

DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA DE SÍNTESIS DE CAMPO ACÚSTICO (WAVE FIELD SYNTHESIS) SIMPLIFICADO

Adrián Lara Moreno, Salvador Luna Ramírez

Dpto. Ingeniería de Comunicaciones. ETSI Telecomunicación. Universidad de
Málaga. Campus de Teatinos. 29071. Málaga. España. Tfno: +34 952137186.

adrianlaramoreno@gmail.com, sluna@ic.uma.es

ABSTRACT

This communication will develop the analysis of theoretical fundamentals of a Wave Field Synthesis (WFS) system. Some simplifications are also introduced and explained, with the aim of implementing a real system later.

Objective and subjective tests have been carried out over a simplified WFS system. Limitations and critical parameters in such an experimental implementation will be detected and remarked.

Keywords: WFS, synthesis, sound system, software, acoustic field.

RESUMEN

En este trabajo se realizará el análisis de los fundamentos teóricos de un sistema Wave Field Synthesis (WFS), resaltando las simplificaciones llevadas a cabo de cara a una implementación real posterior.

Se mostrarán los resultados obtenidos mediante pruebas objetivas y subjetivas realizadas en una implementación simplificada del sistema WFS, donde se destacarán los elementos críticos que caracterizan este tipo de sistemas y las limitaciones experimentadas en este sistema simplificado.

Palabras-clave: WFS, síntesis, sistema de sonido, software, campo acústico

1. INTRODUCCIÓN

Continuamente se están investigando y desarrollando sistemas de audio y vídeo que permitan la reproducción, de la forma más fidedigna posible, de eventos acústicos y visuales que día a día percibimos. En lo que a audio se refiere, numerosos sistemas de sonido han emergido a lo largo de los últimos años y constantemente se realizan investigaciones que permiten obtener resultados cada vez más realistas.

De acuerdo con la física en la que se fundamenta un sistema de sonido, se pueden encontrar distintos tipos de sistemas: los basados en el efecto *phantom*, en la reconstrucción binaural y los que reconstruyen el campo sonoro.

Los sistemas basados en el efecto *phantom* sintetizan fuentes virtuales (fuentes *phantom*) en el espacio comprendido entre dos altavoces (configuración estéreo). Para ello se tienen en cuenta los parámetros de diferencia de nivel/tiempo interaural (ITD, ILD). El principal inconveniente de este tipo de sistemas es el espacio reducido en el que se pueden sintetizar fuentes acústicas y el efecto de *sweet spot* que se produce en la sala.

Por otro lado se encuentran los sistemas que reconstruyen o sintetizan la señal que llega al pabellón auditivo. Estos sistemas tienen como objetivo que en cada oído haya una señal distinta e idéntica a las que se producirían en la escena sonora original. Para ello es necesario realizar grabaciones estereofónicas in situ o bien realizar modificaciones de la señal con la función de transferencia relativa de la cabeza (HRTF). El realismo de estos sistemas es bastante destacable aunque el principal inconveniente es que requieren el uso de auriculares o bien un sistema de seguimiento del oyente.

Por último, y destacando su presencia en numerosas investigaciones en la actualidad, se encuentran los sistemas de síntesis de campo sonoro, que tienen como objetivo la reconstrucción física del campo acústico. El sistema más importante de este tipo es el conocido como *Wave Field Synthesis* (WFS) y surge a partir del teorema de Huygens, en el que se describe el fenómeno de difracción y de descomposición de ondas en frentes de onda secundarios. De este teorema reciben el nombre las fuentes primarias y fuentes secundarias. Las fuentes primarias son fuentes acústicas que se quieren sintetizar/reconstruir, es decir, son las que originan el sonido mientras que por otro lado las fuentes secundarias son las encargadas de aportar las contribuciones (frentes de onda secundarios) que darán lugar a la reconstrucción del campo acústico de la fuente primaria. Como resultado de la adición de numerosas fuentes secundarias (altavoces) se logra sintetizar el campo acústico original o, en términos prácticos, una buena aproximación de él.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS BÁSICOS Y DETERIOROS DE UN SISTEMA WAVE FIELD SYNTHESIS

En términos conceptuales, un sistema Wave Field Synthesis funciona como una cortina acústica que divide dos recintos, uno donde se produce el campo sonoro, y otro donde se reproduce/sintetiza. Si esta cortina acústica estuviese formada por infinitos micrófonos y altavoces ideales, podría decirse que el sistema (cortina) que separa ambos recintos no interfiere en la propagación del campo acústico de la fuente sonora original.

