

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO QUE RECONSTRUYA
AUTOMÁTICAMENTE EL CAMPO ESTEREOFÓNICO DE UN SISTEMA
SONORO 2.0 MEDIANTE EL USO DE SENSORES
POR ULTRASONIDO

JUAN DAVID MORENO ROJAS
JOHANNA MARCELA SALAZAR DÍAZ
CRISTIAN RAFAEL VÁSQUEZ RAMOS

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA DE SONIDO
BOGOTÁ
2010

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO QUE RECONSTRUYA
AUTOMÁTICAMENTE EL CAMPO ESTEREOFÓNICO DE UN SISTEMA
SONORO 2.0 MEDIANTE EL USO DE SENSORES
POR ULTRASONIDO

JUAN DAVID MORENO ROJAS
JOHANNA MARCELA SALAZAR DÍAZ
CRISTIAN RAFAEL VÁSQUEZ RAMOS

Proyecto de grado

Comunicador Social Manuel Jóves
Ingeniero Electrónico Miguel Pérez

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA DE SONIDO
BOGOTÁ
2010

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	8
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
1.1 ANTECEDENTES	9
1.2 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	10
1.3 JUSTIFICACIÓN	11
1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	12
1.4.1 Objetivo General	12
1.4.2 Objetivos Específicos	12
1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES	12
2. MARCO DE REFERENCIA	13
2.1 MARCO TEÓRICO - CONCEPTUAL	13
2.1.1 Los sonidos	13
2.1.2 Percepción y sensación sonora	13
2.1.3 Parámetros y cualidades del sonido	14
2.1.3.1 La frecuencia	15
2.1.3.2 La intensidad	16
2.1.3.3 El timbre	17
2.1.3.4 La duración	17
2.1.4 Nivel de presión sonora	17
2.1.4.1 Aumento en el nivel de presión sonora	18

2.1.4.2 Atenuación del nivel de presión sonora	18
2.1.4.3 Campo sonoro	19
2.1.5 Fundamentos anato-fisiológicos. (Anatomía y fisiología de la audición)	19
2.1.5.1 Anatomía del oído	20
2.1.5.2 Fisiología de la audición	23
2.1.5.2.1 Transformación de la energía sonora	24
2.1.5.2.2 Recorrido de la vía nerviosa	25
2.1.6 Localización de fuentes sonoras	25
2.1.6.1 ¿Cómo el sistema auditivo humano localiza fuentes sonoras reales?	30
2.1.6.2 ¿Cómo el sistema auditivo humano localiza imágenes entre los parlantes?	34
2.1.7 Controlador y microcontrolador	35
2.1.7.1 Lenguajes de programación para microcontroladores	36
2.1.7.2 Grabación de microcontroladores Pic (familias 16F8X y 16F87X)	37
2.1.7.3 Modo monitor	37
2.1.7.4 Arquitectura	37
2.1.7.5 Mapa de memoria	39
2.1.8 Medidores de distancia	39
2.1.8.1 Sensores de distancia por ultrasonidos	40
2.1.8.2 Consideraciones a tener con los Ultrasonidos	40
2.1.9 Altavoces	43

2.1.10 Sistema estéreo (2.0)	43
2.1.11 Motor eléctrico	43
3. METODOLOGÍA	44
3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN	44
3.2 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE USB / SUB-LÍNEA DE FACULTAD / CAMPO TEMÁTICO DEL PROGRAMA	44
3.3 POBLACION Y MUESTRA	44
3.4 HIPÓTESIS	45
3.5 VARIABLES	45
3.5.1 Variables independientes	45
3.5.2 Variables dependientes	45
4. RECURSOS Y PRESUPUESTO	46
5. DESARROLLO INGENIERIL	48
6. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESUSLTADOS	75
7. CONCLUSIONES	85
8. RECOMNEDACIONES	87
BIBLIOGRAFÍA	88
ANEXOS	90

GLOSARIO

ALTAVOZ: Es un transductor, en concreto, un transductor electroacústico, en el que la transducción sigue un doble procedimiento: eléctrico-mecánico-acústico.

CAMPO CERCANO: Es aquella zona o espacio geométrico muy próximo a la fuente donde se presentan variaciones no lineales del nivel de presión sonora en función de la distancia y exhibe efectos netamente reactivos (de almacenamiento de la energía).

CAMPO DIRECTO: Es aquel donde los efectos de las reflexiones de la cavidad (si es que existe cavidad) son mínimos frente al sonido directo.

CAMPO LEJANO: Es aquel que se genera a partir de la distancia donde se comienza a cumplir la ley del cuadrado inverso a medida que el receptor se aleja de la fuente (-6dB por cada duplicación de la distancia para fuentes esféricas).

CAMPO REVERBERANTE: Es aquella zona o espacio geométrico donde existe aleatoriedad en la dirección del flujo del sonido.

DECIBEL (DB): Es un submúltiplo de la verdadera unidad, el belio, que es el logaritmo de la relación entre la magnitud de interés y la de referencia, es la principal unidad de medida utilizada para el nivel de potencia o nivel de intensidad del sonido.

DELAY: Es un retraso de tiempo que se le aplica a una señal.

LEY DEL INVERSO CUADRADO: es aquella que permite explicar por qué el sonido se hace más débil a medida que nos alejamos de la fuente sonora. A medida que una onda se aleja de la fuente, la energía disipada por esta se expande como una esfera (-6dB por cada duplicación de la distancia para fuentes esféricas).

MICROCONTROLADOR: Recibe el nombre de controlador el dispositivo que se emplea para el gobierno de uno o varios procesos. Un microcontrolador es un circuito integrado de alta escala de integración que incorpora la mayor parte de los elementos que configuran un controlador.

NIVEL DE PRESIÓN SONORA: El nivel de presión sonora (SPL: Sound Pressure Level) se utiliza para expresar el nivel de un sonido que ha sido medido utilizando un medidor de nivel sonoro.

El nivel de presión sonora se determina mediante la siguiente fórmula:

$$SPL = 20 \log \frac{P}{P_{ref}}$$

Donde

P: presión sonora N/ m² o pascal.

P_{ref} : presión de referencia 2*10⁻⁵ N/ m² o pascal.

PERCEPCIÓN: Sensación interior que resulta de una impresión material hecha en nuestros sentidos.

ULTRASONIDO: Es una onda acústica cuya frecuencia está por encima del límite perceptible por el oído humano (aproximadamente 20.000 Hz).

INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento de la tecnología¹, las investigaciones y el desarrollo de procesos, han permitido al hombre implementar dispositivos automatizados que reducen el tiempo de supervisión presencial de actividades, con el fin de enfocarse en el desarrollo de tareas de mayor complejidad. Por ejemplo: realizar el diseño de un auditorio y conocer de antemano el funcionamiento del mismo antes de su construcción no era tarea sencilla antes. Sin embargo, con la ayuda de la tecnología actual, -los diferentes softwares de predicción que para la fecha existen-, el hombre requiere de menos tiempo para llevar a cabo dicha tarea y dispone así de más tiempo para aplicar a la funcionalidad del diseño.

Este proyecto de investigación busca integrar saberes y conceptos de varios campos de la ingeniería como lo son la acústica, la mecánica y la electrónica, reuniéndolos en el diseño y construcción de un dispositivo que reconstruya automáticamente el campo estereofónico de un sistema sonoro 2.0 mediante el uso de sensores por ultrasonido.

Este proyecto se dividirá en 3 etapas principales que son:

1. Diseño del control de nivel y el movimiento automatizado en azimut de los altavoces, donde se especificarán los materiales electrónicos, mecánicos y acústicos a utilizar.
2. Construcción de las diferentes partes que componen el dispositivo con el respectivo ensamblaje de las mismas.
3. En la tercera etapa será puesto a prueba el dispositivo, sometiéndole a mediciones y pruebas subjetivas para verificar su funcionamiento

Estudios previos, pudieron demostrar que aspectos como la localización del receptor y un mejor rango dinámico facilitan el proceso de reconstrucción de la imagen sonora. El presente trabajo, pretende solucionar los aspectos de control de nivel y de direccionamiento de las fuentes sonoras según la posición del receptor mediante la automatización de procesos, y movimientos dirigidos para mejorar el proceso de percepción del material sonoro. El control de los resultados se monitoreó a través de dispositivos de medición sonora y de pruebas subjetivas para así, evidenciar el funcionamiento y optimización de procesos que propone el dispositivo.

¹ -Entendida como el “conjunto de teorías y de técnicas que permiten el aprovechamiento práctico del conocimiento científico” (R.A.E)-,

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 ANTECEDENTES

Cuando se habla de la percepción sonora, es necesario traer a colación la psicoacústica, dado que es la ciencia que estudia la percepción del sonido desde la psicología (percepción sonora subjetiva) y describe la manera en que se perciben las cualidades o características del sonido, la percepción del espacio a través del sonido (escucha binaural-campo estereofónico), el fenómeno del enmascaramiento, entre otras cosas.

En base a esto que estudia dicha ciencia se puede decir entonces que tiene en cuenta tanto el sistema auditivo en su funcionamiento estructural así como la percepción subjetiva que pueda hacer cada sujeto del sonido y sus características.

Desde hace varios años diferentes personas han intentado de algún modo manipular las características del sonido a través de componentes o sistemas eléctricos, mecánicos y/o acústicos para mejorar en algún campo (de la aplicación o uso del sonido) la percepción del oyente.

Unas de estas personas fueron los señores Dale C. Connor y Richard S. Putnam quienes interesados en automatizar algunos de los procesos de radiodifusión tales como la manipulación del nivel entre los diferentes contenidos del programa radial (mensajes comerciales, patrocinios, contenido propio de la emisora, etc.), en el año de 1966 diseñaron un dispositivo de control automático de nivel que opta por la utilización de compresión para lograr la compensación de nivel sonoro y además, prevenir la distorsión², pues a pesar de que los niveles estándar de transmisión de, por ejemplo, 0 dbm se utilizaban, era inevitable que algunas señales fueran hasta el 10 db superiores o inferiores a esta norma. Así pues, con la implantación de este dispositivo se mejoro la recepción de la señal a los oyentes, evitando grandes diferencias de nivel de las diferentes señales así como la distorsión de las mismas.

Años después, en 1982, el señor Joseph G. Kingler, desarrolló un proyecto acerca del control de la imagen estéreo para ser aplicada (con limitaciones) en la reproducción del sonido en estudios de grabación y en sonido en vivo, en el cual se reproduce una señal mono en el sistema estéreo y luego, ésta es procesada añadiendo reflexiones sonoras con el fin de alterar las características de la señal y cambiar la percepción psicoacústica del oyente³. Para el desarrollo de este

² Connor, Dale C. Automatic Audio Level Control. Audio Eng. Soc., Paper: 443

³ Kingler, Joseph G. Controlled Imaging: A Format for Stereo Reproduction. Audio Eng. Soc., Paper: 1903

proyecto, el señor Joseph se baso en el comportamiento que tiene le oído para localizar la fuentes: diferencias inter-aurales de tiempo y nivel, efecto precedencia y funcionamiento de la pina (parte del oído) la cual realiza gran aporte el momento de la localización de fuentes sonoras reales.

Es notable que aunque las investigaciones de los señores Dale C. Connor, Richard S. Putnam y Joseph G. Kingler mejoraron de algún modo la precepción del sonido para los oyentes en sus diferentes campos de aplicación y para los cuales fue realizado cada proyecto, ninguno de ellos tuvo en cuenta su localización ni ubicación, para en base a esto reconstruir el campo estereofónico de un sistema (precepción espacial a través del sonido) y así mejorar la percepción subjetiva del oyente.

Debido a esto como elemento inspirador y precursor de este proyecto de investigación, los presentes, decidieron continuar con esta línea de investigaciones, realizando así, un avance tecnológico sobre el tema durante el período de proyecto integrador en el año 2008, llegando a diseñar y construir un dispositivo en el que un altavoz de uso doméstico, ubica la posición de una persona mediante el un sensor de ultrasonido que a su vez controla y automatiza el nivel sonoro proveniente de un software musical, en relación a la distancia fuente-receptor encontrada por el sensor. Debido a los resultados obtenidos en la fase anterior, se tienen en cuenta las limitaciones de tal dispositivo tales como la rotación por motor de corriente continua de poco torque, la detección limitada del receptor y control de nivel sonoro que solo recibe instrucciones MIDI, entre otras, por lo que se decide realizar las mejoras pertinentes presentadas en este informe.

1.2 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El nivel sonoro varía dependiendo de la distancia del receptor respecto a las fuentes y viceversa⁴. Una persona que se acerque o se aleja de las fuentes, está sujeta a la ley del inverso cuadrado. Un alejamiento, causará pérdidas en los detalles auditivos de la señal a reproducir y, un acercamiento, posibles pérdidas auditivas por la cantidad de energía recibida durante un tiempo prolongado. En cualquiera de las dos situaciones, el oyente tiene un cambio de la percepción de lo que está reproduciendo el sistema.

Otro factor a tener en cuenta, es que cuando un usuario está lejos de las fuentes, además de perder detalles auditivos, su percepción relativa podría ser de elementos distantes (debido al nivel sonoro percibido).

⁴ <http://www.todomusicaweb.com.ar/EditorialesNotasDetalle.asp?cod=115>

La opción que tiene este usuario es ajustar el nivel sonoro relativo a la distancia, o diseñar un control automático de volumen. ¿Es posible diseñar un control automatizado, que le permita al usuario mantener una relación distancia-nivel sonoro adecuada, en una posición respecto a la fuente diferente a la sugerida?

1.3 JUSTIFICACIÓN

El mejoramiento de la calidad de vida del ser humano en todos sus aspectos, incluyendo el entretenimiento como parte fundamental del desarrollo humano, es la razón de algunas investigaciones. Investigaciones de este tipo en ingeniería conducen a crear herramientas que facilitan el desarrollo de las actividades humanas. Mediante la integración de varias tecnologías, como la ultrasónica, microcontroladores, transductores electroacústicas y otros, se logra diseñar dispositivos para crear sistemas de entretenimiento muy complejos (TV, videojuegos, computadores, salas de concierto, etc.).

Por esta razón es necesario tener en cuenta un tema que llama la atención en la actualidad respecto de las innovaciones tecnológicas: el de la percepción. La percepción es significativa porque al hombre moderno le atraen las impresiones materiales que estimulan sus emociones y producen en él sensaciones interiores placenteras o de choque; se rige por sus sentidos. Es por esto que el concepto de interacción entre el usuario y los medios de entretenimiento, desde el punto de vista de sistemas sonoros, se ha asumido como sensación espacial (subjetiva) al transmitir información a través de dispositivos sonoros con el fin de mejorar la percepción del receptor.

Para realizar la construcción del dispositivo de esta investigación, se tienen en cuenta las diferentes etapas y tecnologías que lo componen, tales como: un control de nivel sonoro automatizado que permite atenuaciones o incrementos según la posición del receptor, la etapa de movimiento mecánico por motores de paso y un control de medición de distancias por medio de sensores ultrasónicos que facilita la ubicación de la persona en un espacio determinado y cómo estas se intercomunican para llevar a cabo la tarea de reconstrucción de la imagen estéreo.

Es por eso que el tema de esta investigación es pertinente, ya que consiste en la reconstrucción de manera automática del campo estereofónico de un sistema, manteniendo una buena percepción; para esto, se tiene en cuenta un punto de referencia y en base a éste, el sistema atenúa o incrementa el nivel de presión sonora según varía la posición del receptor, con el fin de que este escuche un nivel sonoro similar al inicial (al estar ubicado en el centro del sistema).

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1 Objetivo General

Diseñar y construir un dispositivo que reconstruya automáticamente el campo estereofónico de un sistema, por medio de ultrasonido.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Desarrollar un sistema que mida la distancia entre cada fuente (dos fuentes) y el receptor.
- Identificar los parámetros necesarios para lograr la correcta automatización del movimiento en azimut de los altavoces, respecto a la posición del receptor.
- Diseñar e implementar el algoritmo que permita la compensación de nivel de presión sonora y/o el retardo respectivo de la señal, dependiente de la posición del receptor.

1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES

Alcances

Este proyecto pretende lograr un impacto a nivel tecnológico importante, debido a que en Colombia no se diseñan sistemas sonoros con sensores de distancia por medio de ondas de ultrasonido, que permitan reconstruir de manera automática el campo estereofónico, mejorando así la percepción del oyente.

Limitaciones

Debido a la tecnología a emplear (de punta), los costos de los implementos necesarios para la construcción del dispositivo (altavoces, soportes, medidores de distancia por ultrasonido, microcontroladores, sistemas de retraso en tiempo de la señal (delays) y motores), son altos, por lo que se requiere una gran inversión de dinero, lo cual implica posibles retrasos en la entrega, pero no un impedimento en el desarrollo del proyecto.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1 MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL

2.1.1 Los sonidos. Los sonidos son las vibraciones que producen una sensación auditiva. El sonido es lo que se oye, pero también se puede considerar sonido cualquier fenómeno que potencialmente pudiera producir la sensación. Por ejemplo, una explosión en una isla desierta donde nadie la escucha no es en sentido estricto sonido, porque no se traduce a una sensación. Produce ondas sonoras, pero por extensión se tiende a considerar que son sonidos. Sin embargo, conviene insistir en que el sonido es una sensación y, como tal, es subjetiva y reside en el cerebro de cada cual. El sonido reside en el cerebro: fuera sólo hay ondas sonoras. Pueden existir sonidos que no se escuchen, bien porque no están dentro del rango de frecuencia (16 – 20.000 Hz), o bien porque no se les presta atención.

Los sonidos acompañan y rodean el ser humano hasta el horizonte acústico de su alcance, formando lo que Schafer o Fregtman denominan sonosfera. Se puede clasificar a los sonidos como naturales o artificiales. Son sonidos artificiales todos los que son producto de una actividad humana intencionada. Son sonidos naturales todos aquellos que se producen en la naturaleza sin la intervención humana; o bien, los producidos inconscientemente por el ser humano, como consecuencia de su actividad fisiológica (respirar, toser, roncar...).

Los sonidos están provocados por movimientos que son:

- a) Vibratorios puesto que presentan oscilaciones muy pequeñas.
- b) Oscilatorios, pues recorren su trayectoria alternativamente en un sentido.
- c) Complejos, porque no siguen una sola trayectoria.
- d) Ondulatorios ya que se propagan como ondas a través de un medio elástico.

2.1.2 Percepción y sensación sonora. El espíritu de la música es el sonido y el sonido es una sensación: es lo que se oye. Por extensión, también se considera sonido toda aquella vibración que puede provocar la sensación sonora. Las sensaciones tienen una explicación en parte fisiológica y en parte psicológica. Es imposible percibir aquellas sensaciones, aquellos sonidos, que el oído no está preparado para percibir. Pero no basta con captar los estímulos y transformarlos en impulsos nerviosos, también es fundamental la capacidad mental para interpretarlos. Las distintas especies animales están preparadas para captar sonidos muy diversos. Los canes y los murciélagos, por ejemplo, son capaces de oír ultrasonidos, sonidos tan agudos o tan suaves que el oído humano no los

percibe. Por otro lado, los elefantes o cocodrilos pueden oír sub-tonos muy graves que los humanos no captan. El mundo sonoro es muy amplio, tan amplio como la variedad de formas de vida y la percepción que tienen los seres humanos del mismo, la cual es parcial. El sonido es, en realidad, el sonido de cada cual.

En el proceso de percepción sonora intervienen varios agentes en cadena, los cuales son imprescindibles. En primer lugar, el sonido debe nacer de una fuente, de un objeto sonoro que es puesto en vibración por algún tipo de excitación. La tecnología puede sustituir a los objetos físicos por circuitos en los que la energía eléctrica genera el sonido, pero en última instancia, el sonido nacerá a partir de un altavoz o auricular en el que una membrana, objeto sonoro al fin y al cabo, se pone en vibración. En segundo lugar; el sonido se ha de propagar hasta llegar al sujeto que lo percibe. Normalmente, el medio de propagación es el aire que se respira, el cual, transmite el sonido en forma de ondas provocadas por cambios de presión. Debido a su naturaleza gaseosa no es, por cierto, uno de los mejores transmisores del sonido. De hecho, el sonido se propaga mejor a través de los sólidos. En tercer lugar, se produce la captación de las ondas sonoras a través de los fonoreceptores del oído, en este caso. El oído externo capta y concentra el sonido, el oído medio lo amplifica y el oído interno lo transforma en impulsos nerviosos. En cuarto y último lugar, se produce la sensación sonora cuando el cerebro reconoce e interpreta el estímulo. Absurdo es aquello que no se comprende, porque no se escucha: es lo que parece sordo sin serlo. El sonido no está fuera del ser humano, sino dentro del cerebro de cada cual. Es como cualquier otra sensación y tiene igualmente un alto componente subjetivo. Este componente subjetivo se ve afectado por los parámetros y cualidades físicas del sonido.

2.1.3 Parámetros y cualidades del sonido. Los parámetros sonoros se refieren a los aspectos físico-acústicos que se pueden cuantificar objetivamente, los cuales están relacionados con las cualidades psico-fisiológicas del sonido, que son más subjetivas y cualitativas, y que están relacionadas con la percepción. Todos ellos guardan, a su vez, relación con los distintos elementos técnicos de la música, como se resume en la siguiente Tabla:

Tabla 1. Elementos técnicos de la música

Acústica (parámetros)	Música (cualidades)	Escritura (grafía)
Frecuencia	Altura	Notas (Cifrado)
Fuerza	Intensidad	Dinámica
Espectro	Timbre	Instrumentación
Tiempo	Duración	Figuras (Pentagrama)

Fuente. Compendio de musicoterapia volumen 1

2.1.3.1 La frecuencia. Antes se han explicado los tonos como fenómeno sonoro. La frecuencia es el parámetro físico-acústico perfectamente cuantificable en hertzios, que produce la sensación de tono o de altura musical. Existe una curiosa asociación desde el siglo VIII, que tiende a asociar la altura musical con la altura en el espacio, ubicando los sonidos agudos más "arriba" o más "altos" en la partitura que los sonidos graves, que están más "abajo". Aún hoy, sobre el papel en el pentagrama, se escriben los sonidos agudos más arriba. Esta asociación es convencional y distinta a la que se ha empleado en otros lugares o momentos históricos, pero guarda cierta analogía con el "peso" del sonido y con la gravedad terrestre. Parece como si los sonidos agudos flotaran más arriba por pesar menos que los graves. Este sugerente convencionalismo cultural se ha convertido en algo intuitivo.

El oído humano dispone de 30.000 fibras nerviosas y es capaz de distinguir unas 340.000 frecuencias con diferencias del 0,8 al 1 por ciento. La sensibilidad del oído es muy superior a la que tiene el ojo para reconocer colores distintos. Las audiofrecuencias del ser humano van de los 16 a los 20.000 Hz, en una gama de unas 10 octavas, de las cuales la música sólo emplea siete. Otros animales tienen audiofrecuencias más amplias: los murciélagos abarcan desde los 10.000 a los 120.000 Hz, los perros de los 15 a los 80.000 y los cetáceos de los 150 a los 150.000 Hz.

