



REFUERZO SONORO EN BOVEDAS Y CÚPULAS

José Eduardo Flores Ortega

Parroquia de San Miguel Arcángel

jefo_1964@yahoo.com.mx

Ricardo Flores González

Diócesis de Tula

riflgo@hotmail.com

Román Bravo Cadena

Parroquia de San Miguel Arcángel

romanbravoc@hotmail.com

Resumen

Este trabajo tiene como objetivo determinar experimentalmente los parámetros de diseño para la sonorización de recintos abovedados con elevado tiempo de reverberación. Se estudian las características acústicas de las bóvedas, se realiza la medición de las señales acústicas aplicadas, nivel sonoro y articulación y se realiza el diseño de los sistemas de sonorización para recintos abovedados.

Palabras clave: sonorización, bóvedas, recintos, refuerzo, reverberación

En este trabajo se presenta un método para la sonorización de recintos más o menos grandes o recintos en donde la inteligibilidad de la voz presenta grandes dificultades de audición, como son los templos y auditorios en donde tienen lugar las celebraciones de actos litúrgicos (teatrales, etc.), aquellos recintos en los que la majestuosidad de las construcciones, las impresionantes bóvedas y los grandes muros con superficies bastante pulidas, se usan a diario y tienen condiciones de audición bastante deficientes.

En estos recintos la palabra tiene un puesto de primer orden, <<a la iglesia se viene no solo a ver y a orar, sino a escuchar al celebrante, al lector, al conferencista o al que canta>>. La acústica ha sido muy descuidada, pero es en parte explicable, porque los arquitectos son como se ha dicho <<hombres de ojos>>, su vocación se definió, en la mayoría de los casos, por su sensibilidad para lo plástico y lo visual, pero, puesto que se trata de crear un espacio habitable, el arquitecto debe tener presente que el espacio únicamente óptico, no funciona para la audición, en la mayoría de los casos.



El problema de la acústica debe ser tan importante, como el de la visibilidad, que tanto preocupa hoy a cuantos interesados por hacerse entender.

Sin embargo, este problema apenas se ha tenido presente hasta nuestros días. <<Primero se edificaba; luego se subía al púlpito para hacer la prueba. *Si por casualidad se oía, bien, se felicitaba al arquitecto; si no, mala suerte*>>.

Este problema es tanto más urgente, dado que la experiencia ha demostrado que muchas veces un catálogo de suministros de construcción, no soluciona nada cuando la arquitectura ha quedado ya terminada. Tampoco hay que minimizar la cuestión, pensando que la reducción del espacio requerido por la pastoral litúrgica de nuestro tiempo, soluciona automáticamente el problema, pues el << cubismo >> de los espacios y volúmenes en nuestros templos, con sus superficies lisas y sus cristalerías crea una nueva dificultad.

Por último, se dará especial atención a los templos religiosos, porque son recintos que se utilizan a diario y son estructuras arquitectónicas, con techos que tienen características especiales con impresionantes bóvedas y monumentales cúpulas.

Reflexiones históricas

¿Por qué en el pasado no se juzgó útil legislar sobre la disposición de las iglesias para la celebración del culto? La liturgia y la arquitectura religiosa han evolucionado en el curso de los siglos.

¿La evolución de una, no ha influido en la evolución de la otra? A riesgo de decepcionar, se tiene que confesar que es muy difícil descubrir correspondencias entre esta doble evolución, porque muy pronto el pueblo dejó de participar activamente en la liturgia.

Ejemplar 23. Julio-diciembre de 2020

Para reducir a Occidente, no se debe olvidar que si en el siglo IV vio como la liturgia se comenzó a celebrar en los edificios de tipo basilical adaptados al culto cristiano, los siglos V y VI conocieron las primeras incursiones de los bárbaros y que en los siglos IX y X la segunda oleada de las invasiones acabó de romper los cuadros de la cultura en que había nacido la Liturgia Roman. Desde el siglo VIII el pueblo ya no entiende Latín. Además, ante la impotencia de la Iglesia para elaborar una práctica de la penitencia compatible con la vida, los fieles no tardaron en dejar de comulgar excepto en tres o cuatro fiestas mayores del año. Por estas dos razones la celebración de la eucaristía llegó a ser algo propio de los clérigos; el pueblo no aportaba sino una asistencia *pasiva* (y no interesa que se entienda).

