



**FIA 2018**

**XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre**

## **ACÚSTICA VIRTUAL DE ESPACIOS RELIGIOSOS EN EL ECUADOR. ESTUDIO DE CASO: CAPILLA DE LA UNIVERSIDAD UTE.**

**PACS:** 43.55 Ka.

Jácome González, Lenin<sup>1</sup>; Durán Tenesaca, Eulalia<sup>1</sup>; Orellana Herrera, Zulema<sup>1</sup>; Atanasio Moraga, Pedro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad UTE; Facultad de Arquitectura y Urbanismo.

Rumipamba s/n y Bourgeois, 170147, Quito, Ecuador. Telf.: 593 22990800.

lenin.jacome@ute.edu.ec, eulalia.duran@ute.edu.ec, zulema.orellana@ute.edu.ec.

<sup>2</sup> Departamento de Física Aplicada, Escuela Politécnica, Universidad de Extremadura  
Avda. de la Universidad s/n, Cáceres, 10003, España.

pedroam@unex.es

**Palabras Clave:** Acústica Arquitectónica, Capilla, Simulación Acústica.

**Keywords:** Architectural Acoustics, Chapel, Acoustic Simulation

### **ABSTRACT**

This work contains a planimetric drawing of University UTE's Chapel which dates back to the end of the 19th century. The 3D model was built using AutoCAD and SketchUp and then exported to ODEON in order to perform an acoustic simulation. The parameters obtained were: Reverberation Time, Vocal Clarity, Musical Clarity, Definition, STI (Speech Transmission Index), RASTI (Rapid Speech Transmission Index) which allowed to make a characterization of the sound quality of the Chapel and compare it with the suggested values. In this analysis, the Reverberation Time and STI were considered in a preliminary way.

### **RESUMEN**

En este trabajo se realizó un levantamiento del interior de la Capilla de la Universidad UTE, la cual data de finales del siglo XIX. Con la información obtenida se construyó un modelo en 3D usando AutoCAD y SketchUp cuyo resultado se exportó a ODEON con el fin de realizar una simulación acústica. De ella se obtuvieron parámetros acústicos tales como Tiempo de Reverberación, Claridad vocal, Claridad musical, Definición, STI (Speech Transmission Index), RASTI (Rapid Speech Transmission Index), los mismos que permitieron realizar una caracterización de la calidad sonora de la Capilla y compararla con los valores sugeridos. Para este análisis se consideró de forma preliminar el Tiempo de Reverberación y el STI.

### **INTRODUCCIÓN**

La acústica arquitectónica tiene sus inicios desde el siglo I a.C., donde Marco Vitrubio describió en sus escritos varios diseños para mejorar la acústica de los antiguos teatros romanos. Por otra parte, la acústica arquitectónica moderna, nació a finales del siglo XIX gracias al físico Wallace

## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

Clement Sabine considerado el padre de la acústica arquitectónica. Sabine tras el desarrollo del proyecto Boston Symphony Hall estableció una fórmula de cálculo del tiempo de reverberación, la misma que se consideró para una estimación inicial en el recinto estudiado [1].

La acústica de recintos religiosos constituye uno de los campos de la acústica arquitectónica en los que se pueden aplicar simulaciones virtuales, cuyos resultados vayan enfocados no solamente a la construcción de nuevas edificaciones religiosas sino también a la restauración de edificaciones antiguas que pueden incluso ser parte del patrimonio histórico y cultural de las ciudades. [2]

El uso de modelos acústicos virtuales, permite complementar la caracterización acústica de ambientes ya que con ellos se tiene la posibilidad de estudiar diferentes escenarios con el fin de mejorar o adaptar las condiciones acústicas, esto ha dado como resultado varios trabajos en los que las edificaciones evaluadas son iglesias, capillas o catedrales [2] [3].

En el Ecuador, hay muy pocos estudios en los que se evalúa acústicamente este tipo de ambientes [4] y menos aun usando la opción de caracterización acústica virtual, por lo que este trabajo pretende ser pionero en dicha área.

Hoy en día existen diversos programas que permiten ejecutar simulaciones virtuales. En este estudio se empleó el programa ODEON A/S, software que permite obtener varios parámetros acústicos para la caracterización acústica de ambientes [5].

Para la evaluación acústica es importante considerar el tamaño de la iglesia, más específicamente el volumen del recinto. Este está relacionado con la cantidad de fieles que ocupen dicho espacio. El procedimiento constructivo en edificios históricos determina implícitamente la relación entre la anchura, longitud y altura [2].

