45º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
8º CONGRESO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON SMART CITIES AND ENVIRONMENTAL ACOUSTICS

REFLEXIONES SOBRE REFLEXIONES, ECO Y REVERBERACIÓN

PACS: 43.55.Br

Vera Guarinos, Jenaro; Yebra Calleja, Marisol; Eva Calzado Estepa; Brocal Fernández, Francisco; Miralles García, Adrián.

Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la señal
Escuela Politécnica Superior de Alicante - Edif.: Politécnica II
Universidad de Alicante
Campus de San Vicente del Raspeig
Apdo: 99.
03080-Alicante
Tlf: 965 90 9756 / 9751
Email: jenaro@ua.es; myebra@ua.es; evace@ua.es; francisco.brocal@ua.es; amirallesgarcia@gmail.com

ABSTRACT
The echo phenomenon based on the definitions given in the literature of different authors will be discussed. Individual cases raised as typical risk situations echo using simple geometric tools will be analyzed by studying the set of reflections in every possible situation about the temporal (150 -300 ms), and energy behavior roughly.

Impulse response is presented in two conflicting premises: "Llotja S. Jordi" in Alcoy (Arquit: S. Calatrava) and "Plaza de toros/Arena" Villena (Arquit: J.C. Carrión).
KEYWORDS: Eco, Sound propagation, Eco criteria. Echograms. Energy decay curve.

RESUMEN
Se discutirá el fenómeno del eco partiendo de las definiciones que dan distintos autores en la bibliografía al uso. Para ello se analizarán distintos casos planteados como situaciones típicas de riesgo de eco con ayuda de herramientas geométricas sencillas, estudiando el comportamiento temporal (150 -300 ms) y energético, de forma aproximada, del conjunto de reflexiones en cada situación posible.

Se presenta la respuesta impulsiva para dos recintos conflictivos: “Llotja de S. Jordi” en Alcoy (Arquit: S. Calatrava) y “Pza. de Toros/Arena” de Villena (Arquit: J.C. Carrión)
PALABRAS CLAVE: Eco, Propagación del sonido, Criterios de eco. Ecogramas. Curva de decaimiento energético.

INTRODUCCIÓN

Las opiniones subjetivas en la acústica de recintos se basan en nuestras habilidades neurofisiológicas para la percepción y procesado de la información sonora del universo en el que vivimos para su correcta interpretación y conseguir la transmisión y adquisición de conocimientos. La forma más simple de abordar el problema es comprender el entramado sonoro que recibimos que se entreteje con tan solo dos componentes: una debida al sonido

directo (de estructura simple) y otra al reflejado (cuya composición puede llegar a parecer arbitraria y mucho más compleja). Uno de los fenómenos que aparece de forma reiterada como uno de los errores más flagrantes achacados al diseño arquitectónico al estudiar el comportamiento del campo acústico, especialmente en recintos cerrados, es el eco.

Por ello vamos a esbozar algunas de las ideas que se usan habitualmente para la caracterización y definición de dicho fenómeno:

1.- "*Señal acústica emitida por una fuente y percibida por un receptor como dos o más señales desfasadas. El desfase temporal debe ser mayor de 50ms, este límite en el tiempo depende también de la intensidad y dirección de las reflexiones respecto del sonido directo. En general la forma de tratar el eco en una sala es actuando sobre las superficies de la misma que puedan producirlo en alguna zona de la sala, haciéndolas más absorbentes de modo que las reflexiones que produzcan sean suficientemente débiles para no ser audibles, eliminándose así el efecto eco.*

Así para cada superficie susceptible de producir eco, se dibujará la hipérbola límite la cual proporcionará geométricamente la parte de la superficie a recubrir con material absorbente para eliminar el riesgo de eco" -Cap.: 6. Aptdo.: 3 de [1]-

2.- "*El fenómeno más sencillo que tiene lugar en un ambiente con superficies reflectoras del sonido es el eco, consistente en una única reflexión que retorna al punto donde se encuentra la fuente unos 100 ms (o más) después de emitido el sonido. Se produce después de un tiempo t relacionado con la distancia d a la superficie más próxima por la expresión, t = 2d / c,*
donde: c es la velocidad del sonido, es decir 345 m/s. El factor 2 se debe a que el sonido recorre de ida y de vuelta la distancia entre la fuente sonora y la superficie. De esta fórmula se deduce que para tener un eco la superficie más próxima debe estar a unos 17 m." -Cap.: 4 de [2]-

3.- "*Un eco es una reflexión que se oye como acontecimiento discreto. Para que una reflexión sea oída como eco debe llegar por lo menos 50 ms después que el sonido directo. La reflexión también tiene que ser más prominente que sus vecinas. En todas las salas hay múltiples reflexiones que llegan 50ms después que el sonido directo. Para ser percibida como eco se requiere que la reflexión sea sobre una gran superficie por una trayectoria más simple que otras reflexiones con igual retraso, o reflexiones que impliquen focalizaciones. En la primera categoría, la reflexión en la pared trasera y adyacente es una causa frecuente de ecos sucesivos, aunque éstos solamente son percibidos como ecos en grandes salas. Los ecos focalizados son un problema común en salas con bóvedas, salas semicilíndricas, o en plantas con forma de abanico con las paredes posteriores curvadas."* -Cap.: 2 Aptdo.:7.1 de [3]-

4.- "*Los métodos de Yamamoto y de Dietsch se pueden utilizar para evaluar resultados de medidas en el caso de señales más complejas en situaciones reales. Sin embargo, se necesita una herramienta para evaluar ecos individuales en la etapa de diseño, donde no es posible una medida de la señal. El método de detección del eco usado por Makrinenko, asume que no hay otras señales presentes. Pero en realidad hay muchas reflexiones, de las cuales una reflexión sola, más fuerte puede producir un eco y las otras reflexiones pueden enmascarar el eco. Se necesita conocer como decae el nivel del campo sonoro para determinar el nivel del eco sobre ese campo. El nivel de las reflexiones individuales depende de la distancia recorrida de la fuente al receptor."* -Cap.: 2 Aptdo.: 7 de [4]- y -Cap.: 12 Aptdo.: 4 de [5]-

5.- "*En salas cerradas los ecos son generalmente enmascarados afortunadamente por la reverberación de la sala. Si se convertirá una reflexión en eco o no dependerá de su retraso con respecto al sonido directo, de su intensidad relativa, de la naturaleza de la señal , y de la presencia de otras reflexiones que enmascaren eventualmente la reflexión considerada como eco."* -Cap.: 7 Aptdo.: 1 de [6]-

PLANTEAMIENTO

Después de haber dado un repaso a varias de las definiciones más habituales de eco, vemos que la mayoría se basan tan solo en la capacidad fisiológica de integración que tiene nuestro sistema auditivo. Eso está claro cuando dos sonidos idénticos se presentan a un oyente con una diferencia de 50 milisegundos[1]; éste los aprecia separados y en esencia como dos estímulos diferenciados. Nuestra cuestión o la pregunta que nos hacemos es ¿Bajo qué condiciones se puede dar un fenómeno como el que se usa para definir el eco?