La piedad popular se dirigirá en adelante a una interacción alegórica del espectáculo ritual. Lleno de temor ante la Majestad Divina (entonces crecen los edificios como símbolo de grandeza y superioridad), irá cada vez más hacia los mediadores del perdón, que son los santos y pondrá en el centro de su oración la invocación por los difuntos. La evolución de la disposición de los templos en la Edad Media, estará menos marcada por la evolución de los ritos y más por el doble factor que se acaba de señalar; se organizará el coro en vista de la celebración de la liturgia por el clero (que se colocará arriba y atrás, siempre buscando la perfección geométrica de la estructura); se multiplicarán las Capillas y los Altares en Honor de los Santos y la Celebración de las Misas privadas por los difuntos. Solamente después del Concilio de Trento, con la reforma católica, se manifestará en la disposición de los templos un cuidado de “*Pastoral Litúrgica*”.

La instrucción general del Misal Romano, trata de la disposición y de la decoración de las iglesias para la celebración de la Eucaristía.



Este texto, que reproduce con algunas variantes las disposiciones de una instrucción de 1964, constituye una novedad en el Derecho Litúrgico. Sin duda, el Ceremonial de los Obispos, daba un cierto número de precisiones sobre la disposición del santuario para las misas solemnes del Obispo, pero esta obra data de 1600 y no tenía la intención de innovar; se contentaba con el buen uso del lugar. La reglamentación de 1970, trata por el contrario, de crear un cuadro favorable a la participación del pueblo en la celebración.

Las primeras palabras de la instrucción promulgada por el Papa Paulo VI “*Populo congregatō*” (Habiéndose reunido el pueblo), revela su objetivo. En efecto, según el, el Sacrosanto Concilio Ecueménico Vaticano II, la celebración de la Eucaristía pide la participación plena, consciente y activa de todo el pueblo de Dios, bajo la presidencia del Sacerdote rodeado de ministros.

Técnicas de Sonorización de las Bóvedas y Cúpulas

Puesto que en todo lo que se refiere a la oratoria se debe buscar siempre lo mejor, se debe admitir que allí, donde se logra una buena sonorización, esta tiene notables ventajas sobre la palabra normal.

En templos y auditorios abovedados de capacidad media, si es posible hacerse escuchar con voz normal, muchas veces es a condición de hablar con una intensidad de voz que lleve el tono grandilocuente y al patetismo exagerado, pero en recintos grandes es casi imposible. La asamblea necesita hoy en día, una exposición sencilla, directa, comunicativa y esto lo facilitará la sonorización. Además, es especialmente útil para los momentos de reflexión y oración improvisada en boca del comentarista; la sonorización es la que permitirá

hacerse escuchar de todos en un tono recogido, discreto, casi confidencial.

Cuando se emplean medios electroacústicos, debe cuidarse esmeradamente su acertada disposición, de manera que se integren en el sistema acústico-estructural del recinto. <<*Su fin deberá ser siempre reforzar a la palabra, nunca sustituirla*>>.

Y con esto, los fenómenos de *focalización* y *deslizamiento* acústico, serán resueltos.

La Fase Acústica

La fase es la cualidad del método para sonorizar la voz, pues debido a ella, es como se logra controlar el efecto de las bajas frecuencias y conseguir, un porcentaje superior de articulación de palabras en recintos abovedados.

