

Conferencia realizada en ETSAB ARQUIT 17 Març 2015, por:

Ph.D. Higiní Arau-Puchades

LA ARQUITECTURA DEL SONIDO Y LA ENVOLVENTE DE LOS ESPACIOS.

ABSTRACT:

El objeto de este trabajo es efectuar un estudio sobre lo que puede existir de común entre la Arquitectura, la Música y la Acústica arquitectónica. Hemos intentado explicar esta cuestión, desde todos los ámbitos técnicos, científicos, y del arte, en que cada rama participan de algún modo. Hemos realizando este análisis enunciando algunas de las figuras más importantes que han contribuido, de alguna manera en la búsqueda del objetivo de esta comunicación.

1. INTRODUCCION

Analizar el trinomio ARQUITECTURA – MÚSICA – ACÚSTICA es tanto como encontrar y examinar su conexión de interrelación entre los tres conceptos.

2. ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA

La acústica arquitectónica se inició en el siglo XX, con W.C. Sabine en 1900.



Wallace Clement Sabine fue un físico que fundó el campo de la acústica arquitectónica. **1868-1919**

Boston Symphony hall, inaugurada en 1900. Architecs McKim, Mead, and White
Acoustic Consultant Wallace.C.Sabine

La vida de Sabine es la historia del nacimiento de la acústica arquitectónica en la era moderna. En 1895, hubo, por parte de las autoridades académicas de Harvard, la necesidad de la mejora acústica de la sala Fogg Lecture Hall, incluida en el Fogg Art Museum. Esta labor se consideró como tarea imposible por el personal veterano del departamento de física de Harvard. Su asignación fue bajando de categoría, hasta que aterrizó a manos de un joven profesor de física, llamado Sabine. Aunque era considerado un popular conferencista por los estudiantes, Sabine nunca recibió su Ph.D. Sabine abordó el problema tratando de determinar qué características hacían a la Fogg Lecture Hall diferente de otras salas acústicamente aceptables. En particular, el

Conferencia realizada en ETSAB ARQUIT 17 Març 2015, por:

Ph.D. Higini Arau-Puchades

Sanders Theater que era considerado acústicamente excelente. Posteriormente fue acústico consultor del Boston Symphony Hall.

El tiempo de reverberación lo definió como el número de segundos necesarios para que la intensidad del sonido, desde un nivel sonoro establecido por una fuente sonora, decaiga 60 dB o sea hasta que casi se hace inaudible. Sus métodos de medición fueron un órgano y su oído.

La fórmula de W.C.Sabine:

$$T = \frac{V}{A} \cdot 0.161 \text{ s}$$

(En realidad esta expresión no es exactamente la que él dedujo, ya que su hallazgo fue empírico, fue en 1903 que W.J. Franklin demostró teóricamente la expresión que hemos escrito, como fórmula de Sabine)

donde **T** es el tiempo. V el volumen de la sala en metros cúbicos. A, es el área de absorción en metros cuadrados. La acústica es una ciencia prácticamente recién nacida como, por lo que a W.C. Sabine se le asigna su paternidad.

En el estudio de la acústica, se han establecido **tres métodos de cálculo** para aproximarse a descifrar la problemática del sonido en la Arquitectura.

Los procedimientos con los que hemos desarrollado la acústica arquitectónica son:

a) Ondulatoria, b) Geométrico, c) Estadística.

A la vez que explicamos los distintos métodos, intentaremos hablar de algunos estudios anteriores a nuestra era que han introducido otros científicos ilustres, entre ellos grandes matemáticos y físicos del pasado.

El análisis de los distintos procedimientos físicos que desarrollaremos nos permitirán seguramente esclarecer la conexión que deseamos descifrar entre la arquitectura, la música y la acústica.

Conferencia realizada en ETSAB ARQUIT 17 Març 2015, por:

Ph.D. Higini Arau-Puchades

a) Método Ondulatorio (basado en ondas):

La acústica ondulatoria y otros aspectos relacionados, fueron desarrollados primeramente en el **siglo XVII**, por científicos como Mersenne, Descartes, Christian Huygens, Isaac Newton.



Marin Mersenne, fue un filósofo francés del siglo XVII que estudió diversos campos de la teología, matemáticas y la teoría musical. **1588-1648**

René Descartes, también llamado Renatus Cartesius, fue un filósofo, matemático y físico francés, considerado como el padre de la geometría analítica y de la filosofía moderna. **1596-1650**

Christian Huygens, fue un astrónomo, físico y matemático holandés. Descubrió el Principio de Huygens de la difracción. **1629-**

Isaac Newton, fue un físico, filósofo, teólogo, inventor, alquimista y matemático inglés. **1643-1727**

Los científicos citados anteriormente, descubrieron ciertos aspectos importantes del sonido, como su velocidad en un medio, las propiedades de la reflexión, refracción, y su comportamiento ondulatorio.

Posteriormente los científicos, del **siglo XVIII**, descubrieron ciertos aspectos importantes del sonido, como la ecuación de onda, que nos permite calcular el campo sonoro en una sala, generado por una o varias fuentes. **En este caso se introduce la fuente sonora como un flujo de masa en la ecuación de continuidad.**

Conferencia realizada en ETSAB ARQUIT 17 Març 2015, por:

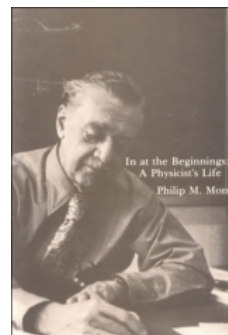
Ph.D. Higiní Arau-Puchades



<p>Daniel Bernoulli fue un matemático, estadístico, físico y médico holandés-suizo. 1700-1782</p>	<p>Leonhard Paul Euler, conocido como Leonhard Euler, fue un matemático y físico suizo. Se trata del principal matemático del siglo XVIII 1707-1783</p>	<p>Joseph-Louis Lagrange, Giuseppe Luigi Lagrangia o Lagrange fue un físico, matemático y astrónomo italiano que después vivió en Prusia y Francia.</p>	<p>Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz fue un médico y físico alemán. E influyó mucho en la música física. 1821-1894</p>	<p>John William Strutt, tercer Barón de Lord Rayleigh. fue un físico y profesor universitario británico galardonado con el Premio Nobel de Física en 1904. Strutt descubrió la existencia de los gases inertes principalmente el Argón y el Radón- Escribió un memorable libro de acústica 1985 de 3 volúmenes</p>
---	---	--	---	---

Como rama de la física, la acústica culminó su desarrollo en el **siglo XIX**, gracias sobre todo a los trabajos de Hermann von Helmholtz y de Lord Rayleigh, y sus bases teóricas han permanecido prácticamente sin cambios desde finales de ese siglo.

También el **siglo XX** se desarrolló la acústica ondulatoria en acústica de salas en el hallazgo de modos resonantes y estudio de la forma de las salas para evitar resonancias indeseables, fueron Richard H. Bolt y Philip Morse.



