



Análisis de los parámetros de escena de la Sala Principal del Palau de les Arts Reina Sofía en Valencia

Ana Planells¹; Sara Girón²; Teófilo Zamarreño²; Salvador Cerdá¹; Jaume Segura¹; Arturo Barba¹; Rosa M. Cibrián¹; Alicia Giménez¹.

¹Grupo de Investigación en Acústica Virtual, Universitat Politècnica de València-Universitat de València. Edificio 5D, Camino de Vera s/n 46022 Valencia, España. E-mail: acusvirt@upv.es

²Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción (IUACC), Universidad de Sevilla. Av. Reina Mercedes 2, 41012 Sevilla, España. E-mails: sgiron@us.es; teofilo@us.es

Resumen

Los parámetros objetivos monofónicos, soporte de escena, en sus dos versiones temporales, soporte precoz (ST_{precoz}), relacionado con la facilidad de escuchar a los demás miembros de la orquesta, y soporte tardío ($ST_{\text{tardío}}$), en relación con la respuesta de la sala percibida por el músico, son los descriptores más universalmente aceptados por la comunidad científica para caracterizar las condiciones acústicas en las plataformas de orquesta de las salas de conciertos. En este trabajo, se analiza la distribución espacial y espectral de los parámetros medidos en una cuadrícula de puntos fuente-receptor en el escenario y foso de la orquesta en la Sala Principal del Palau de les Arts Reina Sofía de Valencia.

Palabras-clave: Escenario, foso de orquesta, parámetros de escena

Abstract

The monophonic objective parameters of stage support, in its two temporal version, early support (ST_{early}), related to the ease of hearing the other members of an orchestra, and late support (ST_{late}), related to the response of the hall as perceived by the musician, are the most widespread descriptors accepted by the scientific community to characterise the acoustic conditions of the orchestra platforms in concert halls. In this paper, the spatial and spectral distribution of these parameters are analysed on a grid of source-receiver points measured on the stage and in the orchestra pit of the main hall of the “Palau de Les Arts Reina Sofia” of Valencia.

Keywords: Stage, orchestra pit, support parameters

PACS no. 43.55.Gx

1 Introducción

Los factores acústicos más importantes para los intérpretes son la audición de su propio instrumento, la de los otros instrumentos de la orquesta y la percepción de la respuesta acústica de la sala. El equilibrio entre estos factores es importante para la reproducción de *conjunto*. Marshall [1] y Barron [2] iniciaron este estudio pero los parámetros objetivos más reconocidos para valorar la acústica del escenario son los de soporte de escena, ST, en sus dos versiones: soporte precoz (ST_{precoz}), para la percepción subjetiva de *conjunto* y *apoyo* entre los músicos de la orquesta; y el soporte tardío ($ST_{\text{tardío}}$) para la percepción de la *reverberación* por parte del músico en la escena. Aunque se han propuesto aproximaciones objetivas alternativas o complementarias [3] y se ha criticado la validez de los



parámetros ST [4], estos descriptores, introducidos en 1989 por Gade [5,6], han sido recogidos, con carácter informativo, en el Anexo C de la norma UNE-EN-ISO 3382-1:2010 [7]. Ambos parámetros se derivan de las respuestas al impulso, omnidireccionales monofónicas, obtenidas a 1 m de la fuente, sin los intérpretes en el escenario, y se definen matemáticamente como:

$$ST = 10 \log \left[\frac{\int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt}{\int_0^{0.01} p^2(t) dt} \right]_{r=1m} \quad (dB) \quad (1)$$

donde $t = 0$ coincide con la llegada del sonido directo. ST_{precoz} integra el sonido reflejado inicial, con límites $t_1=20$ ms y $t_2=100$ ms, en relación con la energía emitida desde la fuente (sonido directo y reflexión en el suelo) a 1 m. No se ha establecido un umbral de discriminación subjetiva para ST_{precoz} pero se ha sugerido [8] que una variación de 2 dB puede ser significativa para un músico. Para $ST_{tardío}$ los límites para el sonido reflejado son $t_1=100$ ms, y $t_2=1000$ ms. En todos los casos las medidas se realizan en bandas de octava y se trabaja con el promedio aritmético de las comprendidas entre 250 Hz y 2000 Hz. En [7] se han recogido las principales sugerencias de Gade [9] para su medida, a excepción de medir más allá de 4 m de cualquier superficie reflectante, que se ha reducido a 2 m.

