

Un proyecto de amplificación acústica de un coro para una actuación al aire libre

José Tomás Entrambasaguas, Coro Nostro Tempo, noviembre de 2016

En abril de 2016 recibí, como director del Coro Nostro Tempo, una petición de la organización Médicos sin Fronteras para cantar en el acto de clausura de unas jornadas que se harían en Málaga en octubre.

En principio me pareció bien, pero me quedé muy preocupado cuando me dijo que el concierto sería al aire libre, en el Teatro Romano de Málaga:



Abril-mayo. Estudios preliminares de acústica y primera visita al recinto

Rápidamente empecé a recopilar estudios sobre la acústica de los antiguos teatros griegos y romanos y me tranquilicé al conocer la famosa acústica de teatro de Epidauro y cómo los sonidos generados en su circular *orchestra* se podían escuchar perfectamente en todo el graderío gracias a la propagación y la difracción en los bordes de las gradas [1-2].

En mayo, aprovechando que se celebraba un acto en el Teatro Romano para el que se había realizado una instalación de megafonía, varios miembros del coro fuimos a estudiar el lugar y a tener una reunión con los responsables del teatro romano. Desgraciadamente llovió toda la mañana y no pudimos hacer pruebas de acústica.



En esa reunión, los responsables nos comunicaron las restricciones de uso del recinto (por razones de protección del patrimonio) que podían complicar la audición. Por una parte, el coro no podría actuar en la **orchestra** como en los teatros griegos porque esa zona no se puede pisar. Realmente, como nos explicaron los responsables, eso era lo adecuado ya que en los teatros romanos la **orchestra** (semicircular) se reservaba a las autoridades y el coro se ponía sobre el **pulpitum**, en el **proscenium** (escenario). Por otra parte, el público no podría ocupar las quince primeras gradas de la **cavea** y sólo podría sentarse en las cinco últimas que son las reconstruidas recientemente.

En la tomada el día de lluvia que no pudimos probar, puede verse la disposición del **proscenium** del Teatro Romano de Málaga y cuáles son las gradas que puede ocupar el público: las más altas, a más de 25 metros del escenario.

Una dificultad adicional es que el frente escénico (**frons scaenae**) posterior del **pulpitum**, que debería actuar como reflector trasero, está totalmente destruido.

Finalmente, la acústica de los teatros de la antigüedad era mejor por la ausencia de ruido ambiente, de manera que la relación señal a ruido percibida por los espectadores era suficiente. El Teatro Romano de Málaga está en una zona peatonal muy transitada en la que el ruido ambiente es muy grande.

Junio-agosto. Búsqueda de información

Lo descrito en el apartado anterior dejaba pocas esperanzas de que las características acústicas del Teatro Romano permitieran un concierto con audición satisfactoria. Por esa razón se realizó una búsqueda de información sobre experiencias y técnicas de actuación al aire libre de coros con y sin amplificación.

Se encontró información sobre técnicas de grabación con reglas para el número y posición relativa de los micrófonos entre sí y respecto a los cantores [3].

También se encontraron reglas para los micrófonos en actuaciones al aire libre [4] pero con escasa referencia a los coros.

No se encontró nada sobre amplificación del sonido de un coro para actuaciones en espacios abiertos (número de altavoces, distribución y mezcla de las señales de los micrófonos, etc.).

La mejor información sobre actuaciones al aire libre de coros se encontró en el blog Chris Rowbury [5] en el que, después de describir los problemas y dar una serie de valiosos consejos termina con un último consejo: *if you have the choice, just DON'T EVER PERFORM OUTDOORS!*

De la información analizada se extrajeron las siguientes conclusiones:

Monitores. No deben usarse monitores para que el coro escuche el sonido mezclado que se va a amplificar. El coro debe escucharse sólo a sí mismo pero los cantores deben escuchar a los demás. Para eso habrá que usar una colocación en semicírculo lo más apretada posible.

Tipo de micrófonos. No deben usarse micrófonos dinámicos sino de condensador. Si se usaran micrófonos dinámicos habría que ponerlos muy cerca de los cantores y, en consecuencia, habría que poner muchos. Yo tengo muy mala experiencia de ocasiones en que se ha hecho así poniendo un micrófono para cada 3 cantores: había que cantar con las caras casi pegadas y siempre se oían las voces individuales sin sonido coral.

Número de micrófonos. Usar un micrófono por cada 20 cantores, siguiendo la regla "menos es más", en nuestro caso, sólo dos para unos 35 cantores.