Partiendo de este concepto se diseñaron los primeros sistemas WFS [1], que posteriormente se verían realizados y complementados gracias a las integral de Kirchhoff-Helmholtz.

$$P(\vec{r}, s) = \frac{1}{4\pi} \oint_S \left[P(\vec{r}_s, \omega) \frac{\delta}{\delta n} \left(\frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}_s|}}{|\vec{r}-\vec{r}_s|} \right) - \frac{P(\vec{r}_s, \omega)}{\partial n} \frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}_s|}}{|\vec{r}-\vec{r}_s|} \right] dS \quad (1)$$

Esta integrales resultado de la cuantificación matemática del teorema de Huygens llevada a cabo por Kirchhoff. Establece que el campo acústico en un volumen cerrado V procedente de una fuente externa se puede calcular conocida la presión acústica en la superficie S de dicho volumen que alimentará a una serie de monopolos y dipolos situados en S . La transformada de Fourier de la presión sonora en una posición de referencia L en V viene determinada por dicha integral.

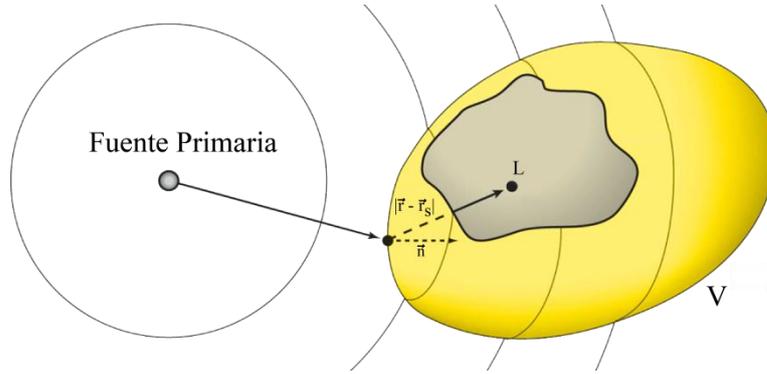


Figura1. Geometría implicada en la integral de Kirchhoff-Helmholtz

Para implementar la ecuación anterior en un sistema WFS resultan oportunas una serie de simplificaciones:

- Degeneración de la superficie S a un plano situado entre el área de escucha (donde se encuentra la fuente sonora) y el área de reproducción (donde se sintetiza el campo acústico)
- Discretización espacial
- Degeneración de la superficie S de un plano a una línea

El desarrollo de las simplificaciones anteriores se contempla en [2][3][4], dando como resultado la ecuación que describe la síntesis de campo acústico mediante un array de altavoces que se muestra a continuación:

$$P(\vec{r}, \omega) = \frac{jk}{2\pi} \sum_{n=1}^N P(\vec{r}_n, \omega) \cos \varphi_n \frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}_n|}}{|\vec{r}-\vec{r}_n|} \Delta x, \quad (2)$$

donde N es el número de fuentes-altavoces y Δx es el espacio entre fuentes. De dicha ecuación se deriva la posibilidad de utilizar un array de altavoces para la síntesis o reconstrucción del campo sonoro producido por una fuente sonora. El siguiente paso, por tanto, será el cálculo de las señales que alimentarán cada uno de los altavoces que componen el array, de manera que se pueda construir el algoritmo que sintetiza el sistema WFS.

Una fuente sonora situada en un punto m genera ondas esféricas cuyo campo sonoro se describe mediante la expresión

$$P(\vec{r}, \omega) = S(\omega) \frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}_m|}}{|\vec{r}-\vec{r}_m|}, \quad (3)$$

siendo $S(\omega)$ el espectro de la fuente virtual y los elementos de la fracción los determinantes de los factores de expansión temporal y de amplitud. Por otro lado, el campo sonoro que produce un array de altavoces es el siguiente

$$P(\vec{r}, \omega) = \sum_{n=1}^N \left[Q(\vec{r}_n, \omega) G(\varphi_n, \omega) \frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}_n|}}{|\vec{r}-\vec{r}_n|} \right], \quad (4)$$

donde N es el número de altavoces que componen el array, $Q(\vec{r}_n, \omega)$ la señal que alimenta cada n -ésimo altavoz (contiene de la información acústica), φ_n el ángulo entre la posición de escucha y el n -ésimo altavoz, y $G(\varphi_n, \omega)$ el diagrama de directividad de cada altavoz. De acuerdo con la formulación aportada por Rayleigh, las señales que se dirigen a los altavoces son versiones pesadas del campo acústico de la fuente primaria en la posición del array.

$$Q(\vec{r}_n, \omega) = A_n P(\vec{r}_n, \omega) = A_n S(\omega) \frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}_n|}}{|\vec{r}-\vec{r}_n|} \quad (5)$$