Recientemente este mismo autor [10] ha publicado una revisión sobre la acústica de la escena tras tres décadas de investigación experimental, destacando las aportaciones de Dammerud *et al.* [3,11] con trabajos puramente objetivos (modelos a escala y computacionales de gran interés) y modelos subjetivos. También conviene señalar el estudio realizado por Wenmaekers *et al.* [12] sobre cuáles son los intervalos temporales más apropiados y cuáles las condiciones de medición más adecuadas, haciendo una propuesta de optimización de los parámetros de soporte de escena existentes.

En este trabajo se analiza el comportamiento de los dos parámetros objetivos de escena propuestos por Gade medidos en el foso orquestal y escenario en la Sala de Ópera del Palau de les Arts Reina Sofía de Valencia y se comparan los resultados con los modelos de campo difuso y de Barron.

2 Material y método

2.1 Descripción de la sala

La Sala Principal, del Palau de les Arts Reina Sofía que se inauguró en 2005, constituye el corazón del grandioso edificio de 70 metros de altura y 55000 m² diseñado por el arquitecto valenciano Santiago Calatrava. El Palau está dedicado a promocionar las artes escénicas y consta de 4 salas independientes. La Sala Principal es el teatro de la ópera de Valencia y sede de la Orquesta de la Comunidad Valenciana. Sus características geométricas principales se recogen en la Tabla 1 junto con los tiempos de reverberación (T) espectrales de la sala.

Tabla 1 – Datos geométricos más relevantes de la sala. V : Volumen; S : Superficie; W : Ancho; H : Alto; D : Profundidad. Valores espectrales del T de la sala.

	V (m ³)	S (m ²)	W (m)	H (m)	D (m)	H/W	D/W
Escenario	18983,08	560,80	24,65	33,85	22,30	1,37	0,90
Foso	2288	130	19,2	17,6	7	0,92	0,36
Frec. (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	
T (s)	2,70	2,77	2,50	2,43	2,42	2,27	

La sala consta de una amplia platea y cuatro niveles de palcos distribuidos en herradura. Dispone de la más avanzada tecnología escénica, que posibilita la realización de todo tipo de actos sobre su inmenso escenario, además todas las butacas están dotadas de pantalla de texto preparada para la traducción

simultánea. Tiene una capacidad para 1481 plazas distribuidas entre la platea (530) y los cuatro niveles de palcos. Su tipología es de Teatro a la italiana (con modificaciones) (Figura 1). Su revestimiento interior es liso y su principal característica son las superficies laterales de trencadís, siendo los palcos y los laterales de la caja de escena de hormigón blanco y el pavimento de madera.



Figura 1 – Vista general, escenario y foso orquestal de la Sala principal del Palau de les Arts de Valencia.

2.2 Metodología empleada

Las medidas se han realizado en el foso orquestal y en el escenario, 7 ubicaciones de la fuente en el foso y 16 en el escenario con un total de 28 posiciones de medida para los parámetros de soporte de escena en el foso orquestal y 64 posiciones en el escenario según se indica en la Figura 2.

