

SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DEL DISEÑO ACÚSTICO DE UN RECINTO ECLESIAÍSTICO COMO ESPACIO MULTIUSOS. LA IGLESIA DE SAN JULIÁN DE CUENCA (ESPAÑA).

Sergio Rubio Luque^{1*}
Samuel Quintana Gómez, José A. Ballesteros²

¹UCLM – Escuela Politécnica de Cuenca

²UCLM – Escuela Politécnica de Cuenca – Grupo GAMMA

RESUMEN

En este estudio analizaremos la Iglesia de San Julián de Cuenca, en la que por motivos en su ejecución no disponemos de planos arquitectónicos del edificio ni detalles de los materiales de acabado interior. Crearemos un modelo acústico lo más semejante posible a la realidad para prever los problemas sonoros que puedan surgir del uso del espacio como recinto multiusos. Este modelo servirá para implementar distintas soluciones de sonorización tanto de instalación fija como de refuerzo sonoro adaptado a los distintos eventos que se puedan albergar.

Para ello, realizaremos una batería de medidas acústicas de caracterización según la norma ISO-3382, con las que generaremos un modelo de simulación que ajustaremos hasta obtener diferencias inferiores al valor JND entre los valores promedio de medición y los obtenidos en el modelo. Una vez validado el modelo desde el punto de vista estadístico, contrastaremos las diferencias JND, entre los valores obtenidos específicamente para cada punto de medida respecto de los obtenidos tras el método de trazado de rayos según el algoritmo AURA-CAESAR.

Finalmente realizaremos una auralización en los puntos clave del recinto, como pueden ser las posiciones de refuerzo sonoro, el escenario (situado en el altar mayor) y las posibles ubicaciones de los técnicos de control.

ABSTRACT

In this research the Church of San Julián in Cuenca will be acoustically analyzed, although digitalized plans or interior finishes were not available due to execution reasons.

For that, an acoustic model as similar as possible to reality will be designed to anticipate sound problems that may arise when this space will be used as a multipurpose room. The model will be used to test sound solutions, both for fixed

installation and for sound reinforcement, adapted to the different events that could be hosted.

Acoustic measurements were carried out according to ISO-3382 standard to design a simulation model that was adjusted to obtain differences lower than the JND value between the average measurement values and those obtained in the model. Once the model was validated from a statistical point of view, we have contrasted the JND differences between the values obtained specifically for each measurement point and those obtained after the ray tracing method with AURA-CAESAR algorithm.

Finally, we have carried out auralizations at key points of the church, such as the sound reinforcement positions, the stage (located on the main altar) and the possible locations of the control technicians.

Palabras Clave— Acústica de iglesias, acústica arquitectónica, modelo de simulación, parámetros acústicos, auralización.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de los recintos eclesiásticos ha evolucionado y se han dejado de utilizar exclusivamente para el culto. Conciertos de cámara o representaciones teatrales y musicales son algunos de los usos añadidos a la liturgia tradicional, que hacen que sea necesario conocer la acústica del recinto y su respuesta frecuencial.

En esta comunicación se analizará la acústica de la Iglesia de San Julián de Cuenca, situada en la Plaza Reina Sofía N°2, en el barrio “Fuente del Oro” de Cuenca. Como se observa en la Figura 1, es un recinto de construcción moderna con forma semicircular en la zona del altar y rectangular en el área de audiencia. En su forma de construcción destacan los arcos transversales de madera que cruzan el eje longitudinal de la iglesia y soportan al techo escalonado. Tiene un volumen aproximado de 5.000 m³ y en su interior predominan

* **Autor de contacto:** sergio.rubio@uclm.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

materiales como la madera, yeso y mármol. Encontramos yeso corrugado en todas las paredes laterales y en las verticales de los techos. La madera está presente en todo el techo y en los arcos, y el altar es completamente de mármol. Encontramos cristalerías sobre la puerta de entrada, en el techo justo encima del altar, en la parte posterior del altar y en los laterales superiores del techo. El suelo es de mármol y tiene una alfombra en el pasillo central. Del techo destaca su forma escalonada de los laterales y la convexidad de la madera de la parte central. El recinto es capaz de albergar a 300 personas sentadas.



