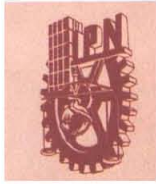


# **INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**



**Centro de Investigación en Computación**



## **TEORÍA, DISEÑO, PROGRAMACIÓN, REALIZACIÓN, Y PUESTA EN MARCHA DE UN ESPACIALIZADOR ACÚSTICO COMPUTARIZADO**

**TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN  
COMPUTACIÓN ELECTRÓNICA**

**PRESENTA**

**CÉSAR PÉREZ CÓRDOVA**

**Director de tesis:**

**DR. MARIO PÉREZ CORTÉS**

**Codirector:**

**DR. LUIS PASTOR SÁNCHEZ FERNÁNDEZ**

**Mayo de 2003**

## **FIGURAS Y TABLAS**

<b>Figura 1.1</b>	<b>25</b>
<b>SPATIALIZER de “Spatializer Audio Laboratories Inc.”</b>	
<b>Figura 1.2</b>	<b>26</b>
<b>Dimensional Space Reverb y Dimensional Space Delay. Roland. CANADA</b>	
<b>Figura 1.3</b>	<b>27</b>
<b>Espacializador experimental del IRCAM</b>	
<b>Figura 1.4</b>	<b>28</b>
<b>El músico Karlheinz Stockhausen durante una presentación con sonido espacial en el IRCAM del Centro Georges Pompidou</b>	
<b>Figura 1.5</b>	<b>28</b>
<b>El Convolotrón de la NASA</b>	
<b>Figura 1.6</b>	<b>31</b>
<b>Altura o tono</b>	
<b>Figura 1.7</b>	<b>31</b>
<b>Intensidad o volumen</b>	
<b>Figura 1.8</b>	<b>31</b>
<b>Timbre</b>	
<b>Figura 1.9</b>	<b>34</b>
<b>El oído</b>	
<b>Figura 1.10</b>	<b>37</b>
<b>Modulación de amplitud</b>	

<b>Figura 1.11</b>	<b>38</b>
<b>Sonido principal y primeras reflexiones</b>	
<b>Figura 1.12</b>	<b>41</b>
<b>Reproducción estereofónica</b>	
<b>Figura 1.13</b>	<b>42</b>
<b>Reproducción multicanal</b>	
<b>Figura 1.14</b>	<b>42</b>
<b>Reproducción binaural</b>	
<b>Figura 2.1</b>	<b>48</b>
<b>Diseño conceptual</b>	
<b>Figura 2.2</b>	<b>52</b>
<b>Distribución del volumen</b>	
<b>Figura 2.3</b>	<b>53</b>
<b>Distribución de volumen en planos sonoros</b>	
<b>Figura 2.4</b>	<b>54</b>
<b>Efecto dinámico</b>	
<b>Tabla 2.5</b>	<b>55</b>
<b>Distribución del volumen</b>	
<b>Figura 2.6</b>	<b>56</b>
<b>Diagrama del programa de espacialización</b>	

<b>Tabla 2.7</b>	<b>58</b>
<b>Trayectorias disponibles</b>	
<b>Tabla 2.8</b>	<b>60</b>
<b>Trayectoria en el espacio</b>	
<b>Tabla 2.9</b>	<b>60</b>
<b>Trayectoria sobre un plano</b>	
<b>Tabla 2.10</b>	<b>60</b>
<b>Trayectoria sobre un eje</b>	
<b>Tabla 2.11</b>	<b>61</b>
<b>Punto estacionario</b>	
<b>Figura 2.12</b>	<b>66</b>
<b>Descripción gráfica del espacializador</b>	
<b>Figura 2.13</b>	<b>67</b>
<b>Espacializador visto desde el frente</b>	
<b>Figura 2.14</b>	<b>68</b>
<b>Parte posterior (bocinas 5, 6, 7, 8)</b>	
<b>Figura 2.15</b>	<b>69</b>
<b>Cableado de interconexión</b>	
<b>Figura 3.1</b>	<b>73</b>
<b>Borradores de una fase de diseño</b>	
<b>Tabla 3.2 Fragmento de la programación de la secuencia de demostración</b>	<b>74</b>



# ÍNDICE

<b>FIGURAS Y TABLAS</b>	<b>1</b>
<b>GLOSARIO</b>	<b>5</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>8</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>9</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>10</b>
<b>Antecedentes.</b>	<b>10</b>
<b>La importancia de este trabajo</b>	<b>12</b>
<b>Justificación</b>	<b>13</b>
<b>Objetivos</b>	<b>13</b>
<b>Alcance</b>	<b>14</b>
<b>Problemas y aportaciones científicos y tecnológicos</b>	<b>15</b>
<b>Hipótesis</b>	<b>16</b>
<b>Valor práctico del trabajo</b>	<b>17</b>
<b>Contenido del documento</b>	<b>18</b>
<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>20</b>
<b>ESTADO DEL ARTE</b>	
<b>1.1 Investigaciones y proyectos actuales</b>	<b>20</b>
<b>1.1.1 Investigaciones</b>	<b>20</b>
<b>1.1.1.1 Teoría Duplex de Rayleigh</b>	<b>21</b>
<b>1.1.1.2 Investigaciones de Batteau sobre localización vertical</b>	<b>22</b>
<b>1.1.1.3 El efecto Clifton y la idea de amplitud y distancia</b>	<b>23</b>
<b>1.1.1.4 Bases físicas</b>	<b>23</b>
<b>1.1.1.5 Bases biológicas (Neurofisiología)</b>	<b>24</b>
<b>1.1.2 Proyectos recientes y actuales</b>	<b>24</b>
<b>1.2 Áreas del conocimiento relacionadas</b>	<b>30</b>

1.2.1 Física, Biología y Psicología	30
1.2.1.1 El sonido	30
1.2.1.2 Cualidades del sonido	30
1.2.1.3 Estudio del sonido (Acústica)	31
1.2.1.4 Percepción del sonido	34
1.2.1.5 Reproducción del sonido	41
1.2.2 Geometría Analítica	43
1.2.3 Lenguaje de programación Visual Basic	44
1.3 Áreas de aplicación	44
1.4 Conclusiones del estado del arte	46
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>48</b>
<b>DISEÑO DEL SOFTWARE</b>	
2.1 Diseño conceptual	48
2.2 Planteamiento matemático	49
2.3 Programa computacional	55
2.3.1 Diagrama del programa de espacialización	56
2.3.2 Ejemplos de ejecución de trayectorias individuales	59
2.3.3 Efecto de distancia	61
2.3.4 Volumen matemático y volumen acústico	62
2.3.5 Descripción de las subrutinas principales del programa	62
2.4 Realización física	66
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>71</b>
<b>DISEÑO DE LA APLICACIÓN</b>	
3.1 Intercambio de ideas e información con el artista	71
3.2 Análisis de la obra a espacializar	72
3.3 Diseño de la secuencia de espacialización	72
3.4 Programación de la secuencia	73

<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>75</b>
<b>PRUEBAS EXPERIMENTALES Y EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS</b>	
<b>4.1 Volumen matemático y volumen acústico</b>	<b>75</b>
<b>4.2 Desempeño general del modelo</b>	<b>77</b>
<b>4.3 Prueba del mecanismo humano de localización</b>	<b>81</b>
<b>4.4 Importancia de la valoración</b>	<b>83</b>
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>85</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>88</b>
<b>ANEXOS</b>	
<b>A. Código fuente</b>	<b>91</b>
<b>B. Cronograma de la secuencia de demostración del espacializador</b>	<b>100</b>
<b>C. Lista de proyectos, referencias y sitios web compilada por la         Universidad de San José Cal.</b>	<b>107</b>

<b>Tabla 4.1</b>	<b>76</b>
<b>Volumen matemático y volumen acústico</b>	
<b>Figura 4.2</b>	<b>77</b>
<b>Puntos extremos de la trayectoria.</b>	
<b>Figura 4.3.</b>	<b>78</b>
<b>El punto sonoro ha recorrido 14 pasos</b>	
<b>Figura 4.4.</b>	<b>78</b>
<b>El Pi actual aún está en el plano YZ</b>	
<b>Figura 4.5.</b>	<b>79</b>
<b>El Pi actual ya está en el plano XZb</b>	
<b>Figura 4.6.</b>	<b>79</b>
<b>Pi está cerca de cambiar a otro plano</b>	
<b>Figura 4.7.</b>	<b>80</b>
<b>Pi actual se encuentra ahora en el plano XY</b>	
<b>Figura 4.8.</b>	<b>80</b>
<b>La trayectoria ha concluido</b>	
<b>Figura 4.9</b>	<b>82</b>
<b>Prueba de localización horizontal de un sonido real en ambiente natural</b>	
<b>Figura 4.10 Prueba de localización vertical de un sonido real en ambiente natural</b>	<b>82</b>

## RESUMEN

Un espacializador (del inglés “spatializer”, del francés “spatialisateur”) acústico es un sistema consistente en equipo de cómputo, equipo sonoro y elementos de interconexión física, que funciona bajo el control de un programa computacional que al operar en conjunto, es capaz de crear a un escucha la sensación de que está recibiendo un sonido producido por una fuente ubicada en cualquier lugar del espacio.

El espacializador motivo de este trabajo, está basado en un desarrollo teórico del autor. Fue construido conjuntando un reproductor de disco compacto que envía los sonidos a espacializar, cuatro computadoras conectadas en red que lo reciben y procesan de acuerdo a un programa basado en la teoría y cuatro amplificadores que envían el sonido procesado a 8 bocinas ubicadas en los vértices de un prisma rectangular en cuyo interior se lleva a cabo el efecto sonoro.

Aunque un espacializador puede tener diversas aplicaciones en investigación médica, educación, entretenimiento, etc., la motivación principal de este trabajo fue la de desarrollar un sistema que pudiera ser utilizado por los músicos contemporáneos para experimentar las posibilidades del sonido espacial en sus composiciones. Es por ello que gran parte del trabajo se dedica a explicar la manera en que se espacializa una obra musical; incluso para quien esté interesado en analizar las trayectorias de la demostración, aunque no cuente con el espacializador puede escuchar la música grabada en el disco compacto en un reproductor que tenga contador de tiempo y seguir los comandos que aparecen en el código.

Con la intención de describir lo más claro posible el proyecto se incluyen en el documento algunas de las investigaciones y teorías que han quedado como piedras angulares, luego una serie de conceptos básicos sobre sonido, percepción y reproducción indispensables para comprender la parte teórica y finalmente la propuesta en versiones conceptual, matemática, computacional y física. A pesar de que el espacializador ya está en funcionamiento, tiene algunas deficiencias relacionadas principalmente en la carencia de equipo más eficiente.

## **ABSTRACT**

An acoustic spatializer is a computer, sound equipment and connector system that operate under control of a computer program based in a mathematical model which whole operation create the sensation of hearing a sound coming from space.

The spatializer described in this document is based in a theoretical development of the author and it was constructed jointing a CD player that sends the sound, a four computers network that receive and process it following a program based in the theory and finally four amplifiers that send the processed sound to eight speakers placed in the vertexes of a rectangular prism, inside which occurred the sounding effect.

A spatializer can be dedicated to several applications, medical, education, entertainment, etc.. The main goal of this work was its application by contemporary music, this is the reason because a lot of the work is dedicated to explain the way to spatialize a musical piece. An interested person interested can hear the music of the demonstration and visualize code commands simultaneously.

The document includes the main researches to date, basic concepts about sound, perception and reproduction necessities to understand the theory as well as the proposal in conceptual, mathematical, computational and physical versions.

# INTRODUCCIÓN

## **Antecedentes.**

A mediados del siglo XIX, el físico, filósofo y psicólogo alemán Gustav Theodor Fechner [13] (1801-1887), sentó las bases de la psicofísica y de la psicología experimental que permitieron investigaciones posteriores sobre psicoacústica y sobre los mecanismos humanos de localización;

Su obra más destacada: *Elementos de psicofísica* (1860), influyó grandemente en el estudio de la sensación y la percepción, no sólo por la teoría ahí expuesta, sino por el método experimental que reveló. Basándose en la “Ley de Weber” (Ernst Heinrich Weber) que estipula que las excitaciones son proporcionales a las sensaciones (conclusiones eminentemente empíricas), desarrolló la llamada Ley de Fechner, que establece la relación cuantitativa que hay entre las sensaciones psíquicas y los estímulos físicos que las originan, uno de los principios básicos de la percepción en la actualidad. Para demostrar la validez de su ley, desarrolló pruebas metodológicas con las que dio inicio la aplicación de técnicas de laboratorio para estudiar fenómenos psíquicos, denominada psicología experimental.

Los experimentos principales que realizó Fechner sobre las sensaciones auditivas fueron sobre dos características cuantificables: La fuerza (intensidad) que depende de la amplitud de las vibraciones, y el tono, que depende de su frecuencia.

Dividiendo el mundo corporal en dos partes: mundo corporal interno o fisiológico y mundo corporal externo o físico, Fechner distingue dos partes de la psicofísica: la interna y la externa. La psicofísica interna tiene por objeto el estudio de las relaciones entre el alma y el cuerpo, es decir, la relación de los fenómenos psicológicos con los fisiológicos. La psicofísica externa, en cambio, tiene por objeto el estudio de las relaciones del alma con el mundo físico; es la ciencia de la medida de las sensaciones.

Fechner dejó plasmados estos conceptos en su obra “Elementos de la Psicofísica” la que entre otros, incluye los siguientes capítulos:

Consideraciones generales de la relación entre el cuerpo y el alma.

El concepto de la psicofísica

Los conceptos concernientes a la sensación y los estímulos

La medida de la actividad física: energía cinética

El principio de la medida de la sensibilidad

Hace poco menos de medio siglo, *Michael Kelly*, de la Universidad de York, Inglaterra describió el llamado “efecto de la fiesta de cocktail”, el cual explica la habilidad humana para dirigir su atención a una simple fuente sonora dentro de un ambiente en que compiten varias fuentes. Bajo ciertas condiciones, fragmentos de señales pueden ser desechadas sin crear un efecto perceptible y otros ser unidos para formar una idea, proceso llamado *ilusión de continuidad*. De esta manera podemos distinguir lo que alguien está diciendo de nosotros entre un grupo de personas que está hablando.

En 1978, un sistema de cintas auditivas fue lanzado por el laboratorio del psicofísica de la universidad de Harvard. Estas demostraciones fueron preparadas por un equipo conducido por profesor David M. Green y patrocinadas por la National Science Foundation. El sistema contiene 20 demostraciones de psicoacústica dentro de las que se encuentran las siguientes:

- Respuesta del oído a la frecuencia
- Escalamiento de la Intensidad
- Asimetría de tonos pulsados
- Enmascaramiento posterior y delantero
- Influencia del ruido
- El emparejamiento de la octava
- Escalas lineales y logarítmicas de tono
- Efecto del tono en el timbre
- Distorsión
- Efectos de ecos
- Efectos binauriculares
- Lateralization Binauricular
- Ilusión Auditiva



En 1995, El Instituto de Investigación sobre Acústica y Música (IRCAM) dependiente del Centro Georges Pompidou de París puso en operación un espacializador con fines de investigación musical. Un restringido grupo de músicos dirigidos por el compositor Karlheinz Stockhausen trabajan en él. Recientemente han surgido otros proyectos similares con diversos fines.

## **La importancia de este trabajo.**

El intento de crear una nueva interfaz humana para sistemas de cómputo consistente en un sistema de audio mejorado para aplicaciones de multimedia y realidad virtual, puede ser una tarea mental difícil y frustrante por la complejidad del problema y la participación del humano, uno de los peores perceptores acústicos de la especie animal tanto por sus limitaciones anatómicas como por su desarrollo evolutivo, sin embargo, el objetivo primario es muy simple: reproducir el sonido natural que nos rodea en la misma forma que éste ocurre, pero atrás de ello hay algo que justifica cualquier esfuerzo; la posibilidad de **tomar el control en la reproducción sonora espacial** para simular fenómenos que no se limiten a los que ocurren en la naturaleza.

Contrastan los limitados avances en audio con los logrados en vídeo para los equipos de cómputo, y es que el canal visual es el sentido de percepción más importante, el principal y más desarrollado receptor de información del ser humano; además durante mucho tiempo la preocupación del sonido digital se orientó hacia los músicos y los juegos de vídeo que buscaron la riqueza de timbres y voces, y no la manipulación de espacios virtuales, esto explica el desarrollo relativamente limitado que hay sobre sonido espacial, cuya tecnología es celosamente guardada por los pocos desarrolladores.

Son diversos los problemas que involucra cualquier intento de desarrollo de sonido espacial considerando que ya se tenga un desarrollo teórico sustentado, pues es necesario reproducir varios fenómenos con la mayor precisión posible como el manejo de volúmenes, retrasos de arriba entre un oído y otro de fracciones de milésima de segundo, simulación de reflexiones

sonoras, selección de sonidos con las cualidades sonoras más susceptibles de espacializar como rangos de frecuencia, formas envolventes, timbres, etc.

Esta problemática incide en el factor económico que a veces puede substituirse con imaginación. El último problema a enfrentar es el objetivo mismo del proyecto: la percepción sonora del humano plagada de elementos degenerativos como zonas de confusión, inmovilidad del pabellón del oído, deformaciones psicoacústicas producto de concepciones de los primeros seres humanos: “si escucho un sonido y no veo de dónde proviene, debe venir de atrás de mí”, razonamiento elemental de sobrevivencia.

La importancia de este proyecto radica en la posibilidad de ofrecer a compositores de vanguardia una herramienta en torno a la cual se pueda realizar un trabajo interdisciplinario en el que se prueben hipótesis, se generen ideas y nuevos proyectos.

## **Justificación.**

Aunque ya existen espacializadores acústicos en diversas partes, no hay manera de conocer las teorías utilizadas en ellos, que son guardadas celosamente por las empresas dueñas de la tecnología. Las alternativas que nos quedan son: convertirnos en dependientes tecnológicos y consumidores de productos, o desarrollar una tecnología propia que podamos utilizar sin ninguna limitación y a la cual le podamos hacer los cambios que se requieran.

## **Objetivos.**

El objetivo general de este proyecto consiste en construir un espacializador acústico basado en un sistema de cómputo electrónico que conectado a un equipo de audio, logre reproducir el efecto tridimensional en un grado apreciable y cuyo costo esté al alcance de cualquier institución de enseñanza e investigación musical. Su cumplimiento depende de los objetivos particulares que se mencionan a continuación:

Buscar una teoría, o desarrollar una propia, que incluya los elementos principales del fenómeno acústico y sirva de fundamento al proyecto.

Traducir esta teoría a un programa computacional que realice los procesos necesarios y envíe las señales al equipo de audio.

Integrar el sistema de cómputo-audio requerido, con componentes existentes en el mercado que bajo el control del programa computacional realicen las funciones deseadas.

Realizar pruebas para evaluar su funcionamiento y la posibilidad de ser usado por músicos con breve capacitación sobre la operación de sistemas computacionales.

## **Alcance.**

El sistema a desarrollar generará los elementos más importantes que utiliza el mecanismo humano de localización. No incluirá equipos especiales de retardo y reverberación porque el modelo abierto utilizado crea fuentes sonoras virtuales en las posiciones deseadas a diferencia de los modelos cerrados en que el sonido es reproducido con dos audífonos.

El equipo de cómputo consiste en 4 computadoras modestas en su velocidad de proceso, lo que impide por ejemplo crear una trayectoria circular en torno al escucha que tarde menos de 1 segundo; pero esto se resuelve con la pura sustitución de los equipos por otros más poderosos, es un problema de orden puramente económico.

Los equipos de audio (amplificadores y bocinas) son de calidad intermedia y de una potencia que permitirán ampliar el espacio de reproducción de sonido espacial a un prisma rectangular de 50 x 50 metros de base y 50 metros de altura (que es difícil de lograr).

En esta primera versión se incorpora un número limitado de trayectorias, sin embargo, es muy fácil incorporar nuevas trayectorias. Por la manera en la que queda la información

procesada, no existe una restricción de duración de orden práctico, fácilmente puede espacializarse una pista de 2 horas.

## **Problemas y aportaciones científicos y tecnológicos.**

**Extensión de la estereofonía a 3 dimensiones.** La primera idea que surgió para crear un modelo de espacialización fue la extensión del sistema unidimensional estereofónico a uno tridimensional. Durante el proceso de extensión surgieron varias alternativas en la forma de implementación que llevaron a la creación de dos modelos muy parecidos, ambos fueron contruidos totalmente y llevados hasta la fase de operación, y el que ofreció mayor claridad y realismo fue el que se utilizó y es el que se presenta en este documento. Más adelante es descrito con detalle.

**Investigación sobre el mecanismo humano de localización acústica.** Surgió la necesidad de conocer qué elementos del sonido utiliza el humano para localizar la región del espacio de donde procede un sonido y cómo son procesados. Lo primero que vino a la mente es la similitud con la visión, con 2 ojos podemos ver en tres dimensiones y esta capacidad es fuertemente reducida cuando cerramos un ojo; entonces hice varias pruebas con diferentes personas. Les pedí que cerraran los ojos para evitar que utilizaran la información visual y provoqué algunos ruidos con diversos objetos en diferentes regiones a su alrededor, les solicité que escucharan normalmente y sin mover la cabeza, luego que taparan el oído izquierdo y escucharan con el derecho y lo contrario, después que movieran la cabeza escuchando con un oído y con los dos y que con las palmas de sus manos extendieran la superficie del pabellón del oído, o que lo empujaran y lo cambiaran de posición como lo hacen los perros y gatos. Las mismas pruebas fueron realizadas a 10 personas; los siguientes son algunos de los resultados obtenidos:

- Al obstruir un oído se reduce fuertemente la capacidad de localización.
- La capacidad de localización varía notablemente de una persona a otra, pero mucha de esta capacidad es gracias a que utilizan otras pistas principalmente psicológicas.

- Girar la cabeza hacia los lados y hacia arriba mientras el sonido continúa ayuda muchísimo a la localización
- La extensión artificial del pabellón del oído con la palma de la mano y la deformación forzada con los dedos crea una gran confusión.
- Pero ocurrió algo muy interesante, a alguien se le ocurrió invertir la concavidad poniendo las manos adelante de los oídos y volteando las palmas hacia atrás, y todos los sonidos que procedían del frente los escuchó como si procedieran de atrás. cubrirse cubrió adelante y los sonidos del frente los escuchó atrás.
- En condiciones naturales (dos oídos activos y los ojos cerrados), los errores de localización cambiaron al cambiar de habitación. Después repitiendo las mismas pruebas con las mismas personas, en un ambiente abierto con poco ruido ambiental (un campo alejado de la ciudad), la capacidad de localización mejoró, sin embargo se perdió un poco la percepción de la distancia.
- Los sonidos graves (de baja frecuencia) y carentes de percusión son muy difíciles de localizar, en cambio sonidos tales como el tic tac de un reloj o el timbre de un teléfono son excelentes para este fin. La repetición continua se convierte en una reiteración de la información para el oído y para el cerebro.

Las pruebas realizadas en forma paralela con investigaciones documentales ayudaron a comprender el fenómeno y a desarrollar el proyecto.

## **Hipótesis.**

Partiendo de las consideraciones y observaciones anteriores, principalmente de la similitud del sonido espacial (tridimensional) con el estereofónico (unidimensional) que proporciona un excelente realismo con la distribución variable del volumen entre 2 bocinas, se supuso que el sistema debería distribuir el volumen en un número de  $2^3$  bocinas colocadas de manera que crearan un espacio tridimensional para lograr el efecto deseado. La distribución del volumen debería ser, como en el caso del sonido estereofónico, inversamente proporcional a la distancia del punto sonoro virtual a cada una de las 8 bocinas. Partiendo de esta suposición se creo la parte central del modelo: la distribución del volumen, con una

metodología original consistente en la proyección del punto sonoro virtual sobre uno de los planos, arista o vértice de la caja sonora, y distribuido entre 4, 2 o 1 punto sonoro real respectivamente.

Para crear la sensación de distancia, se alteraría el volumen total antes de distribuirlo de acuerdo a una función que relaciona dicho volumen con el inverso del cuadrado de la distancia. Sin embargo para el espacio disponible destinado a las pruebas la función se programó como lineal.

## **Valor práctico del trabajo.**

A pesar de las limitaciones que pueda tener el proyecto en su estado actual o de algunos aspectos que pueden ser mejorados como el realizarlo con una computadora en lugar de cuatro, el trabajo tiene varias cosas valiosas:

- En primer lugar el espacializador funciona, lo que indica que puede procesar una serie de trayectorias y convertirlas a una tabla de tiempos y volúmenes para las ocho bocinas; con base en esta información puede ejecutarse una pista de audio cuyos sonidos se irán escuchando según las trayectorias.
- Se ha definido una forma muy sencilla de comunicación entre músicos y el sistema de modo que no requieren la asesoría de un especialista en computación para poder espacializar una pieza musical y escuchar el resultado.
- El espacializador es una herramienta que permite estudiar ampliamente los sonidos que ofrecen mejores resultados y las zonas en que hay confusión.
- Como ya lo dijimos antes, lo más importante es que el sistema está ahí, es nuestro, y muy pronto una universidad contará con este como parte de su laboratorio de acústica.

## **Contenido del documento. (revisar esta sección al final).**

El documento comienza con la identificación del problema al que se pretende dar solución; luego se establece la razón o justificación del proyecto, para concluir esta parte (Capítulo 1) con la definición del objetivo general y los objetivos particulares a fin de establecer los alcances del trabajo y poder compararlos al final con los resultados obtenidos.

El Capítulo 2 describe las principales áreas de aplicación del sonido espacial, en algunas de las cuales ya existen proyectos en operación; después se hace una relación de los desarrollos teóricos que históricamente han sido los que han marcado el camino a seguir, realizados por diversos investigadores desde el siglo antepasado y que han evolucionado hasta el punto de poder explicar el mecanismo que utiliza el ser humano para localizar el lugar de donde proviene un sonido, cosa que sin embargo, aún no ha podido ser plasmada en términos matemáticos por su complejidad. Finaliza esta parte con algunos de los proyectos más recientes e importantes, como el Espacializador del IRCAM y el Convolvotrón de la NASA, así como una referencia a una amplia lista de investigaciones, instituciones y sitios web que se incluye en los anexos.

El tercer capítulo proporciona información sobre el sonido y sus cualidades, así como de la Acústica, que es la ciencia que se dedica a su estudio; luego, se explica el mecanismo de percepción del sonido y localización de la fuente sonora así como los elementos que participan en este proceso, este capítulo finaliza hablando de los diversos métodos de reproducción sonora: estereofónico, multicanal y binaural.

En el Capítulo 4 se presenta la solución propuesta primero con el diseño conceptual del Espacializador Acústico de manera gráfica; luego se muestra el planteamiento matemático que sustenta el diseño y cuya parte principal se divide en 3 etapas; continúa con la traducción de este planteamiento a lenguaje computacional (programa de espacialización), en cuya parte se incluyen cuatro ejemplos breves que clarifican la forma en que opera; en seguida se muestra la realización física del proyecto a través de una red de 4 computadoras, 4 amplificadores, 8 bocinas y una fuente sonora, todas bajo el control del programa; se incluyen fotografías del equipo montado en una sala que fue especialmente preparada para

evitar en lo posible las reflexiones no deseadas; el capítulo termina abordando una de las partes más importantes, que es la metodología con la que se construye una secuencia de espacialización para una obra musical. En ella se muestra la interactividad entre el músico y el técnico, tarea que inicia con un intercambio de ideas e información sobre el tipo de sonidos que el músico deberá utilizar para lograr el efecto deseado.

El Capítulo 5 presenta los resultados alcanzados hasta este momento y los compara con los objetivos iniciales y el Capítulo 6 menciona los proyectos futuros inmediatos que se planea realizar, tanto para mejorar el funcionamiento del sistema, como para hacer realidad el uso del espacializador entre los nuevos creadores musicales.

En los anexos se incluye el código fuente del programa, una lista de referencias bibliográficas, así como de investigaciones y proyectos que se han realizado en el pasado y que actualmente se llevan a cabo; también, una lista de sitios web en los que se puede obtener información relativa al tema, y finalmente, un disco compacto con la pieza musical “murciélagos” que fue elaborada especialmente para espacializador por un joven músico.



# Capítulo 1

## Estado del arte

### 1.1 Investigaciones y proyectos actuales

Antes de mencionar algunos de los proyectos que se desarrollan actualmente en universidades y centros de investigación de empresas privadas, se mencionarán las investigaciones que antecedieron y sirvieron de fundamento a los desarrollos que conforman el estado del arte.

#### 1.1.1 Investigaciones

En seguida se revisan las investigaciones y teorías principales desarrolladas a la fecha; como se verá en general no existe contradicción entre ellas, más bien cada nuevo estudio ha aportado nuevos elementos y en ocasiones ha encontrado la explicación de conceptos que fueron expuestos en trabajos anteriores pero no se habían podido justificar, otra cosa

importante es que a pesar del conocimiento que se tiene sobre el mecanismo de localización acústica, aún no se cuenta con un modelo preciso que permita reproducir el fenómeno.