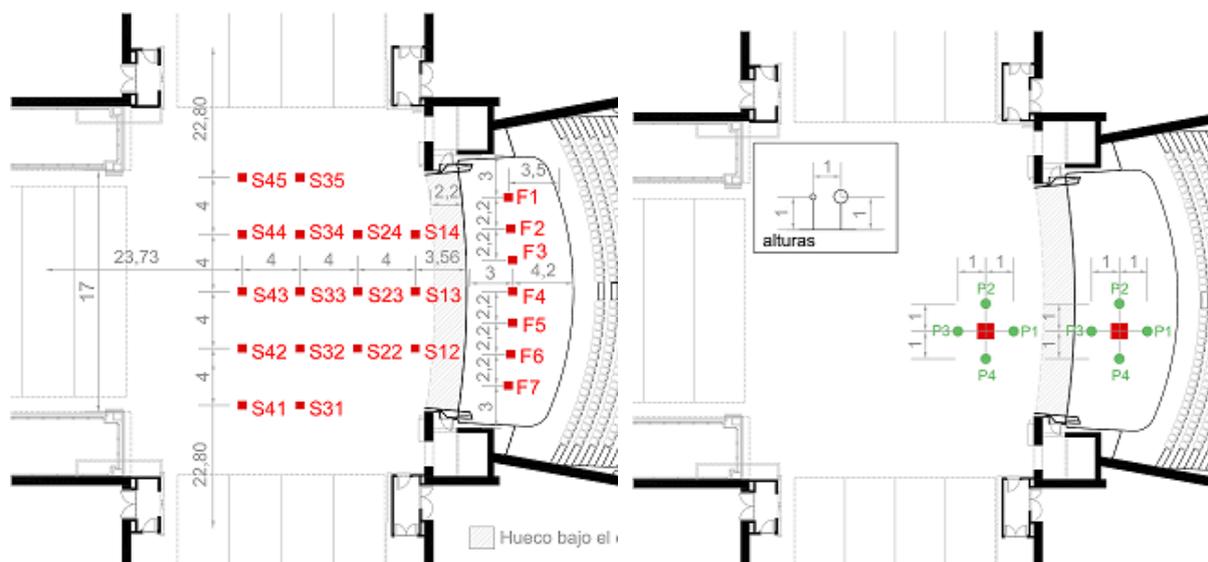


Figura 2 – Posiciones de la fuente en el escenario y el foso orquestal (izquierda) y posiciones de medida para cada ubicación de la fuente (derecha).

Los procedimientos empleados han sido los establecidos en la ISO 3382-1 [7], y las medidas se llevaron a cabo sin la presencia de público, ni músicos, y el escenario libre de sus instrumentos. Se controlaron la temperatura y la humedad relativa mediante un termo-higrómetro de precisión siendo la temperatura media en la sesión de medidas 26,5 °C, la humedad relativa 67% y la presión atmosférica 101,58 kPa. La respuesta al impulso se ha obtenido mediante barridos exponenciales sinusoidales, generados y analizados por el programa WinMLS 2004 mediante una tarjeta de sonido PCMIA de la

firma DIGIGRAM, mod. VXpocket V2 de dos canales. La fuente omnidireccional DO-12 de 01-dB Stell se localiza a 1 m del suelo. Los micrófonos G.R.A.S. tipo 40 AK de $\frac{1}{2}$ pulgada omnidireccionales (y su correspondiente fuente, GRAS 12AA, y preamplificador G.R.A.S Type 26AK) se sitúan a 1 m del suelo y a una distancia de la fuente de 1 m en cuatro posiciones (ver Figura 2, derecha). Las respuestas al impulso (RI) monoaurales medidas fueron posteriormente procesadas para obtener los parámetros de soporte de escena para cada banda de octava en el rango de frecuencias de 125-4000 Hz, en cada receptor.