<p>Richard Henry Bolt, Trabajó Berkeley en 1934-1939, en el programa de física de posgrado de Berkeley Realizó su investigación en la UCLA, dado el hecho de que Berkeley no tenía instalaciones de investigación en acústica en ese momento. Después de alcanzar su doctorado en 1939, trabajó en el MIT durante un año en la transmisión del sonido en diferentes formas de recintos. Tras un breve período en la Universidad de Illinois y una breve permanencia en Londres durante la Segunda Guerra Mundial, se mantuvo asociado con el MIT hasta su jubilación. 1911- 2002</p>	<p>La obra de Philip Morse en las funciones propias y valores propios de habitaciones idealizados en la década de 1940. En 1944, los Reviews of Modern Physics publicó en su número de abril un único papel: el de Dick Bolt y Phil Morse, titulado "Sound waves in rooms" Este tour de force tomó el punto de vista de que un cálculo determinista de las modalidades de una sala idealizado podría revelar características importantes de la acústica de espacios menos ideales. Las relaciones entre la impedancia de la pared y modal de amortiguación para axial, tangencial, y los modos oblicuos y la construcción de campos directos de expansiones modales son dignos de mención. 1903-1983.</p>
--	---

Conferencia realizada en ETSAB ARQUIT 17 Març 2015, por:

Ph.D. Higiní Arau-Puchades

La solución analítica de la ecuación de onda es muy complicada y sólo ha sido posible realizarla para casos muy simples, de salas rectangulares y condiciones de contorno muy sencillas. El método ondulatorio no ha sido posible desarrollarlo con una matemática apropiada, como hicieron Euler y Helmholtz anteriormente, teniendo en cuenta la naturaleza ondulatoria del sonido. Debido a los estudios realizados por los grandes matemáticos y físicos del **siglo XVII y XVIII**, conocemos un poco la naturaleza del sonido, pero somos incapaces de resolver problemas prácticos, del día a día, de los distintos efectos ondulatorios, como el principio de Huygens.

Actualmente sólo existen dos procedimientos matemáticos que intentan extrapolar las propiedades del sonido, halladas en una región de un medio analizado, a otra región próxima a éste.

Los procedimientos de cálculo existentes son: **1. FEM, Método de elementos finitos** y **2. BEM, Método de los elementos frontera**. Ambos procedimientos son técnicas numéricas desarrolladas en la actualidad, que precisan sistemas informáticos de alta potencia de cálculo. No obstante podemos afirmar que su solvencia para resolver problemas ondulatorios es muy escasa desde el punto de vista práctico, y sólo es interesante desde la vertiente didáctica. El método BEM es un método de cálculo de solución de ecuaciones diferenciales lineales que han sido formuladas como ecuaciones integrales. Fue desarrollado por George Green en el siglo XIX.

El concepto principal de la acústica ondulatoria es el **frente de onda**, como la superficie esférica que es lugar geométrico de todas las partículas de aire que participan del mismo estado de vibración, que se propaga a la velocidad propia de la naturaleza propia de cada medio, que en el aire es $c \approx 340$ m/s.

La distancia que separa dos frentes de onda consecutivos, de igual vibración, es la **longitud de onda** λ , en la que $c = \lambda f$ (es f Hz **frecuencia del sonido**). De esta expresión se deduce que la frecuencia y la longitud de onda son inversamente proporcionales. Es decir, cuanto mayor es la frecuencia menor es la longitud de onda λ . La **región de frecuencias** que se considera en la acústica arquitectónica son las **bandas de octava**: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz.

Un tipo de frecuencia muy importante es la **frecuencia de resonancia**, donde la frecuencia de excitación sonora es coincidente con una **frecuencia natural** del recinto. Normalmente estas frecuencias están en las bajas frecuencias. Se les conoce como **modos resonantes**.

Conferencia realizada en ETSAB ARQUIT 17 Març 2015, por:

Ph.D. Higiní Arau-Puchades

El término **onda estacionaria** suele aplicarse a un modo resonante de un objeto extendido vibrante. La resonancia es creada por la **interferencia** constructiva de dos ondas que viajan en direcciones opuestas en el medio, pero el efecto visual es el de un sistema completo que se mueve en un **movimiento armónico simple**. Una cuestión muy importante es la **difracción** del sonido, por lo que el sonido se quiebra a causa que la longitud del obstáculo tiene unas dimensiones similares a la longitud de onda λ del sonido. Existen difractores de superficie y difractores de volumen. **La difusión** se produce cuando la longitud de onda es comparable con la rugosidad y asperezas de los materiales.

También cabe recordar **el eco** como un ejemplo derivado de la efecto de colisión o incidencia del sonido sobre una pared. El **eco flutter, o eco palpitante** que se produce entre paredes paralelas cuando el foco sonoro está en su entre ambas. Además hay muchos casos de defectos acústicos que no cito aquí.

Conferencia realizada en ETSAB ARQUIT 17 Març 2015, por:

Ph.D. Higiní Arau-Puchades



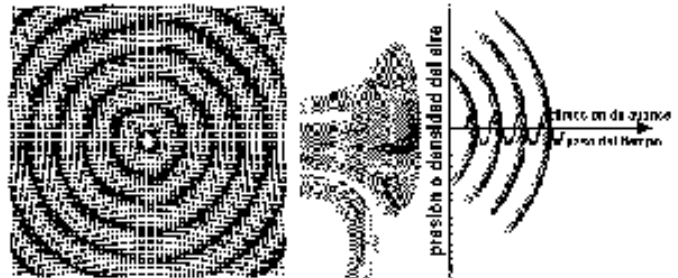
Fuente sonora: Diapason



Partículas de aire en vibración, en oscilación sobre su posición de equilibrio



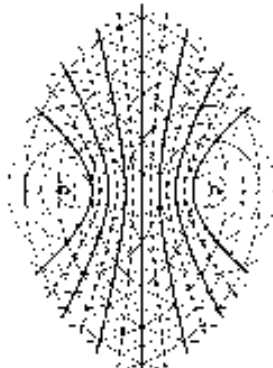
Partículas aire en vibración



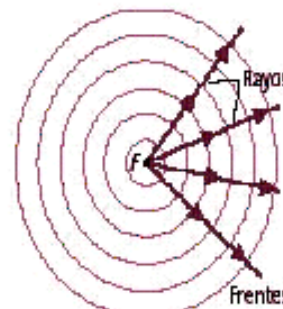
Frentes de onda esféricas de sonido



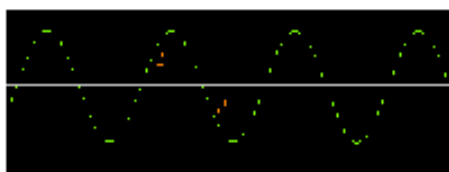
Frente de onda esférico



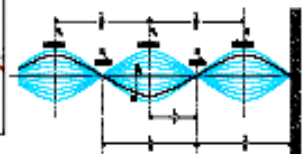
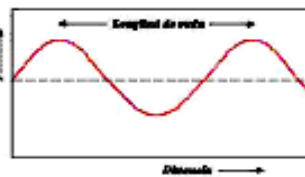
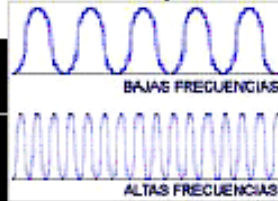
Dos frentes de onda en oposición



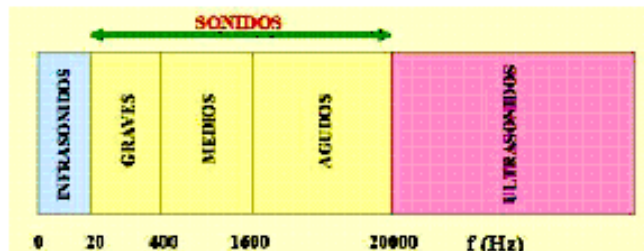
Infinitas direcciones de la onda esférica



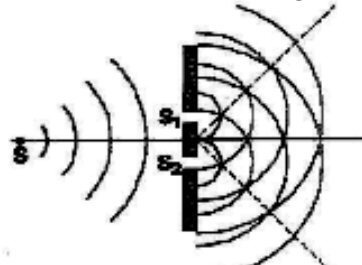
Diversas representaciones matemática senoidal de las ondas



Nodos y vientres de las ondas



Tipos de frecuencia de sonido

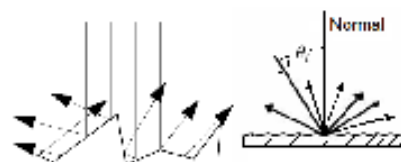
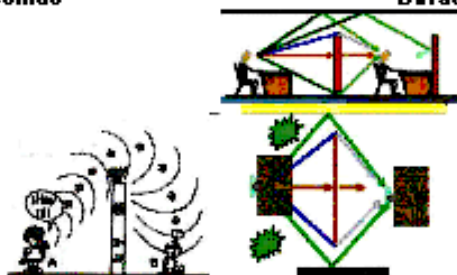


Difracción del sonido

Principio Huygens
 Los puntos situados en un frente de ondas se convierten en fuentes de ondas secundarias, cuya envolvente constituye un nuevo frente de ondas primario.



