

## Análisis de la respuesta subjetiva en auralizaciones de salas con diferentes valores de calidad acústica ( $S_{ab}$ )

REFERENCIA PACS: 43.55.-Gx, 43.55.Hy,

Segura, Jaume<sup>3</sup>; Cerdá, Salvador<sup>2</sup>; Rosa M<sup>a</sup> Cibrian<sup>4</sup>; Giménez, Alicia<sup>1</sup>; Romero, José<sup>1</sup>;

1 Dpt Física Aplicada, ETSII, Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n, [agimenez@fis.upv.es](mailto:agimenez@fis.upv.es)

2 Dpt Matemàtica Aplicada, Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n, [salcerjo@mat.upv.es](mailto:salcerjo@mat.upv.es)

3 IRTIC, Universitat de València, Poligon de la Coma s/n, [jsegura@uv.es](mailto:jsegura@uv.es)

4 Dpt Fisiologia, Universitat de València, Avda Blasco Ibañez, 13, [rosa.m.cibrian@uv.es](mailto:rosa.m.cibrian@uv.es)

### ABSTRACT

The categorization of different areas in a room based on their acoustic quality values ( $S_{ab}$ ) is made by reducing the multiple parameters considered in the room acoustical measurements to 3 factors, which explain a high percentage of the variance. This reduction is summarized in the factors: LEV (listener envelopment), RTmid (mid frequency reverberation time) and LFCE4 (lateral energy fraction in 4 energy bands).

In this work, we evaluated the subjective assessment of the model that defines the quality parameter acoustic  $S_{ab}$  from a number of auralizations in different rooms. This approach is intended to validate the subjective evaluation model of the acoustic quality.

### RESUMEN

La categorización de diferentes zonas de una sala en base a sus valores de calidad acústica ( $S_{ab}$ ) se realiza a partir de la reducción de los múltiples parámetros considerados en la medida de acústicas de salas en 3 factores que explican un alto porcentaje de la varianza. Esta reducción se resume en los factores: el LEV (*listener envelopment*), RTmid (mid frequency reverberation time) y LFCE4 (energy lateral energy fraction in 4 bands).

En este trabajo, se ha evaluado la apreciación subjetiva del modelo que define el parámetro de calidad acústica  $S_{ab}$  a partir de un cierto número de auralizaciones en diferentes salas. De esta manera se pretende validar el modelo de evaluación subjetiva de la calidad acústica.

### 1. INTRODUCCIÓN

La obtención de criterios basados en medidas objetivas para la evaluación de la calidad acústica de salas de conciertos es uno de los objetivos de la acústica de salas. A lo largo de la historia de la acústica diferentes autores han ido realizando aportaciones a la determinación de diferentes parámetros que caracterizan objetivamente la acústica de las salas. Por otra parte, no podemos decir que exista ningún parámetro que caracterice estrictamente la calidad acústica subjetiva percibida. Diversos autores han tratado de establecer modelos que combinen los parámetros objetivos estudiados para la obtención de una escala subjetiva de valoración, ya que para los diseñadores resultaría muy interesante tener un modelo que relacionase los parámetros objetivos medidos con la respuesta del público.

Uno de los trabajos más importantes realizados en este sentido es el de Ando [1][2], sobre los parámetros acústicos preferibles en diferentes estilos musicales y su teoría sobre la preferencia subjetiva. En ella usa como parámetros estadísticos independientes (variaciones en cualquiera

de los parámetros que no afecten a los otros): IACC, EDT, G e ITDG (tiempo entre el sonido directo y la primera reflexión).

Leo Beranek añadió dos parámetros independientes más a esta teoría: BR (Bass Ratio) y SDI (índice de difusión superficial). El conjunto de todos estos parámetros modifican parcialmente la teoría de Ando generando un método objetivo de calificación de salas [3]. También realizó sus propios calculos usando las funciones de Ando como pesos.

Otros intentos similares para la evaluación de salas fueron realizados por Barron [4], Higini Arau [5] y por parte de los autores [6]. Todos estos trabajos presentan un mecanismo que permiten la evaluación de parámetros de salas y proporcionan un coeficiente de calidad global.