Fig.- 1: Eco, eco.....Eco, eco....

[1] Tomando el valor de 50 ms como un valor estandarizado promedio, y para la velocidad del sonido 340 m/s.

Nuestra opinión es que salvo en situaciones muy especiales o singulares, es muy difícil percibir el eco tal como se suele entender en el lenguaje popular o del 'sentido común'. Bueno, si, en el campo a las afueras de la ciudad frente a una montaña lejana (creo que es una experiencia inolvidable, hasta fue popular en algunas viñetas de las revistas gráficas de la época del TBO y ahora en la 'web'). Nuestra intención no es negar la existencia de ecos o la capacidad de detectar éstos en un evento acústico bajo ciertas circunstancias (que no son ni evidentes ni sencillas de normalizar), sino intentar aclarar de alguna forma la confusión que produce la definición tal como se transcribe en la literatura acústica docente y de divulgación, pues es habitual que de forma instintiva casi todo el mundo piense que, en cualquier habitación que tenga unas dimensiones amplias, uno de los problemas principales sobre los que hay que poner mucho celo es en el estudio y análisis del riesgo de eco.

Haciendo unas reflexiones previas a los resultados, podríamos afirmar que: cualquier señal acústica que recibe un individuo es un conjunto extenso de reflexiones de los múltiples paramentos y obstáculos de distinta naturaleza que lo rodean; salvo en la situación ideal que ya hemos comentado de pasada: emisor, receptor colocados en puntos muy próximos o idénticos; campo abierto sin otros objetos reflectantes efectivos que las paredes de las montañas lejanas; ruido ambiente bajo, típico de un escenario natural no contaminado. Pero la realidad es otra muy distinta en los recintos: lo usual es tener al menos seis paramentos que producen reflexiones efectivas; el ruido ambiente es de naturaleza interior debido a las propias reflexiones (campo reverberante). Y, aunque no sea de mucha importancia para la discusión actual, es difícil que la separación del emisor a las superficies reflectantes alcance distancias comparables a las de las montañas lejanas.

Esto último viene avalado por una cuestión que antes dejamos de lado, pero el hecho real es que en un recinto usualmente los sonidos que se producen no son aislados y únicos sino que pertenecen a un discurso continuo por lo que el ruido ambiente está compuesto también por los sonidos sucesivos del habla y por lo tanto los niveles de las reflexiones para ser detectables deberían ser lo suficientemente elevados para que tuvieran preponderancia frente a los subsiguientes golpes de voz. [7], [8]

Para ilustrar la problemática vamos a hacer uso en primera instancia de una herramienta geométrica 2D muy sencilla y de acceso universal (GeoGebra®), tratando posteriormente los datos obtenidos con una hoja de cálculo (Excel®). En una segunda aproximación corroboraremos lo dicho con una aproximación más realista de las situaciones planteadas con un modelo acústico 3D (Catt_Acoustic®).

Los ejemplos que analizaremos con GeoGebra tan solo tendrán cuatro paramentos reflectantes pero creo que el comportamiento es extrapolable sin ninguna cortapisa a la situación real de un recinto con suelo y techo además, puesto que esos dos cerramientos lo único que aportarán es mayor densidad de reflexiones. También hay que recalcar que planteamos un reflectograma de hasta quinto orden, como mucho, pues para recintos de dimensiones normales se consigue llegar hasta los 200 milisegundos aproximadamente de historia temporal, lo que cubre con creces la franja problemática clásica del eco.

Nuestro problema comenzó cuando nos propusimos analizar la evolución temporal de las reflexiones que se producen en un recinto común, es decir con las dimensiones de un aula (tomemos como punto de partida 6m x 12m). El resto de casos posibles se podrían encontrar en las dimensiones de los siguientes recintos: [futbol(100m x 80m); baloncesto(28m x 15m); pabellón deportes(50m x 35m); sala actos(25m x 13m) (17m x 11m); sala conferencias(8m x 10m); aulas(6m x 6m) (5m x 8m); laboratorios(14m x 7m); gimnasios (12m x 10m)];

Al determinar el reflectograma nos percatamos de algunas cosas evidentes:

1) Cualquier reflexión por cercana que estuviera del rayo directo siempre tiene menor intensidad que éste (disminución con el cuadrado de la distancia).

2) No existe una reflexión unitaria y aislada, sino un conjunto secuencial de reflexiones.

3) Las reflexiones tempranas (<250 ms) no están distribuidas uniformemente, concurren en forma de pequeñas agrupaciones en función de las dimensiones y geometría del local y la posición relativa receptor-fuente.

4) Cuando se analiza el reflectograma en función de la posición relativa emisor-receptor, se encuentra que en caso de distancias cercanas la diferencia de nivel entre el directo y el resto de reflexiones es exageradamente grande lo que puede ser negativo en cuánto a que las reflexiones quedan enmascaradas por el ruido ambiente (salvo casos muy particulares como ya se ha comentado anteriormente). Así en el caso contrario, distancia receptor-emisor grande, las reflexiones tienen un nivel mucho más cercano al del 'directo' y se puede dar el caso de que su percepción sea más fácil.

Esto no quiere decir que no exista la posibilidad de que se produzca eco, sino que si se produce no es debido a una reflexión individual aislada (no existe una superficie independiente que sea responsable única del fenómeno) por la razón del apartado (1).

Para la detección del fenómeno de eco se debe de percibir una señal que seamos capaces de discernir como individual, si no es posible por su nivel particular deberá serlo por su temporalidad, esto es difícil si el campo reverberante tiene cierta secuenciación y las reflexiones nunca se dan aisladas por la razón del apartado (2) y (3).

El mayor riesgo de formación de eco acontece en lugares alejados del emisor por la razón del apartado (4).

