

## EL ARTE MUSICAL EN EL ESPACIO - ESPACIALIZADOR ACÚSTICO

Dr. César Pérez Córdova,  
Alumno Francisco Patricio Martínez  
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla,  
Facultad de Artes

### Resumen

Un espacializador acústico es un sistema consistente en equipos de cómputo, sonoros e interconexiones físicas, 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 y se desplaza en diversas trayectorias. El sistema motivo de este trabajo, está basado en un desarrollo teórico del autor. Aunque puede tener diversas aplicaciones en investigación médica, educación, entretenimiento, etc., la motivación principal de este trabajo es ponerlo a disposición de músicos contemporáneos que quieran experimentar las posibilidades del sonido espacial en sus composiciones y directores teatrales que lo utilicen como un recurso adicional.

### I Introducción

La localización de las fuentes sonoras es uno de los problemas más antiguos de la humanidad. Los primeros hombres, habitantes de la tierra, debían estar atentos a los múltiples peligros que les acechaban y desarrollaron una habilidad, tal vez una de las primeras, para localizar el lugar de donde procedía cualquier ruido, pues podía implicar un peligro al tratarse de algún animal que estaba a punto de agredirlos, y a lo largo de miles de años se fue creando en ellos el concepto de localización psicológica: "Si no veo de donde procede el ruido tiene que ser de atrás", concepto que hemos heredado los humanos actuales; sin embargo, los perros y gatos tienen una mejor habilidad que el humano para la localización de una fuente sonora ya que pueden direccionar su pabellón auditivo para escuchar mejor el sonido proveniente de una región del espacio. Existen lechuzas que en absoluta oscuridad son capaces de identificar la posición de un ratón por el ruido que hace al caminar y realizar un vuelo rectilíneo para atraparlo. El arte sonoro se puede enriquecer de un espacializador, que genere sonidos musicales, efectos, voces; en cualquier posición del espacio circundante. Existen diversos desarrollos con distintas técnicas y objetivos; por citar sólo a dos de ellos: el IRCAM en el Centro Pompidou de París, y el Centro recreativo Disney en los Estados Unidos.

### 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.

## Objetivo

El objetivo 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.

## Campos de conocimiento de la investigación

Este trabajo incide en diversos campos del conocimiento entre los que están: la acústica física, la geometría analítica, la psicología (en especial la psicoacústica), la electrónica, la programación computacional; todos ellos con un enfoque de aplicación al arte sonoro.

## Antecedentes

Primeras investigaciones de Fechner

A mediados del siglo XIX, el físico, filósofo y psicólogo alemán Gustav Theodor Fechner, (Begault, 1987) 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.

Teoría Duplex de Rayleigh (Begault, 1987)

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), también llamada IID (Interaural Intensity Difference).

Lord Rayleigh tuvo una explicación simple para la ITD: El sonido viaja a una velocidad de 343 m/s aproximadamente. Para una onda sonora que choca con una cabeza esférica de 17 cm de diámetro, desde una dirección en línea recta a los dos oídos, aunque las ondas sonoras no cruzan a través de la cabeza, son difractadas alrededor y arriban a ambos oídos con una diferencia de tiempo de media milésima de segundo ( $0.17/343 = 0.0005$  segundos) que el cerebro es capaz de distinguir. Hay también una diferencia 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 un efecto de sombra con diferencia entre 20 y 30 dB entre ambos oídos.

La teoría Duplex tiene los problemas siguientes:

- 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.

### Investigaciones de Batteau sobre localización vertical (Batteau, 1967)

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 40 años, Batteau mostró que el oído externo aporta la información esencial para la localización vertical. Para ello 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.

### El efecto Clifton y la idea de amplitud y distancia (Clifton, 1987)

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 e inmediatamente 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.

## 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 (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 estos factores juntos, desalienta cualquier intento de encontrar una fórmula matemática.