### 1.1.1.1 Teoría Duplex de Rayleigh [1], [5]

Uno de los pioneros en investigación sobre recepción de sonido espacial fue John Strutt, mejor conocido como Lord Rayleigh quien hace aproximadamente 100 años desarrolló su teoría denominada Duplex; según la cual hay dos pistas principales para localizar la posición de una fuente sonora: La diferencia de tiempo interaural **ITD** (Interaural Time Difference) y la diferencia de intensidad interaural **ILD** (Interaural Level Difference) o **IID** (Interaural Intensity Difference).

Lord Rayleigh tuvo una explicación simple para la ITD: El sonido viaja a una velocidad **c** de 343 m/s aproximadamente. Para una onda sonora que choca con una cabeza esférica de radio **a** desde una dirección especificada por el ángulo de azimut **az**, la diferencia en la longitud del camino en línea recta a los dos oídos es: **2 a sen az**, que corresponde a una diferencia en tiempo de **2 (a / c) sen az**. Aunque las ondas sonoras no cruzan a través de la cabeza, esta no fue una mala primera aproximación a la ITD. Así, la ITD contiene la información necesaria para encontrar el ángulo de azimut correspondiente.

Además, Lord Rayleigh observó que las ondas sonoras que inciden son difractadas por la cabeza y resolvió la ecuación de la onda para mostrar cómo una onda plana es difractada por una esfera rígida. Su solución mostró que en adición a la diferencia de tiempo hay también una diferencia notable entre las intensidades de la señal entre los dos oídos: La ILD; pero ésta es altamente dependiente de la frecuencia; en frecuencias bajas difícilmente hay diferencia sensible entre la presión sonora en los dos oídos debido a que las ondas alcanzan a rodear a la cabeza, sin embargo en frecuencias altas, la longitud de onda es corta en relación con el diámetro de la cabeza y se provoca el efecto de sombra y puede haber diferencias entre 20 y 30 dB.

La teoría Duplex afirma que ILD e ITD son complementarias. En frecuencias menores de 1.5 kHz la ITD varía una fracción de ciclo entre cada oído que es fácilmente detectada; en cambio en frecuencias superiores a 1.5 kHz hay ambigüedad en la ITD porque hay varios ciclos de desfase, pero la ILD resuelve esta ambigüedad.

Algunos de los problemas serios que tuvo la teoría Duplex fueron:

- El modelo falla en frecuencias superiores a 3 kHz.
- No explica la localización vertical.
- Falla en la discriminación entre el frente y la región posterior.

Para ir más allá de la Teoría Duplex es necesario considerar otros elementos físicos que participan en el fenómeno y conocer los mecanismos biológicos que usan la gente y los animales para tal fin.

### **1.1.1.2 Investigaciones de Batteau sobre localización vertical [10]**

Aunque los humanos somos más aptos en la localización lateral, podemos con menor precisión reconocer la elevación y la distancia del objeto sonoro. Si consideramos un objeto sonoro que se encuentra sobre el plano vertical perpendicular al eje interaural en su punto medio, no hay diferencia entre el sonido que llega a los dos oídos. ¿Cómo es posible entonces que percibamos si el sonido proviene de arriba, abajo, adelante o atrás?.

Hace cerca de 25 años, un investigador llamado Batteau mostró que el oído externo aporta la información esencial para la localización vertical. Batteau colocó dos micrófonos normales en un cuarto y puso a un sujeto a escuchar la salida a través de audífonos en un cuarto adyacente. El escucha pudo seguir fácilmente la fuente sonora que Batteau movió alrededor en un plano horizontal; sin embargo cuando le pidió que dijera si la fuente estaba sobre su cabeza o atrás, las respuestas no fueron mejor que si las hubiera hecho al azar. Entonces, Batteau colocó los micrófonos dentro de unos oídos externos artificiales y la exactitud de las respuestas mejoró dramáticamente, en particular se redujeron grandemente las confusiones entre el frente y atrás, y arriba y abajo.

Batteau concluyó que el oído externo actúa como antena acústica. Los diferentes dobleces, cavidades y arrugas en nuestros oídos externos provén muy importantes reflexiones en altas frecuencias. En adición el torso provoca importantes difracciones que ayudan en el proceso de localización.

### 1.1.1.3 El efecto Clifton y la idea de amplitud y distancia [3] [4]

Creemos que cuando hay múltiples reflexiones de un sonido, nuestro sistema de audición usa la primera señal para su localización y suprime las reflexiones que siguen. En 1987, Clifton mostró que el proceso de supresión no es absoluto. Para tal fin colocó a un escucha dentro de una cámara anecoica e hizo sonar un clic a su derecha y luego otro a su izquierda, la persona identificó que se trataba de dos fuentes sonoras, pero cuando los sonidos continuaron repitiéndose de manera alternada comenzó a tener la sensación de que estaba dentro de una sala muy amplia, lo que indica que las primeras reflexiones son tomadas por el cerebro como una información importante para identificar el ambiente que lo rodea y la distancia a que se encuentra la fuente sonora.

### 1.1.1.4 Bases físicas

De acuerdo con los investigadores Kistler y Wightman, el modelo de cabeza esférica de Rayleigh da una primera idea de cómo la difracción de una onda plana por la cabeza resulta en una variación de la presión sonora en los oídos que depende de la frecuencia, pero para tener una mejor aproximación al fenómeno necesitamos conocer el efecto de difracción por el torso y el oído externo. Estos efectos son capturados en la **función de transferencia relativa a la cabeza (HRTF)** [5], [13] (head-related transfer function), que relaciona la presión del sonido en la fuente con la desarrollada en el tímpano del oído, la cual es dependiente de la frecuencia, azimut, elevación e intensidad y nos proporciona las pistas de la localización sonora.

**La complejidad de la geometría involucrada desalienta toda esperanza de resolución analítica de la HRTF**, y el amplio rango de longitudes de onda que percibimos (17 m en 20 Hz a 17 mm en 20 kHz) desalienta soluciones numéricas. Así, lo más que conocemos acerca de la HRTF a la fecha proviene de medidas experimentales directas.

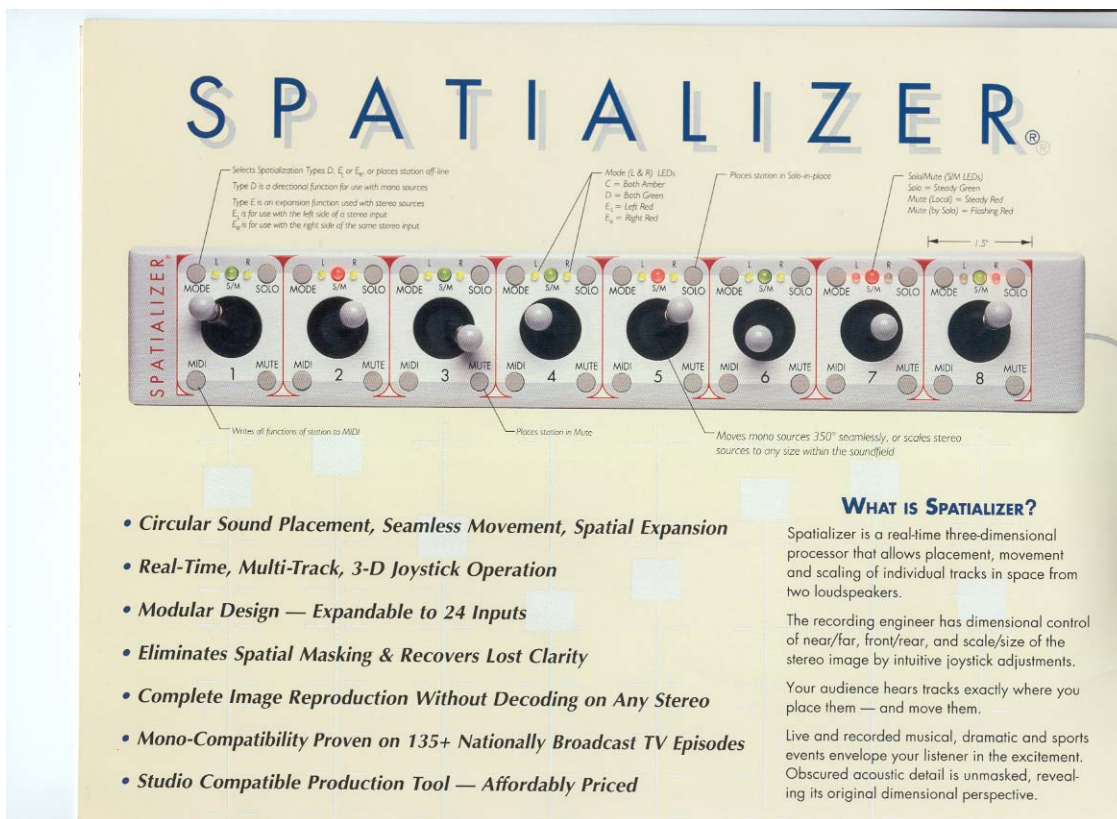
### **1.1.1.5 Bases biológicas (Neurofisiología)**

Existen actualmente varias ideas para construir un modelo óptimo de localización sonora más preciso que el modelo de Rayleigh; dichas ideas parten de imitar la forma en que el humano hace esa localización, pero la Neurofisiología aún no proporciona un “diagrama cableado” ni ha abierto los secretos de la percepción acústica. Una de estas ideas sugiere desarrollar un modelo matemático del proceso de propagación y difracción del sonido por la cabeza y el oído externo, que permita a partir de una determinada forma de onda, hallar las zonas del espacio en que la localización es más precisa. Otras de plano sugieren olvidarse de la cabeza y el oído y desarrollar modelos basados en la experimentación.

### **1.1.2 Proyectos recientes y actuales**

En seguida se revisan las principales características de algunos equipos desarrollados por empresas comerciales y gubernamentales como Audio-Labs, Roland y la NASA, y algunos proyectos de instalación como los que han realizado Disney y el IRCAM, el primero con fines de entretenimiento y el segundo con fines de investigación musical principalmente.

## SPATIALIZER de “Spatializer Audio Laboratorios Inc.”



**Figura 1.1 SPATIALIZER de “Spatializer Audio Laboratorios Inc.”**

Utiliza 2 altavoces para generar el sonido.

Hace énfasis en el sonido circular (2 dimensiones) más que en 3D

Incluye un joystick 3D

No proporciona información algorítmica

Ventajas que menciona:

- Requerimientos mínimos de equipo de cómputo
- Apegado al modelo humano
- Económico (no se conoce rango de precios)

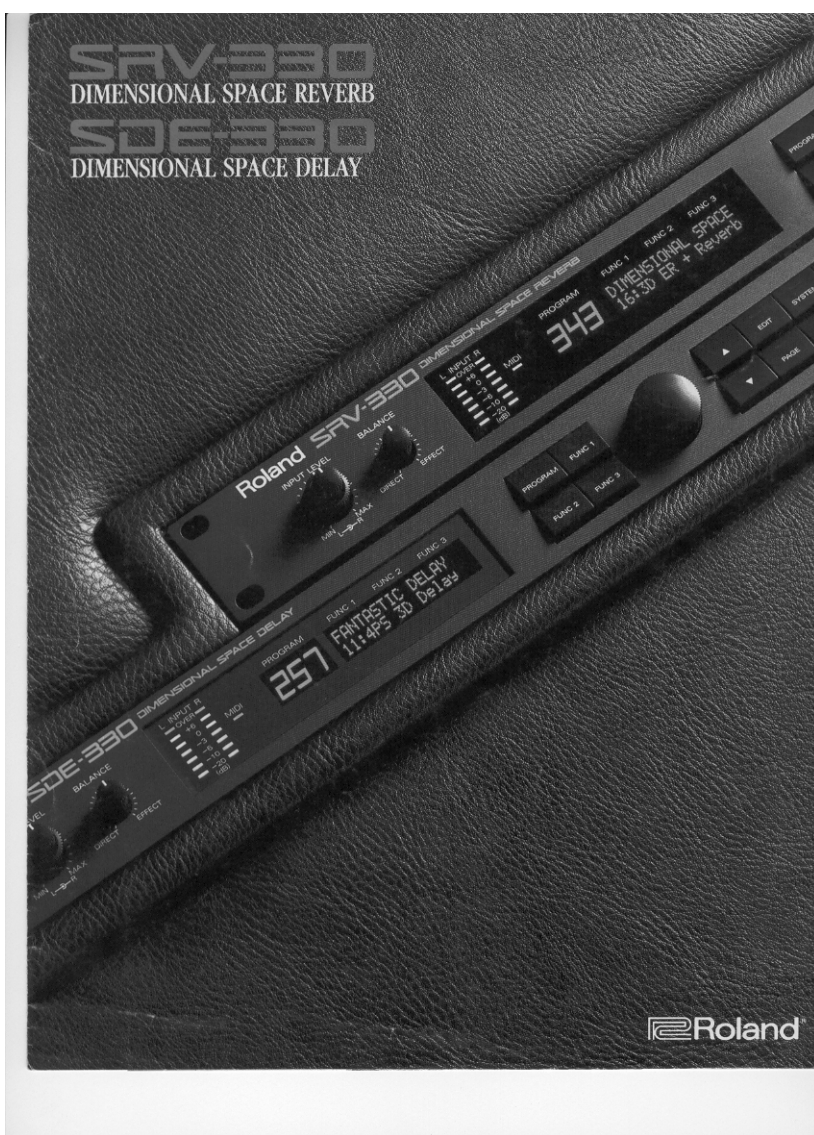
Es un equipo con fines comerciales.

Distribuidor: Audio Intervisual 1155 N La Brea Ave, W Hollywood Ca 90038 USA

## Entretenimiento Sonoro de Disney World. Orlando Fla. USA

- Montaje especial para cabina de audio
- Basado en utilización de audífonos
- Un solo escucha a la vez
- La demostración incluye sólo sonidos de máquinas, teléfonos, etc.
- No proporcionan información técnica pero se trata de una grabación binaural
- Buen nivel de resultados con los sonidos seleccionados

## Dimensional Space Reverb y Delay. Roland. CANADA



**Figura 1.2 Dimensional Space Reverb y Dimensional Space Delay. Roland. CANADA**

Consiste en dos equipos independientes para estructurar sistemas de espacialización, el primero es un sistema de reverberación y el segundo uno de dilación sonora.

Roland Canada Music Ltd, 5480 Parkwood Way, Richmond, B.C. V6V 2M4

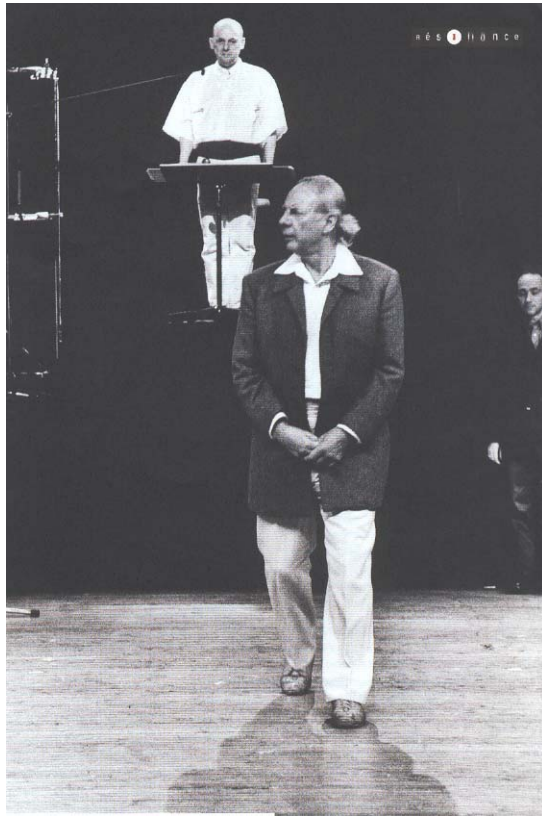
### **Espacializador experimental, IRCAM Ctro Georges Pompidou**

Un proyecto interesante es el espacializador desarrollado en el Instituto de Investigación y Coordinación de Acústica y Música (IRCAM) del Centro Pompidou de París, dirigido por H. Dufort y H. Vinet, consiste en un software creado por Espaces Nouveaux y el IRCAM, orientado a ambientes acústicos de auditorios y conciertos urbanos, usa altavoces externos.



**Figura 1.3**  
**Espacializador**  
**experimental del**  
**IRCAM**

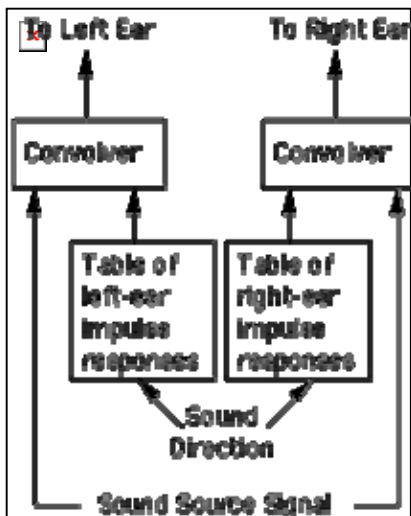




**Figura 1.4**  
**El músico Karleinz**  
**Stokhausen durante una**  
**presentación con sonido**  
**espacial en el**  
**IRCAM del**  
**Centro Georges Pompidou**

**IRCAM Centre Georges Pompidou,**  
**1 Place Igor Stravinsky 75004**  
**París.**

### El Convolvotron de la NASA



**Figura 1.5 El Convolvotron de la NASA [14]**

El Convolvotrón que fue desarrollado por la NASA y manufacturado por Crystal River Engineering, es uno de los desarrollos que marcan el estado del arte en espacialización

acústica y proporciona una conceptualmente simple manera de utilizar la HRTF. Esencialmente consiste de dos “máquinas de circunvolución,” cada una de las cuales puede modificar el flujo de entrada de audio con base en un segmento finito de respuesta al impulso relativa a la cabeza (HRIR) extraída de una tabla de valores. La salida de cada máquina va a los amplificadores de los audífonos del escucha. Si las HRIR para el escucha son suficientemente próximas a las usadas por las dos máquinas, el sonido enviado a los oídos del escucha contendrá toda la información apropiada y la imagen sonora será localizada correctamente. Es muy importante subrayar que a pesar de constituir un sistema muy avanzado, tiene una restricción muy importante que consiste en el carácter individual del modelo que lo hace inapropiado para propósitos de aplicación en públicos numerosos.

La idea básica de su funcionamiento puede ser detallada con las siguientes notas:

1. Múltiples fuentes pueden ser colocadas replicando el hardware y sumando las salidas a cada oído.
2. El movimiento de la cabeza puede ser tomado en cuenta con una combinación de posiciones absolutas de la fuente seleccionadas con un ruteador que escoge las HRIR apropiadas.
3. Las tablas pueden ser indexadas por azimut y elevación solamente, proporcionando la distancia de otra manera a través de la modificación de la amplitud.
4. El número de HRIR almacenadas en las tablas puede ser reducido por medio de un amplio muestreo espacial e interpolación aproximada entre puntos cercanos.
5. Ecos y reverberaciones pueden ser agregados para simular una sala de audición.
6. El sistema puede ser personalizado para cualquier escucha midiendo y utilizando sus propias HRIR.

En resumen, el concepto básico consiste en crear las señales adecuadas para cada oído por convolución en tiempo real de una entrada monaural a partir de una tabla individual de impulsos y respuestas.

### **Otros proyectos recientes y actuales.**

La Universidad de San José en California elaboró una lista de proyectos recientes y actuales para sus estudiantes que trabajan en proyectos de Maestría y Doctorado sobre localización sonora. Esta lista es muy amplia y consta de proyectos de la década de los 90, proyectos en fase de desarrollo o evaluación, referencias bibliográficas y sitios web; por su importancia se incluye la lista completa en los anexos.

## **1.2 Áreas del conocimiento relacionadas**

Esta sección contiene algunas definiciones y explicaciones de conceptos que corresponden a otras disciplinas que son necesarias para comprender la propuesta.

### **1.2.1 Física, Biología y Psicología**

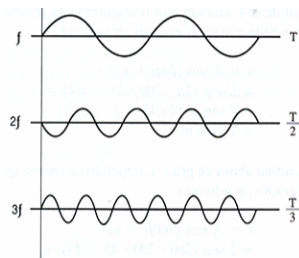
#### **1.2.1.1 El sonido [6]**

El sonido es todo agente físico que impresiona el sentido del oído [6]. Este se produce por vibraciones de los cuerpos que son transmitidas por un medio material en forma de movimiento ondulatorio.

#### **1.2.1.2 Cualidades del sonido**

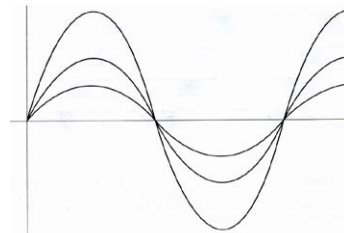
Las principales cualidades del sonido son:

**altura o tono** que es determinada por el número de vibraciones por segundo (frecuencia),



**Figura 1.6 Altura o tono**

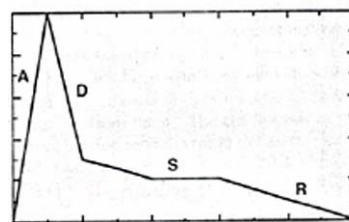
**intensidad o volumen**, causada por la amplitud de la onda sonora, y



**Figura 1.7 Intensidad o volumen**

**timbre** que es el que nos permite distinguir entre un sonido y otro, como las voces de las personas, y es originado por un conjunto de factores como la forma de onda, los armónicos o sonidos que acompañan al principal, la envolvente o gráfica de rapidez con que alcanza su máximo volumen y desciende, los filtros que bloquean el paso de frecuencias altas, bajas o intermedias, etc.

intensidad



tiempo

**Figura 1.8 Timbre**

### 1.2.1.3 Estudio del sonido (Acústica)

La parte de la física dedicada al estudio del fenómeno sonoro se denomina **Acústica** (del griego Akoustikós, y éste a su vez de Akuein que significa oír) [6]. Ésta abarca varios aspectos como:

- Las diversas fuentes que producen una oscilación primaria en un medio.
- Los fenómenos de propagación del sonido en los diferentes medios.
- Los dispositivos de registro, amplificación, transmisión y reproducción sonora.
- Los problemas relacionados con los diseños de las salas.
- El funcionamiento de los órganos fónicos y auditivos.
- Las relaciones entre la ciencia física y el arte musical.
- Las técnicas de construcción de instrumentos musicales.

Estos aspectos originan diversas ramas de la acústica que se han desarrollado y tomado personalidad propia como especialidades y disciplinas, pero que están relacionadas entre sí.

### **Acústica física**

Estudia los fenómenos que se producen durante la generación y transmisión del sonido en diferentes medios. Aborda de manera superficial la percepción e interpretación del sonido por el sentido de la audición.

Entre los fenómenos más importantes que estudia la Acústica física se encuentran: el de reflexión o incidencia de la onda sonora sobre una superficie reflejante; refracción o choque de la onda con un obstáculo de dimensiones especiales; reverberación o aumento de la amplitud cuando las dimensiones del medio están en relación sencilla con la longitud de onda; interferencia o encuentro de dos o más ondas; absorción o fenómeno que ocurre cuando una onda choca con un cuerpo poroso (muy útil en la construcción de salas anti eco); difracción o cambio de las características de la onda cuando atraviesa por un orificio o choca con una esquina; y difusión o comportamiento del sonido dentro de una sala.

### **Acústica arquitectónica**

Está dedicada al estudio de los aspectos formales y constructivos de los locales y edificios. Ha cobrado importancia por la gran generación de ruidos de nuestra sociedad industrial; ya anteriormente ha sido objeto de estudio en la construcción de salas de concierto, conferencias, cines, teatros, etc.

## **Electroacústica**

Se ocupa de la conversión de señales eléctricas en sonoras y viceversa, la amplificación, registro y reproducción del sonido.

También más recientemente ha cobrado una gran importancia por la reproducción de los elementos que intervienen en la generación de las cualidades del sonido o síntesis, lo que ha permitido no solamente la reproducción de instrumentos tradicionales, sino también de sonidos de la naturaleza y más aún, sonidos nuevos que jamás se habían escuchado.

## **Acústica fisiológica**

Estudia dos fenómenos muy distintos, pero íntimamente relacionados; el de la fonación y el de la audición. El primero abarca la fonética o características de la voz humana y su evolución temporal y la síntesis y reconocimiento de la voz; el segundo, las magnitudes subjetivas del escucha (tono, sonoridad, timbre, volumen) en relación con las magnitudes objetivas correspondientes (frecuencia, presión sonora, forma de onda, distribución espectral).

## **Acústica musical**

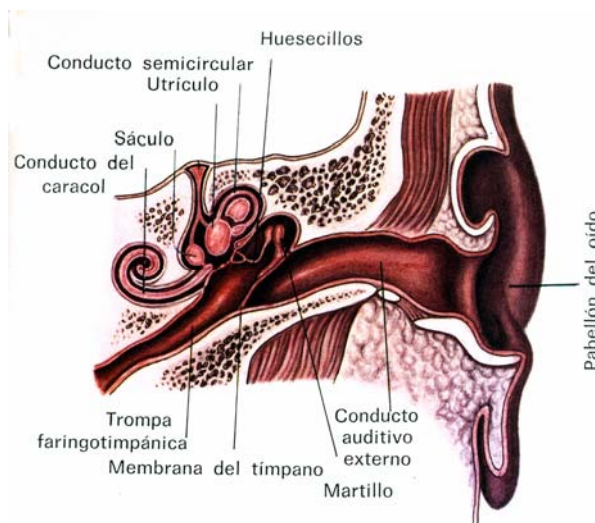
Aborda la estructura de las escalas musicales, intervalos, fenómenos armónicos y los problemas relacionados con los instrumentos musicales.

Este trabajo utilizará conceptos de acústica física, arquitectónica, fisiológica y electroacústica y aunque uno de los objetivos es proporcionar una herramienta para extender las posibilidades de la música, no interesan tanto los conceptos de acústica musical.

### 1.2.1.4 Percepción del sonido

Son varios los elementos que participan en el fenómeno de transmisión y recepción de un sonido en el espacio que nos rodea, y que nos permiten percibir de qué región del espacio con relación a nuestra posición procede dicho sonido, y si además, la fuente que lo produce está cercana o distante. En este capítulo se revisan los elementos físicos más importantes del fenómeno, así como la forma en que influye el factor psicológico. Al final se hacen algunas consideraciones acerca de la capacidad perceptiva espacial del humano.

### El oído



**Figura 1.9 El oído**

Es el órgano que alberga dos importantes sentidos: el oído propiamente dicho y el del equilibrio corporal.

El **oído externo** se compone del pabellón u oreja y del conducto auditivo externo. El primero es una formación cartilaginosa recubierta de piel, que presenta muchas depresiones y prominencias adecuadas para recoger y concentrar las vibraciones acústicas y llevarlas al conducto auditivo externo que es un tubo de unos 3.5 cm que comienza en el orificio de la oreja y termina en una membrana llamada tímpano.

El **oído medio** está constituido por una diminuta caja que contiene cuatro huesecillos conectados entre sí (martillo, yunque, lenticular y estribo). La vibración de la membrana del tímpano ocasionada por las ondas acústicas, se propaga a estos huesos.

El **oído interno** está formado por una serie de sacos y conductos o canales muy intrincados que reciben el nombre de laberinto; en éste, se encuentra el receptor especializado de los estímulos acústicos llamado caracol.

El oído externo recoge las ondas sonoras procedentes del ambiente, las concentra y las lleva hasta la membrana del tímpano que es puesta en vibración. Éstas se transmiten a los huesecillos del oído medio que a su vez las conducen al oído interno a través de la ventana oval y, finalmente en este lugar, el caracol estimula y da lugar a una excitación nerviosa que llega a los centros cerebrales por medio del nervio acústico [15].

## **Elementos que permiten la localización de la fuente sonora**

En esta parte se identifican los elementos que ayudan a determinar la posición lateral, la altura y la distancia a la que está ubicada una fuente sonora respecto a un escucha. Una especial atención es puesta en el factor psicológico, que es capaz de corregir los indicadores físicos y hacer una discriminación para eliminar sonidos que obstruyen aquellos que nos interesa escuchar.

## **Percepción de la posición**

La idea de la posición lateral (azimut) del objeto sonoro respecto a la posición del escucha es proporcionada principalmente por dos informaciones: la diferencia de intensidad con que cada oído recibe el sonido, y la diferencia de tiempo con que ocurre [2].