Figura 1: Vista delantera de la Iglesia de San Julián según eje longitudinal.

Esta comunicación se estructura en tres partes: realización de las medidas in-situ que nos permitirán caracterizar la sala, diseño del modelo geométrico en 3D, validación del modelo según métodos de análisis estadísticos y geométricos, y contraste de los resultados mediante algoritmos de trazado geométrico (AURA).

2. MEDIDAS IN-SITU

La metodología de medida está basada en la norma UNE-EN ISO 3382 [1] con los equipos de refuerzo sonoro y sistemas de climatización desconectados. Las medidas se realizaron en una jornada de mañana y no hubo variación en las condiciones ambientales superior al 5 %. Las muestras se tomaron con una temperatura de 20 °C, una humedad relativa del 60 % y 1013 mbar de presión. El rango frecuencial cubierto para todas las medidas es superior al rango establecido por la norma (125 Hz a 4 kHz).

La grabación de las medidas se realizó tanto con el sistema cabeza-torso (HATS) situado sobre los bancos de la iglesia para simular la posición normal de los oyentes como con micrófonos omnidireccionales de precisión tipo 1. Este sistema de medida nos ha permitido obtener más información del recinto que se podrá utilizar en futuros estudios relacionados con los aspectos subjetivos de espacialidad.

Las medidas se han realizado en 6 posiciones según la recomendación de la norma UNE-EN ISO 3382 [1] en la que se establece ese número de posiciones para recintos con

capacidad inferior a 500 personas. Los puntos de medida, disponibles en la Figura 2, se han distribuido teniendo en cuenta la simetría del recinto y pensando en posibles posiciones estratégicas según el uso, por ejemplo, la posición P3 corresponde al lugar en el que se ubican los técnicos de sonido en el caso de representaciones teatrales, musicales, etc.

Se han elegido 3 puntos de emisión tomando como referencia la puerta de entrada (F1 en la parte superior trasera al altar, F2 en el centro del altar y F3 en un pilar lateral, cercano al sistema de refuerzo sonoro). Estas posiciones han sido elegidas específicamente según el uso del recinto. En la posición F1 se ubica la orquesta en representaciones musicales, F2 corresponde con la posición del orador habitual durante la liturgia, y F3 es la posición habitual del coro en los actos litúrgicos, además, es en la que se instalan preferentemente los sistemas de refuerzo sonoro estacados o descolgados en configuración habitual tipo line-array, que permiten enfocar el haz principal sobre las dos áreas de audiencia, situadas en los bancos laterales, para las representaciones teatrales y musicales.

Para la obtención de los parámetros de calificación, la sala se ha excitado mediante una señal radiada por una fuente omnidireccional [2] [3] [4]. Se han empleado barridos sinusoidales de excitación exponencial (e-Sweep), generados mediante el software DIRAC [5].



Figura 2: Posiciones de medida del estudio acústico.

Se utilizó este método de barridos porque es el que permite conseguir una relación señal a ruido (S/N) más elevada respecto a otros métodos de excitación MLS o barridos lineales [6].

En cada uno de los puntos de medida se han emitido tres barridos frecuenciales con una duración de 10,9 segundos,

suficiente para obtener la totalidad de la respuesta impulsiva y calcular el valor de los parámetros de reverberación (EDT), Calidez (BR), Brillo (Br) y Claridad (C_{50} , C_{80} y D_{50}). Cada una de las medidas se ha realizado con un margen dinámico superior a 35 dB para asegurar una señal de respuesta al impulso suficiente. Además de estos parámetros, también se han calculado los parámetros de ruido (Curvas NR y NC) a partir de la medida de ruido de fondo y sin la generación de señales de excitación.

