

## PATRONES DE MOVIMIENTO EN FUENTES SONORAS UTILIZANDO ESQUEMAS DE LISSAJOUS

Juan Reyes

MagInvent.ORG

juanig@Maginvent.ORG

**Resumen:** El movimiento de fuentes sonoras en composición electroacústica es un parámetro de expresión intrínseco que ofrece varios caminos de exploración. Una de estas alternativas es la localización de fuentes sonoras utilizando trayectorias en el espacio con una metodología inspirada en esquemas que crean las figuras de Lissajous. En este documento se presentan la motivación para trabajar con este tipo de metodología y se explica el uso de la misma como apropiación de parte del compositor en la aplicación éstas matemáticas en composición musical.

**Palabras Clave:** Espacialización de sonido, Panorámicos de intensidad, Movimiento de fuentes sonoras, Efecto Doppler, Espectros, Reverberación, Figuras de Lissajous, Composición Electroacústica.

**Abstract:** Motion of sound sources in electroacoustic music composition is by default an important parameter offering several trails for exploration. A mathematical and graphical technique known as Lissajous Figures, provides several interesting alternatives worth trying, in order to achieve sound source and spectral distribution, over loudspeakers on auditory spaces and concert situations. This paper portraits this technique, and describes artistic appropriation of a mathematical tool used for creative purposes.

**Keywords:** Sound Spatialization, Intensity Panning, Sound Source Motion, Doppler Effect, Spectra, Reverberation, Lissajous Figures, Electroacoustic Composition.

### MOTIVACIÓN

En una escucha natural percibimos que el sonido proviene de todos los lados teniendo una señal que es directa, mas la suma de muchas reflexiones [Kendall, 1995]. Es lógico que desde el punto de vista de composición se utilice este parámetro para alcanzar expresividad en el desarrollo de una obra musical. En percepción sensorial, el movimiento de objetos y de cosas que se acercan y se alejan, también implica un componente sonoro que sugiere claves para la localización de estos. Esto significa que tanto en la experiencia auditiva, como en lo musical, el escucha busca la posición de una fuente sonora para completar y valorar semánticamente la percepción de un sonido [Chowning, 1971].

Manipulación de sonidos de acuerdo a un patrón de movimiento y en relación a una búsqueda estética, se convierte en un reto dentro de las ideas que puede utilizar el compositor en la realización de su obra. Por esta razón, entre otras, compositores electroacústicos e, inclusive compositores de obras con instrumentos tradicionales, han dispuesto de un mecanismo de difusión sonora multi-canal y tri-dimensional.

## ESCUCHA EN EL ESPACIO

Es bien sabido que al prescindir de indicios visuales, se puede percibir un entorno a partir de información acústica que nos lleva a concluir en un principio, si estamos en un lugar al aire libre o en un recinto como un salón, auditorio o teatro. También se perciben claves sobre si este espacio es una caverna o una sala sin reverberación, además de fuentes sonoras que aportan al contexto como sonidos de animales, de la naturaleza y posiblemente de mecanismos y artefactos en movimiento. Al caminar de un ámbito acústico a otro cambian sus características, aportando a la sensación de movimiento.

En un modelo de espacialización ideal con tratamiento de señales para lograr la simulación artificial de ambientes sonoros que delinean el plano o el cubo, también análogos a la imagen de una visión tri-dimensional, es necesario lograr un entorno en donde el escucha perciba mediante altavoces o audífonos, además del tamaño de una fuente sonora, su dirección, su distancia y movimiento en relación con el escucha [Moore, 1983].

Así pues el tratamiento de señales de audio que generan patrones de movimiento de fuentes sonoras envuelven cualidades relacionadas con las características físicas del entorno además de características sicológicas en la percepción de sonidos que se presentan al escucha. Entre las cualidades físicas del entorno se tiene en cuenta si este está al aire libre o si está un lugar cerrado. Adicionalmente, se consideran su forma, tamaño y finalmente su reverberación. Las cualidades en la percepción de un sonido son la frecuencia o altura, su espectro o timbre, la intensidad del sonido o volumen, la dirección o ángulo en referencia al escucha y apparente movimiento de la fuente sonora.