Al colocar las fuentes sonoras a poca distancia entre uno y otra y superponerse las ondas de frecuencias bajas, el frente de onda conseguido es más o menos plano, con cierto rizo, que disminuirá al aumentar el número de afuentes sonoras en línea, a lo largo de una nave. La excitación acústica de un lado de la nave, deberá tener la misma fase y por consiguiente, los del extremo contrario la fase opuesta.

Como las fuentes sonoras deben estar colocadas en un ángulo vertical, de manera que la mayor parte de radiación acústica este dirigida sobre los escuchas, las frecuencias medias y altas serán prácticamente absorbidas por el público, debido a su direccionalidad y decaimiento de potencia y las bajas frecuencias tendrán un área de afección mayor, pero como no contribuyen a la escucha en los recintos abovedados y dificultan la inteligibilidad del sonido, deben ser atenuadas lo más posible y la energía remanente debe formar un colchón acústico en las áreas en donde no afecte.

Ahora bien, partiendo de la ecuación

$$\ddot{x} + \omega^2 x = 0 \quad (1)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (2)$$

Si se resuelve usando series de Fourier, se tendrá una solución homogénea de la siguiente forma

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\begin{matrix} A_n \cos nt + \\ B_n \sin nt \end{matrix} \right) \sin nx \quad (3)$$

Donde

$$A_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(x) \sin nx dx \quad \text{y} \quad B_n = \frac{2}{n\pi} \int_0^{\pi} g(x) \sin nx dx \quad (4)$$

y de la solución particular, considerando sólo hasta $n=2$, para que la salida del sonido de un lado del sistema sea

$$F(t) = A \sin(2\pi ft) \quad (5)$$

y del lado opuesto

$$F(t) = A \sin(2\pi ft + \pi) \quad (6)$$

$$A \sin(2\pi ft) - A \sin(2\pi ft + \pi) = 0 \quad (7)$$

consecuentemente

$$A = 0$$

que es, precisamente, la solución buscada.

La colocación para instalar las fuentes sonoras, debe ser de manera que la voz natural y la amplificadas, lleguen al oído del escucha como viniendo de una única fuente, pues lo ideal sería, que los oyentes no cayeran en la cuenta de que se utiliza un sistema electroacústico. Este punto, en particular constituye la solución al desagradable *efecto Larsen*.

Pruebas de Articulación de voz

Las pruebas que se realizaron fueron hechas; la primera con voz natural y la segunda con el sistema de refuerzo acústico instalado.

Primera Prueba. La distribución de los puntos de escucha como se observa en la figura, con el criterio tal que se encontraran distribuidos a lo largo del recinto, considerando las posiciones críticas de escucha como se observa en el plano.

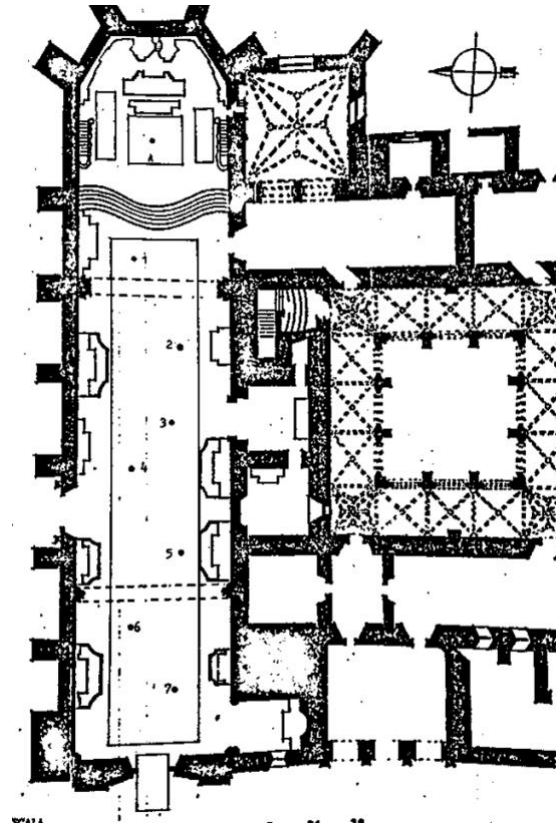


Figura 1. Distribución de puntos. Tomada del Catalogo de templos religiosos del estado de Hidalgo

