

ESTUDIO ACÚSTICO DEL CLAUSTRO DE LA NAU. COMPROBACIÓN DE LA IDONEIDAD DE LA SIMULACIÓN ACÚSTICA POR TRAZADO DE RAYOS

PACS 43.55.6X

Guillén Guillamón, Ignacio; Serrano Rodrigo, Pau; Gómez Lozano, Vicente; Blasco Blasco, Angel; Llopis Reyna, Ana
Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universitat Politècnica de València.
Camino de Vera s/n. 46022 Valencia. España
Tel: 0034-963877524.
E-mail: iguillen@fis.upv.es

ABSTRACT

Nowadays, there are more and more historical building spaces used for activities which are different from the original conceived ones. In this case, the cloisters of the building "la nau" in Valencia was analyzed in which many concerts have been performed so far.

In this study we analyze the acoustic parameters through an in-situ measurement and test the precision of the acoustic software simulation. The absorption coefficient of certain materials were taken from a similar study in order to prove the correspondence between them having different enclosures with similar features.

RESUMEN

Actualmente, cada vez son más los recintos históricos que son utilizados para realizar actividades diferentes a las que fueron concebidos. En este caso se ha estudiado el Claustro del edificio "La Nau" en Valencia, en el cual se realizan numerosos ciclos de conciertos.

En este trabajo se estudian los parámetros acústicos a través de una medición in situ y se comprueba la idoneidad de la simulación acústica realizada. Los coeficientes de absorción de ciertos materiales fueron adquiridos de un estudio similar para comprobar así la similitud entre ellos en distintos recintos con características parecidas.

INTRODUCCIÓN

Hoy en día es muy frecuente encontrarse con recintos históricos y/o eclesiásticos, de alto valor patrimonial, donde se están llevando a cabo usos diferentes para los que fueron concebidos [1,2]. En este caso en concreto nos referimos a claustros, donde actualmente, gran parte de ellos son utilizados para realizar distintas actividades, donde destacan los ciclos de conciertos de diferentes formaciones clásicas. Por este motivo se plantea el estudio de estos espacios

desde dos puntos de vista: comprobar que características acústicas tienen y como mejorarlas para conseguir una mejor audición musical. Por ello se crea la necesidad de poder utilizar correctamente la herramienta de la simulación acústica para proyectar posibles actuaciones y predecir los correspondientes parámetros acústicos con el fin de mejorar su acústica.

En este trabajo, se realiza un estudio del Claustro del edificio “La Nau” de la Universidad de Valencia, situado en el casco histórico de Valencia. A este edificio, con más de seis siglos de historia, se le realizó la última intervención a finales de los años 90. En concreto en el claustro, ésta consistió básicamente en la restauración de las carpinterías, paramentos, columnas y molduras deterioradas por el tiempo y se le añadió al pasillo perimetral un falso techo de cartónyeso para la colocación de luminarias empotradas, tanto en planta baja como en primera (Fig. 1).



Figura 1. Imágenes del claustro.

La principal dificultad que nos encontramos a la hora de utilizar la simulación acústica como herramienta de trabajo en los recintos históricos es la falta de datos sobre los coeficientes de absorción y difusión de las soluciones constructivas de sus paramentos. Por ello, en este estudio, además de caracterizar la acústica del claustro en las condiciones actuales comprobando los efectos de la rehabilitación del mismo, se han utilizado los parámetros de dos materiales de otro estudio de un claustro similar [3], para así poder comprobar el grado de similitud en el comportamiento de materiales parecidos en distintos claustros en la simulación de los mismos.

El estudio del claustro se realiza a través del software de simulación Odeon Room Acoustic Program [4] y de la herramienta Dirac, con los que se han obtenido los valores en los que se basan las conclusiones de esta comunicación.

METODOLOGÍA

En este estudio se ha realizado una medición in situ, calculando los parámetros acústicos a partir de las respuestas a impulsos del claustro y una simulación acústica mediante trazado de rayos sobre un modelo tridimensional virtual.

La medición in situ se realizó con un sistema de emisión, con el que se excitó la sala, formado por un PC, una tarjeta de sonido, un amplificador (Lab. 300 de Lab Grupper), y una fuente sonora dodecaédrica (Omnipower 4296 de Bruel & Kjaer, con 12 altavoces). Para la adquisición de la respuesta de la sala se utilizó el mismo PC con la tarjeta anteriormente nombrada y un micrófono omnidireccional y bidireccional (Shure KSM44). La señal de excitación utilizada fue un “Sweep” o barrido sinusoidal.

