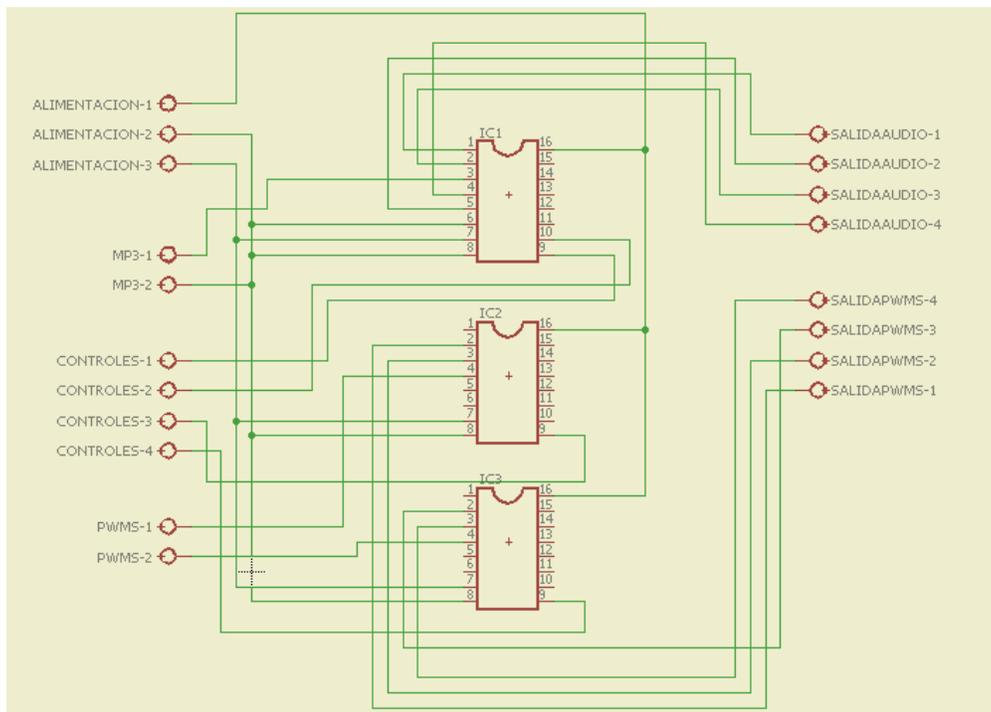


Figura 35. Circuito esquemático demultiplexores para audio y PWM

La tarjeta de demultiplexación también tiene como función la de demultiplexar los PWM que controlan los servomotores HS-311 (ver Figura 36) dando uso de dos demultiplexores cada uno con su debida señal de control y PWM según corresponda ver Figura 35



Figura 36. Servo motor HS-311 tomado de

Fuente: [27]

El servo motor HS-311 en la Figura 36 presenta las características ideales de alimentación, fuerza y rotación para el proyecto, cuenta con un voltaje de operación de 4.8-6.0 voltios, 180 grados de rotación, señal de control por PWM y un torque de 3.0Kg*Cm a 4.8V.

3.4. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y UBICACIÓN DE CAJAS ACUSTICAS

3.4.1. Distribución espacial de las cajas acústicas

El esquema de distribución espacial para las cajas acústicas está dispuesto de tal forma que se aproveche al máximo el espacio. Dicho espacio estará acotado por un cuadrado tres metros de lado representando el área de un estudio promedio, cabe resaltar que estas medidas son estimadas debido a que no hay un estándar para establecer la medida de una habitación o estudio por tal motivo se optó por tomar un cuadrado de lado 3m. Dentro del área se ubicó una circunferencia de radio 1.5m, con el fin de dar ubicación a las cajas acústicas frontales sobre la circunferencia y en las esquinas del cuadrado se ubicaran las cajas acústicas traseras, esta distribución se tuvo en cuenta a partir de las distribuciones presentes en Figura 1, Figura 2, y Figura 3. A continuación se presentaran las dimensiones con que se calculó la ubicación de los puntos donde estarán ubicadas las cajas acústicas y la zona donde se realizaran las pruebas de audio. Esta área está ubicada hacia las cajas acústicas traseras ya que con el fin de crear un ambiente más realista no es posible ubicarlos de forma equidistante a la audiencia.

Las cajas acústicas traseras están ubicadas en las esquinas traseras de cuadrado con la característica que se encuentran a aproximadamente 110 grados tomando como referencia el centro y la ubicación del micrófono en el área de audiencia ver Figura 37.

aprovechando así el espacio de las esquinas y ganando angulación con el fin de radiar mayor nivel de presión sonora hacia la audiencia, y las cajas acústicas frontales se encuentran ubicadas en la circunferencia a 25 grados tomando como referencia el centro y la ubicación del micrófono en el área de audiencia ver Figura 37.

En Figura 38 y Figura 39 se puede apreciar una imagen real de la disposición de los pedestales que sostendrán las cajas acústicas.

La distribución angular presente en la ubicación de las cajas acústicas esta con respecto al punto de referencia que es el micrófono y tienen los siguientes ángulos: las cajas acústicas frontales tiene una angulación de aproximadamente 50 grados entre ellos y las traseras presentan aproximadamente 110 grados entre la caja acústica y la normal del micrófono respectivamente ver Figura 37.

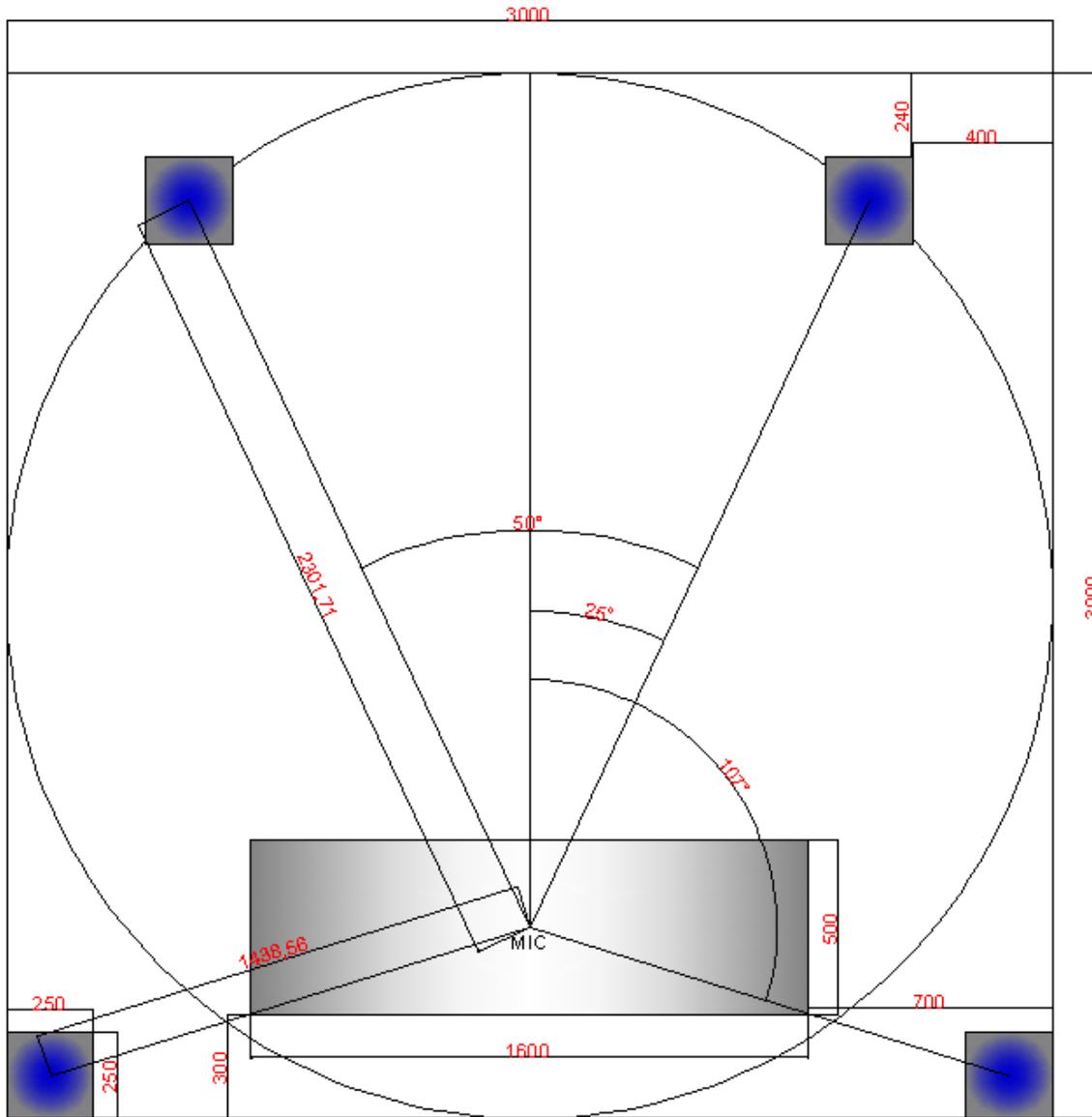


Figura 37. Distribución espacial de las cajas acústicas con respecto al micrófono



Figura 38. Distribución espacial física vista frontal



Figura 39. Distribución espacial física vista lateral

3.4.2. Ubicación de las cajas acústicas

La ubicación de las cajas acústicas crea la necesidad de generar un dispositivo capaz de darle posición y altura y que sea compatible con el sistema, para ello se crearon los pedestales y las bases de control.

- Pedestales: los pedestales tienen como función darle altura a las bases de control que soportarán las cajas acústicas sobre una columna cilíndrica con bases cuadradas, estos pedestales tienen una altura de 1.15m (ver Figura 40). En total se realizaron 4 pedestales, dos para las cajas acústicas frontales y dos para las traseras.



Figura 40. Pedestal

Para la construcción de los pedestales se utilizaron cilindros de papel de 2cm de espesor (ver Figura 41) y madera Mdf para la base (ver Figura 42) y el soporte (ver Figura 43). Con el fin de generar una posición frontal en estos se les ubicó una canaleta de aluminio (ver Figura 44) la cual genera un punto de visión frontal en el pedestal (ver Figura 45).