Las dimensiones del recinto de estudio son: 60m de longitud, 15m de ancho y una altura promedio de 26m (Templo de San Miguel Arcángel, Ixmiquilpan, Hidalgo, México)

La prueba se realizó con una lista de 100 sílabas aleatorias, seleccionadas de los textos que se acostumbra leer en el recinto. La persona que realizó la lectura fue un orador, no se consideró la ortografía, ni letras con el mismo sonido. Los testigos de la prueba fueron personas con buenas características auditivas.

Resultados de la prueba 1. En promedio 60% de articulación. Las lecturas obtenidas se muestran en la tabla 1 y figura 2.

Tabla 1. Prueba de articulación natural

AERICULACIÓN	
PUNTOS	ARTICULACIÓN
1	79%
2	68%
3	60%
4	57%
5	54%
6	52%
7	50%

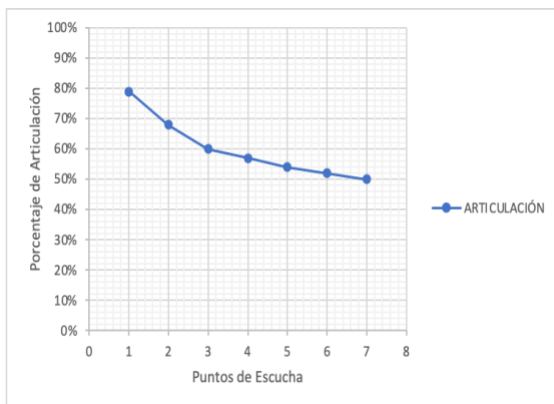


Figura 2. Articulación natural

La medición de intensidad en bandas de octavas con fuente de ruido rosa, colocada en la mesa del altar principal, se generó con un sistema de excitación lineal, ver registro en tabla 2.

Tabla 2. Medición con ruido rosa sin refuerzo

FREC. Hz	PUNTOS DE MEDICIÓN dB							
	A	1	2	3	4	5	6	7
31.1								
63								
125	0	-25	-29	-36	-36	-33	-38	-36
250	0	-25	-35	-36	-39	-36	-38	-36
500	0	-25	-38	-36	-39	-39	-39	-39
1000	0	-28	-41	-42	-42	-42	-45	-45
2000	0	-25	-41	-42	-42	-42	-42	-42
4000	0	-19	-38	-42	-42	-42	-42	-42
8000	0	-28	-47	-51	-52	-51	-51	-51
16000								

Así, la figura 3 muestra la gráfica de distribución.

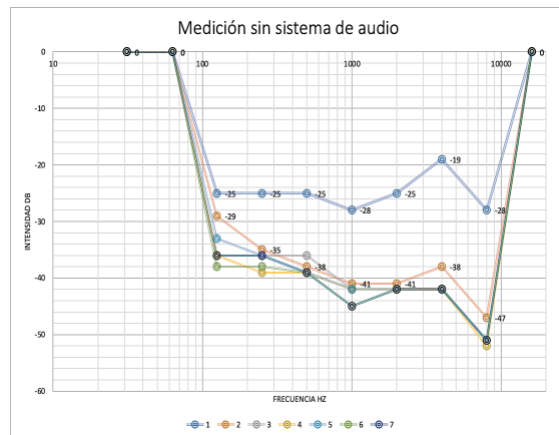


Figura 3. Ruido rosa con fuente central

Segunda prueba. Se realizó con las mismas condiciones que la prueba 1, pero con el equipo de refuerzo sonoro instalado y calibrado. El criterio fue el mismo que para la primera prueba, se empleó la misma lista de palabras, pero en diferente orden.