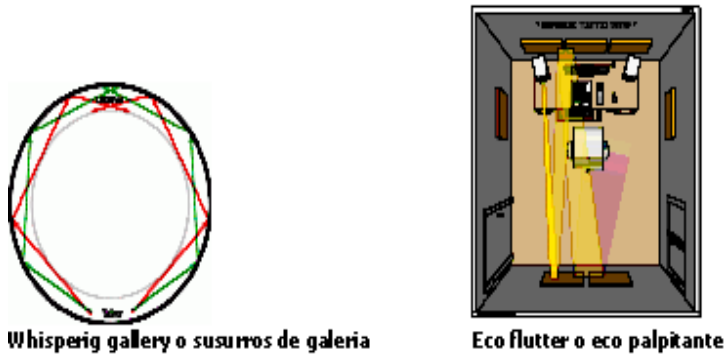
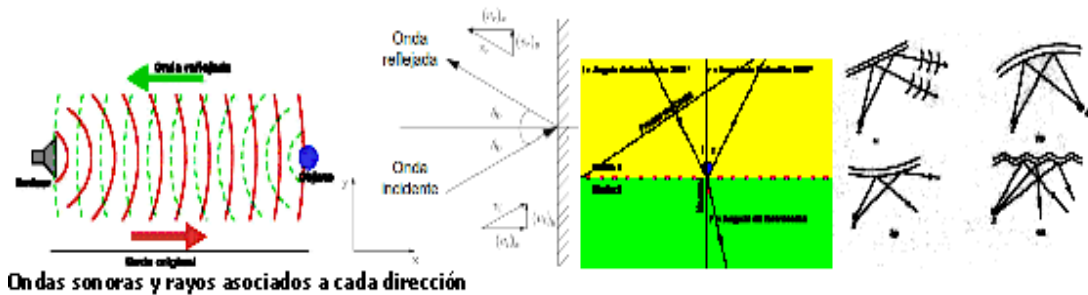
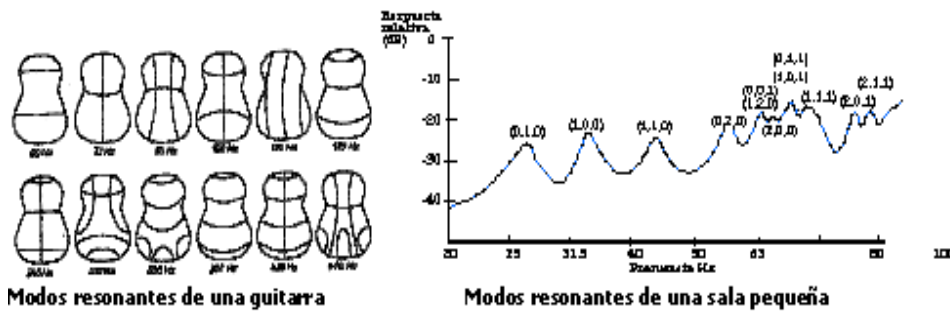
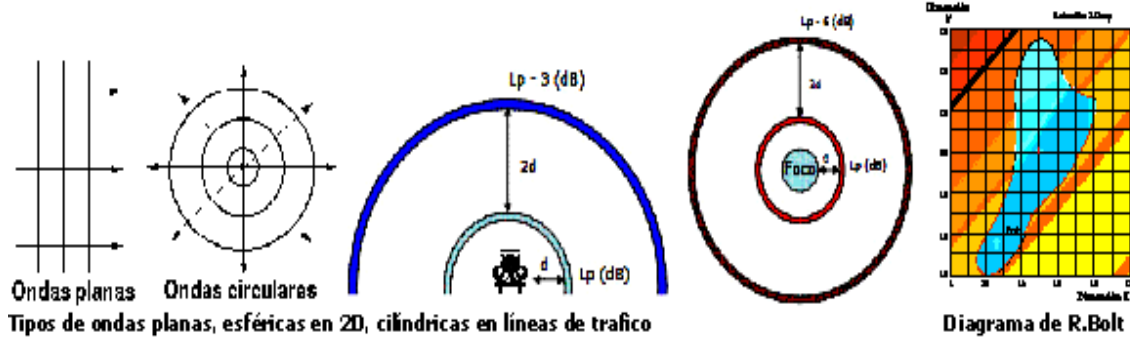
Difracción de una barrera acústica, varios ejemplos



Efecto de difusión producido por difracción

Conferencia realizada en ETSAB ARQUIT 17 Març 2015, por:

Ph.D. Higini Arau-Puchades



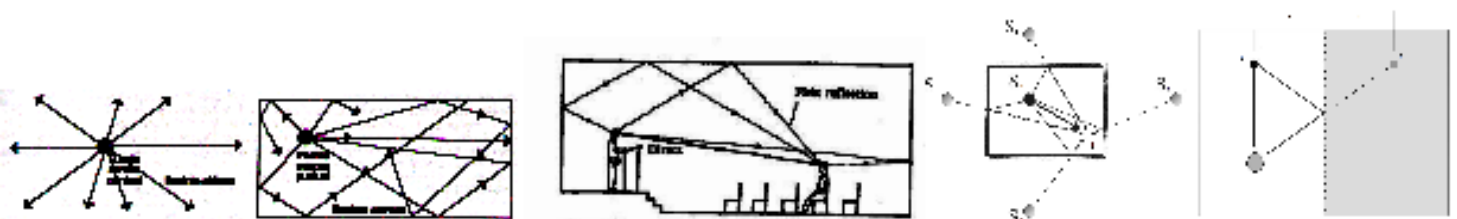
Conferencia realizada en ETSAB ARQUIT 17 Març 2015, por:

Ph.D. Higini Arau-Puchades

b) Método Geométrico (basado en rayos sonoros):

En la acústica geométrica el concepto de frente de onda es fundamental. Pues a una frecuencia dada, un frente de onda es una superficie donde la presión sonora está en fase en todas partes. Es decir todos los puntos del frente de ondas tienen el mismo estado de vibración. El frente de onda se desplaza con el tiempo, por lo que la línea descrita en el espacio por un punto de su superficie, se le denomina **"rayo sonoro"**.

El rayo sonoro es un concepto geométrico, sin identidad física, que expresa la dirección en la que se desplaza el frente de onda. Cuando la longitud de onda es pequeña, o cuanto más pequeña mejor, entonces podemos suponer que todos los frentes de onda son paralelos entre sí, y por tanto perpendiculares a la dirección que indica el rayo sonoro. Pero esta suposición no es cierta para frecuencias graves (125, 250 Hz o menores) ni para frecuencias medias (500, 1000 Hz), cuanto más alta sea la frecuencia considerada más exacta será la hipótesis que da origen al rayo sonoro. Por tanto el rayo sonoro da origen a la acústica geométrica. Así por tanto las líneas curvadas no tendrán sentido, pues una curva puede producir una focalización del sonido, y los rayos que tratamos sólo entienden de la **ley de Snell-Descartes**, en la que el rayo sonoro incidente, respecto a la perpendicular al plano de reflexión llamada bisectriz, forma igual ángulo que el rayo sonoro reflejado. Lo que también es conocido como **ley de los espejos**.



Rayos sonoros, propagándose en el espacio, en salas cerrada produciendo reflexiones especulares.