3 Resultados

La Figura 3 muestra los valores del ST precoz y tardío para los puntos estudiados tanto en el escenario (puntos S12 a S45) como en el foso orquestal (puntos F1 a F7). Puede observarse que el ST precoz en los receptores del foso es unos 10 dB mayor que en los puntos del escenario para casi todas las frecuencias. Diferencias similares entre el foso y el escenario obtienen Bustamante *et al.* [13] utilizando técnicas de simulación para el Teatro de la Maestranza de Sevilla. Además, de acuerdo con otros autores [14,15], se observa gran variabilidad entre los distintos puntos de medida y para las distintas frecuencias, pudiendo observarse la simetría correspondiente a los puntos (S31, S35), (S32, S34), (S41, S45), (S42, S44), (S22, S24), (S12, S14) y su diferencia de valor respecto a los puntos centrales (S13, S23, S33 y S43) que resultan más negativos.

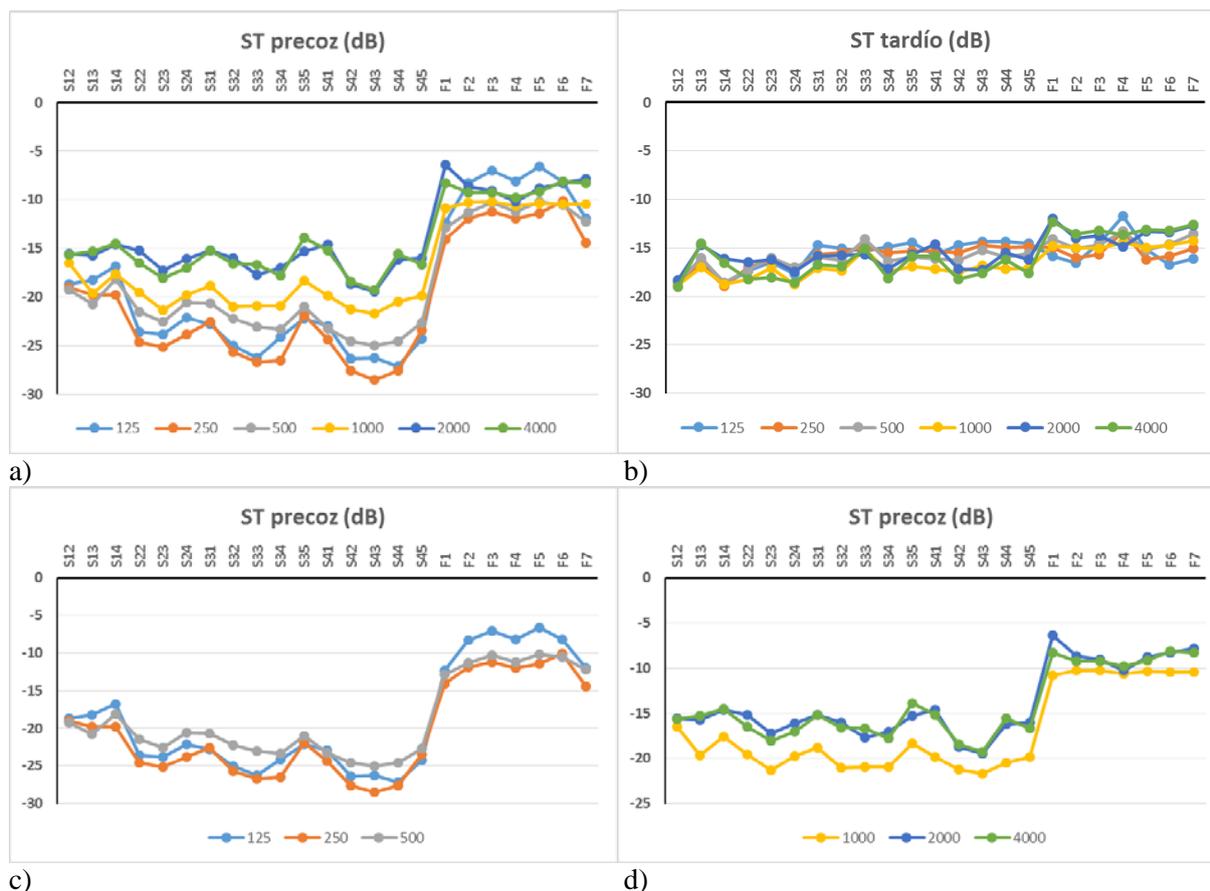


Figura 3 – (a) Valores promedio de ST_{precoz} , y (b) de $ST_{tardío}$, para cada banda de octava en función de la posición de la fuente, tanto en el escenario (puntos S12 a S45), como del foso orquestal (puntos F1 a F7). (c) y (d) Valores de ST_{precoz} para las frecuencias indicadas.

