Nueva versión y reflexiones sobre la teoría. «An Improved Reverberation Formula» (1988)

Higini Arau-Puchades
Arau acustica
arauacustica@gmail.com

PACS: 43.55.Br, 43.55.Ka

IN MEMORIAM al Prof. Dr. Andrés Lara:

Dedicado en recuerdo de nuestro Presidente de Honor que fue un gran sabio, modesto, jovial, un sevillano de pura cepa, un gran y buen amigo de todos al que nunca olvidaremos.

«He personalizado mi teoría de la reverberación, como el Dr. Andrés Lara me solicitó recientemente, en un lenguaje más común a todos nosotros en la Península Ibérica y los Países Iberoamericanos". Sirva este escrito para dar reconocimiento de mi aprecio y profundo respeto y pesar a su persona».

1. Introduccion

Introduciremos primeramente algunos conocimientos ya adquiridos con las teorías clásicas:

Teorías clásicas y conceptos relacionados

Calculando el valor medio de todas las reflexiones producidas en una sala obtenemos la ley de extinción del sonido reflejado, o decaimiento del sonido, que depende de las características de absorción y del número de reflexiones **N** producidas en el recinto, que es:

$$E(t) = Eo\ e^{-Nt\alpha} \qquad (1)$$

donde α es el coeficiente de absorción medio: $\alpha = \sum_{1}^{n} Si.\alpha i/S$, $N = c/lm$, es el número de reflexiones que se producen en la sala, donde (c es la velocidad del sonido y lm es el libre camino medio), que en condiciones gaussianas , o conducta estadística normal, (como ocurre en el caso de que la distribución uniforme de la absorción en una sala) , es: $lm = 4V/S$.

Así tenemos que todas las teorías clásicas, como la de W.C. Sabine [1], C.F. Eyring [2](-Norris) , Millington [3] (- W.H. Sette) , L.Cremer [4] y H. Kuttruff [5], todas participan de que la razón de decaimiento sonoro D dB/s, que se conoce como la relación entre el decrecimiento del nivel sonoro L(t) que se extingue, en relación entre dos instante del tiempo t, su pendiente de caída siempre es constante. Ésta es la pendiente de una línea recta descendente que se inicia cuando el sonido de medición es cesado.

Puede demostrarse fácilmente, la fórmula que vincula **D** con el número de reflexiones, esta es:

$$\mathbf{D} = 10\ N\ \mathbf{a}\ \log e \qquad (2)$$

Como se observa de la expresión (2) que si el coeficiente de absorción medio **a** y el número de reflexiones **N** del recinto si son constantes también lo es la razón de decaimiento del sonido **D**, como hemos indicado anteriormente para campo difuso o reparto simétrico de la absorción en un recinto.

a) Existen dos tipos de absorción acústica:

1. *El coeficiente de absorción acústica energético* α, en el que la absorción acústica no puede ser superior a la unidad, o lo equivalente de que la absorción no puede ser superior al 100 %.
2. El *coeficiente de absorción aparente*, **a**, como los deducidos por ejemplo a través de fórmulas $\mathbf{a} = -\ln(1 - \alpha)$. Estos coeficientes pueden ser

superiores a 1, o bien a su equivalente a ser superiores al 100 %. Lo que viola a la ley de conservación de la energía. Normalmente se corresponde a la absorción determinada en una sala reverberante y calculada la absorción con el método de Sabine. En este caso cuanto mayor sea el área de muestra ensayada menor será el coeficiente de absorción acústica determinado. Esto produce un grado muy notable de incertidumbre sobre el coeficiente de absorción.

Este coeficiente aparente de absorción acústica se le domina coeficiente de absorción de decay (o decaimiento).

En las teorías clásicas se supone por hipótesis(*), un reparto uniforme o simétrico de la absorción en la sala. En este caso no debe producirse otra pendiente de decaimiento del sonido que no sea la debida a la pendiente lineal de razón constante de caída de la reverberación.

Sin embargo en una sala donde el reparto de la absorción en el recinto es no uniforme o asimétrico se generan dos tipos de decaimiento del sonido, de distinta pendiente:

1. El EDT Early Decay Time o Tiempo de Reverberación inmediato, que se analiza entre el nivel 0 dB de caída del sonido y -10 dB aproximadamente.
2. La pendiente de extinción del sonido debida a la reverberación T, que se inicia de manera aproximada desde -5 dB a - 35 dB.