Figura 41. Cilindros de papel



Figura 42. Bases de Mdf para el pedestal



Figura 43. Soportes de Mdf para el pedestal



Figura 44. Canaleta de aluminio para parte frontal del pedestal



Figura 45. Pedestales terminados

- Bases de control: las bases de control se diseñaron con el fin de dar rotación horizontal mediante un sistema de rodamientos, palanca y servomotor (ver Figura 46). Su función es proporcionar a la caja acústica una movilidad de 180 grados en el servomotor y 90 grados en la caja acústica con rotaciones controladas por el sistema embebido.

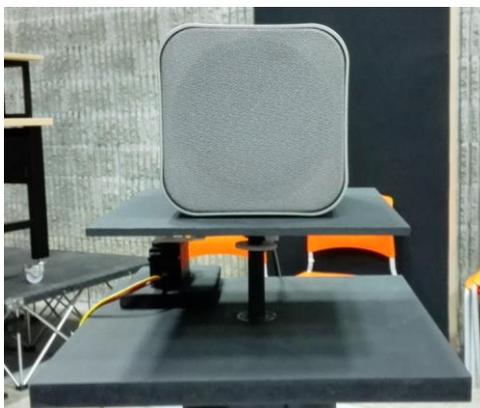


Figura 46. Base de control

Las bases de control se diseñaron usando un servomotor (ver Figura 49) el cual está unido por una palanca (ver Figura 50) al eje central de la base (ver Figura 48) que está unido a un rodamiento (ver Figura 47) en forma horizontal para poder dar libertad de movimiento. Este eje a

su vez soporta una tabla de madera en el cual se ubicaran las cajas acústicas que rotaran mediante el movimiento del servomotor/palanca (ver Figura 51)



Figura 47. Base con rodamiento en el centro

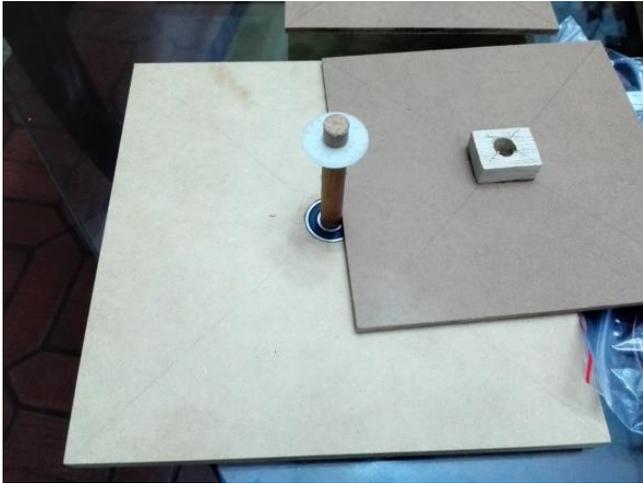


Figura 48. Eje central que une el sistema



Figura 49. Servomotor y palanca

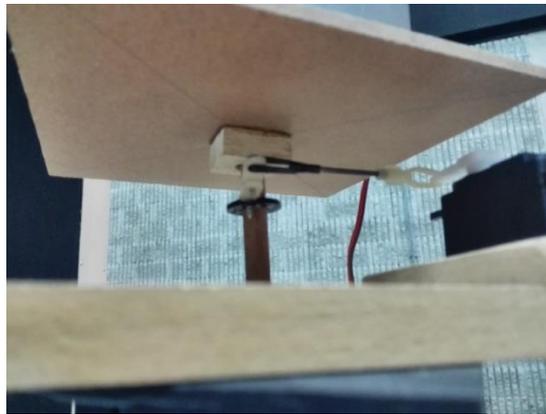


Figura 50. Vista inferior de palanca y eje



Figura 51. Bases de control por ensamblar

El pedestal y la base de control representan un solo sistema que da como resultado el principio para el sistema de ubicación de las cajas acústicas ver Figura 52.

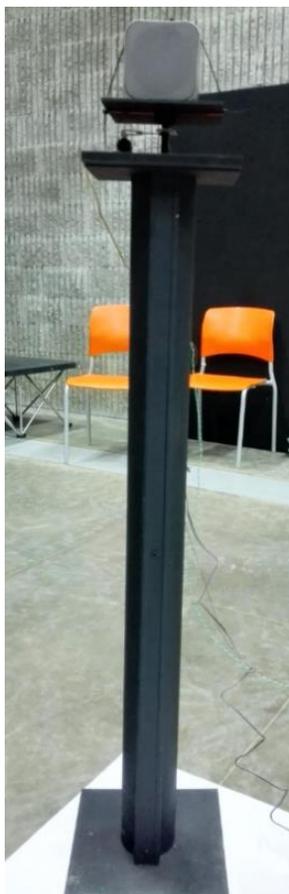


Figura 52. Pedestal con base de control y caja acústica

El sistema de posicionamiento para las cajas acústicas se centrara en tres puntos diferentes bajo los cuales se harán las pruebas de posicionamiento: un primer instante será ubicando el micrófono en la parte central (ver Figura 53) del área de audiencia; el segundo instante estará ubicado hacia la derecha (ver Figura 54) y; el tercer instante hacia la izquierda (ver Figura 55).