## Método

El autor de la ponencia corroboró físicamente qué elementos del sonido utiliza el humano para localizar la región del espacio de donde procede un sonido y cómo son procesados. Vino a la mente la similitud con la visión; con 2 ojos abiertos, una persona puede ver en tres dimensiones, y esta capacidad es fuertemente reducida cuando cierra un ojo; entonces el autor de la ponencia, partiendo de esta idea, hizo varias pruebas con diferentes alumnos suyos. Les pidió que cerraran los ojos para evitar que utilizaran la información visual e hizo algunos ruidos con diversos objetos en diferentes regiones a su alrededor, les solicitó que escucharan 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 lo empujaran y cambiaran de posición como lo hacen los perros y gatos. Las mismas pruebas fueron realizadas a 10 jóvenes; 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.
- En condiciones naturales (dos oídos activos y los ojos cerrados), los errores de localización cambiaron al cambiar de habitación. Al repetir las mismas pruebas con

las mismas personas, en un ambiente abierto con poco ruido ambiental (un jardín exterior), la capacidad de localización mejoró, pero disminuyó 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.

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  $2^3 = 8$  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 realizó 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 alteró el volumen antes de distribuirlo de acuerdo a una función que relaciona dicho volumen con el inverso del cuadrado de la distancia.

### Diseño conceptual

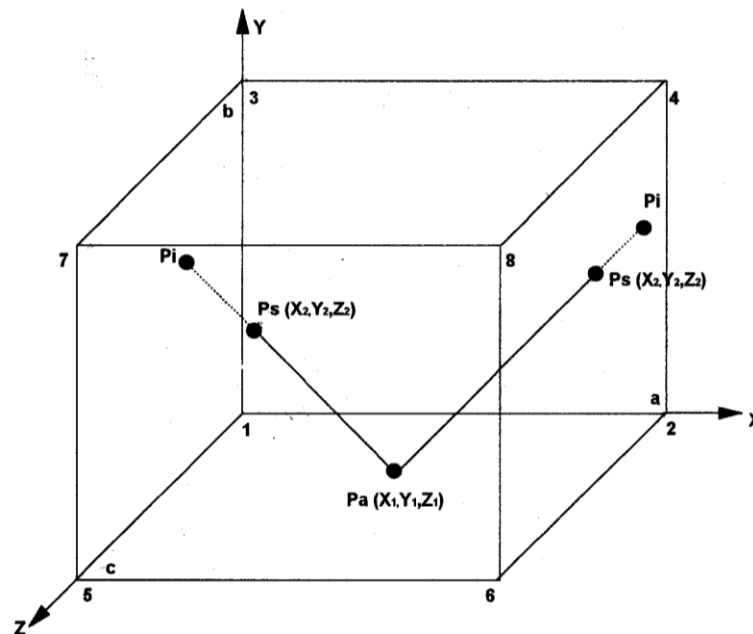


Figura 1. Elementos del diseño conceptual

El escucha que va a percibir el sonido con efecto espacial debe estar 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. Se omite el planteamiento matemático del espacializador propuesto. En su lugar se muestra de manera gráfica su funcionamiento. **La idea, el diseño, el fundamento teórico, la programación; y la instalación fueron desarrollados íntegramente por el autor.**

## Resultados

Se muestra el funcionamiento del espacializador, con una secuencia de imágenes que corresponden a momentos sucesivos del recorrido de un punto sonoro sobre una trayectoria; rectilínea, para facilitar la observación, 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.