## METODOLOGÍA.

### Descripción del sitio

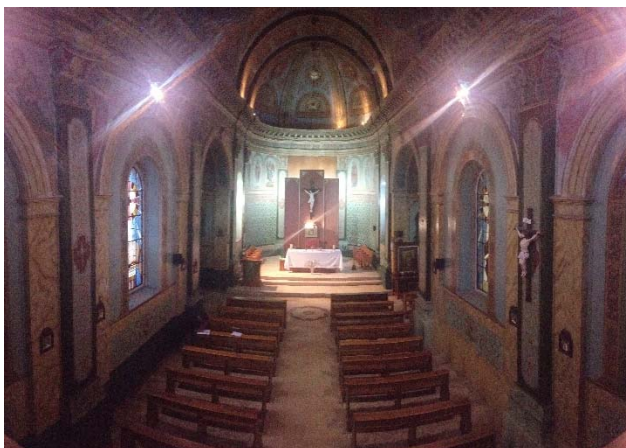


Figura 1. Interior de la Capilla - UTE

En el sector centro – norte de la ciudad de Quito en Ecuador, se encuentra localizada la Universidad UTE, la cual alberga en su interior una capilla que data de mediados del siglo XIX. Fue construida con motivo de la llegada a la ciudad de las religiosas de los Sagrados Corazones y de la adoración perpetua. Su edificación revela interesantes detalles, como el hecho de haber sido construida sobre piedras volcánicas de enorme tamaño, lo que ocasionó que sus cimientos hayan sido fabricados ajustándose a la realidad física del terreno, manteniendo por lo demás todas las características propias de esta

edificación. Sus paredes son de adobe, lo cual ha permitido que a lo largo del tiempo, y a pesar de haber estado sujeta a varios movimientos sísmicos, no existan cuarteamientos o grietas. A inicios del siglo XX, esta capilla de tipo romano fue restaurada y redecorada por el padre alemán,

## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

Thomas Brunig el mismo que realizó varios frescos sobre la pintura original. Esto se observa en la figura 1.

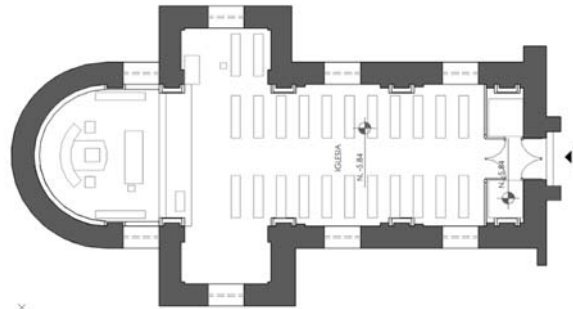


Figura 2. Levantamiento planimétrico planta capilla Universidad UTE

La morfología de la capilla responde a una capilla de planta cruz latina propia del Bizancio (figura 2), con una cúpula sobre el altar en donde se pueden observar también varios frescos. Sobre la puerta de ingreso, se halla ubicado el coro. En lo que respecta a los materiales se tiene que el piso de la planta principal es de mármol, el coro de madera, las paredes de adobe, con revestimiento de pintura y las ventanas con vitrales de temas religiosos. Un detalle particular, es que esta se halla absolutamente dentro del campus y por tanto no se puede observar su fachada, lo que se puede verificar en la figura 3.



Figura 3. Implantación de la capilla

### El modelo de simulación

Con el fin de ejecutar la simulación acústica se procedió, en primera instancia, al levantamiento planimétrico y verificación de medidas de la iglesia obteniéndose de ello los planos en 2D. Posteriormente, se realizó la modelación en 3D, usándose para el efecto, en una fase inicial AutoCAD con el fin de representar las superficies más complejas. En una segunda fase, el modelo fue exportado a SketchUp que permite construir caras sin límite de vértices, y que es

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

compatible con el software para la simulación [5]. En este programa, se asignó las capas correspondientes a los diferentes materiales que componen la capilla.