**Diferencia interaural de intensidad IID** [1], [12] por sus iniciales en inglés. La forma de nuestra cabeza y la disposición de nuestros oídos en posiciones opuestas, causa que cada uno de ellos reciba el sonido con diferente intensidad en dependencia del lugar de donde proviene; si el sonido procede del lado derecho del escucha es lógico pensar que el oído derecho lo recibirá con mayor intensidad que el izquierdo, ya que la cabeza hace un efecto de pared que disminuirá la intensidad en el oído contrario; pero si el objeto se mueve hacia adelante la relación de intensidades se irá equilibrando, y cuando el objeto sonoro esté exactamente frente al escucha, el sonido se recibirá con la misma intensidad en ambos



oídos, sin embargo esto ocurrirá también si el objeto está exactamente atrás de la cabeza, pero la forma y disposición de los oídos hará que se reciba con más intensidad si procede de enfrente. Sin embargo este efecto variará con la longitud de onda del sonido, para longitudes de onda menores que el diámetro de la cabeza (frecuencias mayores de 1.5 kHz) la diferencia es mayor porque la cabeza actúa como una pared efectiva, sin embargo en frecuencias abajo de 1 kHz, la IID es menos efectiva como pista de localización porque las longitudes de onda grandes difractan alrededor de la superficie obstructora de la cabeza minimizando las diferencias de intensidad, por ejemplo una onda sinusoidal a 90° de azimut (exactamente a un costado) tendrá la siguiente atenuación:

Con frecuencia de:	Atenuación:
1 kHz	2 dB
3 kHz	10 dB
6 kHz	20 dB
10 kHz	35 dB

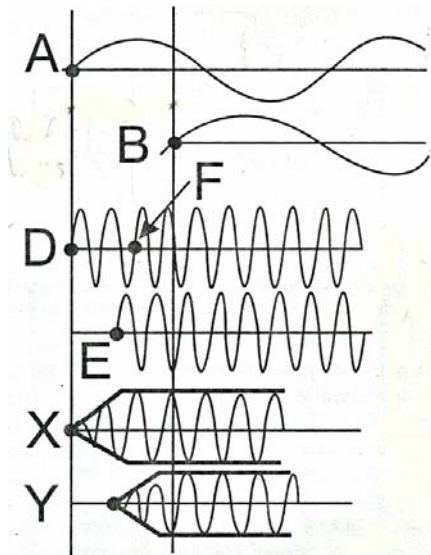
(Feddersen, et al., 1957; Middlebrooks y Green, 1991)

Esta diferencia es una de las informaciones más importantes en el juicio de localización.

**Diferencia interaural de tiempo de arribo ITD [1], [12]** por sus iniciales en inglés. Es la diferencia de tiempo con que el sonido llega a cada oído. Si un sonido procede del lado izquierdo del escucha la onda sonora llegará primero al oído izquierdo y luego al derecho; como el sonido viaja a 340 metros (34000 cm.) por segundo y la distancia entre oídos es de aproximadamente 17 cm., el retraso interaural será de medio milésimo de segundo; conforme el sonido se mueva hacia el frente el retraso disminuirá.

En principio parece lógico que las longitudes de onda grandes generen una ITD más clara. En la siguiente figura se muestran dos ondas **A** y **B** menores de 800 Hz arribando al oído izquierdo y derecho respectivamente. Puesto que medio período de ellas es mayor que el tamaño de la cabeza, el sistema detecta sin ambigüedad la diferencia de fase de esas ondas; en cambio arriba de 1.6 kHz, la longitud de onda se vuelve más pequeña que el tamaño de la cabeza creando una situación ambigua en que **D** se anticipa a **E** pero también **E** se anticipa a **F**. Sin embargo las ondas son aumentadas y disminuidas en su amplitud por un

proceso conocido como modulación de amplitud (ADSR, attack, decay, sustain, release) creando una especie de super ondas **X** y **Y** cuya diferencia de fase sí puede ser detectada.



**Figura 1.10 Modulación de amplitud**

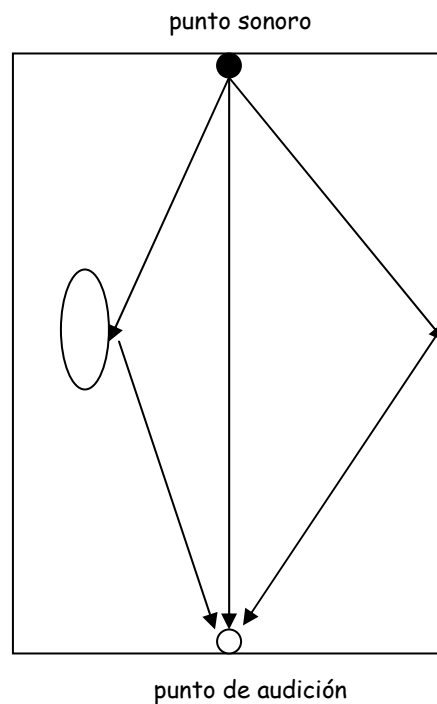
Esto explica porqué los sonidos percusivos y repetitivos como el tic tac de un reloj cuya envolvente es muy aguda son más localizables.

## **Percepción de la altura**

Con el apoyo principal de la IID y la ITD el oído humano detecta la región de procedencia en un plano horizontal (lateralidad), sin embargo la localización de la altura es un proceso mucho más complejo en el que participan la conformación de los hombros, la forma de la cabeza y de manera principal los pliegues del pabellón y la forma del oído externo, en un proceso que es extremadamente difícil de reproducir. A la transformación que sufre el sonido entre la fuente sonora y el tímpano se le ha asociado con una función denominada HRTF (Head Related Transfer Function) [1], [13], la cual sólo ha podido ser manejada de manera experimental a través de mapas en que participan las variables azimut, elevación, frecuencia, envolvente y se llega incluso a tomar en cuenta la conformación anatómica individual del escucha.

## Percepción de la distancia

Cuando escuchamos un ladrido, además de reconocer si es nuestro perro, percibimos si está cerca o lejos de nosotros por la intensidad del sonido; si es fuerte tal vez esté cerca y si es débil quizás esté lejos, o se trata de un perro que ladra quedito; entonces la **Intensidad** no es suficiente para determinar la distancia. Existe otro elemento que nos da información valiosa: todo sonido que proviene de nuestro entorno llega a nuestro oído varias veces con diferencias de fracciones de milésima de segundo [3], [4]. La causa es que el sonido se difunde en el aire en todas las direcciones a velocidad aproximada de 340 metros por segundo, el primer sonido que escuchamos es el que viajó en una sola línea recta hasta nuestro oído; después nos llegan sonidos que recorrieron trayectorias diferentes al ser reflejados por los objetos que nos rodean de los cuales sólo percibimos los primeros que son los que sufrieron menor absorción y que conocemos como **primeras reflexiones**. Si el sonido proviene de un lugar cercano, predominará el primero, pero si proviene de lejos llegará tan menguado que permitirá escuchar las primeras reflexiones como eco que nos darán sensación de lejanía.



**Figura 1.11** Sonido principal y primeras reflexiones.

## Percepción psicológica

Otro elemento que genera una idea de localización es la referencia mental de la posición de los objetos. Así por ejemplo, el sonido de un pájaro o de unas tijeras cortando el cabello nos referirá mentalmente a una región alta y el sonido de un objeto de cristal rompiéndose nos referirá a la parte baja. Estos conceptos son abordados en una disciplina llamada Psicoacústica [1], que puede ser definida simplemente como el estudio psicológico de la percepción acústica. La aspiración de la investigación psicoacústica es descubrir cómo trabaja el sentido del oído y cómo procesa el cerebro los sonidos que aquél recibe para dar información del mundo exterior.

La conexión entre la psicología y la psicoacústica no es muy clara; mucho del trabajo en este campo tiene que ver muy poco con la concepción popular de la psicología. Por ejemplo, dice un investigador: “Yo trato de saber la forma en que la intensidad del sonido es representada por las células nerviosas del oído, lo cual corresponde a la neurofisiología; sin embargo, yo no ando conectando electrodos a roedores o seres humanos, sino que enfoco el problema midiendo la habilidad de escuchas para distinguir entre sonidos cuidadosamente escogidos y transmitidos a través de audífonos. El hecho de que midamos las respuestas de comportamiento de los escuchas es la causa de que se considere a la psicoacústica como una rama de la psicología.

Algunas de las áreas principales de la investigación psicoacústica tienen que ver con:

- ¿Cómo separamos los sonidos simultáneos (dos personas hablando a la vez)?
- ¿Cómo localizamos sonidos en el espacio?
- ¿Cómo determinamos el tono, digamos, de un instrumento musical?
- ¿Cómo separa el caracol del oído un sonido complejo en sus componentes de frecuencia distinta?

Para finalizar esta recopilación se presentan algunos resúmenes de artículos diversos pero interesantes sobre psicoacústica que sin duda resultarán atractivos al lector:

### **Oímos con nuestro cerebro.**

Nuestros oídos son transmisores del sonido que recibimos. La audición no ocurre en ellos ni en el canal del oído externo, ésta toma lugar en nuestro cerebro quien traduce la información a través de una serie de nervios y procesos. La forma en que el cerebro procesa esa información es un tanto conocida, sin embargo, hay muchos fenómenos que sólo pueden ser explicados a través de la psicoacústica; un ejemplo de ello es que si zumbamos con nuestra boca y luego nos tapamos los oídos parecerá que el sonido proviene del interior de nuestra cabeza

Nuestro cerebro reconoce la posición de una fuente sonora comparando las fases de los sonidos que llegan a cada oído. Para crear la ilusión de una fuente sonora fantasma que viaja entre dos altavoces separados, es necesario manejar esos defasamientos. Muchas grabaciones en CD no son hechas en vivo, sino preprocesadas para aplicarles tal efecto.

### **Problemas con nuestro cerebro.**

Uno de los problemas del ser humano es su pésima memoria acústica que le impide realizar comparaciones efectivas; por ejemplo, cuando evaluamos altavoces, nuestro cerebro es tan pobre que nos es difícil retener en nuestra memoria las cualidades de un altavoz e ir a otra tienda, escuchar un modelo parecido y decir con certeza cuál es mejor.

### **La capacidad perceptiva humana**

El ser humano es uno de los animales peor dotados para la localización de la posición de una fuente sonora. Los gatos y los perros al percibir un sonido que les inquieta mueven el pabellón de sus oídos para localizar dicha posición, cosa que los seres humanos no podemos hacer. Existen lechuzas que por la noche se paran en lo alto de graneros totalmente oscuros y al percibir el sonido del movimiento de un ratón, ubican el rumbo y vuelan directamente para atraparlo. Tenemos zonas de confusión, en las nos es difícil acertar a distinguir la posición de la fuente. Esto ha desanimado a muchos investigadores a desarrollar sistemas de espacialización sonora.

### 1.2.1.5 Reproducción del sonido

La reproducción artificial del sonido depende de la forma de grabación y de la tecnología de reproducción. Aunque existen varias modalidades y denominaciones comerciales, los sistemas de reproducción de sonido se pueden clasificar en tres tipos:

- Con dos canales (Estereofónicos)
- Multicanal (sonido “Surround” y “Dolby”)
- Binaural

#### Sistemas estereofónicos con dos canales

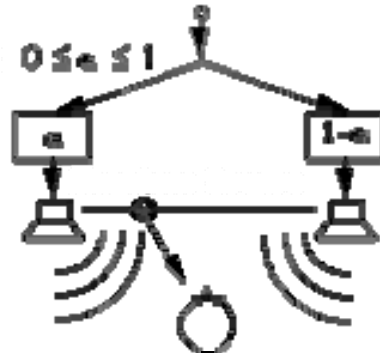
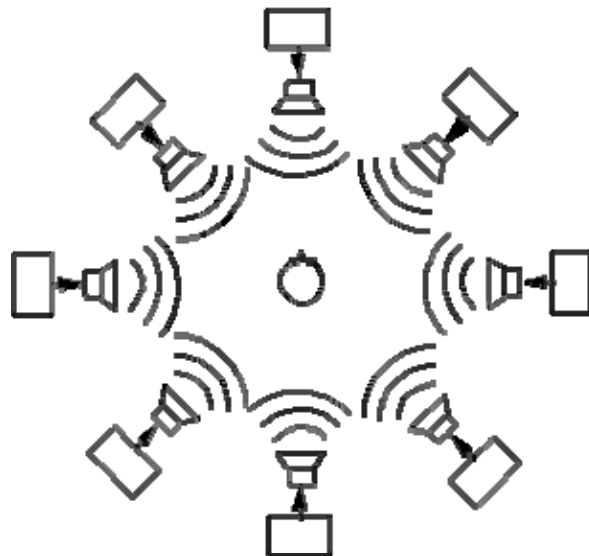


Figura 1.12 Reproducción estereofónica

En la industria del entretenimiento, los sistemas estereofónicos fueron los primeros productos comerciales exitosos. La idea es sencilla y atractiva: colocar un altavoz en el lado izquierdo y otro en el lado derecho del escucha (ver fig. 3.7) y enviarles una señal de audio; si la señal es la misma y está en fase, una “fuente sonora fantasma” aparecerá en el punto medio entre los altavoces. Si aumentamos el volumen de una bocina y disminuimos el de la otra, se puede crear la impresión de que la fuente se mueve entre los altavoces. Otra forma de crear el mismo efecto consiste en manipular las fases usando el efecto de precedencia [11]. Si el sonido es retrasado (desfasado) en el lado izquierdo hasta 10 o 15 ms respecto al lado derecho el escucha sentirá que el sonido proviene del lado derecho, pero si el retraso es mayor entonces sentirá una impresión de eco.

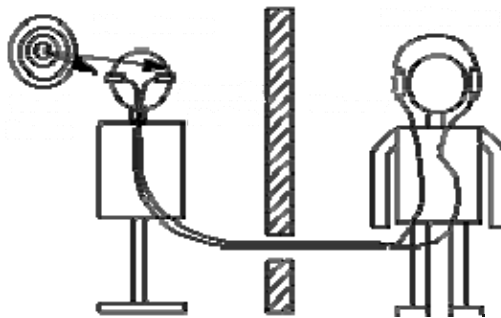
## Sistemas Multicanal (sonido “Surround”)



**Figura 1.13 Reproducción Multicanal**

Otro sistema consiste en tener un canal separado para cada dirección deseada, incluyendo adelante y atrás. Esto es lo que hacen los llamados sistemas de teatro, tales como “Dolby” y “Surround”. En ambientes reverberantes se suelen utilizar altavoces pequeños alrededor del escucha y un altavoz principal de mayor potencia en el frente conocido como “subwoofer”, que emite sonidos no direccionales de baja frecuencia. Aunque producen una impresión agradable, son costosos y no son capaces de realizar un desempeño mayor en sonido espacial [12],[13].

## Sistemas de pregrabación binauricular



**Figura 1.14 Reproducción binauricular [2]**

La enorme dificultad de implementar la HRTF en sistemas de reproducción de sonido espacial, ha llevado a utilizar una técnica consistente en realizar grabaciones con micrófonos diminutos colocados dentro del oído de personas o maniqués hechos con tal fin, donde se captan los sonidos después del complejo proceso de alteración sufrido por el efecto de la forma de la cabeza y del oído externo. La fuente sonora en este caso, deberá colocarse y moverse realmente (no virtualmente) en las regiones del espacio en que se desea generar la imagen espacial en el momento de la grabación, lo que a pesar del excelente resultado que se logra, constituye una restricción para crear efectos de movimientos rápidos por cualquier parte del espacio circundante. Un sistema que aplica la HRTF sin reproducción binauricular es el Convolvutrón de la NASA, descrito en el apartado de Aplicaciones Actuales y que está orientado a utilización personalizada.

### **El problema del ambiente acústico**

En condiciones reales (dentro o fuera de una habitación), el sonido que recibimos de una fuente es seguido por reflexiones provenientes de las superficies que nos rodean. Es muy complicado y costoso construir una sala sin ecos ni reverberaciones, los efectos de las reflexiones no son despreciables, todo lo contrario, transforman las formas de onda respecto al tiempo e introducen picos y depresiones que son particularmente graves en ondas sinusoidales. En frecuencias bajas las reflexiones arriban antes de completarse el primer ciclo y el espacio es llenado con patrones de ondas estacionarias repletas de prominentes nodos y anti-nodos lo que constituye un problema para la reproducción de sonido espacial.

### **1.2.2 Geometría analítica**

En el ámbito de las matemáticas, uno de los conceptos importantes que se utiliza en este trabajo son las ecuaciones de una recta en el espacio que está definida por los dos puntos  $P_1:(x_1,y_1,z_1)$ ,  $P_2:(x_2,y_2,z_2)$ :

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{z - z_1}{z_2 - z_1}$$



También se utilizan ecuaciones de otras figuras como círculos, hélices etc. para las trayectorias del punto sonoro.

### **1.2.3 Lenguaje de programación Visual Basic**

En la elaboración del programa principal y de las rutinas colaterales se utilizó Visual Basic, que es un lenguaje de programación de propósito general y una plataforma de desarrollo de aplicaciones que proporciona elementos gráficos de diseño de aplicaciones, compilador, editor de programas con capacidad de depuración al instante, ayuda contextual, poderosos asistentes (wizards) que automatizan tareas de uso común.

El término “Visual” indica que es una interfaz gráfica de usuario, que en lugar de requerir el uso de comandos escritos para realizar tareas, sólo requiere el uso de herramientas gráficas, de tal modo que desarrollar se asemeja mucho a estar “dibujando” el trabajo.

El término “Basic” indica que aquellas tareas que no se pueden realizar a través de las herramientas gráficas (que no pueden ser dibujadas), son posibles a través de un lenguaje de programación basado en el legendario lenguaje de propósito general llamado Código de Instrucciones Simbólicas Multipropósito para Principiantes (BASIC) con el que prácticamente se puede desarrollar cualquier cosa.

La parte “Visual” está basada en tecnología orientada a objetos, y la parte “Basic” es de tipo procedural. La mezcla de estas dos tecnologías dan lugar a un producto híbrido orientado a eventos.

## **1.3 Áreas de aplicación**

Existe una gran cantidad de posibilidades de aplicación del sonido espacial. Algunas ya han sido visualizadas y se trabaja sobre ellas como es el caso del entretenimiento, otras sin embargo, esperan a que grupos interdisciplinarios de investigación trabajen en su desarrollo. En seguida se describen de manera breve las aplicaciones más obvias. Algunos

de los conceptos mencionados proceden de fabricantes y otros son producto de consideraciones propias.

## **Educación**

En el jardín de niños se promueve el desarrollo de los sentidos. Pedagogos y educadores dan importancia relevante a lo que denominan ubicación espacial a través de la cual los niños aprenden a reconocer las regiones del espacio que los rodea: adelante, atrás, arriba, abajo, derecha, izquierda, adentro y afuera. Estos conceptos son aprendidos con ayuda del sentido de la vista; si esta enseñanza fuera reforzada con sonido espacial, probablemente se podrían alcanzar mejores resultados a la vez que se ayudaría a desarrollar su audición.

En educación media existe la tendencia a utilizar la computadora como herramienta de apoyo didáctico para el profesor. Una de las maneras más efectivas de usarla es a través de programas de simulación que permiten reproducir fenómenos difíciles de ver o escuchar dentro de un aula; tales programas dotados de sonido espacial aumentarían su realismo. Pensemos tan sólo en la exposición de temas como el efecto Doppler (variación de frecuencia al acercarse y alejarse un objeto sonoro), difusión, reflexión y muchos otros.

## **Adiestramiento**

La aviación de los Estados Unidos está experimentando el uso de sonido espacial en sus simuladores de vuelo, desafortunadamente con fines destructivos.

## **Investigación médica**

En contraposición al caso anterior, el sonido espacial utilizado apropiadamente puede ayudar en la determinación de daños y en el tratamiento de tipo auditivo. Resulta muy útil someter al paciente para ayudar a identificar sus deficiencias a identificar ruidos, voces y sonidos en general, cuando se varía la duración, el timbre y la posición espacial.

## **Entretenimiento**

Tal vez sea este el campo de mayores posibilidades para el uso del sonido espacial artificial, ya que cualquier simulador se enriquecerá grandemente con este efecto. En

algunos centros de diversión ya existen entretenimientos que incluyen sonido espacial, pero siempre a través de audífonos. El cine es uno de los grandes usuarios potenciales.

## **Música**

Karlheinz Stockhausen [9], uno de los músicos contemporáneos más reconocidos, trabaja actualmente en dos proyectos en el Instituto de Investigación de Acústica y Música (IRCAM) del Centro Georges Pompidou de París, uno de los cuales consiste en estudiar la relación que hay entre los sonidos y los colores y el otro, en usar el sonido espacial en la música para lo que dispone de un espacializador desarrollado por dicho Centro [9].

Muchos avances experimentó la música durante el siglo XX. En los albores, Arnold Shöenberg elaboró una teoría sobre música atonal para “liberarla de la esclavitud del centro tonal”; Peter Schaefer inició hace medio siglo sus experimentos sobre música concreta que utiliza los sonidos de nuestra civilización y de la naturaleza, ante lo anterior resulta razonable pensar en la liberación de otra de sus restricciones que es la inmovilidad del centro sonoro [7] [8].

Pensemos en la posibilidad de una música proveniente de instrumentos acústicos nuevos tocados con técnicas diferentes, sintetizadores que aprovechan la inmensa cantidad de combinaciones de formas de onda, envolventes, armónicos, filtros, etc., emitiendo sonidos que rompen la limitación de los doce sonidos de la escala temperada y aprovechan todo el espectro sonoro con estructuras armónicas nuevas, y todos esos sonidos llegando a nuestros oídos desde las diversas regiones del espacio que nos rodea. Algo parecido a esto debe ser la música de la primera mitad del siglo 21.

## **1.4 Conclusiones del estado del arte**

Las investigaciones y proyectos realizados a la fecha constituyen el punto de partida de este desarrollo, sin embargo, debe resaltarse el hecho de que no existe a la fecha un conjunto de fórmulas que nos permitan reproducir el efecto espacial. Los elementos que nos legaron Rayleigh, Batteau y Clifton son insuficientes; la función de transferencia relacionada con la

# Capítulo 2

## Diseño del software

### 2.1 Diseño conceptual

El sistema descrito en este documento está basado en las consideraciones siguientes:

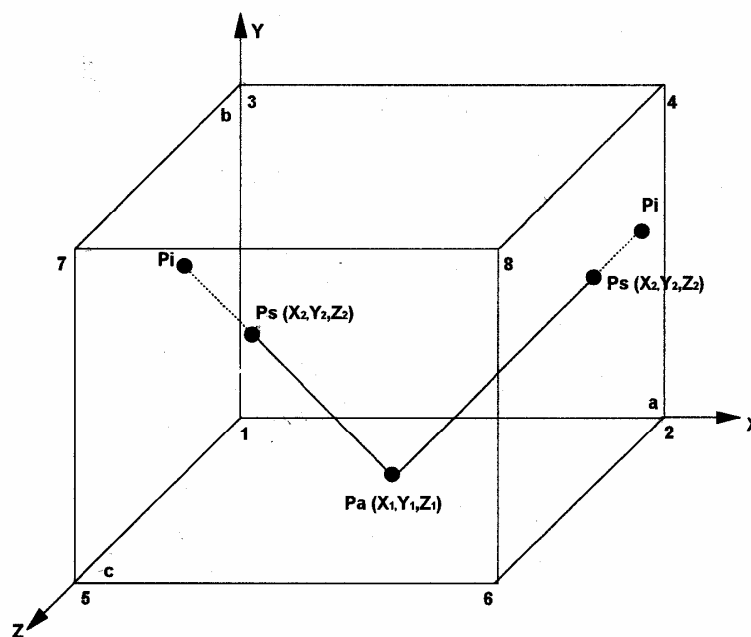


Figura 2.1 Diseño conceptual

- El escucha que va a percibir el sonido con efecto espacial se encuentra ubicado dentro de un prisma rectangular o **caja sonora**, preferentemente en la región central.
- La caja sonora está delimitada por la ubicación de 8 altavoces en los vértices del prisma.

Existen 3 puntos importantes en este modelo:

- **Punto de audición (Pa)** Lugar donde se encuentra el escucha.
- **Punto sonoro virtual (Ps)** Posición de la fuente sonora virtual.
- **Punto de intersección (Pi)** Punto donde la recta imaginaria que parte de Pa hacia Ps cruza una cara, arista o vértice de la caja sonora.

La distancia entre Ps y Pa determina la intensidad general del sonido, y la posición de Pi la distribución del sonido entre los altavoces.

El sonido real que genera la ilusión del punto sonoro virtual Ps, es emitido por las bocinas que corresponden al plano, arista o vértice donde se ubica el punto de intersección y el volumen total se distribuye entre éstas, en una relación inversamente proporcional a su distancia al punto de intersección. Al moverse el punto sonoro virtual se modifica la posición del punto de intersección y cambia la distribución del sonido entre los altavoces.

Si Pi se encuentra en una arista o vértice sólo sonarán 2 o 1 bocinas respectivamente, estos casos particulares están englobados en el modelo general y no requieren fórmulas particulares. En seguida se expone el planteamiento matemático del espacializador propuesto. Todo el fundamento fue desarrollado por el autor del trabajo.

## 2.2 Planteamiento matemático

El desarrollo matemático para espacializar un punto sonoro, se divide en los 3 pasos siguientes perfectamente delimitados.

## Paso 1. Determinación del plano sonoro

La ecuación de la recta que pasa por dos puntos en el espacio:

$$P_1 : (x_1, y_1, z_1) \text{ y } P_2 : (x_2, y_2, z_2),$$

se puede establecer a partir de la condición (1):

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{z - z_1}{z_2 - z_1} \quad (1)$$

Si fijamos a una de las variables como independiente, se pueden establecer 2 condiciones que relacionen a las 3 variables.

Si  $x$  es la variable independiente:

$$y = f(x), \quad y = y_1 + \frac{(x - x_1)(y_2 - y_1)}{x_2 - x_1} \quad (2)$$

$$z = f(x), \quad z = z_1 + \frac{(x - x_1)(z_2 - z_1)}{x_2 - x_1} \quad (3)$$

Si  $y$  es la variable independiente:

$$x = f(y), \quad x = x_1 + \frac{(y - y_1)(x_2 - x_1)}{y_2 - y_1} \quad (4)$$

$$z = f(y), \quad z = z_1 + \frac{(y - y_1)(z_2 - z_1)}{y_2 - y_1} \quad (5)$$

Y si  $z$  es la variable independiente:

$$x = f(z), \quad x = x_1 + \frac{(z - z_1)(x_2 - x_1)}{z_2 - z_1} \quad (6)$$

$$y = f(z), \quad y = y_1 + \frac{(z - z_1)(y_2 - y_1)}{z_2 - z_1} \quad (7)$$

Con las fórmulas (2) a (7) podemos identificar al plano sonoro a través de las condiciones siguientes:

Si cuando la variable independiente es:	Ocurre que:	Entonces el plano sonoro es:
$x = 0$	$0 < y < b, Y: 0 < z < c$	YZ
$x = a$	$0 < y < b, Y: 0 < z < c$	YZa
$y = 0$	$0 < x < a, Y: 0 < z < c$	XZ
$y = b$	$0 < x < a, Y: 0 < z < c$	XZb
$z = 0$	$0 < x < a, Y: 0 < y < b$	XY
$z = c$	$0 < x < a, Y: 0 < y < b$	XYc

El plano YZa es el plano paralelo al YZ que pasa por  $x = a$ . XZb y XYc se forman de manera similar.

La condición que se cumple define cuál de los seis es el plano sonoro.

## **Paso 2. Determinación de las coordenadas del punto de intersección Pi**

Los valores  $x, y, z$ , que cumplen una de las seis condiciones anteriores son las coordenadas del punto de intersección. Por ejemplo, si la condición satisfecha fue:

Con:  $y = b, \quad 0 < x < a, \quad 0 < z < c, \quad \text{plano XZb}$   
 Para valores:  $x = 3.71 \quad z = 8.46,$

el punto de intersección es  $P_i : (3.71, b, 8.46)$ , y se encuentra en el plano XZb.

## **Paso 3. Distribución del volumen**

Este cálculo se hace a partir de la posición que ocupa el punto de intersección en el plano sonoro. Se ilustra el método con un ejemplo en el que el plano sonoro es XY (de vértices 1,2,3,4).