En los puntos del foso esta simetría es aún más evidente mostrando un distinto comportamiento en función de la frecuencia (Figuras 3c y 3d). Así, para frecuencias bajas (125 a 500 Hz) los valores extremos tienen valores más negativos, los laterales valores menos negativos y el central vuelve a tener valores más negativos (la gráfica presenta una forma de M (Figura 4c)), para la frecuencia de 1000 Hz, los valores de este parámetro en todos los puntos es similar y para altas frecuencias 2000 a 4000 Hz, la forma de la gráfica es de V, con valores para los puntos extremos menos negativos y el punto central más negativo (Figura 4d).

El parámetro $ST_{tardío}$ presenta mucha menor variabilidad con el punto de medida, con la frecuencia, e incluso con valores similares entre escenario y foso.

Hemos analizado también la posible influencia de la orientación del punto de medida en cada ubicación de la fuente obteniendo los valores promedio de cada P1, P2, P3 y P4 (Figura 2, derecha) para foso y escenario y cuyos resultados se muestran en la Figura 4. Puede observarse que para frecuencias mayores de 2000 Hz sí que se nota una cierta influencia de la orientación respecto a la fuente, para ambos parámetros ST y entornos. Para la octava de 125 Hz se nota esta influencia en el foso. En todos los casos en los que hay influencia los valores desde P1 a P4 siguen la forma de M.

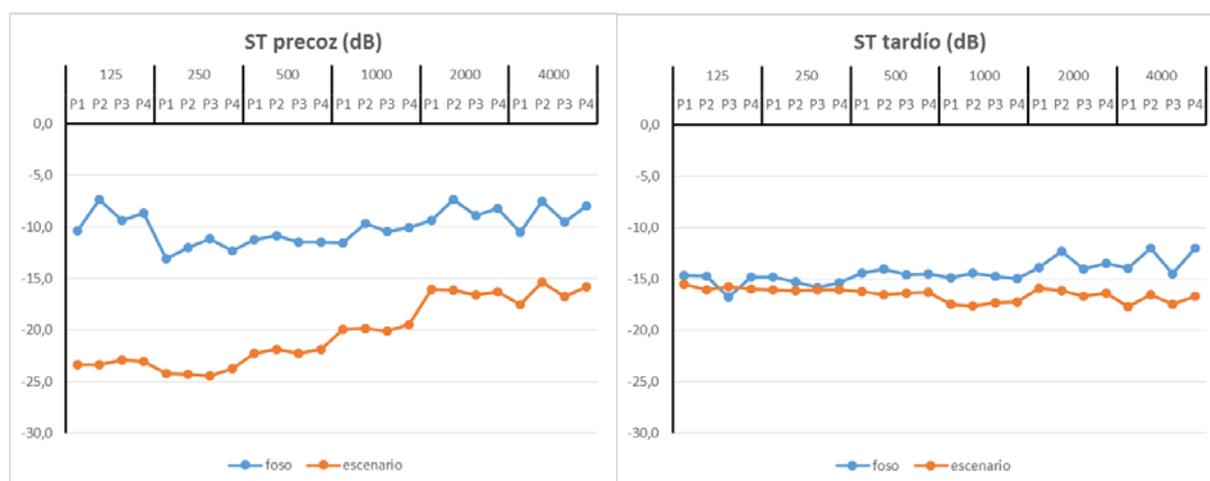


Figura 4 – Valores de ST_{precoz} y $ST_{tardío}$ en función de la frecuencia y la orientación respecto de la fuente en los dos entornos considerados (foso y escenario).