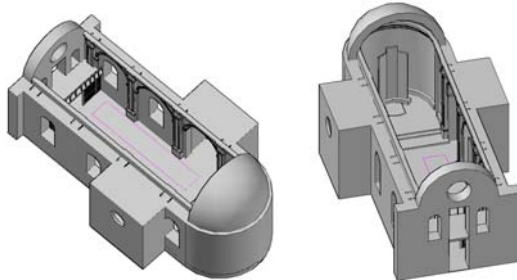


Figura 4. Vistas de modelo 3D en AutoCAD

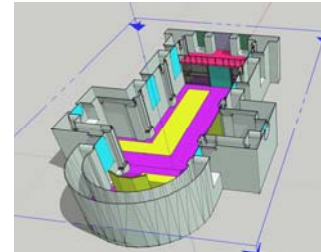


Figura 5. Esquema de capas según diferente tipología de materiales en SketchUp

Una vez asignadas las capas en SketchUp se exportó el modelo 3D al software para simulación acústica, ODEON, en donde inicialmente, se verifica que no tenga solapamientos innecesarios entre superficies, así como espacios abiertos.

La tabla 1 muestra los materiales definidos así como los coeficientes seleccionados para tal fin.

DATOS		COEFICIENTES DE ABSORCIÓN POR CADA BANDA								CÓDIGO ODEON
ELEMENTO	MATERIAL	A [m <sup>2</sup> ]	125 [Hz]	250 [Hz]	500 [Hz]	1000 [Hz]	2000 [Hz]	4000 [Hz]	8000 [Hz]	
Columnas hall	Wood, 25 mm with air space	2.65	0.19	0.14	0.09	0.06	0.06	0.05	0.05	3065
Suelo coro	Wooden floor on joists	35.35	0.15	0.11	0.10	0.07	0.06	0.70	0.70	3004
Suelo capilla general	Marble or glazed tile	256.68	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	2001
Ventanas capilla general	Ventana*	39.08	0.25	0.18	0.14	0.09	0.06	0.05	0.05	13
Puerta hall	Glass, ordinary window glass	5.52	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04	0.04	10006
Puertas entrada y ventanas coro	Solid wooden door	9.68	0.14	0.10	0.06	0.08	0.10	0.10	0.10	10007
Paredes y techo capilla general	Piedra más pintura de revestimiento*	1637.36	0.02	0.02	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07	12
Rejas	Aluminium. AL-21 (Ø 1.0 mm. p = 22.7 %) - 0.2 mm	4.95	0.07	0.21	0.44	0.79	0.80	0.58	0.58	5200
Pasamanos coro	Wooden floor on joists	2.50	0.15	0.11	0.10	0.07	0.06	0.70	0.70	3004
Mobiliario	Empty chairs, upholstered with leather cover	81.76	0.40	0.50	0.58	0.61	0.58	0.50	0.50	11005

Tabla 1. Materiales y coeficientes de absorción

Como insumo, y en una primera fase, para los materiales “Ventana” y “Piedra más pintura de revestimiento” se emplearon materiales de iglesias pre-cargadas en ODEON, más precisamente de la Mezquita de Süleymaniye, localizada en Estambul, Turquía debido a la similitud de dichos materiales entre ambos templos.

Para el resto de materiales se tomó en cuenta los incluidos en la base de datos del programa.

Es importante mencionar que se consideró una superficie equivalente para el mobiliario de la capilla (banacas), cuyo material corresponde a la madera.

### Posiciones Fuente - Receptor

Se realizó un estimado del tiempo de reverberación de la capilla que determinó las posiciones de las fuentes y las distancias de estas con los micrófonos correspondientes. La distancia mínima calculada fue de 4.61 m.

Se consideró cuatro fuentes sonoras y por cada una tres micrófonos (12 combinaciones), cuyas posiciones se colocaron según la norma ISO 3382 – 1, para recintos cerrados de espectáculos [6] tomando en cuenta además las ubicaciones reales de la audiencia versus el orador para



## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

definir así, las diferentes posiciones de fuentes sonoras y micrófonos cuyas alturas fueron de 1.6 m y 1.2 m respectivamente (medidas desde el suelo). La primera fuente se la ubicó en la parte central de la iglesia, la segunda en la parte final, la tercera junto al altar y la cuarta en el área del coro [3]. El detalle se muestra en la tabla 2 así como en la figura 6.