DESARROLLO

Para la discusión, se mostrará en planta la posición relativa del emisor y receptor (EF) en el recinto, las dimensiones de la sala (AB, lateral izquierdo); (DC, lateral derecho); (AD, pared inicio); (BC, pared fondo) y la forma elegida siempre será la de un paralelepípedo. Los colores en la ilustración del trazado de rayos llevan el siguiente código:
Directo=Negro; Reflexión_1=Rosa; Reflexión_2=Naranja; Reflexión_3=Cian; Reflexión_4=Rojo; Reflexión_5=Verde;

También se dará la historia temporal del nivel recibido en conjunción con la curva de riesgo de eco de Doak-Bolt antedicha. Se debe de hacer una aclaración previa sobre lo que se va a considerar ´nivel recibido´ puesto que el continuo de reflexiones muestra una serie de particularidades, independientes del tamaño, a tener en cuenta que intentaremos clarificar a continuación:

La primera singularidad es, tal como ya hemos apuntado anteriormente, que las reflexiones aparecen distribuidas no uniformemente, si representamos los niveles recibidos sin ningún tratamiento. Lo que se observa es cierto agrupamiento (puntos **x** en la figura 2).

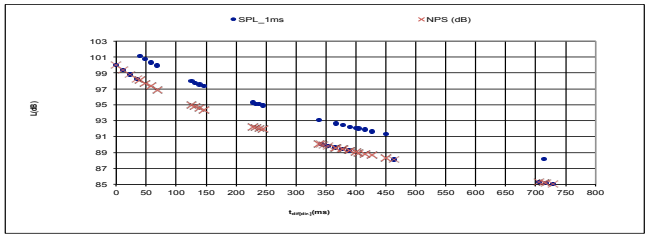

Fig.- 2: Historia temporal de las reflexiones

Si se analizan esos datos temporalmente se encuentra que a veces los datos son coincidentes en el tiempo o están excesivamente cercanos y el punto grafiado es de hecho, varios datos juntos indistinguibles (segunda singularidad); y de ser así, como hay un decaimiento exponencial continuo, sería imposible que el eco se pudiera dar. Por lo tanto se decidió agrupar energéticamente todos aquellos niveles que se recibieran en el mismo milisegundo (a sabiendas de que esta forma de tratamiento encierra cierta arbitrariedad) y se representó el resultado obtenido (puntos ● en la figura 2) con lo que se comprueba que si que es posible el que en algunos instantes los niveles percibidos superen a los de instantes anteriores, lo que propicia la posibilidad de hablar de eco.

En la figura 3, se ha representado la misma situación anterior pero esperamos que de forma más clarificadora a la hora de detectar como hemos construido la adición de niveles en cada milisegundo (se pueden diferenciar los totales (SPL_1ms) de los datos parciales en bruto (NPS).

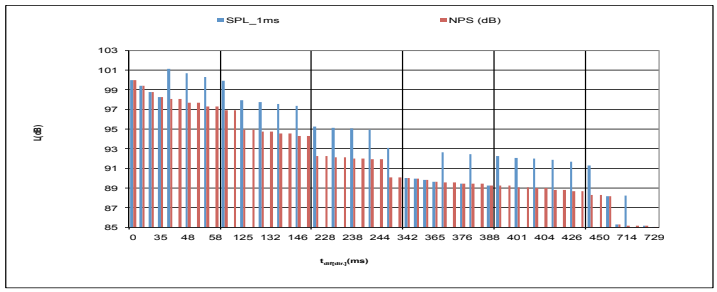

Fig.- 3: Histograma de las reflexiones

Casos En GeoGebra

Como primer espécimen para comenzar el estudio vamos a escoger un aula normal-grande (6m x 12m) parecida a una sala de conferencias, distinguiremos dos situaciones 'Largo', 'Corto' como referencia a la distancia emisor-receptor en cada caso. La razón de esta elección viene dada por ser el tamaño de recinto en donde hemos detectado un comportamiento cercano a la idea que se suele tener de eco. Por debajo de estas dimensiones podríamos decir que el fenómeno que estamos estudiando es inexistente o de percepción inapreciable. Se finalizará este apartado con el análisis de recintos de dimensiones más grandes:

Caso (6x12) Largo

En este ejemplo, figura 4, receptor alejado del emisor (EF=10m; E_{AD}=1m; F_{BC}=1m) podemos ver que, calculando el ecograma hasta el quinto orden con el método de las imágenes, los niveles de las primeras reflexiones, ver figura 5, son elevados y alguno de los paquetes (1ms) puede llegar a tener varias reflexiones simultaneas cuyo nivel resultante es ligeramente superior (101.5 dB) al nivel del rayo directo que hemos estandarizado a 100 dB. También podemos observar que alrededor de los 80 ms de la recepción del rayo directo se rozan los 96 decibelios del criterio adoptado (Doak-Bolt). Con todo es evidente que salvo en ese instante estamos muy lejos de percibir en la señal algún eco.

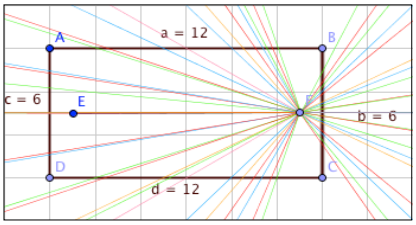

Fig.- 4: Diagrama de rayos - (EF=10m; EAD=1m; FBC=1m)

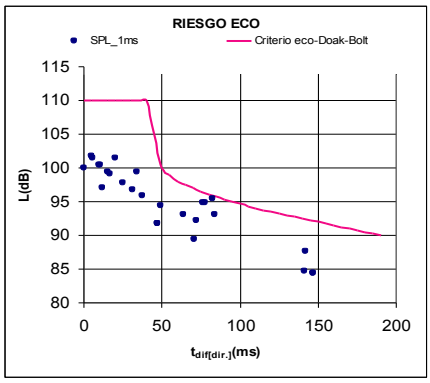

Fig.- 5: Ecograma - (EF=10m; EAD=1m; FBC=1m)

Caso (6x12) Corto

Ahora con la misma geometría posicionamos el receptor en las inmediaciones del emisor (EF=1m; E_{AD}=2m; F_{BC}=11m). Podemos observar lo apuntado en párrafos anteriores; existe una gran diferencia entre el nivel del directo y cualquier reflexión por temprana que sea, aparte el nivel final ronda los 55 decibelios, treinta unidades por debajo del caso anterior. Se puede constatar, a pesar de lo que usualmente se sugiere, que el riesgo de eco desaparece en esta situación por dos razones: no se dan agrupamientos al principio y cuando ocurren los niveles son excesivamente bajos. Por lo que no podemos sugerir que un cerramiento como el BC a más de 10 metros tanto del emisor como del receptor pueda provocar eco.