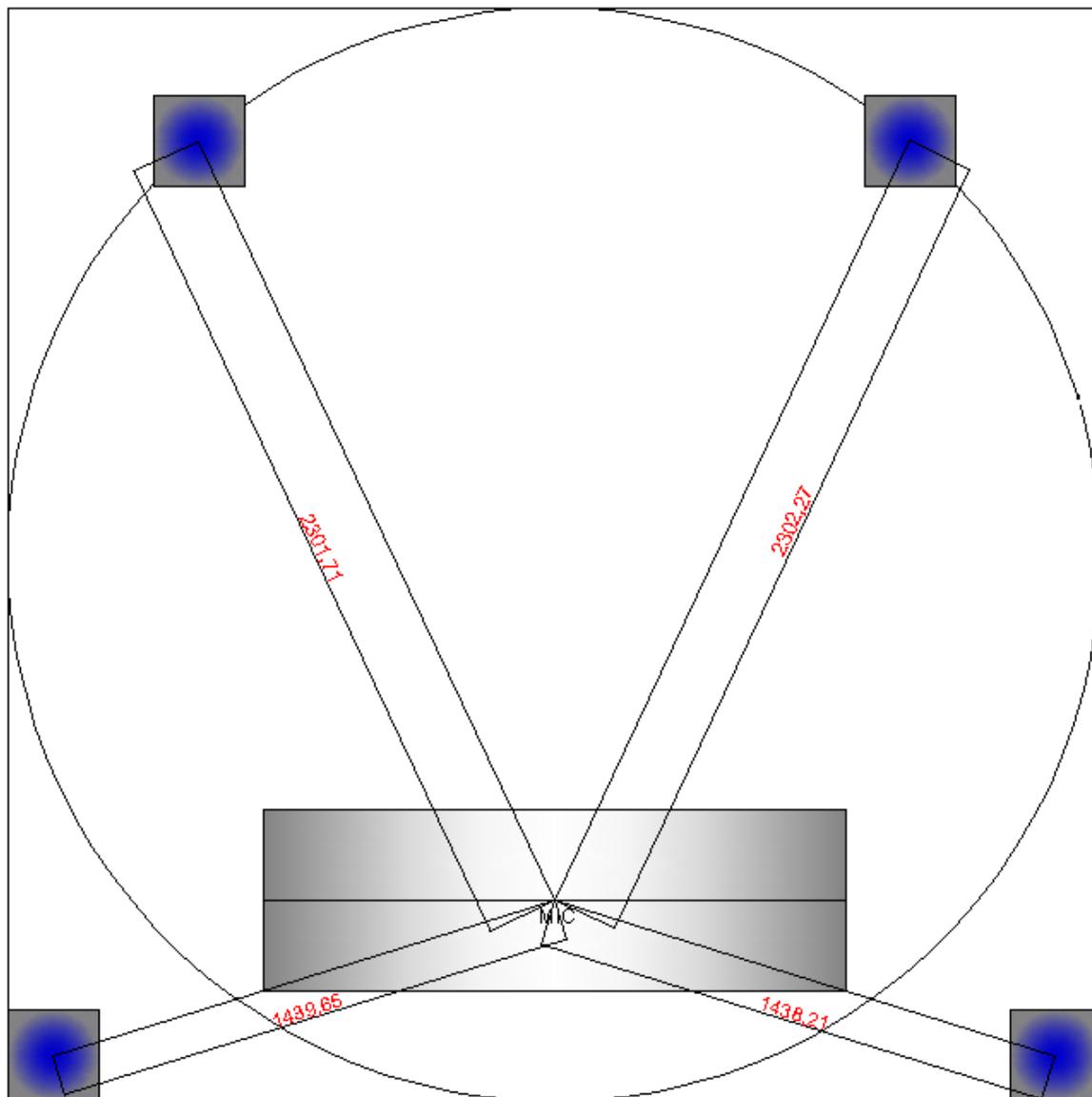


Figura 53. Ubicación de las cajas acústicas en dirección central de la audiencia

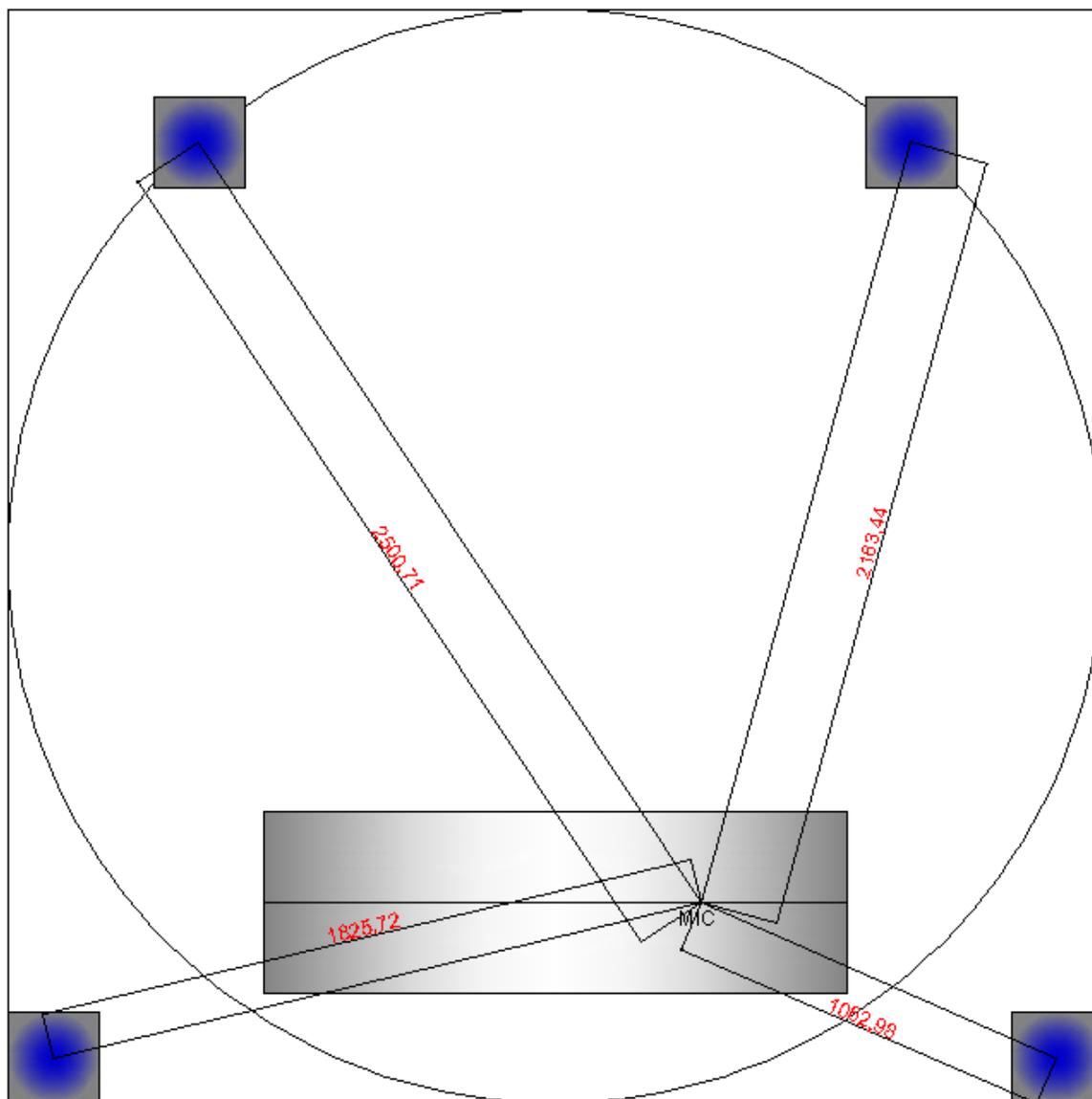


Figura 54. Ubicación de las cajas acústicas en dirección a la derecha de la audiencia.

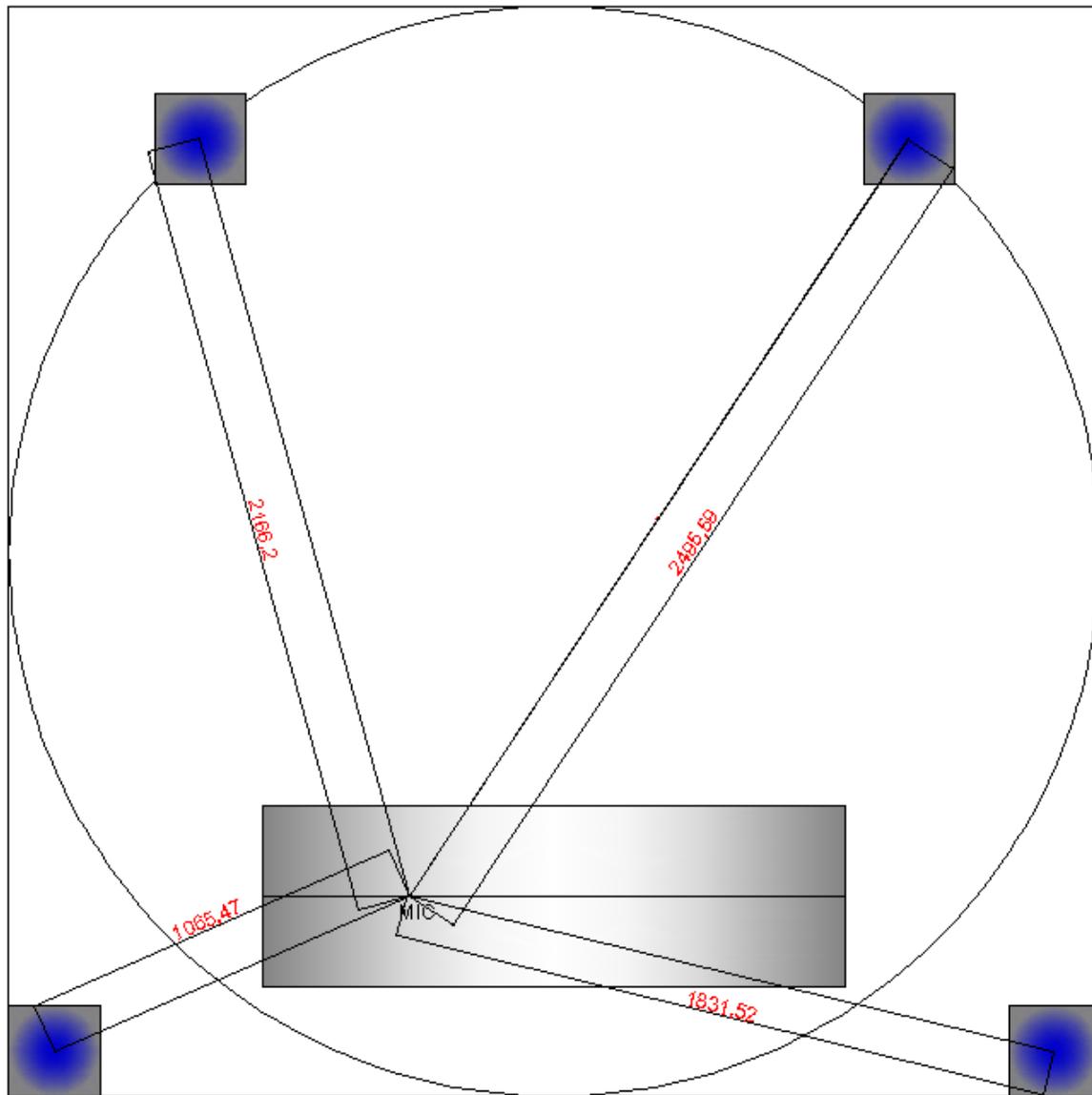


Figura 55. Ubicación de las cajas acústicas en dirección a la izquierda de la audiencia

4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A partir de los resultados obtenidos en el marco experimental se toman decisiones que contribuyen con el desarrollo de la metodología. En este capítulo se presentara en cada sección los resultados del análisis y la toma de datos, también el proceso que lleva a cabo el sistema para posicionarse.

4.1. EVALUACIÓN DE LOS ALGORITMOS DE UBICACIÓN DE FUENTES BASADOS EN:

4.1.1. FFT

La implementación del software para el posicionamiento de las cajas acústicas basado en FFT se desarrolló teniendo en cuenta pruebas por instantes de tiempo y rotaciones angulares, es decir analizando el espectro de cada caja acústica en diferentes instantes de tiempo y rotación entre cada grabación se estimó un tiempo de espera de 2s ver Tabla 2 y Tabla 3.

Tabla 2: datos recolectados en 3 pruebas para tres posiciones

Prueba 1	Eje axial (Voltios)	Prueba 2	135 grados (Voltios)	Prueba 3	45 grados (Voltios)
10	0,497643948	13	0,399407	17	0,4235
11	0,490512401	14	0,396974	18	0,435829
12	0,484564602	15	0,389973	19	0,420658

Tabla 3 datos recolectados en 5 pruebas para 5 posiciones

Recorrido de 5 puntos					
prueba	Izquierda	Eje axial		Derecha	
	45 grados (Voltios)	30 grados (Voltios)	Eje axial (Voltios)	30grados (Voltios)	45 grados (Voltios)
1	0,335550815	0,374253	0,428275	0,421821	0,386407
2	0,379547864	0,405263	0,426175	0,414212	0,377394
3	0,36554113	0,383813	0,403473	0,382688	0,35355
4	0,370475858	0,372626	0,444187	0,395354	0,275997
5	0,32933104	0,395519	0,446124	0,399267	0,354682

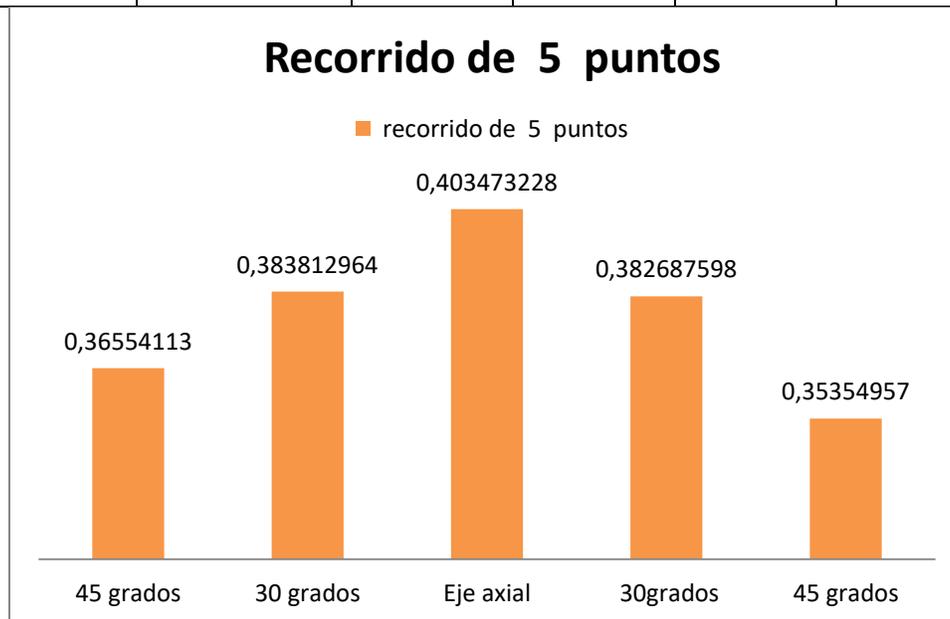


Figura 56. Representación de la fila 3 en la Tabla 3

Las respuestas obtenidas del algoritmo implementado con FFT dio resultado muy satisfactorio debido a que se puede observar el patrón que se ha venido buscando donde el eje axial representa el mayor nivel de presión sonora como de amplitud espectral ver Figura 56.