Combinando las expresiones (4) y (5) se llega a la expresión

$$\frac{e^{-jk\vec{r}}}{\vec{r}} = \sum_{n=1}^N \left[A_n G(\varphi_n, \omega) \frac{e^{-jk(\rho_n + \sigma_n)}}{\rho_n \sigma_n} \right] \quad (6)$$

Tras una serie de desarrollos matemáticos y simplificaciones descritas en [2] se calculan los n -ésimos pesos (A_n) que modifican la señal que origina el campo sonoro. Estas señales son conocidas como señales *driving* y vienen determinadas por la siguiente expresión, fruto de sustituir (A_n) en la ecuación (5).

$$Q(\vec{r}_n, \omega) = S(\omega) \frac{\cos\theta_n}{G(\theta_n, \omega)} \frac{\sqrt{jk}}{\sqrt{2\pi}} \frac{\sqrt{|z-z_1|} e^{-jk|\vec{r}_n-\vec{r}_m|}}{\sqrt{|z-z_0|} \sqrt{|\vec{r}_n-\vec{r}_m|}} \quad (7)$$

2.1 DETERIOROS DE UN SISTEMA WFS

Numerosas simplificaciones se han descrito en el desarrollo matemático descrito anteriormente, teniendo como resultado una ecuación que sintetiza el sistema. Como se puede pensar, estas simplificaciones aportarán errores respecto a la teoría original, teniendo como resultado un sistema que aproxima el campo sonoro original. Los principales deterioros producidos respecto al campo sonoro original se describen a continuación.

▪ Errores de amplitud

Mediante la integral de Kirchhoff-Helmholtz se cuantifica la reconstrucción del campo sonoro producido por una fuente, que produce ondas esféricas, en el interior de un recinto cerrado. Este tipo de reconstrucción resultaría tediosa computacionalmente debido a la infinidad de cálculos matemáticos necesarios.

Tras el conocimiento del funcionamiento del oído humano a través de numerosos estudios se concluye que la localización de fuentes acústicas en el entorno se produce en su gran mayoría en el plano medio que contiene al oído. Simplificando la superficie de fuentes secundarias de una esfera a un plano y posteriormente a una línea de fuentes secundarias, tal y como se ha realizado en el desarrollo matemático, se tendrá como resultado una reconstrucción correcta solamente en el plano que contiene el array de altavoces (fuentes secundarias). Si se sitúa el array de altavoces a la altura del oído se consigue que la localización de fuentes sonoras se lleve a cabo con normalidad.

Otra de las consecuencias de utilizar un array de altavoces es que éste produce ondas cilíndricas en lugar de ondas esféricas, por lo que se producirán errores de amplitud en la reconstrucción del campo sonoro. Estos errores de amplitud tienen como origen la forma en que se expanden dichas ondas, existiendo una diferencia de +3dB al duplicar la distancia entre una onda cilíndrica y una esférica.

- **Aliasing espacial**

La formulación original prevista para la reconstrucción del campo sonoro está definida para distribuciones infinitas de fuentes secundarias. Para posibilitar la construcción del sistema con las herramientas disponibles (en este caso altavoces como fuentes secundarias) es necesario realizar una discretización de dicha formulación.

La principal consecuencia que se deriva de esta discretización es la existencia de *aliasing* espacial, efecto mediante el cual el sistema es incapaz de reconstruir el campo sonoro de forma fidedigna a partir de cierta frecuencia, denominada frecuencia de *aliasing* y determinada por la siguiente expresión:

$$f_{alias} = \frac{c}{2\Delta x_{max} \operatorname{sen}(\alpha_{max})} \quad (8)$$

donde c es la velocidad del sonido, Δx_{max} es la separación máxima entre los altavoces del array y α_{max} el ángulo máximo entre los formados por fuente virtual-altavoz y altavoz-posición de escucha.

Los principales efectos producidos por la existencia de dicho efecto son los siguientes; alteración del frente de onda a partir de la frecuencia de *aliasing* (con la consecuente dificultad de localizar la fuente), efectos de coloración espectral debido al filtrado tipo peine que se produce y por consiguiente efectos de modulación en amplitud debido al movimiento del espectador a lo largo de la sala.