Respecto la determinación de los parámetros acústicos, el software utilizado fue el Dirac. Con él se registró y se grabó la señal recibida por los micrófonos y posteriormente se realizó tratamiento en despacho de los archivos acústicos recogidos en la medición para obtener los parámetros acústicos que caracterizan el recinto.

En el momento de la medición el claustro se encontraba sin presencia de público. Se realizaron mediciones con 1 posición de la fuente y 19 puntos de recepción.

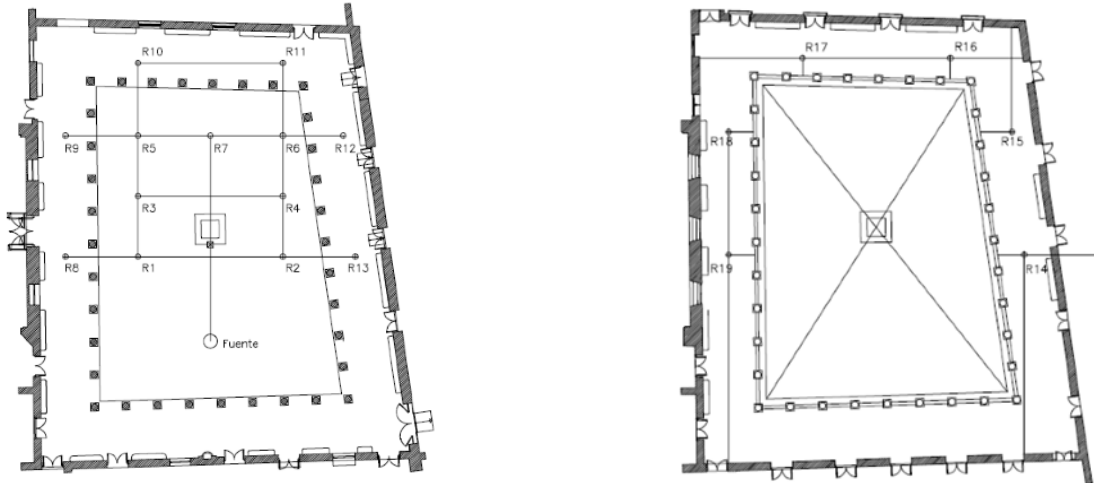


Figura 2. Escenario de la medición (P.B. y P.1ª.) Fuente y receptores.

Como se observa en la Fig. 2, la fuente está situada en el eje de simetría, a 8 metros de la escultura que se encuentra en el centro del claustro y a una altura de 1,50 m. Los receptores se situaron en 19 puntos diferentes del claustro. 13 de ellos en la parte inferior, de los cuales 7 eran exteriores y 6 interiores. Los 6 restantes se situaron en el pasillo del primer piso. Todos ellos a una altura de 1,20 metros.

Para la realización de la simulación, primero se realizó un modelo geométrico tridimensional (Fig. 3) del recinto de estudio. Un modelo simplificado de la geometría interior del claustro. Se exportó al software Odeon y se le asignaron los correspondientes coeficientes de absorción y difusión (para cada banda de octava comprendida entre los 125 Hz y 4.000 Hz) de cada una de las superficies.

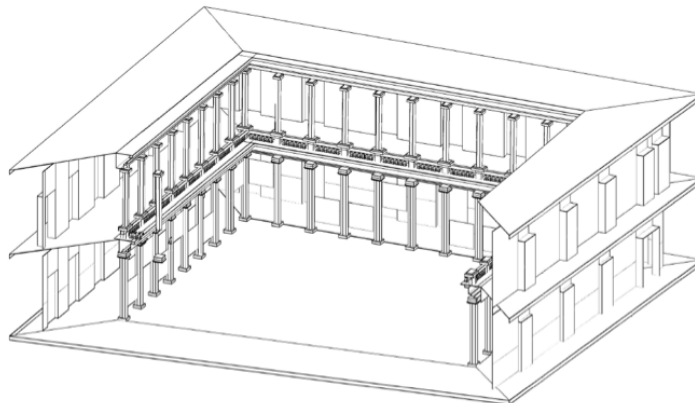


Figura 3. Modelo geométrico tridimensional del claustro “La Nau”.