Se han elegido los parámetros acústicos mencionados entre todos los que recoge la norma UNE-EN ISO 3382 [1] porque son los más interesantes para tomar como referencia a la hora de proponer los objetivos de diseño de configuraciones de refuerzo sonoro adecuadas para cada estilo de música o representación teatral que se desarrolle en la iglesia.

Los valores promedio en frecuencia de número único se han calculado con los valores obtenidos en el rango frecuencial comprendido entre 125 Hz y 4 kHz para cada fuente de emisión.

Las gráficas se han representado en el rango comprendido entre 63 Hz y 8 kHz con el objetivo de visualizar el comportamiento en alta y baja frecuencia, abarcando un mayor espectro frecuencial que el recomendado por la norma UNE-EN ISO 3382 [1].

3. RESULTADOS DE LAS MEDIDAS

En este apartado se expondrán los resultados derivados del procesamiento de las medidas para obtener los parámetros acústicos de calificación. En la Tabla 1 se exponen las magnitudes analizadas y los valores promedio para cada fuente de emisión, así como el rango típico recogido en la norma UNE-EN ISO 3382 [1] para auditorios y los recomendados por A. Carrión [7], L. Beranek [8] y H. Arau [9] para recintos eclesásticos vacíos.

El objetivo de esta comparación es observar las diferencias debidas a la posición de la fuente, y comparar los resultados promediados tanto con el rango típico para auditorios como para el rango típico de iglesias según los criterios de referencia de los autores mencionados.

Tabla 1: Valores promediados en frecuencia de número único por fuente de emisión.

Aspecto subjetivo	Magnitud	Fuentes			Rango típico	
		F1	F2	F3	ISO 3382	Iglesias
Ruido	NC (dB)	30	30	30		30 [7]
	NR (dB)	35	35	35		35 [7]
Reverb.	EDT (s)	3,09	3,12	3,03	1,0 – 3,0	1,8 – 2,0 [8]
Calidez	BR	0,78	0,79	0,82		0,9 a 1,3 [9]
Brillo	Br	0,77	0,77	0,77		1,1 a 1,45 [8]
						$\geq 0,8$ [9]
Claridad	C_{50} (dB)	-5,75	-4,81	-5,02		≥ 2 [10]
	C_{80} (dB)	-4,53	-3,73	-4,07	-5; + 5	-4 – 0 [8]
	D_{50}	0,12	0,16	0,17	0,3; 0,7	0,5 a 0,65 [9]

La medida de ruido de fondo tuvo una duración de 30 segundos y se realizó sin generar ninguna señal de excitación y con todos los sistemas de climatización,

megafonía o eléctricos apagados. Aunque no sea un parámetro que evalúe la calidad de la sala, nos servirá para asegurar una S/N superior a 35 dB en los parámetros medidos.

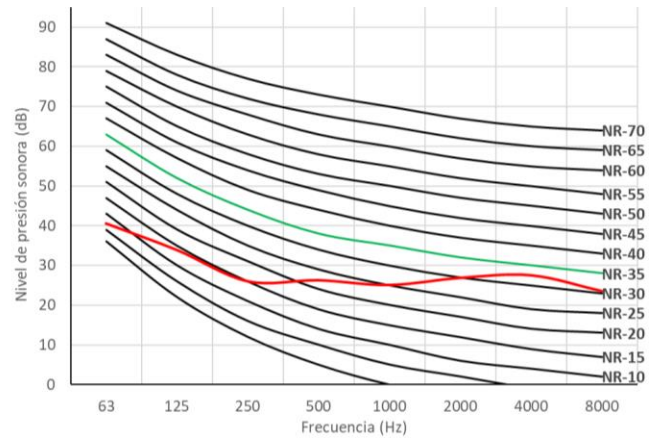


Figura 3: Evaluación de la curva NR de la iglesia.