La percepción de los intervalos no es homogénea. Los intervalos en el registro grave parecen más estrechos que en el registro agudo.

Efecto amplitud

La amplitud o intensidad también tiene efectos sobre la percepción del tono, debido a factores fisiológicos: por debajo de los 500 Hz la sensación puede parecer más grave cuando suena más fuerte; del mismo modo, a mayor intensidad, sobre los 4.000 Hz la sensación puede parecer más aguda. La percepción de altura también se ve afectada por la mayor o menor pureza del sonido. Los sonidos más puros, es decir, con menos armónicos, tienden a parecer más agudos.

Efecto Doppler

La percepción del tono se puede ver modificada si la fuente sonora, el observador, o ambos, están en movimiento.

Efecto de resonancia inferior

Si se escucha el espectro armónico de un sonido cuya frecuencia fundamental generadora no aparece, el oído tiende a reconstruirla y a escucharla aunque no

suene. Este efecto explica el "dum" de las campanas. Los campaneros pulen las campanas hasta emular un espectro armónico que produce en el oyente la sensación de oír el sonido grave correspondiente (el "dum"). En realidad no existe, el "dum" es una ilusión acústica. El sonido metálico que les caracteriza es producto del cerebro, que reconstruye los sonidos graves ausentes. El compositor y tratadista Jean Philippe Rameau advirtió este fenómeno a principios del siglo XVIII cuando reconoció el bajo fundamental de los acordes.

2.1.3.2 La intensidad. La intensidad es la sensación de mayor o menor fuerza producida por la energía contenida en el sonido. En los aparatos electrónicos de amplificación se denomina volumen. En la acústica, este parámetro se refleja en la amplitud de la onda, es decir, en la elongación o alejamiento máximo del punto de reposo. La intensidad absoluta depende de la distancia respecto a la fuente sonora, puesto que la potencia se va a repartir en ondas concéntricas de superficie creciente a medida que se alejan del punto de origen.

El oído interpreta la intensidad sonora de forma logarítmica, no lineal, para poder responder adecuadamente a los enormes contrastes que se pueden producir. El oído es capaz de escuchar desde la caída de un alfiler hasta el sonido de una explosión.

El oído humano es capaz de distinguir valores de intensidad que van desde el umbral auditivo hasta, en su punto máximo, el umbral del dolor. El belio es la unidad de medida correspondiente a la sensación que se produce cuando el estímulo se multiplica por diez

La percepción de intensidad depende también de la frecuencia. El oído es por su fisiología mucho más sensible a las frecuencias medias que a las frecuencias extremas. En 1933 Fletcher Y Munson establecieron experimentalmente unas líneas isofónicas que indican la sensación de sonoridad homogénea según la frecuencia y la intensidad relativa, partiendo del fon, que es la sensación producida por 1000 Hz a 1 dB.

La intensidad puede producir el efecto de enmascaramiento, cuando un sonido fuerte tapa a otro más débil, produciendo una interferencia (un ruido) y una sensación de desasosiego en el oyente. Es lo que ocurre cuando alguien tose en un concierto o hace ruido con un crujiente envoltorio de caramelos.

La intensidad tiene que ver con la direccionalidad, puesto que se relaciona directamente con la distancia. La audición biaural, a través de los dos oídos, permite localizar la fuente sonora en el espacio, gracias a un proceso de triangulación basado en las ligerísimas variaciones de intensidad en la llegada del estímulo sonoro a cada uno de los oídos, debido a su separación. Es un efecto parecido, pero inverso, al que se produce a través de la reproducción

estereofónica del sonido, empleando dos canales y dos altavoces separados, que recrean la ilusión de espacio sobre el plano vertical en el que se colocan. Las frecuencias cuya longitud de onda coincide con la distancia entre los oídos resultan de difícil localización, eso es lo que ocurre, por ejemplo, con el canto de los grillos.

2.1.3.3 El timbre. El timbre es la cualidad del sonido que permite la identificación de su fuente sonora. Es, en otras palabras, la voz propia por la que se reconoce a una persona cuando habla. Depende de la combinación de todos los demás parámetros y también de la fuente sonora, del material, de la forma de atacar y producir la vibración, de la complejidad del movimiento vibratorio, de la resonancia y de la caída o extinción del sonido. Se refleja en la forma de la onda o en el espectro acústico.

2.1.3.4 La duración. Todo sonido tiene una duración. En términos físicos el tiempo se cuantifica en horas, minutos, segundos, décimas, centésimas o milésimas. El sonido tarda entre 12 a 15 centésimas de segundo en llegar al cerebro. Cuando dura menos no da tiempo a que la altura pueda ser reconocida y produce una sensación de chasquido llamada "clic". Para que dos sonidos de distinta altura puedan diferenciarse, deben estar separados al menos 2 centésimas de segundo. En caso contrario, dan la sensación de ser un solo sonido que cambia progresivamente de altura, que se escurre de una altura a otra: es el efecto que en música se conoce como *glissando*.

La duración de un sonido depende de la persistencia del impulso que lo provoca. Cuando éste cesa, el sonido se puede alargar más o menos conforme a la resonancia del propio instrumento o bien la reverberación que pueda haber en el lugar en que se escucha. También se produce una persistencia de la sensación auditiva cuando la intensidad del estímulo es muy grande y prolongada (como una noche en la discoteca)⁵.

2.1.4 Nivel de presión sonora. El nivel de presión sonora (SPL= Sound Pressure Level) se utiliza para expresar el nivel de un sonido que ha sido medido utilizando un medidor de nivel sonoro.

⁵ POCH, Serafina. Compendio de Musicoterapia. Madrid, Ed. Herder, Vol. 1, 2000.

El nivel de presión sonora se determina mediante la siguiente fórmula:

$$SPL = 20 \log \frac{P}{P_{ref}}$$

Donde

P: presión sonora N/ m² o pascal.

P_{ref} : presión de referencia 2*10⁻⁵ N/ m² o pascal.

2.1.4.1 Aumento en el nivel de presión sonora. El aumento en el nivel de presión sonora es la relación del cociente entre la potencia de entrada suministrada a cierto altavoz y una potencia de referencia o múltiplo de ella, estando afectada esta relación por el operador logarítmico y multiplicada por 10.

$$SPL = 10 \log \frac{P_2}{P_1}$$

Donde

P₁: potencia de referencia (en el caso de los altavoces se toma generalmente como 1W).

P₂ : potencia eléctrica de entrada suministrada separadamente (W).

La variación del nivel sonoro en función de la potencia eléctrica con respecto a una potencia de referencia esta dada por:

$$N = N_0 + 10 \log \frac{P}{P_0}$$

Donde

N: nivel sonoro

P: potencia atribuida

P₀: potencia de referencia

N₀: nivel sonoro medido a al potencia P₀.

2.1.4.2 Atenuación del nivel de presión sonora. La Ley del Inverso Cuadrado es aquella que permite explicar por qué el sonido se hace más débil a medida que nos alejamos de la fuente sonora. A medida que una onda se aleja de la fuente, la energía disipada por ésta se expande como una esfera, debido a que debe haber conservación de la energía. A medida que la esfera se hace mayor, cada punto de

ésta tendrá menos energía. A 1 metro de la fuente sonora⁶, el recuadro azul contiene una determinada cantidad de energía. A 2 metros de distancia de la fuente sonora, esa misma cantidad de energía debe ser repartida en el recuadro verde de mayor tamaño, así habrá menos energía en cada punto. La relación matemática a considerar es:

$$I = \frac{1}{r^2}$$

Donde I representa la intensidad y r, la distancia, lo cual expresa la proporcionalidad inversa entre la intensidad y el cuadrado de la distancia.

2.1.4.3 Campo sonoro. Dentro de todo recinto (con aire en su interior), al encender una fuente sonora cualquiera, se generan los llamados “campos sonoros”, a saber:

Cercano, Lejano, Libre, Reverberante, Activo y Reactivo, entre otros⁷.

El campo Cercano es aquella zona o espacio geométrico muy próximo a la fuente, donde se presentan alinealidades respecto de la atenuación del sonido en función de la distancia y exhibe efectos netamente reactivos (de almacenamiento de la energía).

El campo Lejano es aquel que se genera a partir de la distancia, donde se comienza a cumplir la ley del cuadrado inverso a medida que el receptor se aleja de la fuente (-6dB por cada duplicación de la distancia para fuentes esféricas).

El campo Libre es aquel donde los efectos de las reflexiones de la cavidad (si es que existe cavidad) son mínimos frente al sonido directo. Este lugar geométrico se desarrolla desde la fuente hasta la distancia crítica (DC), lugar a partir del cual existe el campo reverberante.

El campo Reverberante es aquella zona o espacio geométrico donde existe aleatoriedad en la dirección del flujo del sonido.

La Distancia crítica es entonces aquella distancia de la fuente en la cual el aporte de energía es, mitad debido al campo libre y mitad debido al campo reverberante.

2.1.5 Fundamentos anato-fisiológicos. (Anatomía y fisiología de la audición). El sistema nervioso controla la relación que existe tanto con el medio externo (luz, sonido...) como con el medio interno. La información acústica es, en su mayor

⁶ Ver Anexo A

⁷ Ver Anexo H de Campo sonoro

parte, del mundo externo. Para poder percibirla se han diferenciado unos órganos especiales más sensibles, que son los oídos

En el ambiente se producen sonidos que es necesario captar para enterarse de lo que ocurre. Estos sonidos tienen una intensidad (medida en decibelios) y una frecuencia (en hertzios) pero el sistema nervioso sólo entiende el lenguaje del impulso nervioso, por lo que el sonido producido en el mundo externo hay que transformarlo hasta impulsos nerviosos. De ello se encarga el oído, que es un receptor y transductor de la información acústica, enviándola al sistema nervioso central a través de los nervios acústicos o auditivos.

Es una vía doble ya que, además de llevar la información acústica (que se recoge en el órgano de Corti del caracol), lleva también información cinemática (que recoge la sensación del equilibrio en los canales semicirculares) desde el oído interno.

El sistema nervioso central está formado por el encéfalo y la médula espinal. Entre ambos se encuentra el tronco del encéfalo, estructura formada por el bulbo raquídeo, la protuberancia o puente y el mesencéfalo. Por detrás del tronco del encéfalo se encuentra el cerebelo, principal órgano del equilibrio. El tronco del encéfalo es como un nudo de comunicaciones, con núcleos de neuronas que direccionan la información que les llega.

En el cerebro se encuentra la corteza o parte externa, con neuronas que le dan el color gris (sustancia gris) y donde se elabora la respuesta consciente. Por debajo de la corteza se encuentran los fascículos de fibras (sustancia blanca) que transportan la información entre la corteza y los núcleos del piso inferior.

2.1.5.1 Anatomía del oído. En el oído se encuentra localizado no solamente el órgano de la audición sino también el del equilibrio. El órgano coclear o caracol es el responsable de la audición, mientras que el órgano vestibular nos informa de la posición de la cabeza en el espacio y ayuda a mantener el equilibrio. En ambos casos se trata de transformar un estímulo dado en una señal eléctrica que sea "legible" por el sistema nervioso.

El oído se divide en tres partes: externo, medio e interno. La función del oído es captar estos estímulos sonoros y transformarlos en señal eléctrica para transmitirlos al cerebro. Para ello, dispone de un oído externo especializado en la captación del sonido, un oído medio que modula la intensidad y transporta el estímulo sonoro hasta el oído interno, donde se produce la transformación del estímulo sonoro en estímulo eléctrico.

Oído externo

Está preparado para captar las ondas sonoras. Está formado por el pabellón auricular y el conducto auditivo externo (CAE).

El pabellón auricular se sitúa a ambos lados de la cabeza a nivel del apéndice nasal. En diversos casos patológicos de malformaciones congénitas suele tener una implantación baja.

El ángulo de implantación con respecto a la cabeza es de aproximadamente 40°, con variaciones según individuos que suponen solamente diferencias estéticas.

Los relieves y depresiones que se observan, facilitan la transmisión de la onda sonora y la localización de la procedencia del sonido. En la cara externa se pueden apreciar los siguientes:

- Hélix: es el reborde externo más posterior.
- Antehélix: repliegue paralelo al hélix, por debajo de éste.
- Concha: es la depresión central que ya se continúa con el CAE. Trago: eminencia triangular por delante de la entrada al CAE.
- Antitrago: enfrente del trago, en la parte posterior de la concha.
- Lóbulo: en la parte inferior, pegado o no a la cabeza y con formas variables.

El pabellón auricular está formado de cartílago fibroso (excepto el lóbulo), recubierto por piel. Entre ambas capas hay músculos intrínsecos que en la especie humana están atróficos. Los músculos extrínsecos (auricular superior, anterior y posterior) pueden modificar la posición del pabellón, pero pocos lo consiguen; tienden a contraerse ante estímulos sonoros intensos.

El conducto auditivo externo (CAE) lleva la información captada por el pabellón hasta el oído medio. Se trata de un conducto de unos 24 mm de longitud (1/3 parte cartilaginosa y 2/3 parte ósea) y entre 5-9 mm de diámetro que tiene un trayecto oblicuo desde fuera hacia adentro, hacia adelante y algo hacia abajo (en los niños es más horizontal). Por ello, para poder visualizar el tímpano con el otoscopio se debe rectificar el trayecto del CAE traccionando hacia arriba y atrás. Su parte interna está tapizada con piel y por tanto hay: folículos pilosos, glándulas sudoríparas, sebáceas y ceruminosas.

El CAE finaliza en la membrana del tímpano, que no es perpendicular al eje del conducto sino que se encuentra inclinada mirando hacia abajo, formando un ángulo con la horizontal de 45°. Ello explica los molestos síntomas que a veces ocurren cuando se humedecen con el baño las secreciones ceruminosas que quedan entre la piel del CAE y la parte inferior del tímpano.

Oído medio

Es una cavidad labrada en hueso temporal que presenta 6 caras a modo de una caja (también se llama la caja del tímpano).

Cara externa: está formada por la membrana timpánica o tímpano, que tiene una forma circular de 9-10 mm de diámetro, unido al hueso de alrededor por un rodete conjuntivo. Es de color gris, translúcido, brillante y abombado hacia adentro (el punto más hundido corresponde al extremo del mango del martillo y se llama "ombbligo").

La parte superior del tímpano es más delgada y menos tensa que el resto.

Pared interna: separa el oído medio del interno. Una de las vueltas del caracol (oído interno) forma una prominencia central (promontorio) en esta pared; por detrás del promontorio está la ventana oval (ocupada por la base del huesecillo estribo y que comunica esta caja del tímpano con el vestíbulo del oído interno) y la ventana redonda (cerrada por una membrana y que comunica con el caracol).

En esta pared se originan también los pequeños músculos del martillo y del estribo.

Pared superior: lámina de hueso que separa el oído de la cavidad craneal. Pared inferior: lámina ósea en contacto con la vena yugular y la arteria carótida interna. En el silencio de la noche, cuando una persona se acuesta de lado puede percibir el impacto del latido de la arteria carótida por su proximidad al caracol. No se oye por transmisión externa sino que se percibe por la vibración sobre el hueso.

La pared posterior comunica con las celdillas del antro mastoideo, llenas de aire.

La pared anterior presenta el orificio de salida de la trompa de Eustaquio, que une esta caja timpánica con la zona de la faringe que se encuentra detrás de la nariz. Su apertura periódica iguala las presiones del aire de la caja timpánica con la del aire exterior.

El orificio de la trompa de Eustaquio en la faringe está recubierto por tejido linfático, que cuando se inflama impide el paso de aire y ello provoca una sensación de ensordecimiento, como ocurre en los catarros.

Contenido de la caja del tímpano

Para amplificar la señal sonora se disponen 3 huesecillos articulados entre sí: martillo, yunque y estribo, y 2 músculos: músculo del martillo y músculo del estribo.

El martillo es el hueso que está en contacto con la membrana del tímpano por su mango; su gruesa cabeza articula con el cuerpo del yunque y éste a su vez con el estribo. La base del estribo cubre la ventana oval.

El músculo del martillo tensa la membrana del tímpano. Su misión es agudizar el oído. El músculo del estribo es antagonista del anterior.

Oído interno

El oído interno se encuentra dentro de las cavidades talladas en el peñasco del hueso temporal, que constituyen el laberinto óseo relleno de una serie de tubos y dilataciones que forman el laberinto membranoso. Entre ambos laberintos se encuentra la perilinfa y dentro del laberinto membranoso está la endolinfa.

Al traspasar la membrana oval se encuentra en el oído interno, una cavidad ósea llamada vestíbulo. Por detrás del vestíbulo se disponen los conductos semicirculares (relacionados con el equilibrio) mientras que por delante del vestíbulo se dispone el caracol (relacionado con la audición).

Dentro del vestíbulo se encuentran unas dilataciones del laberinto membranoso llamadas utrículo y sáculo, las cuales tienen unas zonas con abundantes células sensoriales que captan los impactos de unas partículas sobre ellas, como ocurre en las aceleraciones lineales.

Los conductos semicirculares son 3 tubos curvos: superior, posterior y externo, formando 90° entre ellos, con lo que informan de los movimientos de la cabeza en los 3 planos del espacio. Salen del y vuelven al vestíbulo por lo que presentan 2 orificios, uno de los cuales está ensanchado (ampolla) y en ella se estimulan elementos sensoriales por la circulación de la endolinfa, cuando las aceleraciones son angulares.

El estímulo nervioso sale por el nervio vestibular. La cóclea o caracol tiene forma de escalera de caracol alrededor de una columna o columela que ocupa el eje. Una lámina ósea espiral se arrolla en espiral alrededor de la columela hasta la cúpula, dando casi 3 vueltas (2 vueltas y 3/4).

2.1.5.2 Fisiología de la audición. Cada uno de los tres oídos (Externo, Medio e Interno) que conforman el sistema auditivo, debe desarrollar y cumplir con diferentes funciones, que permiten que el ser humano escuche y sea capaz de diferenciar los múltiples sonidos existentes en la naturaleza.

2.1.5.2.1 Transformación de la energía sonora. El oído interno tiene que transformar la energía mecánica en energía eléctrica, lenguaje de las neuronas: una vez que la onda sonora llega al oído interno, mueve los líquidos que bañan las células sensoriales y se estimula el órgano de Corti en la cóclea o caracol, transmitiendo el impulso al SNC a través del nervio acústico que, junto al nervio vestibular que sale del laberinto llevando información cinemática, forma el VIII par craneal. Así se codifica el estímulo sonoro para poder elaborar una información.

La membrana basilar del órgano de Corti presenta células sensoriales en contacto permanente con la membrana tectoria, que es la capa gelatinosa localizada por encima de ésta.

Cuando la onda sonora llega a la ventana oval, se produce una onda que viaja por la membrana basilar con impulso desde la platina del estribo y se producen oscilaciones de la membrana basilar: aparecen entre ésta y la membrana tectoria fuerzas de roce a nivel de los cilios de las células sensoriales, que sufren una inclinación. Este cizallamiento de los cilios representa el estímulo receptor. Dependiendo de la frecuencia y la intensidad del sonido, vibran células de diferentes zonas y más o menos células. En la base de la membrana basilar se oyen las frecuencias altas y en la parte alta las frecuencias bajas.

El caracol está dividido en zonas que responden a frecuencias distintas y cada tonalidad se transmite a una fibra nerviosa diferente. Cuando los estímulos llegan a la corteza cerebral, cada fibra estimula zonas diferentes, de acuerdo con la frecuencia que lleva.

En la parte externa del encéfalo, en la corteza, se encuentra la sustancia gris, formada por las neuronas y es donde al recibir un estímulo sensitivo se elabora una respuesta motora consciente. Por debajo se encuentra la sustancia blanca compuesta por fibras que transportan la información.

En la corteza hay una neurona que recibe la información y la transmite a las neuronas de alrededor y éstas a su vez a otra tercera capa de alrededor. Se podría decir que la primera neurona es la que recibe la sensación. En la segunda capa de neuronas tiene lugar la percepción al pasar el mensaje que viene de la primera neurona. La tercera capa de alrededor sería la encargada de la gnosis.

Toda la corteza cerebral está conectada entre sí, todas las áreas, unas con otras: la memoria, la audición, la visión, el esquema corporal, el lenguaje. Por lo cual, para que la gnosis sea posible es necesaria esta asociación neuronal. La interpretación ante un mismo estímulo puede ser diferente, dependiendo de la persona y del momento.

2.1.5.2.2 Recorrido de la vía nerviosa. La primera neurona se encuentra, como ya se ha dicho, en el órgano de Corti. Desde ahí discurre por el nervio estatoacústico hasta su primera sinapsis, la cual tiene lugar en los núcleos acústicos (ventral y dorsal) situados a ambos lados, entre la protuberancia y el bulbo. El núcleo ventral es más importante que el dorsal. De este núcleo parte un fascículo que atraviesa la línea media y sube hasta el tálamo óptico por la cinta de Reil o lemnisco lateral. El lemnisco lateral alcanza, a través de la protuberancia y los pedúnculos cerebrales, el cuerpo geniculado medial del tálamo. El tálamo es un núcleo que se encuentra en la base del encéfalo y se puede decir que actúa como puerta de entrada. De ahí parte la irradiación acústica, que termina en la primera circunvolución del lóbulo temporal, área de información acústica y musical (áreas 41 y 42 de Brodmann).

A lo largo de la vía auditiva las señales sonoras sufren codificaciones, lo que permite que haya zonas que intervengan directamente en las funciones auditivas sin que tenga que participar la corteza cerebral consciente. Entre estas funciones, dos núcleos se encargan de determinar la dirección del sonido basándose en la detección del retraso que existe en la entrada de las señales acústicas que llegan a los dos oídos y en la diferencia de intensidades entre ambos.

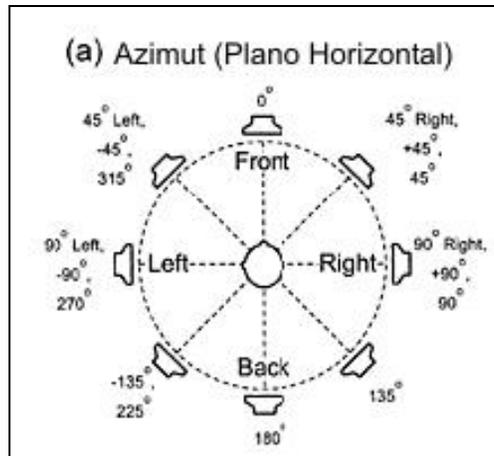
Su situación les permite actuar como centros reflejos en los movimientos automáticos de la cabeza, tronco y ojos en respuesta a determinados sonidos. A lo largo de toda la vía se producen numerosos cruces entre ambos lados, por lo cual el área acústica cerebral de cada lado estaría formada por fibras procedentes de ambos oídos. Esto hace que, cuando se altere uno de los oídos, pueda seguir llegando información auditiva, pero sin poder identificar la localización del sonido⁸.