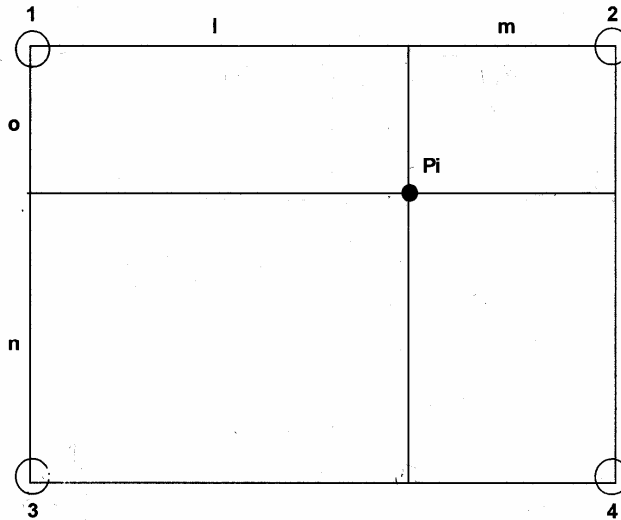


Figura 2.2 Distribución del volumen

Bocina	% del volumen	
	% horizontal	% vertical
1	$m / (l + m)$	$n / (o + n)$
2	$l / (l + m)$	$n / (o + n)$
3	$m / (l + m)$	$o / (o + n)$
4	$l / (l + m)$	$o / (o + n)$

$$\begin{aligned}
 \text{SUMA \%Vols} &= \frac{mn}{(l+m)(o+n)} + \frac{ln}{(l+m)(o+n)} + \frac{mo}{(l+m)(o+n)} + \frac{lo}{(l+m)(o+n)} = \\
 &= \frac{mn + ln + mo + lo}{(l+m)(o+n)} \\
 &= \frac{mn + ln + mo + lo}{lo + ln + mo + mn} \\
 &= 1
 \end{aligned}$$

La aplicación de la teoría anterior para los 6 planos es como sigue:



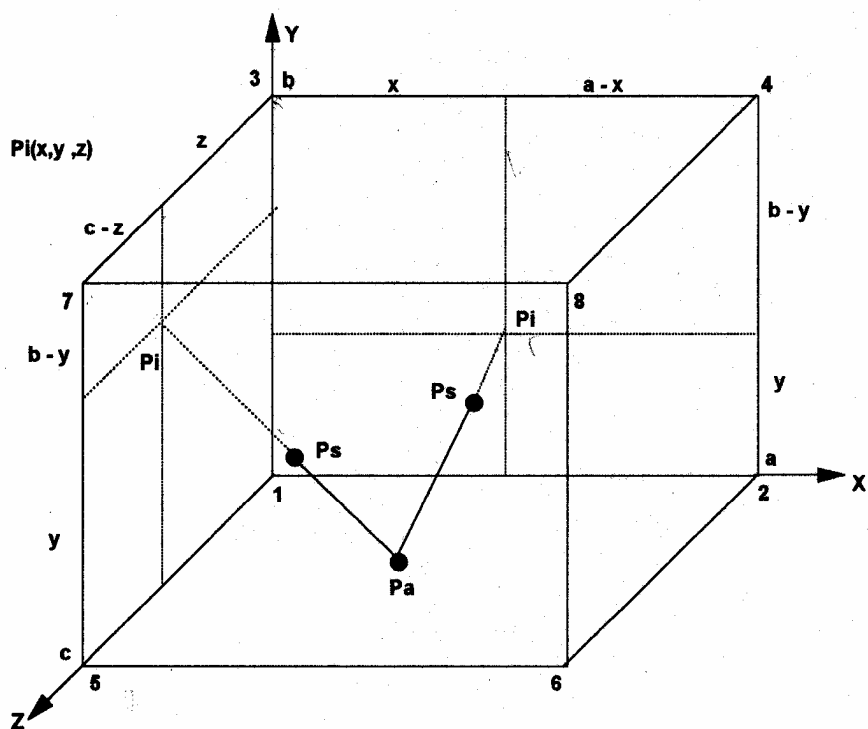


Figura 2.3 Distribución de volumen en planos sonoros

Pi	Plano	Boc.
$(0, y, z)$	$YZ$	$\begin{matrix} 7 & 3 \\ 5 & 1 \end{matrix} \left(\frac{z}{c}\right)\left(\frac{b-y}{b}\right)\left(\frac{c-z}{c}\right)\left(\frac{b-y}{b}\right)\left(\frac{z}{c}\right)\left(\frac{y}{b}\right)\left(\frac{c-z}{c}\right)\left(\frac{y}{b}\right)$
$(a, y, z)$	$YZa$	$\begin{matrix} 4 & 8 \\ 2 & 6 \end{matrix} \left(\frac{c-z}{c}\right)\left(\frac{b-y}{b}\right)\left(\frac{z}{c}\right)\left(\frac{b-y}{b}\right)\left(\frac{c-z}{c}\right)\left(\frac{z}{b}\right)\left(\frac{z}{c}\right)\left(\frac{y}{b}\right)$
$(x, 0, z)$	$XZ$	$\begin{matrix} 1 & 2 \\ 5 & 6 \end{matrix} \left(\frac{a-x}{a}\right)\left(\frac{z}{c}\right)\left(\frac{x}{a}\right)\left(\frac{z}{c}\right)\left(\frac{a-x}{a}\right)\left(\frac{c-z}{c}\right)\left(\frac{x}{a}\right)\left(\frac{c-z}{c}\right)$
$(x, b, z)$	$XZb$	$\begin{matrix} 7 & 8 \\ 3 & 4 \end{matrix} \left(\frac{a-x}{a}\right)\left(\frac{c-z}{c}\right)\left(\frac{x}{a}\right)\left(\frac{c-z}{c}\right)\left(\frac{a-x}{a}\right)\left(\frac{z}{c}\right)\left(\frac{x}{a}\right)\left(\frac{z}{c}\right)$
$(x, y, 0)$	$XY$	$\begin{matrix} 3 & 4 \\ 1 & 2 \end{matrix} \left(\frac{a-x}{a}\right)\left(\frac{b-y}{b}\right)\left(\frac{x}{a}\right)\left(\frac{b-y}{b}\right)\left(\frac{a-x}{a}\right)\left(\frac{y}{b}\right)\left(\frac{x}{a}\right)\left(\frac{y}{b}\right)$
$(x, y, c)$	$XYc$	$\begin{matrix} 8 & 7 \\ 6 & 5 \end{matrix} \left(\frac{x}{a}\right)\left(\frac{b-y}{b}\right)\left(\frac{a-x}{a}\right)\left(\frac{b-y}{b}\right)\left(\frac{x}{a}\right)\left(\frac{y}{b}\right)\left(\frac{a-x}{a}\right)\left(\frac{y}{b}\right)$

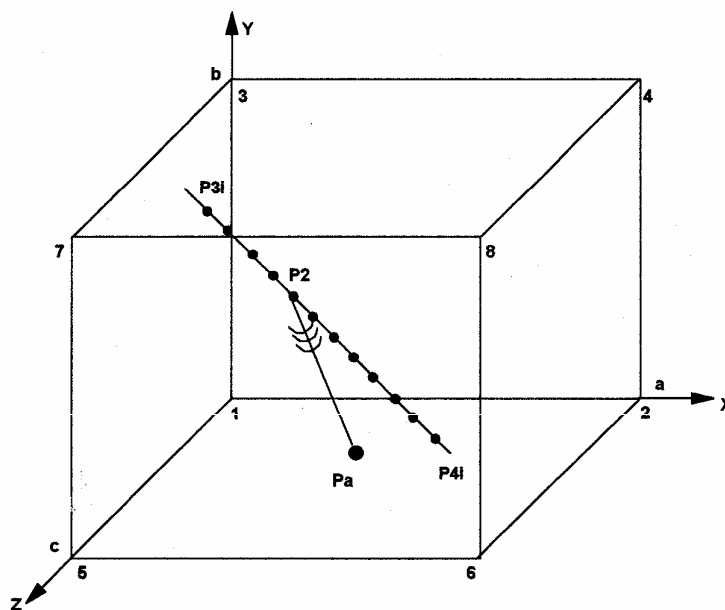
Estas componentes corresponden a una resultante unitaria, lo que implica que para producir un volumen total  $V$ , deben multiplicarse los 4 porcentajes por el valor de  $V$ .

Para producir el efecto de distancia entre  $P_s$  y  $P_a$ , debe multiplicarse el volumen por un factor inversamente proporcional a la distancia y que varía entre 1 y 0.

Hasta aquí la teoría para generar un sonido con efecto espacial desde un punto sonoro fijo.

### Generación de efecto dinámico para el objeto sonoro

Ahora consideraremos un punto sonoro desplazándose en el espacio tridimensional. Para simplificar la exposición se considera una trayectoria rectilínea definida por los puntos extremos  $P_3$  inicial y  $P_4$  final, en el entendimiento de que la consideración de cualquier otra trayectoria diferente ya no es asunto del sonido espacial, sino de la geometría analítica.



**Figura 2.4 Efecto dinámico**

Como se mencionó antes, una recta en el espacio determinada por dos puntos ( $P_3$  y  $P_4$  en este caso) queda definida por dos ecuaciones, (8) y (9) en el caso siguiente, que relacionan a las 3 variables una de las cuales se establece como independiente:

Considerando como independiente a  $x$ :

$$y = y_3 + \frac{(x - x_3)(y_4 - y_3)}{x_4 - x_3} \quad (8) \quad P_3 (0, y_3, z_3)$$

$$P_4 (a, y_3, z_3)$$

$$z = z_3 + \frac{(x - x_3)(z_4 - z_3)}{x_4 - x_3} \quad (9)$$

y  $x$  variando entre 0 y  $a$ , en  $s$  intervalos, quedará determinado un conjunto de puntos distribuidos equitativamente sobre el segmento de recta. El efecto dinámico se logrará realizando para cada uno de los puntos lo mismo que se definió anteriormente para uno en forma secuencial y en el sentido en que se definió el movimiento del punto sonoro. El resultado de este cálculo arrojará los datos que se muestran en la siguiente tabla:

Tiempo	Coordenadas de Ps			Volúmenes							
	X	Y	Z	Boc1	Boc2	Boc3	Boc4	Boc5	Boc6	Boc7	Boc8

**Tabla 2.5 Distribución del volumen**

## 2.3 Programa computacional

Esta secuencia de cálculo está plasmada en un programa computacional de espacialización. A continuación se muestra el diagrama general del programa con una explicación general; en la siguiente sección están algunos ejemplos de comandos de trayectorias individuales con sus resultados. El código completo se encuentra en el anexo A.

### 2.3.1 Diagrama del programa de espacialización

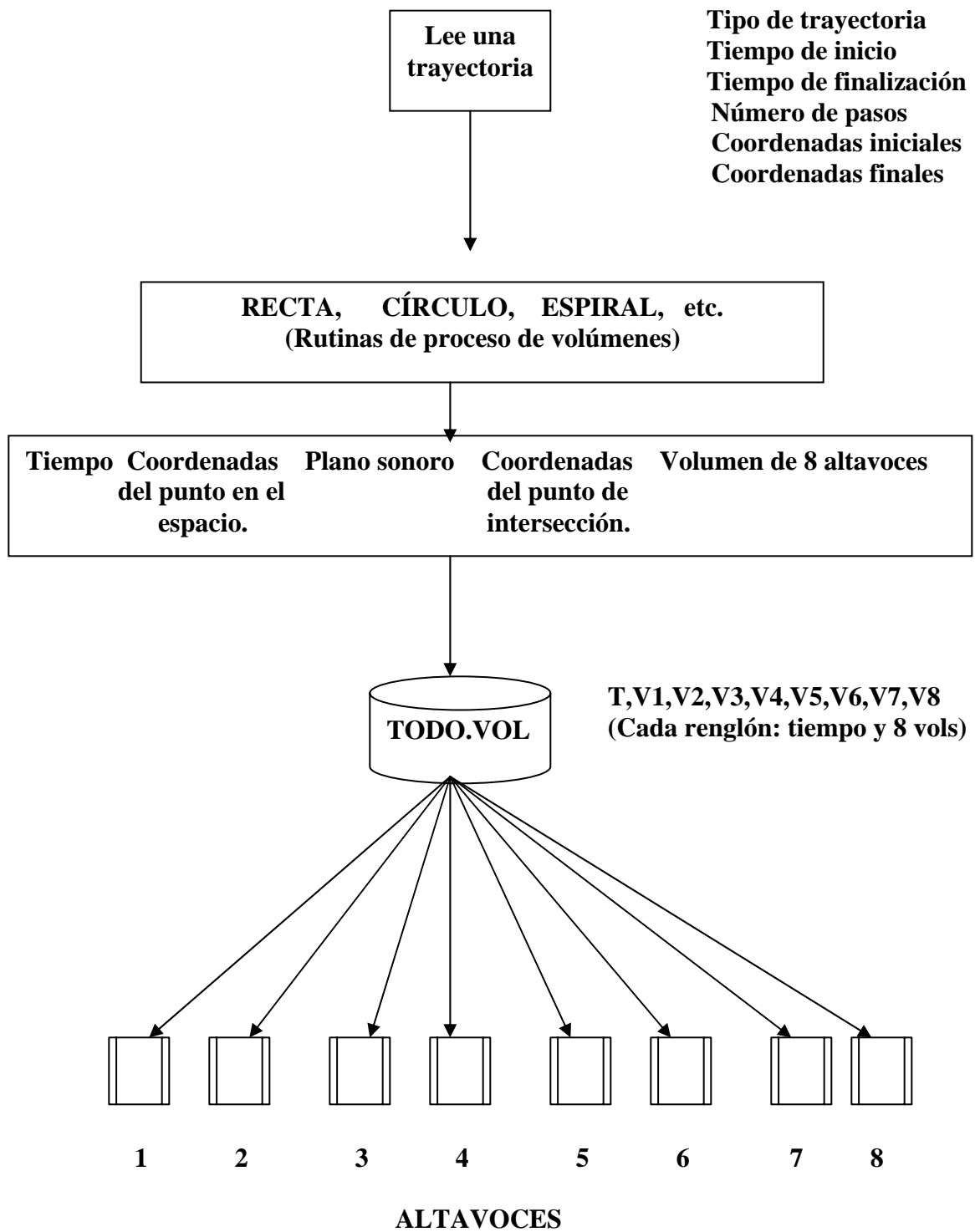


Figura 2.6 Diagrama del programa de espacialización

Lo que hace el programa es leer una secuencia de trayectorias y convertir cada una de ellas a una tabla cuyo número de renglones es igual al número de pasos en que se subdivide la trayectoria más 1, que es el número de puntos sonoros que hay en ella; cada renglón contiene la información de un punto sonoro, o sea: tiempo en que ocurre, coordenadas del punto, plano sonoro, coordenadas del punto de intersección y los volúmenes de cada uno de los 8 altavoces. Todas las tablas se unen en una gran tabla que puede enviarse a impresión y sólo 9 de esos datos se guardan en un archivo: el tiempo y los 8 volúmenes de cada punto sonoro.

### **Lectura de la trayectoria**

Cada trayectoria contiene el siguiente conjunto de datos que definen el tiempo y espacio en que ocurre:

- Tipo de trayectoria. Un código que identifica a una figura geométrica, recta (REC), circunferencia (CIR), etc.
- Tiempo de inicio. Tiempo en segundos a partir del inicio del proceso en que se inicia la trayectoria.
- Tiempo de finalización. Tiempo en segundos a partir del inicio del proceso en el que termina la trayectoria.
- Número de pasos. Segmentos en que se subdivide la trayectoria.
- Coordenadas iniciales. Coordenadas del punto donde inicia la trayectoria.
- Coordenadas finales. Coordenadas del punto donde finaliza la trayectoria.

Hay algunas trayectorias en los que por su naturaleza, estos últimos 6 campos tienen otro significado. Las trayectorias disponibles y los datos requeridos se muestra en la página siguiente.

TRAYECTORIA	CLAVE	TIEMPO INICIAL	TIEMPO FINAL	INTER-VALOS	PUNTO INICIAL X	PUNTO INICIAL Y	PUNTO INICIAL Z	PUNTO FINAL X	PUNTO FINAL Y	PUNTO FINAL Z
RECTA ACELE- RADA-DESACEL.	RAC	T.INIC	T.FIN	No INT	$X_i$	$Y_i$	$Z_i$	$X_f$	$Y_f$	$Z_f$
SEGM RECTA ACCELERADA	SRA	T.INIC	T.FIN	No INT	$X_i$	$Y_i$	$Z_i$	$X_f$	$Y_f$	$Z_f$
SEGM RECTA DESACELERADA	SRD	T.INIC	T.FIN	No INT	$X_i$	$Y_i$	$Z_i$	$X_f$	$Y_f$	$Z_f$
RECTA	REC	T.INIC	T.FIN	No INT	$X_i$	$Y_i$	$Z_i$	$X_f$	$Y_f$	$Z_f$
PUNTO ESTA- CIONARIO	PES	T.INIC	T.FIN	No INT	X	Y	Z	0	0	0
PUNTO ALEATORIO	PAL	T.INIC	T.FIN	No INT	NUM	0	0	0	0	0
					POS.AL					
CÍRCULO HORIZONTAL	CIR	T.INIC	T.FIN	No INT	RADIO	ALTU- RA	0	0	0	0
ESPIRAL ASCENDENTE 5 VUELTAS	ESP	T.INIC	T.FIN	No INT	RADIO	0	0	0	0	0
ESPIRAL DESCENDENTE 5 VUELTAS	ESD	T.INIC	T.FIN	No INT	RADIO	0	0	0	0	0
ESPIRAL ASC. ACCELERADA 7 VUELTAS	ESA	T.INIC	T.FIN	No INT	RADIO	0	0	0	0	0
TERMINACIÓN	FIN	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 2.7 Trayectorias disponibles

## **Rutinas de proceso de volúmenes.**

Dependiendo del código de trayectoria, el programa bifurca hacia una rutina particular en la que utilizando los datos anteriores calcula las coordenadas de un punto sonoro, establece las ecuaciones de la recta que pasa por el punto sonoro  $P_s$  y el punto de audición  $P_a$ , determina el plano sonoro, calcula las coordenadas de del punto de intersección  $P_i$  de la recta con el plano sonoro y distribuye el volumen total en las 4 bocinas del plano sonoro Todos estos datos son enviados a impresora si se desea y el tiempo junto con los 8 volúmenes se graban en un archivo de disco llamado TODO.VOL; luego calcula las coordenadas del siguiente punto y se repite el procedimiento.

Cuando en el código de trayectoria aparece FIN el proceso termina y en el archivo TODO.VOL queda guardada toda la información necesaria para realizar la espacialización de la pista sonora.

La segunda y última parte consiste en leer cada renglón del archivo y ejecutar lo que dice, esto es, en cada tiempo asignar el volumen de las bocinas del plano sonoro mientras la pista sonora se está reproduciendo.

### **2.3.2 Ejemplos de ejecución de trayectorias individuales**

Ahora se muestran los reportes de 4 corridas con trayectorias individuales, la primera trayectoria se realiza en 3 dimensiones, la segunda en 2 dimensiones sobre el plano XY, la tercera en una dimensión sobre la arista 3-4 y la última corresponde a un punto estacionario (vértice 4). En los cuatro casos se muestra el comando de espacialización al principio:

**Ejemplo 1.** Trayectoria recta **en el espacio (3 dimensiones)**, inicia en segundo 0, termina en segundo 2 con 10 pasos iniciando en  $P_3 : (1, 3, 2)$  y terminando en  $P_4 : (4, 3.5, 1)$ .

Comando: DATA REC, 0, 2, 10, 1, 3, 2, 4, 3.5, 1
---

PTO	PUNTO SONORO			PLANO SON	P. INTERSECCIÁN			% DE VOLUMEN DE BOCINAS							
	X2	Y2	Z2		X	Y	Z	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
1	1.00	2.00	2.00	YZ	0.00	2.00	2.00	25	0	25	0	25	0	25	0
2	1.30	2.15	1.90	YZ	0.00	2.43	1.71	22	0	35	0	17	0	26	0
3	1.60	2.30	1.80	YZ	0.00	3.50	1.00	9	0	66	0	3	0	22	0
4	1.90	2.45	1.70	XZb	1.56	4.00	0.67	0	0	51	32	0	0	10	6
5	2.20	2.60	1.60	XZb	2.67	4.00	0.67	0	0	28	56	0	0	6	11
6	2.50	2.75	1.50	XZb	3.33	4.00	0.67	0	0	14	69	0	0	3	14
7	2.80	2.90	1.40	XZb	3.78	4.00	0.67	0	0	5	79	0	0	1	16
8	3.10	3.05	1.30	YZa	4.00	3.91	0.73	0	2	0	80	0	0	0	18
9	3.40	3.20	1.20	YZa	4.00	3.71	0.86	0	6	0	73	0	2	0	20
10	3.70	3.35	1.10	YZa	4.00	3.59	0.94	0	8	0	69	0	2	0	21
11	4.00	3.50	1.00	YZa	4.00	3.50	1.00	0	9	0	66	0	3	0	22

**Tabla 2.8 Trayectoria en el espacio**

**Ejemplo 2.** Trayectoria recta sobre el plano XY (2 dimensiones), inicia en segundo 0 y termina en segundo 2 con 10 pasos iniciando en P3: (0, 1, 0) y terminando en P4:(3, 3, 0).

Comando: DATA REC, 0, 2, 10, 0, 1, 0, 3, 3, 0

PTO	PUNTO SONORO			PLANO SON	P. INTERSECCIÁN			% DE VOLUMEN DE BOCINAS							
	X2	Y2	Z2		X	Y	Z	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
1	0.00	1.00	0.00	YZ	0.00	1.00	0.00	75	0	25	0	0	0	0	0
2	0.30	1.20	0.00	XY	0.30	1.20	0.00	65	5	28	2	0	0	0	0
3	0.60	1.40	0.00	XY	0.60	1.40	0.00	55	10	30	5	0	0	0	0
4	0.90	1.60	0.00	XY	0.90	1.60	0.00	47	14	31	9	0	0	0	0
5	1.20	1.80	0.00	XY	1.20	1.80	0.00	39	17	32	14	0	0	0	0
6	1.50	2.00	0.00	XY	1.50	2.00	0.00	31	19	31	19	0	0	0	0
7	1.80	2.20	0.00	XY	1.80	2.20	0.00	25	20	30	25	0	0	0	0
8	2.10	2.40	0.00	XY	2.10	2.40	0.00	19	21	29	31	0	0	0	0
9	2.40	2.60	0.00	XY	2.40	2.60	0.00	14	21	26	39	0	0	0	0
10	2.70	2.80	0.00	XY	2.70	2.80	0.00	10	20	23	47	0	0	0	0
11	3.00	3.00	0.00	XY	3.00	3.00	0.00	6	19	19	56	0	0	0	0

**Tabla 2.9 Trayectoria sobre un plano**

**Ejemplo 3.** Trayectoria recta sobre la arista 3-4 (1 dimensión), inicia en segundo 0 y termina en segundo 2 con 10 pasos iniciando en P3: (0, 4, 0) y terminando en P4:(4, 4, 0).

Comando: DATA REC, 0, 2, 10, 0, 4, 0, 4, 4, 0

PTO	PUNTO SONORO			PLANO SON	P. INTERSECCIÁN			% DE VOLUMEN DE BOCINAS							
	X2	Y2	Z2		X	Y	Z	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
1	0.00	4.00	0.00	YZ	0.00	4.00	0.00	0	0	100	0	0	0	0	0
2	0.40	4.00	0.00	XZb	0.40	4.00	0.00	0	0	90	10	0	0	0	0
3	0.80	4.00	0.00	XZb	0.80	4.00	0.00	0	0	80	20	0	0	0	0
4	1.20	4.00	0.00	XZb	1.20	4.00	0.00	0	0	70	30	0	0	0	0
5	1.60	4.00	0.00	XZb	1.60	4.00	0.00	0	0	60	40	0	0	0	0
6	2.00	4.00	0.00	XZb	2.00	4.00	0.00	0	0	50	50	0	0	0	0
7	2.40	4.00	0.00	XZb	2.40	4.00	0.00	0	0	40	60	0	0	0	0
8	2.80	4.00	0.00	XZb	2.80	4.00	0.00	0	0	30	70	0	0	0	0
9	3.20	4.00	0.00	XZb	3.20	4.00	0.00	0	0	20	80	0	0	0	0
10	3.60	4.00	0.00	XZb	3.60	4.00	0.00	0	0	10	90	0	0	0	0

**Tabla 2.10 Trayectoria sobre un eje**

**Ejemplo 4.** Punto estacionario en vértice 4 : (4, 4, 0).



Comando: DATA PES, 0, 2, 10, 4, 4, 0, 0, 0, 0

PTO	PUNTO SONORO PLANO			P. INTERSECCIÁN			% DE VOLUMEN DE BOCINAS								
	X2	Y2	Z2	SON	X	Y	Z	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
1	4.00	4.00	0.00	YZa	4.00	4.00	0.00	0	0	0	100	0	0	0	0
2	4.00	4.00	0.00	YZa	4.00	4.00	0.00	0	0	0	100	0	0	0	0
3	4.00	4.00	0.00	YZa	4.00	4.00	0.00	0	0	0	100	0	0	0	0
4	4.00	4.00	0.00	YZa	4.00	4.00	0.00	0	0	0	100	0	0	0	0
5	4.00	4.00	0.00	YZa	4.00	4.00	0.00	0	0	0	100	0	0	0	0
6	4.00	4.00	0.00	YZa	4.00	4.00	0.00	0	0	0	100	0	0	0	0
7	4.00	4.00	0.00	YZa	4.00	4.00	0.00	0	0	0	100	0	0	0	0
8	4.00	4.00	0.00	YZa	4.00	4.00	0.00	0	0	0	100	0	0	0	0
9	4.00	4.00	0.00	YZa	4.00	4.00	0.00	0	0	0	100	0	0	0	0
10	4.00	4.00	0.00	YZa	4.00	4.00	0.00	0	0	0	100	0	0	0	0

**Tabla 2.11 Punto estacionario**

### 2.3.3 Efecto de distancia

Puesto que el sonido se transmite en la atmósfera en forma de esferas concéntricas cuyas moléculas se comprimen y expanden en función del tiempo, entonces la intensidad a una distancia dada está en función inversa de la superficie de la esfera con radio igual a dicha distancia, por tanto la intensidad I de onda a una distancia r de una fuente que emite un sonido con potencia P es:

$$I = P / (4 \pi r^2)$$

Para que realmente se genere la sensación de distancia no basta modificar la intensidad sino que es necesario crear artificialmente reverberaciones y retardos de fracciones de milésima de segundo que al igual que la intensidad vayan modificando sus parámetros con la distancia. Esto es relativamente sencillo lograrlo pero requiere de un reverberador y un delay que puedan recibir órdenes de una computadora en tiempo real. Por su costo se tiene planeado incorporar estos equipos en la siguiente versión y con el apoyo de una institución patrocinadora; por ahora se implantó un modelo lineal de distancia-intensidad muy simple pero que sí hace notorios los cambios de volumen.

### 2.3.4 Volumen matemático y volumen acústico

Durante las pruebas que se hicieron para apreciar el funcionamiento del modelo, se notó que al distribuir el volumen de un sonido entre dos bocinas asignando 50% a cada una, el volumen total que se percibía era notablemente inferior al que ocurría cuando se asignaba el 100% a una sola, se probó una trayectoria virtual entre las dos bocinas y se notó que el volumen total decaía más en cuanto la fuente virtual se aproximaba al centro. Se hizo una prueba entonces, colocando un micrófono conectado a una computadora portátil con el programa Sound Forge, frente a una bocina a la que se varió su volumen de 100% a 0%, y se anotaron los volúmenes registrados por el programa observando que mientras el volumen aritmético de la bocina disminuía linealmente, el decaimiento del volumen acústico ocurría en forma parabólica. Esta deficiencia tuvo que ser compensada con una función de corrección parabólica inversa, el efecto de la corrección fue verificado de la misma manera; sin embargo, realizando pruebas con otras tarjetas de sonido, se ha visto que esta característica no es general para todos los modelos de tarjetas.

### 2.3.5 Descripción de las subrutinas principales del programa

En seguida se muestran las subrutinas y partes principales del programa. En el anexo A se incluye el código fuente completo.

#### **Lectura de una trayectoria y transferencia de control a subrutina correspondiente.**

Se leen: código de trayectoria, tiempo inicial y final, número de pasos y coordenadas de los puntos inicial y final y se transfiere el control a una subrutina según la clave leída en TRY\$.

```
REM *** LEE UNA TRAYECTRIA ***
OTRY: READ TRY$, TINI, TFIN, N, X3, Y3, Z3, X4, Y4, Z4
REM *** TRANSFIERE CONTROL A RUTINA CORRESPONDIENTE ***
IF TRY$ = "REC" THEN GOSUB RECTA
IF TRY$ = "RAC" THEN ALF1 = 3.14: ALF2 = 6.28: FAC = 1: SUM = 0: GOSUB
REACEL
IF TRY$ = "SRA" THEN ALF1 = 3.14: ALF2 = 4.71: FAC = 2: SUM = 0: GOSUB
REACEL
IF TRY$ = "SRD" THEN ALF1 = 4.72: ALF2 = 6.28: FAC = 2: SUM = -1: GOSUB
REACEL
IF TRY$ = "PES" THEN GOSUB PES
IF TRY$ = "CIR" THEN GOSUB CIR
```

```

IF TRY$ = "ESP" THEN GOSUB ESP
IF TRY$ = "ESD" THEN GOSUB ESD
IF TRY$ = "ESA" THEN GOSUB ESA
IF TRY$ = "PAL" THEN GOSUB PAL
IF TRY$ = "FIN" THEN GOTO INICIAGRA
GOTO OTRY

```

### **Ejemplo de una subrutina de trayectoria (circunferencia).**

Como ya está previsto que en este caso el punto realice una trayectoria circular sobre un plano horizontal iniciando en un azimuth fijo, entonces sólo se utilizan los primeros dos campos de coordenadas y con un significado diferente: X3 contiene el radio de la circunferencia y Y3 la altura del plano sobre el cual está la trayectoria.

```

CIR: REM CIRCUNFERENCIA HORIZONTAL CON ALTURA Y
R = X3: Y2 = Y3: P = 0: PASO = 6.2832 / N: TPAS = (TFIN - TINI) / N
FOR ALFA = 0 TO 6.2832 STEP PASO
P = P + 1
X2 = R * SIN(ALFA) + X1
Z2 = R * COS(ALFA) + X1
GOSUB CALCPCT
NEXT ALFA
GOTO SAL1

```

### **Determinación del plano sonoro y punto de intersección.**

Conociéndose las coordenadas del punto de audición P1:(X1, Y1, Z1) y de un punto sonoro P2:(X2, Y2, Z2) se puede conocer cuál es el plano sonoro y al mismo tiempo determinar las coordenadas del punto de intersección siguiendo la metodología diseñada para tal fin:

Primero prueba si Pi está en el plano YZ para lo cual hace X=0, calcula Y y Z correspondientes y revisa si Y está en el rango de 0 a b, y si Z está en el rango de 0 a c. En caso de ser así transfiere el control a la instrucción de etiqueta L740 donde inicia el código que hace la distribución de volúmenes en las bocinas 1, 3, 5 y 7.