Tanto las curvas NR como las curvas NC se encuentran dentro de los criterios recomendados por A. Carrión [7] al tener un valor NR=35 y NC=30. En la Figura 3 se muestra la curva NR que define el nivel de ruido que el espectro en frecuencia no debe sobrepasar para lograr que el nivel sea el adecuado para los oyentes, según la norma ISO 1996-1:2020 [11] que determina el nivel de ruido ambiente aceptable para la audiencia e inteligibilidad del discurso.

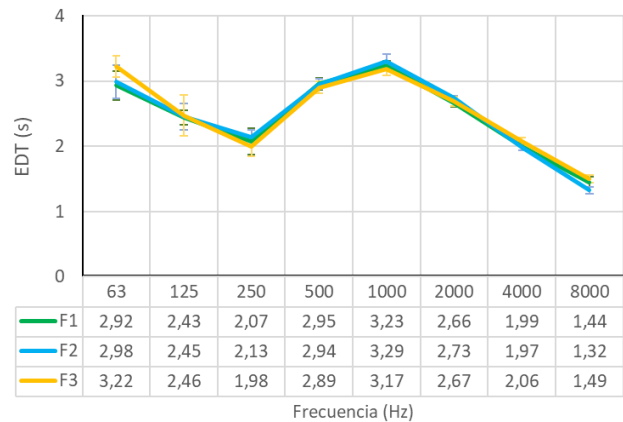


Figura 4: Tiempo de reverberación inicial EDT.

Analizando el parámetro de reverberación EDT de la Figura 4 se observa una diferencia de tiempo mínima entre las tres posiciones emisoras. Se aprecia una disminución del EDT en las frecuencias bajas cercanas a 250 Hz, y un aumento considerable en las frecuencias medias cercanas a 1 kHz. Las barras verticales muestran la variación entre los valores máximos y mínimos de reverberación obtenidos para los 6 puntos de medida en cada banda frecuencial. Se aprecia

una mayor dispersión espacial en baja frecuencia que va disminuyendo progresivamente a medida que alcanzamos las bandas de alta frecuencia.

A medida que aumenta la frecuencia, disminuye el tiempo de reverberación debido a que los materiales de la sala absorben más a alta frecuencia que a baja frecuencia, y además en alta frecuencia se suma la absorción propia del aire.

El EDT no es plano en frecuencia, lo que también afecta a los valores de Calidez (BR) y Brillo (Br). En las frecuencias medias comprendidas entre 500 Hz y 2 kHz se produce un aumento significativo de la reverberación. Además, ese intervalo frecuencial coincide con el espectro de la voz humana, por lo que habrá que tener en cuenta este aumento durante el proceso de ecualización de los espectáculos audiovisuales que se desarrollen en el recinto.

El aumento en las zonas de baja-media y media-alta frecuencia condiciona los valores de Brillo y Calidez. Ambos valores se encuentran por debajo de los niveles recomendados por L. Beranek [8] para recintos vacíos, lo que afectará a la percepción de la acústica del recinto en baja y alta frecuencia, generando una sensación de calidez y riqueza en armónicos insuficiente. Esta sensación se verá condicionada por el número de espectadores que acoja el evento, ya que cuanto más llena esté la iglesia, se producirá una mayor absorción del sonido por parte de los espectadores, y por tanto el tiempo de reverberación disminuirá notablemente.

En cuanto a claridad vocal, musical y definición, los valores se alejan del rango típico, por lo que no podremos esperar un buen resultado sonoro de los conciertos y teatros que se desarrollen en la iglesia con la acústica natural. La claridad vocal es inferior al valor recomendado por L. G. Marshall [10], la claridad musical sí está en el rango típico recogido en la ISO 3382 [1] para las tres posiciones de fuente sonora, pero se aleja del valor recomendado por L. Beranek [8] en la posición F1. Y en cuanto a la definición, los resultados para las tres posiciones de fuente no se encuentran entre los valores típicos recogidos en la ISO 3382 [1] y tampoco son cercanos a los valores recomendados por H. Arau [9].