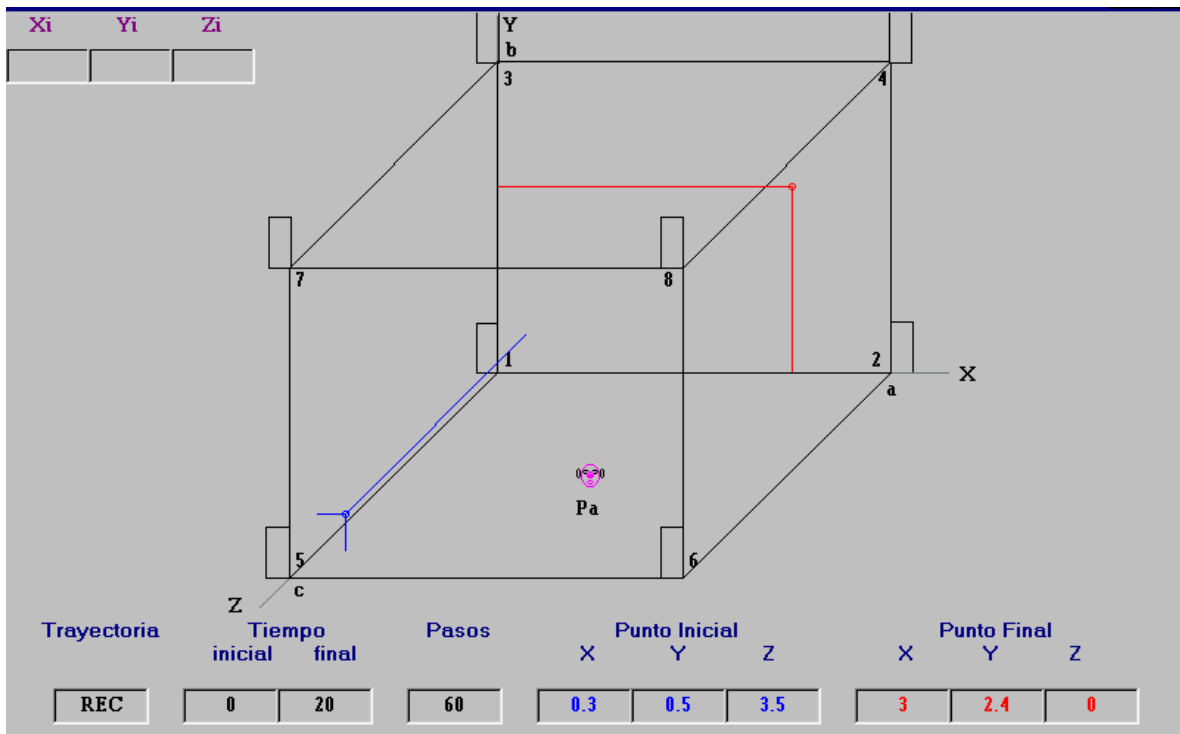


Figura 2. Puntos extremos de la trayectoria. En azul, el punto inicial; en rojo el punto final.