2.1.6 Localización de fuentes sonoras. Los sonidos emitidos desde parlantes son percibidos como si vinieran fuera de la cabeza (externos), en general, los sonidos idénticos que llegan a los dos oídos al mismo tiempo, son localizados directamente en frente o detrás del oyente. Sin embargo, se debe ser consciente que la localización externa puede ser cuestión de los grados, en lugar de ser un todo o ninguna experiencia. La direccionalidad horizontal está expresada como ángulos en azimut alrededor de la cabeza, ilustrada en la Figura 1. Los sonidos provenientes directamente del frente tienen un azimut de 0° y los provenientes directamente de atrás tienen un azimut de 180°. Otros azimuts son usualmente dados como los grados a la derecha (+) o la izquierda (-) del centro. Por ejemplo, un parlante que está fuera del centro hacia la derecha 45°, tiene un azimut de 45° hacia la derecha o de +45°, y un parlante que está fuera del centro hacia la izquierda tiene un azimut de 45° hacia la izquierda o de -45°. Algunas veces los

⁸ POCH, Serafina. Compendio de Musicoterapia. Barcelona: Empresa Editorial Herder S.A., 1999. Vol. 1.

azimuts son expresados en términos del número total de grados que pasan la cabeza hacia la derecha, en cuyo caso 45° a la derecha podría ser 45° y 45° a la izquierda podría ser 315° .

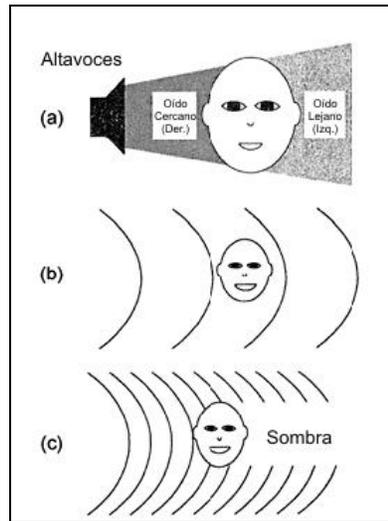
Figura 1. Los ángulos horizontales (azimut) alrededor de la cabeza



Fuente Hearing: Una introducción a la psicología y fisiología acústica. Capítulo 13: Escucha binaural y espacial. Escucha direccional. p.447

La tradicional teoría dúplex o doble explica la localización en base a las diferencias de tiempo entre los dos oídos para las más bajas frecuencias y diferencias de nivel entre los dos oídos para las frecuencias más altas (Lord Rayleigh, 1907). Considerar el arreglo de la Figura 2a. La señal desde el parlante, la cual está a la derecha, debe seguir un camino más largo hasta el oído lejano (izquierdo), que hasta el oído cercano (derecho). Como se muestra en la Figura 2b, las frecuencias bajas tienen longitudes de onda que son más largas que el camino alrededor de la cabeza, por lo tanto éstas “atraviesan o traspasan” a la cabeza hasta el oído lejano (difracción). Así pues, las diferencias interaurales de tiempo (DIT) son utilizadas para proveer la localización de las señales de baja frecuencia, donde la longitud de onda del tono es más larga que la distancia de la señal que debe viajar desde el oído cercano (derecho), hasta el oído lejano (izquierdo). En contraste, las frecuencias altas tiene longitudes de ondas más pequeñas que la cabeza, por lo tanto éstas son “bloqueadas” en el camino al oído lejano (Figura 2c). Esta sombra de la cabeza causa una reducción de la intensidad de la señal del oído lejano, produciendo diferencias de nivel en el sonido entre los dos oídos. En consecuencia, las diferencias interaurales de nivel (DIN) o diferencias interaurales de intensidad (DII), son utilizadas para proveer la localización de señales de alta frecuencia.

Figura 2. (a) Relación entre un parlante y los dos oídos. (b) Bajas frecuencias rodeando la cabeza debido a sus grandes longitudes de onda. (c) Altas frecuencias con longitudes de onda más pequeñas que el diámetro de la cabeza, resultando en una sombra acústica en el oído lejano.



Fuente Hearing: Una introducción a la psicología y fisiología acústica. Capítulo 13: Escucha binaural y espacial. Escucha direccional. p.448

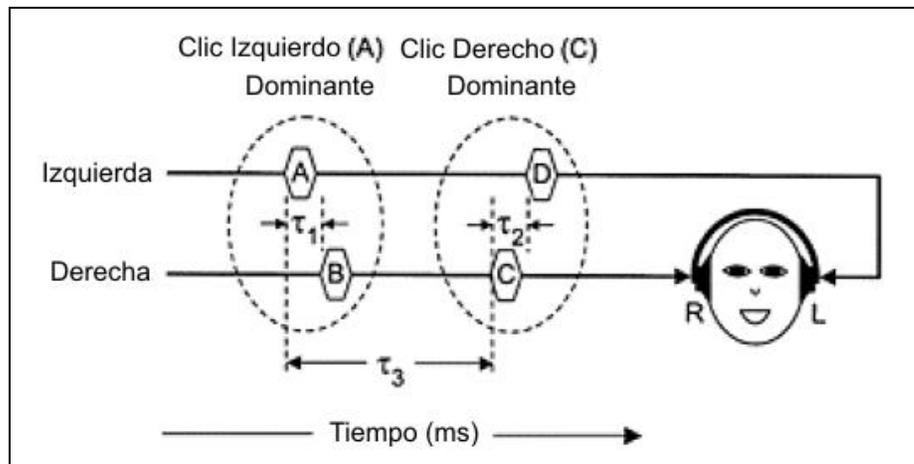
La aproximación tradicional para diferencias interaurales involucra el modelado de una cabeza como una esfera sólida, alrededor de la cual la distancia entre oído y oído es de aproximadamente 22 a 23 cm. (Woodworth, 1938). Esto da como resultado un retraso de aproximadamente $660 \mu s$ para un sonido que se obtiene desde el oído cercano hasta el oído lejano, el cual corresponde a una frecuencia de 1500Hz. Por debajo de 1500Hz la longitud de onda es mayor que la distancia alrededor de la cabeza y las diferencias de fase a los dos oídos proveen una localización ambigua de la señal. Sin embargo, la discrepancia de la fase llega a ser ambigua (excepto para la primera longitud de onda) cuando la frecuencia incrementa a 1500Hz, donde su longitud de onda es aproximadamente la distancia alrededor de la cabeza, resultando en errores de localización.

Para la localización de fuentes es también importante tener en cuenta lo que dice el efecto precedencia, efecto Hass o el efecto del principio del primer frente de onda, que sucede cuando un sonido que viene de una dirección es rápidamente seguido por un segundo sonido (el eco) desde otra dirección, entonces el sonido

percibido será dominado por la señal que llegue primero. En otras palabras, se puede decir que ha ocurrido una supresión de eco.

El efecto precedencia puede ser descrito en términos de cómo los oyentes perciben una secuencia de cuatro clics escuchados a través de audífonos, de la misma manera que en el experimento clásico de Wallach et al (1949). La Figura 3 muestra que el primer clic (A) fue enviado al oído izquierdo seguido por un clic (B), enviado al oído derecho después de un corto retraso (τ_1). Este par de clics fueron escuchados como una imagen fusionada proveniente de lado izquierdo (por ellos mismos). El clic C fue enviado al oído derecho seguido por un clic D, después de otro muy corto delay (τ_2), encontrándose que por ellos mismos, este par de clics también fueron escuchados como una imagen fusionada pero proveniente del lado derecho. La composición de la secuencia de los cuatro clics fue escuchada como una imagen fusionada proveniente del lado izquierdo, es decir, que su percepción fue dominada por el comienzo de las señales izquierdas en vez de las señales derechas y sus desplazamientos. De esta manera, la llegada de la primera señal determina la percepción de la ubicación del sonido fusionado. Wallach et al encontró que este efecto precedencia ocurre para intervalos de dos pares de clics (τ_3) hasta de 40ms. Sin embargo, duraciones mayores de τ_3 causa que el oyente escuche dos señales separadas, una en cada oído.

Figura 3. Arreglo de clics presentados a través de audífonos para demostrar el efecto precedencia, como lo usaron Wallach y otros (1949)



Fuente Hearing: Una introducción a la psicología y fisiología acústica. Capítulo 13: Escucha binaural y espacial. Escucha direccional. p.464

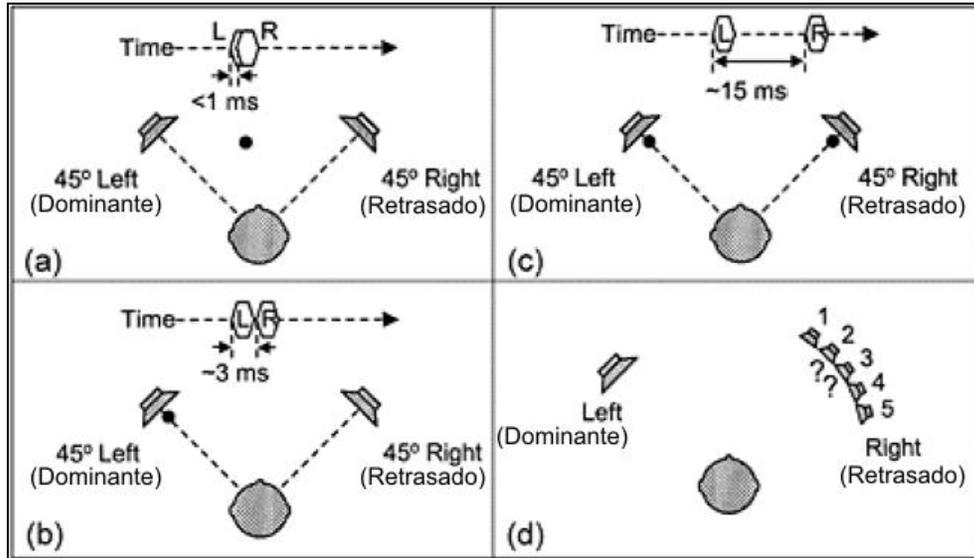
La demostración clásica de Haas del efecto precedencia involucró muestras de habla desde dos parlantes, con un retardo en el comienzo de la señal de un parlante respecto al otro. Una imagen fusionada que venía del parlante dominante fue escuchada para retrasos (delays) hasta de 35ms. Los delays mayores hacían que los receptores detectaran la presencia del sonido retrasado, aunque la señal era localizada en el lado dominante. Los delays mayores a 50ms hicieron que los receptores oyeran un sonido del parlante dominante y un eco distinto que venía del parlante retrasado.

Los aspectos más relevantes del fenómeno precedencia: La Fusión es percibir el sonido dominante y las siguientes señales como si fueran uno solo, como una imagen unificada y ocurre con clics retrasados alrededor de entre 5 y 10 ms y entre 40 y 50 ms para el habla. Los retardos mayores crean dos imágenes separadas. El retardo en el cual la percepción se divide en dos imágenes se llama umbral de eco.

La ubicación percibida de la imagen fusionada está afectada por la cantidad de retardo entre las dos señales. La localización sumada (summing) ocurre con retardos menores a 1 ms. En este caso la ubicación percibida de la imagen fusionada está afectada por las dos señales, tanto la inicial como la retrasada, como se ilustra en la Figura 4a. La localización dominante ocurre cuando la ubicación de la imagen fusionada está determinada por la señal dominante (Figura 4b). Esto ocurre cuando el retraso entre el primer y el segundo clic está entre 1 y 5 ms. Entre mayor sea el retardo, el dominio de la localización se pierde, dividiendo la imagen en dos en el umbral de eco y además de ser percibidas dos imágenes, se puede escuchar la dirección de donde viene cada una (Figura 4c). Otro aspecto del efecto de precedencia se ilustra en la Figura 4d. Aquí se le pide al receptor que discrimine la ubicación de clics en el azimut en el lado retrasado. La discriminación es menos provechosa cuando la señal inicial está presente en comparación a lo que suena cuando esta no lo está.⁹

⁹ GELFAND, Stanley A. Hearing. Una introducción a la psicología y fisiología acústica. Cuarta edición. Nueva York: Marcel Dekker, 2004. p. 445-446, 448, 464-465.

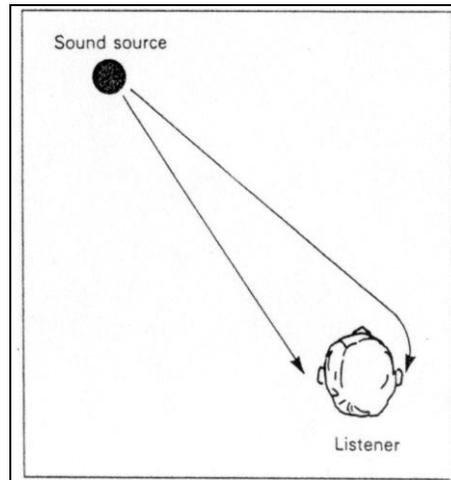
Figura 4. Aspectos del efecto precedencia mostrado en términos de las señales presentadas en dos parlantes, localizadas a 45° a la derecha e izquierda del receptor. La señal izquierda es dominante y la derecha está retrasada. En la viñeta c, los círculos rellenos indican las localizaciones de las imágenes percibidas y el retardo entre los desfases de las dos señales, también se muestra en la parte superior de cada viñeta. En la viñeta d, la tarea es discriminar entre las señales provenientes del arreglo de altavoces (retrasados) del lado derecho.



Fuente Hearing: Una introducción a la psicología y fisiología acústica. Capítulo 13: Escucha binaural y espacial. Escucha direccional. p.466

2.1.6.1 ¿Cómo el sistema auditivo humano localiza fuentes sonoras reales? El sistema auditivo humano usa el sonido directo y las reflexiones tempranas para localizar una fuente sonora. El sonido directo y las reflexiones dentro de alrededor de 2 milisegundos contribuyen a la localización. Las reflexiones ocurren entre 5 y 35 milisegundos después de la influencia del sonido directo de la imagen amplia. Los ecos retrasados más de alrededor de 5 a 50 milisegundos (dependiendo en el material de programa) no se fusionan en el tiempo con el sonido temprano, pero no contribuyen para percibir el espectro tonal. Imagine una fuente sonora y un oyente. Digamos que la fuente esta en frente del oyente y a la izquierda del centro (Figura 5).

Figura 5. Sonido viajando desde una fuente hasta los oídos del oyente

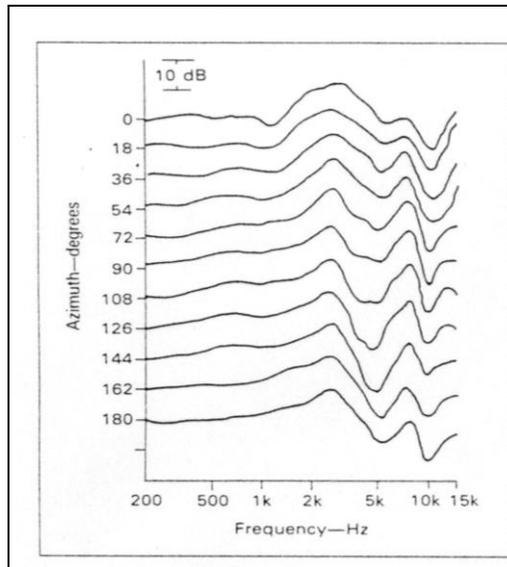


Fuente Stereo microphone techniques. Capítulo 3: Teoría de imagen estéreo. ¿Cómo el sistema auditivo localiza fuentes sonoras reales? p.30

El sonido viaja una distancia más larga al oído derecho que al oído izquierdo, entonces el sonido llega al oído derecho después que al oído izquierdo. En otras palabras, la señal del oído derecho está retrasada respecto a la señal del oído izquierdo. Cada ubicación de fuente produce unas diferencias de tiempo de llegada entre los oídos.

Además, la cabeza actúa como un obstáculo para sonidos alrededor de 1000 Hz. Las frecuencias altas son ensombreadas por la cabeza, por lo que un espectro diferente aparece en cada oído. Cada ubicación de fuente produce unas diferencias espectrales únicas entre los oídos (Figura 6).

Figura 6. Respuesta en frecuencia de un oído para diferentes ángulos en azimut. 0° es enfrente de la cabeza; 90° es al lado del oído medido y 180° es detrás de la cabeza.

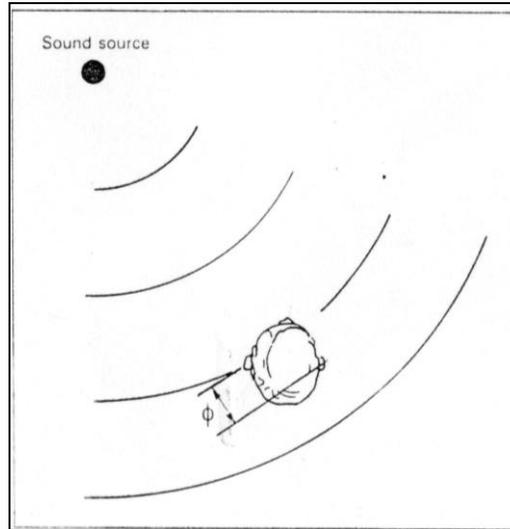


Fuente Stereo microphone techniques. Capítulo 3: Teoría de imagen estéreo. ¿Cómo el sistema auditivo humano localiza fuentes sonoras reales? p.31

Se ha aprendido a asociar ciertas diferencias interaurales con direcciones específicas de la fuente sonora. Cuando se presenta con una nueva localización de una fuente, lo que se escucha coincide con un patrón memorizado de una situación similar para determinar la dirección.

Como se dijo antes, un importante punto de localización son las diferencias interaurales de tiempo de llegada de la señal. El ser humano percibe estas diferencias en cualquier cambio en el sonido – transitoria, una pausa, o un cambio en timbre. Por esta razón, localiza sonidos transitorios más fácilmente que sonidos continuos. Las diferencias de tiempo entre las señales de los oídos pueden también ser consideradas como una diferencia de fase entre las ondas sonoras llegando a los dos oídos (Figura 7). Este cambio de fase aumenta con la frecuencia.

Figura 7. Cambio de fase de las ondas sonoras entre los oídos



Fuente Stereo microphone techniques. Capítulo 3: Teoría de imagen estéreo. ¿Cómo el sistema auditivo humano localiza fuentes sonoras reales? p.31

Cuando las ondas sonoras de una fuente real golpean la cabeza del oyente, un espectro diferente de amplitud y fase aparecen a cada oído. Estas diferencias interaurales son traducidas por el cerebro en la percepción de la dirección de una fuente sonora. Cada dirección esta asociada con un conjunto diferente de diferencias interaurales.

Los oídos hacen uso de las diferencias interaurales de fase para localizar sonidos entre 100 Hz y 700 Hz. Frecuencias por debajo de 100 Hz no son localizadas (Creación "subwoofer/satélite" sistema de altavoz factible). Por encima de 1500 Hz, las diferencias de amplitud entre los oídos contribuyen a la localización. Entre 700 Hz y 1500 Hz tanto las diferencias de fase como de amplitud son usadas para decir la dirección de un sonido.

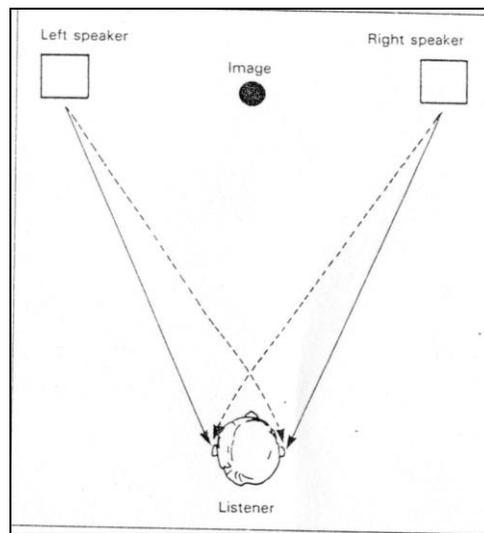
Pequeños movimientos de la cabeza cambia las diferencias de tiempo de llegada a los dos oídos. El cerebro usa esta información como otro punto para localización de fuentes, especialmente para discriminación de distancias frente/atrás.

El oído externo (pina) juega también una parte. En cada pina, las reflexiones del sonido de varias crestas se combinan con el sonido directo causando cancelaciones de fase-corte de frecuencias en el espectro percibido. La posición del corte en el espectro varía con la altura de la fuente. El ser humano percibe estos patrones de corte no como una coloración tonal, pero sí como información de altura. También, el oído humano puede discriminar los sonidos de enfrente de

aquellos de atrás, por el efecto sombreado a altas frecuencias de la pila. Algunos de estos puntos-señales usados por los oídos pueden ser omitidos sin destruir la precisión en la localización, si aún otras señales-puntos son presentadas.¹⁰

2.1.6.2 ¿Cómo el sistema auditivo humano localiza imágenes entre los parlantes?. Ahora que hemos discutido como localizar fuentes sonoras reales, miremos como localizamos sus imágenes reproducidos sobre el altavoz. Imagine que usted está sentado entre dos parlantes estéreo como en la Figura 8.

Figura 8. Dos oídos recibiendo señales desde dos parlantes



Fuente Stereo microphone techniques. Capítulo 3: Teoría de imagen estéreo. ¿Cómo el sistema auditivo humano localiza imágenes entre los parlantes? p.33

Si usted introduce una señal musical igualmente para ambos canales en la misma polaridad, usted percibirá, una imagen entre los dos parlantes. Normalmente usted escucharía una fuente sintética única, más que dos fuentes de altavoces separadas.

Cada oído escucha ambos parlantes. Por ejemplo, el oído izquierdo escucha la señal del parlante izquierdo, entonces, después de un corto retardo debido al camino más largo viajado, escucha la señal del parlante derecho. En cada oído, la señal de ambos parlantes se suma o se agregan vectorialmente para producir una señal resultante.

¹⁰ BARTLETT, Bruce. Stereo microphone techniques. Boston: Focal Press, 1991. p. 29-31.

Suponga que se hace más estruendosa la señal en uno de los parlantes. Esto es, se crean unas diferencias de nivel entre los dos parlantes. Sorprendentemente, esto causa unas diferencias de tiempo de llegada a los oídos. Esto es un resultado de la adición de la fase de ambas señales de los parlantes a los oídos.

Es importante recordar distinguir diferencias *intercanal* (entre los canales de los parlantes) de las diferencias *interaurales* (entre los oídos). Una diferencia intercanal de *nivel* no aparece como una diferencia interaural de nivel, mas bien como una diferencia interaural de *tiempo*.

El oído humano puede usar estas diferencias interaurales generadas por los parlantes para ubicar imágenes. Aquí está como: suponga que nosotros queremos ubicar una imagen a 15° a un lado. Una fuente sonora real 15° a un lado produce diferencias interaurales de tiempo de 0.13 milisegundos. Si nosotros podemos hacer que los parlantes produzcan unas diferencias de tiempo de 0.13 milisegundos, escucharemos la imagen 15° a un lado. Nosotros podemos engañar al sistema auditivo a creer que hay una verdadera fuente a ese ángulo, lo cual ocurre cuando los parlantes difieren en nivel por una cierta cantidad.