Es decir una teoría acústica que pretenda resolver el tema global de la reverberación en una sala debe permitir calcular dos magnitudes esenciales del proceso de reverberación, que son: EDT y T.

2. El tiempo de reverberación en campo sonoro no difuso

En este caso supondremos que la distribución de la absorción tiene un reparto no uniforme en la sala. Por tanto no existe una densidad sonora igual en cada punto de la sala, dado que la reflexión decae mucho cuando encuentra una pared con mucha absorción y prácticamente no decae cuando el sonido colisiona contra una pared muy reflectante. Así pues la varianza de la energía sonora en la sala es muy dispar según se halle distribuida la absorción en la sala.

Teoría H.Arau-Puchades, [6]

La Ley de extinción de la energía en este tipo de sala será una combinación de las distintas extinciones del sonido en cada dirección. Lo que escribimos en el dominio real, la siguiente expresión:

$$E = E_{0e}^{-Nt\mathbf{a}} = E_{0e}^{-Nx\,t\,ax}\,{}_{e}^{-Ny\,t\,ay}\,{}_{e}^{-Nz\,t\,\mathbf{a}z} \qquad (3)$$

Recordemos que existe una anomalía muy importante de que los rayos sonoros se distribuyen en el recinto de acuerdo a una ley gaussiana, o normal, cuando estamos considerando un libre camino medio lm de las reflexiones que su valor es 4V/S.

Este concepto que cumple lm es incompatible con una distribución irregular de las reflexiones producidas por la distinta absorción que tienen las paredes.

La única posibilidad de compatibilizar las dos cuestiones efectuando una aproximación logarítmica normal de los coeficientes de absorción, tomando sus logaritmos.

$$€ = E_0\, e^{-N\,t\,\log \mathbf{a}} = E_0\, e^{-Nx\,t\,\log a_x}\, e^{-Ny\,t\,\log ay}\, e^{-Nz\,t\,\log \mathbf{a}_z} \qquad (4)$$

Admitiendo que ahora se cumpla aproximadamente $E \approx €$, obtenemos la siguiente igualdad:

$$\log \mathbf{a} = (N_x/N)\log a_x + (N_y/N)\log a_y + (N_z/N)\log a_z, \qquad (5)$$

De la que se deduce que en el dominio real es:

$$\mathbf{a} = a_x^{Nx/N}.a_y^{Ny/N}.a_z^{Nz/N} \qquad (6)$$

Admitiendo que la relación $(N_i/N)= (S_i/S)$, i=x, y, z. es cierta,

Obtenemos la siguiente expresión:

$$\mathbf{a} = a_x^{Sx/S}.a_y^{Sy/S}.a_z^{Sz/S} \qquad (7),$$

donde son:

$$Sx = Sx_1 + Sx_2,\ Sy = Sy_1 + Sy_2,\ Sz = Sz_1 + Sz_2,$$
$$S= S_X + Sy + Sz$$

$a_x = -\ln (1 - \alpha_x)$, $a_y = -\ln (1 - \alpha_y)$, $a_z = -\ln (1- \alpha_z)$, siendo además:

$$\alpha_x = (Sx_1\, \alpha x_1 + Sx_2\, \alpha x_2) / Sx, \text{ siendo } Sx = Sx_1+Sx_2 \qquad (8a)$$

$$\alpha_y = (Sy_1\, \alpha y_1 + Sy_2\, \alpha y_2)/Sy, \text{ siendo } Sy = Sy_1+Sy_2 \qquad (8b)$$

$$\alpha_x = (Sz_1\, \alpha z_1 + Sz_2\, \alpha z_2)/Sz, \text{ siendo } Sz = Sz_1+Sz_2 \qquad (8c)$$

En nuestro discurso hacia el cálculo del tiempo de reverberación en una sala de absorción asimétrica, o no uniformemente repartida, estamos admitiendo:

1. Que entre paredes que interceptan una dirección, por ejemplo la dirección x, o sea entre paredes paralelas o enfrentadas, admitiremos que el valor medio aritmético de los coeficientes de absorción energético ponderados por su área respectiva,

(*) La hipótesis citada casi nadie la respeta ni la ha respetado, pues no ha habido nunca una fórmula solvente que permita el cálculo del T y menos del EDT. Por esto en 1988 H. Arau propuso una teoría nueva que intenta resolver en lo posible este problema.

son los que aseguran la secuencialidad de las reflexiones entre paredes.