<pre> X = 0 Y = Y1 + (X - X1) * (Y2 - Y1) / (X2 - X1) Z = Z1 + (X - X1) * (Z2 - Z1) / (X2 - X1) IF (Y &gt;= 0 AND Y &lt;= B) AND (Z &gt;= 0 AND Z &lt;= C) THEN GOTO L740 </pre>
--

Ahora prueba si Pi está en el plano YZa (paralelo a YZ) para lo cual hace X=a, calcula Y y Z correspondientes y revisa si Y está en el rango de 0 a b, y si Z está en el rango de 0 a c. En caso de ser así transfiere el control a la instrucción de etiqueta L820 donde inicia el código que hace la distribución de volúmenes en las bocinas 2, 4, 6 y 8.

```

X = A
Y = Y1 + (X - X1) * (Y2 - Y1) / (X2 - X1)
Z = Z1 + (X - X1) * (Z2 - Z1) / (X2 - X1)
IF (Y >= 0 AND Y <= B) AND (Z >= 0 AND Z <= C) THEN GOTO L820

```

De manera similar se prueban los restantes 4 planos. El código completo está en el anexo A.

### **Distribución del volumen entre las bocinas del plano sonoro.**

En seguida está el código a partir de L740 en donde se muestra la distribución del volumen para las bocinas 1, 3, 5 y 7 que delimitan el plano sonoro YZ de acuerdo a las fórmulas definidas en el planteamiento matemático del modelo diseñado:

```

L740: REM --PLANO YZ--
PL$ = " YZ "
GOSUB BORRAVOL
VOL(P, 5) = Z * (B - Y) / (C * B)
VOL(P, 1) = (C - Z) * (B - Y) / (C * B)
VOL(P, 7) = Z * Y / (C * B)
VOL(P, 3) = (C - Z) * Y / (C * B)
GOSUB CALCVOL
RETURN

```

Lo mismo ocurre en L820 para las bocinas 2, 4, 6 y 8 que delimitan al plano sonoro YZa:

```

L820: REM --PLANO YZa--
PL$ = " YZa"
GOSUB BORRAVOL
VOL(P, 2) = (C - Z) * (B - Y) / (C * B)
VOL(P, 6) = Z * (B - Y) / (C * B)
VOL(P, 4) = (C - Z) * Y / (C * B)
VOL(P, 8) = Z * Y / (C * B)
GOSUB CALCVOL
RETURN

```

De igual manera se distribuyen los volúmenes para los otros 4 planos sonoros.

### **Corrección del volumen por distancia.**

El siguiente código corresponde a la modificación del volumen para causar el efecto de distancia entre el punto de audición P1 y el punto sonoro P2. DSE es la distancia calculada por la fórmula de distancia entre 2 puntos en el espacio; como ya se justificó anteriormente se utiliza una función lineal:

```

VOLDIST: REM ** CORRIGE VOLUMENES POR DISTANCIA ENTRE Ps Y Pa **
REM DISTANCIA DEL PUNTO SONORO (P2) AL ESCUCHA (P1):
DSE = SQR((X2 - X1) ^ 2 + (Y2 - Y1) ^ 2 + (Z2 - Z1) ^ 2)
REM GANANCIA POR APROX. PARA DSE<X1 DESDE VOL=0 CON DSE=X1 HASTA MAX.CON
DSE=0
REM IF DSE < X1 THEN GAN = (X1 - DSE) / X1 ELSE GAN = 0
REM ALTERNATIVA A ANTERIOR, AUMENTA SUMA DE VOLS ENMEDIO DE BOCINAS
IF DSE < 1.732 * X1 THEN GAN = 8 - 2 * DSE ELSE GAN = 1
RETURN

```

### **Corrección del volumen por diferencia entre volumen matemático y acústico.**

La diferencia hallada entre los dos valores anteriores en las tarjetas de sonido utilizadas se corrige por una fórmula que compensa el decaimiento que ocurre en la región central entre bocinas:

```

FOR I = 1 TO 8
REM VOL(P, I) = VOL(P, I) * 255 * GAN
VOL(P, I) = 255 * (-22.65 / (10 * VOL(P, I) + .22159) + 102.216) / 100
IF VOL(P, I) > 255 THEN VOL(P, I) = 255
NEXT I

```

### **Lectura de trayectorias de espacialización.**

Por último se muestra la forma en que son leídas las trayectorias utilizando en este caso la instrucción DATA:

```

DATA ESP,0,10,150,2,0,0,0,0,0
DATA ESD,10,20,150,2,0,0,0,0,0
DATA ESP,20,30,150,2,0,0,0,0,0
DATA ESD,30,40,150,2,0,0,0,0,0
DATA ESP,40,50,150,2,0,0,0,0,0
DATA ESD,50,60,150,2,0,0,0,0,0
DATA FIN,0,0,0,0,0,0,0,0,0

```

## 2.4 Realización física

En esta parte se muestra la construcción del Espacializador que comienza por un esquema que contiene los componentes:

<b>Equipo de cómputo</b>	+	<b>Equipo de audio</b>	+	<b>Inter - conexiones</b>	+	<b>Programa de espacialización</b>
------------------------------	---	----------------------------	---	-------------------------------	---	--

### Componentes físicos del espacializador (hardware)

Explicación de la interconexión de Hardware (de izquierda a derecha):

1. Reproductor de CD o equivalente. Envía al divisor el sonido que va a espacializarse.
2. Divisor. Reproduce el sonido recibido y lo envía a través de 4 cables estereofónicos (8 canales con el mismo sonido).
3. Computadora con tarjeta de sonido. Recibe 2 canales sonoros con volumen igual, les asigna un volumen a cada canal y los envía por parejas a los amplificadores.
4. Amplificadores. Envían el sonido a las bocinas.
5. Bocinas. Emiten el sonido al aire.

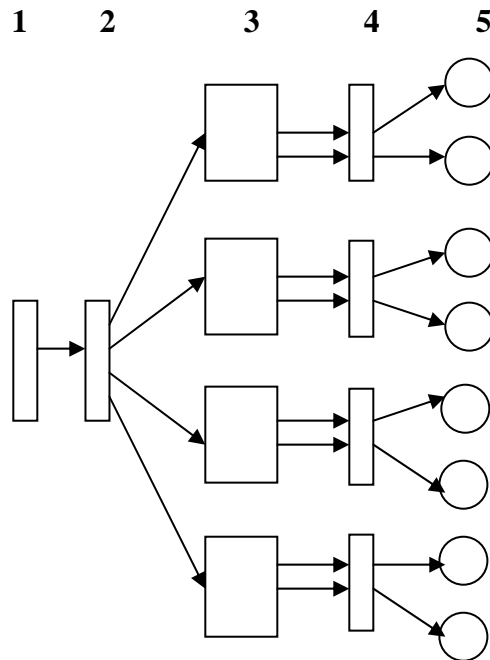
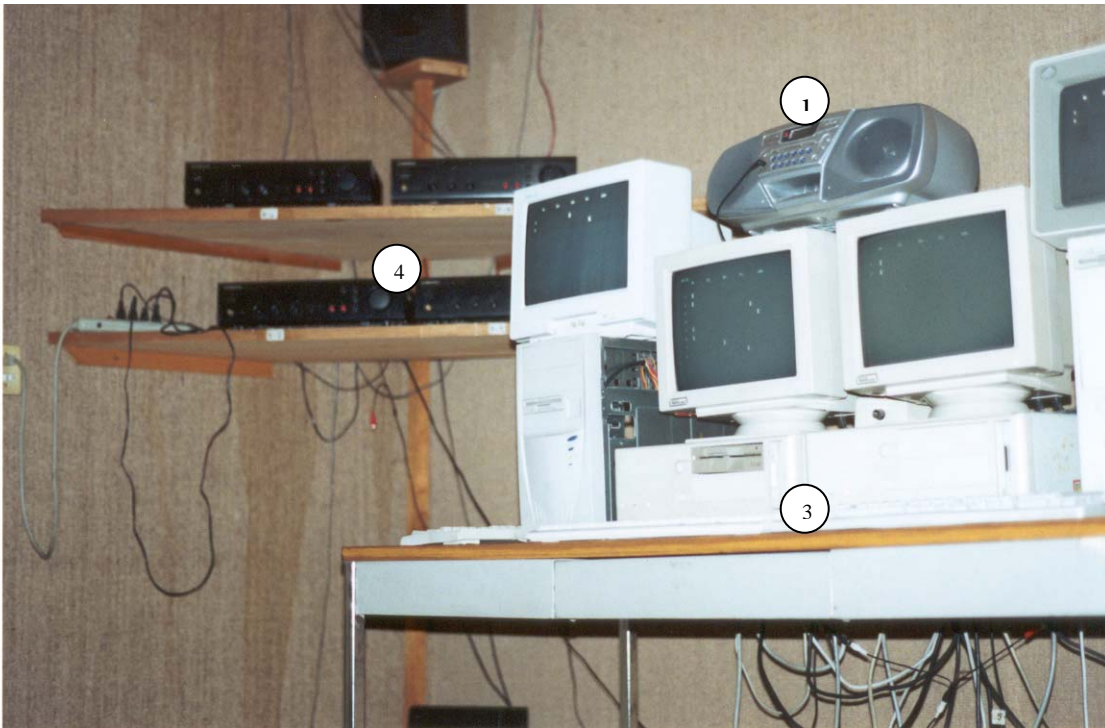


Figura 2.12 Descripción gráfica del espacializador



**Figura 2.13 Espacializador visto desde el frente**

1 Reproductor de CD, SONY CFD-S22, 20 watts, estereofónico, CD, Radio.

3. Red de 4 computadoras personales con 16 MB RAM y tarjeta de sonido.

Especificaciones de la tarjeta de sonido:

Modelo: Pro Audio Spectrum 16, Fabricante: Media Vision.

Calidad de señal:

Velocidad de muestreo 16 bit	6-44.1 kHz
Capacidad dinámica señal a ruido	Audio mezclador sintetizado: -75dB
	Audio muestreador (PCM): -85dB
Respuesta de frecuencia	De 20 Hz a 20 kHz
Filtrado	Programable de 4 kHz a 20 kHz
Control de volumen	Volumen principal de 0 a -80 dB

Mezcla de audio:

- 10 mezclas de audio de salida con control de canales der/iz independientes
- 7 mezclas de audio de entrada con control de canales der/iz independientes
- Sintetizadores internos estéreo
- Audio CD interno estéreo
- Micrófono mono
- Altavoz mono

4 Amplificadores de audio PIONEER Stereo A-103, speaker impedance 6 a 16 Ohms, 100/200 watts que reciben la señal de las tarjetas de sonido y la envían a los 4 altavoces.

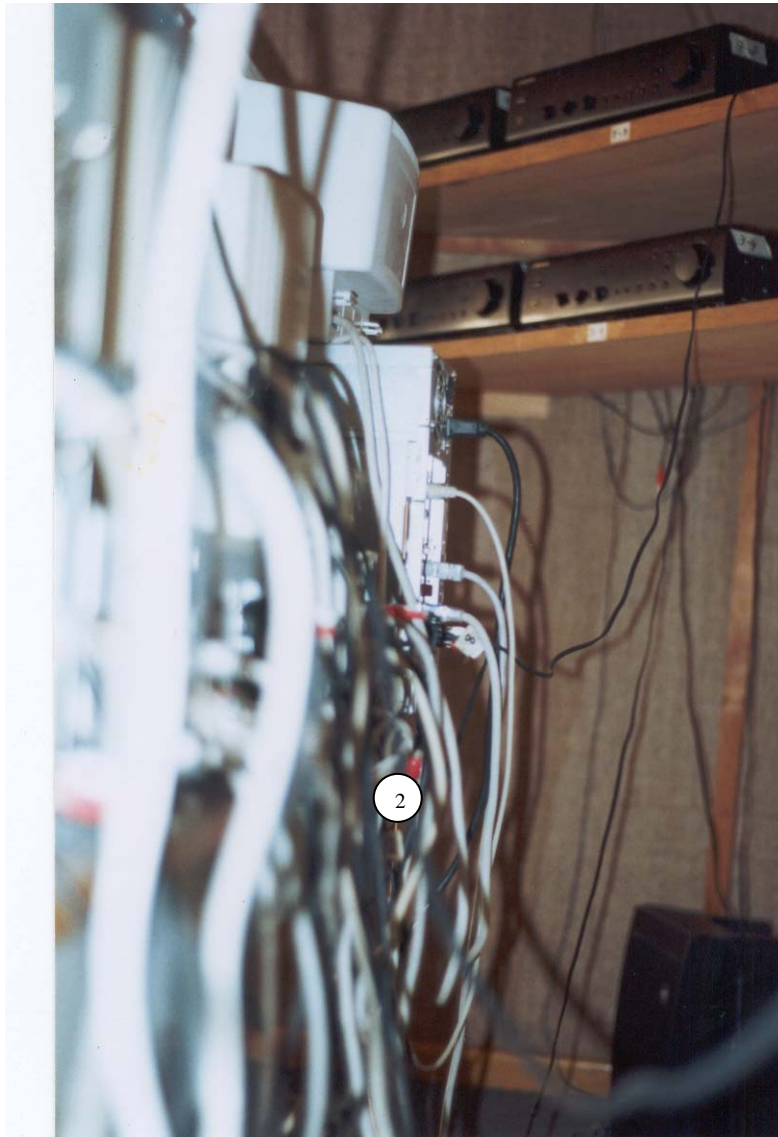


**Figura 2.14 Parte posterior (bocinas 5, 6, 7, 8)**

5. Altavoces ALDE Audio Surround Sound DC 6030 Bass reflex, High performance, two way speaker System 4 Ohms, correspondientes a la parte posterior (plano sonoro XYc).

Las paredes y el techo están forrados con mayatex, el piso con alfombra y una cortina cubre los cristales de la ventana con la intención de reducir parcialmente las reflexiones.





**Figura 2.15 Cableado de interconexión**

2. Divisor en la parte posterior de las computadoras con el cableado de entrada y salida de audio a las tarjetas de sonido.

### **Especificaciones del objeto.**

Con objeto de evitar reflexiones acústicas indeseables se adaptó una sala con dimensiones de 4x4 mts y una altura de poco menos de 3 mts con recubrimiento de mayatex en los muros y el techo y una alfombra en el piso; las ventanas se cubrieron con cortinas. Los únicos objetos que pueden provocar reflexiones son una mesa y las computadoras que están colocadas sobre ella.

Habría sido deseable contar con una sala más alta para percibir mejor los movimientos verticales del objeto sonoro virtual. A pesar de no lograr las condiciones de una cámara anti-eco sí se reduce notablemente este efecto.

### **Medios en los que llega la información al programa.**

Los datos son alimentados al programa actualmente a través de teclado, guardados en un archivo en el disco duro de la computadora central y distribuidos luego de ser procesados a las otras 3 computadoras a través de una red local.

### **Modificaciones planeadas para una versión siguiente del espacializador.**

Las mejoras físicas al sistema planeadas son:

- Sustituir las 4 computadoras actuales por una sola de desempeño superior y con 8 canales de salida de audio.
- Agregar un ecualizador de buena calidad para seleccionar las frecuencias de los sonidos a espacializar.
- Agregar un reverberador y de ser posible un retrasador (delay) que puedan ser controlados por la computadora.
- Aunque tal vez no sea para la segunda versión sino más adelante, se planea incorporar un mouse 3D para ordenar cualquier tipo de trayectoria en tiempo real.

# Capítulo 3

## Diseño de la aplicación

### (Creación de secuencias de espacialización para música)

Una de las tareas más importante al incorporar sonido espacial en una obra musical es la creación de **secuencias de espacialización**. En esta parte se abordan los aspectos de esta actividad, a los que debe dedicarse el máximo cuidado para alcanzar buenos resultados.

### 3.1 Intercambio de ideas e información con el artista

Cuando se trata de un trabajo interdisciplinario es muy importante la comunicación; en este caso el especialista debe conocer muy bien cuál es la idea del artista acerca de la obra que va a crear o está creando para poder proponer los efectos más apropiados; por su parte el músico debe conocer las características del sonido que facilitan su espacialización y tomar en cuenta los aspectos psicológicos para lograr la ilusión acústica.

## 3.2 Análisis de la obra a espacializar

Después del intercambio inicial de información entre artista y técnico, debe estudiarse cuidadosamente la pista; no es lo mismo el sonido de una voz humana, de un grupo de grillos, de un animal de la jungla, de un mosquito, o de un ave. Una voz humana deberá tener poco o ningún movimiento, Un grupo de grillos estarán colocados en lugares distintos pero fijos y desde ahí cantarán, un mosquito se moverá en forma continua en torno a nosotros, se acercará y alejará; si uno no toma en cuenta estos aspectos nuestro cerebro rechazará los efectos. En el caso de una obra musical debe estudiársele cuidadosamente para ver qué partes se prestan para aplicar el efecto espacial; el abuso de este efecto resultará chocante y contraproducente.

Esta tarea es equivalente al análisis cuando realizamos un proyecto computacional.

## 3.3 Diseño de la secuencia de espacialización

En esta etapa se seleccionan las partes que van a espacializarse; la imaginación juega un papel importante, pero el criterio debe acotarla racionalmente; se deberá escuchar una y otra vez la pista con un cronómetro y hacer anotaciones como las siguientes:

<b>Tiempo</b>	<b>sonido</b>	<b>efecto</b>
2' 34"	arpeggio musical	secuencia de recta en zigzag, alejándose
3' 15"	viento	espiral ascendente acelerada de aprox. 20 segundos.

Con este borrador en la mano debe volverse a escuchar la pista e imaginar cómo sonará, y hacer tantos cambios como sean necesarios hasta quedar totalmente satisfecho con la idea. Esta parte es equivalente al diseño computacional.

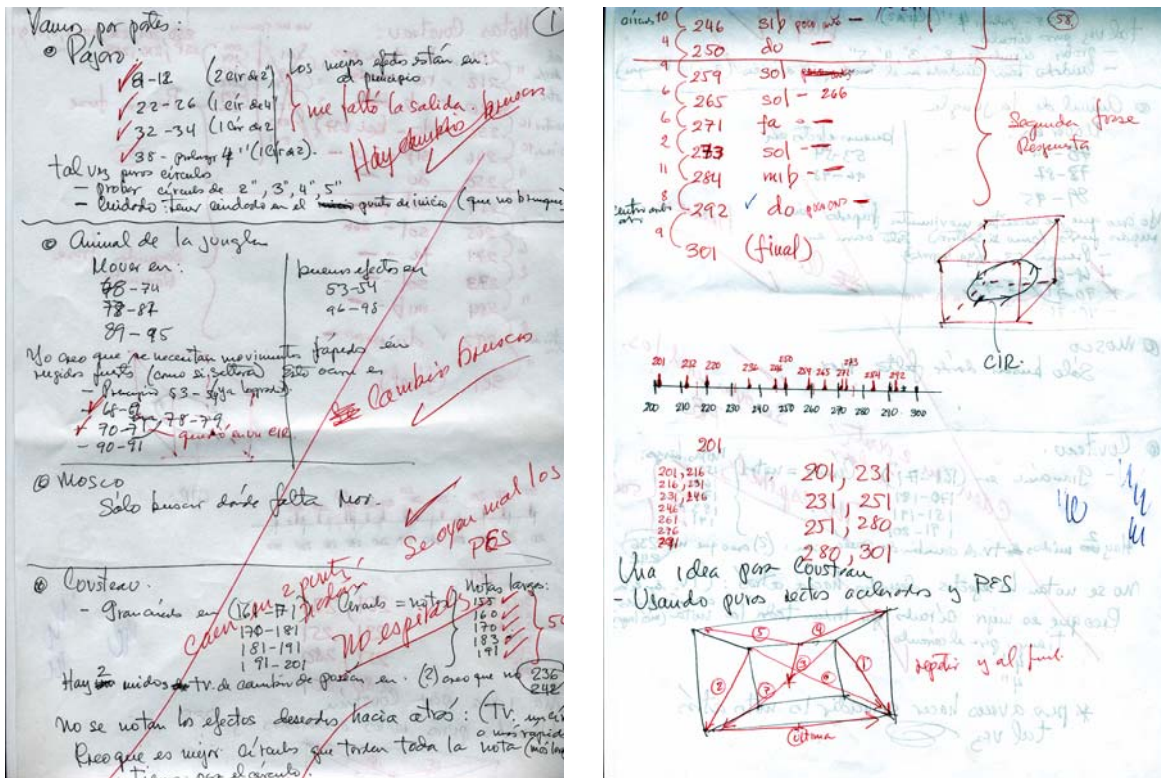


Figura 3.1 Borradores de una fase de diseño.

### 3.4 Programación de la secuencia

Para programar la secuencia es indispensable tener la pista final grabada en disco compacto y reproducirla en un aparato que tenga contador de tiempo, para leer con precisión los tiempos de inicio y terminación de cada fragmento a espacializar, y registrarlos en un papel junto con su trayectoria. Es muy recomendable evitar programar cambios bruscos de posición de la fuente sonora, es decir, terminar una trayectoria en un punto del espacio e iniciar otra inmediata en un punto alejado del anterior pues causará un “blop”, hasta donde sea posible conviene iniciar una secuencia en el punto donde terminó la anterior a menos que se busque ese efecto. La programación deberá quedar de la manera siguiente: (En los anexos se incluye la programación completa de la demostración.)

Trayectoria	Tiempo	Tiempo	Pasos	Coordenadas			Coordenadas		
	inicial	final		iniciales			finales		
	(seg)	(seg)		X3	Y3	Z3	X4	Y4	Z4
REC	123	128	50	2.5	1.2	3.8	0	1	4
CIR	155	153	20	2	3	0	0	0	0

5. MURCIÉLAGO										
TRY\$	TINI	TFIN	N	X3	Y3	Z3	X4	Y4	Z4	
PES	301	340	39	2	4	0	0	0	0	
CIR	340	341	10	2	4	0	0	0	0	CÍRCULO DE 1"
PES	341	353	12	2	4	0	0	0	0	
CIR	353	354	10	2	4	0	0	0	0	CÍRCULO DE 1"
PES	354	367	13	2	4	0	0	0	0	
REC	367	367.5	5	0	2	2	4	2	2	IZ DER
REC	367.5	368	5	4	2	2	0	4	0	DER IZ/AD
REC	368	368.5	5	0	4	0	4	0	4	IZ/AD DER/AT
REC	368.5	369	5	4	0	4	2	4	0	DER/AT ADEL
REC	369	369.5	5	2	4	0	2	2	4	ADEL AT
REC	369.5	370	5	2	2	4	4	4	0	AT DER/AD
REC	370	370.5	5	4	4	0	0	2	4	DER/AD IZ/AT
REC	370.5	371	5	0	2	4	4	2	2	IZ/AT DER

**Tabla 3.2 Fragmento de la programación de la secuencia de demostración**

# Capítulo 4

## Pruebas experimentales y evaluación de los resultados

En este capítulo se muestran algunas pruebas realizadas al espacializador en cuanto a su funcionamiento y a diferentes personas para medir su capacidad auditiva, se mencionan también algunas opiniones externadas.

### 4.1 Volumen matemático y volumen acústico

Como se dijo en el capítulo de Diseño de Software, durante las pruebas que se hicieron para apreciar el funcionamiento del sistema, al hacer viajar un punto sonoro virtual a lo largo de una arista se apreció claramente un decaimiento general en la parte central que no generaba la idea de que el objeto sonoro viajaba sobre dicha línea; este defecto se presentó en general cuando la fuente sonora virtual se encontraba alejada de las bocinas como en la región central de un plano o del cubo sonoro, por lo que se midió la energía recibida con una

computadora portátil con micrófono a través del programa Sound Forge colocada en la posición del punto de audición; habiendo detectado cómo ocurría dicho decaimiento se hicieron correcciones al software para compensar dicho decaimiento. A continuación se muestra el reporte de esta prueba.

En las primeras dos columnas aparecen los volúmenes matemáticos que son enviados a los canales 3 y 4. En las dos columnas siguientes aparece la medida tomada con el programa Sound Forge desde el punto de audición. Las columnas finales muestran el resultado de la corrección efectuada al programa de espacialización

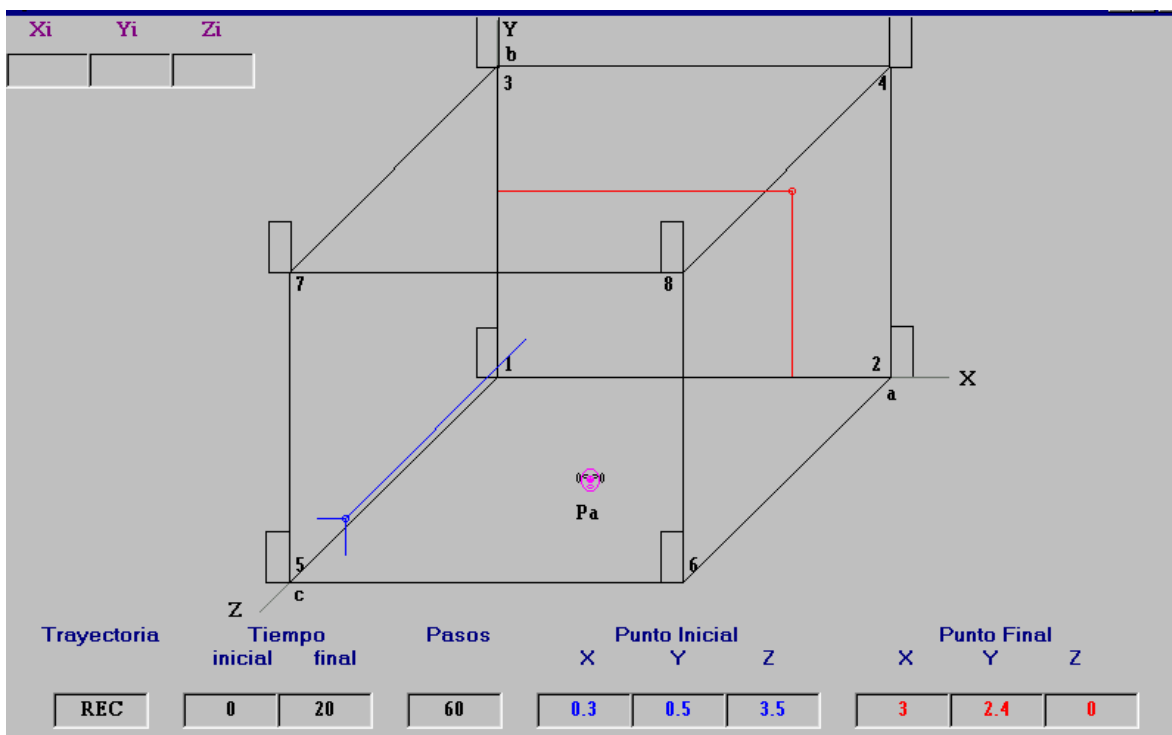
Volumen matemático		Energía total recibida		Energía total recibida	
Bocina 3	Bocina 4	sin corrección acústica		con corrección acústica	
100	0	100	0	100	0
90	10	70	2	90	10
80	20	47	4	79	20
70	30	35	7	68	31
60	40	20	10	60	40
50	50	14	14	50	50
40	60	10	20	40	60
30	70	7	35	31	68
20	80	4	47	20	79
10	90	2	70	10	90
0	100	0	100	0	100

**Tabla 4.1 Volumen matemático y volumen acústico**



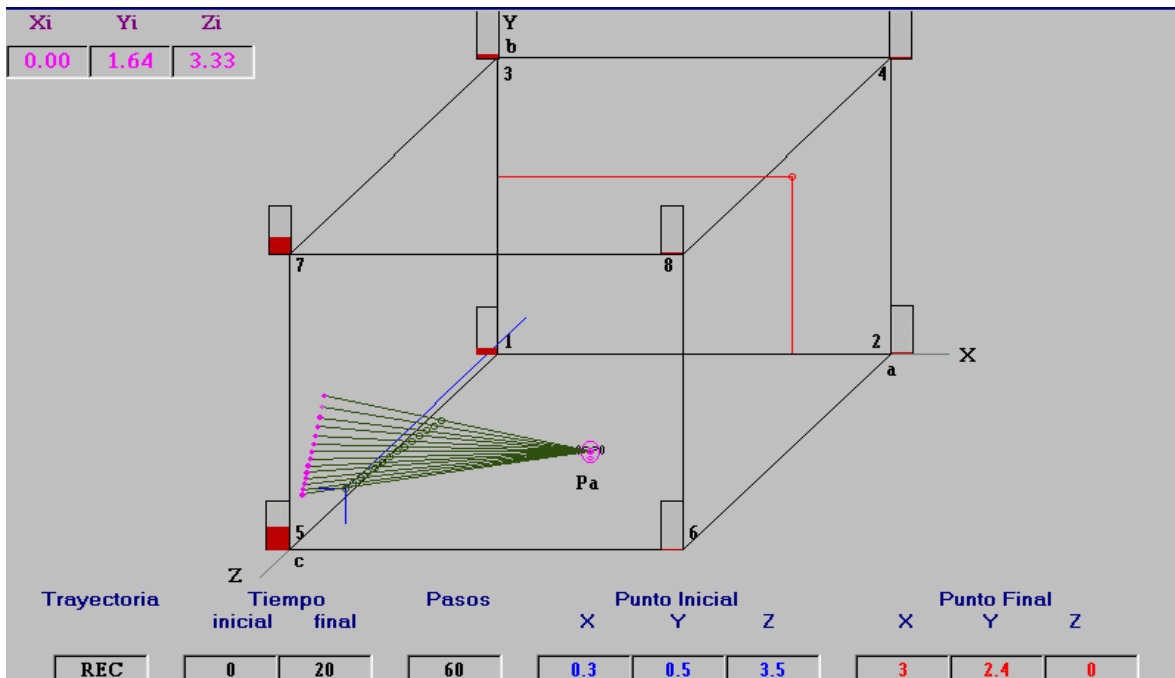
## 4.2 Desempeño general del modelo

Ahora se muestra una secuencia de imágenes que corresponden a momentos sucesivos del recorrido de un punto sonoro sobre una trayectoria rectilínea que parte del punto de coordenadas (0.3, 0.5, 3.5) y termina en el punto de coordenadas (3, 2.4, 0) con una duración de 20 segundos subdivididos en 60 pasos. Las coordenadas del punto de intersección se muestran en la parte superior izquierda. El volumen de cada bocina se representa por el nivel de iluminación del rectángulo adjunto. La caja sonora tiene dimensiones de 4 x 4 x 4. Las imágenes muestran en una forma gráfica el método que se diseñó, que es en el que se basa el modelo matemático.