En trabajos anteriores [7][8], los autores redujeron un conjunto mínimo de parámetros acústicos ortogonales con tres factores a partir de un análisis factorial. El primero de ellos fue interpretado como RT, el segundo factor está correlacionado espacialmente con LFC y el tercer factor está correlacionado con la envolvente del oyente (LEV de acuerdo con [9]). En [11] se presentó un modelo como combinación de RT, LFC y LEV correlacionadas con las funciones de Ando. Esto nos permitió introducir una función de Ando-Beranek ajustada a los datos experimentales objetivos que estaban de acuerdo con las evaluaciones de las salas incluidas en los estudios de salas [10]. También establecimos unos intervalos óptimos para los datos medidos en el plano LFC-LEV para el RT de cada sala estudiada. A partir del modelo del establecido se pudo establecer también un procedimiento para la obtención de auralizaciones a partir de los parámetros básicos RT, LFC y LEV.

En este trabajo, se ha realizado una evaluación subjetiva mediante 'listening tests online' para analizar la posible diferenciación apreciada por diferentes observadores en diferentes posiciones y tres salas.

## 2. METODOLOGÍA

La determinación de las auralizaciones para su presentación en una encuesta de evaluación ha sido posible gracias a una variación del modelo de Ando-Beranek que simplifica este modelo utilizando tres parámetros que determinan la calidad acústica en cada punto de la sala a partir de ellos.

### 2.1 Modelo de Ando-Beranek

Aquí introducimos una variante del modelo de Ando-Beranek. Este modelo consiste en una combinación lineal de funciones de Ando  $S_i$  [1] con pesos adicionales. En el trabajo de Beranek [3], se dice que a partir de los estudios de Ando se puede deducir una función peso relativa para cada función de Ando  $S_i$ . En [11], se introdujeron las constantes de los pesos como grados de libertad adicionales que permitían una combinación lineal  $S_{AB}$  de factores ortogonales, obtenidos en trabajos anteriores [7][8], que correlacionan con una combinación lineal ponderada  $S_\alpha$  de funciones  $S_i$ . A  $S_{AB}$  lo llamamos modelo o función de Ando-Beranek.

El problema general a resolver es cómo encontrar los coeficientes en:

$$S_\alpha = \sum_{i=1}^5 \alpha \cdot S_i \quad (1)$$

con

$$\sum_{i=1}^5 \alpha = 1$$

de manera que se maximice el coeficiente de correlación

$$r = \text{corr}(C + xRT_{mid} + yLFC_{E4} + zLEV, S_\alpha) \quad (2)$$

Como las funciones de Ando se relacionan con la respuesta subjetiva para grandes salas y música clásica, esperamos que la combinación lineal obtenida proporcione una información equivalente.

En [11] se determinó que la combinación lineal con la mejor correlación fue:

$$S_{\alpha} = -1.49 + 0.36 \cdot RT_{mid} + 2.76 \cdot LFC_{E4} - 0.19 \cdot LEV \quad (3)$$

Respecto a nuestra evaluación subjetiva [10], el criterio de calidad de sala con el parámetro  $S_{AB}$  es:

$$0 < S_{\alpha} < \frac{1}{3} \quad (4)$$

En este trabajo se ha utilizado este intervalo que permite corregir las diferencias existentes entre las salas reales y las salas modelizadas.

## 2.2 Auralización de las salas

Este estudio incluye el modelado y simulación de 3 salas de Valencia que pueden ser usadas para usos diversos. Para realizar el ajuste se utilizaron medidas realizadas con el software WinMLS, calculando los parámetros acústicos a partir de las respuestas impulsivas de acuerdo con la norma ISO 3382 [12]. Esta respuesta se obtuvo mediante tests de sweeps logarítmicos sinusoidales en el interior de las diferentes salas.

Las salas estudiadas en este trabajo fueron:

- La Lonja de los Mercaderes
- El Paraninfo de la Universitat Politècnica de València
- El Teatro Principal de València

Más detalles sobre las salas auralizadas y el procedimiento seguido se puede encontrar en [13].

A partir de la determinación de los diferentes parámetros ( $RT_{min}$ ,  $LFC_{E4}$ ,  $LEV$ ) en cada una de las salas consideradas hemos determinado las posiciones donde se encuentran las funciones de Ando-Beranek  $S_{ABmáx}$ ,  $S_{ABmín}$ ,  $S_{ABpromedio}$ , y dos posiciones intermedias más. En todas y cada una de ellas se ha determinado la auralización correspondiente para cada una de estas cinco posiciones con una señal anecoica sintética en la que suena el Golliwog's Cakewalk de Claude Debussy (1862-1918).