4.1.2. DFBB, TDE Y TDOA

La implementación del código para la ubicación de fuentes tiene gran alcance sin embargo las pruebas no han salido satisfactorias debido a varios factores que evitan una repetitividad en el sistema. Factores como la acústica del recinto, el nivel de presión sonora y el ángulo de incidencia haciendo de este método poco efectivo en los resultados esperados Figura 57 y Figura 58.

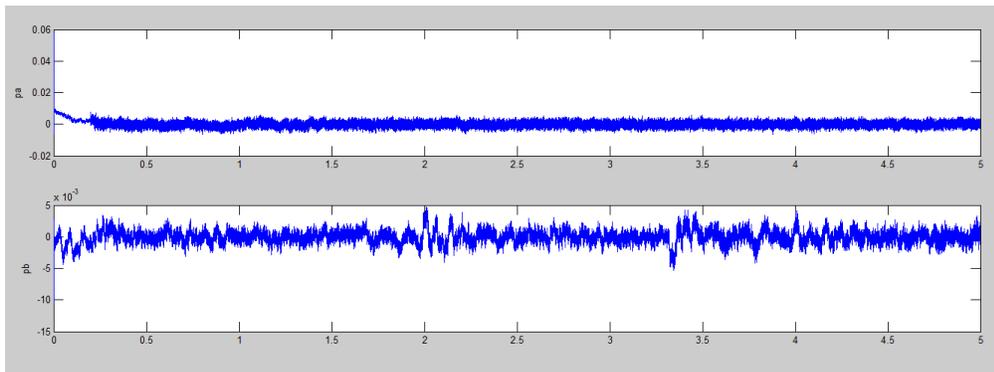


Figura 57. Prueba 1 señal pa y pb

Fuente: Software MATLAB

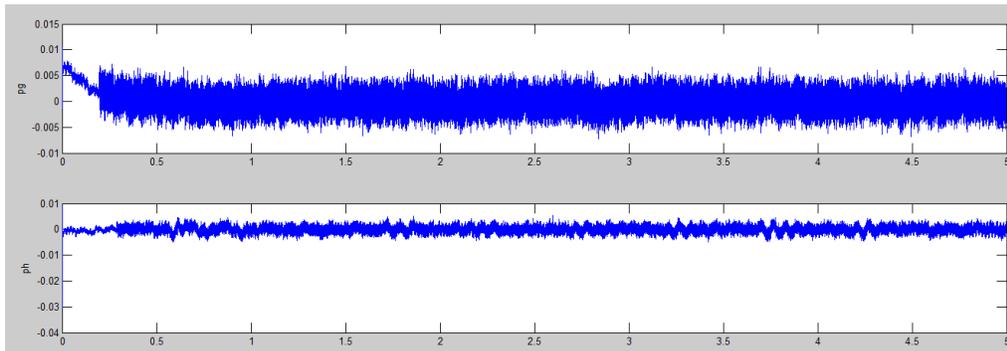


Figura 58. Prueba n señal pg y ph

Fuente: software MATLAB

Un primer factor del sistema que se encontró es que no existe una repetitividad en las grabaciones y esto es debido al hardware que se está usando aquí se puede identificar y descartar que para las grabaciones es necesario un buen transductor (micrófono) que garantice una buena grabación. Un

segundo factor es el entorno debido a que no se cuenta aún con un recinto independiente y controlado, hay mucho ruido en el ambiente y demás señales que puedan generar una interferencia, la cual deteriora las grabaciones. Por tal motivo aunque ya se dispone de un algoritmo para la identificación de fuentes no se puede de forma apropiada establecer las distancias y los retardos de señal.

4.1.3. Selección de algoritmo de ubicación de fuentes.

Teniendo en cuenta que se realizaron las pruebas pertinentes para seleccionar el mejor algoritmo para la ubicación de fuente, se encontró que los métodos basados en retardos de señal o tiempos de llegada no son eficientes para el proyecto. Esto se hizo notable al momento de realizar pruebas de respuesta al impulso de las cajas acústicas y el micrófono omnidireccional ubicado en el punto de referencia obteniendo una respuesta de 6.7s y con variaciones en el tiempo solo con rotaciones en las cajas acústicas de ángulos mayores a 45 grados con variaciones de la respuesta al impulso aproximadamente de 6.6s-6.4s, así mismo los resultados obtenidos en los métodos basados en DFBF, TDE y TDOA los cuales no permiten una adecuada ubicación de la fuente.

Gracias al análisis espectral y basándonos en la FFT, se establece con mayor precisión que en el eje axial se encuentra mayor nivel de presión sonora que en los lados adyacentes. Este comportamiento puede tener variaciones debidas a condiciones propias del recinto, lo cual genera en algunas pruebas un corrimiento entre la posición directa y el mayor nivel de presión sonora percibida por el punto de referencia.

4.1.4. Comportamiento de la interfaz HMI.

El posicionamiento de las cajas acústicas del sistema 5.1 cuenta con una interfaz HMI diseñada para Android y manejada mediante comunicación *bluetooth*. La interfaz es el control del sistema embebido con el cual se podrá dar inicio al posicionamiento de las cajas acústicas como también tiene la opción de realizar un reajuste en el caso que se desee reposicionar o conocer la última posición de las cajas acústicas. A continuación se presentara el proceso que se debe realizar para manejar la interfaz HMI.

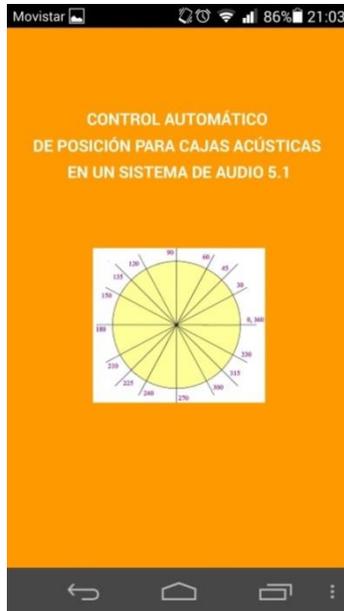


Figura 59. Pantalla de inicio

En la Figura 59 se presenta la pantalla de inicio de la aplicación donde se encuentra ubicado el título del proyecto.



Figura 60. Pantalla principal

Inmediatamente después de pasar la pantalla de inicio se presenta una notificación que indica la necesidad de establecer conexión con el bluetooth (ver Figura 61) esta notificación se presentara cada que se inicie la aplicación o cuando el bluetooth se encuentre desactivado y solo se muestra en la pantalla principal (ver Figura 61) la pantalla principal se muestra en la Figura 60 esta pantalla cuenta con un menú desplegable el cual está ubicado en la esquina superior izquierda representado por el símbolo de las tres líneas paralelas. Esta pantalla será a la cual se deba regresar para poder usar las opciones del menú.

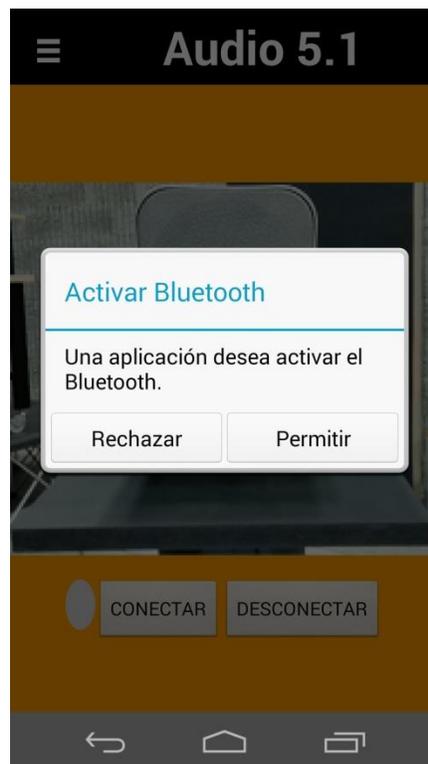


Figura 61. Activación del bluetooth

El menú desplegable cuenta con dos opciones para el ajuste de las cajas acústicas. La primera opción es la de Ajustar 5.1. Esta opción es diseñada para dar inicio al funcionamiento del prototipo de ajuste de las cuatro cajas acústicas. La segunda opción es la de Reajustar la cual trabaja basándose en la posición que ha dejado como referencia en la opción Ajustar 5.1 para

hacer un reajuste en el caso que alguna caja acústica este fuera de posición. Estas opciones están visibles en la Figura 62.



Figura 62. Menú desplegable

a opción Ajustar 5.1 tiene una interfaz en la cual se presentan las cuatro cajas acústicas con su respectiva referencia, botón de Inicio y piloto de enlace con el bluetooth ver Figura 63.

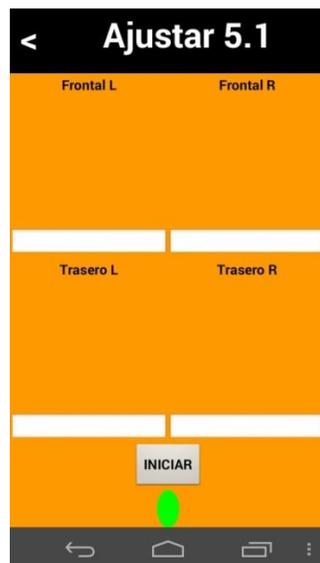


Figura 63. Opción Ajustar 5.1

Una vez presionado el botón de Iniciar el prototipo inicia el posicionamiento de las cajas acústicas y al finalizar este se puede visualizar en la interfaz una alerta que indica que las cajas acústicas fueron posicionadas ver Figura 64.