Los materiales utilizados en la simulación se reflejan en Tabla 1. El proceso más extendido para realizar las simulaciones de recintos históricos es validar el modelo ajustando los coeficientes de absorción de los materiales que menos información se tiene de su comportamiento [5]. En este tipo de recintos suelen ser los revestimientos de los paramentos de yeso y piedra. En este caso, en lugar de validar el modelo, se ha tomado como coeficientes de estas superficies los utilizados en un estudio anterior de otro claustro, con características parecidas, pudiendo así comprobar si estos materiales se comportan de manera similar en distintos espacios.

| COEFICIENTES MATERIALES SIMULACIÓN | | | | | | | |
|------------------------------------|--------|-------------|------|------|------|------|------|
| Descripción | Codigo | Frecuencias | | | | | |
| | | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| Piedra* | 19017 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,02 |
| Pavimentos | 18032 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| Enlucido de yeso* | 19017 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,02 |
| Madera | 17009 | 0,01 | 0,05 | 0,05 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| Vidrio | 18027 | 0,18 | 0,06 | 0,04 | 0,03 | 0,02 | 0,02 |
| Zocalo | 18025 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 |
| Fuente | 18025 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 |
| Figura | 18025 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 |
| Paneles | 4040 | 0,11 | 0,13 | 0,05 | 0,03 | 0,02 | 0,03 |
| Techo Pladur | 4046 | 0,29 | 0,10 | 0,05 | 0,04 | 0,07 | 0,09 |
| Aire | 90 | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,90 |

*Coeficientes adquiridos de los materiales de otra simulación validada.

Tabla 1. Coeficientes de absorción de cada material utilizados en la simulación.

Con este modelo se definió el escenario y se realizó la simulación del recinto. La situación de la fuente y los receptores es la misma que en el momento en que se efectuó la medición in situ con la intención de posteriormente poder comparar los resultados y así comprobar si existe una similitud razonable entre los datos obtenidos. Del resto de características que definen el escenario de la simulación se destacan la siguientes: Temperatura interior 20 C; Humedad relativa 50 %; Densidad del aire: estándar; Longitud de la Respuesta Impulsional: 4.500 ms; Número de rayos prefijado: 209.880 rayos y Método de dispersión Lambert.

RESULTADOS

Caracterización Acústica del Claustro.

Respecto a las características acústicas del recinto, se obtuvieron valores de los siguientes parámetros acústicos: RT_{30} (RT_{mid} ; BR; Br), EDT, C80 y LF80. A continuación se presentan los resultados.

Con los datos del tiempo de reverberación que se obtuvieron, se calcularon los siguientes parámetros:

El RT_{mid} recomendado para el tipo de música que se suele dar en estos recintos están comprendidos entre 1,3 a 1,7 s para la música de cámara, y entre 1,6 a 1,8 para la música barroca clásica [6], valores que no se alcanzan (**2,80 s** en este caso) pero que no quedan tan lejos como en otros tipos de recintos históricos cerrados y sin llevar a cabo ninguna actuación de acondicionamiento.

Para el **BR** el valor recomendado es de 1,25 para unos tiempos de reverberación altos (2,2 s) [6]. La Calidez, en el claustro es notablemente menor de la recomendada, **0,82**. La causa principal de este hecho es la restauración de los techos del pasillo perimetral del claustro con cartonyeso. Éstos actúan como membranas absorbiendo las frecuencias graves, y con ello empeorando la calidad de la audición.

El valor de **Br** mínimo recomendado es de 0,87 [6] por lo que el claustro, con **0,72**, está cerca del mínimo recomendable y en consecuencia, se podría decir que la riqueza en armónicos de la sala sería corta, aunque suficiente.

El **EDT_{mid}** que se obtiene es de **2,49 s**. cercano al RTmid. Esto significa que el recinto, tiene una buena difusión [7].