2. Que la colisión simultanea entre paredes, mutuamente perpendiculares, se mantiene por medio de la media geométrica ponderada por el área en cada dirección considerada.

Considerando todas las expresiones calculadas anteriormente podemos escribir el Tiempo de Reverberación del siguiente modo:

$$\mathbf{T = 0.163\ V/\ (Sa + 4mV)} \qquad (9)$$

Donde es: $\mathbf{a} = a_x^{Sx/S}.\ a_y^{Sy/S}.\ a_z^{Sz/S}$, definido de (7) a (8a, 8b, 8c) y V es el volumen de la sala y m es el coeficiente de absorción del aire.

Otra forma de escribir la fórmula del T es:

$$\mathbf{T = T_x^{Sx/S}.\ T_y^{Sy/S}.\ T_z^{Sz/S}} \qquad (10)$$

Donde son : lx , ly, lz, las dimensiones que definen el volumen en cada dirección, siendo además:

$T_x = \dfrac{0.16V}{-S\ \ln(1-\alpha x)+4mlx}$, (periodo reverberación en dirección x)

$T_y = \dfrac{0.16V}{-S\ \ln(1-\alpha y)-4mly}$, (periodo reverberación en dirección y)

$T_Z = \dfrac{0.16V}{-S\ ln(\alpha z)+4mlz}$, (periodo reverberación en dirección z)

Observando la expresión (10) vemos que: ***El tiempo de reverberación de una sala con absorción no uniforme es igual a la media geométrica ponderada por las fracciones de área de cada uno de los periodos de reverberación en cada dirección x, y, z del recinto.***

El valor medio de la muestra normal expresada en la formula (7) ó (10) tiene un factor de dispersión de la distribución logarítmico-normal que viene dado por la expresión (12), la cual determina los valores máximos y mínimos en que la muestra de valores sigue siendo típico normal.

La muestra máxima es la siguiente: $a_l = \mathbf{a}.d$ y la mínima: $a_l = \mathbf{a}/d$. Como el coeficiente de «decay» $\mathbf{a_i}$ es proporcional al $\mathbf{D_i}$ (razón de decaimiento del sonido inmediato), obtenemos que. $\mathbf{D_i} = \mathbf{D}.d$, por lo que el Tiempo de reverberación inmediato, o Early decay time, se calcula así:

$$\mathbf{EDT = 60/D_i} \qquad (11)$$

El valor d de la dispersión estadística se obtiene desde la siguiente expresión:

$$d = \text{antilog}\,(1/6)\sqrt{\frac{x}{S}(\lg \bar{a}_x)^2+\frac{y}{S}(\lg \bar{a}_y)^2+\frac{z}{S}(\lg \bar{a}_z)^2-\left[\frac{x}{S}\lg \bar{a}_x+\frac{y}{S}\lg \bar{a}_y+\frac{z}{S}\lg \bar{a}_z\right]^2} \qquad (12)$$

También la muestra mínima obtenida a través de la expresión $a_l = \mathbf{a}/d$, es:

$$D_l = \mathbf{D}/d.\ \text{Por lo que}\ T_l = 60 / D_l \qquad (13)$$

Este el tiempo de reverberación final o «late reverberation time»que muchas veces no se observa experimentalmente ya que depende del ruido de fondo que enmascara su aparición. Nótese que cuando el reparto de la absorción es simétrico entonces d = 1. Por tanto entones la pendiente única e idéntica a la **D**.

Si observamos, tanto la expresión (9) y (10) de la fórmula de Higini Arau – Puchades, obtenemos que cuando los coeficientes de absorción energéticos α_x, α_y, α_z son iguales, o se aproximan a un valor α_i, superior a $\alpha_i > 0.3$ entonces lo calculado por las formulas (9) y (10) son coincidentes, o tienden a aproximarse a los valores calculados según Eyring.