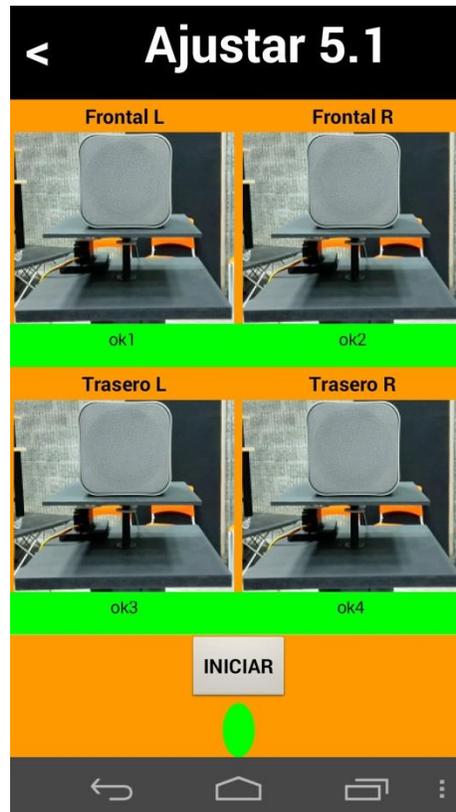


Figura 64. Finaliza Ajustar 5.1

Cuando el prototipo termina el posicionamiento de las cajas acústicas en la aplicación existen dos opciones que se pueden seguir la primera es realizar nuevamente el ajuste en la opción Ajustar 5.1 lo cual daría inicio al ajuste nuevamente de las cajas acústicas; o se puede retroceder usando el botón de retorno al menú que se encuentra ubicado en la esquina superior izquierda representado por el símbolo menor que al realizar esa acción regresara a la pantalla principal y ya en esta se puede pasar a la opción Reajustar (ver Figura 65) para verificar el posicionamiento de las cajas. La opción Reajustar está diseñada no para comprobar inmediatamente lo que realice la opción Ajustar 5.1 sino para en un instante de tiempo diferente al del posicionamiento verificar si alguna caja acústica fue movida de la última posición que tomo mediante la opción Ajustar 5.1.

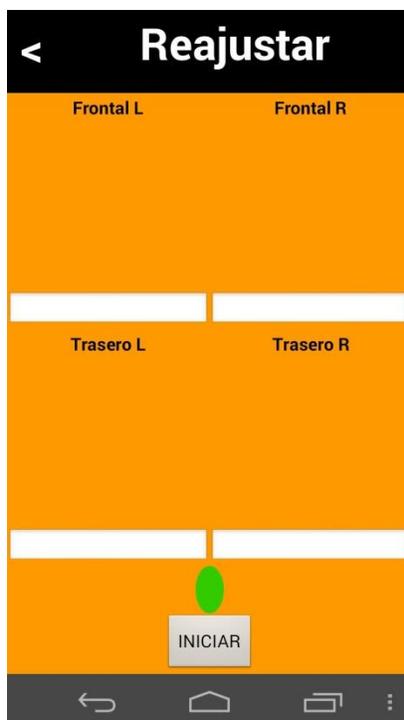


Figura 65. Opción Reajustar

La opción **reajustar** cuenta con una interfaz similar a la de “Ajustar 5.1”, la cual muestra en un campo de la pantalla el texto “ok” cuando el parlante está bien posicionado, de lo contrario mostrara “malo”.

En el caso que la prueba realizada en Reajustar no haya ningún inconveniente en la posición de las cajas acústica el resultado en todas será ok (ver Figura 66) de lo contrario si la prueba resulta mala saldrá un aviso con fondo rojo indicando malo en la caja acústica que corresponda al error de posicionamiento (ver Figura 67).

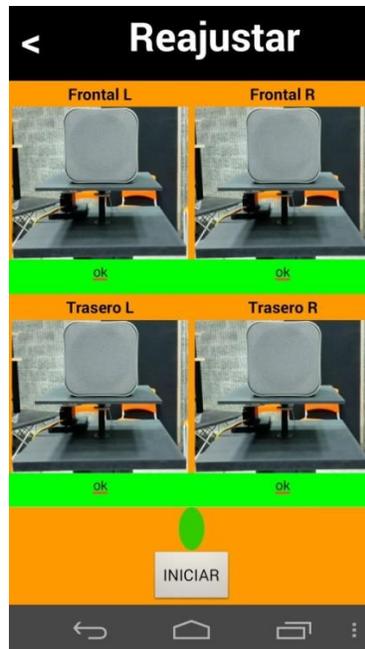


Figura 66. Finaliza Reajustar "ok"

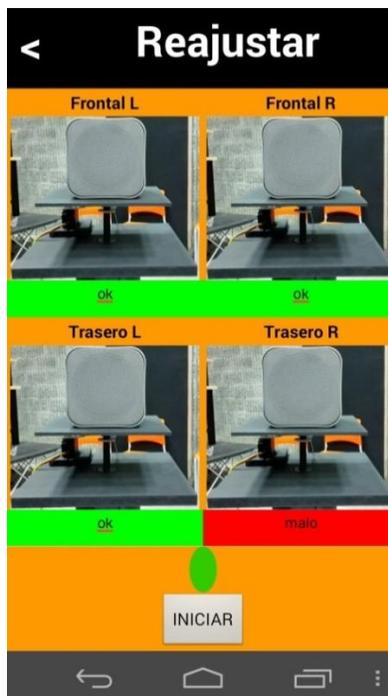


Figura 67. Finaliza Reajustar "malo"

4.1.5. Comportamiento de las muestras recolectadas.

Como se mencionó en el subcapítulo “Ubicación de las cajas acústicas” se consideraron tres momentos en los cuales se ubicará el punto de referencia. En cada punto se hacen cinco muestras por caja acústica dando un total de 20 muestras por cada vez que se ajusta el sistema 5.1 a continuación se presentaran las tablas donde se expresan los resultados tomados por el sistema embebido.

Tabla 4. Punto de referencia al centro

Caja					
Acústica	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4	Posición 5
F Izquierda	87	103	77	47	21
F Derecha	6	26	51	44	30
T Izquierda	59	26	2	11	12
T Derecha	18	10	17	56	87

La primer prueba del posicionamiento de las cajas acústicas del sistema 5.1 se realiza ubicando el punto de referencia en el centro (ver Figura 53). La toma de muestras se hace en el siguiente orden: inicia la caja acústica frontal izquierda seguida de la frontal derecha, después inicia la trasera izquierda y finaliza la trasera derecha. En la Tabla 4 se presentan los valores que arrojó la FFT en cada una de las muestras por caja acústica y podemos observar que existe un momento en el que el valor se incrementa. Estos valores están resaltados para cada caja acústica en la Tabla 4 y hacen referencia al punto donde la caja acústica presenta su mayor nivel de presión sonora respecto al punto de referencia, este será el punto donde las cajas acústicas se posicionarán. En el Anexo C (ver Figura 80) se encuentran las cajas acústicas posicionadas hacia el punto de referencia en el centro.

Tabla 5. Punto de referencia a la derecha

Caja					
Acústica	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4	Posición 5
F Izquierda	45	74	78	66	45
F Derecha	8	17	22	26	20
T Izquierda	88	38	2	20	39
T Derecha	28	44	139	295	332

El siguiente punto de referencia será a la derecha como se aprecia en la Figura 54. Los datos arrojados por esta se encuentran en la Tabla 5 en donde se puede observar que hay un incremento del nivel de presión sonora debido a que el micrófono de prueba está mucho más próximo a las cajas acústicas frontal izquierda y trasera derecha. Esto se puede notar en la Tabla 5 en los valores resaltados. En el Anexo C (ver Figura 81) se encuentran las cajas acústicas posicionadas hacia el punto de referencia hacia la derecha.

Tabla 6. Punto de referencia a la izquierda

Caja					
Acústica	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4	Posición 5
F Izquierda	226	276	211	108	47
F Derecha	46	49	26	10	4
T Izquierda	264	192	91	55	34
T Derecha	2	11	63	98	112

Por último, el punto de referencia será a la izquierda como se aprecia en la Figura 55, los datos arrojados por esta se encuentran en la Tabla 6. Haciendo énfasis en los valores resaltados se puede observar que el incremento del nivel de presión sonora aumenta en la caja acústica trasera izquierda y también aumenta en la caja acústica frontal derecha. En el Anexo C (ver Figura 82) se encuentran las cajas acústicas posicionadas hacia el punto de referencia hacia la izquierda.

Los resultados obtenidos en Tabla 4, Tabla 5 y Tabla 6 representan el posicionamiento de las cajas acústicas para un punto de referencia específico, pruebas en nuevas posiciones arrojarán resultados nuevos y similares mas no se puede establecer que serán idénticos, debido a que la prueba no se puede hacer dos veces en un punto exacto dentro de la zona de audiencia.

El micrófono de prueba cuenta con una sensibilidad muy alta y hace que cada movimiento de la capsula con respecto a las cajas acústicas genera variaciones en los resultados pero sin dejar la tendencia mencionada en Tabla 4, Tabla 5 y Tabla 6.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1. CONCLUSIONES

Este trabajo de grado presenta el prototipo de un sistema de Control automático de posición para cajas acústicas en un sistema de audio 5.1. El cual garantiza el mejor nivel de presión sonora en la audiencia y genera un sonido más tridimensional y con mayor fidelidad.

En este trabajo de grado adicionalmente se diseñó una interfaz HMI con la plataforma MIT App inventor 2, con el fin de generar una interacción directa entre el sistema embebido y el usuario. Gracias a esta interfaz el usuario no requiere estar en contacto con el prototipo para dar un adecuado inicio al proceso de ubicación de las cajas acústicas.

Este sistema utiliza técnica de Transformada de Fourier que permite analizar la magnitud de la señal obtenida en diferentes posiciones de la caja acústica sobre un punto de referencia, esto con el fin de obtener el mayor nivel de presión sonora en la frecuencia de 4KHz y así garantizar una adecuada directividad de la señal de cada caja acústica.

De acuerdo a los experimentos realizados en la recolección y análisis de los datos en las pruebas de sonido en los puntos de referencia, se estableció el comportamiento al rededor del eje axial en las cajas acústicas en relación al mayor nivel de presión sonora.

El resultado de la validación de las pruebas arrojadas por los diferentes algoritmos para la localización de fuentes, se pudo concluir que los resultados arrojados por los métodos DFBB, TDE Y TDOA, no son eficientes para dar posicionamiento angular. Los algoritmos basados en FFT al identificar el espectro de la señal de prueba del tono puro en magnitud y su variación respecto al eje axial es notable respecto a su posición angular.

El resultado de la validación del algoritmo basado en el análisis por FFT dio el primer paso para el diseño del sistema embebido, enfocando la selección del hardware a microcontroladores con capacidad de procesamiento digital de señales. Adicionalmente, se requeriría de un sistema

robusto y confiable para la toma de muestras y el manejo de servomotores, a partir de esto se discrimino y selecciono los elementos pertinentes con los cuales se implementó el sistema embebido para el control automático de posición para cajas acústicas en un sistema de audio 5.1.