- **Efecto de truncado**

Otra de las simplificaciones llevadas a cabo para adaptar la formulación a un sistema realista ha sido la limitación del número de fuentes secundarias, es decir, no disponer de una superficie infinita de fuentes secundarias. Como resultado de esta simplificación se produce un efecto de truncado o enventanado en el sistema, lo que tiene las siguientes consecuencias:

- Limitación del espacio en el que se pueden sintetizar fuentes virtuales, ya que el array sólo podrá reconstruir aquellas que se encuentren dentro del área de visibilidad. Esta área de visibilidad se delimita siguiendo la teoría de rayos e intervienen principalmente la longitud del array y la posición de la fuente virtual. Para solucionar este problema de visibilidad y poder así sintetizar fuentes sonoras en los 360° del semiplano x se utilizan arrays circulares que incluyen el área determinada por la sala de escucha.
- Efectos de difracción en los extremos del array. La difracción aportará versiones retardadas al campo sonoro reconstruido que resultará en una coloración espectral

Para paliar este deterioro basta con aplicar una ventana de ponderación sobre los coeficientes de amplitud que modifican la señal de cada altavoz, de manera que la amplitud de los altavoces situados en los extremos sea reducida y, por tanto, el efecto de difracción. En el algoritmo diseñado se ha utilizado una ventana de ponderación tipo coseno truncado en el que entre el 60-70% de los altavoces tienen factor 1, es decir, no modifican su amplitud. El campo sonoro, antes y después de la corrección se muestra en la siguiente figura.

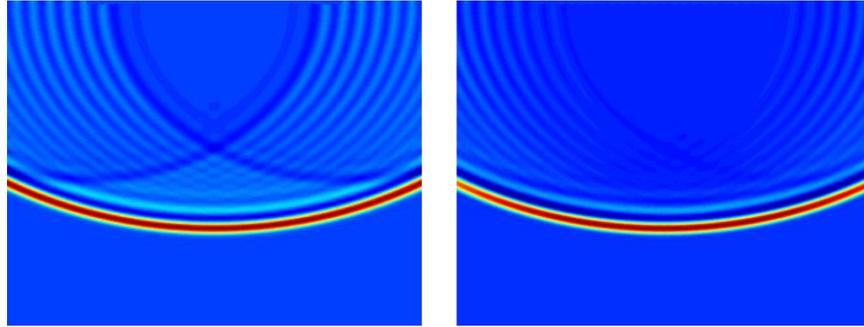


Figura 2 – Impulso de 1kHz con difracción (izquierda) y resultado tras aplicar ventana de ponderación (derecha)

3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA WFS SIMPLIFICADO

Tras una breve introducción de los fundamentos teóricos que describen la síntesis de campo sonoro, así como los deterioros que se producen tras la adaptación de éstos a un sistema realizable, se presenta a continuación las herramientas que se han utilizado para la implementación de un sistema WFS simplificado. Dichas herramientas pueden ser software, diseño del algoritmo, y hardware, elementos que intervienen en la cadena de reproducción del sistema.

▪ Implementación del algoritmo

El objetivo principal es la implementación de las funciones driving. Para ello se ha utilizado el software Matlab®, aprovechando las ventajas que posee en el manejo de ficheros de sonido y las diversas opciones de representación gráfica. La función a implementar se describe en la ecuación (7) y se resume de la siguiente forma:

$$Q(\vec{r}_n, \omega) = S(\omega)H(\omega)Y_n \quad (9)$$

Donde $S(\omega)$ es el espectro de fuente sonora virtual que se quiere sintetizar, $H(\omega) = \sqrt{jk/2\pi}$ corresponde a un prefiltrado paso alto de +3dB/oct, e Y_n es un operador que implementa las modificaciones de amplitud y retardo correspondientes para cada n -ésimo altavoz.

La etapa de prefiltrado es del tipo respuesta al impulso infinita (IIR) por lo que resulta complicado implementarlo de forma exacta mediante filtros digitales. Otra de las características del filtro es una respuesta en frecuencia plana a partir de la frecuencia de aliasing, que se justifica de la siguiente forma; el uso de array de altavoces supone un comportamiento paso bajo innato [5] que se compensa mediante el prefiltrado, no obstante, a partir de la frecuencia de aliasing se produce un aumento de energía de aproximadamente +3dB/oct debido al efecto de aliasing, por lo que resulta innecesario aplicar prefiltrado en esta zona del espectro.

Por otro lado, para el operador de ganancia y retardo, que modifica la señal de cada altavoz, es necesario implementar una etapa de retardo que no aporte, en la medida de lo posible, errores en la reconstrucción del campo acústico. Debido a la exactitud en las distancias entre fuente y altavoz resultarán retardos decimales que si no son aplicados correctamente (por ejemplo, redondeando al entero más cercano) pueden causar incoherencias en el campo sonoro. Para solucionar este detalle se ha implementado un retardo fraccional mediante un filtro interpolador lineal de primer orden, descrito mediante la siguiente expresión:

$$y[n] = x[n](\tau - 1) + \tau x[n - 1] \quad (10)$$

▪ Síntesis de fuentes acústicas

La principal ventaja que ofrece un sistema WFS estriba en la capacidad para reconstruir distintos tipos de fuentes que otros sistemas de sonido no son capaces de realizar. Las fuentes sonoras contempladas en la teoría son conocidas como fuentes virtuales, situadas en el semiplano positivo z , donde el array de altavoces está contenido en el eje x con $z=0$, es decir, el array de altavoces se encuentra siempre entre la fuente virtual y el espectador.