Dado que, aunque con pequeñas variaciones, no hay diferencias estadísticamente significativas entre los valores de ST_{precoz} y $ST_{tardío}$ en los distintos puntos de ubicación de la fuente, puede determinarse un valor promedio de estos parámetros para cada entorno (foso, escenario). La Tabla 2 y la Figura 5 muestran los valores medios de ST precoz y tardío para el escenario y el foso orquestal, para cada una de las octavas estudiadas, así como los valores obtenidos de estos parámetros con el modelo de Barron [16] o de campo difuso (Ecuaciones (2) y (3)) y los valores promedio espectral de escenario y foso en el intervalo 250 a 2000 Hz. Estos valores del ST_{precoz} (-20,59 dB para el escenario y -10,5 dB para el foso) pueden compararse con los valores óptimos de Gade [18] (-20,97 dB y -13,71 dB, respectivamente para escenario y foso), mostrando un acuerdo excelente para el escenario.

$$ST_{precoz} = 10 \log_{10} \left\{ (T/V) \left(\exp(-0.276/T) - \exp(-1.38/T) \right) \right\} + 24.2 \quad (dB) \quad (2)$$



$$ST_{tardio} = 10 \log_{10} \left\{ (T/V) (\exp(-1.38/T) - \exp(-13.82/T)) \right\} + 24.2 \quad (dB) \quad (3)$$

Se observa el diferente comportamiento del ST tardío y precoz en el escenario y en el foso. Así, para el ST tardío hay poca diferencia entre los valores en el foso y en el escenario, valor medio $2,4 \pm 1,4$ dB, aumentando ligeramente la diferencia con la frecuencia. Para el ST precoz la diferencia entre ambas ubicaciones es de casi 10 dB ($9,9 \pm 2,6$) dB, siendo, en este caso, ligeramente mayor la diferencia a bajas frecuencias.

Los modelos de campo difuso y de Barron, que dan valores prácticamente idénticos entre ellos, no llegan a ajustar las variaciones medidas de este parámetro a las distintas frecuencias, pero si ofrecen un valor promedio de estos parámetros cuando se considera el volumen del recinto considerado. Ahora bien, con esta consideración el valor de ST_{tardio} con el modelo de campo difuso para el foso ofrecía valores aproximadamente la mitad de los medidos, por lo que en este caso el volumen considerado ha sido la mitad del volumen del escenario más el del foso porque se entiende que la escena tiene un fuerte influencia sobre el foso. Hemos analizado si el ajuste es más adecuado si en lugar de utilizar el tiempo de reverberación T de la sala, se utilizaba el EDT, pero los resultados han sido muy semejantes.

Tabla 2 - Valores medios y desviaciones típicas (DT) del valor ST precoz y tardío determinado para cada frecuencia de medida, tanto para el escenario (64 puntos en 16 localizaciones) como para el foso (28 puntos de medida en 7 localizaciones). Valores de estos parámetros considerando campo difuso (CD) y VTotal: valor promedio para el intervalo 250 a 2000 Hz. *El volumen considerado es mayor que el real del foso.