Lo que da origen a **otra hipótesis** de trabajo de la acústica geométrica, esta es que **la energía se propaga en la dirección de la línea recta del rayo**, como si se tratara de un rayo de luz.

Conferencia realizada en ETSAB ARQUIT 17 Març 2015, por:

Ph.D. Higini Arau-Puchades

En el modelo geométrico no existe información acerca de la frecuencia del sonido y por tanto la **validez de los resultados calculados es muy limitada**.

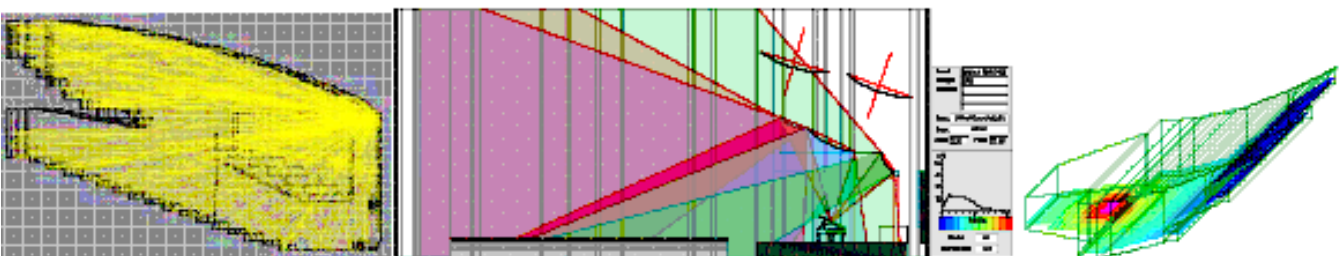
El **trazado de rayos** sonoros, sólo considera se producen reflexiones especulares, que obedecen la ley de los espejos, en donde supone que el punto simétrico al plano de reflexión, en relación a la fuente sonora, existe una **fente imagen** que produce el rayo reflejado.

El tema de la **difracción**, tratarla por el procedimiento del trazado de rayos, es ineficaz, pues la difracción es tratar con líneas curvadas y estas no satisfacen las hipótesis de aplicación del método geométrico.

Este método geométrico se ha impuesto en la era de la informática, como un medio de negocio muy importante, pues permite a cualquiera realizar cálculos acústicos, con poco conocimiento de la acústica.

Incluso los fabricantes de estos programas informáticos, aseguran que pueden estudiar efectos de difracción, pero en la realidad introducen este concepto heurísticamente, como un factor correctivo, en sus cálculos del tiempo de reverberación y otras magnitudes asociadas, para corregir los resultados calculados a un valor que ellos piensen más adecuado.

El problema es que este procedimiento, que es de presentación espléndida, es muy poco eficaz para resolver problemas importantes. Esto es como el refrán que explica que en el País de los ciegos el tuerto es el rey.



imágenes de programas de trazados de rayos,

Conferencia realizada en ETSAB ARQUIT 17 Març 2015, por:

Ph.D. Higiní Arau-Puchades

c) Método estadístico, (basado en teorías estadísticas)

La acústica estadística se ha concebido principalmente para espacios cerrados, en concreto recintos, o salas, que deberán utilizarse como salas conferencias, salas concierto, salas cámara, teatros, teatros de ópera, pabellones deportivos, etc.etc.

En estos espacios se considera que una fuente sonora crea un sonido que se propaga en frentes de onda esféricas, que transportan energía sonora, es decir energía vibrante, que colisiona con las distintas superficies del recinto, manteniendo su naturaleza ondulatoria, hasta que pasado un cierto tiempo todas las ondas, emitidas y las que se emiten y las reflejadas desde todas las superficies del recinto, se entremezclan de tal modo que el sonido al final se puede considerarse formado por una infinidad de ondas planas. En las que se considera que en cada una de ellas se halla contenida la energía sonora en cada instante, y su trayectoria será perpendicular a su frente de onda plana.

En esta suposición, estamos admitiendo un poco del método ondulatorio y otro poco del método geométrico.

Campo sonoro difuso

Nosotros admitiremos que un **campo sonoro es difuso**, si la varianza de la energía, entre cualquier dos puntos del recinto, su valor es cero. Ello quiere decir que todos los puntos de la sala tienen igual energía, es decir que la densidad de energía es constante en la sala considerada.

También podemos admitir que un campo sonoro está formado por la superposición de una infinidad de ondas planas en todas las direcciones de propagación, igualmente probables, y su relación de fases son aleatorias, en todos los puntos de la sala. Esta afirmación implica que la distribución de la absorción acústica del recinto sea uniforme, o bien uniformemente repartida en todas las superficies del recinto.

Conferencia realizada en ETSAB ARQUIT 17 Març 2015, por:

Ph.D. Higiní Arau-Puchades

Esta hipótesis tan estricta del campo difuso, en la realidad natural que de nuestras construcciones, es incumplible. Es decir no se verifica ni se cumple.

Tiempo de reverberación, libre camino medio, Intensidad sonora

La teoría de reverberación de Sabine (empírica), demostrada por Franklin vía matemática, bajo la hipótesis de la existencia de un campo sonoro difuso.

Las salas con las que trabajó Sabine, fueron recintos de paredes sin ningún tipo de absorción acústica. Incluso fue así con el Auditorio del Boston Symphony hall que fue una copia del MusikvereinSaal de Viena (1870), Arquitecto T. Ritter von Hansen, fue la sala que tomó, como prototipo, el Arquitecto de USA, por su buena acústica.

La fórmula de Sabine del Tiempo de Reverberación $T = 0.16 V/A$, [1], nos indica que es proporcional al volumen de la sala V e inversamente proporcional a la unidades de absorción A , $A = S\alpha$ que existen en la misma, siendo α el coeficiente de absorción acústica medio del recinto.

La grandeza de la fórmula de Sabine, descansa en que su fórmula participa de la esencia de las mejores fórmulas que han existido en la humanidad, en los distintos campos de la ciencia, que consiste en su sencillez.

Su fórmula nos expresa que T aumenta si el volumen V del recinto aumenta, a igualdad de unidades de absorción A , o viceversa.

Otra fórmula y concepto nuevo, consecuencia de admitir que el campo sonoro es difuso, es el Libre Camino Medio (Mean Free Path) MFP , que es: $MFP = 4V/S_{room}$, donde S_{room} es el área total de las superficies del recinto considerado.

Esta fórmula cumple con la ley estadística de Gauss, o campana de Gauss, en la que se cumple el comportamiento normal de un distribución estadística.

Conferencia realizada en ETSAB ARQUIT 17 Març 2015, por:

Ph.D. Higini Arau-Puchades

En consecuencia podemos escribir el **T** en función del **MFP**: $T = [\ln(10^6)/c] \cdot \text{MFP}$, $c \approx 340$ m/s.

Aquí vemos que el tiempo de reverberación es proporcional a libre camino medio de las reflexiones producidas en un recinto. Nosotros, examinando la última fórmula, que cuanto mayor es el volumen del recinto mayor será el tiempo de reverberación **T**, a igualdad de superficie total

S_{room}.

En un campo reverberante difuso de una sala, cuando se genera un sonido, desde una fuente sonora, existen dos tipos de intensidad sonoras: **1. Intensidad sonora del campo directo** (procede de la fuente) y **2. Una intensidad sonora del campo reflejado, o reverberado**, (que procede de las múltiples reflexiones que se producen en las paredes del recinto). La primera la componente del sonido directo decrece con el cuadrado de la distancia, es lo que en logaritmos se traduce en un decrecimiento de 6dB cada vez que se doble la distancia. Es decir esta componente de sonido desaparece muy pronto, mientras que la intensidad sonora reflejada se mantiene mejor, dependiendo del valor del T y del volumen del recinto: $I_{\text{diffuse}} = 25 w (T/V) \cdot e^{-0.04 r / T}$, donde **W** es la potencia sonora radiada por la fuente sonora.