La polaridad de los dos canales también afecta la localización. Explicando la polaridad: si las señales enviadas a los dos canales de los parlantes están en polaridad, ellos están en fase en todas las frecuencias; van positivo en voltaje el mismo tiempo. Si la señal está fuera de polaridad, ellos están 180° fuera de fase en todas las frecuencias. La señal de un canal es positiva cuando el otro canal de la señal es negativo. Señales con polaridad opuesta son a veces incorrectamente referidas a como “fuera de fase”. Si las señales están con polaridad opuesta entre los dos canales y niveles iguales en ambos canales, la imagen resultante tiene una calidad difusa, sin dirección y no puede ser localizada. Si la señal está en polaridad opuesta y en niveles más altos en un canal que en otro, la imagen frecuentemente aparece fuera del límite de la pareja de parlantes. Es decir, se escucha una imagen izquierda en el parlante izquierdo o derecha en el parlante derecho¹¹.

2.1.7 Controlador y microcontrolador. Recibe el nombre de controlador el dispositivo que se emplea para el gobierno de uno o varios procesos. Por ejemplo, el controlador que regula el funcionamiento de un horno dispone de un sensor que mide constantemente su temperatura interna y, cuando traspasa los límites prefijados, genera las señales adecuadas que accionan los efectores que intentan llevar el valor de la temperatura dentro del rango estipulado.

Aunque el concepto de controlador ha permanecido invariable a través del tiempo, su implementación física ha variado frecuentemente. Hace tres décadas, los controladores se construían exclusivamente con componentes de lógica discreta;

¹¹ *Ibíd.*, p. 32-34.

posteriormente, se emplearon los microprocesadores que se rodeaban con chips de memoria y E/S sobre una tarjeta de circuito impreso. En la actualidad, todos los elementos del controlador se han podido incluir en un chip, el cual recibe el nombre de microcontrolador. Realmente consiste en un sencillo pero completo computador contenido en el corazón (chip) de un circuito integrado.

Un microcontrolador es un circuito integrado de alta escala de integración que incorpora la mayor parte de los elementos que configuran un controlador.

Un microcontrolador dispone normalmente de los siguientes componentes:

- Procesador o UCP (Unidad Central de Proceso).
- Memoria RAM para Contener los datos.
- Memoria para el programa tipo ROM/PROM/EPROM.
- Líneas de E/S para comunicarse con el exterior.
- Diversos módulos para el control de periféricos (temporizadores, Puertas Serie y Paralelo, CAD: Conversores Analógico/Digital, CDA: Conversores Digital/Analógico, etc.).
- Generador de impulsos de reloj que sincronizan el funcionamiento de todo el sistema.

2.1.7.1 Lenguajes de programación para microcontroladores. Los lenguajes de programación son herramientas que permiten crear programas y software. Existen varios lenguajes de programación para microcontroladores; entre los más usados se encuentran:

- *Lenguaje Ensamblador*

El ensamblador (en inglés, Assembler o Assembly, que se suele abreviar como Asm), es un lenguaje de programación de ordenadores de bajo nivel (muy cercano al código máquina), por lo que es específico de cada tipo de ordenador (básicamente, de cada procesador). Es más difícil de aprender que los lenguajes de alto nivel, resulta mucho menos legible y prácticamente no es portable, pero si se domina, es el que dará la mayor velocidad al programa.

- *Lenguaje C*

C es un lenguaje de programación creado en 1969 por Ken Thompson y Dennis M. Ritchie en los Laboratorios Bell como evolución del anterior lenguaje B, a su vez basado en BCPL. Al igual que B, es un lenguaje orientado a la implementación de Sistemas Operativos, concretamente Unix. C es apreciado por la eficiencia del código que produce y es el lenguaje de programación más popular para crear software de sistemas, aunque también se utiliza para crear aplicaciones.

Se trata de un lenguaje débilmente tipado de medio nivel, pero con muchas características de bajo nivel. Dispone de las estructuras típicas de los lenguajes de alto nivel, pero a su vez, dispone de construcciones del lenguaje que permiten un control a muy bajo nivel. Los compiladores suelen ofrecer extensiones al lenguaje que posibilitan mezclar código en ensamblador con código C, o acceder directamente a memoria o dispositivos periféricos.

2.1.7.2 Grabación de microcontroladores PIC (familias 16F8X y 16F87X). Los microcontroladores PIC se graban mediante un método llamado ICSP (in circuit serial programming), por el cual se puede grabar la memoria de programa, la memoria de datos y la palabra de configuración.

2.1.7.3 Modo monitor. Para realizar la grabación, el PIC debe estar en modo monitor. Existen varias maneras de entrar en este modo, que dependen del PIC usado. Aquí se utiliza el método más general, que consisten en introducir una tensión de 12 voltios por la pata MCLR. El otro método es el denominado de bajo voltaje. Hay que introducir 5 voltios por la pata RB3.

En el Anexo E ¹² se muestra un ejemplo de un circuito para hacer que el PIC entre en modo monitor. Hay que introducir 12v por la pata MCLR. Cada vez que se pulse (y suelte) el botón de reset, el PIC entrará en modo monitor, por lo que se tendrá acceso a los servicios de grabación.

2.1.7.4 Arquitectura. Una vez en modo monitor, se tiene acceso a una serie de servicios a través del protocolo ICSP. Este protocolo se describe a dos niveles: nivel físico y nivel de comandos. En el nivel físico se especifica cómo se transmiten los bits (temporizaciones, sincronismo, etc) y en el de comandos, qué tramas hay que enviar para tener acceso a los diferentes servicios.



Nivel físico

Para realizar la comunicación se utiliza un protocolo serie síncrono. Son necesarios dos hilos, del puerto B, uno para llevar los datos (conectado a RB7) y otro para el reloj (conectado a RB6).

¹² Ver Anexo E

Los detalles son los siguientes:

- Primero se transmiten los bits menos significativos
- Los datos se capturan en el flanco de bajada del reloj
- El periodo mínimo del reloj es de 200ns (frecuencia máxima de 5MHz)
- El tiempo de set up (tiempo que deben estar los datos antes de que llegue el flanco de bajada) y el tiempo de hold (el que deben estar después de producirse el flanco de bajada) son de 100ns

Nivel de comandos

El acceso a los servicios del modo monitor se realiza enviando, primero comandos y a continuación datos, si fueran precisos.

En la Tabla 2 se encuentra información sobre los comandos más comunes, que le permiten al usuario dar instrucciones a los PICs, dependiendo de la aplicación en la cual se utilicen. Existen más servicios, específicos para determinadas familias de PICs. (Consultar las hojas de datos para más información):

Tabla 2. Comandos más comunes de los PICs

Comando	Valor	Datos	Dirección	Descripción
Load Configuration	0 0 0 0 0 (00H)	Si	Entrada	Saltar a la memoria de configuración
Load Data for Program Memory	0 0 0 1 0 (02H)	Si	Entrada	Enviar un dato para la memoria de programa
Read Data from Program Memory	0 0 1 0 0 (04H)	Si	Salida	Leer un dato de la memoria de programa
Increment Address	0 0 1 1 0 (06H)	No	----	Apuntar a la siguiente dirección
Begin Erase/Programming Cycle	0 1 0 0 0 (08H)	No	-----	Comenzar un ciclo de borrado/grabación
Bulk Erase Program Memory	0 1 0 0 1 (09H)	No	---	Borrado completo de la memoria de programa
Bulk Erase Data Memory	0 1 0 1 1 (0BH)	No	----	Borrado completo de la memoria de datos
Load Data for Data Memory	0 0 0 1 1 (03H)	Si	Entrada	Enviar un dato para la memoria de datos
Read Data for Data Memory	0 0 1 0 1 (05H)	Si	Salida	Leer un dato de la memoria de Datos

Fuente Grabación de microcontroladores PIC. Arquitectura. Disponible en:<<http://www.iearobotics.com/proyectos/cuadernos/ct4/ct4.html#introduccion>>

En la primera columna se encuentra el nombre del comando en inglés, utilizando la nomenclatura de Microchip. En la siguiente, está el valor del comando en binario y en hexadecimal. El bit de la izquierda es el más significativo. La tercera columna indica si hay transferencia de datos y la cuarta, el sentido de esta transferencia: si es desde el PIC hacia el exterior (salida) o desde el exterior hacia el PIC (entrada). La última columna describe qué hace el comando.

Cuando se hace un reset y se entra en modo monitor, el contador de programa (PC) apunta a la dirección 0000h. (Memoria de programa). Cualquier comando enviado actuará sobre la dirección que indique el PC.

- Si se envía el comando increment-address (0x06), se incrementa el contador de programa, apuntándose a la siguiente dirección ($pc=pc+1$)
- Si se envía el comando Load Configuration (0x00) (Hay que enviar un dato, que se ignora), el contador apuntará a la dirección 2000h (PC=2000H), donde se encuentra el bloque de configuración, con la palabra de configuración y la identificación del PIC. Para volver al bloque de memoria de programa es necesario hacer un reset.

2.1.7.5 Mapa de memoria. Cuando se entra en modo monitor, la memoria se divide en dos partes: la memoria de programa (0000h-1FFFh) y la memoria de configuración (2000h-3FFFh).

Dentro de la memoria de configuración, existe una región, comprendida entre las direcciones 2000h y 2007h, que tiene información importante. Primero se encuentran 4 posiciones disponibles para que el usuario guarde información de identificación (Direcciones 2000h-2003h). En la dirección 2006h hay una identificación del PIC, grabada por el fabricante y que permite conocer de qué modelo de PIC se trata. Finalmente en la dirección 2007h se encuentra la palabra de configuración.

Al hacer un reset el contador de programa apunta a la dirección 0000h. Cuando se envía el comando "Load Configuration" (00h) se pasa a la memoria de configuración (2000h). Para volver a la memoria de programa hay que volver a hacer un reset.

2.1.8 Medidores de distancia. Además de los medidores de distancia de Ultrasonido, se conocen sensores de RF y fuentes de energía óptica, los cuales poseen características particulares dependiendo de la tecnología empleada en su construcción, tales como Rango dinámico (Máximo valor, mínimo valor medible),

Resolución (Sensor analógico: mínimo valor medible), Linealidad (Dentro del rango), Ancho de Banda. También se hace necesario analizar su comportamiento real ya que son fabricados en base a cálculos y se tiene en cuenta el margen de error por manufactura. Dentro de su comportamiento real, encontramos aspectos como la Sensibilidad, Sensibilidad a parámetros externos (Cross-Sensitivity), Error, precisión, Repetibilidad y Errores aleatorios.

Dentro de la gama de medidores de distancia, los ultrasónicos se destacan por su alcance (rango típico: 20 – 30 m) frente a los que son construidos con Infrarrojo (10-80 cms), además, por la precisión en la medición respecto al objeto o cuerpo sobre el cual incide la onda sonora.

2.1.8.1 Sensores de distancia por ultrasonidos. Funcionamiento básico de los ultrasonidos como medidores de distancia

Los ultrasonidos son sonidos superiores a los 20 KHz, es decir, son sonidos que no se encuentran dentro de nuestro rango audible (20 Hz-20 KHz).

El funcionamiento básico de los ultrasonidos como medidores de distancia se muestra de una manera muy clara en el Anexo G¹³, donde se tiene un receptor que emite un pulso de ultrasonido que rebota sobre un determinado objeto y la reflexión de ese pulso es detectada por un receptor de ultrasonidos.

La mayoría de los sensores de ultrasonido de bajo costo se basan en la emisión de un pulso de ultrasonido cuyo lóbulo, o campo de acción, es de forma cónica. Midiendo el tiempo que transcurre entre la emisión del sonido y la percepción del eco se puede establecer la distancia a la que se encuentra el obstáculo que ha producido la reflexión de la onda sonora, mediante la fórmula:

$$d = \frac{1}{2} V \cdot t$$

donde V es la velocidad del sonido en el aire y t es el tiempo transcurrido entre la emisión y recepción del pulso.

2.1.8.2 Consideraciones a tener con los Ultrasonidos. A pesar de que su funcionamiento parece muy sencillo, existen factores inherentes tanto a los ultrasonidos como al mundo real, que influyen de una forma determinante en las medidas realizadas. Por tanto, es necesario un conocimiento de las diversas

¹³ Ver Anexo G

fuentes de incertidumbre que afectan a las medidas para poder tratarlas de forma adecuada, minimizando su efecto en el conocimiento del entorno que se desea adquirir. Entre los diversos factores que alteran las lecturas que se realizan con los sensores de ultrasonido cabe destacar:

- El campo de actuación del pulso que se emite desde un transductor de ultrasonido tiene forma cónica. El eco que se recibe como respuesta a la reflexión del sonido indica la presencia del objeto más cercano que se encuentra dentro del cono acústico y no especifica en ningún momento la localización angular del mismo¹⁴. Aunque la máxima probabilidad es que el objeto detectado esté sobre el eje central del cono acústico, la probabilidad de que el eco se haya producido por un objeto presente en la periferia del eje central no es en absoluto despreciable y ha de ser tenida en cuenta y tratada convenientemente.
- La cantidad de energía acústica reflejada por el obstáculo depende en gran medida de la estructura de su superficie. Para obtener una reflexión altamente difusa del obstáculo, el tamaño de las irregularidades sobre la superficie reflectora debe ser comparable a la longitud de onda de la onda de ultrasonido incidente.
- En los sensores de ultrasonido de bajo costo se utiliza el mismo transductor como emisor y receptor. Tras la emisión del ultrasonido se espera un determinado tiempo a que las vibraciones en el sensor desaparezcan y esté preparado para recibir el eco producido por el obstáculo. Esto implica que existe una distancia mínima d (proporcional al tiempo de relajación del transductor) a partir de la cual el sensor mide con precisión. Por lo general, todos los objetos que se encuentren por debajo de esta distancia d , serán interpretados por el sistema, como que están a una distancia igual a la distancia mínima¹⁵.
- Los factores ambientales tienen una gran repercusión sobre las medidas: a) Las ondas de ultrasonido se mueven por un medio material que es el aire. b) La densidad del aire depende de la temperatura, influyendo este factor sobre la velocidad de propagación de la onda según la expresión:

$$V_s = V_{s0} \sqrt{1 + \frac{T}{273}}$$

siendo V_{s0} la velocidad de propagación de la onda sonora a 0 °C, y T la

¹⁴ Ver Anexo B

¹⁵ Ver Anexo C

temperatura absoluta (grados Kelvin).

- Un factor de error muy común es el conocido como falsos ecos. Estos falsos ecos se pueden producir por razones diferentes: Puede darse el caso en que la onda emitida por el transductor se refleje varias veces en diversas superficies antes de que vuelva a incidir en el transductor (si es que incide). Este fenómeno, conocido como reflexiones múltiples, implica que la lectura del sensor evidencia la presencia de un obstáculo a una distancia proporcional al tiempo transcurrido en el viaje de la onda; es decir, una distancia mucho mayor que a la que está en realidad el obstáculo más cercano, el cual pudo producir la primera reflexión de la onda. Otra fuente más común de falsos ecos, conocida como crosstalk, se produce cuando se emplea un cinturón de ultrasonidos, donde una serie de sensores está trabajando al mismo tiempo. En este caso, puede ocurrir (y ocurre con una frecuencia relativamente alta) que un sensor emita un pulso y sea recibido por otro sensor que estuviese esperando el eco del pulso que él había enviado con anterioridad (o viceversa)¹⁶.
- Las ondas de ultrasonido obedecen a las leyes de reflexión de las ondas, por lo que una onda de ultrasonido tiene el mismo ángulo de incidencia y reflexión respecto a la normal a la superficie. Esto implica, que si la orientación relativa de la superficie reflectora con respecto al eje del sensor de ultrasonido es mayor que un cierto umbral, el sensor nunca reciba el pulso de sonido que emitió¹⁷.
- La posición real del objeto es desconocida: (cualquier posición del cono a distancia d).
- Reflejos especulares: la dirección del reflejo depende del ángulo de Incidencia
- Cuanto menor sea el ángulo, mayor es la probabilidad de perderse y producir falsas medidas de gran longitud.
- Las superficies pulidas agravan el problema (las rugosas producen reflejos que llegan antes).
- Cuando varios robots usan ultrasonidos, puede existir un problema de falsa detección.

¹⁶ Ver Anexo D

¹⁷ Ver Anexo F

2.1.9 Altavoces. El altavoz, también conocido como baffle y, en América Latina, como parlante, altoparlante o bocina, es un dispositivo utilizado para la reproducción de sonido. Altavoz y pantalla acústica no son sinónimos, pues tienen un funcionamiento diferente.

El altavoz es un transductor, en concreto, un transductor electroacústico, en el que la transducción sigue un doble procedimiento: eléctrico-mecánico-acústico.

En la primera etapa convierte las ondas eléctricas en energía mecánica, y en la segunda convierte la energía mecánica en energía acústica.

2.1.10 Sistema estéreo (2.0). Generalmente se llama sonido estereofónico o estéreo al sonido que es grabado y reproducido en dos canales (disposición 2.0)¹⁸. Aunque el sonido estéreo pueda tener dos canales monaurales independientes, usualmente la señal en un canal está relacionada con la señal del otro canal.

2.1.11 Motor eléctrico. Es una máquina eléctrica que transforma energía eléctrica en energía mecánica por medio de interacciones electromagnéticas. Algunos de los motores eléctricos son reversibles, es decir, pueden transformar energía mecánica en energía eléctrica funcionando como generadores.

Los motores de corriente alterna y los motores de corriente directa se basan en el mismo principio de funcionamiento, el cual establece que si un conductor por el cual circula una corriente eléctrica se encuentra dentro de la acción de un campo magnético, éste tiende a desplazarse perpendicularmente a las líneas de acción del campo magnético.

Dentro de los motores de corriente continua, se encuentran el Motor serie, Motor compound, Motor shunt, Motor eléctrico sin escobillas, Motor paso a paso, Servomotor, Motor sin núcleo. En la clasificación de motores de corriente alterna, se encuentran los motores Asíncronos (Jaula de Ardilla y Rotor Devanado) y los motores Síncronos.

¹⁸ Ver Anexo I de Sistema 2.0

3. METODOLOGÍA

3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

El enfoque de esta investigación es empírico-analítico, porque se desea mejorar un sistema de audio utilizado para la simulación de espacios, lo cual se vería reflejado en mejoras del mundo material.

3.2 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE USB / SUB-LÍNEA DE FACULTAD / CAMPO TEMÁTICO DEL PROGRAMA

La línea de investigación de este proyecto es “Tecnologías actuales y sociedad”, ya que se utilizan los recursos que brinda la tecnología a fin de mejorar los sistemas de audio existentes y así mejorar la calidad de vida de la sociedad. La sublínea es “Instrumentación y Control de Procesos”, porque se emplean microcontroladores con el fin de lograr procesos automatizados; para el caso de este proyecto, automatización de volumen (procesamiento de señal) dependiendo de la distancia a la que se encuentre el oyente de los parlantes. Por último, el campo temático del proyecto está enfocado al “Diseño de Sistemas de Sonido”, puesto que se hace necesario el uso de las herramientas matemáticas y físicas para una mejor comprensión y manipulación de la tecnología.

3.3 POBLACION Y MUESTRA

Para la recolección de datos, se emplearan básicamente dos métodos. El primero consiste en realizar una medición de niveles mediante el uso del sonómetro en los diferentes puntos a verificar, generando primero ruido rosa y después utilizando como señal generadora un fragmento de una canción. Para el segundo método de recolección, se empleara el uso de una prueba subjetiva, para cual se escogerá una muestra por cuotas¹⁹ de estudiantes de Ingeniería de Sonido de los semestres Séptimo a Décimo cantidad de personas (aleatoriamente), quien mediante el uso de sus sistema auditivo comprobara el funcionamiento o no funcionamiento del proyecto.

¹⁹ ILDEFONSO ABASCAL, Elena Grande Esteban. Análisis de Encuestas. Pozuelo de Alarcón (Madrid). ESIC EDITORIAL. 2005. p. 75.

3.4 HIPÓTESIS

Entre los resultados esperados, se plantea que el campo estereofónico generado por el sistema sonoro 2.0, se reconstruya automáticamente mediante el adecuado funcionamiento electrónico y de los parámetros de construcción a variar en el dispositivo, es decir, que mediante el cálculo de la distancia, realizado por el sensor, la ubicación de la persona, mediante el motor y el retraso de la señal, se automatice el nivel del sistema 2.0 de manera tal, que el oyente perciba una imagen sonora similar a la de su posición ideal (centro).

3.5 VARIABLES

3.5.1 Variables independientes

Los instrumentos tanto de medición como de construcción del sistema y las características y/o funcionamiento particular del sistema auditivo de las personas expuestas a la prueba subjetiva para la verificación del funcionamiento del sistema.

3.5.2 Variables dependientes

Mejoramiento de la percepción sonora del oyente.

4. RECURSOS Y PRESUPUESTO

Tabla 3. Presupuesto sin las herramientas de la Universidad

EQUIPO	CANTIDAD	VALOR X UNIDAD (\$)	VALOR TOTAL (\$)
Microcontrolador PIC 16F877A	4	9.000	36.000
Sensor medidor de distancia SFR04	2	105.000	210.000
Motorreductores	2	80.000	160.000
Sistema 2.0	1	1.350.000	1.350.000
Base para monitores	2	220.000	440.000
Computador	1	1'500.000	1'500.000
Cables de conector XLR	4	35.000	140.000
Cable de conector TRS	4	30.000	120.000
Resistencias	50	30	1.600
Condensadores	20	2.000	40.000
Diodos	10	500	5.000
Cable UTP (metros)	10	700	7.000
Cable Multiplexado (metros)	10	600	6.000
Baquelas	6	2.000	12.000
Cautín	1	25.000	25.000
Pomada de Soldadura	1	3.500	3.500
Soldadura	2	6.000	12.000
Fuente de voltaje	1	650.000	650.000
Software para la programación del PIC (PIC C)	1	Software Demo	Software Demo
Quemador de PICs	1	90.000	90.000
Estudios USB (hora)			
Tutor de fondo	2		
Tutor de forma	1		
Transporte (120 viajes)	120	1.500	180.000
TOTAL			3.488.100

Tabla 4. Presupuesto con las herramientas de la Universidad

EQUIPO	CANTIDAD	VALOR X UNIDAD (\$)	VALOR TOTAL (\$)
Microcontrolador PIC 16F877A	4	9.000	36.000
Sensor medidor de distancia SFR04	2	105.000	210.000
Motorreductores	2	80.000	160.000
Sistema 2.0	1	1.350.000	1.350.000
Base para monitores	2	220.000	440.000
Resistencias	50	30	1.500
Condensadores	20	2.000	40.000
Diodos	15	500	7.500
Cable UTP (m)	10	700	7.000
Cable Multiplexado (metros)	10	600	6.000
Baquelas	6	2.000	12.000
Cautin	1	20.000	20.000
Pomada de soldadura	1	3.500	3.500
Soldadura	2	6.000	12.000
Transporte (120 viajes)	3	1.500	180.000
TOTAL			2.585.500

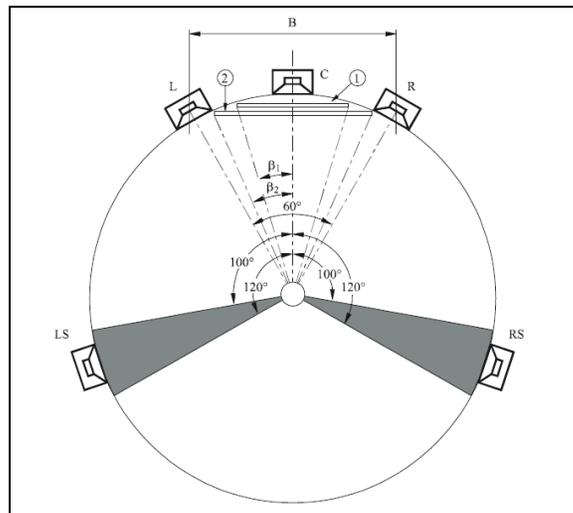
5. DESARROLLO INGENIERIL

El objetivo de este proyecto es conseguir la reconstrucción del campo sonoro estereofónico mediante el uso de sensores ultrasónicos, los cuales calculan la distancia a la que está el receptor de los parlantes. Para lograrlo, se establecen valores de nivel sonoro de referencia y una posición de referencia del oyente, mediante la calibración de todos los dispositivos mecánicos, electrónicos y sonoros involucrados.