El valor medio que se obtiene del **C80** es de **-2,68 dB** para todos los receptores, de -1,33 dB para la media de los exteriores y de -3,47 para los interiores. Estos valores entran dentro de las recomendaciones establecidas ($-4 \geq C80(3) \geq 0$ dB para salas vacías) [8]. En este valor encontramos una diferencia notable, entre los receptores exteriores e interiores, ya que influye notablemente las primeras reflexiones que reciben los receptores, y como es lógico, los interiores reciben más energía en los primeros 80 ms que los exteriores.

Por último se calculó el **LF**. Este recinto tiene un valor del **28%**, lo que nos indica que tiene una buena espacialidad, ya que el mínimo recomendado es del 19% [8].

A continuación se presenta una tabla con el resumen de los valores obtenidos:

| | RT mid | BR | Br | EDT | C80 | LF |
|----------------|--------|------|------|------|-------|------|
| Media | 2,83 | 0,85 | 0,72 | 2,49 | -2,68 | 0,28 |
| Media exterior | 2,77 | 0,84 | 0,71 | 2,39 | -1,33 | 0,27 |
| Media interior | 2,86 | 0,86 | 0,73 | 2,55 | -3,47 | 0,29 |

Tabla 2. Parámetros obtenidos en la medición.

Simulación del Claustro

Respecto a la simulación, los parámetros calculados son los mismos que en el apartado anterior para poder comparar los resultados obtenidos. Con esta comparación se pretende centrarse en la adecuación de la simulación con los condicionantes expuestos en la metodología. Los valores obtenidos son los siguientes:

Respecto al **RT**, los valores medios se pueden observar en la Fig. 5. La tendencia de los resultados son las mismas, aunque existe un desfase de una media de 0,32 s más en cada frecuencia en la simulación, lo que supera los JND [9].

Al mantenerse la misma tendencia en los dos casos, los valores de Calidez y Brillo son coincidentes. En los parámetros temporales no hay diferencia apreciable entre los receptores interiores y los exteriores, tanto en la medición como en la simulación.

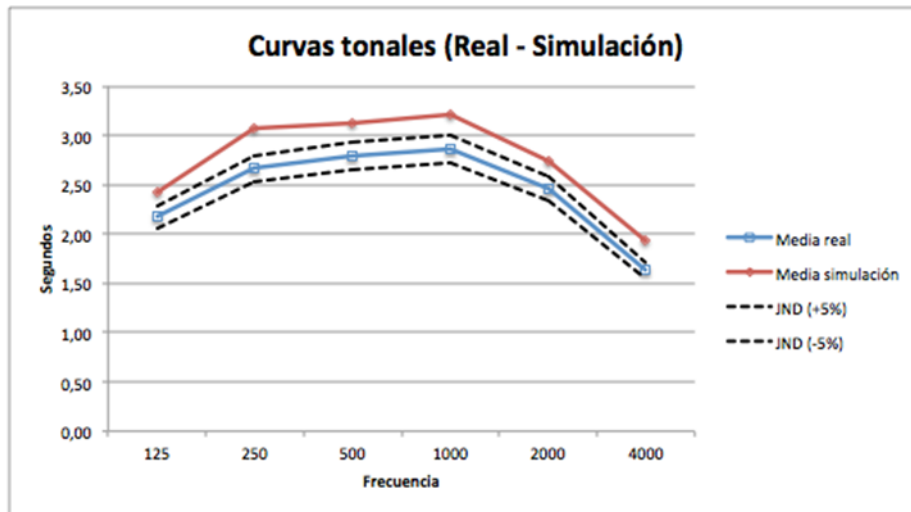


Figura 4. Curvas tonales. Valores medios de la Simulación y Real.

| | RTmid | BR | Br |
|------------|-------|------|------|
| Real | 2,83 | 0,85 | 0,72 |
| Simulación | 3,17 | 0,87 | 0,74 |

Tabla 3. Parámetros temporales (Simulación-Real).