Para mejorar la claridad vocal, musical y definición se recurre al sistema de refuerzo sonoro básico instalado en la iglesia para una correcta inteligibilidad de la palabra durante los actos litúrgicos, y además es necesario instalar un sistema de refuerzo sonoro para las representaciones teatrales y musicales, tanto para los espectadores en forma de P.A tipo line array, como para los actores en forma de monitores de escenario o in-ear.

Con la posterior simulación del recinto se podrá prever la instalación de un sistema de refuerzo sonoro que mejore estos parámetros durante las representaciones teatrales y musicales que se desarrollan en la iglesia, así como estudiar la configuración que mejor se adapte al espectáculo que se desarrolle.

4. DISEÑO DEL MODELO 3D Y VALIDACIÓN

La base del modelo geométrico, representada en la Figura 5, se ha realizado con el software Cinema 4D [12]. Este software permite exportar las superficies al software EASE [13], con el que se ha realizado la asignación necesaria de materiales y que servirá para estudiar la acústica del recinto.

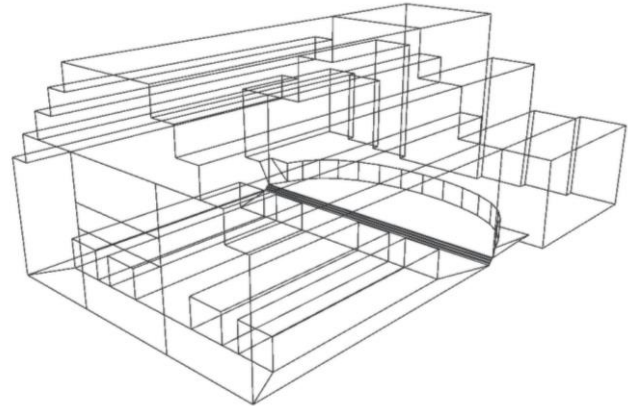


Figura 5: Perspectiva del diseño del modelo en Cinema 4D.

Realizar la base del modelo en Cinema 4D permitirá también tener una simulación del recinto para generar otros estudios como la escenografía o iluminación de los espectáculos teatrales que se desarrollen. Como no disponemos de planos digitalizados del interior ni acabados finales, se ha creado un modelo acústico lo más semejante posible a la realidad en base a la medición de las superficies y elementos geométricos del recinto con un distanciómetro láser y cinta métrica.

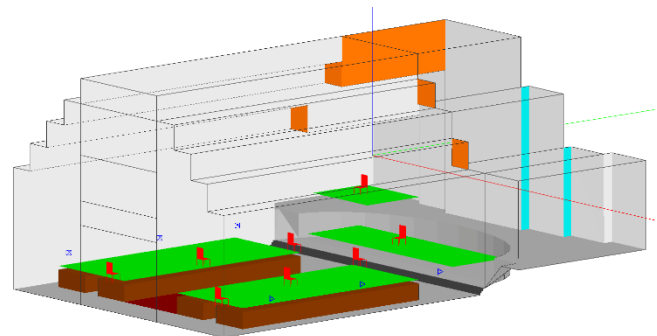


Figura 6: Prototipo 1 del diseño acústico en EASE.

Para ello se ha realizado una inspección visual de los materiales del recinto y se ha establecido que los materiales del prototipo son mármol, yeso, madera, moqueta y cristal. El modelo se ha ajustado mediante la convergencia entre la respuesta promedio del tiempo de reverberación EDT evaluado in-situ respecto al valor del tiempo de reverberación calculado por el programa a través de los materiales y geometría según Eyring.

En el prototipo inicial de diseño se ha partido de un modelo básico cuya geometría se ha completado en función de la comparación de los resultados simulados con los medidos in-situ hasta obtener un diseño más complejo con el que se ajuste al máximo el tiempo de reverberación.