La construcción del dispositivo consta de 3 etapas de control, establecidos en dos circuitos que se intercomunican para lograr la reconstrucción de imagen estéreo. Hay una etapa totalmente digital en la que se encuentra el sensor por ultrasonido y el control digital de volumen programable y otra, de control mecánico aplicado a los motores paso a paso.

El primer paso, es establecer la ubicación de referencia del oyente con respecto al sistema sonoro 2.0, la cual está sujeta a las especificaciones en la recomendación de la Unión Internacional de Telecomunicaciones UIT-R BS.775-2²⁰, que sugiere formar un triángulo equilátero entre los dos altavoces y el oyente, quedando este último en el medio de los parlantes y a una altura de 1.2m, como se ilustra:

Figura 9. Disposición de los altavoces de referencia L (izquierdo)/C (central)/R (derecho) y LS (Envolvente izquierdo)/RS (Envolvente derecho)



Fuente Recomendación de la Unión Internacional de Telecomunicaciones UIT-R BS.775-2

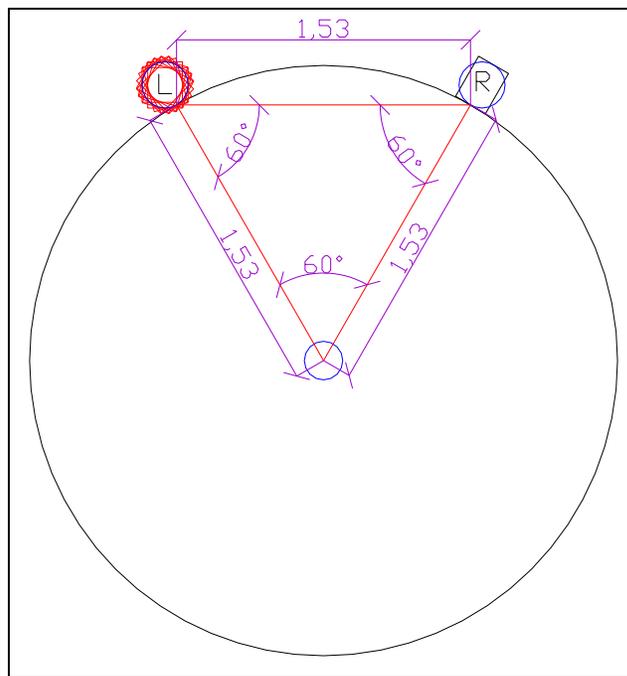
²⁰ Rec. UIT-R BS.775-2 pág 4 nota 2

Tabla 5. Angulación y altura de los altavoces de referencia L (izquierdo)/C (central)/R (derecho) y LS (Envolvente izquierdo)/RS (Envolvente derecho)

Altavoz	Ángulo horizontal desde el centro (grados)	Altura (m)	Inclinación (grados)
C	0	1.2	0
L, R	30	1.2	0
LS, CS	100...120	≥ 1.2	0...15 (hacia abajo)

Fuente Recomendación de la Unión Internacional de Telecomunicaciones UIT-R BS.775-2

Figura 10. Posición de referencia de las fuentes y el receptor



Una vez establecidas las posiciones de las fuentes sonoras y del oyente, se procede a realizar la etapa de localización del receptor mediante el uso de sensores ultrasónicos, los cuales determinan la distancia a la cual se encuentra el receptor de cada fuente sonora; es decir, que para cada fuente hay un medidor de distancia. Debido a que el sistema debe ajustarse a la posición del receptor, es necesario añadir al sistema de reproducción de audio y de medición de distancia,

un dispositivo que al moverse en azimut permita una localización más precisa de la persona.

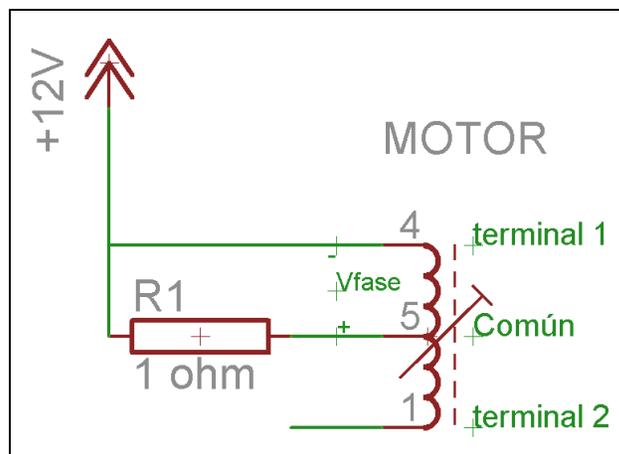
Para conocer la manera en que el sensor ultrasónico calcula la distancia, se realizó una prueba mediante el uso de un circuito y una programación, la cual consistía en cada vez que el sensor encontrara un valor de distancia igual a X, un led alumbrara la misma cantidad de veces para poder saber qué número había encontrado el sensor. A medida que el valor de distancia del sensor cambiaba, se medía la distancia en centímetros mediante el uso de un metro, para la cual el sensor arrojaba un número; por ejemplo, si el led alumbraba una vez, quería decir que el sensor había encontrado una distancia equivalente a uno, que en centímetros equivale a 17 cm; cuando alumbraba 2 veces, equivalía a un valor en el sensor de dos y a 34 cm. Esta prueba se realizó hasta encontrar el valor máximo de alcance del sensor, que fue 18 (unidad del sensor) lo que equivale a 306 cm. Mediante este método se llegó a la conclusión de que el sensor maneja un rango de 17cm por cada cambio de unidad del mismo, así:

Circuito mecánico del dispositivo:

Se logró la adquisición de dos motores paso a paso, cada uno con sus terminales de fase y de control. Para su correcto funcionamiento, se precisó determinar la cantidad de corriente que debía fluir en el circuito con un voltaje que ya estaba establecido (12 volts).

Para ello se colocó una resistencia 1 Ω /20W en serie con cada terminal

Figura 11. Esquema circuito Voltaje medido en la fase.

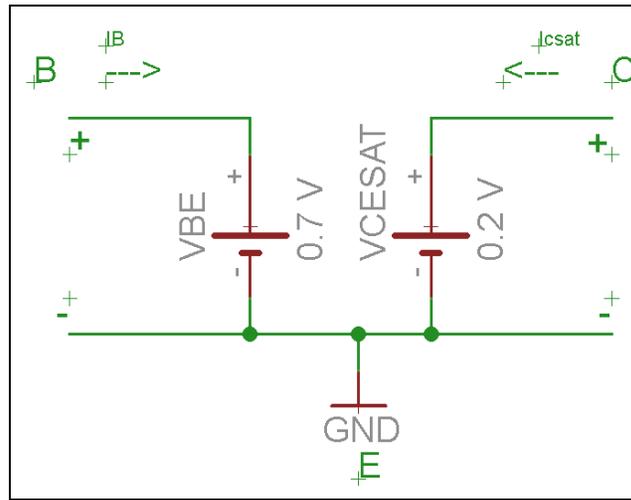


Y se procedió a medir el voltaje en cada terminal para calcular la corriente de fase:

$V_{\text{fase}}: 1.16\text{V}$

$I_{\text{fase}} 0.83\text{ A}$

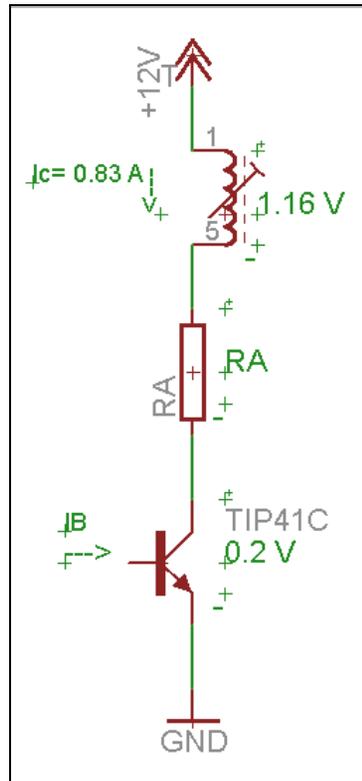
Figura 12. Esquema de uso de transistor en modo saturación.



Para el diseño del circuito se implementó el uso de transistores, los cuales trabajaron en saturación debido a que en la zona de saturación el voltaje V_{cE} no tendrá variaciones significativas aunque la corriente de colector I_c se incremente. De esta manera el transistor funciona como un interruptor, que es así como funciona el transistor en la zona de saturación. En esta zona, la resistencia del mismo transistor es más baja, lo que facilita el flujo de la corriente.

Hallar el valor necesario de R_a , tal que con 12 V de la fuente y 0.2V en $V_{cE\text{sat}}$, permita que circule una corriente de 0.83A por la fase del motor para activarla.

Figura 13. Esquema circuito para obtención de R_a



Mediante el uso de la ley de Kirchhoff (Análisis por mallas) se procedió a calcular el valor de R_a tal que,

$$-12\text{V} + 1.16\text{V} + R_a \cdot 0.83\text{A} + 0.2\text{V} = 0$$

$$R_a = 12.2892 \Omega, \text{ aprox } 12 \Omega$$

$$P_{R_a} (\text{potencia en } R_a) = (0.83)^2 \cdot 12 \Omega$$

$P_{R_a} = 8.2668\text{W}$, entonces se uso un valor de potencia por encima del obtenido.

Así se utilizo una resistencia de $12 \Omega / 20\text{W}$.

3. En saturación para que halla I_c , debe existir una I_B

B (beta del transistor) relaciona I_B con I_c

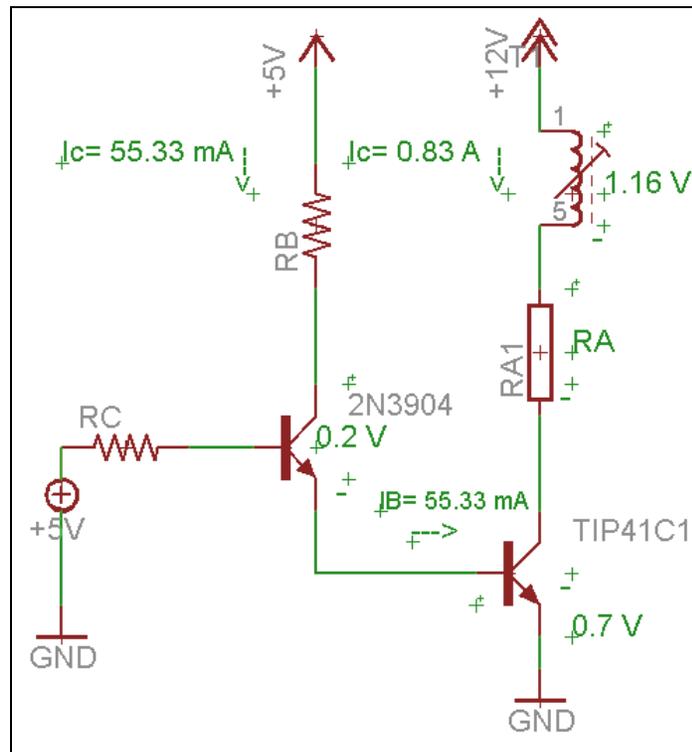
$$I_c = B \cdot I_B$$

B del TIP41C mínimo valor es 15, entonces

$$I_c/B = I_B \quad 0.83 \text{ A}/15 = I_B \quad I_B = 55.33 \text{ mA}$$

Como la corriente de base necesaria para activar el transistor TIP41C es mayor a la corriente que ofrece el micro (pin de salida 40mA), necesitamos otro elemento que genere la corriente de base necesaria para activar el TIP41C, para ello se usó un transistor 2N3904 unido al otro.

Figura 14. Control de corriente de activación por adición de transistor.



$I_E = I_B + I_c$ como la corriente de base generalmente es muy baja, entonces se puede decir que la corriente de emisor I_E es aproximadamente igual a la corriente de colector I_c .

Calculo de R_b por análisis de mallas

$$5V = R_b * 55.33\text{mA} + 0.2V + 0.7V$$

$$R_b = 74.1 \Omega \text{ aprox. } 75 \Omega$$

$$I_c (2N3904) = B (\text{beta mínimo}) * I_B (2N3904)$$

$$I_B = B/I_c$$

$$I_B = 30/55.33 \text{ mA}$$

$$I_B = 1.8443 \text{ mA}$$

Calculo de R_c por análisis de mallas

$$-5V + R_c \cdot 1.84 \text{ mA} + 0.7V + 0.7V = 0$$

$$R_c = 1.95 \text{ K}\Omega \text{ aprox } 1.8 \text{ K}\Omega$$

Por medio de este método se obtuvo el control de corriente y resistencias necesarias para un mejor desempeño del sistema, específicamente en el movimiento mecánico del motor, teniendo en cuenta que debía controlar un peso aproximado de 5 Kg distribuidos en el altavoz y el soporte del mismo. Con base en este diseño, se hizo una réplica aplicada al segundo altavoz, cuyas características son idénticas.

Figura 15. Diagrama de bloques del algoritmo de la programación del dispositivo

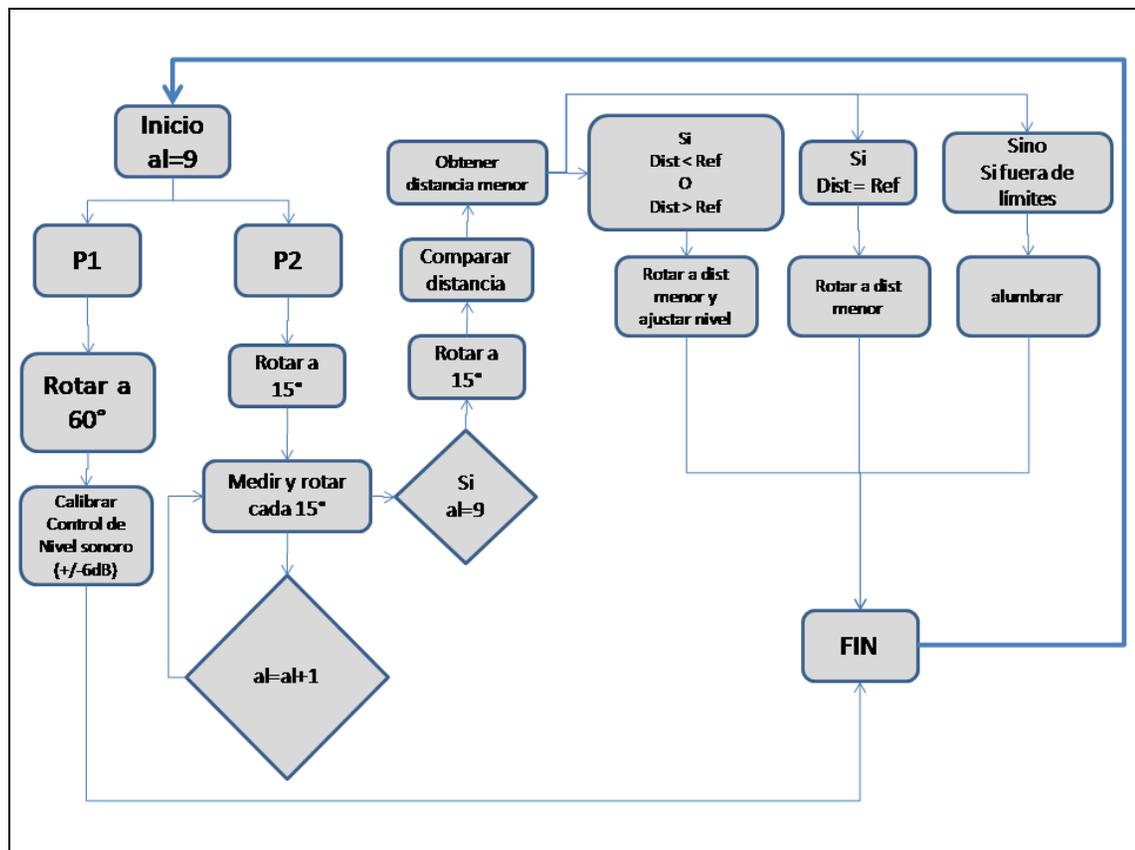


Tabla 6. Unidades del sensor

Unidad del sensor	En cm.
1	17 a 33
2	34 a 50
3	51 a 67
4	68 a 84
5	85 a 101
6	102 a 118
7	1119 a 135
8	136 a 152
9	153 a 169
10	170 a 186
11	187 a 203
12	204 a 220
13	221 a 237
14	238 a 254
15	255 a 271
16	272 a 288
17	289 a 305
18	306 a 322

Cabe mencionar que la teoría sobre efecto precedencia expuesta, está basada en el uso de clics para la determinación de la proveniencia de la fuente, es decir, que los diferentes tipos de localización mencionados, los cuales dependen del tiempo, están sujetos al uso y duración de clics. En este proyecto no se utilizarán clics, sino que se va a manipular un paquete de información que contiene varias frecuencias dadas por los diferentes instrumentos que estén presentes en la mezcla (bajo, guitarra, batería, piano, congas, timbales, entre otros, dependiendo del género), por ende la duración de las señales utilizadas en esta propuesta, será mayor que la de un clic, pues aun cuando puedan haber instrumentos de percusión que generen golpes impulsivos o de corta duración, ésta será mayor a la de un clic; por lo tanto, es posible que esta teoría no se comporte de la misma manera con el uso de una señal diferente.

Para poder realizar la reconstrucción del campo las etapas anteriormente mencionadas deben estar correctamente ensambladas. Para llevar a cabo este proceso, el dispositivo tendrá el siguiente orden de funcionamiento:

Cada uno de los sensores ultrasónicos estará ubicado sobre los parlantes ubicados a 0° (uno enfrente del otro), el receptor deberá estar ubicado en la posición de referencia y con los parlantes en su posición inicial (ver gráfica de posición de referencia de las fuentes y el receptor); una vez este dispuesto el sistema en sus condiciones iniciales, los motores sujetos a la base inferior de cada uno de los montajes que sostienen los parlante empezaran a girar así: se debe oprimir el *pulsador 1 (P1)* de cada montaje de tal forma que los parlantes giren a 60°, el parlante izquierdo en sentido horario y el parlante derecho en sentido anti-horario para sí calibrar el control de nivel, llevándolo a su máximo nivel y luego, atenuando su nivel y obtener posibles ajustes de +/-6dB.

Luego se oprime el *pulsador 2 (P2)* para realizar un giro de preparación al sistema, ubicando cada altavoz a 15° y que posteriormente haga un barrido desde 30 hasta 135 grados en pasos de 15° (como el motor gira 1.8 grados, entonces se le deberá enviar la orden al mismo de que realice al rededor de ocho pasos para que así se mueva cada quince grados en si mismo). Cada quince grados el motor hará una pequeña pausa para que el sensor realice la medición de distancia que será almacenada en el microcontrolador, al cual están sujetos todos los elementos electrónicos del dispositivo y a través del cual se controlan todos los movimientos y procesamientos, en el que se compararán todas las distancias encontradas, que el sistema se devuelva a la posición de 15° y que al final, identifique la ubicación del receptor, haga el proceso de rotación respectivo del altavoz hasta el mismo y ajuste el nivel sonoro que este requiere (reconstrucción de la imagen sonora).

Este mismo proceso lo realizará cada uno de los parlantes con su respectivo sensor, uno después de otro, es decir, de manera no simultánea.

Cuando los dos parlantes estén ubicados en dirección a la posición de la persona, una nueva orden será ejecutada por el microcontrolador, la cual consiste en hacer el ajuste de nivel necesario para cada uno de los parlantes, que depende de la distancia a la que se encuentre el receptor de cada uno de estos. Para calcular este nivel de incremento (cuando la distancia sea mayor a la de referencia: 1.53m) o atenuación (cuando la distancia sea menor a la de referencia: 1.53m), se utilizó la siguiente ecuación:

$$NIA = 20 \log (d_m/d_{ref})$$

Donde:

NIA: nivel de incremento o atenuación necesario

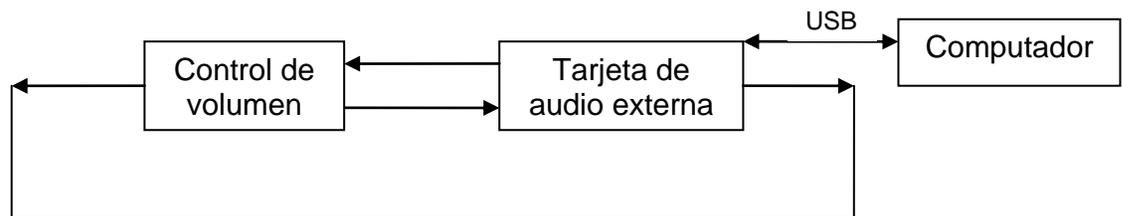
d_m : distancia medida por el sensor

d_{ref} : distancia de referencia (1.53m)

Para simplificar los procesos que debe realizar el microcontrolador PIC 16F877A en la etapa de control de nivel, se realizaron los siguientes cálculos y/o procesos:

- Se estableció un método de calibración de nivel, que consiste en que cada 100 ms de voltaje que se le imprimen al circuito, corresponden o son equivalentes a 0.22 dB, con una fluctuación de más o menos 0.1 dB. Para llevar a cabo esta calibración, fue necesario utilizar diferentes tiempos de voltaje hasta encontrar un valor que generara la mayor precisión posible. A su vez, para conocer la equivalencia en nivel sonoro se utilizaron los medidores de nivel de Inspector IXL de Roger Nichols® (versión demo, plug-in utilizado en mezcla para tener una referencia del nivel sonoro de una señal de audio), es decir, que se hizo una conexión entre el circuito y una tarjeta de audio externa, a cuya entrada se conectó la salida del control de nivel y a cuya salida se conectó la entrada del mismo.