## LOCALIZACIÓN DE FUENTES SONORAS

Existen dos fenómenos que contribuyen a la dirección en la percepción de una imagen sonora. En un principio se tiene el fenómeno de lateralización que representa la ubicación de una fuente sonora en referencia a la cabeza del oyente. Este efecto existente en escucha binaural típica en audífonos y auriculares, describe que con el movimiento de la cabeza en una persona, también se mueve la fuente sonora. Lo que quiere decir que la imagen sonora siempre es la misma sin importar el movimiento de la cabeza. En segunda instancia el otro fenómeno es conocido como localización e implica que el escucha percibe la dirección de una fuente sonora en referencia a un entorno externo de la cabeza. En la localización auditiva, los eventuales movimientos de la cabeza no afectan la ubicación y el referente de la fuente sonora [Di-Liscia and Basso, 2009].

En localización de fuentes sonoras existen claves en la intensidad del sonido que llegan a cada oído por separado, ayudando a determinar la dirección de la fuente sonora, especialmente en sonidos con espectros de frecuencias altas, superiores a 2000Hz. Otro factor es la diferencia en los tiempos de llegada de un sonido a los oídos. Esto sugiere que si un sonido que está en frente del escucha, no hay diferencia en tiempos de llegada a cada uno de los oídos. Si el sonido está ubicado hacia la izquierda, el tiempo de llegada de sonido al oído derecho es mayor que al izquierdo y, viceversa [Moore, 1983].

El efecto Doppler es otro factor que contribuye a localización de fuentes sonoras en el espacio. Se percibe el efecto Doppler de un sonido como al escuchar si las cornetas de un tren se acercan o alejan de un sujeto. Este fenómeno de percepción del sonido genera cambios en el espectro de frecuencias del sonido y en la intensidad. Si el sonido se aleja, bajan aparentemente la frecuencia e intensidad y al contrario.

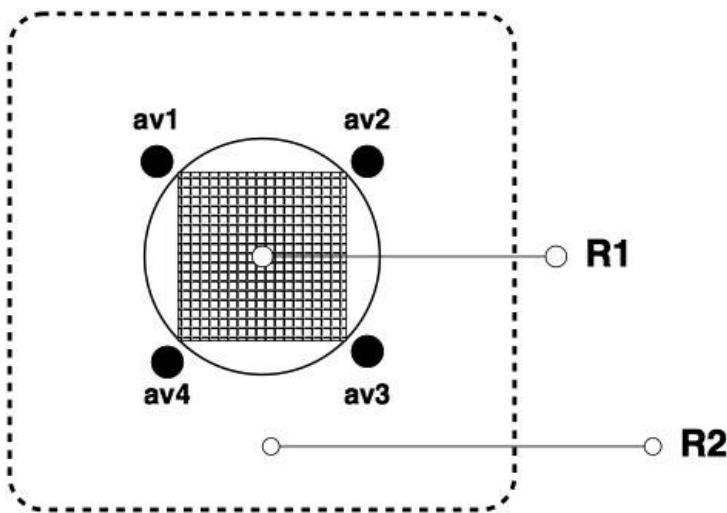


Figura 1: Esquema del modelo de espacialización de un recinto entre otro recinto. Se puede apreciar un recinto interno **R1**, dentro del recinto externo **R2**. El oyente y la audiencia se encuentran en el recinto interno; los altavoces **AV1 ... AV4**, actúan como ventanas de un recinto **R1** al otro. La ilusión de movimiento de fuentes sonoras se presenta alrededor del círculo que aparece como umbral y que une los altavoces entre ambos recintos. La imagen sonora espacial aparece por detrás de éste umbral circular.

## MODELO PARA ESPACIALIZACIÓN

Para la aplicación de movimiento de fuentes sonoras en un espacio artificial que se concibe para la difusión sonidos en una composición, se utiliza el esquema definido por F.R. Moore [Moore, 1983], (ver figura No.1). En este esquema se describe un modelo que representa la ilusión de un espacio acústico delimitado por un recinto dentro de otro recinto mayor. El recinto interno puede ser un auditorio o una sala de conciertos; el externo representa la ilusión de un espacio acústico imaginado. Los altavoces están dispuestos en el recinto interno y sirven como ventanas que comunican al oyente lo que sucede en el recinto externo [Cetta, 2007]. El tamaño del recinto externo está dado por las dimensiones del espacio acústico artificial, que bien puede ser una catedral o un estadio. Estas dimensiones en percepción determinan la reverberación artificial del recinto externo. El recinto interno aporta su reverberación natural. Dependiendo de la proximidad a los altavoces, cada oyente percibe el sonido con una perspectiva diferente aunque la audiencia en total percibe la misma ilusión de movimiento con trayectorias de sonidos.