El primer prototipo se muestra en la Figura 6, cuya geometría parte del diseño original. A este modelo se añadieron los materiales seleccionados tras la valoración del recinto y se realizó la primera simulación en EASE cuyo resultado se representa en color amarillo en la Figura 8. Con el primer análisis se consiguió una curva EDT semejante a la medida in-situ pero con los valores alejados de la realidad.

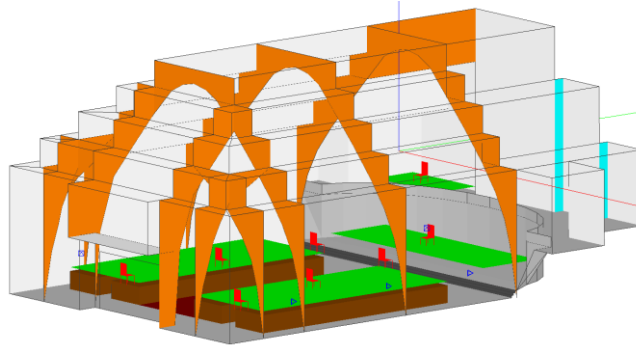


Figura 7: Prototipo 2 del diseño acústico en EASE.

El prototipo 2 se muestra en la Figura 7, y se realizó añadiendo elementos geométricos como los arcos de madera, además de ajustar la forma escalonada del techo en la zona de la puerta principal. Tras este análisis, comprobamos que el EDT disminuyó en torno a 1 segundo en la zona de baja-media frecuencia, como podemos ver representado en color naranja en la Figura 8.

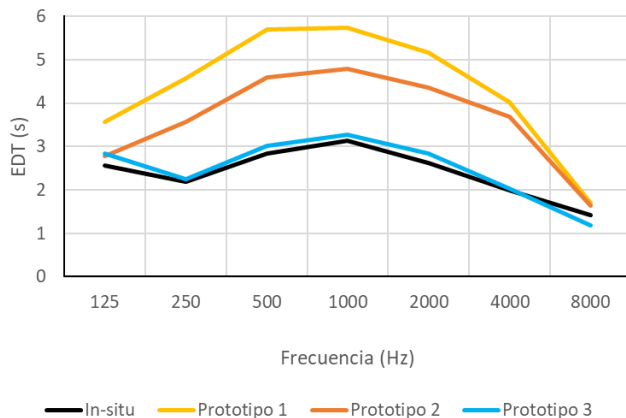


Figura 8: Comparativa entre RT medido in-situ y simulado.

Tras determinar que no había más elementos geométricos que añadir y obviando las superficies de cristal del techo debido a que son muy pequeñas en comparación con el resto de los materiales, las siguientes mejoras se realizaron

modificando las propiedades de los materiales, hasta conseguir el EDT representado en color azul en la Figura 8.

Con este prototipo se da por validado el modelo con el método de cálculo estadístico debido a que el tiempo de reverberación simulado presenta una desviación máxima del 5 % del JND. Se ha establecido un intervalo inferior al JND que marca los límites en los que se ha ajustado el tiempo de reverberación de la simulación.

A continuación, se calcula el EDT por el algoritmo CAESAR mediante el módulo AURA de EASE. Esta simulación se ha realizado con la configuración *Very High Resolution, Slow*, mediante la cual se han generado 1834000 partículas con una longitud de 2470 ms (*Extended, Slow*). Las superficies sin datos de difusión se han configurado con la opción por defecto *Default, S-Curve*.

En la Figura 9 se compara el EDT de la medida in-situ, representado en color negro, y el obtenido tras el ajuste por el método estadístico, representado en color azul, con el resultado de un primer análisis con AURA, representado en verde. Tras esta primera simulación con la que se ha obtenido un EDT muy superior al JND establecido, se ha añadido difusión a los distintos materiales que por su forma geométrica afectan en mayor medida a la difusión del sonido hasta conseguir el ajuste representado en color rojo en la Figura 9.