Colocación de los micrófonos. El mejor estudio sobre la posición de los micrófonos lo proporcionó el fabricante de micrófonos "Shure" que recomendaba la regla 3-1 en cuanto a posición horizontal y una altura tal que haya la misma distancia a todas las filas de cantoras (2,5 a 3 metros de altura) [6] (ver figuras al final de este documento)

Regla 3-1

Si se usan varios micrófonos deben estar separados 3 veces la distancia de los micrófonos a la primera fila de cantores.

La razón de esto es que si se recoge el sonido con dos micrófonos y se suman las señales, al tener diferente retardo, se producen desvanecimientos por suma destructiva a algunas frecuencias (en las que la diferencia de retardos es un número entero y medio de ciclos) [4]. Los desvanecimientos son totales si las dos señales tienen el mismo nivel y se reducen cuando una señal es más débil que la otra.

Dado que la potencia de la radiación sonora recibida se reduce con el cuadrado de la distancia, es fácil demostrar que si un cantor se sitúa enfrente de uno de los micrófonos (distancia d_1), la potencia recibida en el otro micrófono (distancia d_2) es 10 dB menor si tiene diagrama polar omnidireccional y 12 dB menor si el diagrama polar es cardioide.

$$\text{Omnidireccional: } 10 \log \frac{d_2^2}{d_1^2} = 10 \log \frac{d_1^2 + (3d_1)^2}{d_1^2} = 10 \log 10 = 10 \text{ dB}$$

La profundidad de los desvanecimientos es la que corresponde a la diferencia relativa de niveles recibidos:

$$20 \log \frac{1 - \sqrt{1/10}}{1} = -3,3 \text{ dB que es aceptable}$$

Con micrófonos cardioides el ángulo de llegada es 72° y el nivel del segundo micrófono se reduce 2 dB

Realmente la regla 3-1 que se usa frecuentemente, es discutible ya que pretende evitar los desvanecimientos debido a la suma de señales, pero las señales de ambos micrófonos no tienen por qué sumarse a menos que se realice un tratamiento estrictamente monofónico. De hecho, nuestro cerebro recibe señales por los dos oídos y no las “suma” sino que percibe la sensación espacial a partir de la recepción de las dos señales distintas.

No se encontró ninguna información que relacionara la regla 3-1 con la grabación y reproducción estereofónicas en la que las señales de los micrófonos no se mezclan, sino que se envía cada una a un altavoz diferente.

Se encontró información sobre técnicas clásicas de disposición de micrófonos y mezcla de señales para grabación estereofónica (A/B, X/T, M-S) [3].

Número y colocación de los altavoces. En cuanto al número y colocación de los altavoces no se encontró ninguna información.

26 de septiembre. Primera prueba acústica

El 26 de septiembre se realizaron pruebas acústicas con un pequeño coro. En una primera prueba sin ayuda de megafonía se observó que desde arriba de la grada, donde se pondrían los espectadores, se oía muy poco al coro. Se concluyó pues que era necesaria alguna ayuda de megafonía.

A continuación se realizaron pruebas usando con dos micrófonos de condensador con diagrama polar cardioide y dos altavoces autoamplificados de 150wattios. La prueba resultó satisfactoria en cuanto al volumen sonoro percibido por los espectadores pero no en cuanto a la calidad musical percibida.



No dio tiempo a probar diferentes combinaciones de mezcla de las señales de los micrófonos. Tampoco se pudieron probar diferentes separaciones de altavoces o micrófonos.

Un problema que se detectó fue la dificultad de escucha entre los cantores, indispensable para la buena afinación y equilibrio sonoro. Se dejó para el día del concierto, cuando estuviera todo el coro, la decisión sobre la colocación: número de filas, radio del círculo, separación entre cantores, etc.

Septiembre. Simulaciones

Se consideró necesario utilizar un programa de simulación para ensayar diferentes combinaciones de:

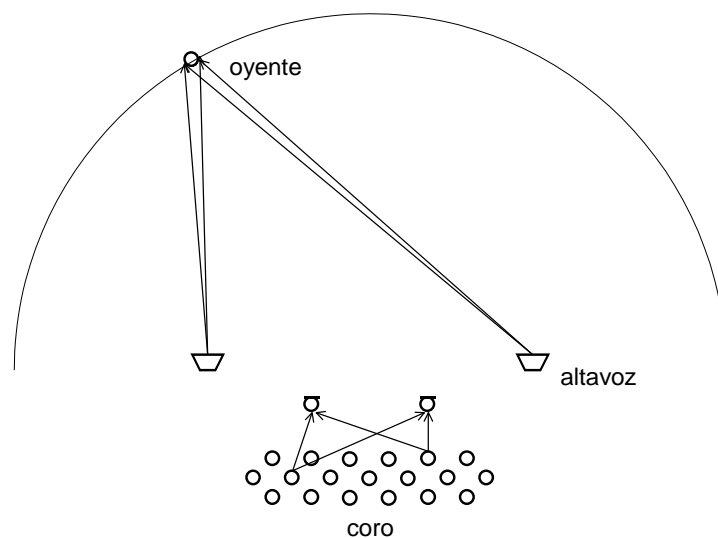
- Posición de los cantores
- Número, posición y orientación de los micrófonos
- Número y posición de los altavoces en relación con la posición del público

Aunque se disponía de consejos sobre colocación de los micrófonos, se consideró necesario utilizar un simulador para estudiar el número adecuado de altavoces, su colocación relativa al público y el tipo de mezcla estéreo a emplear ya que sobre todo eso no se encontró información.