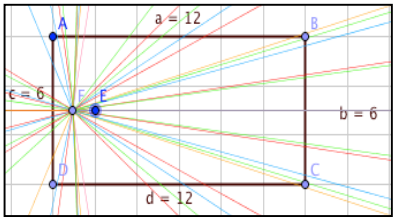

Fig.- 6: Diagrama de rayos - (EF=1m; EAD=2m; FBC=11m)

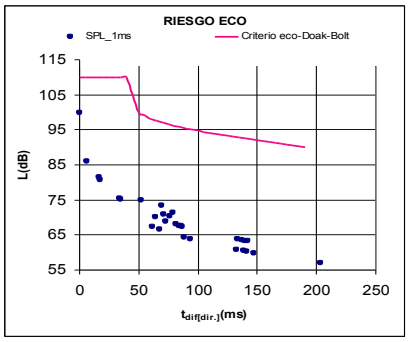

Fig.- 7: Ecograma - (EF=1m; EAD=2m; FBC=11m)

Caso (6x12) Miscelanea

Con el fin de afianzar el discurso planteado, vamos a analizar el mismo recinto pero con otras posiciones relativas (EF) de emisor y receptor.

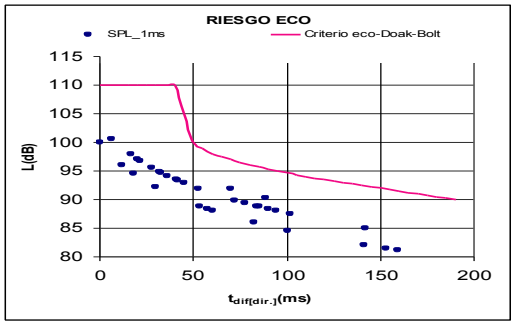

Fig.- 8: Ecograma - (EF=8.5m; EAD=1.5m; FBC=2m)

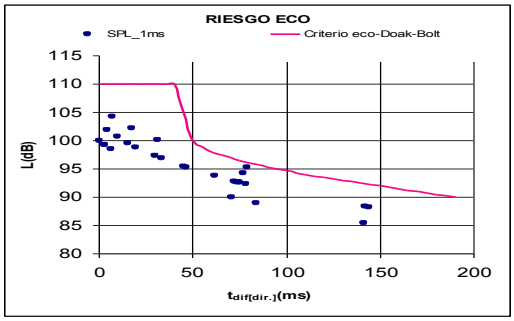

Fig.- 9: Ecograma - (EF=11 m; EAD=0.5m; FBC=0.5m)

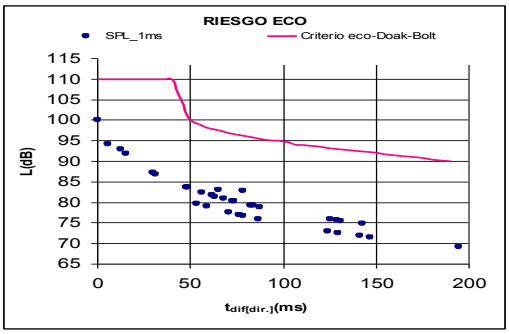

Fig.- 10: Ecograma - (EF=2m; EAD=3m; FBC=11m)

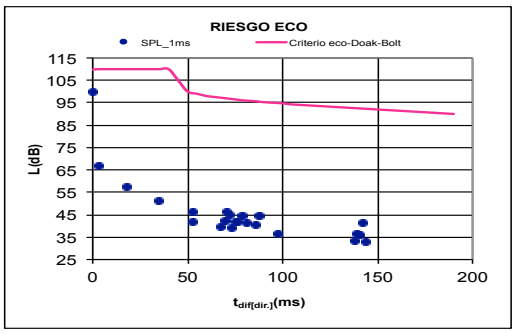

Fig.- 11: Ecograma - (EF=0m; EAD=0.5m; FBC=11.5m)

En las figuras 8 y 9 presentamos los ecogramas de dos situaciones con receptor alejado de la fuente donde se constata de nuevo que el riesgo de eco es ostensible para la zona cercana a la pared trasera.

En las figuras 10 y 11 se ha elegido el que la fuente y el receptor estén cerca y en un caso coincidentes para extralimitar el riesgo de eco y se puede comprobar que éste es inexistente.

Se puede concluir que los recintos que tienen una de sus dimensiones de 12 metros podrían considerarse como aquellos en los que empieza a existir riesgo de eco (mínimo), siempre que el receptor estuviera colocado en la franja del último metro y el emisor en la zona inicial de la habitación (franja de 2 metros). Pasemos a continuación al análisis de geometrías con dimensiones superiores:

Caso (14x14)

Buscamos con este tamaño un poco más grande (14 metros) si se detecta el posible riesgo de eco.

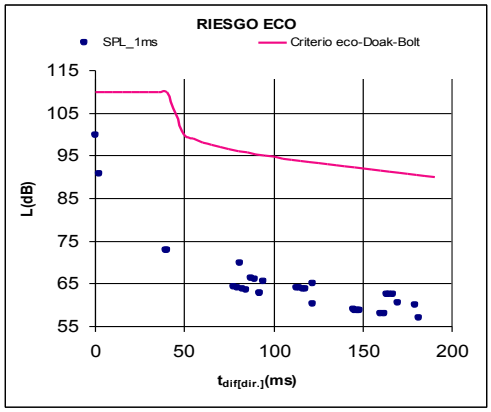

Fig.- 12: Ecograma - (EF=0.5m; EAD=1.5m; FBC=12m)

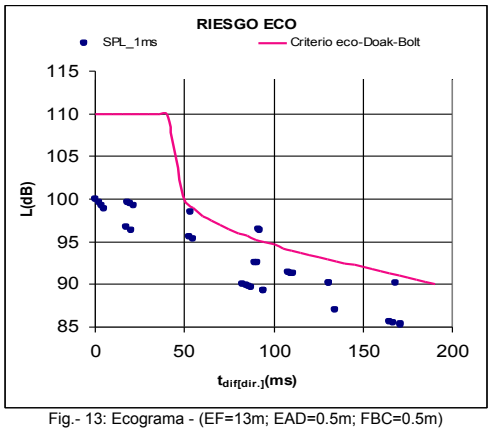

Fig.- 13: Ecograma - (EF=13m; EAD=0.5m; FBC=0.5m)

Queda claro que ya con estas dimensiones es posible percibir el eco pero siempre con las posiciones del receptor alejadas del emisor y en las cercanías del paramento trasero como en la figura 13.

Caso (40x60)

Vamos a ver un caso extremo pero no con dimensiones exageradas, por ejemplo un pabellón deportivo de tamaño medio 40m x 60m. Con esto daremos por terminado la exposición de casos.