Pero cuando α_i es inferior a 0.3, entones vemos que lo calculado según por las formulas (9) y (10) son coincidentes, o tienden a aproximarse a los valores calculados según Sabine. Por tanto debemos admitir que las fórmulas (9) y (10) son expresiones generales útiles para el cálculo del tiempo de reverberación tanto para el caso simétrico y asimétrico de la absorción en una sala.

3. Discusión de otras fórmulas que pretenden calcular espacios de absorción asimétrica

3.1. Formula D. Fitzroy, [7]

Otra forma de escribir la fórmula del T es:

$$\mathbf{T = T_x(Sx/S) + T_x(Sy/S) + T_x(Sz/S)} \qquad (14)$$

Donde son: lx, ly, lz, las dimensiones rectangulares que definen el volumen. Siendo además:

$T_x = \dfrac{0.16V}{-S\ \ln(1-\alpha x)+4mlx}$, (periodo reverberación en dirección x)

$T_y = \dfrac{0.16V}{-S\ \ln(1-\alpha y)+4mly}$, (periodo reverberación en dirección y)

$T_z = \dfrac{0.16V}{-S\ \ln(1-\alpha z)+4mlz}$, (periodo reverberación en dirección z)

Observando la expresión (14) vemos que: ***El tiempo de reverberación de una sala con absorción no***

uniforme es igual a la media aritmética ponderada por las fracciones de área de cada uno de los periodos de reverberación en cada dirección x, y, z del recinto.

Fitzroy escribió esta formula sin ninguna demostración, pero nosotros pensamos que esta fórmula era posible deducirla matemáticamente. No obstante demostramos nuestra fórmula en lugar de la suya. Pero observamos que si la absorción acústica es idéntica, o aproximadamente igual en cada dirección x,y,z, entonces se cumple:

$$T_x^{Sx/S} \cdot T_x^{Sy/S} \cdot T_x^{Sz/S} = T_x(Sx/S) + T_x(Sy/S) + T_x(Sz/S)$$

Lo que significa que la media geométrica ponderada de los periodos es igual, o aproximadamente igual, a la media aritmética ponderada de los mismos.

Esto quiere decir que la fórmula de Fitzroy, al igual que la fórmula de Arau-Puchades, dan resultados iguales, o semejantes, a Sabine o a Eyring cuando existe un reparto uniforme, o aproximado, de la absorción acústica en una sala. Sólo en este caso coinciden ambas fórmulas de pefil clásico con las no clásicas. Pero en otras distribuciones de la absorción no uniformes el comportamiento de ambas fórmulas es bien distinto, como veremos en la sección 4.

También debemos advertir que Fitzroy no emitió ninguna fórmula de cálculo del EDT como sería lógico y deseable obtener. Pero a buen seguro no la hubiera podido obtener dado que su fórmula sólo tiene sentido para reparto uniforme de la absorción en un recinto.

Posiblemente Fitzroy enunció su fórmula, leyendo a H.Bagenal. [8], quien escribió:

La Reverberación en salas rectangulares consiste realmente de tres conjuntos de de inter-reflexiones entre los tres pares de superficies opuestas paralelas.

3.2. E. Nilsson o la Norma EN 12354-Parte 6, [9]

La expresión de Nilsson se basa en el método Estadístico energético. Es una expresión muy compleja que se detalla en la EN 12354- Parte 6.para campo no difuso.

Por su dificultad expresiva no la incluiremos en detalle. Lo que podemos decir es que no cumple las prescripciones que indicó el Prof. Lothar Cremer de que el sistema propuesto también debiera calcular el EDT.

3.3. Formula R. O. Neubauer

Esta teoría [11] se basa en una corrección que Kuttruff [12] realizó sobre la fórmula de Eyring, en el que consideraba un campo parcialmente difuso en donde se cumple la ley de Lambert cuando la intensidad de irradación es constante.

Neubauer aplica la corrección de Kuttruff sobre las expresiones tipo Eyring existentes en la fórmula de Fitzroy, simplificando la expresión considerando sólo las superficies primetrales (paredes frontales y fondo + las superficies laterales), sólo distingue el techo + suelo.

Esta teoría no predice un EDT como sería obvio hiciera si esta pretende ser aplicable a espacios de absorción distribuidos de manera no uniforme.