Esquema de conexión para la calibración de nivel



- Se realizaron los cálculos de nivel mediante la ecuación de NIA para las posibles posiciones en el rango de cobertura a utilizar (30 grados a 135 grados) y posteriormente se compararon, tanto las distancias como los niveles reales, con los rangos de distancia que utiliza el sensor (ver Tabla 8 de comparación de unidades del sensor y unidades reales), para saber el rango al cual pertenecía cada uno de los valores de distancia obtenidos.

Tabla 7. Posiciones del rango de cobertura

Posición 1	Posición 2
Posición 3	Posición 4
Posición 5	Posición 6

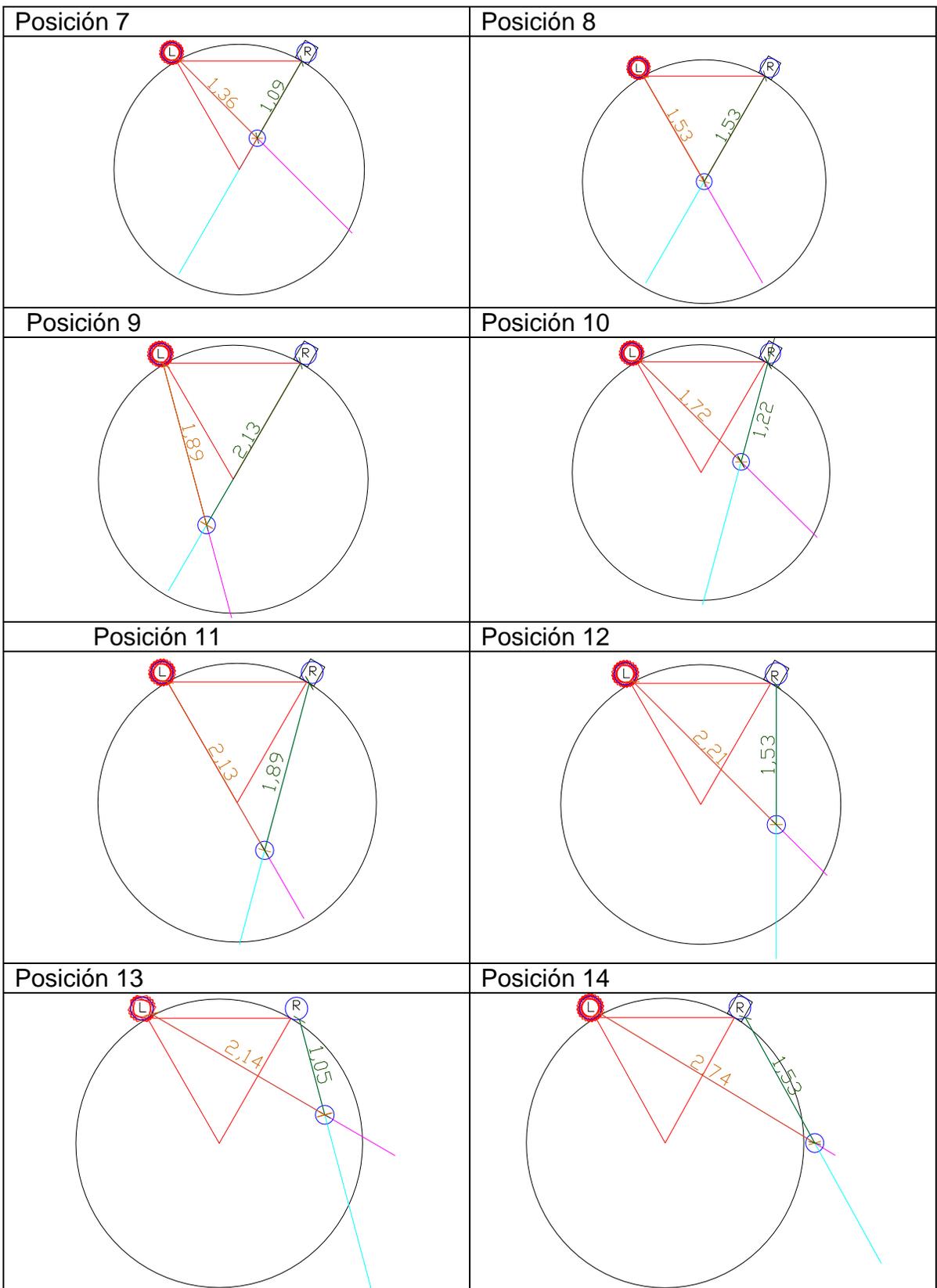
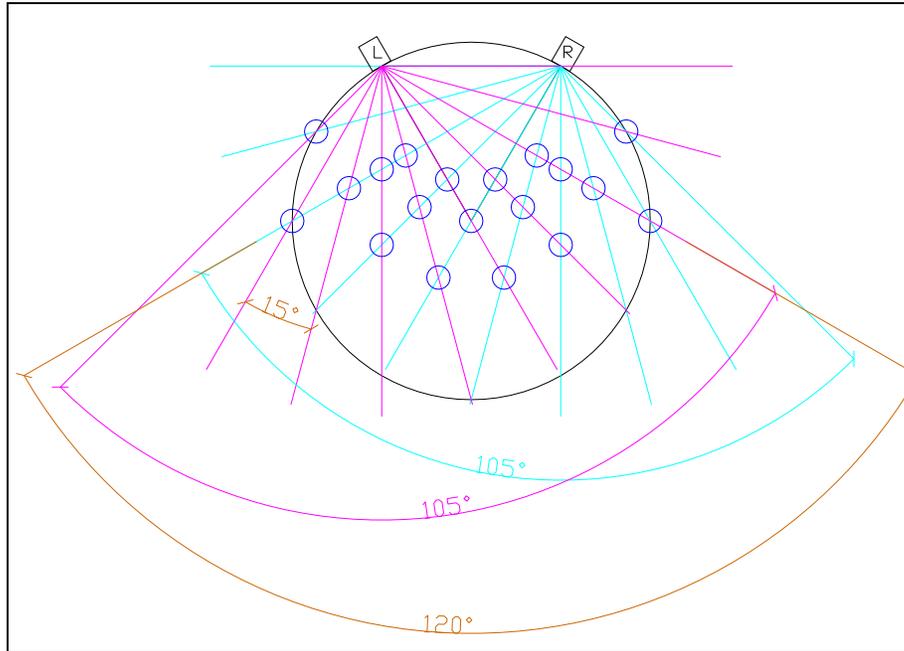


Figura 16. Gráfico de radiación general



Las ilustraciones anteriores muestran algunas de las posiciones posibles donde hay intersección de los parlantes (indicada por los círculos), teniendo en cuenta los 15 grados de rotación a los que girará el motor y por ende el parlante, con sus respectivas dimensiones dadas en metros. La figura de radiación general muestra la cobertura de cada uno de los parlantes izquierdo (L) de color morado y derecho (R) de color cian, junto con algunas de las intersecciones posibles ilustradas por medio de los círculos de color azul.

Como se mencionó antes, la cobertura de cada parlante será de 135 grados; sin embargo, como se puede notar en la figura de radiación general no hay intersecciones hasta tal cobertura, es decir, que la cobertura hasta donde se hallan intersecciones es menor a 135 grados, específicamente de 105 grados, con una cobertura total de 120 grados.

Tabla 8. Comparación de unidades del sensor y unidades reales

Posición	L (distancia en m)	Equivalencia con unidades sensor L	Equivalencia nivel sensor L	Nivel L (dB)	R (distancia en m)	Equivalencia Con unidades sensor R	Equivalencia nivel sensor R	Nivel R (dB)
1	1,05	6	-3,52	-3,27	2,14	12	2,5	2,91
2	1,53	9	0	0,00	2,74	16	5	5,06
3	1,09	6	-3,52	-2,95	1,36	8	-1,02	-1,02
4	1,22	7	-2,18	-1,97	1,72	10	-1,02	1,02
5	1,53	9	0	0,00	2,21	13	3,19	3,19
6	2,22	13	3,19	3,23	3,06	18	6,02	6,02
7	1,36	8	-1,02	-1,02	1,09	6	-3,52	-2,95
8 REF	1,53	9	0	0,00	1,53	9	0	0,00
9	1,89	11	1,74	1,84	2,13	12	2,5	2,87
10	1,72	10	0,92	1,02	1,22	7	-2,18	-1,97
11	2,13	12	2,5	2,87	1,89	11	1,74	1,84
12	2,21	13	3,19	3,19	1,53	9	0	0,00
13	2,14	12	2,5	2,91	1,05	6	-3,52	-3,27
14	2,74	16	5	5,06	1,53	9	0	0,00

- Utilizando la calibración del control de nivel, se calcularon los pasos necesarios para que se ajustaran a cada rango del sensor, es decir, que se hace una división entre el nivel NIA obtenido en términos de las unidades del sensor y 0.22 dB y de esta forma se obtiene la cantidad de pulsos de 100 ms que debe enviar el circuito para incrementar o atenuar el nivel sonoro necesario.

Tabla 9. Pulsos para incrementar o atenuar el nivel sonoro (NIA) necesario

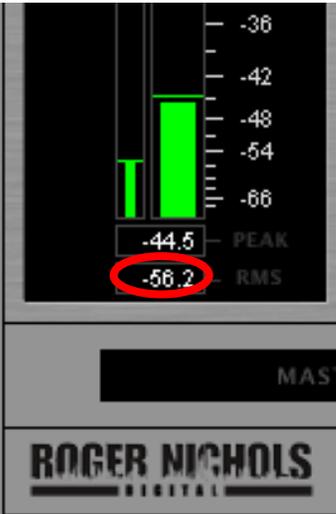
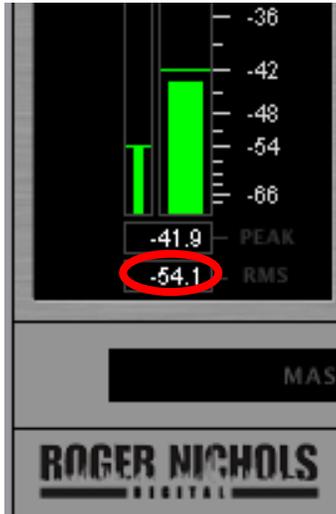
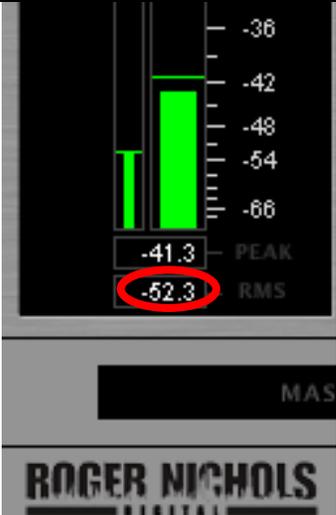
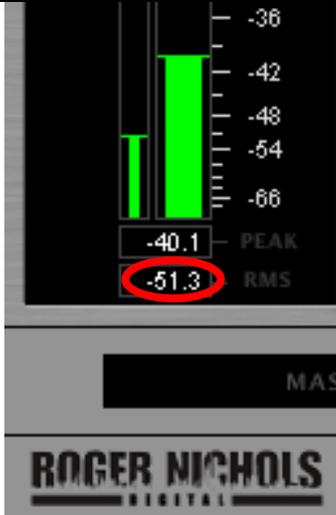
Unidad Sensor	NIA	División entre 0.22 dB redondeando
1	-19,08	-87
2	-13,06	-59
3	-9,54	-43
4	-7,04	-32
5	-5,11	-23
6	-3,52	-16
7	-2,18	-10
8	-1,02	-5
9 (DIST DE REF.)	0	0
10	0,92	4
11	1,74	8
12	2,5	11
13	3,19	15
14	3,84	17
15	4,44	20
16	5	23
17	5,52	25
18	6,02	27

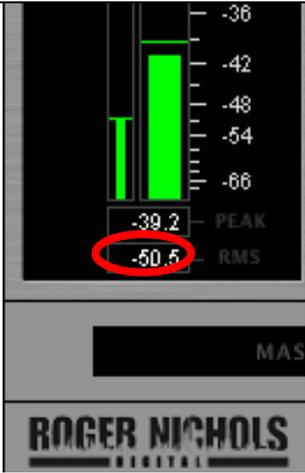
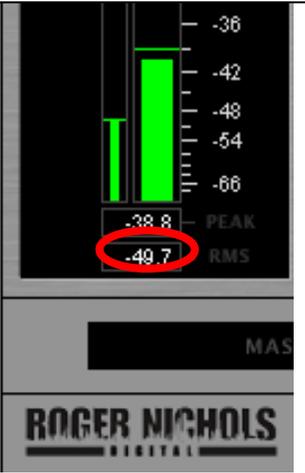
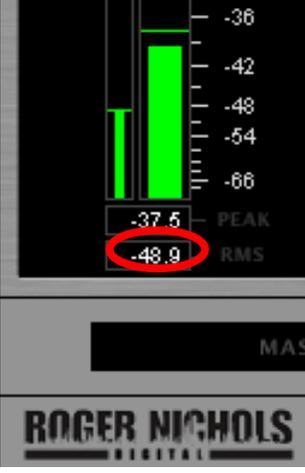
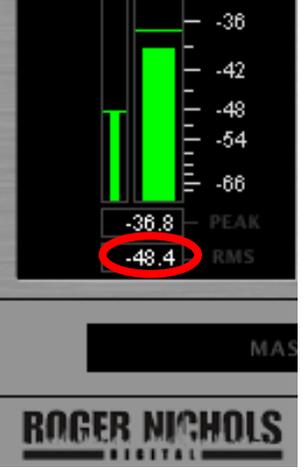
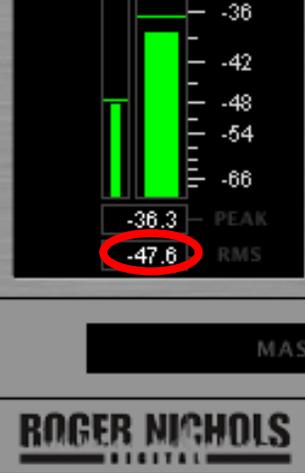
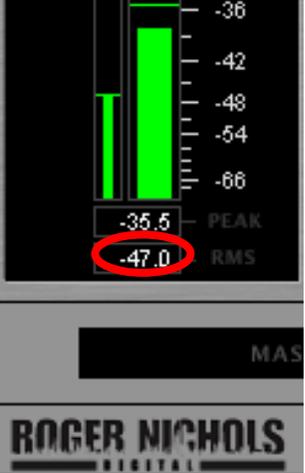
Ya con estos cálculos y procesos, el microcontrolador sólo debe enviar la cantidad de pasos dependiendo de la distancia que encuentre, evitándole el cálculo de nivel y la división para obtener la cantidad de pulsos que debe utilizar, para realizar los ajustes de nivel en cada uno de los parlantes.

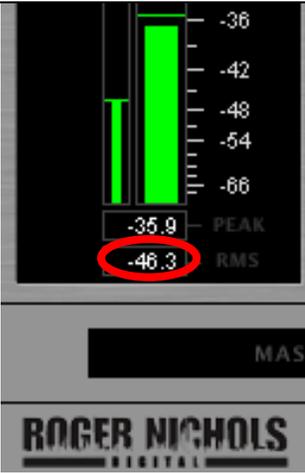
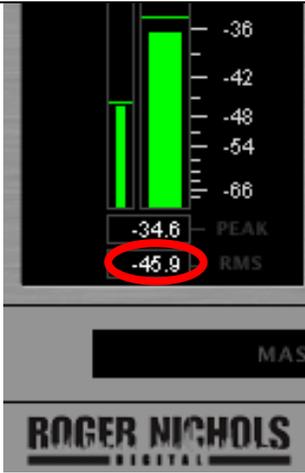
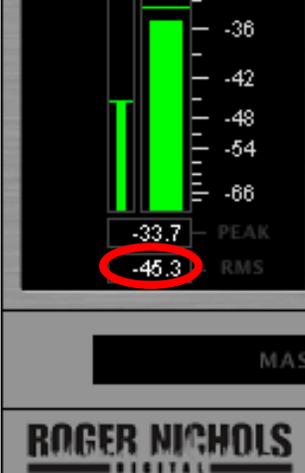
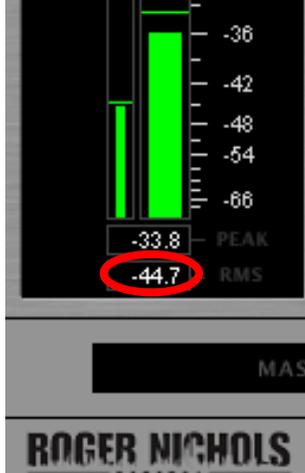
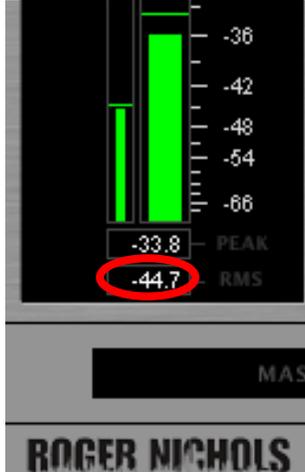
Para que el sistema pueda hacer los ajustes de nivel varias veces, es necesario que antes de realizar el ajuste siguiente, la etapa de amplificación sonora (control de volumen) vuelva a las condiciones iniciales. Por esta razón, dentro de los varios procesos que debe realizar el micro, se encuentra el reajuste de nivel, haciendo que el control de volumen llegue a su nivel máximo y después baje aproximadamente 6dB, para de esta manera permitirle al sistema realizar incrementos (hasta el nivel máximo: alrededor de 6dB) y no solo atenuaciones, dado que el sistema en condiciones iniciales no permite atenuaciones, debido a que su nivel inicial es el mismo nivel máximo.

Una vez ensamblada la etapa de medición de distancia, mediante el sensor, y la etapa del control de nivel, usando el procedimiento antes mencionado, se procedió a verificar la efectividad del proceso de ajuste de nivel -programado en el microcontrolador- usando el mismo esquema de conexión de calibración de nivel antes mencionado. De allí se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 10. Niveles arrojados por los medidores de Roger Nichols para cada unidad del sensor. Para mayor claridad respecto a las unidades del sensor, ver Tabla 6.

Unidad del sensor =5	Unidad del sensor =6
 <p>Unidad del sensor =5</p> <p>PEAK: -44.5 RMS: -56.2</p>	 <p>Unidad del sensor =6</p> <p>PEAK: -41.9 RMS: -54.1</p>
Unidad del sensor =7	Unidad del sensor =8
 <p>Unidad del sensor =7</p> <p>PEAK: -41.3 RMS: -52.3</p>	 <p>Unidad del sensor =8</p> <p>PEAK: -40.1 RMS: -51.3</p>

<p>Unidad del sensor =9</p>  <p>ROGER NICHOLS DIGITAL</p>	<p>Unidad del sensor =10</p>  <p>ROGER NICHOLS DIGITAL</p>
<p>Unidad del sensor =11</p>  <p>ROGER NICHOLS DIGITAL</p>	<p>Unidad del sensor =12</p>  <p>ROGER NICHOLS DIGITAL</p>
<p>Unidad del sensor =13</p>  <p>ROGER NICHOLS DIGITAL</p>	<p>Unidad del sensor =14</p>  <p>ROGER NICHOLS DIGITAL</p>

<p>Unidad del sensor =15</p>  <p>ROGER NICHOLS DIGITAL</p>	<p>Unidad del sensor =16</p>  <p>ROGER NICHOLS DIGITAL</p>
<p>Unidad del sensor =17</p>  <p>ROGER NICHOLS DIGITAL</p>	<p>Unidad del sensor =18</p>  <p>ROGER NICHOLS DIGITAL</p>
<p>Nivel de atenuación</p>  <p>ROGER NICHOLS DIGITAL</p>	<p>Nivel máximo</p>  <p>ROGER NICHOLS DIGITAL</p>

La tabla anterior muestra los niveles de variación obtenidos para cada distancia en términos de las unidades del sensor (las distancias menores a 5 no fueron tenidas en cuenta debido al funcionamiento del control de nivel, puesto que éste no realiza variaciones mayores y/o menores a aproximadamente +/- 6dB). Estas variaciones permiten verificar la efectividad de la etapa del control de nivel al comparar los valores obtenidos con los calculados (Tabla 11). Para conocer la real variación de nivel que el sistema está efectuando, es necesario tener en cuenta que el sistema primero realiza unos ajustes tanto de ubicación (60°) como de nivel (incrementa su nivel al máximo y luego se atenúa en 6dB) en la posición de referencia los cuales se ejecutan al pulsar **P1** y después con el pulsador 2 (**P2**), es que el sistema hace el pertinente ajuste nivel relativo a la distancia del oyente.

Los niveles ilustrados en la Tabla 11 están sujetos al nivel del ruido rosa que se suministre en la prueba; para este caso, se utilizó un nivel de ruido de -7.9 dB. Lo importante es la diferencia que se genere entre el nivel de atenuación y el ajuste que efectúe el control de nivel, dependiendo de la distancia.

Tabla 11. Comparación de niveles de presión sonora medidos y calculados

Unidades del sensor (distancia)	Nivel-dB- de atenuación (Roger Nichols)	Niveles-dB- obtenidos con los Roger Nichols	Nivel medido-dB- (variación de nivel medida)	Nivel calculado-dB-	Error absoluto	Error relativo (%)
5	-50,7	-56,2	-5,5	-5,11	-0,39	7,6
6	-50,7	-54,1	-3,4	-3,52	0,12	-3,4
7	-50,7	-52,3	-1,6	-2,18	0,58	-26,6
8	-50,7	-51,3	-0,6	-1,02	0,42	-41,2
9	-50,7	-50,5	0,2	0	0,2	0,0
10	-50,7	-49,7	1	0,92	0,08	8,7
11	-50,7	-48,9	1,8	1,74	0,06	3,4
12	-50,7	-48,4	2,3	2,5	-0,2	-8,0
13	-50,7	-47,6	3,1	3,19	-0,09	-2,8
14	-50,7	-47	3,7	3,84	-0,14	-3,6
15	-50,7	-46,5	4,2	4,44	-0,24	-5,4
16	-50,7	-45,9	4,8	5	-0,2	-4,0
17	-50,7	-45,3	5,4	5,52	-0,12	-2,2
18	-50,7	-44,7	6	6,02	-0,02	-0,3

Después de asegurar el correcto funcionamiento del control de nivel y la medición de distancia, se acopló a este ensamble el movimiento de rotación del motor paso a paso, el cual girará cada 15 grados, como ya antes se explicó. No obstante, fue

necesario ajustar en la programación el ángulo de rotación, es decir, el sistema sigue girando cada quince grados, pero para que esto suceda, ya la cantidad de pasos que éste debe hacer será mayor a la naturalmente establecida ($15 \text{ grados} / 1.8 \text{ grados} \text{ -rotación natural del motor-} = 8.33 \text{ pasos}$), puesto que debido al uso de un sistema de poleas y un eje de mayor dimensión que el piñón del motor, cuando el motor gire 15 grados, el sistema general que soporta el parlante, ejecutará un giro con un ángulo menor, es por ello que se hace necesario hacer esta corrección, para que el sistema en realidad realice las mediciones cada quince grados. El sistema que soporta el parlante y está acoplado al motor tiene los siguientes elementos:

Tabla 12. Placa superior en HR de 20cm x 20cm y 1/8 " de espesor

Placa superior en construcción	Placa superior pintada
	

Tabla 13. Placa inferior en HR de 30cm x 30cm y 1/8 " de espesor

Placa inferior en construcción	Placa inferior en estado final
	

Tabla 14. Eje de 15 cm de altura y 3 cm de diámetro en la parte superior.