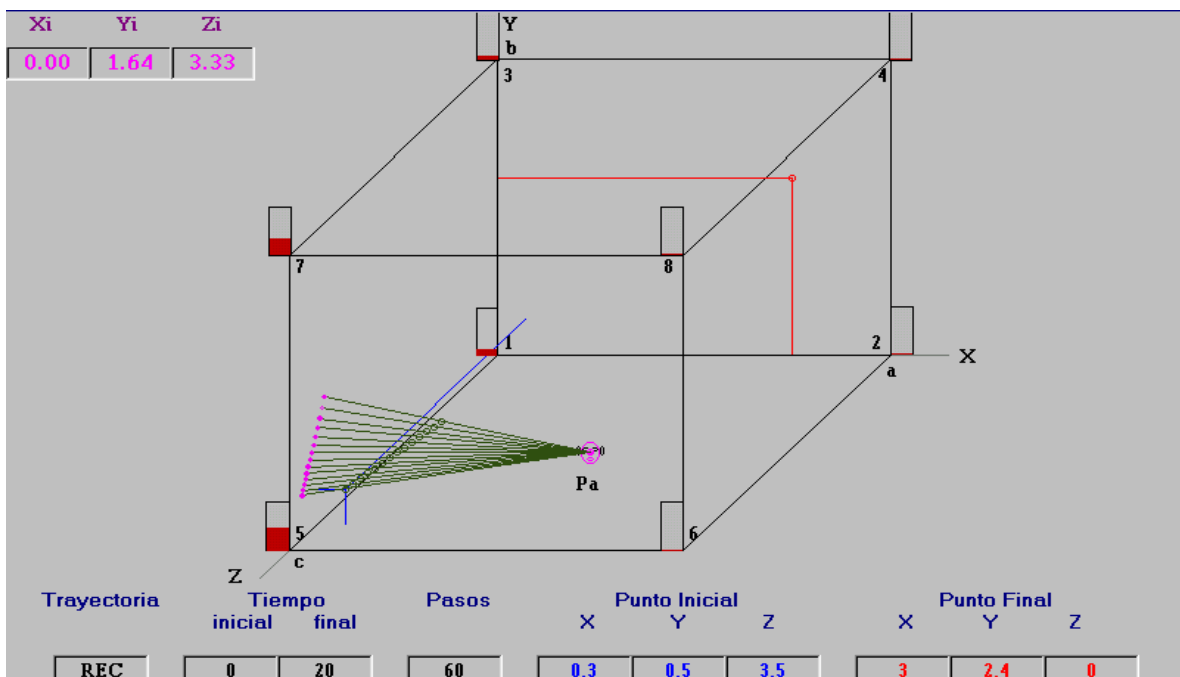


Figura 3. El punto sonoro ha recorrido 14 pasos, el Pi actual está sobre el plano YZ, ( $X_i = 0$ ) cuyos vértices son 1, 3, 5 y 7; como Pi está más cerca de 5, 7 que de 1, 3 los primeros tienen mayor intensidad sonora.

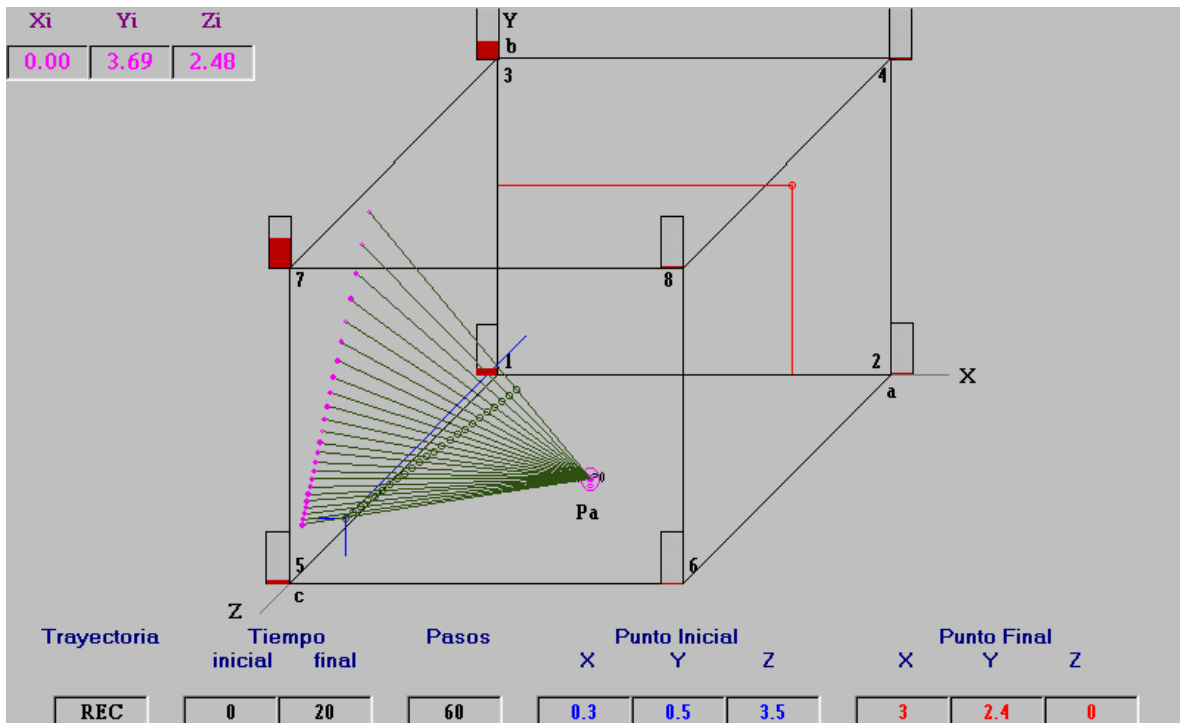


Figura 4. El  $P_i$  actual aún está en el plano  $YZ$  pero se aproxima al techo (plano  $XZb$ ).