Otra de las posibilidades que incluyen el uso de fuentes virtuales es la síntesis de frentes de onda plano. Para conseguirlo basta con situar la fuente sonora a una distancia suficiente como para que la distancia entre fuente y cada n -ésimo altavoz sea prácticamente la misma.

Finalmente, destaca la posibilidad de sintetizar fuentes acústicas en el interior del recinto donde se reconstruye el campo sonoro. Este tipo de fuentes son conocidas como fuentes focales y, aunque no están contempladas en la teoría de WFS, pueden implementarse por el principio de reciprocidad entre emisor y receptor. Mediante el algoritmo de síntesis implementado se ha simulado el campo acústico en los tres casos anteriores. La figura 3 muestra estos resultados de simulación.

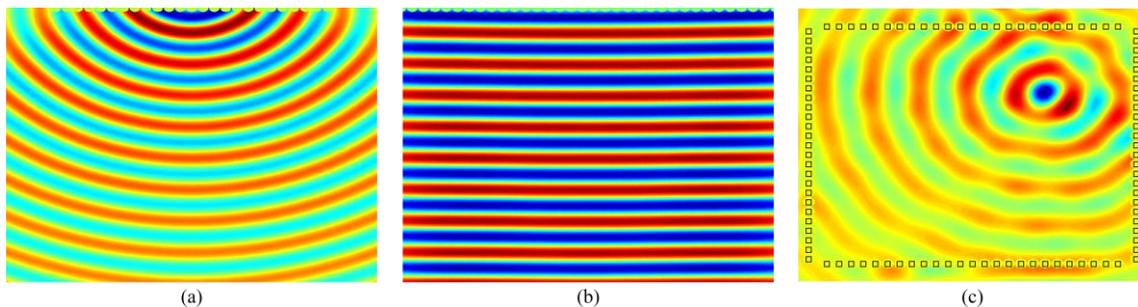


Figura 3. Simulación de sistema WFS con (a) fuente virtual, (b) frente de onda plana y (c) fuente focal

▪ Configuración del sistema WFS simplificado.

La configuración que se ha utilizado para el análisis del sistema WFS consta principalmente de un array de 10 altavoces distanciados 10 centímetros entre ellos. La elección de dichos parámetros se ha realizado teniendo en cuenta las dimensiones de la habitación donde se ha situado el sistema, en un estudio de grabación de medianas dimensiones ($\approx 30\text{m}^2$). El array se ha situado a una altura de aproximadamente 1.5m, valor en el que se sitúa el plano medio del oído si el espectador se encuentra sentado en una silla.

Los altavoces que se han utilizado son el modelo KR1 de la firma CELESTION, compuestos por un cono de 5.25" y un *tweeter*, lo que permite disponer un rango de frecuencias bastante competente, sobre todo en bajas frecuencias, rango crítico si se utilizan altavoces muy pequeños para el array. El tamaño de los altavoces es de 174cm, que equivaldrá a la distancia entre fuentes. Esta distancia resulta en una frecuencia de aliasing mínima de 1.2kHz según ecuación (8) en el caso de que se sitúen los altavoces juntos.

Para la reproducción del contenido en el array, así como la grabación del campo sonoro para el análisis y estudio de éste, se ha seguido la siguiente metodología en la que han intervenido equipos que se nombran a continuación:

- La síntesis de las señales driving se ha realizado en un PC mediante un algoritmo implementado en Matlab.

- Mediante una tarjeta de sonido externa (Edirol UA-25EX) se ha obtenido la trama de audio para cada altavoz, de forma sincronizada, para almacenarla en un multipistas (Fostex D-80).
- Una vez almacenadas las 10 pistas, una para cada altavoz, se procederá a la amplificación de la señal mediante amplificadores Pioneer A-605R. Posteriormente se reproducirán, mediante el panel de interconexión entre estudio y sala de control, en el array de altavoces. Para la captura del campo sonoro en la sala de reproducción se ha utilizado un micrófono de condensador AUDIX TR-40. Todos los procesos de reproducción/grabación han sido sincronizados mediante protocolo MIDI.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

Con la finalidad de comprobar los efectos de deterioro que se han descrito en el apartado 2 se ha desarrollado una funcionalidad de simulación de campo acústico en el algoritmo. No obstante, y de forma adicional, resulta interesante contemplar estos deterioros y el comportamiento del sistema en un entorno simplificado real. Para llevar a cabo este estudio se han desarrollado una serie de pruebas objetivas y subjetivas descritas a continuación.