Este proyecto de grado facilita el posicionamiento de las cajas acústicas en sistemas de audio 5.1, dando versatilidad al usuario de generar diferentes entornos acústicos respecto a la posición de la audiencia, aprovechando el espacio proporcionado por el recinto y la directividad que ofrecen las cajas acústicas.

De acuerdo a las pruebas realizadas para la verificación de la señal de prueba ideal para el posicionamiento de las cajas acústicas del sistema 5.1, la directividad y la longitud de onda son características de los tonos puros de media y alta frecuencia, se evidenció que trabajar con una señal de prueba de 4KHz presenta mejores resultados que con una señal de prueba de 1KHz.

5.2. TRABAJOS FUTUROS

Se suponen algunas actividades como trabajo futuro con el objetivo de explorar la metodología aplicada para el control de posición de cajas acústicas en sistemas de audio 5.1, como es el caso del presente estudio. Entre los aspectos que se considera pueden aportar al desarrollo de sistemas de control en sistemas de sonido son:

- Sistema de control del nivel de presión sonora de las cajas acústicas de forma equitativa a la audiencia.
- Sistema de reconocimiento del entorno acústico de cada caja acústica.
- Análisis de reflexiones molestas entre las cajas acústicas y la audiencia.
- Sistema de posicionamiento automático para cajas acústicas en sistemas de refuerzo sonoro en:
 - Eventos
 - Espacio público.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. ROPER y T. COLLINS, «A Sound Sources and Reflections Localization Method for Reverberant Rooms using Arrays of Microphones,» de *AES 32nd International Conference: DSP For Loudspeakers*, Hillerød, Denmark, 2007.
- [2] S. ROPER y T. COLLINS, «The localization of a sound source in a reverberant room using arrays of microphones,» de *AES 31st International Conference*, London, UK, 2007.
- [3] H. SHIM, S. JEONG-HUN, Y. JAE-HYOUN y S. KOENG-MO, «Artificial Reverberator to Control Location of Sound Source for Surround Audio System,» de *AES 28th International Conference: The Future of Audio Technology Surround and Beyond*, Piteå, Sweden, 2006.
- [4] M. Moser y J. L. Barros, *INGENIERÍA ACÚSTICA. Teoría y aplicaciones*, New York: Springer, 2009.
- [5] B. Pueto Ortega y M. Róma Romero, *ELECTROACUSTICA. altavoces y micrófonos*, Madrid: Pearson, 2003.
- [6] S. B. Chon, I. Y. Cho, H.-g. Moo, J. Seo y K.-M. Sung, «Virtual Source Location Information for,» *Audio Engineering Society*, pp. 1-5, 2005.
- [7] I. Acusticos, «ingenieros Acusticos,» 2015. [En línea]. Available: www.ingenierosacusticos.com. [Último acceso: 23 6 2015].
- [8] H. SHIM, J.-H. SEO, J.-H. YOO y K.-M. SUNG, «Artificial Reverberator to Control,» *Artificial Reverberator to Control Location of Sound Source*, pp. 1-5.
- [9] V. PULKKI, «Virtual Sound Source Positioning Using Vector Base Amplitude Panning,» *Audio Engineering Society*, 1997.
- [10] Y.-c. P. S.-P. L. a. D. H. Y. Se-Woon Jeon, «VIRTUAL SOURCE PANNING USING MULTIPLE-WISE VECTOR BASE,» de *19th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2011)*, Barcelona, 2011.
- [11] M. Steele, «A Direction Finding – Beam Forming Conference,» *Lexington Center/School for the Deaf*, pp. 1-8, 2000.
- [12] H. Khaddour, «A Comparison of Algorithms of Sound Source Localization Based,» *elektrorevue*, pp. 1-7, 2011.

- [13] Q. L. D. M. Jing Fan, «Localization Estimation of Sound Source by Microphones Array,» *Procedia Engineering* 7, pp. 312-317, 2010.
- [14] M. Y. A. G. ,. K. B. A.V. Singh, «Localization of multiple acoustic sources in a room environment,» *Applied Energy* 109, p. 171–181, 2013.
- [15] S.-C. L. Holger Finger, «Estimating the Location of a Sound Source with a Spike-Timing Localization Algorithm,» Osnabuck, Germany . Zurich, Switzerland.
- [16] S. M. Shaik Kaleem Basha, «FPGA Based Sound Location Estimation using the,» *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, p. 5, 2014.
- [17] dbxpro, «www.dbxpro.com,» [En línea]. Available: <http://dbxpro.com/en/products/rta-m>. [Último acceso: 2016].
- [18] TASCAM, «www.tascam.com,» [En línea]. Available: <http://tascam.com/product/us-366/downloads/>. [Último acceso: 2016].
- [19] MathWorks, «mathworks.com,» [En línea]. Available: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/21231-gong>. [Último acceso: 25 05 2017].
- [20] Microchip, «Documentos Microchip,» [En línea]. Available: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/DS-70095K.pdf>.
- [21] M. T. Inc., «microchip.com,» [En línea]. Available: <http://www.microchip.com/design-centers/16-bit>. [Último acceso: 2016].
- [22] N. Semiconductors, «nxp.com,» [En línea]. Available: <http://www.nxp.com/products/microcontrollers-and-processors/more-processors/dsp-dsc:DSP-DSC>. [Último acceso: 2016].
- [23] T. I. Incorporated, «ti.com,» [En línea]. Available: <http://www.ti.com/lstds/ti/processors/dsp/overview.page>. [Último acceso: 2016].
- [24] T. I. Incorporated, «Texas Instrument.com,» [En línea]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2596.pdf>. [Último acceso: 2016].
- [25] p. s. module. [En línea]. Available: <https://www.aliexpress.com/item/Free-shipping-10pcs-lot-Tracking-number-LM2596-LM2596S-DC-DC-adjustable-step-down-power-Supply-module/1732504666.html?spm=2114.40010308.4.1.a5wLIG>.
- [26] Y. U. M. S. MP3, «ModuleFans,» [En línea]. Available: <https://es.aliexpress.com/store/product/YX5300-UART-M-dulo-Serial-MP3-Reproductor-de-M-sica-de-Control-Para-Arduino-AVR->

ARM/612195_32673728703.html?spm=2114.04010208.3.2.evfLGE&ws_ab_test=searchweb0_0%2Csearchweb201602_4_10065_10068_433_434_10136_10137_10.

- [27] HITEC, «www.servodatabase.com,» [En línea]. Available: <http://www.servodatabase.com/servo/hitec/hs-311>.
- [28] F. Keyrouz, A. Bout Salenh y K. Diepold, «A Novel Approach to Robotic Monaural Sound Localization,» de *AES 122nd Convention*, Vienna, Austria, 2007.
- [29] T. Yosuke y I. Akira, «CONTROLLING THE DIRECTION OF SOUND INTENSITY BASED ON SOUND INTENSITY TRANSFER PATH ANALYSIS,» de *AES 48th International Conference: Automotive Audio*, Munich, Germany, 2012.
- [30] J. R. Aguilar, M. Arias, R. Salinas y M. A. Abidi, «DIRECT SEARCH OF TIME DELAY IN BEAMFORMING APPLICATIONS,» *INGEACUS 2004*, pp. 1-7, 2004.
- [31] E. Mumolo, M. Nolich y G. Vercelli, «Algorithms for acoustic localization based on microphone,» *Robotics and Autonomous Systems*, pp. 1-20, 2002.
- [32] Microchip, «Microchip,» [En línea]. Available: <http://www.microchip.com/pagehandler/en-us/family/16bit/home.html>.
- [33] T. Instruments. [En línea]. Available: <http://www.ti.com/corp/docs/landing/c280x/index.htm?DCMP=f28044&HQS=Other+OT+f28044>.
- [34] Freescale. [En línea]. Available: <http://www.freescale.com/products/more-processors/dsp-dsc/dscs/mc56f84xxx/digital-signal-controllers:MC56F84xxx>.
- [35] Wikipedia. [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Digital_signal_controller.

ANEXO A

A1. Diagrama de flujo del funcionamiento para el ajuste automático de las cajas acústicas para el sistema 5.1