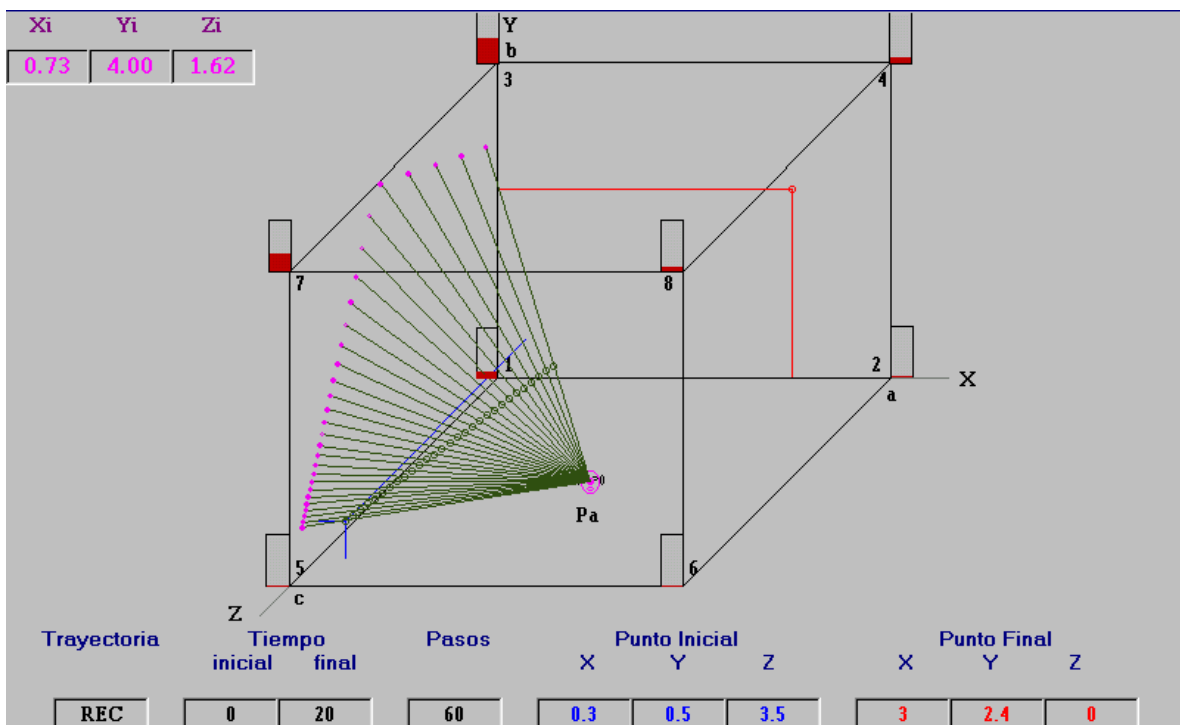


Figura 5. El  $P_i$  actual ya está en el plano  $XZb$  ( $Y_i = 4$ ), las bocinas activas son ahora 3, 4, 7 y 8, predominan 3 y 7 por su proximidad al punto de intersección.