Eje con tornillo sujetador de placa superior	Ejes de giro terminados
	

El diámetro del eje disminuye a 2.7 cm en la parte donde se encuentra graficado y a 1.6 cm en la parte inferior donde se acopla con los rodamientos.

Tabla 15. Rodamientos de 1.6 cm de diámetro interno

Rodamientos para ejes	Rodamientos con el eje
	

Tabla 16. Cilindro de 5cm de altura que separa y sostiene los dos rodamientos

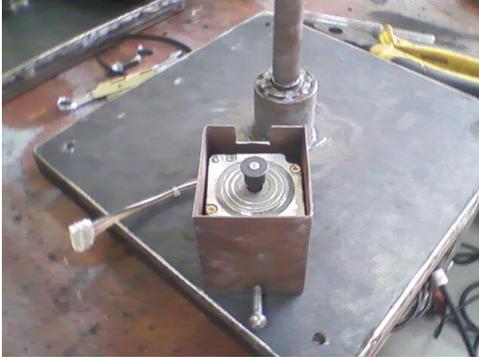
Cilindro de rodamiento y soporte de eje	Cilindro de rodamiento y soporte, vista superior
 A photograph of a cylindrical metal component, likely a bearing housing, showing its side profile. It has a slightly flared top edge and a smooth, metallic finish.	 A top-down view of the same cylindrical component, showing the inner bore and the two bearing seats. The central hole is dark, and the surrounding metal has a slightly worn appearance.

Tabla 17. Polea de 15 cm de largo

Polea de giro vista superior	Polea de acople motor-eje
 A photograph of a black rubber V-belt pulley lying flat on a light-colored surface. The pulley is oval-shaped with a smooth, slightly textured surface.	 A photograph of a hand holding a black rubber V-belt pulley. The pulley is shown in a vertical orientation, highlighting its length and the V-shaped groove on its inner surface.

Esta polea permite unir el piñón del motor con el eje que se ubica en el cilindro de 5 cm en la placa inferior para hacer girar el sistema.

Tabla 18. Caja hecha en láminas que contiene el motor, que a su vez

Caja soporte con motor	Caja con sistema de tensión de polea
	

Esta caja además de contener el motor, está sujeta a la placa inferior y tiene un pequeño sistema de ajuste dado por el tornillo que se ve en las fotografías, el cual permite variar al tensión de la polea.

Estas piezas se acoplan así: las placas inferior y superior están unidas mediante el eje de 15 cm que está contenido dentro del cilindro de 5 cm de altura, que a su vez contiene los dos rodamientos, los cuales permiten la fácil rotación del eje. El motor está contenido en una caja sujeta a la lámina inferior, la cual está ubicada a una altura tal que el piñón del motor quede a la misma altura de la parte perfilada del eje. Esta parte perfilada del eje y el piñón están unidos por la polea, que al movimiento del motor hace mover el eje y éste a su vez la placa superior, y por ende, el parlante que se encuentra sobre ésta.

Tabla 19. Diseño mecánico completo

Diseño completo sin pintar	Diseño completo de dos bases
	

Tabla 20. Sistema electrónico y mecánico completo

Montaje final sin altavoz	Montaje final con altavoz y dispositivo de control	Diseño final con altavoces al aire libre
		

Puesto que ya se estableció todo el sistema que permitirá realizar la reconstrucción del campo sonoro estereofónico, es el momento de contemplar finalmente los elementos que intervienen en el momento de poner en práctica este sistema:

1. Ámbito de medición

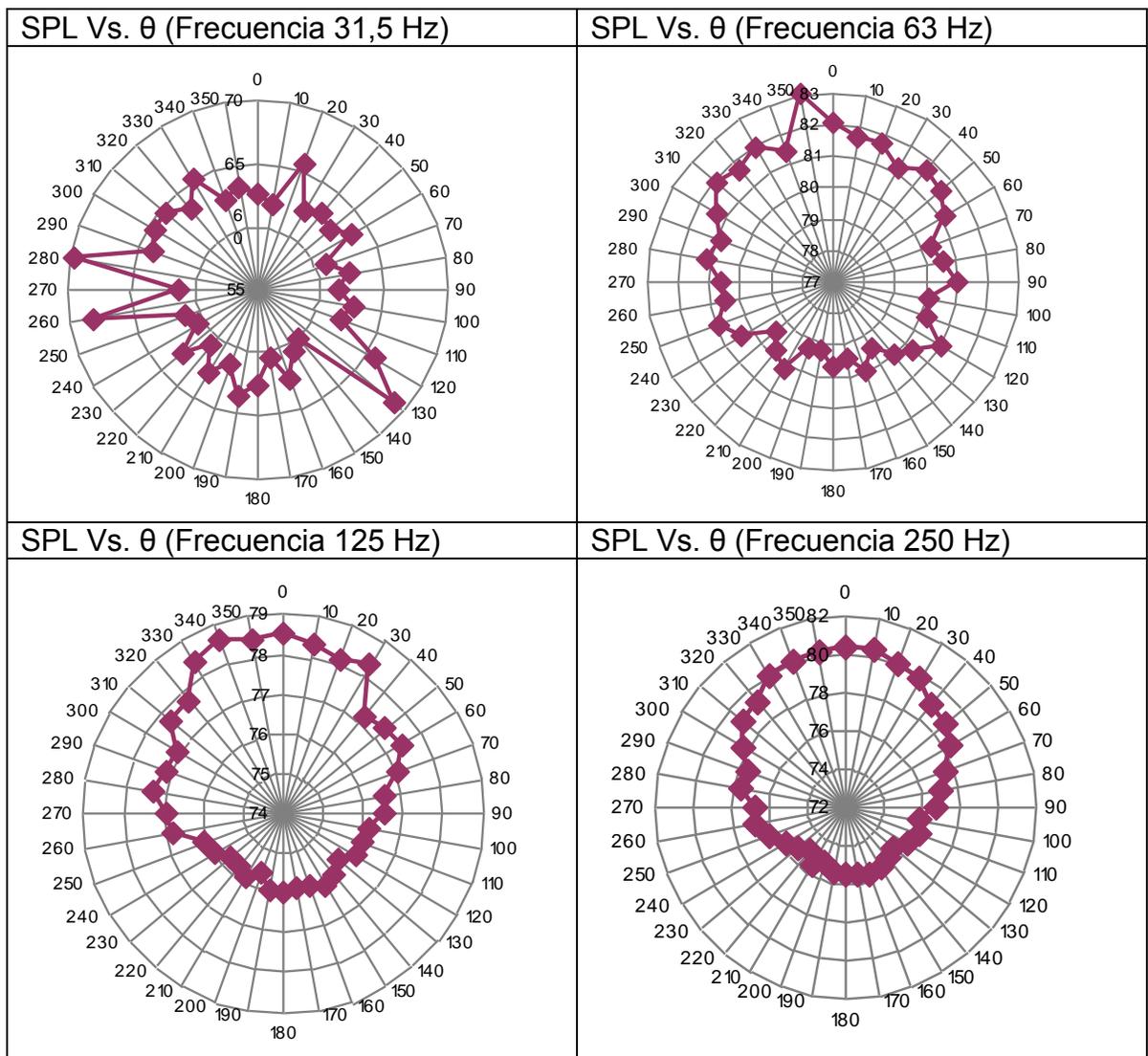
Para verificar el funcionamiento de este sistema, y debido a las condiciones acústicas bajo las cuales fue diseñado, es necesario realizar las pruebas de funcionamiento al aire libre o en una cámara anecoica, puesto que los ajustes de nivel se calcularon en base a una ecuación que, aunque relaciona la distancia con

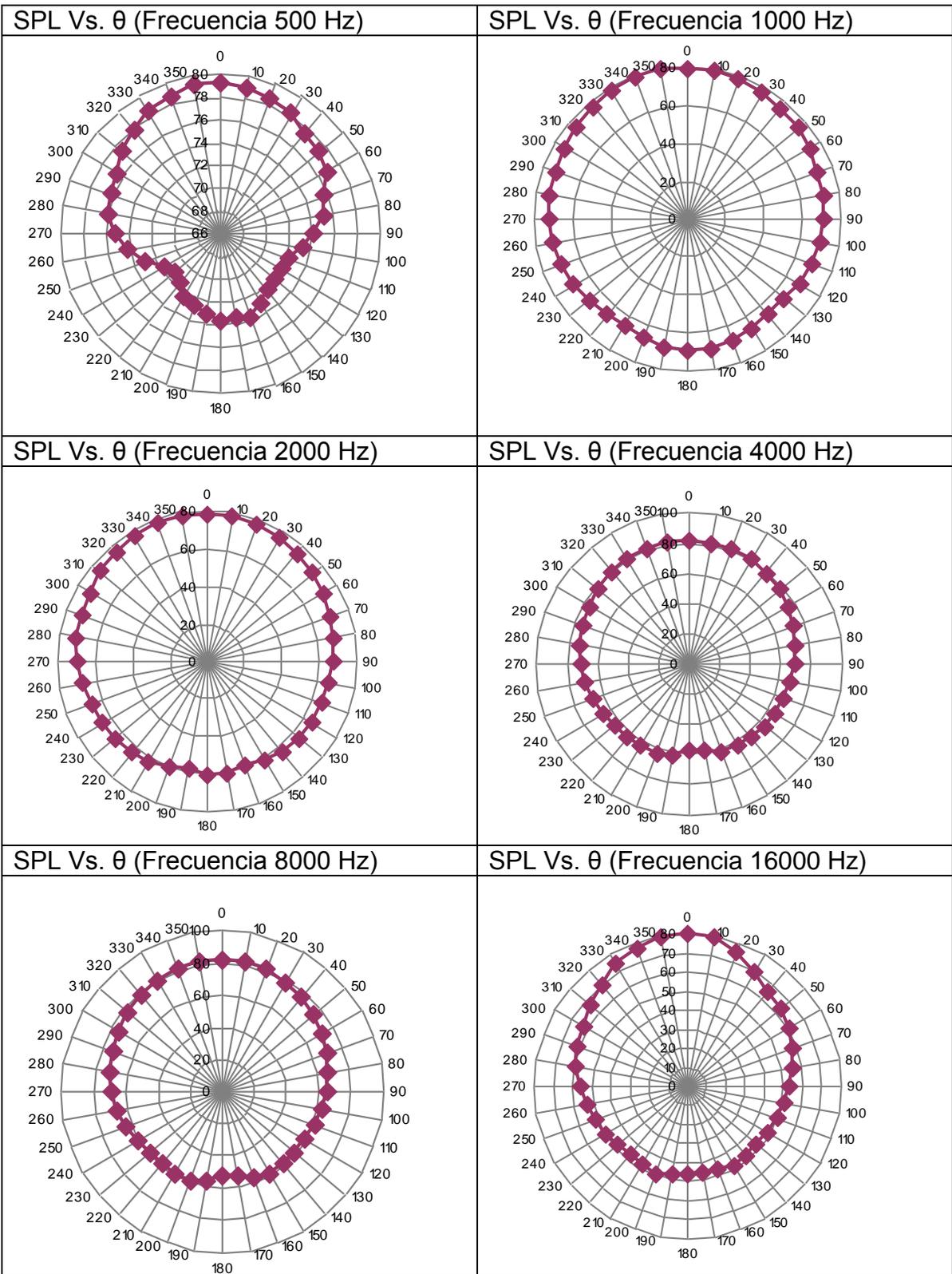
el nivel, aplica para condiciones de campo libre o anecóicas, es decir, sin reflexiones. Esta prueba se realizará en las instalaciones de la Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá.

2. Comportamiento de la fuente sonora

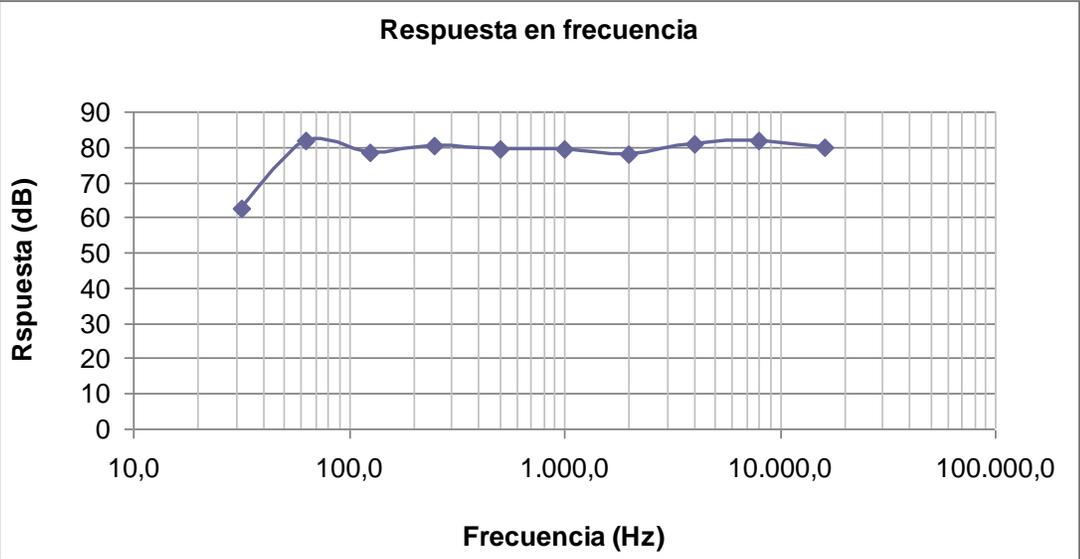
Conjuntamente, se estudió el comportamiento de las fuentes sonoras a usar (KRK RP5), obteniendo su patrón polar y la respuesta en frecuencia por bandas de octava:

Tabla 21. Patrón Polar de los monitores KRK RP5





Gráfica 1. Respuesta en frecuencia de los monitores KRK RP5



6. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Mediciones de verificación en los puntos de intersección ilustrados en la gráfica de radiación general.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la medición objetiva, la cual consiste en medir el nivel sonoro en las diferentes posiciones para cada una de las fuentes y a su vez, la medición de la sumatoria del nivel sonoro emitido entre las dos. Los cálculos se realizaron a través de la siguiente ecuación:

$$SPL=20\text{LOG} (P/P_{REF})$$

Donde

P: presión medida.

P_{REF}: presión de referencia.

Tabla 22. Valores calculados y medidos L, R y L+R

Posición	L Calculado	L Medido	R Calculado	R Medido	L+R calculado	L+R medido
1	76,48	78,5	82,5	83,4	86,02	83,8
2	80	83	85	82,2	88,88	85,7
3	76,48	83,3	78,98	87,8	83,84	82,9
4	77,82	81,5	78,98	87,3	84,44	81,6
5	80	82	83,19	86,7	87,76	83,2
6	83,19	80,2	86,02	87	90,74	82
7	78,98	84	76,48	84,7	83,84	81,3
8 Ref	80	84,2	80	87,2	86,02	82,7
9	81,74	81,8	82,5	87,7	88,15	82,6
10	80,92	84,6	77,82	86,9	85,53	81,1
11	82,5	83,5	81,74	85,9	88,15	81,6
12	83,19	81,5	80	87,2	87,76	85,9
13	82,5	84	76,48	87,2	86,02	77,6
14	85	82,8	80	84,8	88,88	77,4

Tabla 23. Error relativo y error absoluto L, R, L+R

Posición	L Error absoluto	R Error absoluto	L+R Error absoluto	L Error relativo (%)	R Error relativo (%)	L+R Error relativo (%)
1	2,02	0,9	-2,22	2,64	1,09	-2,58
2	3	-2,8	-3,18	3,75	-3,29	-3,58
3	6,82	8,82	-0,94	8,92	11,17	-1,12
4	3,68	8,32	-2,84	4,73	10,53	-3,36
5	2	3,51	-4,56	2,5	4,22	-5,2
6	-2,99	0,98	-8,74	-3,59	1,14	-9,63
7	5,02	8,22	-2,54	6,36	10,75	-3,03
8 Ref	4,2	7,2	-3,32	5,25	9	-3,86
9	0,06	5,2	-5,55	0,07	6,3	-6,3
10	3,68	9,08	-4,43	4,55	11,67	-5,18
11	1	4,16	-6,55	1,21	5,09	-7,43
12	-1,69	7,2	-1,86	-2,03	9	-2,12
13	1,5	10,72	-8,42	1,82	14,02	-9,79
14	-2,2	4,8	-11,48	-2,59	6	-12,92

Como se aprecia en las tablas anteriores, los valores medidos difieren de los calculados en la mayoría de puntos donde se efectuaron las pruebas así: En algunos casos, los valores medidos en L son cercanos a los calculados al igual que en R, sin embargo, al medir el nivel de presión sonora de L+R, no coincidía. En otras ocasiones, los valores calculados en R y/o en L presentan una amplia diferencia respecto a los medidos pero, al medir el SPL de las dos fuentes, su valor se aproxima al calculado. Estas diferencias se deben a varios factores:

1. Sistemáticos:

El sensor cuyo ángulo de cobertura (de 30°) influye en el proceso de ubicación de la persona, ya que el dispositivo realiza mediciones cada 15° lo que significa que una persona puede ser rastreada más de una vez por el sensor, afectando así, la correcta ubicación de los altavoces respecto al receptor. El hecho de poder localizar una persona más de 1 vez (por características propias del sensor), garantiza la zona en la cual se encuentra ubicada la persona. Esto no sucede en los extremos, es decir, en los puntos donde las distancias de los altavoces respecto al receptor tienen gran diferencia o cuando la persona se acerca al límite de medición del sensor (3mts), salvo situaciones donde se hizo pruebas con personas de contextura gruesa. Adicionalmente hay que contemplar las características que posee el instrumento de medición con el cual se llevaron a cabo las pruebas objetivas, SVANTEK 943 A, sonómetro tipo 2 con un factor de precisión de +/- 2dB.

Teniendo en cuenta que el sensor detecta diferencias de distancia cada 17cm y que el control digital de nivel sonoro presenta incrementos o atenuaciones cada 0,22dB (como se explica en el Desarrollo ingenieril) es posible obtener valores diferentes de nivel en comparación a los calculados.

2. Climáticos:

Debido al entorno de medición, dado que esta prueba se debe hacer en condiciones ideales (anecóicas) de las cuales carecen las instalaciones de la Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá; por esta razón, las mediciones se realizaron en la cancha de fútbol de la Universidad. Un factor determinante fue el cambio de temperatura ya que las mediciones se efectuaron en el transcurso de una jornada completa (mañana, tarde y noche); debido a estas circunstancias, hubo cambios notables de nivel de ruido de fondo, afectando del mismo modo los resultados obtenidos.

Figura 17. Prueba objetiva Medición con Sonómetro 1



Figura 18. Prueba objetiva Medición con Sonómetro 2



Figura 19. Prueba objetiva Medición con Sonómetro 3



Figura 20. Prueba objetiva Medición con Sonómetro 4



Método de evaluación subjetivo:

Para el desarrollo de esta prueba, se decidió utilizar la selección de muestras por cuotas, que es un método pseudoprobabilístico que permite elegir una muestra libremente de una determinada población de determinadas condiciones con un tiempo de antelación. Dado que el proyecto se diseñó para personas con un entrenamiento auditivo avanzado, se delimitó una población que cumpliera con estas condiciones (estudiantes de séptimo a décimo semestre de ingeniería de sonido) y luego una muestra representativa a fin de obtener resultados más fieles.

Se escogió una muestra de 10 (diez) personas, que corresponde a un 10 o 20% del total de la población

Los resultados que se muestran a continuación son los obtenidos con la prueba subjetiva, que consistía en la reproducción de un segmento de una canción (Earth Song de Michael Jackson), con la cual se evaluó la efectividad del sistema al reconstruir la imagen. Para ello las personas convocadas, debían escuchar el fragmento en la posición ideal de escucha y luego, seleccionar tres puntos aleatorios dentro de los límites de funcionamiento del sistema

Figura 21. Formato Prueba Subjetiva

Prueba subjetiva proyecto de grado

Nombre: _____

Semestre: _____

Como es bien sabido la ubicación ideal para el receptor dentro de un sistema 2.0 es aquella con la que forma un triángulo equilátero (altavoz L, altavoz R y persona). Cuando el sujeto cambia la posición de referencia por alguna otra, la percepción de la fuente virtual que se crea entre los altavoces cambia.

Por favor indique en la siguiente línea donde percibe la fuente virtual.

Prueba 1

L _____ C _____ R

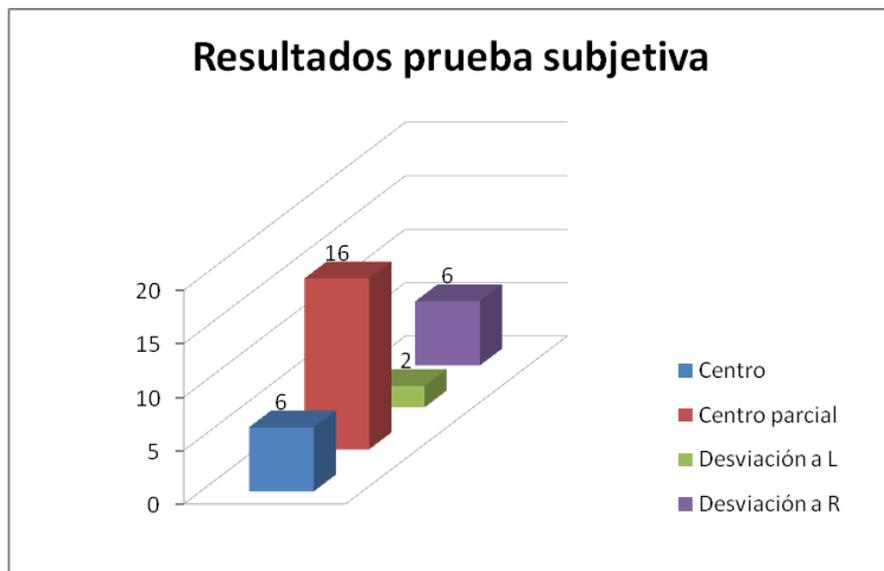
Prueba 2

L _____ C _____ R

Prueba 3

L _____ C _____ R

Gráfica 2. Resultados obtenidos en la prueba subjetiva



A continuación se muestran las fotos que ilustran las diferentes clasificaciones establecidas en la prueba subjetiva a fin de describirla eficiencia del sistema.