## 2.3 Evaluación subjetiva

Con las auralizaciones de las diferentes funciones de Ando-Beranek hemos preparado una encuesta para ser respondida online donde se evaluaba la valoración de la calidad acústica en cada una de las posiciones.

En la figura 1 se puede ver una imagen del formulario online que se utilizó en este estudio.

*Con esta encuesta se pretende evaluar la apreciación subjetiva de la percepción de la calidad acústica en diferentes posiciones y diferentes salas con el objetivo de determinar el grado de discriminación de esta calidad (definida en función del envolvimiento LEV, RTmid y la fracción de energía lateral LFC) para determinar el JND de este parámetro.*

*Escucha cuidadosamente cada auralización en cada una de las salas y califica de 1 a 5 (donde 1 es de muy baja calidad y 5 es alta calidad) en qué grado percibes la calidad acústica en cada posición (cada auralización corresponde a una posición de la sala). (Por favor, utilizad auriculares para realizar la audición). Cuando acabes de responder la encuesta pulsa el botón 'Enviar' que está al final de la página. Esta encuesta está optimizada para el navegador Google Chrome*

Nos visitas desde IP: 84.127.43.138  
August 24, 2013 12:58:00 PM

<b>SALA 1</b>	Para escuchar el audio haz click en play (fecha)		
Posicion 1	Valora entre 1 y 5 (donde 1 es muy baja y 5 muy alta) la calidad acústica que percibes en esta auralización:		NS/NC
	Para escuchar el audio haz click en play (fecha)		
Posicion 2	Valora entre 1 y 5 (donde 1 es muy baja y 5 muy alta) la calidad acústica que percibes en esta auralización:		NS/NC
	Para escuchar el audio haz click en play (fecha)		
Posicion 3	Valora entre 1 y 5 (donde 1 es muy baja y 5 muy alta) la calidad acústica que percibes en esta auralización:		Muy baja
	Para escuchar el audio haz click en play (fecha)		
Posicion 4	Valora entre 1 y 5 (donde 1 es muy baja y 5 muy alta) la calidad acústica que percibes en esta auralización:		NS/NC
	Para escuchar el audio haz click en play (fecha)		
Posicion 5	Valora entre 1 y 5 (donde 1 es muy baja y 5 muy alta) la calidad acústica que percibes en esta auralización:		NS/NC
	Para escuchar el audio haz click en play (fecha)		
<b>SALA 2</b>	Para escuchar el audio haz click en play (fecha)		
Posicion 1	Valora entre 1 y 5 (donde 1 es muy baja y 5 muy alta) la calidad acústica que percibes en esta auralización:		NS/NC
	Para escuchar el audio haz click en play (fecha)		
Posicion 2	Valora entre 1 y 5 (donde 1 es muy baja y 5 muy alta) la calidad acústica que percibes en esta auralización:		NS/NC
	Para escuchar el audio haz click en play (fecha)		
Posicion 3	Valora entre 1 y 5 (donde 1 es muy baja y 5 muy alta) la calidad acústica que percibes en esta auralización:		NS/NC
	Para escuchar el audio haz click en play (fecha)		
Posicion 4	Valora entre 1 y 5 (donde 1 es muy baja y 5 muy alta) la calidad acústica que percibes en esta auralización:		NS/NC
	Para escuchar el audio haz click en play (fecha)		
Posicion 5	Valora entre 1 y 5 (donde 1 es muy baja y 5 muy alta) la calidad acústica que percibes en esta auralización:		NS/NC
	Para escuchar el audio haz click en play (fecha)		
<b>SALA 3</b>	Para escuchar el audio haz click en play (fecha)		
Posicion 1	Valora entre 1 y 5 (donde 1 es muy baja y 5 muy alta) la calidad acústica que percibes en esta auralización:		NS/NC
	Para escuchar el audio haz click en play (fecha)		
Posicion 2	Valora entre 1 y 5 (donde 1 es muy baja y 5 muy alta) la calidad acústica que percibes en esta auralización:		NS/NC
	Para escuchar el audio haz click en play (fecha)		
Posicion 3	Valora entre 1 y 5 (donde 1 es muy baja y 5 muy alta) la calidad acústica que percibes en esta auralización:		NS/NC
	Para escuchar el audio haz click en play (fecha)		
Posicion 4	Valora entre 1 y 5 (donde 1 es muy baja y 5 muy alta) la calidad acústica que percibes en esta auralización:		NS/NC
	Para escuchar el audio haz click en play (fecha)		
Posicion 5	Valora entre 1 y 5 (donde 1 es muy baja y 5 muy alta) la calidad acústica que percibes en esta auralización:		NS/NC
	Para escuchar el audio haz click en play (fecha)		
	¿Tienes formación musical?		NS/NC
	¿Qué sala de las tres consideras que tiene mejor calidad?		NS/NC
	¿Eres hombre/mujer?		Hombre
	¿Cuántos años tienes?		menos de 20 años