POSICIÓN	Combinación 1				Combinación 2				Combinación 3				Combinación 4			
	F1	M1	M2	M3	F2	M4	M5	M6	F3	M7	M8	M9	F4	M10	M11	M12
X [m]	12.80	7.00	8.30	8.20	18.60	12.80	12.60	13.00	5.60	12.00	13.80	18.00	21.40	16.20	11.40	13.40
Y [m]	6.72	5.92	5.00	7.40	7.20	5.92	8.48	5.60	6.72	8.16	4.96	5.44	8.32	8.16	6.24	8.16
Distancia Fuente-micrófono [m]	-	5.85	4.82	4.65	-	5.94	6.14	5.82	-	7.93	9.76	5.36	-	5.20	10.21	8.00

Tabla 2 Distancia Fuente-Micrófono



Figura 6. Posiciones en capilla de fuentes y micrófonos

### Configuraciones para la simulación

Para llevar a cabo el proceso de simulación se debió configurar algunos parámetros, los cuales se presentan a continuación:

- Configuración para el cálculo: Precisión
- Longitud del impulso: 4000 [ms]
- Número de rayos: 80000
- Emisión de la fuente: 90 dB
- Tipo de fuente: Omnidireccional

El modelo dentro de ODEON estuvo constituido por 8741 superficies. Un grupo de ellas correspondió a los elementos curvos, los mismos que dentro de la asignación de materiales, se les configuró con la etiqueta de "Fraccional" ya que al no hacerlo la gran cantidad de superficies planas que forman la superficie curva, dispersará demasiado el sonido y dicha superficie no se comportaría como una sola [5].

### RESULTADOS

En la tabla 3 se muestra los valores promedio correspondientes a los tiempos de reverberación EDT,  $T_{20}$  y  $T_{30}$  para la capilla considerando las doce combinaciones ya indicadas. Las bandas de frecuencias tomadas en cuenta fueron desde la de 125 Hz hasta la de 8000 Hz. Se pueden observar además los valores de desviación estándar promedio por banda, el valor promedio de los tiempos de todas las bandas, el valor  $TR_{mid}$  calculado entre las bandas de 500 Hz y 1000 Hz y la desviación estándar promedio calculada entre los valores obtenidos para todas las bandas.

## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIAACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

A más de ello en la tabla 4, se presentan los valores promedio de STI y RASTI obtenidos de ODEON.

EDT										
BANDA [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000	EDT promedio [s]	$\sigma$ EDT promedio	EDT mid [s]
promedio [s]	2.93	2.75	2.04	1.76	1.70	1.50	0.90	1.94	-	1.90
$\sigma$ EDT	0.05	0.05	0.06	0.07	0.07	0.07	0.06	-	0.06	
T <sub>20</sub>										
BANDA [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000	T <sub>20</sub> promedio [s]	$\sigma$ T <sub>20</sub> promedio	T <sub>20</sub> mid [s]
promedio [s]	2.87	2.70	2.00	1.72	1.68	1.47	0.88	1.90	-	1.86
$\sigma$ T <sub>20</sub>	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	-	0.01	
T <sub>30</sub>										
BANDA [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000	T <sub>30</sub> promedio [s]	$\sigma$ T <sub>30</sub> promedio	T <sub>30</sub> mid [s]
promedio [s]	2.87	2.70	2.00	1.72	1.68	1.47	0.88	1.90	-	1.86
$\sigma$ T <sub>30</sub>	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	-	0.00	

Tabla 3.-Tiempos de reverberación EDT, T<sub>20</sub>, T<sub>30</sub> promedio, obtenidos de la simulación

STI		RASTI	
Promedio	0.46	promedio	0.45
$\sigma$	0.03	$\sigma$	0.03

Tabla 4. Valores promedio de STI y RASTI promedio, obtenidos de la simulación

Un dato importante para el posterior análisis constituye el volumen del recinto, el cual es de 2897.04 m<sup>3</sup>, equivalente a 102.308 x 10<sup>3</sup> pies<sup>3</sup>.

## ANÁLISIS

En el presente estudio, se ha considerado tres criterios en lo que respecta a los tiempos de reverberación sugeridos para iglesias, capillas y catedrales. En la tabla 5 se presentan los mismos considerando el valor del volumen del recinto [7], [8], [9].

Criterio (volumen 2897.04 m <sup>3</sup> )	T <sub>R</sub> en bandas de 500Hz, 1000Hz y 2000Hz [s]
Carrión, 1998	2.00 - 3.00
Long, 2006	~ 2.05
Ermann, 2015	~ 1.88

Tabla 5. Tiempos de reverberación recomendados para espacios de uso religioso

Considerando los T<sub>R mid</sub> obtenidos de la simulación, para EDT, T<sub>20</sub> y T<sub>30</sub>, se puede verificar que solamente para el criterio propuesto por Ermann [9] el recinto tendría un tiempo de reverberación adecuado. Para los otros dos criterios, el T<sub>R mid</sub> estaría ligeramente debajo del valor sugerido. El detalle para cada valor se lo puede verificar en la tabla 6.