Por otro lado citar que normalmente que los valores del tiempo de reverberación que predice son muy próximos a los que predicen Sabine y Eyring.

$$T_{60} = \left(\frac{0{,}32 \cdot V}{S^2}\right) \cdot \left(\frac{h(l+w)}{\bar{\alpha}^*_{ww}} + \frac{lw}{\bar{\alpha}^*_{CF}}\right)$$

where

V, S = Volume in m^3 and total surface area of the room in m^2

h, l, w = room dimensions height, width and length in m

$\bar{\alpha}^*_{ww}$; $\bar{\alpha}^*_{CF}$ = average effective absorption exponent of walls, ceiling + floor

with

$$\bar{\alpha}^*_{ww} = -\ln(1-\bar{\alpha}) + \left[\frac{\rho_{ww}(\rho_{ww}-\bar{\rho}) \cdot S_{ww}^2}{(\bar{\rho} \cdot S)^2}\right]$$

$$\bar{\alpha}^*_{CF} = -\ln(1-\bar{\alpha}) + \left[\frac{\rho_{CF}(\rho_{CF}-\bar{\rho}) \cdot S_{CF}^2}{(\bar{\rho} \cdot S)^2}\right]$$

and

$\bar{\alpha}$ is the arithmetic mean of the surface averaged absorption coefficient

$\rho = (1-\alpha)$ is the reflection coefficient

$s_{CF} = 2lw$; is the survace area of ceiling and floor, in m^2

$S_{ww} = 2lh + 2hw$; is the surface area of the walls, in m^2

$S_{total} = 2[h(l+w)+lw]$; is the total surface area of ceiling, floor and walls, in m^2

4. Round robins internacionales: experimento-teoria

Una teoria es buena, cuando sus resultados se ajustan a los valores determinados experimentalmente. Aquí vamos ha examinar los resultados obtenidos de varias intercomparaciones internacionales.

4.1. ROUND ROBIN 1

Sylvio Bistafa – J.S. Bradley [13], en este caso considera la corrección Dance-Shield en las fórmulas de Millington y Cremer. Por esta razón nosotros hemos omitido