4.1 Resultados Objetivos

Mediante este tipo de pruebas se ha pretendido cuantificar el error de síntesis en el área de escucha. La configuración del sistema así como los elementos que intervienen en este tipo de pruebas se han descrito en el apartado anterior. Para el muestreo espacial en el área de escucha se han tomado muestras espaciadas 12.5cm sobre un área de 1x1m situada a 1.54 m del array de altavoces. Las pruebas realizadas sobre dicha matriz han sido las siguientes:

- **Reconstrucción de la señal**

Tal y como se deduce de la teoría, el nivel de presión sonora en cada punto de la sala será el resultado de la adición simultánea de las aportaciones que proporcionan los altavoces del array. Para cuantificar la calidad de reconstrucción se ha utilizado un tono de 500Hz posicionado en [1.5; 3], siendo el centro del array el origen de coordenadas. Si se toma una frecuencia de muestreo de 44.1KHz se obtiene que cada periodo de señal analógica estará compuesto por 88.2 muestras.

Tras calcular el periodo de señal digital sobre 24000 muestras se ha obtenido un resultado medio en toda la matriz de muestreo de 88.252 muestras, muy aproximado al valor teórico. Las muestras medias de cada punto de muestreo se ilustran en la Figura 4.

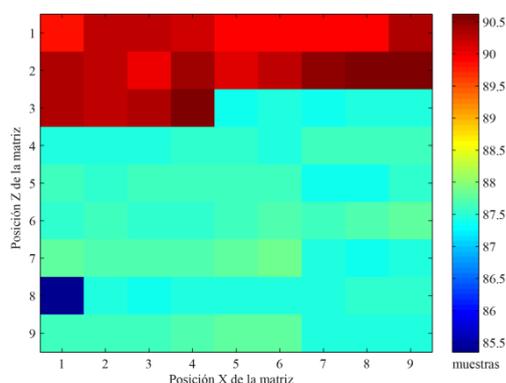


Figura 4 – Error de reconstrucción en muestras producido en la matriz de muestreo

▪ Reconstrucción del frente de onda

Para evaluar la reconstrucción del frente de onda desde la posición de origen descrita anteriormente se ha tomado como referencia la posición de la matriz más cercana al origen de la fuente, situada 1.5m en el eje x, es decir, la esquina superior derecha. Para medir la forma correcta del frente de onda se han tomado las diferencias de fase entre el punto de referencia y cualquier otro punto de la matriz. Esta diferencia de fase se calcula mediante la transformación en muestras de la expresión $\Delta\tau = d_i - d_0$, donde d_0 es la distancia entre la posición de referencia y el origen del frente de onda y d_i la distancia entre la i -ésima posición de la matriz y el origen del frente de onda.

Para evitar desfases temporales a la hora de captar las señales se han grabado pares de señales (posición de referencia + i -ésima posición) mediante dos micrófonos sincronizados. El error cometido en el frente de onda será resultado de la diferencia de fase teórica calculada y la diferencia de fase medida. El mapa de error de la figura de la izquierda ilustra las muestras de error producidas en la matriz.

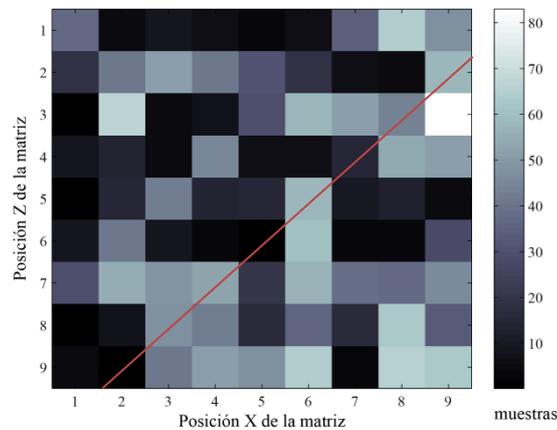


Figura 5 - Mapa de error en muestras de la reconstrucción del frente de onda

Cabe destacar varios puntos que se consideran causantes del error ilustrado en la Figura 5. El principal motivo e ilustrado en el mapa de error, es que la posición de la fuente virtual (1.5m) se encuentra ligeramente fuera del área de visibilidad del array (1.2m de longitud desde el origen de coordenadas). Tal y como se ha descrito anteriormente, se produce un efecto de enventanado en el que la zona superior de la matriz (dividida por una línea roja) es visible a la posición de la fuente sonora y la zona inferior de ésta no, provocando por consiguiente errores de reconstrucción y errores indeseados. Esta visibilidad de la fuente tiene un efecto perceptible en el mapa de error en el que el número de muestras de error es notablemente inferior en esa zona.