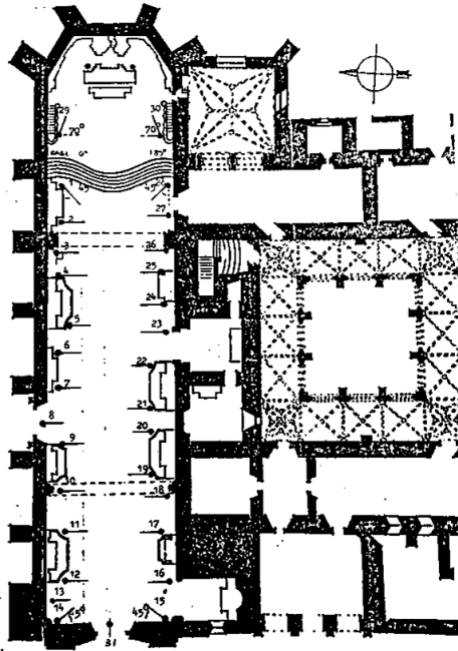


Figura 4. Distribución de fuentes sonoras. Tomada del Catalogo de templos religiosos del estado de Hidalgo

Resultados de la prueba 2. En promedio 99% de articulación. Las lecturas obtenidas se muestran en la tabla 3 y figura 5.

Tabla 3. Prueba de articulación con refuerzo

ARTICULACIÓN	
PUNTOS	ARTICULACIÓN
1	99%
2	98%
3	98%
4	99%
5	99%
6	98%
7	99%

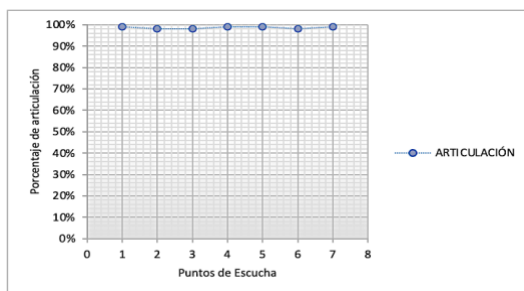


Figura 5. Articulación con refuerzo sonoro
Ejemplar 23. Julio-diciembre de 2020

La medición de intensidad en bandas de octavas, con fuente de ruido rosa, se generó con el sistema de excitación lineal con la distribución indicada en la figura 4, ver registro en tabla 2.

Tabla 2. Medición con ruido rosa con refuerzo

FREC. Hz	PUNTOS DE MEDICIÓN dB						
	1	2	3	4	5	6	7
31.1	-24	-24	-24	-24	-24	-24	-24
63	-24	-24	-24	-24	-24	-24	-24
125	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10
250	0	0	0	0	0	0	0
500	0	0	0	0	0	0	0
1k	0	0	0	0	0	0	0
2k	0	0	0	0	0	0	0
4k	0	0	0	0	0	0	0
8k	0	0	0	0	0	0	0
16k	0	0	0	0	0	0	0

En la tabla 6 se muestran las lecturas obtenidas.

Todas las mediciones fueron hechas con equipo NTi Spectrum Analyzer XL2 y Minirator MR-PRO.

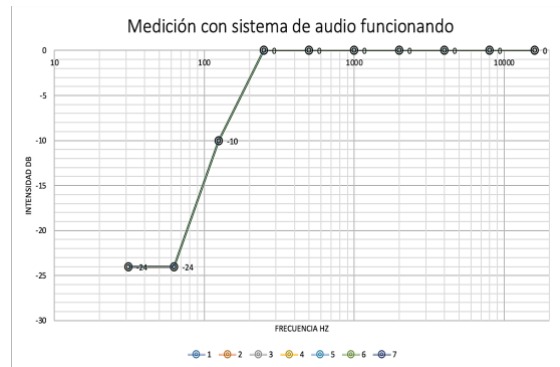


Figura 6. Ruido rosa con sistema instalado

Conclusiones

Tomando en cuenta que la participación litúrgica, ha de ser consciente, activa y comunitaria; los medios electroacústicos deberán de reforzar la voz del que preside la liturgia, cantores y lectores, integrando todos los elementos a las bóvedas y cúpulas.