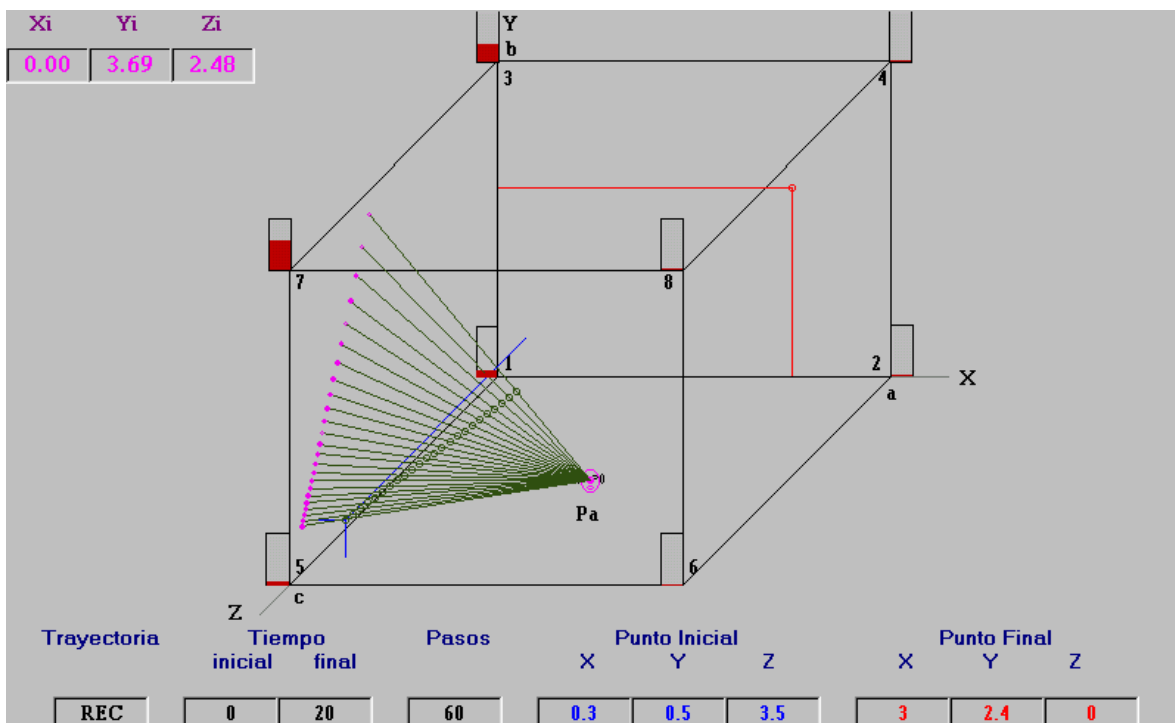


**Figura 4.2** Puntos extremos de la trayectoria.

En la imagen siguiente el punto sonoro ya ha recorrido 14 pasos, la trayectoria recorrida se muestra con pequeños círculos que se dirigen hacia el punto final, los puntos de intersección son los extremos del abanico que inciden en este momento en el plano YZ.

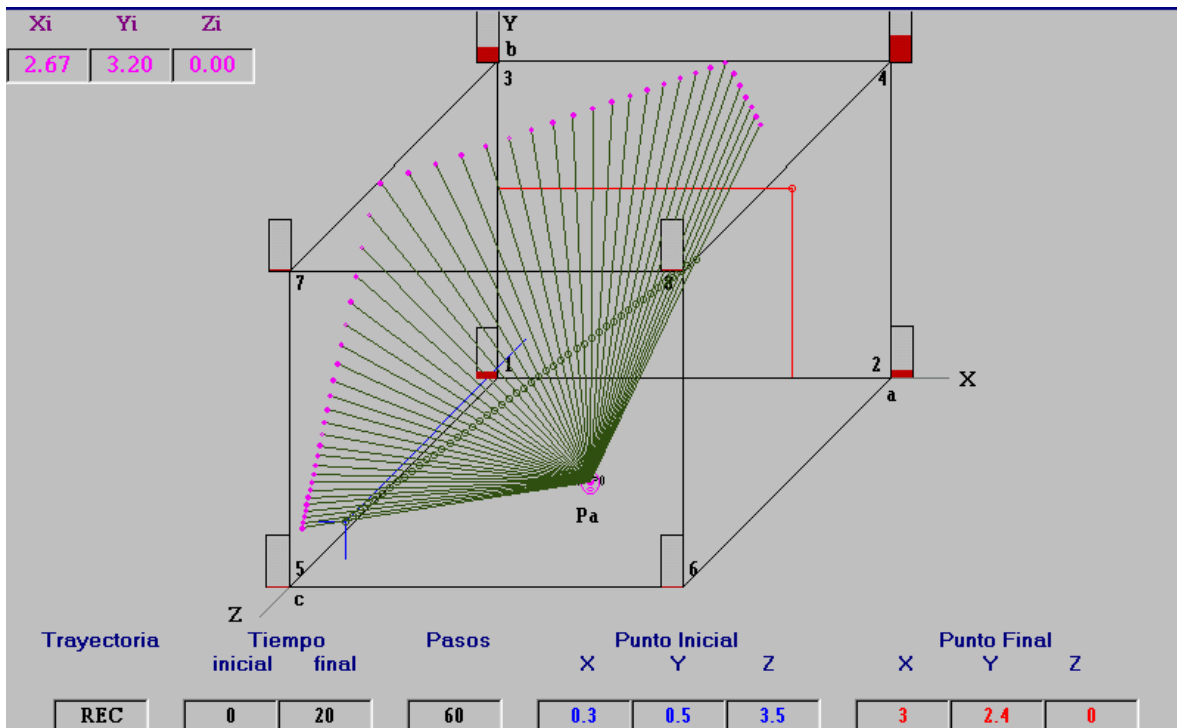


**Figura 4.3.** El punto sonoro ha recorrido 14 pasos, el Pi actual está sobre el plano YZ, ( $X_i = 0$ ) cuyos vértices son 1, 3, 5 y 7; como Pi está más cerca de 5, 7 que de 1, 3 los primeros tienen mayor intensidad sonora.

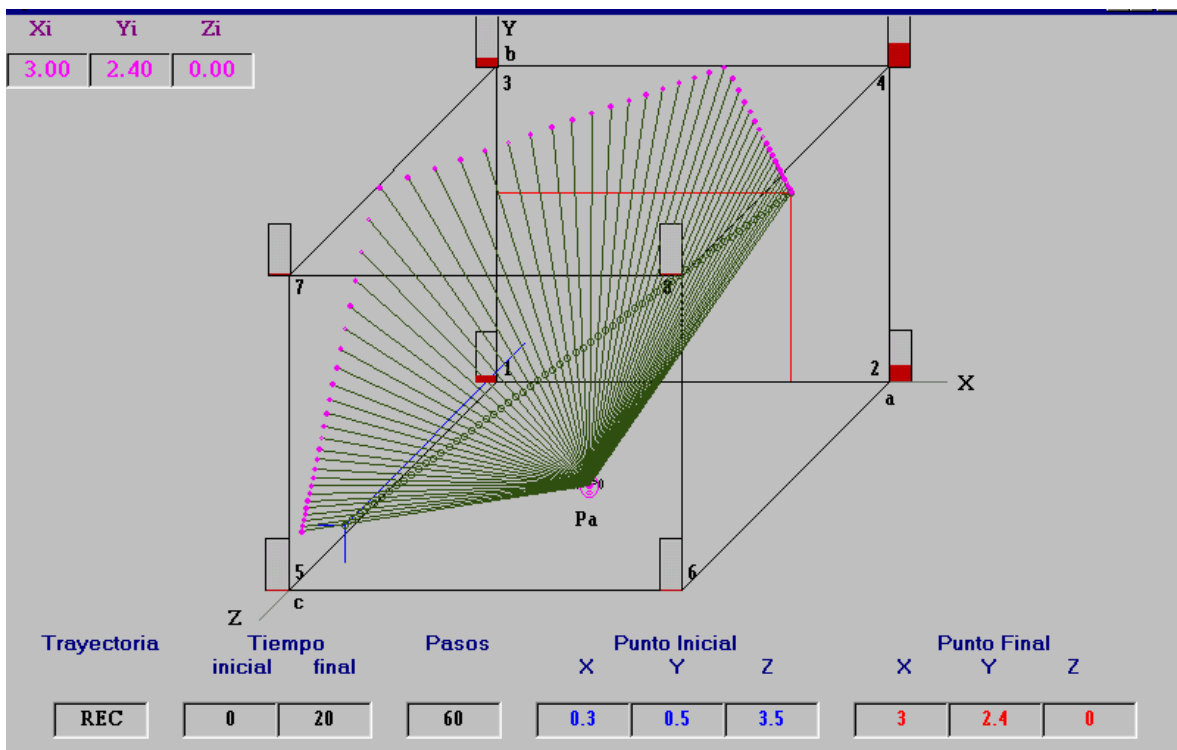


**Figura 4.4.** El Pi actual aún está en el plano YZ pero se aproxima al techo (plano XZb).





**Figura 4.7.**  $P_i$  actual se encuentra ahora en el plano XY ( $Z_i = 0$ ). El punto sonoro se aproxima al final de su recorrido.

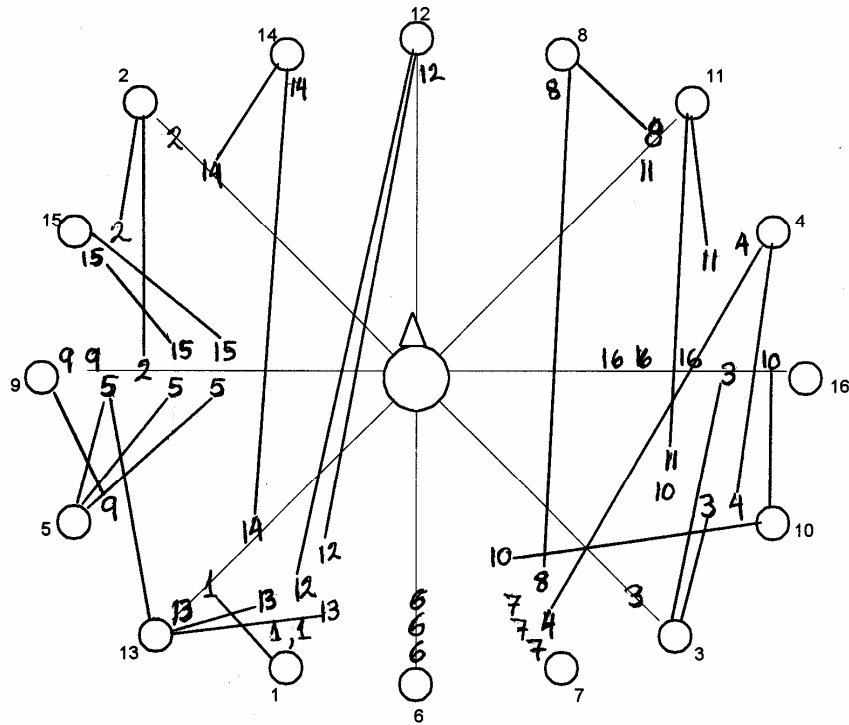


**Figura 4.8.** La trayectoria ha concluido, tanto  $P_s$  como  $P_i$  actuales coinciden con el punto final de la trayectoria.

### **4.3 Prueba del mecanismo humano de localización**

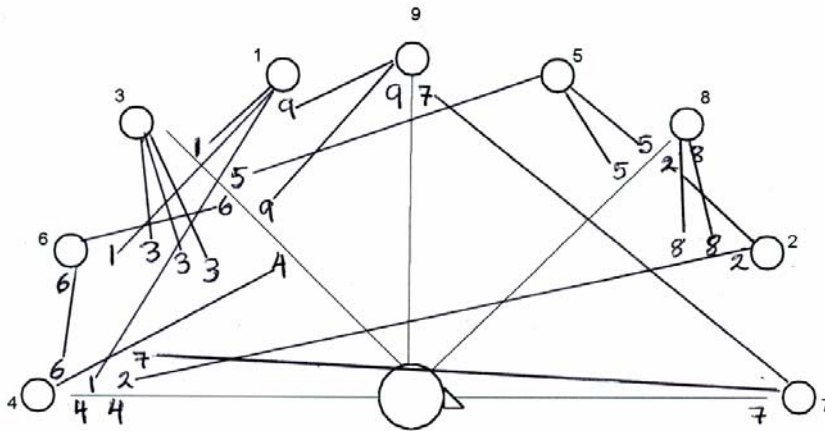
Aunque por la información recopilada al inicio del proyecto, proveniente de diversas investigaciones, ya se sabía de la deficiencia humana en localización auditiva, después de poner a prueba el Espacializador se detectó una importante desviación entre la posición de la fuente virtual y la percepción del escucha, y también entre la percepción de un escucha y otro; aunque esto podía interpretarse como la corroboración de esas investigaciones, se consideró importante realizar dos pruebas reales de localización acústica en un ambiente natural, una lateral y otra vertical. Ambas pruebas se realizaron a un grupo de estudiantes de Ingeniería en un área verde, descubierta, sin piso de cemento ni edificios cercanos que reflejaran el sonido, en un momento en el que había muy pocas personas en la zona y no se percibió viento; la fuente sonora fue un metrónomo de cuarzo con sonido tipo tic-tac a una frecuencia de 100 emisiones sonoras por minuto, a una distancia de 5 metros del escucha para la prueba horizontal y de 2 metros para la vertical, en cada posición espacial se sonaron 5 tic-tac. Aunque la prueba se aplicó a 10 estudiantes se muestran los resultados de 3 de los casos más representativos para no perder la claridad en la gráfica. El círculo central representa al escucha en el que la nariz indica su orientación, los 16 círculos periféricos indican las 16 posiciones en que se ubicó la fuente sonora y los números de la parte exterior la secuencia de la prueba. Los números escritos a mano indican las respuestas de los escuchas y son unidos por una línea recta con la posición de la fuente sonora real.

Las líneas de mayor longitud indican las mayores confusiones y ocurren entre las regiones frontal y posterior, en cambio la ausencia de líneas entre la región izquierda y derecha indican que casi no existe confusión entre esas zonas del escucha



**Figura 4.9 Prueba de localización horizontal de un sonido real en ambiente natural.**

La segunda prueba se realizó en la misma sesión pero ahora el sonido se emitió desde 9 posiciones ubicadas dentro del plano vertical que corta perpendicularmente al eje interaural en su punto medio, la nariz indica la orientación del escucha, se observan confusiones muy grandes.



**Figura 4.10 Prueba de localización vertical de un sonido real en ambiente natural.**

## 4.4 Importancia de la valoración

### **El proceso iterativo: escuchar-valorar-correr**

Una vez concluido el trabajo de espacialización de una pista sonora, aunque haya sido largo y cansado, es muy conveniente entrar a un proceso iterativo de refinamiento que incluye tres pasos: escuchar cuidadosamente el efecto logrado, valorar crítica y objetivamente los resultados, y realizar las modificaciones de precisión y mejoría necesarias. Este proceso debe repetirse una y otra vez, incluso, se logran mejores resultados si se deja pasar un tiempo y luego se repite la iteración; sin embargo la valoración personal tiene un margen de subjetividad. Es muy conveniente que cuando ya se haya llegado a un punto aceptable, se someta el trabajo a la crítica de otras personas. Estos críticos no forzosamente deberán ser expertos. Excelentes resultados y brillantes ideas aportan los niños, ya que no tienen prejuicios ni compromisos y expresan sus ideas con libertad.

La muestra que se tiene preparada incluye algunos sonidos aislados principalmente de animales y luego unos fragmentos musicales que incluyen una pieza llamada “Murciélago” que sugiere el vuelo de un murciélago en un ambiente sombrío. Esta secuencia ha sido escuchada por varias personas de edad y nivel de estudios muy diversos. A continuación se muestran algunas opiniones, preguntas y sugerencias que fueron externadas.

“¿Qué velocidad angular máxima puede alcanzar el espacializador?, sería interesante hacer pruebas de percepción en este sentido”.

“Sería interesante presentar este trabajo a grupos de estudiantes de diferentes niveles, incluso a niños y ver cómo reaccionan y qué opinan, y tomar esas ideas para realizar mejorías”.

“Es importante haber alcanzado resultados concretos que pueden con mejor equipo y seguramente más tiempo. Me interesa en especial conocer la razón por la que la intensidad del sonido decae cuando se distribuye entre varias bocinas que obliga a que el modelo incluya una corrección de recuperación”.

“Creo que es importante la selección de los sonidos, pues algunos me parecieron confusos en su posición, pero en cambio el sonido del mosco me resultó sumamente real”.

“Creo que se deben extender las pruebas con muchas personas para recabar qué es lo que gusta más y qué es lo que se aprecia menos para mejorarlo y comercializarlo”.

“Me gustó el acoplamiento de la música del Murciélago (que por cierto está muy bien lograda) con el movimiento, se nota que requirió mucho trabajo, también me gustó el sonido del mosco”.

“Este proyecto cabe dentro de otros proyectos educativos. Debe seguirse mejorando y buscarse su aplicación dentro del proceso de enseñanza-aprendizaje.”



# Conclusiones

A continuación se presentan las conclusiones a que se llegó después de haber realizado todos los pasos para la construcción del espacializador acústico computacional y de haber realizado un gran número de pruebas que incluyeron la espacialización de una pieza musical así como el intercambio de conocimientos con músicos o simplemente de ideas con personas de formación y profesiones diversas:

El espacializador está funcionando con base en la teoría desarrollada a través de una red de computadoras que procesan el sonido y lo transfieren a un equipo de audio. Aunque puede ser mejorado con equipo de cómputo más rápido, de audio de mejor calidad y componentes adicionales como un ecualizador, el sistema funciona y está disponible una demostración que incluye sonidos de la naturaleza y música especialmente compuesta para este fin por lo que se puede afirmar que se cumplieron las hipótesis iniciales.

Se obtuvo una gran cantidad de referencias bibliográficas que aparecen en la sección de anexos y algunas obras importantes sobre sonido espacial, tal como *3D sound for virtual reality and multimedia* de **Durand R. Begault** considerada como la más completa

compilación sobre el tema; en cuanto a acústica musical y estructura del sonido se reunieron varios libros y artículos; a través de internet se obtuvo mucha información sobre psicoacústica.

Tuve la oportunidad de conocer físicamente el espacializador del IRCAM, escuchar una demostración e intercambiar ideas con algunos de los técnicos que participaron en su diseño y construcción. La conclusión que logré fue que la calidad del equipo utilizado y la disposición de una verdadera sala anti eco establece una diferencia importante, sin embargo los problemas a que ellos se enfrentan son los mismos que aquí se presentaron y muchos de los enfoques de solución que les están dando son muy similares. Una cosa que noté es el hecho de que en el IRCAM prefieren utilizar sonidos simples de la naturaleza o sintetizados y no contaban para ese momento (hace 2 años) con una obra musical especialmente compuesta para espacializarse.

Como resultado de este trabajo, se cuenta con una teoría original, su planteamiento matemático y programa computacional que pueden ser utilizados y modificados más adelante conforme el proyecto evolucione y surjan nuevos requerimientos o ideas de músicos que utilicen el sistema.

El sistema ha sido probado con sonidos individuales cortos, largos, con diferente frecuencia, con diferente timbre, sonidos de la naturaleza y música de diversos autores.

El estado actual del espacializador puede ser un punto de reinicio para seguir explorando las técnicas de generación de sonido espacial y las posibilidades de aplicación, sin embargo creo que se deben incluir nuevos conceptos y tomar en cuenta las opiniones de expertos y no expertos, pero se tiene la ventaja de contar con el sistema. Algunas cosas importante a incluir en desarrollos futuros son:

- Agregar un ecualizador con buenas características
- Integrar un equipo de retardo (delay)
- Preprocesar primeras reflexiones con un programa de manejo de sonido
- Realizar análisis individuales de más sonidos para su utilización

- Realizar pruebas psicoacústicas con diferentes sonidos y personas
- Invitar a más personas y grupos y atender sus críticas y sugerencias.

Se está buscando la colaboración de instituciones educativas y culturales para realizar algunas instalaciones y demostraciones temporales o fijas con fines divulgación; también de alguna institución superior de música que acepte crear un laboratorio de investigación de musical espacial.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- 1. (1994) Durand R. Begault, “3-D Sound for Virtual Reality and Multimedia”  
Editorial AP PROFESSIONAL**
- 2. (1991) Ahnert, W, and Feistel R. “Binaural Auralization from a sound system  
simulation program”  
No 3127 New York Audio Engineering Society**
- 3. (1971) Barron M. “The subjective effects of first reflections in concert halls, the  
need for lateral reflections”  
Journal of Sound and Vibration, 15, 475-494**
- 4. (1981) Barron M. and Marshall A. “Spatial impression due to early lateral  
reflections in concert halls: the derivation of a physical measure”  
Journal of Sound and Vibration, 77, 211-232**
- 5. (1993) Ericson M. McKinley “Laboratory and In-flight experiments to evaluate  
3 - D audio technology on Space Operations Applications and Research”  
Conference publication 3240 Houston NASA Johnston Space Center**
- 6. (1993) Calvo Manzano Antonio, “Acústica Físico Musical”  
Real Musical, Madrid España**
- 7. (1992) Jacobson L. Cyberarts. “Exploring Art and Technology”  
San Francisco Millar Freeman**
- 8. (1993) Kalawsky R. S. “The Science of Virtual Reality and Virtual Environments”  
Wokinham, England: Addison Wesley**

9. (1998) IRCAM "Revista *résonance* No 13"  
Centre Georges Pompidou, Entretien avec Karlheinz Stokhausen
10. (1967) Batteau, D. W. "The role of the pinna in human localization,"  
*Proc. Royal Society London*, Vol. 168 (series B), pp. 158-180. The first work to report pinna echoes as an explanation for vertical (and also horizontal) localization.
11. (1987) Clifton, R. K. "Breakdown of echo suppression in the precedence effect,"  
*J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 82, pp. 1834-1835. Demonstrates that the suppression of echoes is a dynamic process, probably related to the need for the auditory system to build a model of the acoustic environment; also demonstrates that [Lindemann's model](#) must be incomplete.
12. (1993) Duda, R. O. "Estimating Azimuth and Elevation From the Interaural Intensity Difference,"  
Technical Report No. 4, NSF Grant No. IRI-9214233, Dept. of Elec. Engr., San Jose State Univ. (September, 1993). For an abstract, see [Report No. 4](#)
13. (1995) Duda, R. O. "Estimating azimuth and elevation from the interaural head related transfer function," in *Binaural and Spatial Hearing*, R. Gilkey and T. Anderson, Eds. (Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, N; In press.) Shows that the HRTF's contain the information needed to estimate azimuth and elevation using only interaural intensity differences. Assumes a distant, single wide-band source in an anechoic environment.
14. (1998) Wenzel, E. M., F. L. Wightman, D. Kistler, and S. H. Foster  
"The Convolvotron: Realtime synthesis of out-of-head localization,"  
Second Joint Meeting Acoustic Societies of America and Japan, Honolulu, HI. Describes the Convolvotron -- special hardware to synthesize 3-D sound

- 15. (2000) Enciclopedia formativa Marín**  
**Editorial Marín S.A.**
  
- 16. Serway, Física tomo 1, Cuarta edición**  
**Mc Graw Hill**
  
- 17. Ross Nelson, Guía completa de Visual Basic**  
**Mc Graw Hill**
  
- 18. Birnios Baltazar, Aplicaciones Multimedia con Visual Basic**  
**Manuales Users**

## ANEXO A

### CÓDIGO FUENTE

*En seguida se explica el desarrollo del programa en sus partes principales que son:  
Generación de las posiciones del punto sonoro dentro de una trayectoria.  
Para cada posición, realización de los 3 pasos del planteamiento matemático:*

- 1. Determinación del plano sonoro*
- 2. Determinación de las coordenadas del punto de intersección*
- 3. Distribución de volúmenes entre las bocinas del plano sonoro*

*Para ejemplificar el funcionamiento del programa se seleccionó una trayectoria rectilínea siendo:*

*P1:(X1,Y1,Z1) El punto de audición (fijo)  
P2:(X2,Y2,Z2) El punto sonoro (variable)  
P3:(X3,Y3,Z3) El punto inicial de la trayectoria (fijo)  
P4:(X4,Y4,Z4) El punto final de la trayectoria (fijo)  
P:(X, Y, Z) El punto de intersección con el plano sonoro (variable)*

*Los límites de la caja sonora son: A=4, B=4, C=4*

*El punto de audición es: P1:(2,2,2)*

*Los puntos inicial y final de la trayectoria son: P3:(1,3,2) y P4:(4,3.5,1)*

*El punto sonoro P2 toma valores desde P3 hasta P4*

*Se explica sólomente el cálculo del primer punto sonoro ya que es similar para los demás, las partes enmarcadas en rectángulos son las que corresponden al cálculo anterior.*

#### DECLARACIONES INICIALES

```
DECLARE SUB CANAL (CHANEL!)
DECLARE SUB VOLU (DATOS!, CAN!, TIEMPO)
CANALACTIVO = 1      'CANAL DE SALIDA MIDI
CLEAR , 50000, 2048
DIM VOL(801, 8)
```

#### DIMENSIONES DE CAJA SONORA Y COORDENADAS DE P1 (ESCUCHA)

```
A = 4: B = 4: C = 4: VS = 4
X1 = A / 2: Y1 = B / 2: Z1 = C / 2
LEJOS = SQR(X1 * X1 + Y1 * Y1 + Z1 * Z1)
```

#### PREPARACIÓN DE ARCHIVOS

```
INICIAGRA: CLOSE
INPUT "VOCES A GRABAR"; J1, J2
IF J1 = 0 THEN STOP
INPUT "ARCHIVO "; ARC$
OPEN ARC$ FOR OUTPUT AS #1
RESTORE
```

## LECTURA DE UNA TRAYECTORIA Y BIFURCACIÓN A SU RUTINA

TRY\$ =           CÓDIGO DE TRAYECTORIA  
TINI,TFIN = TIEMPOS INICIAL Y FINAL  
N =               NÚMERO DE INTERVALOS EN QUE SE DIVIDIRA LA  
                  TRAYECTORIA  
X3,Y3,Z3 = COORDENADAS DEL PUNTO INICIAL DE LA TRAYECTORIA  
X4,Y4,Z4 = COORDENADAS DEL PUNTO FINAL DE LA TRAYECTORIA