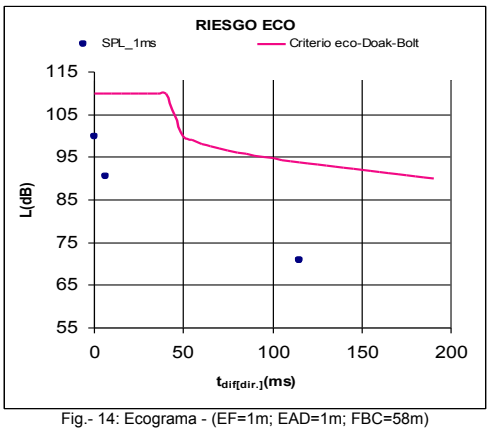

Fig.- 14: Ecograma - (EF=1m; EAD=1m; FBC=58m)

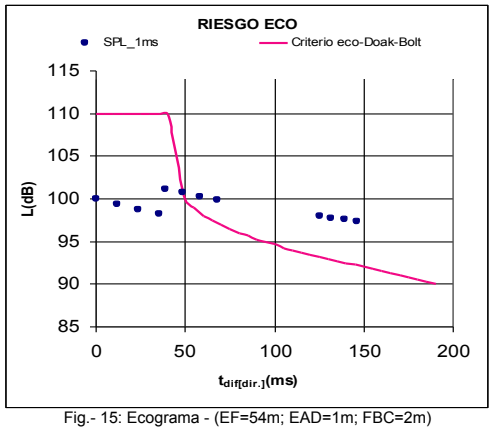

Fig.- 15: Ecograma - (EF=54m; EAD=1m; FBC=2m)

Con este ejemplo se constata que la zona de riesgo de eco más probable siempre es la zona alejada de la fuente y en las cercanías de la pared trasera, y de forma más evidente según aumenta el tamaño del recinto.

Casos En Catt_Acoustic

En este apartado vamos a retomar alguno se los ejemplos más significativos y realizaremos una simulación de su comportamiento sobre un modelo 3D con Catt_Acoustic, con el fin de comprobar la verosimilitud de lo expuesto con anterioridad.

Caso (40x60x8)

Hemos elegido el espacio de 40m x 60m x 8m; con la fuente a 1 metro del principio y el receptor en dos posiciones, una en las cercanías a 0.5 metros del inicio y otra en el fondo de la habitación a 59 metros de la fuente. Se calcula el ecograma para los 200 milisegundos con absorción despreciable y los resultados se muestran a continuación; con una ventana de promediado de 1 milisegundo.

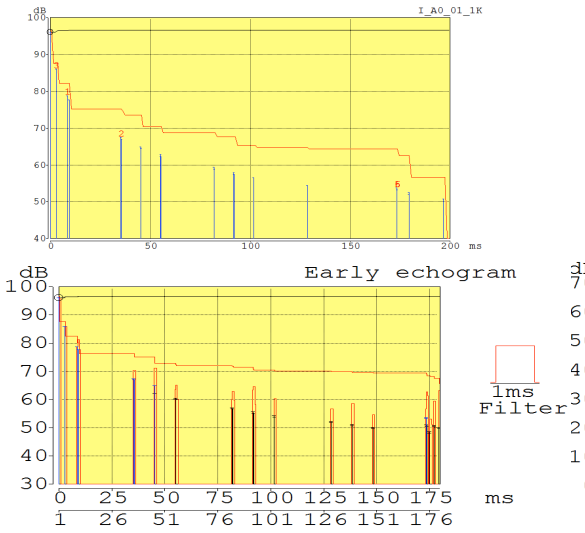

Fig.- 16: Ecograma - (EF=0.5m; EAD=1m; FBC=59.5m)

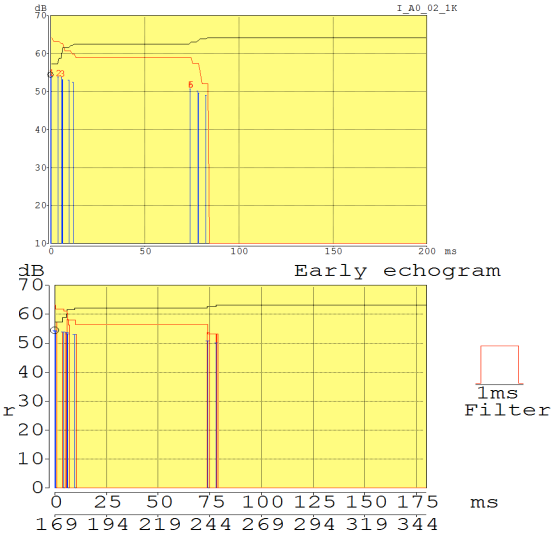

Fig.- 17: Ecograma - (EF=59m; EAD=1m; FBC=0.5m)

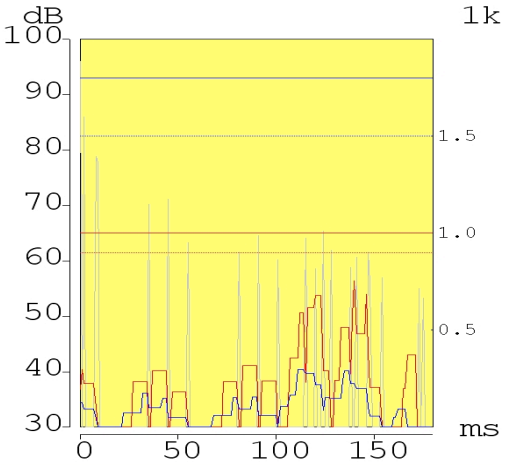

Fig.- 18: Ek_grad- (EF=0.5m; EAD=1m; FBC=59.5m)

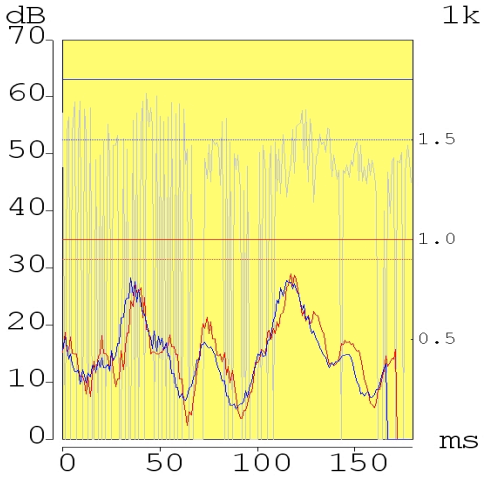

Fig.- 19: Ek_grad- (EF=59m; EAD=1m; FBC=0.5m)

Se ha calculado también el riesgo de eco usando el criterio Ek_grad [9], y no se ha detectado éste en ninguno de los dos supuestos, aunque parece evidente, a la vista de las figuras 17 y 18, que cuando receptor y fuente están alejados dicho riesgo aumenta. Se podría interpretar esto como que la aparición de ecos es una cuestión mucho más compleja de lo que se entiende habitualmente [6] [10] [11]. Y si bien con la idea planteada por Doak y Bolt [7] se puede tener una aproximación al fenómeno de una forma relativamente fácil, la cuestión es mucho más compleja como podemos ver en las figuras anteriores, pudiendo no ser posible la detección del fenómeno ni aún en recintos de dimensiones que podría considerarse singulares en la construcción habitual como es el caso del ejemplo analizado.