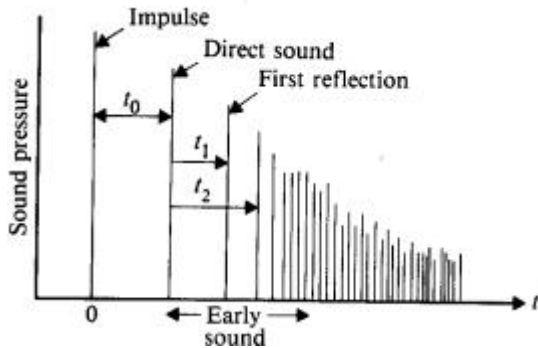
En esta última expresión de la intensidad sonora reflejada o en campo difuso I_{diffuse} , su valor decrece lentamente con la distancia a cada punto receptor, de forma exponencial (**Mike Barron**), **[2]**.

En una sala de pequeña dimensión el campo sonoro reflejado se puede considerar constante. Desde esta expresión podemos advertir, que cuanto mayor sea el el tiempo de reverberación T mayor será también la intensidad sonora difusa I_{diffuse} .

Es decir que se produce un aumento notorio del nivel sonoro de nuestra voz, o música, a causa que el I_{diffuse} ha crecido, cuando el tiempo de reverberación aumenta. Es decir, el tiempo de reverberación repercute en la intensidad sonora: **a mayor tiempo de reverberación T del recinto, mayor intensidad del sonido resultante I_{diffuse}** .

Conferencia realizada en ETSAB ARQUIT 17 Març 2015, por:

Ph.D. Higini Arau-Puchades



Respuesta impulsional

Sonido reverberante:

Es el que el oyente capta tras las reflexiones tempranas, de una respuesta impulsional, captada en un punto de medición del sonido. Proviene de todas direcciones.

Si la fuente emite un sonido continuo, el sonido reverberante crece hasta que alcanza un nivel de equilibrio.

Cuando el sonido se interrumpe, el nivel sonoro decrece a una tasa mas o menos constante hasta que se anula.

El crecimiento sonoro y el decrecimiento son leyes físicas complementarias, a partir de la primera citada se descubrió el nuevo sistema de medir la respuesta impulsional, y en consecuencia todas las magnitudes acústicas.

Otra fórmula importante del tiempo de reverberación fue la descubierta por **C.F. Eyring** en 1930, que en realidad, como la de Sabine, sólo es válida para campo difuso, [3]. Demostró que su fórmula es la misma que la deducida por Sabine, pero en este caso el valor de **A** es: $A = -S \ln(1 - \alpha)$, que para valores pequeños del coeficiente medio de la absorción α menores a 0.3, ambas fórmulas tienden a ser coincidentes. Es decir la expresión de Eyring es mejor para altos valores de la absorción acústica y tiende a la Sabine cuando los valores de alfa son bajos. Es una fórmula más general que la de Sabine y la demostración matemática que hizo fue brillante.

Conferencia realizada en ETSAB ARQUIT 17 Març 2015, por:

Ph.D. Higiní Arau-Puchades

Posteriormente aparecieron otras fórmulas de corte clásico, para campo difuso, pero que tienden a desaparecer por sus resultados tan lejanos de la realidad experimental.

Campo sonoro no difuso, tiempo de reverberación

Una cuestión científica que permaneció sin resolver durante muchos hasta 1988, es el tema de qué pasa con la conducta del tiempo de reverberación **T** cuando existe una distribución de absorción acústica **no uniforme, es decir asimétrica**, en una sala.

En este caso unas paredes tienen absorción acústica y otras no. Con lo que el sonido reflejado resultado de la colisión contra las paredes sin absorción acústica **es muy intensa**, mientras si colisiona sobre paredes absorbentes, entonces la intensidad reflejada es **poco intensa o atenuada**.

H.Arau-Puchades, [4], [5], resolvió este crucigrama físico del comportamiento del sonido, pudiendo hallar la compatibilidad entre la naturaleza del libre camino medio de una sala MFP, que obedece la campana de Gauss, con la conducta tan distinta del campo sonoro asimétrico, que define al campo sonoro no difuso, realizando una aproximación logarítmica de los coeficientes de absorción, que nos transformó la expresión matemática a una ecuación logarítmico normal, que participa de la misma naturaleza que la ley de Gauss, con la que obtuvo esta expresión:

$$T = T_x^{s_x/s} \cdot T_y^{s_y/s} \cdot T_z^{s_z/s}, T_i = \frac{0.16V}{-\text{Sln}(1-\alpha_i)}, \text{ para } i = x, y, z, \text{ para cada dirección en el espacio.}$$

Otra fórmula de escribir la ecuación de Arau es: **T= 0.16 V/Sa_{ArP}** , en donde es:

$$a_{ArP} = a_x^{s_x/s} \cdot a_y^{s_y/s} \cdot a_z^{s_z/s}, a_{ArP} \text{ significan el coeficiente de absorción medio Arau-Puchades.}$$

La formula de Arau cuando los coeficientes de absorción acústica tienden a 0.3 o valores superiores, entonces es coincide con los resultados de Eyring; y cuando alfa tienden hacia un valor inferior a 0.3 hacia 0, entonces T Arau tiende a coincidir con T Sabine. Esta es la fórmula de la reverberación mejor coincidente con los tests tecnológicos experimentales científicos de distintos Round Robin internacionales realizados más de 15 años.

Conferencia realizada en ETSAB ARQUIT 17 Març 2015, por:

Ph.D. Higini Arau-Puchades

El Criterio Acústico:

Desde que W.C. Sabine desarrolló la teoría de la Reverberación 1900 y fue el consultor acústico del Boston Symphony, que es la primera sala del mundo donde como consultor realizó un estudio acústico, empezó a nacer la inquietud, entre los científicos consultores, de los años 1920 - 1950, de cómo obtener la sala ideal?

Entre ellos tenemos **F.R. Watson, Vern O. Knudsen, P.E. Sabine, M. Nair, Samuel Lifschits**, muchos de ellos habían diseñado salas de concierto.

Incluso **Knudsen**, y después **L.L. Beranek** (1962), también realizaron viajes de trabajo para ver y analizar salas de concierto de Europa. Después de todo esto Knudsen escribió **[9]** que para obtener una sala ideal deben tenerse ciertas condiciones especiales:

1. Los músicos no deben distraerse por ruido ningún ruido ni interior ni exterior.
2. Los espacios para la orquesta, solistas, coro, órgano y la audiencia deben disponerse y articularse adecuadamente.
3. Debe preverse el refuerzo del sonido por reflexión y resonancia mediante un diseño apropiado de las superficies próximas al escenario, lo que da soporte a la creación de la música hace más fácil cantar y tocar. Así estos músicos oirán su propia música dentro del abrigo de la música del conjunto.
4. Tener una apropiada reverberación y resonancia de modo que cada nota persista de modo suficiente de manera que el artista sea capaz de determinar de manera precisa su verdadero tono.
.....etc.
5. Deben evitarse focalizaciones en la orquesta, o en el escenario, ni deben producirse ecos o interferencias de cualquier superficie de la sala.
6. Las propiedades acústicas de la sala deberían ser independientes del tamaño de la audiencia. La sala debería ser aproximadamente la misma utilizada para ensayos con sólo músicos, o para sala totalmente llena.

Semejantes declaraciones también las realizó F.R. Watson en 1941. **[10]**

Conferencia realizada en ETSAB ARQUIT 17 Març 2015, por:

Ph.D. Higiní Arau-Puchades

Importantes son en este sentido también los trabajos de Knudsen – Harris 1950 [11], los trabajos de **Hope Bagena** 1930 "The practical Acoustics of Concert Rooms and Opera Houses" [12], y **Parkin and Humphreys** [13] y Sabine, P.E. [14]

A continuación enumeramos y explicamos las distintas magnitudes de calidad del sonido, en la actualidad existentes, intentando realizar una exposición histórica y a su vez dando soluciones prácticas para lograr la mejora de cada una de ellas.