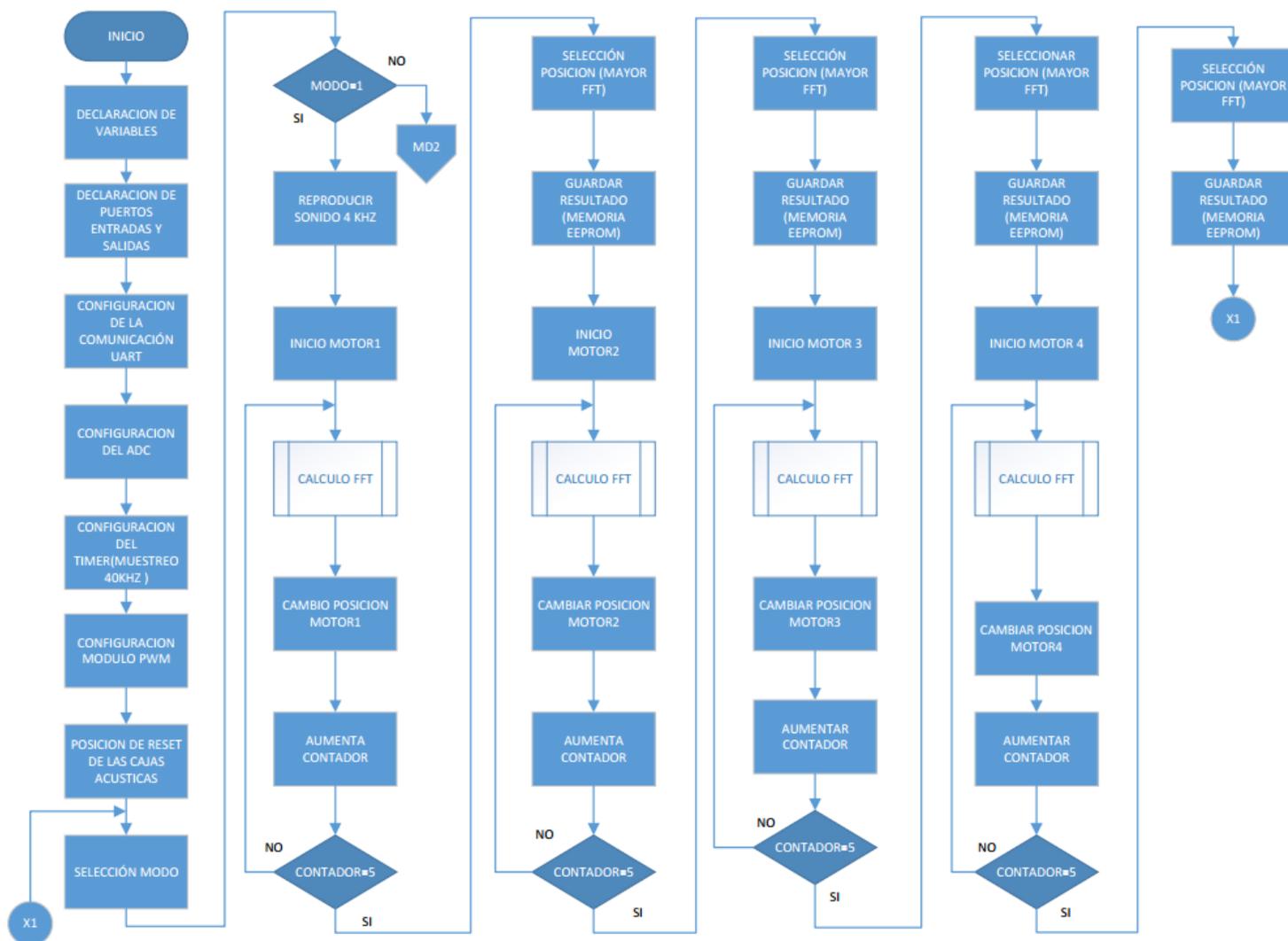


Figura 68. Diagrama de flujo general parte 1

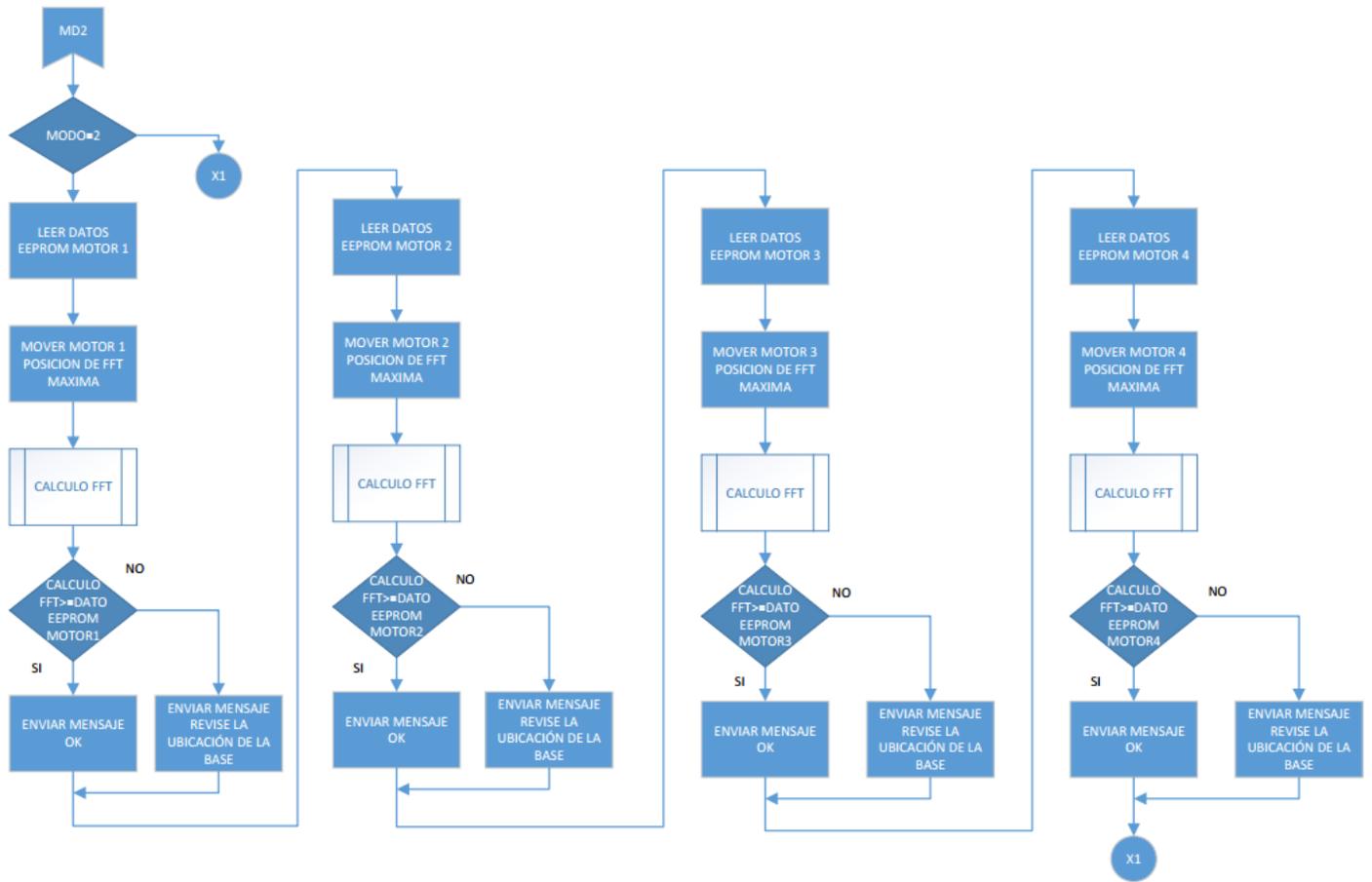


Figura 69. Diagrama de flujo general parte2

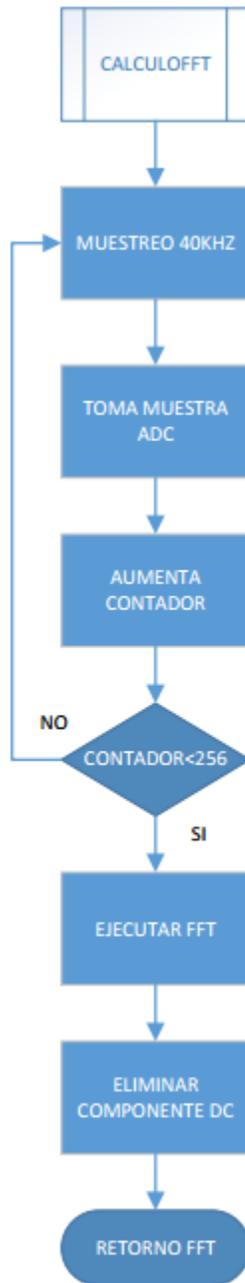


Figura 70. Diagrama de flujo de subrutina para el cálculo de FFT

ANEXO B

B1. Código para gráfica y reproducción de ruido rosa

```
[y, Fs]=wavread('pink noise.wav');
s1=y;
% s2=s1(1:220500)
s2=s1(:,2);
% sound(s2, Fs)
H = spectrum.periodogram
plot(psd(H, s2))
```

Figura 71. Código para gráfica y reproducción de la señal de prueba

B2. Grabación señal

```
%Record n seconds.
%***** (fs, numero de bits, nuemro de canales)**
grabacion_Obj = audiorecorder(44100, 16, 1);
disp('inicia grabacion')
recordblocking(grabacion_Obj, 2);
disp('finaliza grabacion.');
```



```
%grabacion_1 es el arreglo de la señal
grabacion_1 = getaudiodata(grabacion_Obj, 'single');
```



```
s1 = grabacion_1;
```

Figura 72. Código para la grabación de la señal de prueba

```

t1 = (0:length(s1)-1)/Fs;

%*****grafica señal del microfono *****
figure(1)
plot(t1,s1)
title(['señal ',num2str(k),' captada por el microfono'])
grid on
ylabel('s_1');

%****guardar imagen*****
saveas(gcf, 'señal.png')

%*****fft*****
tf1 = fft(s1);
L=length(s1);

%*****tf para s1*****
b2 = abs(tf1/L); %calcula valor absoluto de la fft dividida entre la longitud del vector muestra
b1 = b2(1:L/2+1);
b1(2:end-1) = 2*b1(2:end-1);

fa = Fs*(0:(L/2))/L;

%*****graficas*****
figure(2)

drawnow

plot(fa,b1);
grid on;
title(['Amplitud del espectro de la señal S(t) ',num2str(k)])
xlabel('f (Hz)')
ylabel('|b1(f)|')

%****guardar imagen*****
saveas(gcf, 'amplitud.png')

% se toma el valor maximo de la grabacion
Ma = max(b1)

% guardamos los valores maximos de cada grabacion
compara(k) = Ma;
grabaciones(:,k) = grabacion_1;

```

Figura 73. Generación del espectro mediante FFT

B3. Función finddelay

```
load gong;
s1=y;
s=zeros(400,1);
% s2=zeros(1,42428)
s2=[s;s1];

sound(s2,Fs)

ax(1) = subplot(3,1,1);
plot(s1)
ylabel('s_1')

ax(2) = subplot(3,1,2);
plot(s2)
ylabel('s_2')

t1=finddelay(s1,s2)
% tiempo (1/fs)*t1
t=(1/Fs)*t1
% tau = gccphat(s1,s2)

>> sonido

t1 =

    400

t =

    0.0488
```

Figura 74. MATLAB función finddelay

B4. Correlación cruzada

```
load gong;

s1=y;
s=zeros(400,1);
%s2=zeros(1,42428)
s2=[s;s1];

t1=(0:length(s1)-1)/Fs;
t2=(0:length(s2)-1)/Fs;
% sound(s2,Fs)

ax(1) = subplot(3,1,1);
plot(t1,s1)
ylabel('s_1');

ax(2) = subplot(3,1,2);
plot(t2,s2)
ylabel('s_2');
t=(1/Fs)*t1;

[r,l]=xcorr(s2,s1);%r amplitud de la correlacion ,l es el tiempo

[~,I] = max(abs(r));
lagM = l(I)
timelag = lagM/Fs

figure
stem(l,r)
```

```
lagM =
    400

timelag =
    0.0488
```

Figura 75. Codificación de correlación cruzada en Matlab

B5. Grabación Audio

```
%grabacion de audio y guardado como un .wav
%*****
%Record 5 seconds.
%*****(fs,numero de bits,numero de canales)**
grabacion_Obj = audiorecorder(44100, 16, 1);
disp('inicio de grabacion.')
recordblocking(grabacion_Obj, 5);
disp('final de grabacion. ');
con
% Play back el recording.
%play(recObj);

% Store data in double-precision array.
%myrecording es el arreglo de la señal

myRecording = getaudiodata(grabacion_Obj, 'single');

% Plot the waveform.
plot(myRecording);

%Grabamos y guardamos la señal
wavwrite(myRecording, 44100, uiputfile({'*.wav'}, 'Guardar como'));
```