### *Lee una trayectoria y transfiere el control a una subrutina (en este caso a RECTA)*

```
REM *** LEE UNA TRAYECTORIA ***  
OTRY: READ TRY$, TINI, TFIN, N, X3, Y3, Z3, X4, Y4, Z4  
REM *** TRANSFIERE CONTROL A RUTINA CORRESPONDIENTE ***  
IF TRY$ = "REC" THEN GOSUB RECTA  
IF TRY$ = "RAC" THEN ALF1 = 3.14: ALF2 = 6.28: FAC = 1: SUM = 0: GOSUB  
RECACEL  
IF TRY$ = "SRA" THEN ALF1 = 3.14: ALF2 = 4.71: FAC = 2: SUM = 0: GOSUB  
RECACEL  
IF TRY$ = "SRD" THEN ALF1 = 4.72: ALF2 = 6.28: FAC = 2: SUM = -1: GOSUB  
RECACEL  
IF TRY$ = "PES" THEN GOSUB PES  
IF TRY$ = "CIR" THEN GOSUB CIR  
IF TRY$ = "ESP" THEN GOSUB ESP  
IF TRY$ = "ESD" THEN GOSUB ESD  
IF TRY$ = "ESA" THEN GOSUB ESA  
IF TRY$ = "PAL" THEN GOSUB PAL  
IF TRY$ = "FIN" THEN GOTO INICIAGRA  
GOTO OTRY
```

## RUTINAS DE TRAYECTORIAS

RECTA:

### *Como X3 es diferente a X4 considera a X como variable independiente*

```
RECTA: P = 0: TPAS = (TFIN - TINI) / N  
IF X3 <> X4 THEN GOTO VARX  
IF Y3 <> Y4 THEN GOTO VARY  
IF Z3 <> Z4 THEN GOTO VARZ
```

### *Calcula el paso S y determina las coordenadas X2, Y2, Z2 para los N puntos sonoros*

```
VARX: S = (X4 - X3) / N  
FOR X2 = X3 TO X4 STEP S  
P = P + 1  
Y2 = Y3 + (X2 - X3) * (Y4 - Y3) / (X4 - X3)  
Z2 = Z3 + (X2 - X3) * (Z4 - Z3) / (X4 - X3)  
GOSUB CALCPCT  
NEXT X2  
GOTO SAL1
```

```
VARY: S = (Y4 - Y3) / N  
FOR Y2 = Y3 TO Y4 STEP S  
P = P + 1
```



```

X2 = X3 + (Y2 - Y3) * (X4 - X3) / (Y4 - Y3)
Z2 = Z3 + (Y2 - Y3) * (Z4 - Z3) / (Y4 - Y3)
GOSUB CALCPCT
NEXT Y2
GOTO SAL1

```

```

VARZ: S = (Z4 - Z3) / N
FOR Z2 = Z3 TO Z4 STEP S
P = P + 1
X2 = X3 + (Z2 - Z3) * (X4 - X3) / (Z4 - Z3)
Y2 = Y3 + (Z2 - Z3) * (Y4 - Y3) / (Z4 - Z3)
GOSUB CALCPCT
NEXT Z2
GOTO SAL1

```

### RECTA ACELERADA:

```

RECACEL: P = 0: TPAS = (TFIN - TINI) / N: ALFD = (ALF2 - ALF1) / N
IF X3 <> X4 THEN GOTO VARIAX
IF Y3 <> Y4 THEN GOTO VARIAY
IF Z3 <> Z4 THEN GOTO VARIAZ
VARIAX: DST = X4 - X3
FOR ALFA = ALF1 TO ALF2 STEP ALFD
P = P + 1
X2 = X3 + (.5 + .5 * (COS(ALFA) + SUM)) * FAC * DST
Y2 = Y3 + (X2 - X3) * (Y4 - Y3) / (X4 - X3)
Z2 = Z3 + (X2 - X3) * (Z4 - Z3) / (X4 - X3)
GOSUB CALCPCT
NEXT ALFA
GOTO SAL1

```

```

VARIAY: DST = Y4 - Y3
FOR ALFA = ALF1 TO ALF2 STEP ALFD
P = P + 1
Y2 = Y3 + (.5 + .5 * (COS(ALFA) + SUM)) * FAC * DST
X2 = X3 + (Y2 - Y3) * (X4 - X3) / (Y4 - Y3)
Z2 = Z3 + (Y2 - Y3) * (Z4 - Z3) / (Y4 - Y3)
GOSUB CALCPCT
NEXT ALFA
GOTO SAL1

```

```

VARIAZ: DST = Z4 - Z3
FOR ALFA = ALF1 TO ALF2 STEP ALFD
P = P + 1
Z2 = Z3 + (.5 + .5 * (COS(ALFA) + SUM)) * FAC * DST
X2 = X3 + (Z2 - Z3) * (X4 - X3) / (Z4 - Z3)
Y2 = Y3 + (Z2 - Z3) * (Y4 - Y3) / (Z4 - Z3)
GOSUB CALCPCT
NEXT ALFA
GOTO SAL1

```

### PUNTO ESTACIONARIO

```

PES: REM PUNTO ESTACIONARIO
P = 0: TPAS = (TFIN - TINI) / N
FOR IEST = 1 TO N

```

```

P = P + 1
X2 = X3
Y2 = Y3
Z2 = Z3
GOSUB CALCPCT
NEXT IEST
GOTO SAL1

```

### CÍRCULO:

```

CIR: REM CIRCULO HORIZONTAL CON ALTURA Y
R = X3: Y2 = Y3: P = 0: PASO = 6.2832 / N: TPAS = (TFIN - TINI) / N
FOR ALFA = 0 TO 6.2832 STEP PASO
P = P + 1
X2 = R * SIN(ALFA) + X1
Z2 = R * COS(ALFA) + X1
GOSUB CALCPCT
NEXT ALFA
GOTO SAL1

```

### ESPIRAL ASCENDENTE:

```

ESP: REM ESPIRAL HORIZONTAL ASCENDENTE DE 5 VUELTAS VARIANDO Y DE 0 A B
R = X3
P = 0: Y2 = 0: PASO = 31.416 / N: TPAS = (TFIN - TINI) / N
FOR ALFA = 0 TO 31.35 STEP PASO
P = P + 1
Y2 = Y2 + B / N
X2 = R * SIN(ALFA) + X1
Z2 = R * COS(ALFA) + X1
GOSUB CALCPCT
NEXT ALFA
GOTO SAL1

```

### ESPIRAL DESCENDENTE:

```

ESD: REM ESPIRAL HORIZONTAL DESCENDENTE DE 5 VUELTAS VARIANDO Y DE B A 0
R = X3
P = 0: Y2 = B: PASO = 31.416 / N: TPAS = (TFIN - TINI) / N
FOR ALFA = 0 TO 31.35 STEP PASO
P = P + 1
Y2 = Y2 - B / N
X2 = R * SIN(ALFA) + X1
Z2 = R * COS(ALFA) + X1
GOSUB CALCPCT
NEXT ALFA
GOTO SAL1

```

### ESPIRAL ASCENDENTE ACELERADA:

```

ESA: REM ESPIRAL HORIZONTAL ASCENDENTE ACELERADA DE 7 VUELTAS VARIANDO Y
DE 0 A B
R = X3
P = 0: Y2 = 0: PASO = 43.982 / N: INCR = PASO / N: TPAS = (TFIN - TINI) /
N
PASO = PASO / 2: ALFA = 0

```

```

FOR L = 1 TO N - 1
ALFA = ALFA + PASO + L * INCR
P = P + 1
Y2 = Y2 + B / N
X2 = R * SIN(ALFA) + X1
Z2 = R * COS(ALFA) + X1
GOSUB CALCPCT
NEXT L
GOTO SAL1

```

### PUNTO ALEATORIO:

```

PAL: REM NPA POSICIONES ALEATORIAS DE M PTOS C/U. EN TOTAL SUMAN N PUNTOS
NPA = X3: M = N / NPA
P = 0: TPAS = (TFIN - TINI) / N
FOR IALE = 1 TO NPA
X3 = (A * RND(1)) / 2
Y3 = (B * RND(1)) / 2
Z3 = (C * RND(1)) / 2
FOR IEST = 1 TO M
P = P + 1
X2 = X3
Y2 = Y3
Z2 = Z3
GOSUB CALCPCT
NEXT IEST
NEXT IALE
GOTO SAL1

```

### GRABACIÓN DE UNA TRAYECTORIA:

```

SAL1: REM *** GRABA UNA TRAYECTORIA INDIVIDUAL A DISCO CON TIEMPOS ***
FOR I = 1 TO N
VOLU VOL(I, J1), VOL(I, J2), TINI
TINI = TINI + TPAS
NEXT I
RETURN

```

***CALCPCT determina el Plano Sonoro, las coordenadas del punto de intersección y la distribución de volúmenes entre las bocinas contenidas en dicho plano***

CALCPCT:

### DETERMINACIÓN DEL PLANO SONORO Y COORDENADAS DE PI:

```

REM ** DETERMINA PLANO SONORO E INTERSECCION (X,Y,Z) DE ACUERDO A
(X2,Y2,Z2) *
IF X1 = X2 GOTO L470
IF X2 > X1 GOTO L430

```

***Como para el primer punto sonoro  $X_2 < X_1$ :***

***Hace  $X=0$  para probar si YZ es el plano sonoro***

***Calcula Y y Z correspondientes a  $X=0$***

***Prueba si Y y Z están dentro de los límites de la cara en el plano YZ***

```

X = 0
Y = Y1 + (X - X1) * (Y2 - Y1) / (X2 - X1)
Z = Z1 + (X - X1) * (Z2 - Z1) / (X2 - X1)
IF (Y >= 0 AND Y <= B) AND (Z >= 0 AND Z <= C) THEN GOTO L740

```

```

IF X2 < X1 GOTO L470
L430:
X = A
Y = Y1 + (X - X1) * (Y2 - Y1) / (X2 - X1)
Z = Z1 + (X - X1) * (Z2 - Z1) / (X2 - X1)
IF (Y >= 0 AND Y <= B) AND (Z >= 0 AND Z <= C) THEN GOTO L820
L470:
IF Y1 = Y2 GOTO L580
IF Y2 > Y1 GOTO L540
Y = 0
X = X1 + (Y - Y1) * (X2 - X1) / (Y2 - Y1)
Z = Z1 + (Y - Y1) * (Z2 - Z1) / (Y2 - Y1)
IF (X >= 0 AND X <= A) AND (Z >= 0 AND Z <= C) THEN GOTO L900
IF Y2 < Y1 GOTO L580
L540:
Y = B
X = X1 + (Y - Y1) * (X2 - X1) / (Y2 - Y1)
Z = Z1 + (Y - Y1) * (Z2 - Z1) / (Y2 - Y1)
IF (X >= 0 AND X <= A) AND (Z >= 0 AND Z <= C) THEN GOTO L980
L580:
IF Z1 = Z2 GOTO L700
IF Z2 > Z1 GOTO L650
Z = 0
X = X1 + (Z - Z1) * (X2 - X1) / (Z2 - Z1)
Y = Y1 + (Z - Z1) * (Y2 - Y1) / (Z2 - Z1)
IF (X >= 0 AND X <= A) AND (Y >= 0 AND Y <= B) THEN GOTO L1060
IF Z2 < Z1 GOTO L700
L650:
Z = C
X = X1 + (Z - Z1) * (X2 - X1) / (Z2 - Z1)
Y = Y1 + (Z - Z1) * (Y2 - Y1) / (Z2 - Z1)
IF (X >= 0 AND X <= A) AND (Y >= 0 AND Y <= B) THEN GOTO L1140

```

## DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE VOLÚMENES

REM\*\*CALCULA LA DISTRIBUCION PORCENTUAL DE VOLUMENES EN EL PLANO SONORO\*\*  
L700:

***Habiéndose determinado que YZ es el plano sonoro***

***Asigna el nombre***

***Borra los 8 volúmenes (BORRAVOL)***

***Calcula el porcentaje que corresponde a las bocinas 5, 1, 7, 3 del plano YZ***

***Corrige los volúmenes por el efecto de distancia y acústico (CALCVOL)***

***Regresa a procesar el siguiente punto***

```

L740: REM --PLANO YZ--
PL$ = " YZ "
GOSUB BORRAVOL
VOL(P, 5) = Z * (B - Y) / (C * B)
VOL(P, 1) = (C - Z) * (B - Y) / (C * B)
VOL(P, 7) = Z * Y / (C * B)
VOL(P, 3) = (C - Z) * Y / (C * B)
GOSUB CALCVOL
RETURN

```

```

L820: REM --PLANO YZa--
PL$ = " YZa"
GOSUB BORRAVOL
VOL(P, 2) = (C - Z) * (B - Y) / (C * B)
VOL(P, 6) = Z * (B - Y) / (C * B)
VOL(P, 4) = (C - Z) * Y / (C * B)
VOL(P, 8) = Z * Y / (C * B)
GOSUB CALCVOL
RETURN

```

```

L900: REM --PLANO XZ--
PL$ = " XZ "
GOSUB BORRAVOL
VOL(P, 5) = (A - X) * Z / (A * C)
VOL(P, 6) = X * Z / (A * C)
VOL(P, 1) = (A - X) * (C - Z) / (A * C)
VOL(P, 2) = X * (C - Z) / (A * C)
GOSUB CALCVOL
RETURN

```

```

L980: REM --PLANO XZb--
PL$ = " XZb"
GOSUB BORRAVOL
VOL(P, 3) = (A - X) * (C - Z) / (A * C)
VOL(P, 4) = X * (C - Z) / (A * C)
VOL(P, 7) = (A - X) * Z / (A * C)
VOL(P, 8) = X * Z / (A * C)
GOSUB CALCVOL
RETURN

```

```

L1060: REM --PLANO XY--
PL$ = " XY "
GOSUB BORRAVOL
VOL(P, 1) = (A - X) * (B - Y) / (A * B)
VOL(P, 2) = X * (B - Y) / (A * B)
VOL(P, 3) = (A - X) * Y / (A * B)
VOL(P, 4) = X * Y / (A * B)
GOSUB CALCVOL
RETURN

```

```

L1140: REM --PLANO XYc--
PL$ = " XYc"
GOSUB BORRAVOL
VOL(P, 6) = X * (B - Y) / (A * B)
VOL(P, 5) = (A - X) * (B - Y) / (A * B)
VOL(P, 8) = X * Y / (A * B)
VOL(P, 7) = (A - X) * Y / (A * B)
GOSUB CALCVOL
RETURN

```

```

REM -----FINAL DE CALCPCT

```

### ***Borra los volúmenes de las 8 bocinas***

```
BORRAVOL: REM **BORRA VOLUMENES ANTES DE CALCULAR LOS DE UN NUEVO PUNTO**
FOR I = 1 TO 8
VOL(P, I) = 0
NEXT I
RETURN
```

CORRECCIÓN DE VOLÚMENES POR DIFERENCIA ENTRE VOLUMEN ACÚSTICO Y MATEMÁTICO

### ***Corrige volúmenes por distancia y por diferencia entre volumen matemático y acústico***

```
CALCVOL: REM ** CORRIGE VOLUMENES POR DISTANCIA Y ACUSTICA **
PRINT USING "###"; P;
PRINT USING "##.##"; X2; Y2; Z2;
PRINT PL$;
PRINT USING "##.##"; X; Y; Z;
PRINT USING "#####"; VOL(P, 1) * 100; VOL(P, 2) * 100; VOL(P, 3) * 100;
VOL(P, 4) * 100; VOL(P, 5) * 100; VOL(P, 6) * 100; VOL(P, 7) * 100;
VOL(P, 8) * 100
GOSUB VOLDIST
FOR I = 1 TO 8
REM VOL(P, I) = VOL(P, I) * 255 * GAN
REM SIGTES. 2 INSTR. CONVIERTEN VOL. MAT. A ACUSTICO (PARABOLA) 2a
AUMENTA MAS.
REM VOL(P, I) = 255 * (-32.95 / (10 * VOL(P, I) + .31932) + 103.19) / 100
VOL(P, I) = 255 * (-22.65 / (10 * VOL(P, I) + .22159) + 102.216) / 100
IF VOL(P, I) > 255 THEN VOL(P, I) = 255
NEXT I
REM LPRINT USING "###"; P;
REM LPRINT USING "##.##"; X2; Y2; Z2;
REM LPRINT PL$;
REM LPRINT USING "##.##"; X; Y; Z;
REM LPRINT USING "#####"; VOL(P, 1); VOL(P, 2); VOL(P, 3); VOL(P, 4);
VOL(P, 5); VOL(P, 6); VOL(P, 7); VOL(P, 8)
RETURN
```

```
VOLDIST: REM ** CORRIGE VOLUMENES POR DISTANCIA ENTRE Ps Y Pa **
REM DISTANCIA DEL PUNTO SONORO (P2) AL ESCUCHA (P1):
DSE = SQR((X2 - X1) ^ 2 + (Y2 - Y1) ^ 2 + (Z2 - Z1) ^ 2)
REM GANANCIA POR APROX. PARA DSE<X1 DESDE VOL=0 CON DSE=X1 HASTA MAX.CON
DSE=0
REM IF DSE < X1 THEN GAN = (X1 - DSE) / X1 ELSE GAN = 0
REM ALTERNATIVA A ANTERIOR, AUMENTA SUMA DE VOLS ENMEDIO DE BOCINAS
IF DSE < 1.732 * X1 THEN GAN = 8 - 2 * DSE ELSE GAN = 1
RETURN
```

```
DATA REC,0,2,10,1,3,2,4,3.5,1
DATA FIN,0,0,0,0,0,0,0,0,0
```

*Los 7 renglones siguientes son otro ejemplo de 7 comandos sucesivos el último de los cuales es el que da por finalizado el proceso.*

```
DATA ESP,0,10,150,2,0,0,0,0,0
DATA ESD,10,20,150,2,0,0,0,0,0
```

```
DATA ESP,20,30,150,2,0,0,0,0,0
DATA ESD,30,40,150,2,0,0,0,0,0
DATA ESP,40,50,150,2,0,0,0,0,0
DATA ESD,50,60,150,2,0,0,0,0,0
DATA FIN,0,0,0,0,0,0,0,0,0
```

```
SUB VOLU (DATOS!, DATOS2!, TIEMPO) STATIC
PRINT #1, INT(DATOS! * 100 / 255), INT(DATOS2! * 100 / 255), TIEMPO
PRINT INT(DATOS! * 100 / 255), INT(DATOS2! * 100 / 255), TIEMPO
END SUB
```

## ANEXO B

### CRONOGRAMA DE LA SECUENCIA DE DEMOSTRACIÓN DEL ESPACIALIZADOR

TRY\$	TINI	TFIN	N	X3	Y3	Z3	X4	Y4	Z4
-------	------	------	---	----	----	----	----	----	----

---

#### 1. PÁJARO CANTANDO CONTINUAMENTE.

PES	0	2	2	2	4	0	0	0	0	CANTO CONTÍNUO
REC	2	4	20	2	4	0	0	4	4	
REC	4	6	20	0	4	4	4	4	4	
REC	6	8	20	4	4	4	2	4	2	
PES	8	12	4	2	4	2	0	0	0	
REC	12	14	20	2	2	2	2	4	0	
REC	14	16	20	2	4	0	0	4	2	
REC	16	18	20	0	4	2	4	4	2	
REC	18	20	20	4	4	4	2	4	4	
REC	20	22	20	2	4	4	2	2	2	
PES	22	26	4	2	2	2	0	0	0	
REC	26	28	20	2	2	2	4	4	2	
REC	28	30	20	4	4	2	0	4	2	
REC	30	32	20	0	4	2	4	4	1	
PES	32	34	2	4	4	1	0	0	0	
REC	34	36	20	4	4	1	0	4	0	
REC	36	38	20	0	4	0	2	2	0	
PES	38	52	12	2	2	0	0	0	0	

#### 2. ANIMAL DE LA JUNGLA

CIR	52	56	40	2	4	0	0	0	0
REC	56	60	40	2	2	0	0	0	4
PES	60	66	6	0	0	4	0	0	0
REC	66	68	20	0	0	4	4	0	4
PES	68	74	6	4	0	4	0	0	0
REC	74	76	20	4	0	4	2	2	2
PES	76	82	6	2	2	2	0	0	0
REC	82	84	20	2	2	2	4	0	4
PES	84	95	11	4	0	4	0	0	0
REC	95	96	10	4	0	4	0	0	4
REC	96	97	10	0	0	4	4	0	4
REC	97	98	10	4	0	4	0	0	4
REC	98	99	10	0	0	4	0	4	4
REC	99	100	10	0	4	4	4	2	2



TRY\$	TINI	TFIN	N	X3	Y3	Z3	X4	Y4	Z4
REC	100	101	10	4	2	2	2	4	0
REC	101	102	10	2	4	0	0	0	4
PES	102	107	5	2	4	2	0	0	0

### 3. MOSCO

PES	107	110	3	2	4	2	0	0	0
REC	110	111	10	3	4	2	0	2	2
PES	111	114	3	0	2	2	0	0	0
REC	114	115	10	0	2	2	4	2	2
PES	115	118	3	4	2	2	0	0	0
REC	118	119	10	4	2	2	2	2	0
CIR	119	120	10	2	2	0	0	0	0
CIR	120	121	10	2	2	0	0	0	0
CIR	121	122	10	2	2	0	0	0	0
REC	122	123	10	2	2	0	4	2	2
REC	123	124	10	4	2	2	2	2	2
PES	124	127	3	2	2	2	0	0	0
REC	127	128	10	2	2	2	2	2	4
REC	128	129	10	2	2	4	4	4	2
REC	129	130	10	4	4	2	2	2	2
PES	130	133	3	2	2	2	0	0	0
REC	133	134	10	2	2	2	0	4	0
REC	134	135	10	0	4	0	4	0	4
REC	135	136	10	4	0	4	0	4	0
REC	136	137	10	0	4	0	4	4	0
REC	137	138	10	4	4	0	2	4	2
PES	138	144	6	2	4	2	0	0	0

### 4. COUSTEAU

REC	144	145	10	2	4	2	2	4	0	
PES	145	201	56	2	4	0	0	0	0	
REC	201	206	50	2	4	0	4	2	4	ATRÁS DER
REC	206	210	40	4	2	4	2	4	0	
PES	210	212	2	2	4	0	0	0	0	
REC	212	217	50	2	4	0	2	2	4	ATRÁS CENTR
REC	217	219	20	2	2	4	2	4	0	
PES	219	220	1	2	4	0	0	0	0	
REC	220	225	50	2	4	0	0	2	4	ATRÁS IZQUIE
REC	225	230	50	0	2	4	2	4	0	
PES	230	236	6	2	4	0	0	0	0	

TRY\$	TINI	TFIN	N	X3	Y3	Z3	X4	Y4	Z4	
CIR	236	241	50	2	3	0	0	0	0	CÍRC. ALT=3
PES	241	246	5	2	3	0	0	0	0	
REC	246	248	20	2	4	0	4	2	4	ATRÁS DER
REC	248	250	20	4	2	4	2	4	0	
REC	250	255	50	2	4	0	2	2	4	ATRÁS CENTR
REC	255	258	30	2	2	4	0	2	2	
PES	258	259	1	0	2	2	0	0	0	
PES	259	263	4	0	2	2	0	0	0	OÍDO IZQUIER
REC	263	265	20	0	2	2	4	2	2	
PES	265	269	4	4	2	2	0	0	0	OÍDO DERECH
REC	269	271	20	4	2	2	0	0	4	ABAJO ATR IZ
REC	271	273	20	0	0	4	2	3	0	ADELANTE.
CIR	273	280	70	4	3	0	0	0	0	CÍRCUL ALT=3
PES	280	290	100	2	3	0	0	0	0	
REC	290	292	20	2	3	0	2	2	2	
PES	292	298	6	2	2	2	0	0	0	
REC	298	301	30	2	2	2	2	4	0	

### 5. MURCIÉLAGO

TRY\$	TINI	TFIN	N	X3	Y3	Z3	X4	Y4	Z4	
PES	301	340	39	2	4	0	0	0	0	
CIR	340	341	10	2	4	0	0	0	0	CÍRCULO DE 1''
PES	341	353	12	2	4	0	0	0	0	
CIR	353	354	10	2	4	0	0	0	0	CÍRCULO DE 1''
PES	354	367	13	2	4	0	0	0	0	
REC	367	367.5	5	0	2	2	4	2	2	IZ DER
REC	367.5	368	5	4	2	2	0	4	0	DER IZ/AD
REC	368	368.5	5	0	4	0	4	0	4	IZ/AD DER/A
REC	368.5	369	5	4	0	4	2	4	0	DER/AT ADEL
REC	369	369.5	5	2	4	0	2	2	4	ADEL AT
REC	369.5	370	5	2	2	4	4	4	0	AT DER/A
REC	370	370.5	5	4	4	0	0	2	4	DER/AD IZ/AT
REC	370.5	371	5	0	2	4	4	2	2	IZ/AT DER
REC	371	371.5	5	4	2	2	0	2	2	DER IZ
REC	371.5	372	5	0	2	2	4	2	4	IZ DER/AT

TRY\$	TINI	TFIN	N	X3	Y3	Z3	X4	Y4	Z4		
REC	372	372.5	5	4	2	4	0	4	0	DER/AT	IZ/AD
REC	372.5	373	5	0	4	0	2	2	4	IZ/AD	AT
REC	373	373.5	5	2	2	4	2	4	0	AT	AD
REC	373.5	374	5	2	4	0	0	2	4	AD	IZ/AT
REC	374	374.5	5	0	2	4	4	4	0	IZ/AT	DER/A
REC	374.5	375	5	4	4	0	0	2	2	DER/AD	IZ
CIR	375	376	10	2	4	0	0	0	0	CÍRCULO DE 1"	
CIR	376	377	10	2	4	0	0	0	0	“	
CIR	377	378	10	2	4	0	0	0	0	“	
CIR	378	379	10	2	4	0	0	0	0	“	
REC	379	379.5	5	0	2	2	4	2	2	5 IZ-DER-IZ 1"	
REC	379.5	380	5	4	2	2	0	2	2		
REC	380	380.5	5	0	2	2	4	2	2		
REC	380.5	381	5	4	2	2	0	2	2		
REC	381	381.5	5	0	2	2	4	2	2		
REC	381.5	382	5	4	2	2	0	2	2		
REC	382	382.5	5	0	2	2	4	2	2		
REC	382.5	383	5	4	2	2	0	2	2		
REC	383	383.5	5	0	2	2	4	2	2		
REC	383.5	384	5	4	2	2	0	2	2		
----- FIN DE SERIE 1.											
REC	384	384.5	5	0	2	2	4	2	2	IZ	DER
REC	384.5	385	5	4	2	2	0	4	0	DER	IZ/AD
REC	385	385.5	5	0	4	0	4	0	4	IZ/AD	DER/A
REC	385.5	386	5	4	0	4	2	4	0	DER/AT	ADEL
REC	386	386.5	5	2	4	0	2	2	4	ADEL	AT
REC	386.5	387	5	2	2	4	4	4	0	AT	DER/A
REC	387	387.5	5	4	4	0	0	2	4	DER/AD	IZ/AT
REC	387.5	388	5	0	2	4	4	2	2	IZ/AT	DER
REC	388	388.5	5	4	2	2	0	2	2	DER	IZ
REC	388.5	389	5	0	2	2	4	2	4	IZ	DER/AT
REC	389	389.5	5	4	2	4	0	4	0	DER/AT	IZ/AD
REC	389.5	390	5	0	4	0	2	2	4	IZ/AD	AT

TRY\$	TINI	TFIN	N	X3	Y3	Z3	X4	Y4	Z4		
REC	390	390.5	5	2	2	4	2	4	0	AT	AD
REC	390.5	391	5	2	4	0	0	2	4	AD	IZ/AT
REC	391	391.5	5	0	2	4	4	4	0	IZ/AT	DER/A
REC	391.5	392	5	4	4	0	0	2	2	DER/AD	IZ
CIR	392	393	10	2	4	0	0	0	0	CÍRCULO DE 1"	
CIR	393	394	10	2	4	0	0	0	0	"	
CIR	394	395	10	2	4	0	0	0	0	"	
CIR	395	396	10	2	4	0	0	0	0	"	
REC	396	396.5	5	0	2	2	4	2	2	5 IZ-DER-IZ 1"	
REC	396.5	397	5	4	2	2	0	2	2		
REC	397	397.5	5	0	2	2	4	2	2		
REC	397.5	398	5	4	2	2	0	2	2		
REC	398	398.5	5	0	2	2	4	2	2		
REC	398.5	399	5	4	2	2	0	2	2		
REC	399	399.5	5	0	2	2	4	2	2		
REC	399.5	400	5	4	2	2	0	2	2		
REC	400	400.5	5	0	2	2	4	2	2		
REC	400.5	401	5	4	2	2	0	2	2		
REC	401	401.5	5	0	2	2	4	2	2	IZ	DER
REC	401.5	402	5	4	2	2	0	4	0	DER	IZ/AD
REC	402	402.5	5	0	4	0	4	0	4	IZ/AD	DER/A
REC	402.5	403	5	4	0	4	2	4	0	DER/AT	ADEL
REC	403	403.5	5	2	4	0	2	2	4	ADEL	AT
REC	403.5	404	5	2	2	4	4	4	0	AT	DER/A
REC	404	404.5	5	4	4	0	0	2	4	DER/AD	IZ/AT
REC	404.5	405	5	0	2	4	4	2	2	IZ/AT	DER
REC	405	405.5	5	4	2	2	0	2	2	DER	IZ
REC	405.5	406	5	0	2	2	4	2	4	IZ	DER/AT
REC	406	406.5	5	4	2	4	0	4	0	DER/AT	IZ/AD
REC	406.5	407	5	0	4	0	2	2	4	IZ/AD	AT
REC	407	407.5	5	2	2	4	2	4	0	AT	AD
REC	407.5	408	5	2	4	0	0	2	4	AD	IZ/AT