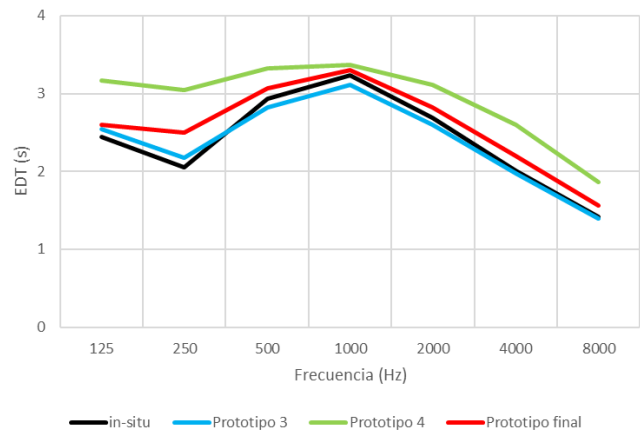


Figura 9: Ajuste del EDT con el módulo AURA.

La difusión añadida en el yeso de las paredes ha sido de un 50 % desde 1 kHz hasta un 80 % en 10 kHz. La difusión de la madera del área de audiencia ha sido un 60 % en 100 Hz hasta un 40 % en 2 kHz, y, por último, en el yeso del techo escalonado la difusión va desde el 80 % en 100 Hz hasta el 40 % en 4 kHz.

Siguiendo un modelo de difusión lineal entre las bandas de frecuencia, se consigue que el resultado del EDT mediante AURA se acerque más a los valores medidos in-situ y al EDT simulado mediante el modelo estadístico.

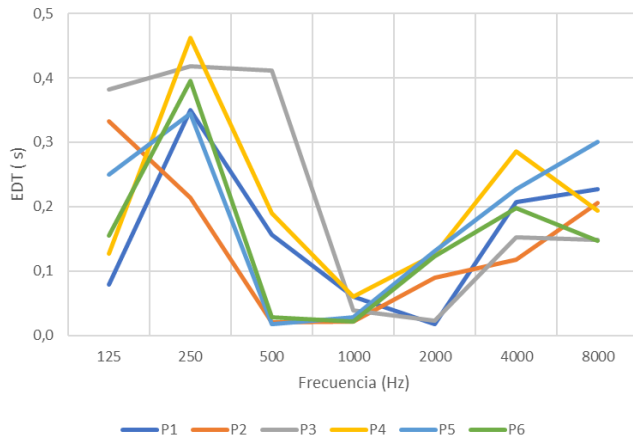


Figura 10: Diferencia entre EDT in-situ y simulado en AURA para cada posición de medida con la fuente F2.

En la Figura 10 se visualiza la diferencia entre el EDT promedio para cada punto de la medida in-situ con el promedio del resultado de la simulación con AURA para la fuente emisora F2. Se ha tomado esta fuente para realizar la comparación al tratarse de la posición en la que se ubica habitualmente el orador durante los actos litúrgicos, siendo la posición emisora más utilizada de entre las tres. Se comprueba que a baja frecuencia existe mayor diferencia de tiempo debido a la difusión del sonido.

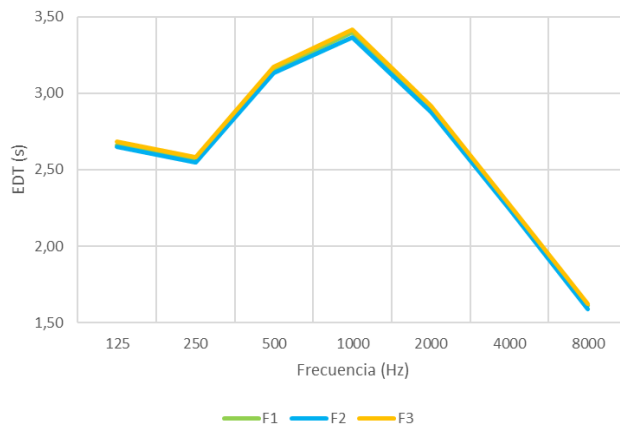


Figura 11: Tiempo de reverberación AURA en P3.