En el comparativo de las pruebas de articulación, el gradiente $\nabla A_{art} = 39$, representa el 39% promedio obtenido, se

observa la notable mejora de la articulación. Sin embargo, debe advertirse que las lecturas obtenidas en los puntos de muestreo, tienen pendientes negativas. No se debe olvidar, que la la divergencia de la compliancia acústica deberá permanecer constante: $\nabla \cdot C_A = \delta = cte$. Las pruebas de articulación sin equipo instalado, se repitieron para el recinto a cupo completo y en tal caso, las pendientes negativas se incrementan, ver figura 7. Es notoria la pérdida de articulación y en los puntos 4 al 7 desaparece, es decir la mitad del recinto se queda sin escucha.

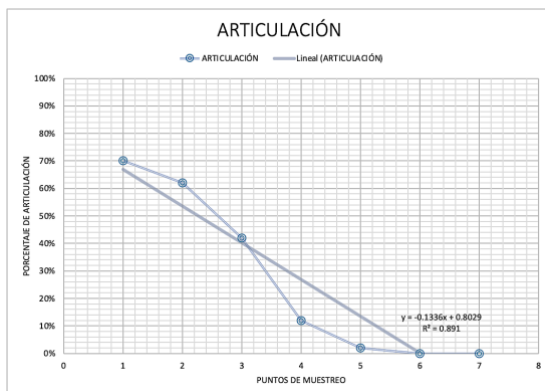


Figura 7. Articulación de voz natural con recinto lleno.

La calibración final del sistema de sonorización instalado, si bien, se realizó con el equipo adecuado, dependerá en más de las características acústicas de las bóvedas o cúpulas y del análisis y el diseño aplicado. Lo importante es que se consiga obtener la solución de la ecuación $A=0$ en las frecuencias que deberán de ser eliminadas,

Los filtros electrónicos instalados en el equipo, deberán de tener control del 3° armónico de Fourier en adelante, es decir, el control de los coeficientes a_n y b_n correspondientes (vease ecuación 3), para conseguir la articulación deseada, o como se le conoce también, la coloratura de la voz.

Al instalar el refuerzo sonoro, se observa que la articulación se incrementa hasta llegar al 99% aproximadamente, este porcentaje aplica en cualquier punto de escucha del templo, inclusive con el recinto a cupo total de gente, desde luego, previa calibración utilizando el NTi Spectrum Analyzer XL2 y Minirator MR-PRO.

Finalmente, el refuerzo sonoro consigue la buena articulación, sin perder jamás, “*La Majestuosidad Divina*” y conservando de manera clara y precisa la audición, en los <<Recitos Sagrados>>.

9. Referencias

Beraneck, Leo L. (1969) Acústica. Hispanoamericana. Buenos Aires.

Concilio Vaticano II (1972) Documentos completos del Vaticano II. Librería Parroquial. México

Fernández, Justino (1940) Catálogo de templos religiosos del Estado de Hidalgo. Talleres Gráficos de la Nación. México.

Flores Ortega, J. Eduardo (1991) Refuerzo sonoro aplicado a Bóvedas. Tesis. ESIME-IPN. México.

Flores, Juan (1963) Construcción y renovación de templos. Instituto de Pastoral. Salamanca.

Foller, Kent (2008) Los pilares de la Tierra. Random House Mandadori. México.

Historia religiosa y de los conquistadores. (1932) Recopilación de manuscritos hechos por los Frayles en latín. México

Murray R. Spiegel. (1967). Theory and Problems of Theoretical Mechanics. Schaum Publishing Co. Copyright © New York. EUA.

Obra Nacional de la Buena Prensa (1981) Lo Musical Litúrgico. Elite. México

Zemansky, Mark W. Dittman, Richard H. (1990). Calor y Termodinámica. McGraw-Hill. Madrid. España