Se puede comprobar, con todo lo dicho hasta ahora, que los resultados son congruentes con los obtenidos en la simulación hecha en el plano con GeoGebra en el apartado precedente. La salvedad que hay que hacer es que ahora, en el CATT, los niveles del rayo directo no he podido forzarlos a que fueran 100 decibelios en ambas situaciones. Pero se sigue manteniendo la misma tendencia de decaimiento rápido de la presión sonora cuando fuente y receptor están en la misma zona, mientras que cuando están alejados los niveles son similares y los agrupamientos son mucho más espaciados.

CASOS REALES

En los párrafos siguientes vamos a presentar los resultados obtenidos en dos recintos actuales de grandes dimensiones: Lonja de San Jorge en Alcoy (Alicante) de 5 558 m^3 y Plaza de Toros cubierta de Villena (Alicante) de 64 500 m^3.

Lonja de San Jorge - Llotja de San Jordi

Es un espacio público para eventos, muestras y exposiciones situado bajo el suelo de la Plaza de España en Alcoy (Alicante, España). Es obra del arquitecto Santiago Calatrava. Realizada durante los años 1992-1995. Su estructura interior recuerda al costillar de una ballena.

Se realizaron medidas de la respuesta impulsiva de las que mostramos los resultados para dos posiciones de la fuente: una cerca de 2 metros (A) y otra en el punto más alejado posible (B) del receptor (R).

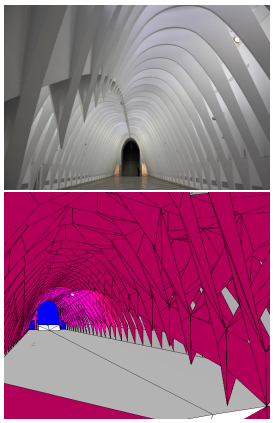

Fig.- 20: Arriba - Vista real.
Abajo - Modelo 3D_Catt.

Volumen	5558 m^3
Superficie total (sin contar los arcos)	565 m^2
Longitud	56.87 m
Anchura máxima (Acceso Sur)	14.8 m
Anchura mínima	7.09 m
Altura de la sala	9 m

Tabla- 1: Dimensiones esenciales de la sala - Llotja de San Jordi

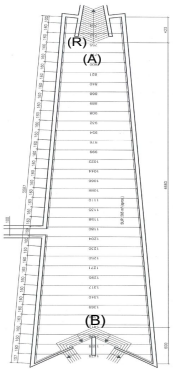

Fig.- 21: Plano medida

Respuesta impulsiva

Un resumen de los resultados sobre esta sala, se muestra a continuación:

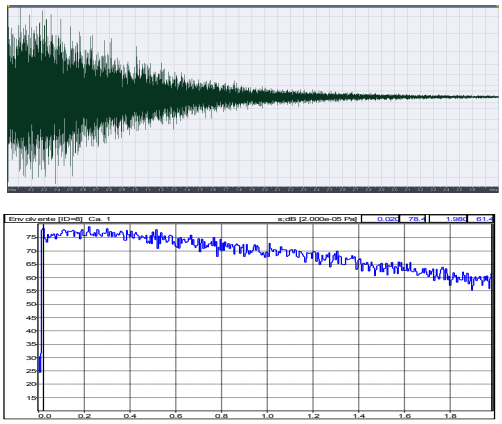

Fig.- 22: Evolución del impulso y decaimiento enegético. Posición (R-**B**)

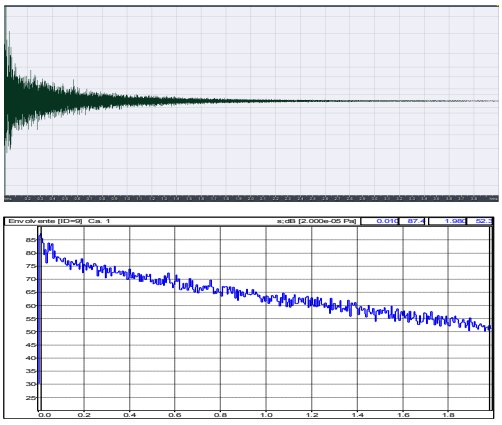

Fig.- 23: Evolución del impulso y decaimiento enegético. Posición (R-**A**)

La historia temporal en bruto no presenta ninguna anomalía apreciable y el decaimiento energético es menos pronunciado con la fuente alejada del receptor. Por lo que se procede, en los siguientes parágrafos, a realizar el análisis del riesgo de eco usando los dos puntos de vista que se han tenido en este documento.

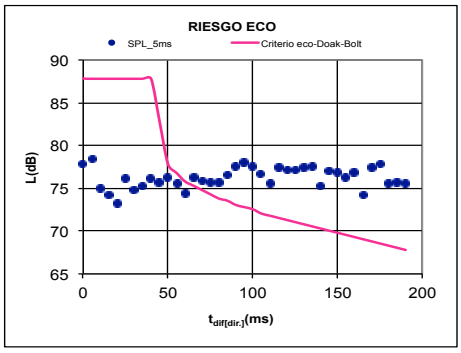

Fig.- 24: Ecograma - **Posición (R-B)**

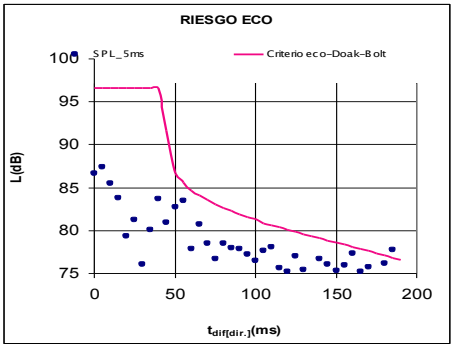

Fig.- 25: **Ecograma -** Posición (R-**A**)