Frec (Hz)	ST _{precoz}						ST _{tardio}					
	Escenario		Foso		CD Esc	CD Foso	Escenario		Foso		CD Esc	CD* Foso
	Media	DT	Media	DT			Media	DT	Media	DT		
125	-23,16	3,17	-8,93	2,75	-19,43	-10,17	-15,81	1,68	-15,24	2,22	-16,17	-14,54
250	-24,18	3,05	-12,14	1,89	-19,40	-10,13	-16,08	1,43	-15,32	1,16	-15,96	-14,45
500	-22,06	2,17	-11,23	1,22	-19,54	-10,28	-16,34	1,26	-14,39	0,91	-16,70	-15,02
1000	-19,84	1,68	-10,45	1,29	-19,57	-10,32	-17,4	1,16	-14,75	0,76	-16,93	-15,15
2000	-16,28	2,27	-8,47	1,73	-19,58	-10,35	-16,26	1,96	-13,43	1,37	-17,07	-15,05
4000	-16,38	2,83	-8,86	2,28	-19,67	-10,46	-17,09	2,66	-13,1	2,12	-17,60	-15,38
VTotal	-20,59	2,29	-10,57	1,53	-19,52	-10,27	-16,52	1,45	-14,47	1,05	-16,97	-14,92

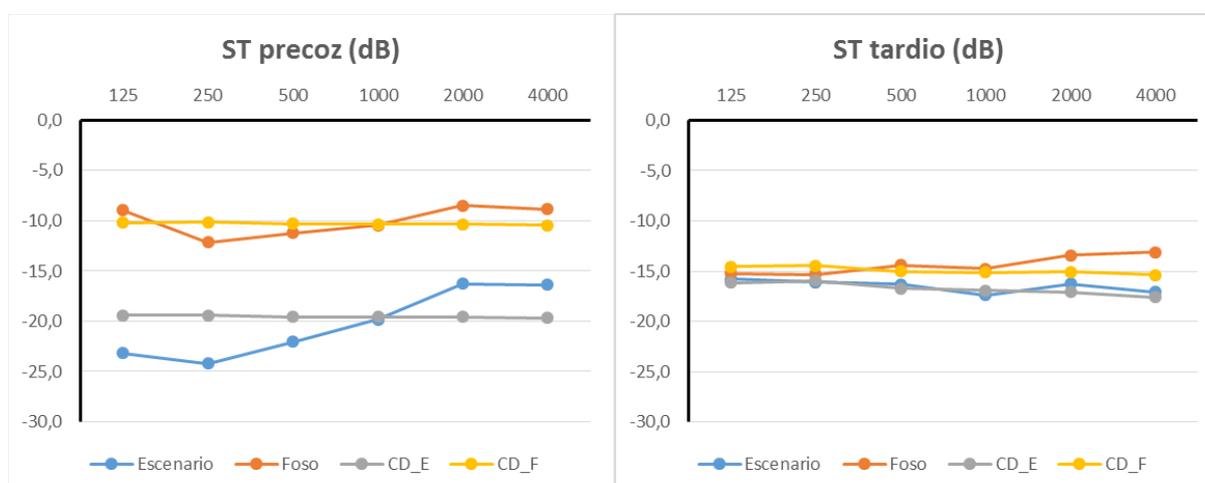




Figura 5 – Valores promedio de ST precoz y tardío para el foso y el escenario, en función de la frecuencia y valores obtenidos con el modelo de campo difuso (CD).

Dado que el modelo de campo difuso y el modelo de Barron no se han ajustado a la variación espectral mostrada por los datos experimentales, pues en ambos modelos se utiliza el tiempo de reverberación T de la sala para cada frecuencia, y la necesidad de modificar el volumen del foso en cálculos de $ST_{\text{tardío}}$, indican la conveniencia de realizar estudios específicos para analizar el comportamiento de estos parámetros con otras variables.

4 Conclusiones

Los parámetros soporte de escena, ST_{precoz} y $ST_{\text{tardío}}$ medidos en el escenario y en foso muestran valores muy diferentes, siendo los valores del foso mayores, sobre todo en el caso del ST_{precoz} . Estas diferencias muestran el interés de estos parámetros para caracterizar la acústica de estos entornos.

Las aproximaciones de campo difuso permiten encontrar a partir de valores de la sala como el tiempo de reverberación T o el EDT valores promedio de estos parámetros, pero en el caso del $ST_{\text{tardío}}$ del foso debe considerarse un volumen mayor para realizar el cálculo.