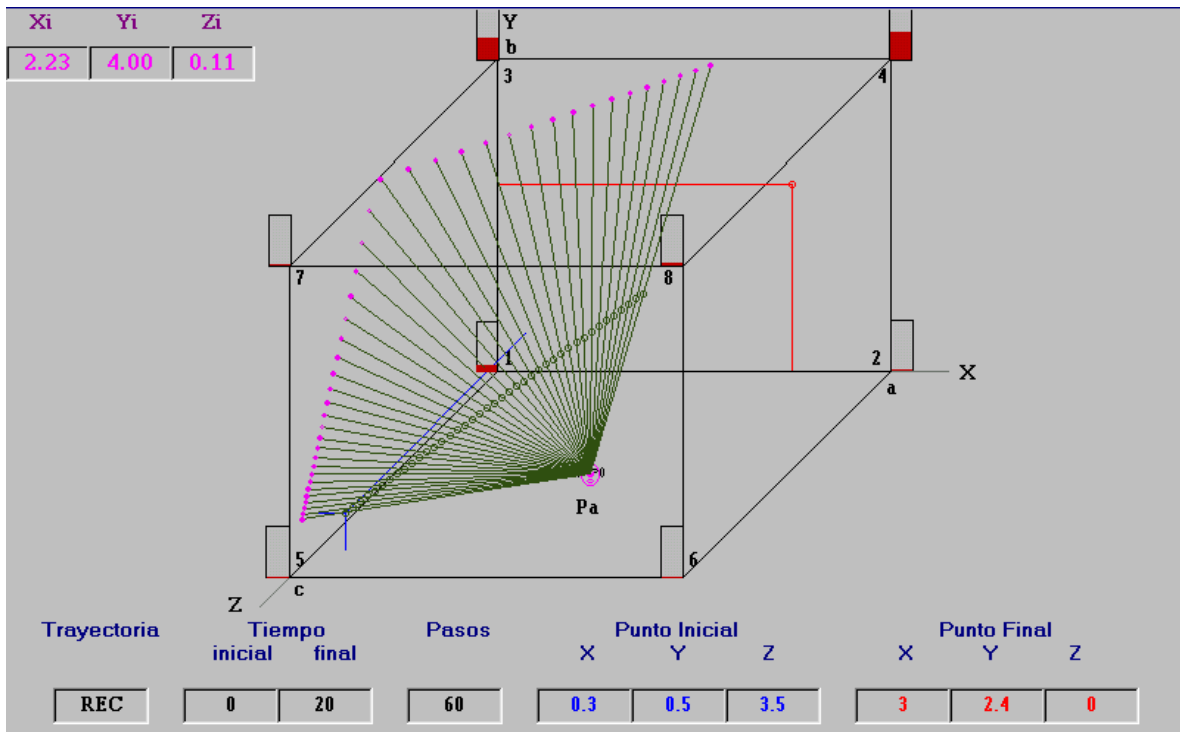


Figura 6.  $P_i$  está cerca de cambiar a otro plano ( $Z_i = 0.11$ ). El volumen está concentrado casi en su totalidad en las bocinas 3 y 4.

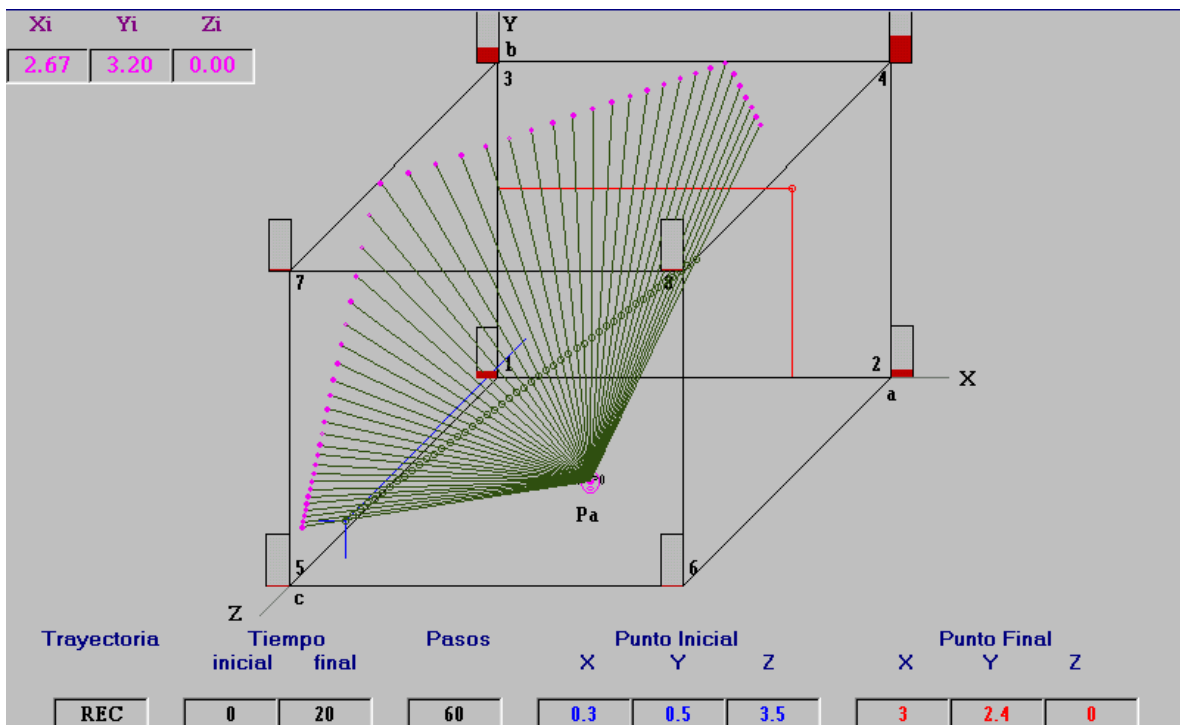


Figura 7.  $P_i$  actual se encuentra ahora en el plano XY ( $Z_i = 0$ ). El punto sonoro se aproxima al final de su recorrido.