Desviaciones a L ó R

Estas desviaciones ocurren cuando la persona está ubicada en los extremos de los límites del sistema, en estos casos, la persona percibe una fuente sonora más fuerte que la otra y por lo tanto, la imagen sonora desviada. Hay puntos en los extremos en los que la persona puede ser ubicada correctamente si es de contextura gruesa, sin embargo, la percepción sonora sigue alterada.

Figura 22. Andrea Torres Respuesta 2 Desviación a L



Figura 23. Felipe Estrada Respuesta 2 Desviación a R



Centro Parcial

Este caso ocurre en posiciones diferentes a los extremos que tienden al centro y no se reconstruye en su totalidad la imagen virtual

Figura 24. Andrés Pachón Respuesta 2 Centro Parcial



Centro

Es cuando el dispositivo reconstruye la imagen sonora en su totalidad

Figura 25. María Ayala Respuesta 1 Centro



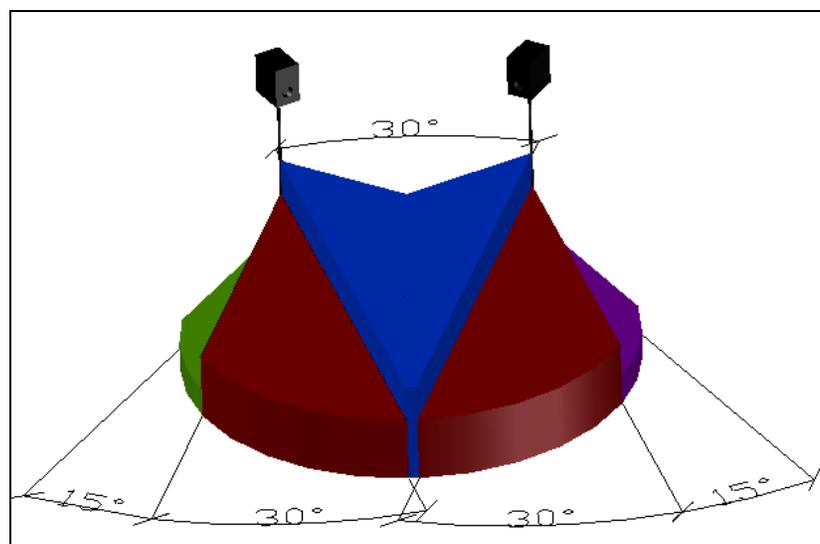
Una posible razón por la cual la imagen sonora no se reconstruyó del mismo modo en todas las posiciones es la distribución espacial de los instrumentos en el fragmento de la canción que se utilizó en la prueba subjetiva puesto que para todas las personas no es fácil localizar fuentes virtuales. Es probable que al cambiar la muestra en la prueba subjetiva, los resultados sean diferentes. Este fragmento se escogió pensando en la popularidad del mismo y en la variedad musical a la cual se enfrenta el receptor en la cual, los elementos implícitos están distribuidos en el espacio a consideración de quienes lo producen.

Reconstruir el campo en posiciones donde la persona se encuentra muy cerca de uno de los altavoces es complicado debido a las distancias y, sin importar el procesamiento que se le aplique a la señal, la imagen no podrá ser restablecida porque el nivel al que se encuentra el altavoz más cercano al sujeto será relativamente más alto.

Otro factor importante es el ruido de fondo ya que como se mencionó anteriormente, las pruebas se efectuaron durante un jornada continua, en donde alrededor del entorno de medición se realizaban actividades (estudiantes en las áreas aledañas, tráfico de automóviles, etc.) simultáneas a las pruebas, haciendo que los niveles que capturaba el sonómetro se vieran alterados puesto que no recibía solamente la información sonora de los altavoces, como se puede ver en la Tabla 22 donde se comparan los niveles medidos y los calculados.

La imagen a continuación, muestra la distribución espacial para cada uno de los casos antes expuestos utilizando para este grafico las mismas convenciones de la grafica de barras de los resultados de la prueba subjetiva.

Gráfica 3. Zonas de posible reconstrucción de la imagen estéreo



- Centro en color azul con 30 grados de cobertura
- Centros parciales en color vinotinto con 60 grados de cobertura
- Desviación a R (altavoz derecho) en color morado con 15 grados de cobertura
- Desviación a L (altavoz izquierdo) en color verde con 15 grados de cobertura

Al comparar los resultados de las dos pruebas realizadas, se puede ver que las fallas sistemáticas del dispositivo han de reflejarse en las dos pruebas, con más relevancia en la subjetiva, donde el material reproducido era aun más fluctuante en su contenido espectral que el utilizado en la prueba objetiva. Además de esto, las habilidades auditivas en las personas que participaron en la prueba subjetiva varían en cierta proporción por factores socio culturales y por constitución física, generando un nivel de incertidumbre dado el tipo de prueba que se realizó para cualificar el desempeño del dispositivo.

7. CONCLUSIONES

Después de diseñar y construir el sistema que permitiera realizar la reconstrucción del campo y comprobando su funcionamiento mediante la recolección de datos de las pruebas subjetivas y objetivas y después de hacer el respectivo análisis de los resultados obtenidos a través de estas, se concluye:

- El sistema demuestra su eficiencia en la capacidad que tiene de hacer ajustes sonoros necesarios para que la imagen sonora se reconstruya, la capacidad de activar un sistema electromecánico que permita hacer giros calculados y obedecer a órdenes de localización basados en mediciones realizadas por un sensor ultrasónico
- El diseño de los circuitos permitió que el sistema funcionara sin restricción alguna dentro de sus límites ya mencionados. No presenta problemas de sobrecalentamiento y la programación realiza las tareas que se le asignaron.
- El sensor tiene mayor efectividad en las zonas de centro y centro parcial debido a que un 73 % de la población acertó con haber sentido la imagen en el centro; para las demás zonas, no funciona muy bien debido al alcance que este tiene. Aunque el fabricante indique que funciona hasta 3m, se pudo comprobar en la prueba objetiva, como se indica en la tabla 23 que para distancias mayores de 2 metros (posiciones 2-6-13-14) el sensor presenta dificultad al encontrar el receptor y por ende las variaciones de nivel no son las adecuadas, notándose en los valores más altos de error relativo correspondientes a la posiciones antes mencionadas. En la prueba subjetiva se verificó tal limitación con personas de contextura delgada que se encuentren en posiciones distantes al sistema, ubicadas en las zonas de desviación a L y R (ver grafica 3).
- Se concluye que el sistema es capaz de hacer la reconstrucción de la imagen en un ángulo de cobertura de 30° para centros y de 60° para centros parciales con un total de cobertura de 90° , teniendo en cuenta que la cobertura general del sistema es de 120 grados.
- La imagen sonora no se reconstruirá en los casos donde el receptor esté demasiado cerca a uno de los altavoces. Aunque el sistema hará la tarea de localización y ajuste de nivel, la percepción de la imagen sonora estará distorsionada respecto a la inicial
- En la prueba subjetiva, todas las personas encuestadas experimentaron reconstrucción de la imagen sonora, y esto se notó en al menos una de las

pruebas que cada uno realizó, según lo que respondieron, esto representa el 73% de efectividad del dispositivo. De este 73%, el 20% manifiesta reconstrucción total de la imagen y el 53% restante, reconstrucción parcial, lo cual permitió establecer las zonas de centro y centro parcial en la gráfica de análisis de la evaluación subjetiva.

- El sistema puede presentar un porcentaje mínimo de error, debido a la manera en la que se hayan distribuido los sonidos en el material sonoro. Ya que para el receptor es más fácil identificar sonidos que virtualmente se perciben en el centro del material que aquellos que han sido distribuidos hacia los lados o paneados al momento de mezclar una canción.
- La inestabilidad que se presentaba por la forma irregular de la superficie donde se encontraba el sistema representó una pérdida de efectividad debido a que las bases se inclinaban y por esta razón había mayor esfuerzo en la etapa mecánica, pues el movimiento del motor era más forzado e impedía el desplazamiento a las posiciones según se indicó en el algoritmo de programación
- Los factores climáticos y el ruido de fondo fluctuante fueron determinantes durante el desarrollo de la prueba objetiva ya que al momento de comparar los datos obtenidos del medidor de nivel sonoro y los calculados, se presentaron diferencias en algunos puntos con errores relativos no superiores al 15%. Este margen de error se debe también a aspectos como cancelaciones de contenido espectral en mediciones donde los dos altavoces estaban encendidos y en casos donde el sistema no realizaba el ajuste de nivel debido a las restricciones presentadas por el sensor.

8. RECOMENDACIONES

Para un mejor funcionamiento del sistema y una calibración adecuada se debe tener en cuenta las siguientes indicaciones:

En el momento de poner en funcionamiento el sistema se recomienda que la persona adopte una postura adecuada, mirando siempre el parlante que se encuentre en movimiento y tratando al máximo de no ubicarse de medio lado, aun cuando se trate de una persona de contextura gruesa. Adicionalmente, para mayor precisión la calibración del sistema deberá ser realizada parlante por parlante, obteniéndose de este modo una mayor exactitud de la ubicación del mismo respecto al receptor.

Con respecto a la construcción física del sistema se recomienda para una mejor manipulación del mismo, elaborar un control remoto que active el sistema evitando que la persona tenga que desplazarse del lugar donde se encuentra. Así mismo, un diseño mejorado de las bases que soportan el sistema, que tenga adaptabilidad en cualquier tipo de terreno, dado que no siempre han de encontrarse superficies totalmente planas y esto le quita efectividad al sistema

Teniendo en cuenta que hay un sistema de control de procesos independiente para cada altavoz, se aconseja utilizar un microcontrolador con mayor capacidad que el utilizado en este proyecto que permita controlar todos los procesos desde un circuito maestro y que a su vez, le permita al desarrollador extender el número de tareas y procesos a realizar.

Por ultimo como se menciona en el trascurso del documento, este sistema actualmente esta diseñado y es funcional para entornos al aire libre. Si en algún momento se desee implementar este sistema en un recinto cerrado, es importante tener en cuenta que debido al cambio de entorno seria necesario considerar las características físicas del mismo y por ende, la ecuación que relaciona los ajustes de nivel respecto a la distancia seria diferente a la que para este proyecto se utilizó, haciéndose necesario un cambio en la programación del sistema. Por las condiciones del sistema de medición, las cuales tiene un corto alcance (máximo 3 mts), se recomienda que la aplicación para recinto cerrado se haga mediante la implementación del dispositivo para sistemas de audio caseros y por ende hogares o lugares pequeños donde el sistema de medición por ultrasonido logre abarcar las dimensiones de los recintos. Adicionalmente se sugiere la adaptación de una etapa que permita la corrección de la fase del sistema realizado en este proyecto, ya que como se ve en las tablas de análisis de resultados en algunos de los puntos se presentaron grandes diferencias entre los valores calculados y los medidos (Tabla 23 posiciones 2-6-13-14) debido a posibles cancelaciones de fase en especial en baja frecuencia.

BIBLIOGRAFÍA

BERSTEIN, Claudio. Efecto proximidad en micrófonos. Todo música S.A. Ley del inverso cuadrado [en línea]. Lugar de publicación desconocido. s.f. renglones 36-45. Disponible en: <<http://www.todomusicaweb.com.ar/EditorialesNotasDetalle.asp?cod=115#>>

CABANES, Nacho [en línea]. Lugar de publicación desconocido. Septiembre de 1999. Actualizado en Enero de 2009. Renglones 14-21. Disponible en: <<http://ciberia.ya.com/nachocabanes/asm.htm>>

GONZÁLES, Juan. Grabación de microcontroladores PIC [en línea]. Lugar de publicación desconocido. 28 de Diciembre de 2003. Actualizado en Septiembre de 2004[87renglones]. Disponible en: <<http://www.learobotics.com/proyectos/cuadernos/ct4/ct4.html#introduccion>>

Lenguaje de programación C [en línea]. La plata (Buenos Aires): Agustin Marcoff, Mayo 2007. Disponible en: <<http://chorirama.blogspot.com/2007/05/lenguaje-de-programacin-c-c-es-un.html>>

NN, David. Introducción a los microcontroladores [en línea]. Lugar de publicación desconocida. s.f. Capitulo I. Controladores y microcontroladores. Disponible en: <<http://www.monografias.com/trabajos12/microco/microco.shtml>>

PÉREZ, Diego. Sensores de distancia por ultrasonido [en línea]. Lugar de publicación desconocido. s.f. p.1-6. Disponible en: <<http://www.depeca.uah.es/alcabot/seminario2006/Trabajos/EduardoGalanFernandez.pdf>>

POCH, Serafina. Compendio de Musicoterapia. Barcelona: Empresa Editorial Herder S.A., 1999. Vol. 1.

Sonido Tema 1: Acústica [en línea]. Lugar de publicación desconocido .s.f. p.1-2. Disponible en: http://platea.pntic.mec.es/~lmarti2/SONIDO%20_STI_.pdf

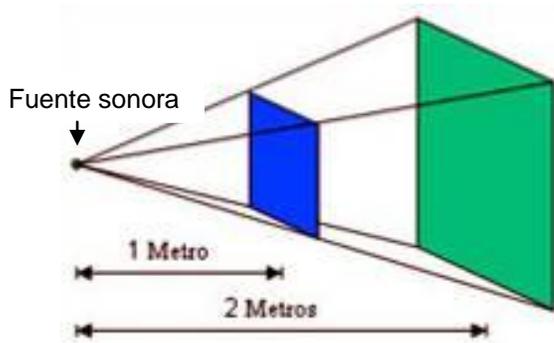
ILDEFONSO ABASCAL, Elena Grande Esteban. Análisis de Encuestas. Pozuelo de Alarcón (Madrid). ESIC EDITORIAL. 2005. p. 75.

CONNOR, Dale C. Automatic Audio Level Control. Audio Eng. Soc., Paper 443.

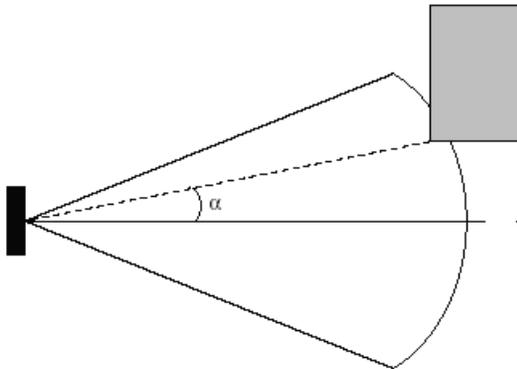
KLINGER, Joseph G. Controlled Imaging: A Format for Stereo Reproduction. Audio Eng. Soc., Paper 1903.

ANEXOS

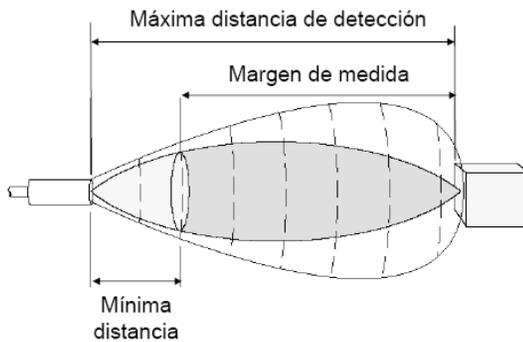
Anexo A. Representación de la ley del inverso cuadrado



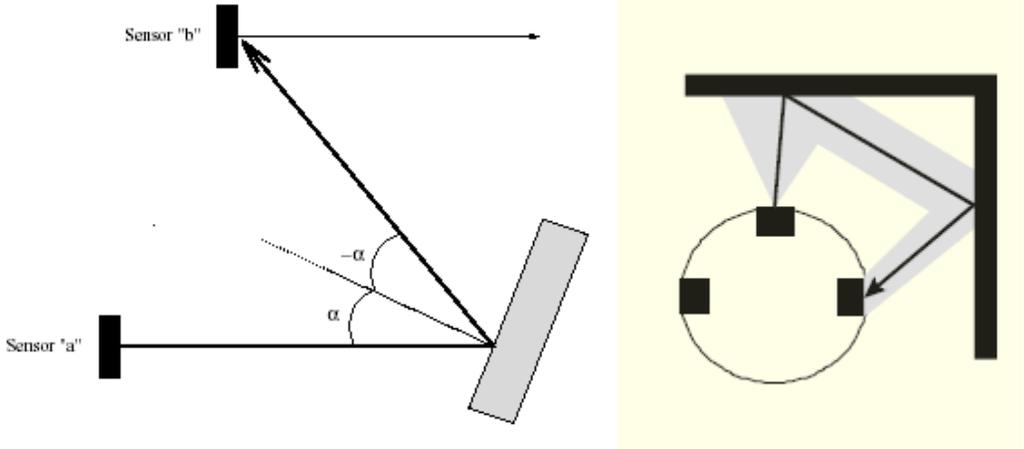
Anexo B. Incertidumbre angular en la medida de un ultrasonido



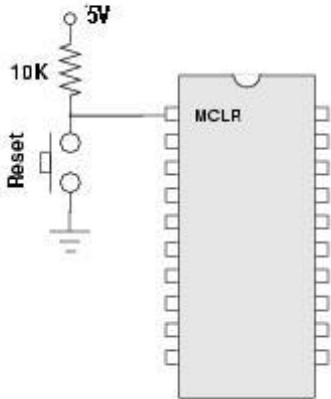
Anexo C. Comportamiento de los sensores que tienen un solo transductor emisor-receptor.



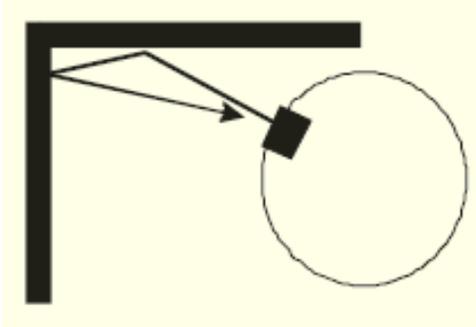
Anexo D. Falsos ecos: El sensor "a" emite el pulso que recibe el sensor "b"



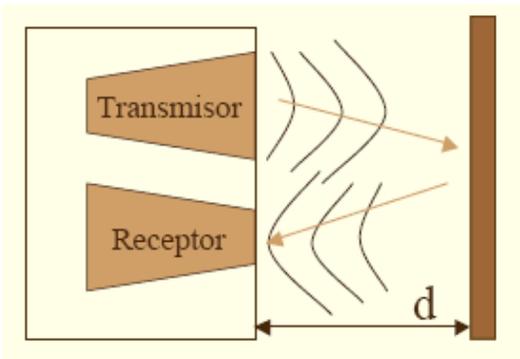
Anexo E. Circuito para hacer que el PIC entre en modo monitor



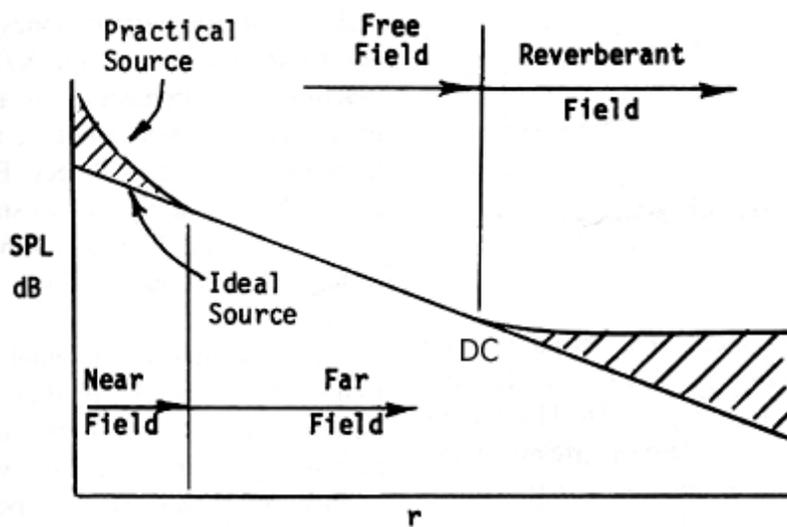
Anexo F. Comportamiento de una onda ultrasónica



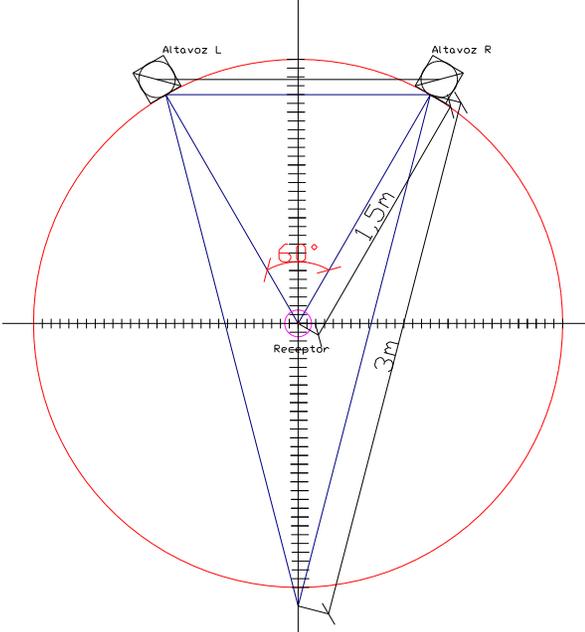
Anexo G. Funcionamiento básico de los ultrasonidos como medidores de distancia



Anexo H. Campo Sonoro



Anexo I. Sistema 2.0



Anexo J. Configuración del sonómetro

Header information:

```
-----
Device type ..... SVAN 943A
Serial No. .... 5183
Internal software version ... 5.11
File system version ..... 5.11
-----
```

```
-----
Original file name ..... @P00
Associated buffer name ..... Buffer_1
Measurement hour ..... 11:18'52
Measurement day ..... 10/04/20
Device function ..... OCTAVE 1/3
-----
```

Title text:

```
-----
Input ..... Microphone
Mic. polarization ..... 0 V
Measurement range ..... 130 dB
Leq integration ..... Linear
Trig. mode ..... OFF
Start delay ..... 2 s
Integration time def. .... 1 m
Repetition cycle ..... 1
Octave 1/3 lines ..... 30+3
Octave 1/3 filter ..... Lin
Octave 1/3 in buffer ..... OFF
Number of histograms ..... 0
Calibration type ..... Sensitivity
Calibration time ..... 17:07'54
Calibration date ..... 10/04/15
Rotation measurement ..... OFF
-----
```

Profile:	#1	#2	#3
Weighting filter	Lin	A	C
Detector type	Slow	Slow	Slow
Buffer contents definition ..	RMS	RMS	RMS
Calibration factor	-0.1 dB	-0.1 dB	-0.1 dB