En la Figura 11 comparamos el EDT recibido en la posición P3, que corresponde con la posición de los técnicos de sonido e iluminación durante las representaciones teatrales y musicales. Como se puede apreciar, la diferencia de tiempos respecto de las tres posiciones de emisión es mínima, por lo que los técnicos percibirán el sonido emitido desde las tres posiciones de forma similar.

5. CONCLUSIONES

El análisis de los parámetros medidos ha permitido caracterizar acústicamente la Iglesia de San Julián de Cuenca. Se ha obtenido que la iglesia cumple con el nivel recomendado de ruido de fondo, sin embargo, los tiempos de reverberación resultantes son elevados, sobre todo en las frecuencias centrales de 500 Hz y 1 kHz. En estas frecuencias tendremos un problema debido a que en ellas el sonido reverbera más y son frecuencias importantes en el espectro de la voz humana.

En cuanto a Brillo y Calidez, para ninguno de estos parámetros nuestro resultado se encuentra dentro de los recomendados, por lo que no tendremos esa sensación de calidez o resalte de agudos.

Los resultados de calidez vocal, musical y definición tampoco se encuentran dentro de los valores recomendados. Esto se traduce en que puede haber problemas de comprensión y diferenciación entre voces e instrumentos durante las representaciones musicales.

A partir del diseño y simulación electroacústico de la iglesia, se podrá prever la instalación de un sistema de refuerzo sonoro que resuelva los problemas acústicos según el tipo de evento que albergue el recinto, permitiendo incidir especialmente en la posición principal del evento mediante el análisis individual de las distintas posiciones de medida.

Tras analizar los resultados obtenidos de la simulación por métodos estadísticos y geométricos, comprobamos que no es suficiente con ajustar el tiempo de reverberación medido in-situ con el obtenido mediante métodos estadísticos, ya que la dispersión de los materiales afecta a la difusión del sonido, como hemos comprobado mediante el cálculo con el algoritmo AURA-CAESAR.

6. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido posible gracias a la colaboración y ayuda de la Parroquia de San Julián de Cuenca.

7. REFERENCIAS

- [1] UNE-EN ISO 3382-1:2010. Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Salas de espectáculos. 2010.
- [2] UNE-EN IEC 60268-3:2018. Equipos para sistemas electroacústicos. Parte 3: Amplificadores.
- [3] UNE-EN IEC 60268-4:2018. Equipo de sistema de sonido. Parte 4: Micrófonos.
- [4] UNE-EN 60268-5:2004. Equipos para sistemas electroacústicos. Parte 5: Altavoces
- [5] DIRAC: Room acoustics software. <https://www.bksv.com/en/products/Analysis-software/acoustic-application-software/building-acoustics/room-acoustics-software-dirac>. Último acceso: 22 de agosto de 2023.

- [6] Ferreyra, S. P., & Elías, J. M. Análisis comparativo de parámetros acústicos de recintos, utilizando diferentes técnicas de medición de la respuesta al impulso.
- [7] Antoni Carrión Isbert. Diseño acústico de espacios arquitectónicos, volume 4. Univ. Politèc. de Catalunya, 1998.
- [8] L. Beranek. Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture. Springer, 2003.
- [9] Higini Arau. ABC de la Acústica Arquitectónica. Ceac Barcelona, 1999.
- [10] L. Gerald Marshall. An acoustics measurement program for evaluating auditoriums based on the early/late sound energy ratio. The Journal of the Acoustical Society of America, 96(4):2251-2261, 1994.
- [11] UNE-EN ISO 1996-1:2020. Acoustics. Description, measurement and assessment of environmental noise. Part 1: Basic quantities and assessment procedures. 2020.
- [12] Cinema4D. <https://www.maxon.net/es/productos/cinema-4d/cinema-4d/>. Último acceso: 22 de agosto de 2023.
- [13] EASE. <https://ease.afmg.eu/>. Último acceso: 20 de agosto de 2023.