Figura 76. Grabación de audio

B6. Proceso de correlación

```
%*****
[ps, Fs]=wavread('pink noise.wav');
p=ps;
p1=p(1:220500);
sound(p1, Fs)
```

Figura 77. Reproducción de la señal de prueba

```

% *****
%Record 5 seconds.
%***** (fs,numero de bits,numero de canales)**
grabacion_Obj = audiorecorder(44100, 16, 1);
disp('Start speaking.')
recordblocking(grabacion_Obj, 5);
disp('End of Recording. ');

% Play back the recording.
% play(grabacion_Obj);
% Store data in double-precision array.
%myrecording es el arreglo de la señal
myRecording = getaudiodata(grabacion_Obj, 'single');
%**pausamos unos instantes el codigo **
pause |
% *****
sound(p1, Fs)
% *****
%Record 5 seconds.
%***** (fs,numero de bits,numero de canales)**
grabacion2_Obj = audiorecorder(44100, 16, 1);
disp('Start speaking2.')
recordblocking(grabacion2_Obj, 5);
disp('End of Recording2. ');
% Play back the recording.
%play(recObj);
% Store data in double-precision array.
%myrecording es el arreglo de la señal
myRecording2 = getaudiodata(grabacion2_Obj, 'single');
% *****
%Grabamos y guardamos la señal
wavwrite(myRecording, 44100, uiputfile({'*.wav'}, 'Guardar como'));
wavwrite(myRecording2, 44100, uiputfile({'*.wav'}, 'Guardar como'));

```

Figura 78. Grabación de las señales

```

%cargamos el .wav
[y, Fs]=wavread('pa.wav');
s1=y;

[y2, Fs]=wavread('pb.wav');
s2=y2;
% s=zeros(400,1);
%s2=zeros(1,42428)
% s2=[s;s1];
t1=(0:length(s1)-1)/Fs;
t2=(0:length(s2)-1)/Fs;
%*****

%sound(s2,Fs)
%graficar las dos señales
ax(1) = subplot(3,1,1);
plot(t1,s1)
ylabel('s_1');

ax(2) = subplot(3,1,2);
plot(t2,s2)
ylabel('s_2');
t=(1/Fs)*t1;

%*****

[amp,time]=xcorr(s2,s1);%amp amplitud de la correlacion ,time es el tiempo

[~, I] = max(abs(amp));
lagM = time(I)
timelag = lagM/Fs

figure
stem(time, amp)

```

Figura 79. Correlación de la señales

ANEXO C

C1. Posicionamiento de las cajas acústicas.



Figura 80. Cajas acústicas posicionadas hacia el centro



Figura 81. Cajas acústicas posicionadas hacia la derecha

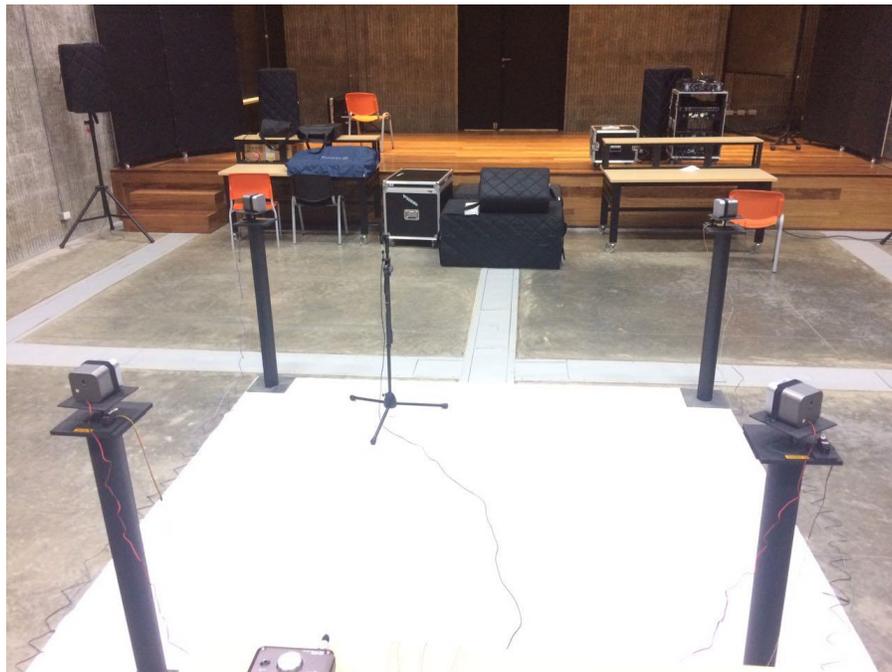


Figura 82. Cajas acústicas posicionadas hacia la izquierda

C2. Sistema embebido y prototipo

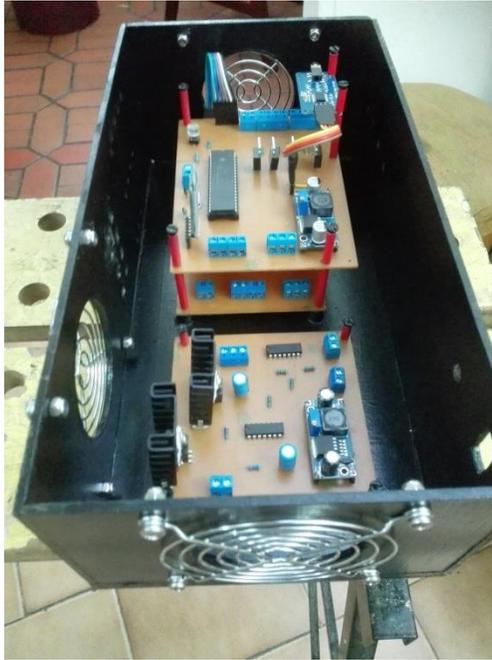


Figura 83. Distribución de tarjetas del sistema embebido



Figura 84. Conexiones internas del sistema embebido



Figura 85. Vista frontal del prototipo



Figura 86. Vista trasera del prototipo

C3. Conexión del sistema para el posicionamiento



Figura 87. Conexión del sistema 5.1 al prototipo



Figura 88. Vista frontal de la conexión al prototipo

C4. **Tabla de costos del proyecto**

Tabla 7. Costos del proyecto

Costos propios				Costos universidad			
Numero	Descripción	Valor unitario	Valor total	Numero	Descripción	Valor unitario	Valor total
4	Servo hs-311	\$ 35.000	\$ 140.000	1	Piaña	\$ 80.000	\$ 80.000
1	Varilla para servo	\$ 2.000	\$ 2.000	64	Horas asesoría director	\$ 100.000	\$ 6.400.000
4	Terminales servo mediano	\$ 1.000	\$ 4.000	1	Rta-m dbx	\$ 292.000	\$ 292.000
4	Terminales servo grande	\$ 1.000	\$ 4.000	1	TASCAM us-366	\$ 582.800	\$ 582.800
1	Conector para servo	\$ 2.000	\$ 2.000	1	Amplificador YAMAHA	\$ 1.500.000	\$ 1.500.000
20m	Cable para sonido	\$ 600	\$ 12.000				
4	Rodamientos	\$ 6.000	\$ 24.000				
4	Tabla mdf de 1cm 20*20	\$ 2.000	\$ 8.000				
4	Tabla mdf de 0,3cm 15*15	\$ 1.000	\$ 4.000				
1	Broca de madera para Rodamiento	\$ 9.000	\$ 9.000				
1	Cilindro de madera	\$ 3.000	\$ 3.000				
1	Super bonder	\$ 4.000	\$ 4.000				
2	Cilindros de cartón	\$ 4.000	\$ 8.000				
6	Cortes de cilindros en carpintería	\$ 833	\$ 5.000				
8	Tablas mdf 0,3cm20*20	\$ 1.500	\$ 12.000				
1	Brocha	\$ 4.000	\$ 4.000				
2	Perfiles de aluminio	\$ 2.000	\$ 4.000				
2	Vinilo negro Pintuco	\$ 5.000	\$ 10.000				
Paquete	Tornillos para madera de 1'	\$ 1.000	\$ 1.000				

1	Pegante para madera	\$ 5.000	\$ 5.000				
Paquete	Puntilla de 1cm	\$ 1.000	\$ 1.000				
10	Varilla de radio	\$ 1.000	\$ 10.000				
1	Pic kit 3	\$ 80.000	\$ 80.000				
4	Dspic30f4011	\$ 28.000	\$ 112.000				
1	Modulo bluetooth	\$ 16.000	\$ 16.000				
1	Módulo yx5300	\$ 20.000	\$ 20.000				
2	Tarjeta lm2596	\$ 12.000	\$ 24.000				
4	Baqelita	\$ 2.000	\$ 8.000				
3	Mc14551bcp	\$ 12.000	\$ 36.000				
4	Mc14551 soic-16	\$ 12.000	\$ 48.000				
3	Mc14052	\$ 12.000	\$ 36.000				
12	Pin head	\$ 500	\$ 6.000				
4	Transistor tip41	\$ 1.500	\$ 6.000				
3	Amplificador operacional lf374	\$ 2.500	\$ 7.500				
1	Cargador dc 15v	\$ 16.000	\$ 16.000				
2	Terminal estereo	\$ 2.000	\$ 4.000				
4	Teminal parlante	\$ 2.000	\$ 8.000				
4	Rejillas extractor	\$ 1.500	\$ 6.000				
1	Interruptor	\$ 2.000	\$ 2.000				
1	Tabla mdf de 1cm 30*30	\$ 4.500	\$ 4.500				
1	Tabla mdf de 0,3cm 60*50	\$ 10.000	\$ 10.000				
1	Spray negro mate	\$ 20.000	\$ 20.000				
2	Cable rca	\$ 5.000	\$ 10.000				
1	Papeleria	\$ 100.000	\$ 100.000				
1	Microcomponente jwin jh v100 5.1	\$ 300.000	\$ 300.000				
2m	Cable proel	\$ 2.500	\$ 5.000				
Total			\$ 1.161.000	Total			\$ 8.854.800
TOTAL							\$ 10.015.800