Ley del dimensionado según H.Arau

El criterio acústico establecido por H.Arau [7]: que, para sala llena con audiencia y para un volumen determinado, el tiempo de reverberación medio $T_{mid\ optimo}$ (valor medio de los valores de T de 500 y 1000 Hz) debe estar entre un valor máximo y un valor mínimo escogidos para la aplicación concreta de uso a la que esté destinada la sala: sea palabra teatro o conferencia, música de cámara, o bien música sinfónica.

Ahora estamos en condiciones de definir la sala ideal como aquella sala que cuando se ocupa (con audiencia) obtiene el Tiempo de Reverberación óptimo que se ha definido en (5a) a (5d), según sea el caso, y cuando la sala esté vacía debe tener unas butacas que den una absorción acústica parecida a la de la audiencia sobre butacas. Esto cumpliría el punto 6 definidos por Vern O. Knudsen indicado en el anterior párrafo.

En este caso puede predecirse el tiempo de reverberación, a frecuencias medias, T_{mid} , según indica H.Arau, que, nosotros la denominamos ley del dimensionado, [7]:

$$V / S_A = 7.361 (1 + \beta) T_{mid} \quad , \quad \text{donde } \beta = 0 \text{ para teatros y opera.}$$

$V \text{ m}^3$ es el volumen sala, escenario músicos y coro, en salas de concierto y salas de cámara. En salas de teatro y ópera, V es el volumen de la sala sin incluir el palco escénico.

Conferencia realizada en ETSAB ARQUIT 17 Març 2015, por:

Ph.D. Higini Arau-Puchades

S_A es el área de audiencia, entendiendo que la superficie equivalente de las butacas es $S_A=k.S$, donde S es la superficie del suelo de la sala y k que puede oscilar entre 0.6 a 0.74 tomamos como valor medio: $0.7 \text{ m}^2 / \text{butaca}$.

El **caso habitual es $\beta = 0$** , ver [7]. El caso general debe verse en [16]

En esta propuesta los materiales de la sala se se han supuesto tienen una absorción máxima del orden de 0.05 y la absorción importante se debe tan sólo a la audiencia.

Si el T_{mid} es superior al $T_{\text{mid}} \text{ óptimo}$, según el caso que corresponda, esto significaría que sobra volumen o falta audiencia, o en todo caso le falta absorción adicional, lo cual debe suspesarse con mucho cuidado si hay que ponerla o no, pues pueden haber otros factores que aconsejen no hacerlo.

Ejemplo 1: L'Auditori Barcelona. Sala Principal. Rafael Moneo, Arquit. Consultor Acústico H. Arau

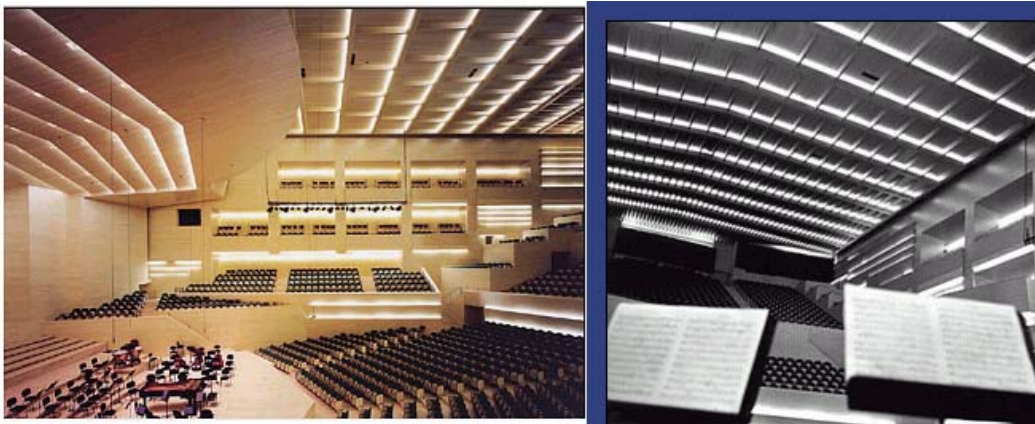


Fig 1. Ley del dimensionado según Arau: l'Auditori, Main Hall, ver figura 1bis

Conferencia realizada en ETSAB ARQUIT 17 Març 2015, por:

Ph.D. Higiní Arau-Puchades

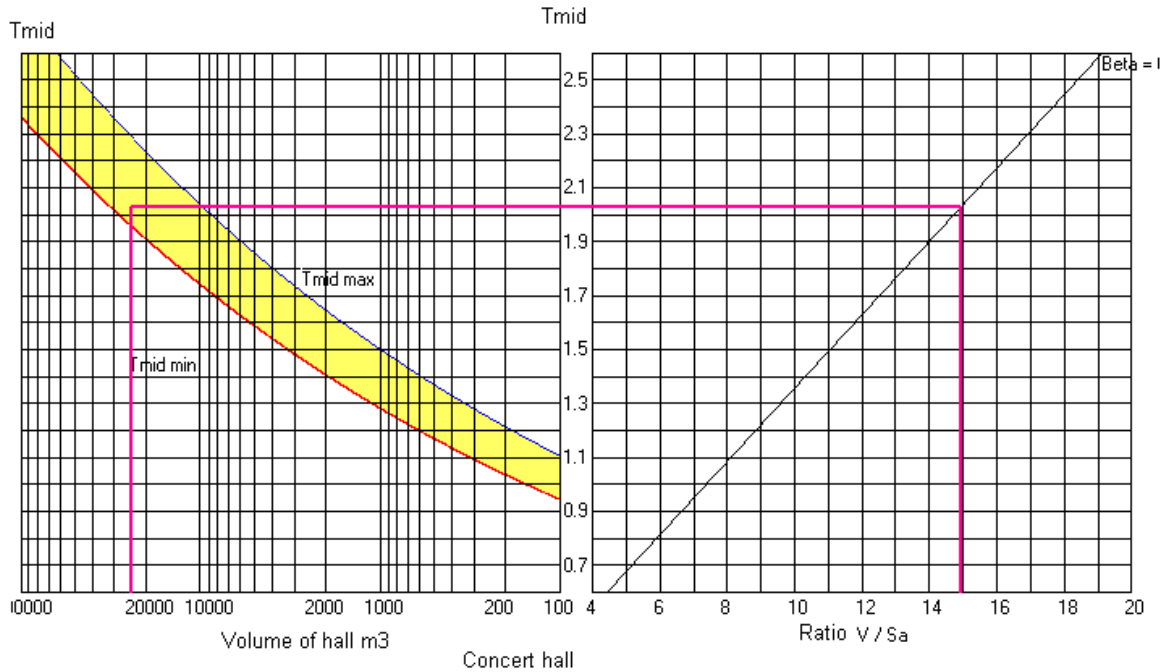
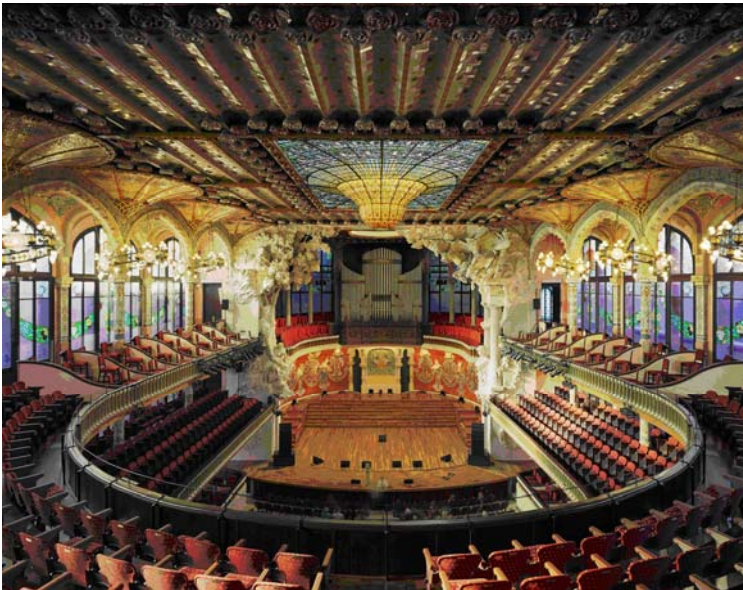


Figure 1bis: Volume predicted, $V=24300\ m^3$, by [7] theory before start acoustical design is $T_{MID} = 2.03\ s$ (occ.) for full hall $N=2326$ seats.