Por otro lado diversos factores se han identificado como causantes de deterioros en la reconstrucción del campo, el principal de ellos son las reflexiones originadas por diversos elementos dentro del estudio (tales como puertas metálicas, cristal entre estudio-sala de control, etc) con altos índices de reflexión. Otra importante aportación al error ha sido el posicionamiento de los micrófonos, existiendo un error de aproximadamente $\pm 5\text{cm}$.

4.2 Resultados subjetivos

Además del diseño, implementación y verificación objetiva del sistema, dado que es un sistema de sonido, resulta importante realizar pruebas subjetivas que tengan en cuenta los complejos procesos que realiza el sistema auditivo. Para llevar a cabo este objetivo se ha necesitado la colaboración de 10 voluntarios a los que se les ha proporcionado un cuestionario con una serie de ejercicios/preguntas cuyos resultados se muestran a continuación.

▪ Localización de fuentes

El principal objetivo de esta prueba ha sido evaluar la capacidad de los voluntarios para percibir fuentes virtuales situadas en distintas posiciones, concretamente se situaron cuatro orígenes distintos (A-D). Para indicar el resultado los voluntarios contaban con un esquema del estudio donde se situaba el array y, en una serie de divisiones medidas en grados, sobre él marcar el origen de la fuente sonora. Para cada posición de la fuente virtual el voluntario tenía que realizar la prueba en tres puntos de escucha distribuidos uniformemente en la sala. La señal estímulo utilizada ha sido tres impulsos de ruido rosa de duración 1s, donde el conjunto de los tres impulsos representaban una posición, es decir, se reproducía el mismo origen en tres ocasiones para dotar al voluntario de mayor seguridad en el resultado.

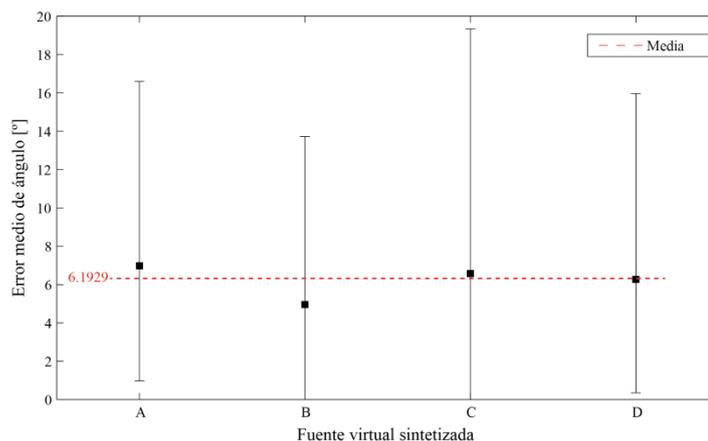


Figura 6 – Error medio en grados de las 4 fuentes virtuales

Para medir la calidad subjetiva de cada oyente se ha calculado el error medio (\bar{E}). Dicho parámetro indicará el error, medido en grados, producido por cada voluntario en los tres puntos de la sala y para las 4 distintas posiciones de fuentes virtuales. El resultado medio se muestra en la Figura 6 y es de aproximadamente 6°, valor razonable teniendo en cuenta que el error medio de localización del oído se considera de 5°.

Cabe destacar que, tras realizar un estudio por separado de los tres puntos de evaluación de la sala, los resultados entre dichos puntos difieren muy significativamente, apoyando una vez más los factores que incrementan el deterioro del campo acústico descritos anteriormente. En concreto se ha obtenido un error medio de 10.24° en la primera posición (muy cercana a una puerta metálica), 4.6° y 3.6° en la segunda y tercera posición respectivamente.

▪ Percepción del origen y profundidad

Se define la percepción subjetiva del origen como la capacidad que tiene el espectador para determinar el origen de la fuente sonora, siendo posible una percepción mala, en la que la dirección se percibe pero el origen es difuso e indeterminado en una determinada área, o bien pudiendo determinar el origen de la fuente virtual como un punto espacial concreto y perceptible. En el cuestionario proporcionado se ofrecían las puntuaciones de 1 a 5, siendo 1 la peor calificación correspondiente al primer caso explicado anteriormente y 5 el mejor resultado, coincidiendo con el segundo caso comentado. La calificación media otorgada al sistema es de 3.16, lo que indica que los oyentes han tenido dificultades para determinar el origen, al contrario de como resultó ser con la dirección.

Otro dato que se ha pretendido evaluar ha sido la percepción entre fuentes situadas a distinta profundidad, algo que en el 100% de los casos ha resultado perceptible aunque al

carecer de una referencia espacial ha sido difícil situar los orígenes de forma correcta en el esquema proporcionado.