Con las fuentes sonoras localizadas en el recinto externo, entre más altavoces, más clara la ilusión de las movimientos de sonidos en el recinto externo. La trayectoria de una fuente sonora se despliega al pasar el tiempo de altavoz en altavoz, creando la ilusión de movimiento a los oyentes en el recinto interno. Si por ejemplo se quiere generar la ilusión de movimiento circular con ocho altavoces, la fuente sonora pasará del altavoz No.1, al No.2, al No.3 y sucesivamente hasta volver a llegar al altavoz No.1. Las cualidades de la fuente sonora están representadas por vectores de radiación que incluyen parámetros como distancia, ángulo, amplitud y reverberación.

Para calcular la intensidad de una fuente sonora en el recinto externo, asumiendo que el oyente se encuentra en un lugar promedio del interno, se ha utilizado la siguiente fórmula sugerida en [Moore, 1998], que además involucra cambios en la distancia:

$$G_n(\theta, D) \triangleq \begin{cases} \frac{D_n}{D} \cos(\theta - \theta_n) & \text{si } |\theta - \theta_n| < \frac{\pi}{2}, \\ 0 & \text{para los demás valores.} \end{cases} \quad (1)$$

En la formula de la ecuación No. 1  $G_n(\theta, D)$  es el factor de ganancia o intensidad para el altavoz  $n$ . La fuente sonora se encuentra a una distancia  $D$  y a un ángulo  $\theta$  del escucha.  $\theta_n$  y  $D_n$  son el ángulo y la distancia entre el escucha y los altavoces en el recinto interno. Los ángulos se dan en radianes y  $|x|$  significa el valor absoluto de  $x$ . La distancia en coordenadas  $x, y$  esta dada por:

$$D = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}. \quad (2)$$

Teniendo las coordenadas  $x, y$  de una fuente sonora, el ángulo  $\theta$  puede ser obtenido a partir de:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right). \quad (3)$$

Por lo tanto en un modelo para patrones de movimiento, si se conoce la posición de una fuente sonora por medio de coordenadas  $x, y$  se puede calcular un factor de ganancia utilizando la ecuación No. 1. En el caso de las figuras de Lissajous, cada reiteración del sistema produce un par  $x, y$  en el plano, con el que se puede manipular la intensidad de una fuente de acuerdo a la distancia en referencia al origen, donde se supone se encuentra el escucha promedio. Varias reiteraciones del sistema al pasar el tiempo generan cambios de posición que producen indicios sobre la posición y una trayectoria cambiante que sigue un sonido. El factor de ganancia se calcula para cada altavoz en el recinto interno.

## FIGURAS DE LISSAJOUS

Una descripción técnica de las figuras de Lissajous puede resumirse como los patrones formados al sobreponer dos representaciones de vibraciones periódicas (como sinusoides), a lo largo de dos ejes perpendiculares. La definición paramétrica de las figuras de Lissajous esta dada por las siguientes ecuaciones:

$$x = a \sin(\omega_1 t + \phi_1), y = b \sin(\omega_2 t + \phi_2). \quad (4)$$

En las formulas de la ecuación No. 4,  $\omega_1, \omega_2$  son la frecuencia angular en (en radianes por segundo);  $a$  y  $b$  las amplitudes respectivas y  $\phi_1, \phi_2$  las diferencias en fase entre una función y la otra.  $t$  es el parámetro de tiempo (o reiteraciones del sistema). Para las condiciones iniciales en este sistema de ecuaciones habría que manipular seis parámetros diferentes, lo que hace complejo el control de este sistema. Por lo que reducciones algebraicas pueden simplificar la manipulación de este sistema. Por ejemplo si  $\omega_1 = \omega_2$  y  $\phi_1 = \phi_2$ , tendríamos:

$$x = a \sin(\omega t + \phi), y = b \sin(\omega t + \phi), \quad (5)$$

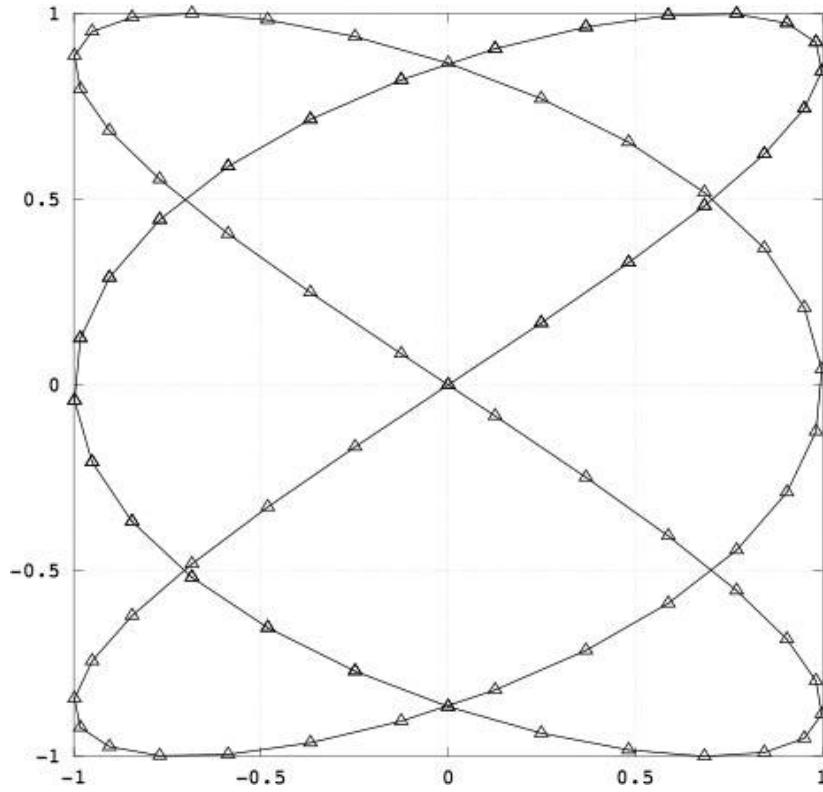


Figura 2: Ejemplo de una figura de Lissajous. En este caso se utilizan los parámetros,  $a=b=1$ ,  $\omega=3/2$  y  $\phi=0$ , de la ecuación No.8. Pares de puntos  $x,y$ , delinean movimientos laterales, al frente, atrás y en el centro. Los máximos están entre  $[-1,1]$ , lo que facilita ampliar el espacio a mayores o menores distancias.

En donde se eliminan los subscritos en cada una de las ecuaciones. Similarmente si  $\omega_1=\omega_2$ , con una diferencia de fases de  $\pi/2$  y  $\phi_1=0$ , se obtiene:

$$x = a \sin(\omega t), y = b \cos(\omega t). \quad (6)$$

Si las frecuencias son diferentes se crean curvas mas complejas. Por ejemplo cuando  $\omega_2=2\omega_1$ , las vibraciones aparecen con una octava de diferencia y se obtiene:

$$x = a \sin(\omega t), y = b \cos(2\omega t). \quad (7)$$

Finalmente y tratando de reducir el número de parámetros que se pueden manipular en las formulas de la ecuación No. 4, si  $\omega_2=\omega_1$  y  $\phi_2=0$  y  $\phi_1=\pi/2$ , donde no hay diferencia de fase entre ambas ecuaciones, obtenemos una forma reducida para las figuras de Lissajous.