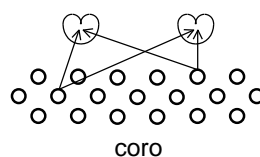
Aunque la simulación no corresponde exactamente a la realidad, permite probar cómodamente muchas combinaciones de posición de los elementos para averiguar cuál es el efecto de desplazarlos o de usar diferente número de ellos.

Se desarrolló un programa sobre MATLAB con las siguientes características:

- calcula las distancias de cada cantor a cada micrófono y de cada altavoz a cada oído oyente, y el efecto de esas distancias sobre los retardos y atenuaciones de las señales.
- calcula la señal mezcla en cada micrófono, suma de las procedentes de los cantores (con sus retardos y atenuaciones según la distancia), y la señal mezcla en cada oído de los oyentes, suma de las procedente de los altavoces (con sus retardos y atenuaciones según la distancia).



- calcula también la mezcla que se hace en la mesa de mezclas según las proporciones que de cada micrófono se envíen a cada altavoz.
- tiene en cuenta el diagrama polar de los micrófonos (omnidireccional o cardioide) y su orientación, aplicándolo a la atenuación de cada cantor dependiendo del ángulo de llegada de la voz.



- permite posicionar un número variable de cantores, micrófonos y altavoces y los dos oídos de un oyente
- Algunas limitaciones del simulador actual: es bidimensional (2D) por lo que no se puede simular el efecto de la altura de los micrófonos ni su orientación vertical; no considera el diagrama de radiación de los altavoces; no simula el efecto de acoplo de los altavoces a los micrófonos.

Con el programa MATLAB se realizaron numerosas pruebas y se llegaron a las siguientes conclusiones para oyentes situados a unos 25 metros del coro:

- Usar sólo **dos micrófonos y dos altavoces** (*menos es más*). La razón principal de esto es, probablemente, que se evita la suma destructiva de señales retardadas (desvanecimientos). Si se usa una separación total de los dos canales (cada micrófono con su altavoz) sólo hay suma de señales retardadas en cada oído del oyente. De cada cantor, un oído recibe dos señales con retardo diferente (cantor-microL + altavozL-oido y cantor-microR + altavozR-oido).
- Poner los altavoces en el borde del escenario un poco por delante de los micrófonos (1,5 metros y estos, a su vez un poco por delante del coro (0,5 m de los cantores extremos del semicírculo).
- **Separar totalmente las señales L y R.** La señal de cada micrófono debe dirigirse a cada altavoz sin ninguna mezcla (micrófono L a altavoz L, micrófono R a altavoz R). La mejora entre separar totalmente las señales L y R y usar una mezcla monofónica es muy apreciable. (mezcla monofónica: sumar por igual las señales de los dos micrófonos y enviarlas a los dos altavoces).
- A pesar de la distancia del oyente (25 metros), se obtiene **una buena sensación espacial en el centro** que se degrada al desplazarse el oyente hacia los laterales, pero continua siendo aceptable.

En los laterales aumenta la diferencia de distancias desde los altavoces y, en consecuencia, de retardos de las señales lo que aumenta el número de frecuencias en que se producen desvanecimientos. Por otra parte, la diferencia de potencias recibidas hace que esos desvanecimientos sean menos profundos.

- **Separar los altavoces** 12 metros. Realmente no se aprecia degradación acercándolos hasta 8 metros lo que teóricamente mejoraría la percepción de los usuarios laterales, pero en las pruebas no se aprecia esa mejora. Separarlos más empeora la sensación espacial en los laterales.
- **Separar los micrófonos** 3 metros para una distancia extremo a extremo del coro de 8 metros. Esta distancia debe reajustarse según la colocación del coro para que se oiga por igual a todas la voces.
- **No usar más altavoces.** Usar otros dos altavoces en los laterales, más cercanos al público, es bastante peor (*menos es más*), probablemente por el aumento de desvanecimientos.