Ejemplo 2: Palau de la Música de Barcelona (1905) Domenech i Montaner Arquitecto, restauración 1990, Oscar Tusquets et al. Consultor Acústico Higiní Arau



Conferencia realizada en ETSAB ARQUIT 17 Març 2015, por:

Ph.D. Higiní Arau-Puchades

Lluís Domenec i Montaner construyó un recinto tan hermoso que hoy es Patrimonio de la humanidad. Lo construyó pensando que pudiera ser utilizado para el canto coral del **Orfeo Català**. Se compone prácticamente de dos, o máximo 3 materiales. Principalmente la cerámica, en las partes sólidas. Y los vitrales en las partes transparentes. El volumen de esta sala es aproximadamente de 10 000 m³ y su aforo es de 2000 asientos. Estas dimensiones y aforo, son adecuados, para el uso que el arquitecto pretendía. No tenía un caso parecido, creemos, sobre el que basarse. Sin embargo su imaginación era maravillosa.

No obstante en 1990, fue necesario mejorar ciertos aspectos de deterioro del edificio, y se decidió también mejorar la acústica del recinto para otras actividades musicales.

Medidas correctoras:

Contra la ley del dimensionado no se pudo batallar, pues en realidad allí sobraban 1000 localidades para conseguir una sala válida para uso sinfónico. Pero sí pudimos mejorar otras deficiencias muy importantes, debidas a que los vitrales emplomados eran tan delgados 3 mm, que producían tanta absorción acústica en las bajas frecuencias, que incluso producían que la absorción acústica en las frecuencias medias fuera muy grande, superior 30 %. Lo que se corrigió doblando los vitrales de la sala, con un vidrio grueso 8 mm. Ahora su acústica no es la perfecta para uso sinfónico, pero es muy buena, incluso como una gran sala música de cámara muy hermosa.

Conferencia realizada en ETSAB ARQUIT 17 Març 2015, por:

Ph.D. Higini Arau-Puchades

Ejemplo 3. Tonhalle St. Gallen, Suiza. (2010), Bosshard-Vaquer. Consultor acustico H. Arau.

Problema planteado: La sala era pequeña 6000 m³, para una audiencia de N=900 asientos, en la que especialmente los músicos del escenario e incluso la audiencia padecían con gran molestia del ruido que produce el sonido cuando se realizan fuertes reflexiones sobre el techo a causa de su escasa altura y por tanto volumen:

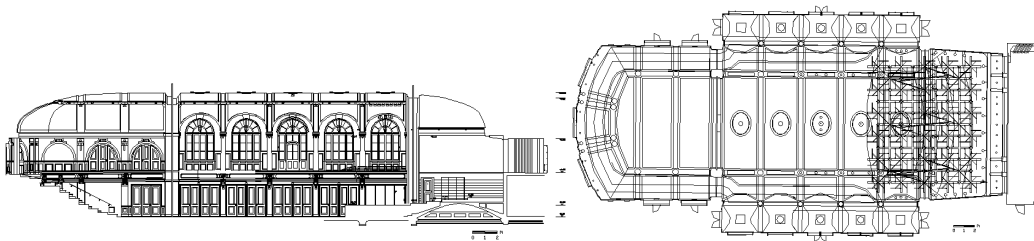


Figura 2a .Tonhalle St. Gallen, antes de su restauración antes 2009

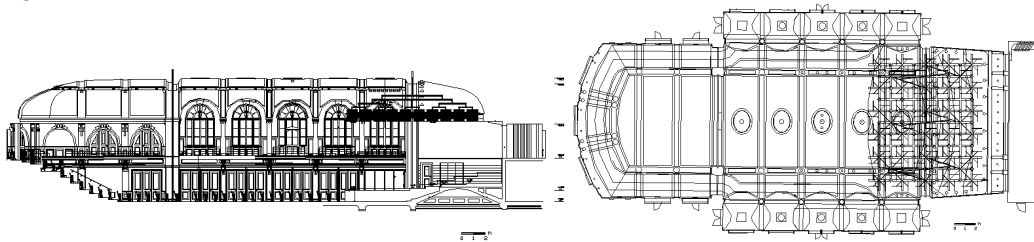


Figura 2b .Tonhalle St. Gallen, despues de su restauración en 2010

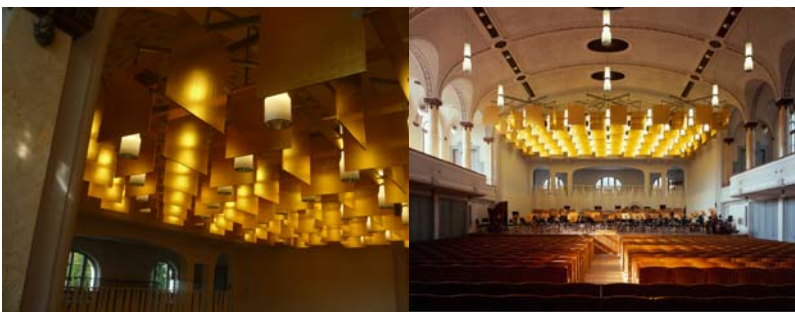


Figura 2c. Medidas correctoras. Diseño de difractor de volumen, tipo laberinto sobre escenario

Conferencia realizada en ETSAB ARQUIT 17 Març 2015, por:

Ph.D. Higini Arau-Puchades

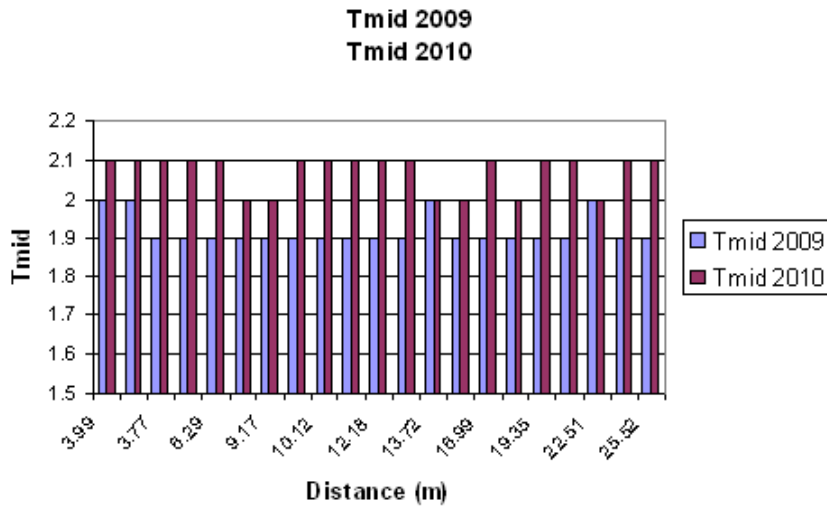


Figure 3: Average values of T₃₀ in hall with distance to F1 source in 2009 and 2010 in audience zone