		Carrión	Long	Ermann	
EDT mid [s]	1.90	no cumple	no cumple	cumple	
T <sub>20</sub> mid [s]	1.86	no cumple	no cumple	cumple	
T <sub>30</sub> mid [s]	1.86	no cumple	no cumple	cumple	
EDT promedio [s]	1.94	no cumple	no cumple	cumple	
T <sub>20</sub> promedio [s]	1.90	no cumple	no cumple	cumple	
T <sub>30</sub> promedio [s]	1.90	no cumple	no cumple	cumple	

Tabla 6. Evaluación de los T<sub>R</sub> obtenidos con respecto a los valores recomendados

## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

En lo que respecta a la inteligibilidad del habla, se tomó en cuenta los índices STI y RASTI, cuya tabla de valoración propuesta por Houtgast & Steeneken [10], se muestra en la tabla 7.

Escala STI/RASTI	
> 0,75	excelente
0,6 - 0,75	bueno
0,45 - 0,6	regular
0,3 - 0,45	pobre
< 0,30	malo

Tabla 7. Escala de evaluación de STI/RASTI

Se verifica que el STI se ubica en el rango correspondiente a “regular” ya que el valor promedio obtenido fue de 0.46. De la misma manera el RASTI se encuentra en la misma categoría al ser 0.45 el valor promedio. Por tanto, la capilla tiene una calidad acústica para la transmisión del mensaje hablado no muy adecuada.

## CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo, se puede concluir lo siguiente:

El tiempo de reverberación obtenido mediante la simulación, da un valor promedio que se halla en un rango un poco menor al sugerido por Carrión [7] y por Long [8] en un valor que va desde 0.1 [s] hasta 0.14 [s] en el primero y de 0.15 [s] hasta 0.19 [s] en el segundo. Considerando el criterio de Ermann, el tiempo obtenido tiene un rango de diferencia promedio con el mismo de  $\pm 0.03$  [s], de lo que se concluye que en este caso si cumple con la sugerencia de dicho autor. En general se puede concluir que la sala tiene una calidad acústica que roza los límites mínimos sugeridos y sería conveniente el realizar un acondicionamiento ya que el  $T_R$  sería menor si se toma en cuenta el ambiente ocupado.

Por otra parte, en lo que tiene que ver con la inteligibilidad del habla el STI y el RASTI se hallan dentro de la escala correspondiente a “regular”, por tanto el mensaje hablado no se transmite de forma adecuada en este recinto. Una forma de mitigar esta desventaja es instalar un apoyo electroacústico, el cual de hecho existe.

Es conveniente la realización de un análisis tomando en cuenta los otros índices acústicos obtenidos en la simulación, específicamente la Claridad vocal, Claridad musical y Definición, lo cual permitiría tener más elementos para evaluar el ambiente y que se lo realizará en una fase posterior.

Por último, en el futuro queda abierta la posibilidad de obtener las medidas in Situ de la capilla y contrastar con los valores simulados. Esto permitiría ajustar los coeficientes de absorción de los diferentes materiales considerados en este estudio preliminar.



**FIA 2018**

**XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre**

## **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] W. C. Sabine, *Collected Papers On Acoustics*, Cambridge: Harvard University Press, 1923.
- [2] U. Berardi, «Predicción de las variaciones espaciales en la acústica de diferentes tipologías de iglesias,» *Revista de Acústica*, vol. 42, nº 3 y 4, pp. 8-16, 2011.
- [3] R. Suarez, J. Sendra, J. Navarro y A. León, «Espacios acoplados en la Mezquita,» Cordova, 2006.
- [4] P. Chiriboga, *Caracterización de Parámetros Acústicos de las iglesias ubicadas en la "Calle de las Siete cruces" del centro histórico del Distrito Metropolitano de Quito*, Quito, 2017.
- [5] C. Christensen y G. Koutsouris, *Odeon Room Acoustics Software Version 13. Full User's Manual*, Lyngby, 2015.
- [6] UNE - EN ISO 3382 - 1, *Acústica, Medición de parámetros acústicos en recintos: Sala de espectáculos*, Madrid, 2010.
- [7] I. Carrión, *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*, Barcelona, 1998, pp. 69-96-140.
- [8] M. Long, *Architectural Acoustics*, San Diego, CA: Elsevier Academic Press, 2006.
- [9] M. Ermann, *Architectural Acoustics Illustrated*, New Jersey, 2015.
- [10] T. Houtgast y H. Steeneken, « Evaluation of speech transmission channels usign artificial signals,» *Acustica*, pp. 355-367, 1971.