Los valores obtenidos para el EDT se muestran en la siguiente figura:

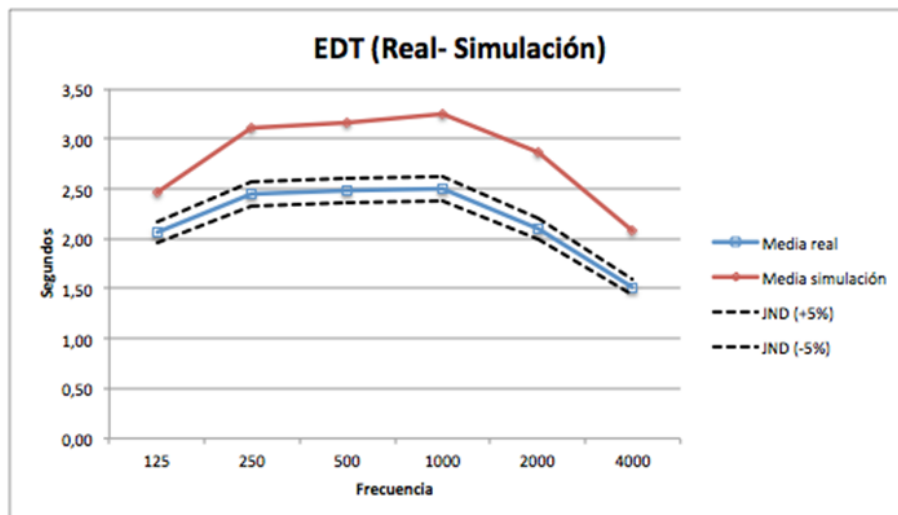


Figura 5. EDT. Valores medios de la Simulación y Real.

Como era previsible, los valores de este parámetro son parecidos a los del RT. La tendencia de los valores de la simulación es similar a la tendencia de los de la medición. Al igual que con las curvas tonales, los valores de la simulación son más altos que los reales, pero en este caso con una diferencia más marcada que en el RT, llegando a 0,64 s de media

El valor obtenido en la simulación es de 3,21 s en el EDT, respecto a los 3,21 s calculados para el RT.

Respecto a la Claridad, C_{80} , se han calculado los siguientes resultados:

| C_{80} | Todos | Exteriores | Interiores |
|------------|-------|------------|------------|
| Real | -2,68 | -1,33 | -3,47 |
| Simulación | -4,78 | -3,08 | -5,77 |

Tabla 4. Valores de C_{80} . Medias de receptores totales, exteriores e interiores.

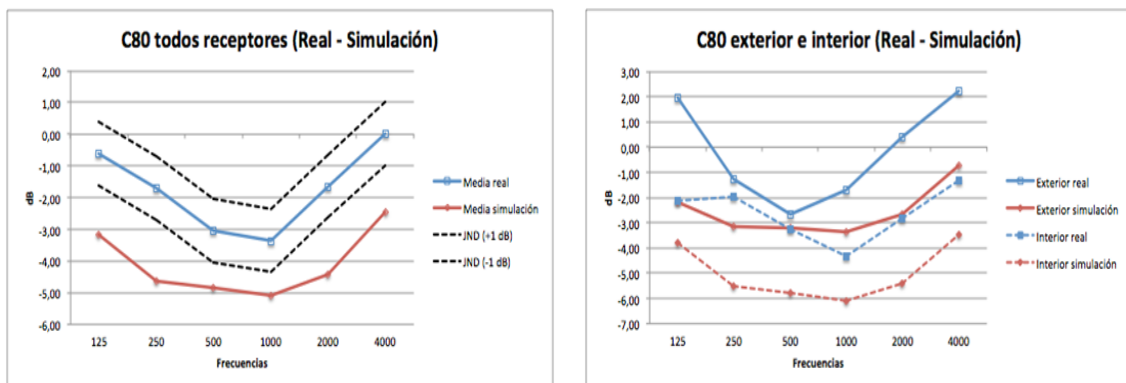


Figura 6. C_{80} . Medias de receptores totales, exteriores e interiores.

Como se puede comprobar, en los valores medios de todos los receptores, sin diferenciar exteriores e interiores, al igual que en los anteriores parámetros se consigue la misma tendencia en los datos, aunque con una diferencia notable entre la realidad y la simulación. En este valor en concreto, si diferenciamos los receptores exteriores e interiores observamos que las gráficas empiezan a diferenciarse más, ya que este valor depende mucho de la posición en que se encuentre el receptor y las tendencias empiezan a no ser iguales. Si se compara receptor por receptor, las diferencias son mayores.

Por último se ha estudiado el LF , con los siguientes datos:

| LF_{E4} | Todos | Exteriores | Interiores |
|------------|-------|------------|------------|
| Real | 0,28 | 0,27 | 0,29 |
| Simulación | 0,31 | 0,28 | 0,33 |

Tabla 5. Valores de LF_{E4} . Medias de receptores totales, exteriores e interiores.