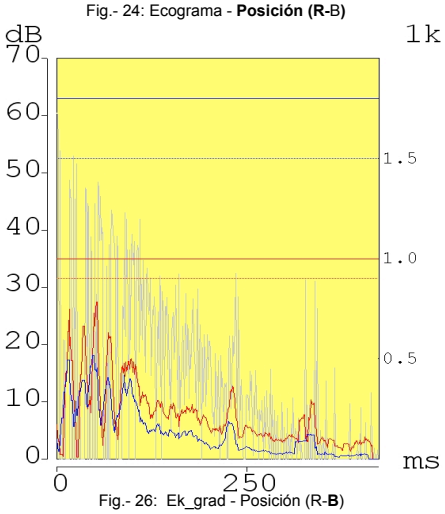

Fig.- 26: Ek_grad - Posición (R-**B**)

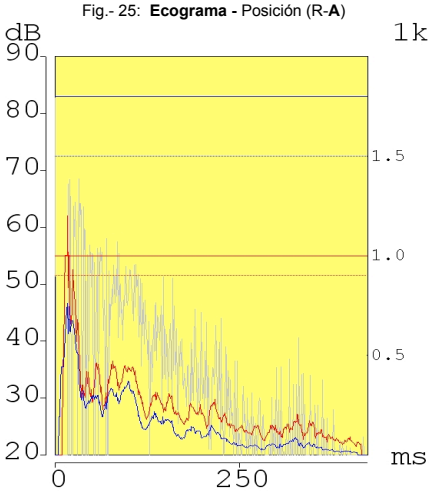

Fig.- 27: Ek_grad - Posición (R-**A**)

Es evidente que mientras que desde la filosofía planteada por Doak & Bolt el riesgo de eco es grande a partir de los 60 milisegundos en la situación (B) y casi inapreciable en (A), en cambio al aplicar el criterio de Dietsch & Kraak se detecta eco en los 20 milisegundos en (A) mientras que no existe en (B). [12]

Plaza de Toros Cubierta de Villena

La plaza de toros de Villena es una de las escasas plazas de toros existentes en la provincia de Alicante de factura neo-mudéjar, fue proyectada por el arquitecto Julio Carrilero Prat, se inauguró en el año 1924, con aforo para 10 000 personas (64 500 m^3). Se reinauguró como coso taurino y multiusos en 2011. El plan de restauración del arquitecto J. Carlos Carrión incluía la cubrición con una cúpula de vidrio estática (geoda) y un panelado móvil por secciones sobre los tendidos.

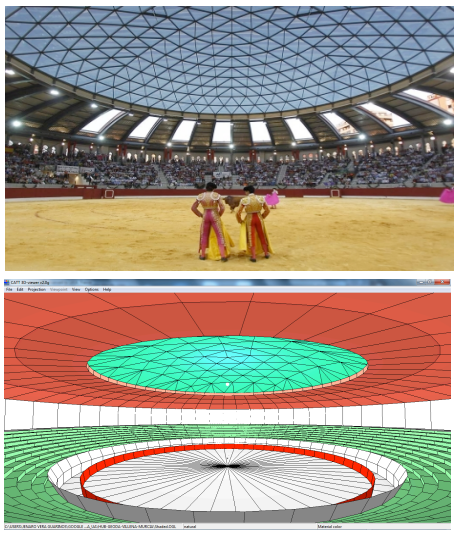
Fig.- 28: Arriba - Vista real. Abajo - Modelo 3D_Catt.

Volumen	64500 m^3
Diámetro albero	50 m
Diámetro coso	80 m
Diámetro cubierta (geoda)	50 m
Altura cubierta (geoda)	20.5 m
Altura graderío	7 m

Tabla- 2: Dimensiones esenciales de la sala - Plaza de toros Villena

Se realizaron medidas de la respuesta impulsiva de las que mostramos el resultado con el receptor en el centro geométrico del ruedo y el emisor a 4 metros.

Un resumen de los resultados sobre este recinto, se muestra a continuación:

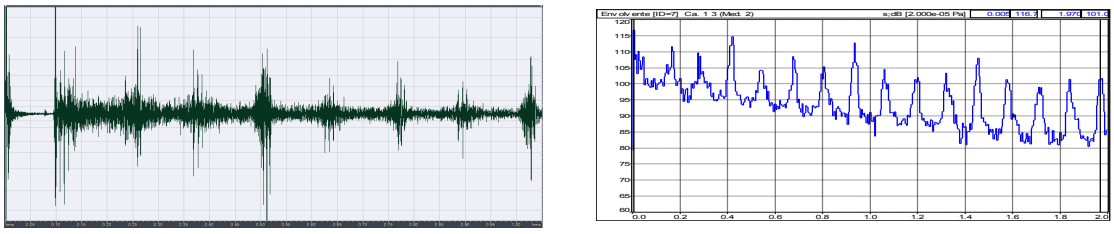

Fig.- 29: Evolución del impulso y decaimiento enegético. Receptor en centro del ruedo de la plaza de toros - emisor a 4 metros.

Es notorio que en este recinto singular, ya a simple vista, la historia temporal en bruto presenta anomalías apreciables con agrupaciones secuenciales de nivel similar al inicial. Creo que se puede responsabilizar este comportamiento a la geometría cilíndrica en su mayor parte que propicia focalizaciones, sobre todo desde los paramentos verticales de la barrera y contrabarrera. Aparte de su volumen grandioso y la existencia del cerramiento de cubierta que con su concavidad y ausencia de capacidad absorbente crea un campo reverberante confuso y largo en exceso, alcanzando un tiempo de reverberación para las bandas de 250 Hz y 1000 Hz de 25 segundos y 12 segundos respectivamente.

A continuación se procede a realizar el análisis del riesgo de eco usando los dos puntos de vista que se han tenido en este documento.

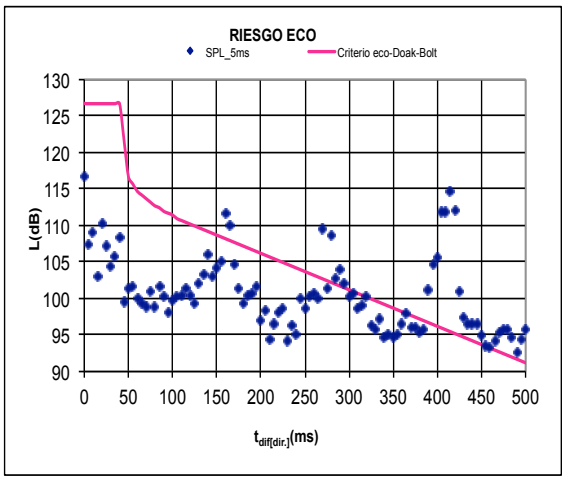

Fig.- 30: Ecograma- Plaza toros Villena

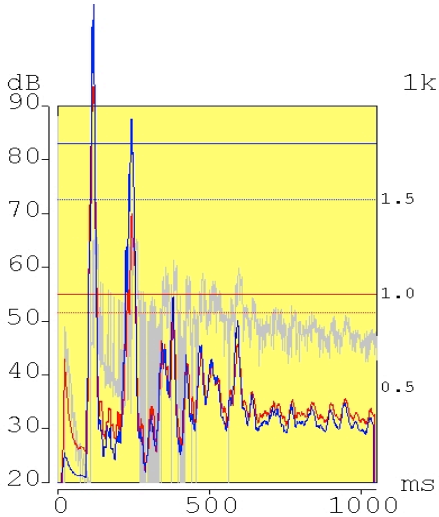

Fig.- 31: Ek_grad - Plaza toros Villena

Sea cual sea el método que usemos para detectar el eco, en este ejemplo singular, es evidente que hasta de su historia temporal se emitir un juicio certero.