24 de octubre. Segunda prueba acústica

Con las conclusiones extraídas de las simulaciones se realizaron nuevas pruebas acústicas en el Teatro Romano, también con un pequeño coro, pero esta vez con un mejor conocimiento de cómo funciona el sistema y cuál es el efecto de la posición de los elementos.

La lluvia sólo permitió la realización de unas pocas pruebas, pero éstas permitieron comprobar que las predicciones de las simulaciones eran acertadas.

Las pruebas se realizaron con las posiciones indicadas anteriormente (micrófonos separados 3 metros, altavoces separados 12 metros).

Se probó la audición en la parte alta de la grada para canciones de pequeño y gran volumen sonoro y se ajustó la amplificación para un nivel de percepción natural similar a que se tendría a unos pocos metros del coro.



Se comprobó la gran diferencia de calidad subjetiva percibida entre usar separación total de los dos canales y mezcla total monofónica.

Una prueba que no se había podido hacer con el simulador disponible era la del efecto del acoplo entre altavoces y micrófonos.

Se comprobó que el nivel de amplificación para el que se recibía en la parte alta de la grada con un nivel satisfactorio estaba próximo al nivel de acoplo. Sin embargo, dado que la prueba se realizó con un pequeño coro de 10 cantores, se consideró que el acoplo no sería problema el día del concierto ya que, al ser el coro de unos 35 cantores, se podía reducir la amplificación al menos unos 3 o 4 dB.

Se comprobó que pequeños desplazamientos laterales de los micrófonos pueden afectar al acoplo desde los altavoces.

30 de octubre. Pruebas previas al concierto

El mismo día del concierto se hicieron pruebas con el coro completo.

Se ajustaron los niveles de amplificación y se comprobó que el sonido en lo alto de la grada era satisfactorio, mejor en el centro que en los extremos, como las simulaciones habían previsto.

Se utilizó el filtro paso alto interno de los micrófonos ("low cut") y, dado que en el momento de las pruebas no se apreció sonido de viento no se colocaron goma-espumas en los micrófonos. Esto fue un gran error porque, más tarde, a lo largo del concierto fue aumentando la velocidad del viento y, finalmente, empezó a percibirse el ruido que provocaba.

El mayor problema a resolver fue el de la posición de los cantores que tenían dificultad en escucharse entre ellos. Aunque en principio se tenía prevista una disposición en dos filas para reducir las diferencias de nivel recibido en los micrófonos desde cada fila, se decidió una colocación más cerrada en tres filas para mejorar la escucha mutua entre los cantores.

La diferencia entre filas se compensó aumentando la altura de los micrófonos de manera que la diferente atenuación debida a la distancia se compensara con la debida al ángulo de llegada al usar un diagrama polar vertical cardioide.



La agrupación cerrada permitió mejorar la escucha mutua y en consecuencia la afinación y el equilibrio, pero no fue del todo satisfactoria. Tal vez el uso de unos pequeños monitores habría mejorado ese aspecto. Se podrían haber situado a espaldas de los micrófonos, para evitar el acoplo con ellos, y orientados al coro.

El resultado final puede percibirse en [el siguiente video](#) tomado con zoom óptico desde arriba de la grada. A pesar de la gran distancia de los espectadores, la sensación auditiva es similar a la que se tendría a poca distancia del coro.





Referencias

- [1] Nico F. Declercq, Cindy S. A. Dekeyser, *Acoustic diffraction effects at the Hellenistic amphitheater of Epidauros: Seat rows responsible for the marvelous acoustics*, Journal Acoustical Society of America, Vol. 121, no. 4, pp. 2011–2022, April 2007.
- [2] John Mourjopoulos, *The origins of building acoustics for theater and music performances*, J. Acoust. Soc. Am., vol. 137, no.4, pp. 2427 April 2015. - [enlace](#)
- [3] Shure Incorporated, *Microphone techniques for recording*, 2016. - [enlace](#)
- [4] Shure Incorporated, *Microphone techniques for live sound reinforcement*, 2014. - [enlace](#)
- [5] Chris Rowbury, *Performing outdoors – tips and tricks*, From the front of the choir - blog - [enlace](#)
- [6] Shure, Davida Rochman, *How to Mic a Choir*, 2009 - [enlace](#)

Otras fuentes consultadas

- Vic Hooper, *How to Amplify the Sound of Your Choir - Choir Sound Reinforcement*,
- Pat Brown, *Miking a Choir Without Feedback* - [enlace](#)
- Shure - James Wasem, *Of Mics and Monitors: Live Sound Reinforcement Tips for Choirs* - [enlace](#)
- Nathan Lively, *6 Smart, Proven Methods To Control Feedback Onstage (Without EQ)* - [enlace](#)
- Presonus - *How to Configure Your PA System* - [enlace](#)