TRY\$	TINI	TFIN	N	X3	Y3	Z3	X4	Y4	Z4		
REC	408	408.5	5	0	2	4	4	4	0	IZ/AT	DER/A
REC	408.5	409	5	4	4	0	0	2	2	DER/AD	IZ
CIR	409	410	10	2	4	0	0	0	0	CÍRCULO DE 1"	
CIR	410	411	10	2	4	0	0	0	0	"	
CIR	411	412	10	2	4	0	0	0	0	"	
CIR	412	413	10	2	4	0	0	0	0	"	
REC	413	413.5	5	0	2	2	4	2	2	5 IZ-DER-IZ 1"	
REC	413.5	414	5	4	2	2	0	2	2		
REC	414	414.5	5	0	2	2	4	2	2		
REC	414.5	415	5	4	2	2	0	2	2		
REC	415	415.5	5	0	2	2	4	2	2		
REC	415.5	416	5	4	2	2	0	2	2		
REC	416	416.5	5	0	2	2	4	2	2		
REC	416.5	417	5	4	2	2	0	2	2		
REC	417	417.5	5	0	2	2	4	2	2		
REC	417.5	418	5	4	2	2	0	2	2		
----- FIN DE SERIE 3											
REC	418	418.5	5	0	2	2	4	2	2	IZ	DER
REC	418.5	419	5	4	2	2	0	4	0	DER	IZ/AD
REC	419	419.5	5	0	4	0	4	0	4	IZ/AD	DER/A
REC	419.5	420	5	4	0	4	2	4	0	DER/AT	ADEL
REC	420	420.5	5	2	4	0	2	2	4	ADEL	AT
REC	420.5	421	5	2	2	4	4	4	0	AT	DER/A
REC	421	421.5	5	4	4	0	0	2	4	DER/AD	IZ/AT
REC	421.5	422	5	0	2	4	4	2	2	IZ/AT	DER
REC	422	422.5	5	4	2	2	0	2	2	DER	IZ
REC	422.5	423	5	0	2	2	4	2	4	IZ	DER/AT
REC	423	423.5	5	4	2	4	0	4	0	DER/AT	IZ/AD
REC	423.5	424	5	0	4	0	2	2	4	IZ/AD	AT
REC	424	424.5	5	2	2	4	2	4	0	AT	AD
REC	424.5	425	5	2	4	0	0	2	4	AD	IZ/AT
REC	425	425.5	5	0	2	4	4	4	0	IZ/AT	DER/A
REC	425.5	426	5	4	4	0	0	2	2	DER/AD	IZ
CIR	426	427	10	2	4	0	0	0	0	CÍRCULO DE 1"	
CIR	427	428	10	2	4	0	0	0	0	"	
CIR	428	429	10	2	4	0	0	0	0	"	
CIR	429	430	10	2	4	0	0	0	0	"	

TRY\$	TINI	TFIN	N	X3	Y3	Z3	X4	Y4	Z4	
REC	430	430.5	5	0	2	2	4	2	2	5 IZ-DER-IZ 1"
REC	430.5	431	5	4	2	2	0	2	2	
REC	431	431.5	5	0	2	2	4	2	2	
REC	431.5	432	5	4	2	2	0	2	2	
REC	432	432.5	5	0	2	2	4	2	2	
REC	432.5	433	5	4	2	2	0	2	2	
REC	433	433.5	5	0	2	2	4	2	2	
REC	433.5	434	5	4	2	2	0	2	2	
REC	434	434.5	5	0	2	2	4	2	2	
REC	434.5	435	5	4	2	2	0	2	2	

----- FIN DE SERIE 4

## ANEXO D

### LISTA DE PROYECTOS, REFERENCIAS Y SITIOS WEB COMPILADA POR LA UNIVERSIDAD DE SAN JOSÉ CAL.

#### Proyectos de la década de los 90:

1. [Analog binaural head-shadow filter](#) Urayama et al.
7. [Analog monaural pinna-notch filter](#) Deng et al.
8. [A gated, ITD-based sound-source azimuth locator](#) Wayman,
9. [A Real-Time ILD-based sound-source azimuth locator](#) Katira,
10. Use of a cochlear model in estimating azimuth and elevation
11. [Simulation study of acoustic onset detection](#)
12. [Combining monaural and binaural elevation estimates](#)
13. [Time-variable DSP filters for synthetic binaural sound](#)

#### Proyectos en fase de realización o evaluación:

14. [An improved real-time azimuth locator](#)
15. [A multi-band, real-time onset detector](#)
16. [Generation of ear-model-based azimuth/elevation maps](#)
17. [Suppressing echoes and modeling the auditory environment](#)
18. [Estimating range](#)
19. [Modeling the head-related transfer function](#)
20. [Computing the HRTF by Numerical Simulation](#)
21. [Real-time head-controlled synthesis of binaural signals](#)

#### Referencias bibliográficas

Para quienes estén interesados en obtener información extensa y diversa relacionada con sonido espacial se incluyen una lista con referencias bibliográficas y otra con ligas a entidades que desarrollan proyectos de este tipo.

22. Allen, J. B. (1985). "Cochlear modeling," *IEEE ASSP Magazine* , Vol. 2, pp. 3-29. A good survey of alternative models of the cochlea.
23. Batteau, D. W. (1967). "The role of the pinna in human localization," *Proc. Royal Society London*, Vol. 168 (series B), pp. 158-180. The first work to report pinna echoes as an explanation for vertical (and also horizontal) localization.
24. Begault, D. (1994). *3-D Sound for Virtual Reality and Multimedia* (Academic Press, Boston, MA, 1994). A clear and comprehensive presentation of 3-D audio principles and current technology.
25. Blauert, J. (1997). *Spatial Hearing (Revised Edition)* (MIT Press, Cambridge, MA). The standard reference on the psychophysics of three-dimensional hearing. (See [Mills \(1972\)](#) for a shorter overview.)
26. Bodden, M. (1993). "Modeling human sound-source localization and the cocktail-party-effect," *Acta Acustica*, Vol. 1, pp. 43-55. A hardware system for real-time separation of two speech sounds using interaural crosscorrelation and Wiener filtering.
27. Bregman, A. S. (1990). *Auditory Scene Analysis* (MIT Press, Cambridge, MA). A massive description of experiments by the author and his students on the factors that influence the formation and segregation of sound streams. The first and last chapters are readable by nonspecialists, but see [Handel \(1989\)](#) or [Yost \(1991\)](#) for an easier introduction.
28. Brown, C. Phillip. (1996). "Modeling the Elevation Characteristics of the Head-Related Impulse Response," Technical Report No. 13, NSF Grant No. IRI-9402246, Dept. of Elec. Engr., San Jose State Univ. (May, 1996). Presents a simple but effective structural model along the lines of [Genuit](#). (A [PDF version](#) of this thesis is available.)
29. Brown, G. J. (1992). "Computational auditory scene analysis: A representational approach," Ph.D. dissertation, Department of Computer Science, University of Sheffield, Sheffield, England, UK. Separates sounds by forming maps of common onset, offset, periodicity, etc. (See also [Mellinger \(1991\)](#).)
30. Carlile, Simon, Ed. (1996). *Virtual Auditory Space: Generation and Applications* (R. G. Landes Company, Austin, TX). An excellent survey of the psychophysics of spatial hearing and the generation for spatial audio. Highly recommended.
31. Carlile, Simon and Daniele Pralong (1994). "The location-dependent nature of perceptually salient features of the human head-related transfer functions," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 95, pp. 3445-3459 (June 1994). A very interesting and extremely well done study of the way that location-dependent features of the HRTF show up in the frequency domain. The paper rewards careful study, even though it does not pay enough attention to the elevation dependence of interaural differences.
32. Casseday, J. H., and E. Covey (1987). "Central auditory pathways in directional hearing," in W. A. Yost and G. Gourevitch, Eds., *Directional Hearing*, pp. 109-145 (Springer Verlag, NY). A thorough overview of the known neurophysiology associated with binaural hearing. (See [Handel \(1989\)](#) for an easier introduction, or [Pickles \(1988\)](#) for a less condensed exposition.)
33. Chau, W. (1995). "Binaural and Monaural Elevation Estimate for Sound Sources," Technical Report No. 12, NSF Grant No. IRI-9402246, Dept. of Elec. Engr., San Jose State University (May, 1995). Combined [Zakarauskas and Cynader's](#) monaural



- method; good results for wide-band sources, but poor results for speech. For an abstract, see [Report No. 12](#).
34. Chau, W. and R. O. Duda (1995). "Combined Monaural and Binaural Localization of Sound Sources," *Proc. Twenty-Ninth Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers* (Asilomar, CA, November 1995). Extends [Chau's MS work](#) by computing probability distributions for the location every 10 ms and averaging these distributions over time.
  35. Clifton, R. K. (1987). "Breakdown of echo suppression in the precedence effect," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 82, pp. 1834-1835. Demonstrates that the suppression of echoes is a dynamic process, probably related to the need for the auditory system to build a model of the acoustic environment; also demonstrates that [Lindemann's model](#) must be incomplete.
  36. Clifton, R. K. (1993). "Context and learning affect echo perception," *Conference on Binaural and Spatial Hearing* (Dayton, OH), September 9-12, 1993. Updates [Clifton's 1987 paper](#).
  37. David, E. E., Jr., and O. G. Selfridge (1962). "Eyes and ears for computers," *Proc. IRE*, Vol. 50, pp. 1093-1101. Describes the need for and the problems of machine perception; primarily of historical interest.
  38. Duda, R. O. (1993). "Modeling head related transfer functions," in *Proc. Twenty-Seventh Annual Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers* (Asilomar, CA). Briefly surveys the approaches used to date.
  39. Duda, R. O. (1993). "Estimating Azimuth and Elevation From the Interaural Intensity Difference," Technical Report No. 4, NSF Grant No. IRI-9214233, Dept. of Elec. Engr., San Jose State Univ. (September, 1993). For an abstract, see [Report No. 4](#).
  40. Duda, R. O. (1995). "Estimating azimuth and elevation from the interaural head related transfer function," in *Binaural and Spatial Hearing*, R. Gilkey and T. Anderson, Eds. (Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, N; In press.) Shows that the HRTF's contain the information needed to estimate azimuth and elevation using only interaural intensity differences. Assumes a distant, single wide-band source in an anechoic environment.
  41. Gaik, W. (1993). "Combined evaluation of interaural time and intensity differences: Psychoacoustical results and computer modeling," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 94, pp. 98-110. An extension of [Lindemann's model](#) to include interaural intensity effects; the very large interaural differences shown in the data raise questions about the results.
  42. Genuit, K. (1984). "A model for the description of outer-ear transmission characteristics," Doctor of Engineering dissertation, Rheinisch-Westphalian Technical University, Aachen, Germany. An ambitious attempt to develop signal-processing models of head related transfer functions from head and outer-ear geometry.
  43. Glasberg, B. R. and B. C. J. Moore (1990). "Derivation of auditory filter shapes from notched-noise data," *Hearing Research*, Vol. 47, pp. 103-138 (1990).
  44. Han, H. L. (1994). "Measuring a dummy head in search of pinna cues," *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 42, pp. 15-37, January/February 1994.
  45. Handel, S. (1989). *Listening* (MIT Press, Cambridge, MA). A recommended general introduction to the psychology of hearing; includes a good summary chapter on neurophysiology.

46. Hartmann, W. M. (1995). "Listening in a room and the precedence effect," in R. H. Gilkey and T. B. Anderson, Eds., *Binaural and Spatial Hearing* (Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ, in press). Proposes an interesting optimum processor model of localization that uses a plausibility criterion in combining inconsistent IID and ITD cues.
47. Jeffress, L. A. (1948). "A place theory of sound localization," *J. Comp. Physiol. Psychol.*, Vol. 41, pp. 35-39 (1948). The classic cross-correlation model of horizontal localization, proposed long before neural correlation circuits were identified in the Medial Superior Olive (MSO); primarily of historical interest.
48. Katira, C. (1995). "A Real-Time DSP System for Estimating the Azimuth to a Sound Source from the Interaural Intensity Difference," Technical Report No. 10, NSF Grant No. IRI-9402246, Dept. of Elec. Engr., San Jose State Univ., San Jose, CA (May, 1995). A simple, FFT-based approach that employed spectral energy weighting to cope with narrow-band sounds. For an abstract, see [Report No. 10](#).
49. Katz, Brian F. G. (1998). "Measurement and Calculation of Individual Head-Related Transfer Functions using a Boundary Element Model Including the Measurement and Effect of Skin and Hair Impedance," Ph.D. dissertation, Graduate Program in Acoustics, Pennsylvania State University (May, 1998). Uses numerical methods to compute the HRTF for frequencies up to 6 kHz.
50. Kawaura, J., Y. Suzuki, F. Asano, and T. Sone (1991). "Sound localization in headphone reproduction by simulating transfer functions from the sound source to the external ear," *J. Acoust. Soc. Japan*, Vol. (E)12, pp. 203-216. Describes experiments in synthesizing binaural sounds. Asserts that head motion is almost essential for externalization and to resolve front/back confusion. (See also Loomis, Hebert and Cicinelli, *J. Acoust. Soc. Am.*, Oct. 1990.)
51. Kistler, D. J., and F. L. Wightman (1992). "A model of head-related transfer functions based on principal components analysis and minimum-phase reconstruction," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 91, pp. 1637-1647. A recent and revealing study of the person-to-person variability of the head-related transfer function.
52. Kuhn, G. F. (1987). "Acoustics and measurements pertaining to directional hearing," in W. A. Yost and G. Gourevitch, Eds., *Directional Hearing* (Springer Verlag, New York, 1987).
53. Lim, C., and R. O. Duda (1994). "Estimating the azimuth and elevation of a sound source from the output of a cochlear model," in *Proc. 28th Asilomar Conf. on Signals, Systems and Computers* (Asilomar, CA). Extends [Duda \(1993\)](#) by replacing FFT's by a cochlear model, showing that high spectral resolution at high frequencies is unnecessary.
54. Lindemann, W. (1986). "Extension of a binaural cross-correlation model by contralateral inhibition. I. Simulation of lateralization for stationary signals," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 80, pp. 1608-1622; "Extension of a binaural cross-correlation model by contralateral inhibition. II. The law of the first wave Front," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 80, pp. 1623-1630. An important paper that presents an appealing modification of the classic [Jeffress cross-correlation model](#) to account for the precedence effect. But see [Clifton \(1987\)](#).
55. Lyon, R. F., (1982). "A computational model of filtering, detection and compression in the cochlea," *ICASSP 82* (Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics Speech and Signal

- Processing, May, 1982). Describes an important filter-bank model of the cochlea. See also [Lyon \(1988\)](#) and [Slaney \(1988\)](#).
56. Lyon, R. F., and C. Mead (1988). "An analog electronic cochlea," *IEEE Trans. Acoustics, Speech and Signal Processing*, Vol. 36, pp. 1119-1134. Describes further development of Lyon's filter-bank model of the cochlea. See also [Lyon \(1982\)](#) and [Slaney \(1988\)](#).
  57. Lyon, R. F. (1991). "Automatic gain control in cochlear mechanics," in C. D. Geisler et al., *Mechanics and Biophysics of Hearing* (University of Wisconsin Press, Madison, WI, 1991).
  58. Marr, D. (1982). *Vision* (W. H. Freeman, San Francisco, 1982). A controversial and influential book on bottom-up computational models of vision whose philosophy is now being applied to audition. Of only collateral interest.
  59. Mellinger, D. K. (1991). "Event Formation and Separation of Musical Sound," Ph.D. dissertation, Report No. STAN-M-77, Center for Computer Research in Music and Acoustics, Department of Music, Stanford University, Stanford, CA. Performs auditory scene analysis by extracting onset maps, common-modulation maps, etc. See also [Brown \(1992\)](#).
  60. Middlebrooks, J. C., and D. M. Green (1991). "Sound localization by human listeners," *Annu. Rev. Psychol.*, Vol. 42, pp. 135-159 (1991). An excellent review of the abilities of people to localize sound. Highly recommended.
  61. Mills, A. W. (1972). "Auditory localization," in J. V. Tobias, Ed., *Foundations of Modern Auditory Theory, Vol. II*, pp. 303-348 (Academic Press, NY). An excellent summary of the mechanisms and cues for sound localization.
  62. Moller, H., M. F. Sorensen, D. Hammershoi and C. B. Jensen (1995). "Head-related transfer functions of human subjects," *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 43, pp. 300-321, May 1995.
  63. Morgan, D. P., and C. L. Scofield (1991). *Neural Networks and Speech Processing* (Kluwer Academic Publishers, Boston, MA). Includes overviews of auditory neurophysiology, artificial neural networks, and speech technology that are well suited for electrical engineers.
  64. Neti, C., E. D. Young, and M. Schneider (1992). "Neural network models of sound localization based on directional filtering by the pinna," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 92, pp. 3140-3156. A straightforward use of neural networks for localization in both azimuth and elevation; however, the neural net contained too many degrees of freedom to generalize well.
  65. Palmieri, F., M. Datum, A. Shah, and A. Moiseff (1991). "Sound localization with a neural network trained with the multiple extended Kalman algorithm," *Proc. Int. Joint Conf. on Neural Networks*, (Seattle, WA), pp. 1125-1131. Exploits the unusual orientation characteristics of the external ear of the barn owl.
  66. Patterson, R. D., et al. (1992). "Complex sounds and auditory images," in Y. Cazals, L. Demany and K. Horner, Eds., *Auditory Physiology and Perception*, pp. 429-446 (Pergamon, Oxford, 1992).
  67. Pickles, J. O. (1988). *An Introduction to the Physiology of Hearing (2nd Ed.)* (Academic Press, London). Describes in detail most of what is known of the neurophysiological processes along the path from the cochlea to the auditory cortex. See [Handel \(1989\)](#) for an easier introduction.

68. Reed, M. C., and J. J. Blum (1990). "A model for the computation and encoding of azimuthal information by the lateral superior olive," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 88, pp. 1442-1453. A complex model that attempts to account for both the functionality and the detailed neurophysiological characteristics of the lateral superior olive (LSO), where interaural intensity differences seem to be determined.
69. Rosenberger, J., and E. Thomas (1971). "Performance of an adaptive echo canceller operating in a noisy, linear, time-invariant environment," *Bell System Technical Journal*, Vol. 50, pp. 785-813. An engineering approach to suppressing echoes in telephony.
70. Shahwan, T., and R. O. Duda (1994). "Adjacent channel inhibition in acoustic onset detection," in *Proc. 28th Asilomar Conf. on Signals, Systems and Computers* (Asilomar, CA). Shows how an onset detector can be designed to work over a wide dynamic range and be sensitive to amplitude rather than frequency modulation.
71. Shinn-Cunningham, B. and A. Kulkarni (1996). "Recent developments in virtual auditory space," in Carlile, Simon, Ed., *Virtual Auditory Space: Generation and Applications*, pp. 185-243 (R. G. Landes Company, Austin, TX). An excellent survey of approaches to synthesizing spatial sound. Highly recommended.
72. Slaney, M. (1988). "Lyon's Cochlear Model," Apple Technical Report No. 13, Advanced Technology Group, Apple Computer, Inc., Cupertino, CA. Describes and includes a C program for [Lyon's filter-bank cochlear model](#).
73. Slaney, M. (1993). "An Efficient Implementation of the Patterson-Holdsworth Auditory Filter Bank," Apple Technical Report No. 35, Advanced Technology Group, Apple Computer, Inc., Cupertino, CA. Describes and includes a C program for [the Patterson/Holdsworth](#) Gammatone filter bank.
74. Slaney, M. (1995). "A critique of pure audition," *Proceedings of the Computational Auditory Scene Analysis Workshop; 1995 International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Montreal, Canada (August 1995). Argues the need for top-down as well as bottom-up operation for models of sound perception.
75. Sondhi, M. (1967). "An adaptive echo canceller," *Bell System Technical Journal*, Vol. 46, pp. 497-511. An engineering approach to suppressing echoes in telephony.
76. Stern, R. M., Jr. (1988). "An overview of models of binaural perception," in *Proc. 1988 National Research Council CHABA Symposium* (Washington, DC). A useful survey paper directed at models that attempt to explain all known psychoacoustic phenomena.
77. Tran, B. and T. Tran (1993). "A Sound Localization System Using Lyon's Cochlear Model and Lindemann's Cross-Correlation Model," Technical Report No. 5, NSF Grant No. IRI-9214233, Dept. of Elec. Engr., San Jose State Univ. (December, 1993). For an abstract, see [Report No. 5](#).
78. Wightman, F. L., and D. J. Kistler (1993). "Factors affecting relative importance of sound localization cues," *Conference on Binaural and Spatial Hearing* (Dayton, OH), September 9-12, 1993. Surveys psychoacoustic responses when interaural time and intensity cues are inconsistent.
79. Yost, W. A., and G. Gourevitch, Eds. (1987). *Directional Hearing* (Springer-Verlag, New York). The most important collection of research contributions since Blauert's book. Includes results of direct measurements of head-related transfer functions.

80. Yost, W. A. (1991). "Auditory image perception and analysis: The basis for hearing," *Hearing Research*, Vol. 56, pp. 8-18. An excellent survey of the problems of auditory scene analysis.
81. Wenzel, E. M., F. L. Wightman, D. Kistler, and S. H. Foster (1988). "The Convolvotron: Realtime synthesis of out-of-head localization," Second Joint Meeting Acoustic Societies of America and Japan, Honolulu, HI. Describes the Convolvotron -- special hardware to synthesize 3-D sound.
82. Zakarauskas, P., and M. S. Cynader (1993). "A computational theory of spectral cue localization," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 94, pp. 1323-1331. Provides a plausible spectral model for monaural elevation estimation, although it requires averaging over relatively long time intervals.

### **Ligas al mundo de sonido espacial (sitios web)**

- [AUDITORY home page](#). Contains archives of the discussions on the AUDITORY list. Also contains many interesting pointers, including indices to recent meetings of the Acoustical Society of America, tables of contents for journals concerned with audition, plus pointers to relevant software.
- [CCRMA Hearing Seminar announcements](#). Contains abstracts for presentations given at a weekly Hearing Seminar at Stanford University organized by Malcolm Slaney of Interval Research Corp.
- [HRTF data for KEMAR](#) measured at the MIT Media Lab.
- University and Nonprofit Research Centers
  - [Auditory Home Page](#), Department of Neurophysiology, University of Wisconsin - Madison
  - [CERL Sound Group](#), University of Illinois (provides links to the ACM SIG on Sound and Computation)
  - [Darmstadt Auditory Research Group](#)
  - [Georgia Tech Multimedia](#).
  - [Hearing Development Research Laboratory](#), Waisman Center, University of Wisconsin
  - [Hearing Sciences](#), University of California at Berkeley
  - [Human Interface Technology Laboratory](#), University of Washington
  - [An Exploration of Virtual Auditory Shape Perception](#), M.S. Thesis by Ari J. Hollander
  - [Institute for Perception Research](#), Philips Research Laboratories and Eindhoven University of Technology
  - [McGill Auditory Perception Tutorial](#)
  - [MIT Media Lab Machine Listening Group](#).
  - [MRC Applied Psychology Unit](#), Cambridge University
  - [Auditory Image Model](#) of the auditory periphery
  - [Parmley Hearing Research Institute](#), Loyola University Chicago
  - [Silicon Audition Project](#), University of California at Berkeley
  - [Speech and Hearing Research Group](#), University of Sheffield
  - [Speech and Hearing Laboratory](#), Loughborough University

- [Virtual Environments Research Group](#), Tampere University of Technology (Finland)
- Companies with spatial audio products:
  - [Ambisonic Surround Sound](#)
  - [CATT](#)
  - [Chromatic Research](#)
  - [Creative Labs](#)
  - [Crystal River Engineering](#)
  - Etymotic Research
  - Focal Point
  - HEAD Acoustics
  - [HeadRoom](#)
  - [Hologonics](#)
  - [Knowles Electronics](#)
  - [Lake DSP Pty. Ltd](#)
  - [NuReality](#)
  - [Paradigm Simulation](#)
  - [QSound Labs](#)
  - [Roland Corporation](#)
  - [Sonic Solutions](#)
  - [Spatializer](#)
  - [SRS Labs](#)
- Speech and Acoustics Links
  - [WWW Information for Speech/Acoustics Research](#) , a valuable set of international links created and maintained by the [Speech and Acoustics Laboratory](#) of the Graduate School of Information Science at the Nara Institute of Science and Technology in Japan.
  - [Speech on the Web](#) for links to speech research.
  - [Acoustics FAQ](#) from alt.sci.physics.acoustics [Psychoacoustics.html](#)

## **Glosario.**

**Absorción.-** Choque de una onda con un cuerpo poroso que disminuye el eco [6].

**Altura o tono.-** Frecuencia del sonido (a mayor frecuencia más agudo y a menor más grave)

**Binaural.-** Relativo a los dos oídos.

**Caja sonora.-** Prisma rectangular cuyos vértices están determinados por la posición de los altavoces.

**Difracción.-** Cambio de las características de una onda al atravesar por un orificio o chocar con una esquina [6].

**Difusión.-** Comportamiento del sonido en un local [6].

**Electroacústica.-** Estudio de la conversión de señales eléctricas en sonoras y viceversa, amplificación, registro, y reproducción del sonido [6].

**Espacializador.-** Del inglés spatializer, es un conjunto de elementos físicos y programas que al operar en conjunto generan la sensación de la existencia de un objeto sonoro en el espacio.

**Frecuencia.-** Altura o tono, número de vibraciones por segundo.

**Intensidad o volumen.** Amplitud de la onda sonora.



**Interaural.-** Referente a relación entre nuestros oídos izquierdo y derecho. Interferencia. Encuentro de dos o más ondas [1].

**Movimiento oscilatorio.-** Tipo de movimiento periódico en que el móvil se desplaza en trayectorias rectilíneas o curvilíneas, en un sentido y el contrario, alternativamente [6].

**Movimiento periódico.-** El que realiza un cuerpo cuando a intervalos regulares de tiempo pasa por los mismos puntos con idéntico sentido [6].

**Movimiento vibratorio.-** Un caso particular del movimiento oscilatorio rectilíneo con oscilaciones muy pequeñas [6].

**Psicoacústica.-** El estudio psicológico de la percepción acústica.

**Punto de audición (Pa).-** Lugar donde se considera ubicado el escucha.

**Punto de intersección (Pi).-** Punto donde la recta que une el punto de audición (Pa) con el punto sonoro virtual (Ps) intersecta a la caja sonora.

**Punto sonoro real.-** El lugar donde está colocado un altavoz.

**Punto sonoro virtual (Ps).-** Lugar donde se simula la existencia de un objeto sonoro.

**Reflexión.-** Incidencia de la onda sonora sobre una superficie reflejante [6].

**Refracción.-** Choque de la onda sonora con un obstáculo de dimensiones especiales [6].

**Reverberación.-** Aumento de amplitud cuando las dimensiones del medio están en relación sencilla con la longitud de onda [6].



**Sonido.-** Todo agente físico que impresiona el sentido del oído [6].

**Sonido “Dolby”.-** Un tipo de sonido multicanal (con varias bocinas) [1]

**Sonido espacial abierto.-** El que puede escucharse libre de audífonos, y la percepción posicional de la fuente sonora virtual es independiente de la orientación de la cabeza.

**Sonido espacial dinámico.-** El que genera la percepción de que el objeto sonoro virtual cambia de posición espacial sin dejar de sonar.

**Sonido espacial virtual.-** Sensación en un escucha de percibir un sonido originado por un cuerpo inexistente ubicado en un punto cualquiera del espacio.

**Sonido espacial.-** El sonido natural que escuchamos y que se origina en los objetos que nos rodean.

**Sonido estereofónico.-** El emitido por dos altavoces con variación de intensidad y/o tipo de sonido.

**Sonido monaural.-** El emitido por uno o varios altavoces con características idénticas.

**Sonido “surround”.-** Un tipo de sonido multicanal que utiliza altavoces frontales, laterales y traseros que permiten generar un efecto de movimiento [1].

**Sonido tridimensional.-** Denominación alternativa de sonido espacial.

**Timbre.-** Conjunto de cualidades de un sonido que lo hacen distinguirlo de otros.