Los parámetros soporte de escena se ha constatado que presentan valores similares en puntos geoméricamente simétricos lo que confirma la posibilidad de reducir el número de puntos de medida.

Los valores de estos parámetros no son sensibles a la orientación de la medida respecto de la fuente a las frecuencias de 250 a 1000 Hz.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la dirección de la sala el permiso concedido para la realización de las medidas. Esta comunicación es parte del trabajo realizado en el proyecto de investigación I+D+i con referencia BIA2014-56755-P. Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto de investigación BIA2012-36896.

Referencias

- [1] Marshall, A.H; Gottlob, D.; Alrutz, H. Acoustical conditions preferred for ensemble, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 64, 1978, pp 1437-1442.
- [2] Barron, M. The Gulbenkian Great Hall. Lisbon II: An acoustic study of a concert hall with variable stage, *Journal of Sound and Vibration*, Vol 59, 1978, pp 481-502.
- [3] Dammerud, J.J.; Barron, M.; Kahle, E. Objective assessment of acoustic conditions for symphony orchestras, *Building Acoustics*, Vol 18, 2011, pp 207-219.
- [4] Arau, H. Is Gade's "support" parameter ST_{early} a sure method to forecast stage acoustics?, *Inter noise 2010, Noise and sustainability*, Lisbon, Portugal, June 13-16, 2010, In CD-ROM.
- [5] Gade, A.C. Investigations of musicians' room acoustic conditions in concert halls. Part I: Method and laboratory experiment, *Acustica*, Vol 69, 1989, pp 193-203.
- [6] Gade, A.C. Investigations of musicians' room acoustic conditions in concert halls. Part II: Field experiments and synthesis of results, *Acustica*, Vol 69, 1989, pp 249-262.
- [7] UNE-EN-ISO 3382-1. Acústica, Medición de parámetros acústicos en recintos, parte 1: salas de espectáculos. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, 2010.



- [8] Jeon, J.Y.; Barron, M. Evaluation of stage acoustics in Seoul Arts Center Concert Hall by measuring stage support, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 117, 2005, pp 232-239.
- [9] Gade, A.C. Practical aspects of room acoustic measurements on orchestra platforms, 14th International Congress on Acoustics (ICA) Beijing, China, September 3-10, 1992.
- [10] Gade, A.C. Acoustics for symphony orchestras; status after three decades of experimental research, *Building Acoustics*, Vol 18, 2011, pp 181-206.
- [11] Dammerud, J.J.; Barron, M. Attenuation of direct sound and the contributions of early reflections within symphony orchestras, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 128, 2010, pp 1755-1765.
- [12] Wenmaekers, A.R.H.C.; Hak, C.C.J.M.; Van Luxemburg. L.C.J. On measurements of stage acoustic parameters: Time interval limits and various source–receiver distances, *Acta Acustica United with Acustica*, Vol 98, 2012, pp 776-789.
- [13] Bustamante, P.; Zamarreño, T.; Girón, S. Acústica virtual del escenario multi-configurable del Teatro de la Maestranza. *Tecniacustica 2013*, Valladolid, Spain, pp 1473-1481, 2013, In CD-ROM.
- [14] Girón, S.; Zamarreño, T.; Galindo. M. Experimental study of Support parameters in auditorium and proscenium stages, *Acta Acustica United with Acustica*, Vol 96, 2010, pp 1026-1041.
- [15] Dammerud, J.J.; Barron, M. Concert hall stage acoustics from the perspective of the performers and physical reality. *Proceedings of Institute of Acoustics*, Vol 30, 2008.
- [16] Barron, M.; Lee. L.J. Energy relations in concert auditoriums I, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 84, 1998, pp 618-628.
- [18] Gade, A.C. An acoustical survey of eleven European concert halls - a basis for discussion of halls in Denmark, *The Acoustics Laboratory, Technical University of Denmark*, [Report No.44], 1989.