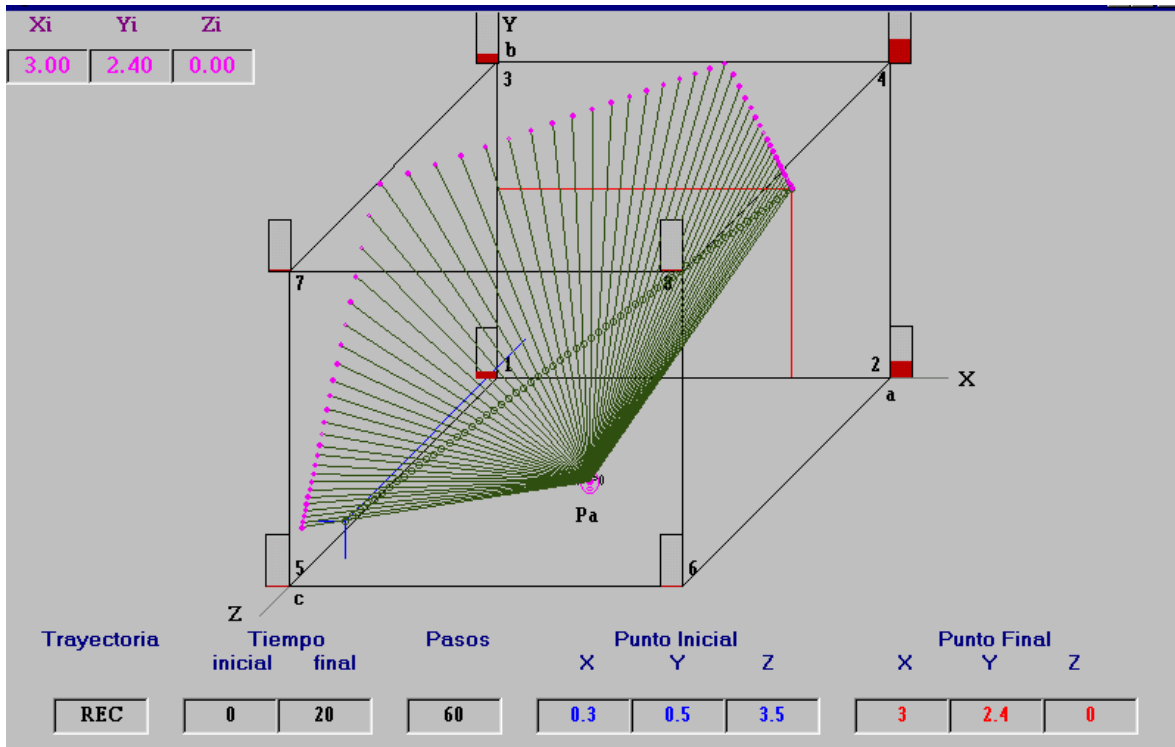


Figura 8. La trayectoria ha concluido, tanto  $P_s$  como  $P_i$  actuales coinciden con el punto final de la trayectoria.

## Discusión de los resultados

Se presentan las conclusiones, en forma de discusión de resultados, a que se llegó después de haber realizado todos los pasos para la construcción del espacializador acústico y haber realizado varias 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 un sistema que procesa el sonido y lo transfiere a un equipo de audio. Aunque puede ser mejorado con 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.

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.

**Bibliografía**

Batteau, D. W. (1967) "The role of the pinna in human localization,".London, UK: *Proc. Royal Society London*, Vol. 168 (series B)

Begault, D. (1994) "3-D Sound for Virtual Reality and Multimedia" USA Editorial AP

Clifton, R. K. (1987) "Breakdown of echo suppression in the precedence effect". USA, *Acoust. Soc. Am.*, Vol. 82, pp. 1834-1835.

Duda, R. O. (1995) "Estimating azimuth and elevation from the interaural head related transfer function," in *Binaural and Spatial Hearing*, Hillsdale, USA: R. Gilkey and T. Anderson, Eds.

[https://en.wikipedia.org/wiki/Gustav\\_Fechner](https://en.wikipedia.org/wiki/Gustav_Fechner) (Recuperado 27/09/2018)