CONCLUSIONES

A la vista de los resultados obtenidos tanto de las simulaciones como de los casos reales contemplados, se puede afirmar que el fenómeno del eco es mucho más complejo de lo que se podría pensar en principio desde la concepción simplista de los manidos 50 milisegundos o los 17 metros del camino diferencial entre el directo y el reflejado, tanto da. Con esto no quiero decir que no esté involucrada la capacidad de integración fisiológica del sistema auditivo, todo lo contario; es la clave. Pero hay muchos otros aspectos: temporales, el umbral diferencial en la percepción de los niveles de presión sonora y también, aunque en este estudio realizado con herramientas básicas lo hemos ignorado, habría que tener en cuenta la dirección de recepción relativa y binaural.

No existen reflexiones únicas que puedan ser más intensas que cualquiera precedente y por supuesto siempre serán inferiores al sonido directo, hecha la salvedad de que no vamos a tener en cuenta focalizaciones puesto que las geometrías planteadas son prismas rectangulares.

No se debe hablar de superficies reflectantes individuales pues el fenómeno de las reflexiones se entiende mucho mejor si al recinto lo consideramos como un sistema: un conjunto de superficies interrelacionadas.

El eco puede formarse en cualquier momento, el intervalo de 50 milisegundos es una zona especial pero no prohibida, cabe discutir si el eco se percibe como tal o nuestro sistema neurofisiológico lo asimila a una especie de deslocalización de la imagen sonora percibida.

No necesariamente las posiciones de recepción cercanas a la fuente emisora de sonido son las que conllevan el mayor riesgo de eco.

No se ha pretendido en ningún caso establecer una nueva metodología, tan sólo se ha abordado el tema desde una perspectiva docente, intentando ir comprendiendo la problemática de eso que llamamos campo reverberante. Y de paso intentar desterrar el fantasma de las dimensiones de la sala o la colocación de tal cerramiento, que ronda al concepto de eco tal como dicta el 'sentido común' popular. No hemos establecido nada nuevo, la lectura del texto de Kuttruff ya evidencia e ilustra el fenómeno de forma clara y realista, tan solo se ha querido entrver cómo y cuándo sería posible detectar el eco y el porqué es tan difícil encontrarlo en los recintos en los que nos movemos habitualmente (¿Permanece Eco escondida en una cueva, como cuenta la mitología, rechazada e injuriada por el bello Narciso?)

Se ha visto que el criterio de Doak & Bolt puede resultar ineficaz en algún caso pero su sencillez es loable, aunque desde el punto de vista del conocimiento y comprensión del campo acústico con profundidad el de Dietsch & Kraak es mucho mas robusto. Sobre este particular y en profundidad se pueden consultar las referencias [10] y [11].

La razón última que promovió este análisis estriba en los escasos casos, estaría mejor decir inexistentes, con los que uno se encuentra donde se pueda decir que se ha percibido eco en su uso habitual. Y esto era así hasta cuando se estudió la Llotja de Alcoi en la que se tenía la esperanza de detectarlo con claridad, tengo que decir que a pesar de que los resultados obtenidos bajo el parámetro Ek_grad no se percibe eco ni en directo ni en la escucha de las grabaciones realizadas "in situ". En cambio al realizar el estudio de la Plaza de toros de Villena, en busca de una solución a la debacle acústica que ha dado como resultado la remodelación sufrida: con sólo traspasar los corredores perimetrales por uno de los vomitorios y pisar el ruedo se descubrió que ese fenómeno existía, que era posible detectarlo con una potencia y claridad inusitada.

REFERENCIAS

[1] Llinares, J., et alt. **Acústica Arquitectónica**. Ed. SPUPV. Valencia, España (1988)

[2] Miyara, F. **Acústica Y Sistemas De Sonido**. Ed. UNR. Rosario, Argentina (1999)

[3] Barron, M**. Auditorium Acoustics And Architectural Design**. Ed. Spon Press, N.Y. (2010)

[4] Cremer, L. Mueller, H. A. **Principles And Applications Of Room Acoustics**. App. Sci. Pub. London (1982)

[5] Vercammen, M. **Sound Concentration Caused By Curved Surfaces**. PhD thesis, Eindhoven University of Technology (http://repository.tue.nl/) Printed by Eindhoven University press, (2012)

Published as issue 163 in the Bouwstenen series of the Faculty of Architecture, Building and Planning of the Eindhoven University of Technology.

[6] Kuttruff, H. **Room acoustics,** 5th edition. Ed. Taylor & Francis, New York (2009)

[7] Bolt, Doak *A Tentative Criteria For The Short-Time Transient Response Of Auditoriums*. J. Acoust. Soc. Am. 22.4 (1950)

[8] R.H. Bolt, P.H. Doak y P.J. Westervelt,
Pulse Statistics Analysis Of Room Acoustics, J. Acoust. Soc. Am. 22, 328-340 (1950)

[9] Dietsch L, Kraak W. *Ein objektives Kriterium zur Erfassung von Echosto¨rungen bei Musik- und Sprachdarbietungen.* ACOUSTICA 60 (1986): 205-216

[10] Lovstad, A. **Evaluation of Objective Echo Criteria**, M.Sc, Norwegian University of Science and Technology, Norway. (2003)

[11] Wargert, S. **A New Approach For Detecting Strong Reflections In Rooms**. Master's dissertation. Dept. Of Construction Sciences Div. of Engineering Acoustics, LTH, Lund University, Sweden. (2014)

[12] Miralles, A. **Realización De Un Estudio De Condiciones Acústicas En Una Sala Dedicada Principalmente A Palabra Y Búsqueda De Soluciones Acústicas Para Su Mejora**, PFC de Ing. Téc. de Telecomunicación -Sonido e Imagen-. Universidad de Alicante, España. (2014)