$$x = a \sin(\omega t + \phi), y = b \cos(2\omega t). \quad (8)$$

Con estas formulas para encontrar pares  $x,y$  de puntos para posibles locaciones de fuentes sonoras en el plano, los parámetros se reducen de seis a cuatro. Por ejemplo en la figura No.2, se puede apreciar el movimiento en una figura de Lissajous donde las amplitudes son  $a=b=1$ , la frecuencia angular  $\omega=3/2$  radianes por segundo, y el desfase  $\phi=0$ . La curva esta centrada en un cuadrado que se puede adaptar al modelo del recinto-2, en el modelo para espacialización ya descrito, de un recinto pequeño dentro de un segundo mas grande (ver figura No.1). En cada momento de la trayectoria del sonido se calcula su distancia con el origen (centro, y el ángulo, suponiendo que el escucha se encuentra ubicado en centro de ambos recintos). La distancia  $y$  y el ángulo sirven para calcular indicios de movimiento del sonido como su intensidad y el efecto Doppler. Con la intensidad y el ángulo también se calcula la reverberación de todo el espacio en referencia a la audiencia interna. La figura No.3, muestra otros patrones para trayectorias, simplemente cambiando los parámetros de frecuencia angular  $\omega$  y la diferencia de fase  $\phi$  en la ecuación No.8. Ejemplos de valores para éstos parámetros se pueden encontrar en: [Weisstein, 2011].

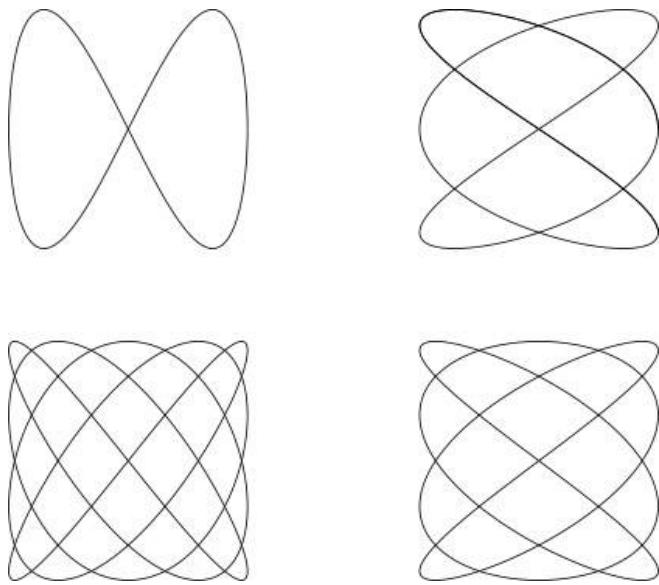


Figura 3: Ejemplos de diferentes patrones con Figuras de Lissajous.

## MODELO PARA EL EFECTO DOPPLER

El efecto Doppler se percibe como cambios relativos de altura y frecuencia, cuando un sonido se aleja o se acerca del escucha al transcurrir la duración del sonido. En la figura No.2, se aprecian los cambios de posición en el tiempo e implican una velocidad con la que se acerca o aleja la fuente sonora. Esto indica que la velocidad en función del tiempo es el factor con el cuál se calculan los cambios de frecuencia del sonido con el efecto Doppler. En términos de velocidad se puede decir que los cambios de frecuencia de una fuente sonora en movimiento están dados por:

$$\omega_e = \omega_s \frac{c}{c - v}, \quad (9)$$

donde  $\omega_e$  es la frecuencia del sonido que percibe el escucha,  $\omega_s$  es la frecuencia real del sonido,  $v$  la velocidad de aproximación o alejamiento de la fuente sonora y  $c$ , la velocidad del

sonido. Un método eficaz para el modelo computacional del efecto Doppler es la linea de retardo [Smith, 2002]. Es bien sabido que al variar la longitud (en duración) de una linea de retardo, ocurren variaciones en la frecuencia del sonido que pasa a través de este dispositivo [Smith and Abel, 2002]. Si  $x(t)$  es la entrada de un sonido, la linea de retardo esta dada por  $Y(t) = x(t - D_t)$ , donde  $D_t$  denota la variación de la linea de retardo en segundos. Partiendo de la ecuación No.9, se puede decir que  $D_t = -v/c$ . Por lo que variaciones en la longitud de la linea de retardo pueden calcularse a partir de la velocidad instantánea con  $D_t = -d/c$ , donde  $d$ , es la distancia dada desde el par  $x,y$  al origen. Con este método se deduce que cambios en la longitud de la linea de retardo, implican cambios en la frecuencia del sonido que se procesa.