**Figura 1:** Encuesta de evaluación subjetiva en tres salas ( $S_{ABmin}$ ,  $S_{ABmax}$ ,  $S_{ABmean}$ ,  $S_{AB,1}$  y  $S_{AB,2}$ )

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La encuesta ha sido realizada por 29 personas (expertos acústicos y músicos). De ellos, 21 tenían formación musical, mientras que 8 no la tenían. Por otra parte, el 72.4% fueron hombres, mientras que el 27.6% fueron mujeres y la distribución por edades fue:

	Porcentaje
Menor de 20 años	10.3 %
Entre 20 y 30 años	55.2 %
Entre 30 y 50 años	31.0 %
Entre 50 y 60 años	3.4 %
Mayor de 60 años	0.0 %

Las valoraciones globales sobre las salas, a partir de la cuestión sobre la evaluación de la mejor calidad, han sido: un 86.2% considera que la sala 2 tiene mejor calidad acústica en sus auralizaciones, mientras que el 3.4% considera que es la sala 1 o la sala 3 respectivamente. Esto significa que el Paraninfo es percibido como sala con mejor calidad acústica para música clásica.

Por otra parte, la evaluación de las 5 auralizaciones de cada una de las 3 salas ha permitido recoger los estadísticos de evaluación subjetiva de la calidad en las posiciones que determinan los parámetros  $S_{AB,P1}$ ,  $S_{AB,P2}$ ,  $S_{ABmáx}$ ,  $S_{ABpromedio}$  y  $S_{ABmín}$  (respectivamente).

	Media	Desv. Tip	IC(95%)	Moda - %
S1P1	2,86	1.22	[2.41, 3.31]	Regular (3) – 37.9%
S1P2	2,07	0.88	[1.76, 2.38]	Baja (2) – 34.5%
S1Smáx	2,21	0.82	[1.93, 2.52]	Baja (2) – 58.6%
S1Sprom	3,28	0.92	[2.93, 3.62]	Regular (3) – 51.7%
S2Smín	2,93	0.96	[2.55, 3.28]	Regular (3) – 41.4%
S2P1	3,79	1.11	[3.38, 4.14]	Alta (4) – 41.4%
S2P2	3,34	0.94	[3.00, 3.66]	Alta (4) – 41.4%
S2Smáx	3,14	0.95	[2.79, 3.41]	Regular (3) – 48.3%
S2Sprom	3,21	0.90	[2.86, 3.52]	Regular (3) – 55.2%
S2Smín	3,66	1.40	[3.17, 4.10]	Muy alta (5) – 34.5%
S3P1	1,79	0.82	[1.52, 2.07]	Baja (2) – 41.4%
S3P2	1,97	0.94	[1.66, 2.31]	Baja (2) – 44.8%
S3Smáx	1,66	0.72	[1.41, 1.93]	Muy baja(1) – 48.3%
S3Sprom	2,41	1.05	[2.00, 2.76]	Regular (3) – 37.9%
S3Smín	2,59	1.32	[2.10, 3.07]	Regular (3) – 41.4%

**Tabla 1:** Estadísticas de molestia en la sala emisora y receptora

En la tabla anterior se observa una mejor valoración de la sala 2 (Paraninfo) en todas las posiciones calculadas. Además, podemos decir que en esta sala las posiciones con  $S_{AB}$  mayor que su valor promedio son peor valoradas. Este hecho también se observa en la sala 1 (Lonja) y en la sala 3 (Teatro Principal), aunque en este último caso existe una mayor varianza de valoración en las posiciones con valores de  $S_{AB}$  por debajo de la media.

Por otra parte, cabe destacar que algunos participantes en la encuesta hicieron comentarios sobre la complejidad de la valoración en las salas con mayor RT (salas 1 y 3), ya que los cambios en  $S_{AB}$  eran menos perceptibles.