Aquí se observa que se ha conseguido unos valores medios en la simulación muy próximos a los reales con diferencias menores del 5%.

CONCLUSIONES

A la vista de los resultados obtenidos, en referencia a la caracterización del claustro, se puede concluir que es un recinto, que compensa la alta reflexión de los materiales de los que está construido con el patio interior al aire libre. Con ello se consigue reducir el Tiempo de Reverberación y conseguir una Claridad y una Espacialidad con unos valores aceptables para realizar conciertos en el claustro.

El principal problema a destacar en la calidad de audición de este claustro a sido causado por la última restauración realizada, donde se colocaron los falsos techos de cartonyeso en los pasillos perimetrales (tanto en PB como en P1). Esto a creado que se desvirtúe la curva tonal del claustro, absorbiendo excesivamente en las frecuencias bajas y como consecuencia empeorando los parámetros como la Calidez.

En la siguiente gráfica se ha simulado como sería la curva tonal del claustro sin el falso techo (Simulación 1). Se observa claramente como ha influido en ella.

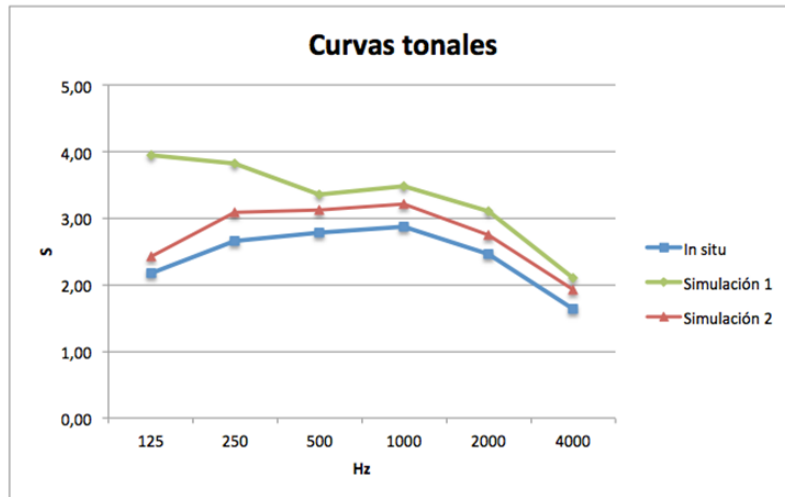


Figura 7. Curva tonal real, simulada y simulada sin falso techo..

Respecto a la simulación, se ha comprobado que el no validar el modelo y utilizar los materiales validados en un recinto similar (las fachadas de piedra y de yeso) no es un método a priori eficaz para realizar la simulación de estos recintos. Se observa que las tendencias en la mayoría de parámetros coinciden, pero que los valores difieren de forma considerable.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Llinares, J.; Llopis, A.; Sancho, J. (1993). *Adecuación de la reverberación de una iglesia para su uso como sala de recitales*. Tecniacustica. Valladolid
- [2] Llopis Reyna, Ana; Serrano Rodrigo, Pau; Guillen Guillamón, Ignacio; Gómez Lozano, Vicente (2013). *Ajustes por técnicas de ray tracing de un modelo virtual de la intervención acústica en la iglesia del Monasterio de Santa María de la Valldigna*. Tecniacustica. Valladolid
- [3] Serrano, P.; Guillen, I. (2013). *Estudio por técnicas de Ray Tracing sobre la adecuación de las simulaciones acústicas a recintos al aire libre. Estudio del Claustro de Llutxent*. PFG. UPV
- [4] ODEON Room Acoustic Software. (2009). User Manual. Denmark.
- [5] Galindo, M.; Zamarreño, T.; Girón, S. (2009). *Acoustic simulations of Mudejar-Gothic churches*. Journal of the Acoustical Society of America, 2009. 126(3): p. 1207-1218.
- [6] Beranek, L. (1962). *Music, Acoustics and Architecture*.
- [7] Carrion, A. (1998). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Catalunya: Edicions UPC.
- [8] Marshall, A. H. (1967). *A note on the importance of room cross-section in concert halls*. J. Sound Vibration
- [9] UNE-EN_ISO_3382-1. *Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1*.