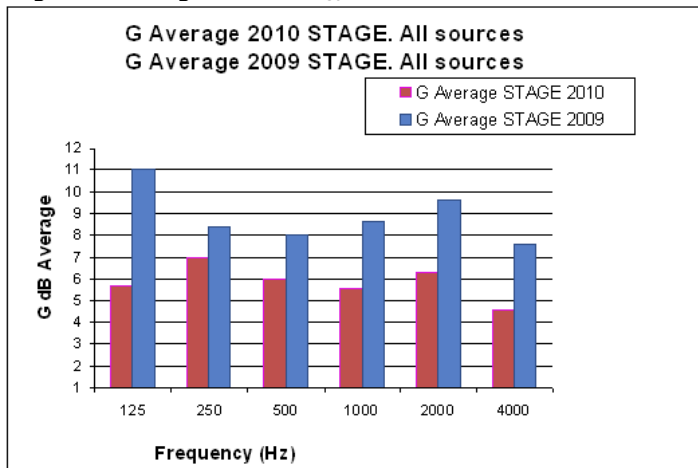


Figure 4 : G average value all sources. Red colour is G for 2010 and blue is G for 2009

Medidas correctoras, método de diseño:

Dado el escaso volumen del recinto lo suyo era derribarlo y construir un auditorio nuevo bien diseñado. Si así se hubiese realizado el volumen del recinto, tendría que haberse diseñado con un volumen de 9000 m³. Pensemos que la sala que tuvimos que reformar sin tocar para nada su geometría interna, era el auditorio hermano pequeño de todos los auditorios que se diseñaron a fines del siglo XIX e inicios del XX.

Se realizó un estudio acústico en que se planeó la opción de diseño de un difusor de volumen, diseñado por nosotros, colocado sobre el escenario. Con objeto de reducir la intensidad sonora del rebote, o rayo reflejado, por el techo. Este método de diseño se basó en la creencia de las

Conferencia realizada en ETSAB ARQUIT 17 Març 2015, por:

Ph.D. Higiní Arau-Puchades

propiedades ondulatorias del sonido son muy importante, dado que es su naturaleza, y pensado que el **Principio de Huygens** sería el protagonista de la solución de este problema, Para efectuar este diseño nos basamos en nuestra experiencia e intuición o imaginación, con la creencia con Einstein de que **"Imagination is more important than knowledge. Knowledge is limited. Imagination encircles the world."**

En el caso ondulatorio, como ya hemos explicado antes nuestro conocimiento científico es casi nulo. También exploramos el método de trazado de rayos de los programas de simulación de salas, los más importantes del mercado (no doy nombres de marcas) fueron del todo inoperantes en esta caso. Sólo nuestro programa de cálculo de simulación pudo calcular los efectos de focalización que producían las curvas de entrega de las paredes con el techo, pero creo fue una casualidad.

Sin embargo con el procedimiento de diseño que efectuamos, nuestro difusor ha producido una reducción de la intensidad sonora G de 3 dB, en la zona del escenario, figura 4; y además ha ocurrido un efecto inesperado de que el tiempo de reverberación de la sala ha crecido, figura 3. Ahora los músicos del Tonhalle aprecian auditivamente que la sala ha crecido, es decir como si hubiera habido un aumento de volumen del recinto. El público está también muy emocionado por el gran éxito que ha tenido la sala y su excelente resultados musicales. Antes decían que tenían la peor sala de Suiza y ahora comentan tienen la mejor, según me han explicado.

Nosotros sólo tenemos la gloria de haber conseguido obtener un nuevo aspecto científico no conocido con anterioridad, al que le falta mucha investigación, lo que permitirá a la humanidad crear en espacios pequeños con la sensación subjetiva de estar en espacios grandes.

Quizás éste sea el nuevo paradigma científico, para las futuras generaciones de la humanidad, en hallar el método de cálculo matemático que explique y desarrolle el nuevo sistema de crear espacios más pequeños con sensación de espacios más grandes, de manera mucho más económica.

Conferencia realizada en ETSAB ARQUIT 17 Març 2015, por:

Ph.D. Higiní Arau-Puchades

Ejemplo 4: New Philharmony Szczecin.Main Hall. (2014) EBV Architect, Acoustic Consultant H. Arau



New Philharmony Szczecin. (2014)



New Philharmony Szczecin. (2014)

Esta sala, actualmente construida, tiene una acústica excelente. Tiene un volumen de $V=10\,375$ m³ y $N=954$ asientos, los resultados determinados del Tiempo de Reverberación RT sala con audiencia, son:

Conferencia realizada en ETSAB ARQUIT 17 Març 2015, por:

Ph.D. Higini Arau-Puchades

Frecuencia Hz	125	250	500	1000	2000	4000	MID
RT , s	1.84	1.82	1.86	1.99	2.05	1.97	1.93

Medido por el laboratorio: Politechnika Wroclawska Katedra Akustyki i Multimediów Laboratorium Badawcze3 Akustyki

<https://www.youtube.com/watch?v=a5xJUECKBjg>

<http://radioszczecin.pl/4,115602,fanfara-pendereckiego-na-inauguracji-filharmonii&idf=277022>

5. CONCLUSION FINAL:

En esta comunicación hemos intentado definir las bases en los que se asienta el criterio acústico del tiempo de reverberación de un recinto, que es el principal concepto sobre que se fundamenta la acústica arquitectónica.

Hemos visto que el volumen del espacio geométrico, que define un recinto, es la magnitud más importante que describe nuestra sensación subjetiva del sonido en una sala, que nos permite conocer si su percepción es buena o no tan buena.

Por otro lado hemos averiguado que el volumen y su geometría, se encuentran en la intersección exacta del concepto espacio que yace en la arquitectura, y subyace también en la sensibilidad de la música.

Conferencia realizada en ETSAB ARQUIT 17 Març 2015, por:

Ph.D. Higiní Arau-Puchades

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Sabine, P.E. (1900) , Acoustics and Architecture. Mac Graw Hill. New York
- [2]] M.Barron, J. of Sound and Vibration (1973) 27(2),183-196
- [3] Eyring, C.F.(1930) Reverberation time in dead rooms, J. Acoust. Soc. Am. 1, 217-241.
- [4] Arau-Puchades H.. An improved Reverberation Formulae, Vol. 65, nº4, 163-180.
- [5] Higiní Arau-Puchades, (2014). Im Memoriam al Profesor Dr. Andrés Lara, Nueva versión y reflexiones sobre la teoría. «An Improved Reverberation Formula» (1988), SEA-Revista de acústica | Vol. 45 | N.1 y 2[
- [6] Schröder, M.R.(1965)“ New Method of measuring reverberation time” J.Acoust. Soc.Am. 37, 409-412
- [7] Higiní Arau (/1997) Variation of the Reverberation Time of Places of public Assembly with audience size. Journal of Building acoustics, Volume 4 Number.
- [8] Beranek, L.L. (1962) Music, Acoustics and Architecture., Wiley, New York.
- [9] Knudsen, o.Vern.(1931) “Acoustics of Music Rooms”J, Acoust. Soc. Am.p 434-467.
- [10] Watson, F.R. (1941) Acoustics of Auditoriums. Mac Graw Hill, Third ed.
- [11] Knudsen – Harris (1950) “Acoustical Designing in Architecture”, I
- [12] Hope Bagenal (1930) “The practical Acoustics of Concert Rooms and Opera Houses”
- [13] Parkin and Humphreys (1958)“Acoustics, Noise and Buildings. Faber and Faber , London.
- [14] Sabine, P.E. Acoustics and Architecture. Mac Graw Hill. New York
- [15] Lothar Cremer, Helmut Müller and Theodore J.Shultz (1978) Principles and Applicatios of Room Acoustics. Ed. Applied Science Publishers.
- [16]] H.Arau (1999). ABC de la Acústica Arquitectónica. Editorial CEAC