## 5. CONCLUSIÓN

En este artículo presentamos una encuesta que permite evaluar subjetivamente las auralizaciones obtenidas a partir de funciones de Ando-Beraneck a partir del modelo establecido en [7][8][11]. A partir de estas funciones hemos determinado 5 auralizaciones a partir de las simulaciones en cada una de las salas consideradas, teniendo en cuenta los valores de las funciones  $S_{AB,1}$ ,  $S_{AB,2}$ ,  $S_{ABmáx}$ ,  $S_{ABpromedio}$  y  $S_{ABmín}$ .

La encuesta ha permitido determinar la respuesta subjetiva a partir de 'listening test' de las auralizaciones realizadas. A partir de los resultados obtenidos podemos concluir que la sala mejor valorada es el Paraninfo de la Universitat Politècnica de València. Además, las respuestas correspondientes a posiciones con  $S_{AB}$  mayor que su valor promedio son peor valoradas. Cabe resaltar que un comentario que realizaron varios encuestados fue que les fue complicado distinguir entre las auralizaciones en las salas 1 y 3. Estos comentarios nos hacen pensar que las funciones  $S_{AB}$  deberían tener una variación mayor para poder percibirse, lo cual nos hace pensar en la necesidad de establecer un valor de JND para estas funciones. Por otra parte, también cabría la posibilidad que la obra seleccionada (con pasajes musicales muy articulados y sin completar la instrumentación) pudiese ocasionar esta confusión en salas con un tiempo de reverberación medio-alto.

Para trabajos futuros, se plantea determinar valores de JNDs para las funciones de Ando-Beraneck, ajustándonos a los valores óptimos de estas funciones determinados en [11].

## 6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto de investigación BIA2012-36896.

## 7. REFERENCIAS

- [1] Y. Ando. "Calculation of subjective preference at each seat in a concert hall". J. Acoust. Soc. Am. 74.pp 873-887. (1983)
- [2] Y. Ando, Concert Hall Acoustics (Springer, Berlin, 1985).
- [3] L. Beraneck, Concert halls and opera houses: How they sound? (Acoust. Soc. Am., Woodbury, NY, 1996).
- [4] M. Barron, Auditorium Acoustics and Architectural Design (EFN Spon, Londres, 1993).
- [5] H. Arau, ABC de la Acústica Arquitectónica, (CEAC. Barcelona. 1999).
- [6] A. Giménez, A. Marín, A. Sanchis and J. Romero, "Subjective Parameters of Musical Rooms", presented at Auditorium conference. Auditorium design at the millenium. Institute of Acoustics of U.K, Belfast. (1997).
- [7] S. Cerdá, A. Giménez, J. Romero, R.M. Cibrian and J.L. Miralles, "Room Acoustical Parameters a Factor Analysis Approach". Applied Acoustics. Volume 70, Issue 1, January, pp. 97-109 (2009).
- [8] S. Cerdá, A. Giménez, J. Romero and R.M. Cibrián, "A Factor Analysis Approach To Determining A Small Number Of Parameters For Characterising Halls", Acta Acustica united with Acustica. Volume 97, Number 3, May/June, pp. 441-452 (2011).
- [9] L.L. Beraneck, "Concert Hall Acoustics - 2008". J. Audio Eng. Soc., Volume 56 Issue 7/8 pp. 532-544; (2008).
- [10] A. Gimenez, R.M. Cibrian, S. Giron, T. Zamarreño, J.J. Sendra, A. Vela and F. Daumal. "Questionnaire Survey to Qualify the Acoustics of Spanish Concert Halls," Acta Acustica united with Acustica, Volume 97. Number 6. pp. 949-965 (2011).
- [11] S. Cerdá, A. Giménez, R. Cibrián. "An Objective Scheme for Ranking Halls and Obtaining Criteria for Improvements and Design". JAES. 60-6. pp. 419-430. (2012).
- [12] ISO 3382:1997(E), Second edition 1997-06-15, Acoustics - Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters.
- [13] S. Cerdá, A. Giménez, R. Montell, A. Barba, R. Lacatis, J. Segura y R. M. Cibrián.; "On the Relations Between Audio Features and Room Acoustic Parameters of Auralizations". J. Vib. Acoust. 135(6), 064501 (Jun 19, 2013) doi:10.1115/1.4023835