## **INTEGRACIÓN DE LOS MODELOS DE INTENSIDAD Y DOPPLER**

Para lograr un modelo para trayectorias de fuentes sonoras con figuras de Lissajous, es necesario integrar los factores de intensidad del sonido y el efecto Doppler. Esto quiere decir que dependiendo la distancia y el ángulo entre el escucha y la fuente de sonido, hay que calcular la intensidad y los cambios de frecuencia en el sonido que se mueve. Dado el modelo del recinto interno al externo, hay que calcular la intensidad de la fuente y el Doppler por cada altavoz. Dependiendo de la posición del par  $x,y$ , la intensidad será diferente en cada uno de los altavoces y obviamente será mayor en el altavoz que se encuentra mas cercano a la fuente. Ya que la reverberación es proporcional a la intensidad del sonido, habrá mayor nivel de este parámetro en la dirección del altavoz con mas volumen, aunque la reverberación se dispersará proporcionalmente y por parejo a cada uno de los demás altavoces. Existe la posibilidad de incorporar otras claves de localización de fuentes pero en el momento no se utilizan ni los indicios de lateralización, ni los de localización inter-aural.

## **APLICACIÓN DEL MODELO**

Se han desarrollado varios programas en que se implementa el modelo descrito para patrones de movimiento de fuentes sonoras, usando figuras de Lissajous y otros esquemas. La parte teórica se ha prototipado en *Octave* y *Matlab*, que son herramientas que ayudan para cálculos matemáticos. Para composición de música electroacústica se han utilizado *CLM*[Schottstaedt, 2006] y *S7*[Schottstaedt, 2011] y *SuperCollider*. Las versiones en *SuperCollider* aparte de utilizar el paradigma del recinto dentro de otro recinto, añaden la posibilidad de Ambisonics[Gerzon, 1985]. Los algoritmos de *Octave* han sido implementados con tan solo traducción del código a cada uno de estos lenguajes. El único reto que surge, es la implementación de la linea de retardos fraccionada e interpolada, que igualmente es un generador de unidades incorporados en *CLM*, *S7* y *SuperCollider*.

El flujo de señal en cada programa sigue una fuente sonora que puede ser un lector de archivos de audio monofónicos o generadores de unidades como osciladores. A partir de ahí, la señal es distribuida a cuatro o mas canales para hacer el tratamiento de señal respectivo. Para cada canal hay que realizar el tratamiento de señal respectivo, dependiendo de la posición de la fuente con su par  $x,y$ , en referencia a su ángulo con el escucha y con el altavoz de cada canal. Por lo tanto hay factores independientes de intensidad y Doppler para cada altavoz en el espacio acústico simulado.

## CASOS Y APLICACIONES

El modelo descrito y los algoritmos que aquí se mencionan han sido utilizados en la composición de varias obras electroacústicas realizadas por el autor. En *Esquemas de Marimonda* (2007), se utilizó un modelo del espacio estereofónico [Reyes, 2009]. En *Chuchoter* (2010), se aplica el modelo a cuatro canales, con tan solo cambios de intensidad pero siguiendo trayectorias con figuras de Lissajous. En una nueva versión de *Chuchoter* (2011), se añaden los cambios de frecuencia para el efecto Doppler, se aumenta la difusión a ocho canales y se utiliza Ambisonics. En *Traxpong* (2011), se aplica la misma metodología de la última versión de *Chuchoter*, utilizando intensidad por Lissajous, Doppler y Ambisonics en ocho canales. Los programas utilizados son de fuente abierta y están a disposición del lector.

## TRABAJO FUTURO

Ningún software está libre de errores (bugs), por lo que para nuevas versiones se corregirán las deficiencias que vayan apareciendo. En la ecuación No.8 de las figuras de Lissajous, hay cuatro o mas parámetros que se pueden manipular, lo que invita a probar con mas combinaciones de parámetros y condiciones iniciales. De gran importancia es tratar de lograr una implementación de este método en un modelo de audio en tres dimensiones como "third-order" Ambisonics o VBAP [Pulkki and Lokki, 1998]. También cabe la posibilidad de adaptar la generación de estas trayectorias con figuras de Lissajous a otros programas como *DLOCSIG* [Lopez-Lezcano, 2008] y *move-sound* en *S7* y *CLM*. Por su versatilidad en crear gestos no tan predecibles en la difusión de material sonoro, es muy seguro que en la concepción de nuevas obras, este método sea una herramienta y parámetro de expresión musical.