▪ **Reproducción de una escena compleja**

Finalmente, y para demostrar una utilidad práctica del sistema, se ha sintetizado el campo sonoro de una sala de conciertos en la que distintos instrumentos se situaban en diferentes posiciones. Concretamente se han sintetizado las siguientes fuentes; coros, batería, guitarra y voz principal, situados en la escena sonora en el siguiente orden; izquierda, centro, derecha y movimiento variable de izquierda a derecha.

Los resultados son bastante satisfactorios, ya que para la guitarra el 66% y guitarra el 100% percibieron la correcta localización. En el caso de la voz, el 100% percibió movimiento de izquierda a derecha, un 50% con más resolución espacial que el resto, y en el caso de los coros, debido a su escaso volumen e intermitente aparición solamente el 40% los situó correctamente.

5. CONCLUSIONES

En esta contribución se ha descrito la implementación de un sistema real de síntesis de campo virtual con diversas simplificaciones en su elaboración. Dichas simplificaciones se han justificado teóricamente. El sistema resultante es de gran adaptabilidad a distintas situaciones y configuraciones, ya que es capaz de simular campos acústicos de distintos tipos de fuentes sonoras mediante un array de altavoces, en principio, con bastante margen para cambios en su configuración.

No obstante, las simplificaciones introducidas aportan deterioros que en la mayoría de los casos resultan preocupantes. Como se ha podido observar a través de pruebas objetivas y subjetivas, un factor crucial para la correcta síntesis del sistema es el aislamiento acústico necesario, es decir, la localización del sistema en salas reflectantes o con objetos de este tipo provocan un deterioro del campo acústico sintetizado. El principal motivo es que la teoría describe como la reconstrucción del campo sonoro se realiza a través de las aportaciones de infinitas fuentes secundarias localizadas en un recinto tridimensional cerrado. De esta forma no hay nada que interfiera en la reconstrucción ya que en cualquier punto del volumen solamente se recibirán aportaciones del campo provenientes de los 360°.

Otro de los factores a tener en cuenta en sistemas WFS son los límites espaciales marcados por un altavoz que determinan las zonas de campo directo y campo reverberante. Si no se dispone de una sala no reverberante, lo necesario para el correcto funcionamiento del sistema sería un sistema de altavoces que tuviese una amplia zona de campo directo, donde las reflexiones de la sala no tienen influencia.

Los sistemas WFS sufren también de problemas de aliasing, un extra añadido a la dificultad para la reconstrucción del campo acústico. Este problema no resulta ser extremadamente grave si se sitúan los altavoces lo suficientemente juntos como para sobrepasar la frecuencia a la que el oído humano le cuesta localizar fuentes sonoras.

En un diseño simplificado como el que se ha presentado se ha podido percibir perfectamente las limitaciones del sistema, siendo más o menos moderadas en sistemas de reducido/mediano tamaño. En zonas de visibilidad de la fuente, a una distancia moderada del array y sin influencia de objetos reflectantes, la percepción sonora es aceptable.

La magnificación del sistema para su instalación en recintos de grandes dimensiones supone la adición de ciertos fenómenos que intervienen en la reconstrucción del campo, como

pueden ser las variaciones de temperatura, humedad y presión en distintas zonas de la sala de escucha.

Los detalles descritos en los párrafos anteriores tienen las mismas consecuencias y, de cierta forma, están relacionados entre sí. Curiosamente, en la mayoría de sistemas WFS que se implementan hoy día ninguno, o muy pocos, de éstos factores se tienen en cuenta, lo que da lugar a un replanteamiento del camino en el que futuras vías de investigación del sistema podrían ser tomadas para la mejora de éste.

REFERENCIAS

[1] A. J. Berkhout. A Holographic Approach to Acoustic Control. *J. Audio Eng. Society*, Vol.36, 1988, páginas 977-995, 1988.

[2] D. de Vries. Sound Reinforcement by Wavefield Synthesis: Adaption of the Synthesis Operator to the Loudspeaker Directivity Characteristics. *Laboratory of Seismics and Acoustics*, Delft University of Technology, The Netherlands, 1996.

[3] Verheijen, E.N.G. Sound reproduction by wave field synthesis. *Ph.D. thesis, Delft University of Technology*, Delft, Pays Bas. The Netherlands, 1997.

[4] A. J. Berkhout, D. de Vries, and P. Vogel. Acoustic control by wave field synthesis. *Laboratory of Seismics and Acoustics, Delft University of Technology*, The Netherlands, 1993

[5] Mark S. Ureda. Analysis of Loudspeaker Line Arrays. *JBL Professional*, Northridge, CA USA