## CONCLUSIONES

Se ha presentado una metodología para lograr trayectorias de fuentes sonoras que siguen esquemas delineados por figuras de Lissajous. Estas trayectorias se formulan como una ilusión de movimiento de sonido en el espacio, aunque el modelo funciona en el plano. Para lograr el objetivo de un ámbito sonoro omni-direccional, se utiliza el paradigma de un recinto de menor tamaño dentro de uno mas grande. La ilusión de movimiento ocurre en el recinto grande y los altavoces del recinto interno actúan como ventanas al externo. Es bien sabido que cambios en la intensidad y en el ángulo de una fuente sonora en relación con el escucha, esbozan una perspectiva sonora del ambiente donde se está percibiendo el sonido. Igualmente cambios en la frecuencia del sonido son claves determinantes para saber si la fuente se acerca o se aleja del escucha. Patrones de movimiento con figuras de Lissajous es un método ágil para generar trayectorias de sonidos que no son tan predecibles como metodologías lineales o circulares. Este modelo ha sido utilizado exitosamente en varias composiciones desarrolladas por el autor.

## REFERENCIAS

- [Cetta, 2007] Cetta, P. (2007). *Un Modelo para la simulación del espacio en música*. Educa, Editorial Universidad Católica Argentina.
- [Chowning, 1971] Chowning, J. (1971). The simulation of moving sources. *Journal of the Audio Engineering Society*, 19(1):26.
- [Di-Liscia and Basso, 2009] Di-Liscia, P. and Basso, G. (2009). *Música y Espacio: Ciencia, tecnología y*

- Estética*, chapter Audición espacial de sonido: conceptos básicos y estado actual de la cuestión. Editorial Universidad Nacional de Quilmes, Bernal, Buenos Aires, Argentina.
- [Gerzon, 1985] Gerzon, M. A. (1985). Ambisonics in multichannel broadcasting and video. In *Journal of the Audio Engineering Society*, volume 33, pages 859–871.
- [Kendall, 1995] Kendall, G. (1995). A 3-d sound primer: Directional hearing and stereo reproduction. *Computer Music Journal*, 19(4):23–46.
- [Lopez-Lezcano, 2008] Lopez-Lezcano, F. (2008). Dlocsigt, a dynamic spatial locator ugen for clm. In *Proceedings of Sound and Music Computing Conference 2008*.
- [Moore, 1998] Moore, F. R. (February 17, 1998). *Elements of Computer Music*. Pearson Education POD.
- [Moore, 1983] Moore, R. (1983). A general model for spatial processing of sounds. *Computer Music Journal*, 7(3):6–15.
- [Pulkki and Lokki, 1998] Pulkki, V. and Lokki, T. (1998). Creating auditory displays with multiple loudspeakers using vbap: A case study with diva project. In *Proceedings of the 5th International Conference on Auditory Display (ICAD98)*. British Computer Society.
- [Reyes, 2009] Reyes, J. (2009). Esquema sonoro: Una aproximación musical a la plástica sonora. *Itamar, Revista de Investigación Musical: Territorios para El Arte*.
- [Schottstaedt, 2006] Schottstaedt, B. (2006). Common Lisp Music (CLM). <http://ccrma.stanford.edu/software/snd/snd/clm.html>. Visto en Febrero del 2012.
- [Schottstaedt, 2011] Schottstaedt, B. (2011). S7. <http://ccrma.stanford.edu/software/snd/snd/s7.html>. Visto en Mayo del 2012.
- [Smith, 2002] Smith, J. (2002). Delay lines. [https://ccrma.stanford.edu/~jos/pasp/Delay\\_Lines.html](https://ccrma.stanford.edu/~jos/pasp/Delay_Lines.html). Visitado en Mayo del 2012.
- [Smith and Abel, 2002] Smith, J. and Abel, J. (2002). Doppler simulation and the leslie. <https://ccrma.stanford.edu/~jos/doppler/>. Visitado en Marzo del 2012.
- [Weisstein, 2011] Weisstein, E. (2011). Lissajous Curve Reference. <http://mathworld.wolfram.com/LissajousCurve.html>. Vista en Mayo del 2012.