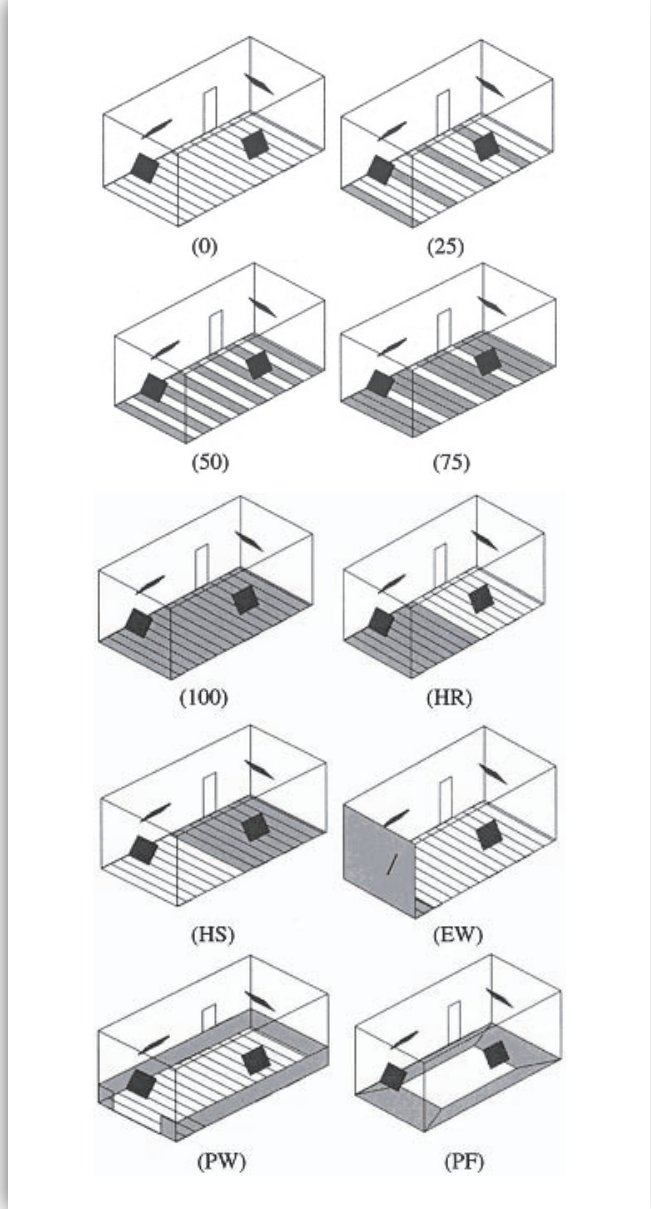

Figura 1. Los cuadraditos negros que están flotando en las distintas salas que aparecen en la figura anterior son los difusores que utilizaron los investigadores para conseguir un campo sonoro difuso.

los resultados referentes a Millington y Cremer debido a que la corrección de Dance transforma las citadas fórmulas a una de Sabine.

De los casos analizados sólo veremos aquí la forma, donde se muestra las zonas de ubicación del material absorbente. Para obtener mayor información débese a leer la publicación indicada.

Los resultados obtenidos son indicados en el gráfico y tabla que se muestra a continuación.

El error relativo, en valor absoluto, cometido entre el experimento y el modelo Teórico considerado es:

$$E(\%) = \frac{|T_{exp} - T_{theo}|}{T_{exp}} \times 100$$

En la tabla que se muestra hemos eliminado las filas de Cremer y Millington con motivo que Bistafa y Bradley han aplicado la corrección de Dance y Shield [18] que en nuestra opinión falsean las propuestas originales de los autores. Y además la corrección de Dance convierte el coeficiente de Millington a uno de Sabine. Esto mismo no hemos podido anularlo en el gráfico para no estropearlo.

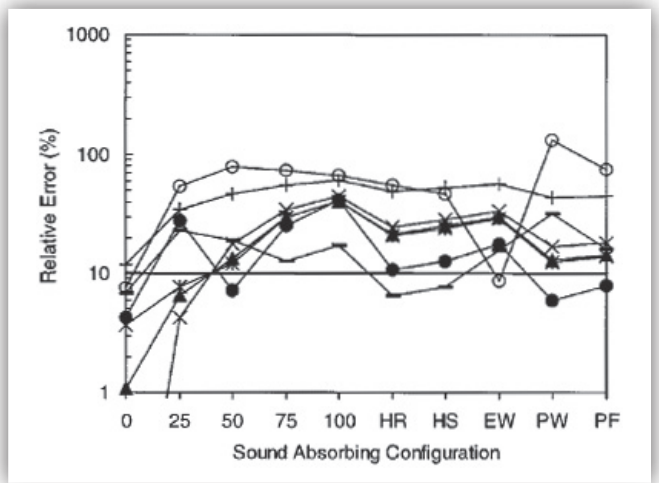

Figura 2. Average relative error in reverberation time prediction across the six octave bands from 125 Hz to 4kHz, for each sound-absorting configuration. Analytical predictions usisng absorption exponents fo: (▲) a_{Sab}, (x) a_{Eyr}, (*)a_{Mil}, (●) a_{Cre}, (+) a_{Kut}, (○)a_{Fit}, and (–) a_{ArP}. Also shown in this figure is a horizontal line across the plot area that corresponds to an accuracy of 10%.

Tabla 1. Overall average relative errors of the analytical predictions of reverberation time for then sound-absorbing configurations in the simulated classroom.

Absorption exponent	Overall average relative error (%)		
	Frequency bands included in the averages		
	1kHz	500 Hz-2kHz	125Hz-4 kHz
Sabine	38.8	31.6	21.5
Eyring	42.6	35.7	24.7
Kuttruff	68.0	63.5	49.3
Fitzroy	92.0	95.8	65.7
Arau-Puchades	22.9	22.7	16.7

Por ejemplo, para la frecuencia de 1kHz de este Round Robin en la franja de 100 a 60 % de error relativo, de mayor a menor, tenemos Fitzroy y Kuttruff.

En la franja 50 a 30 % tenemos Eyring y Sabine. Finalmente en la franja 20 a 0 % tenemos Arau-Puchades.

4.2. ROUND ROBIN 2

Round Robin efectuado por J. Ducourneau, U. Planeau [16]

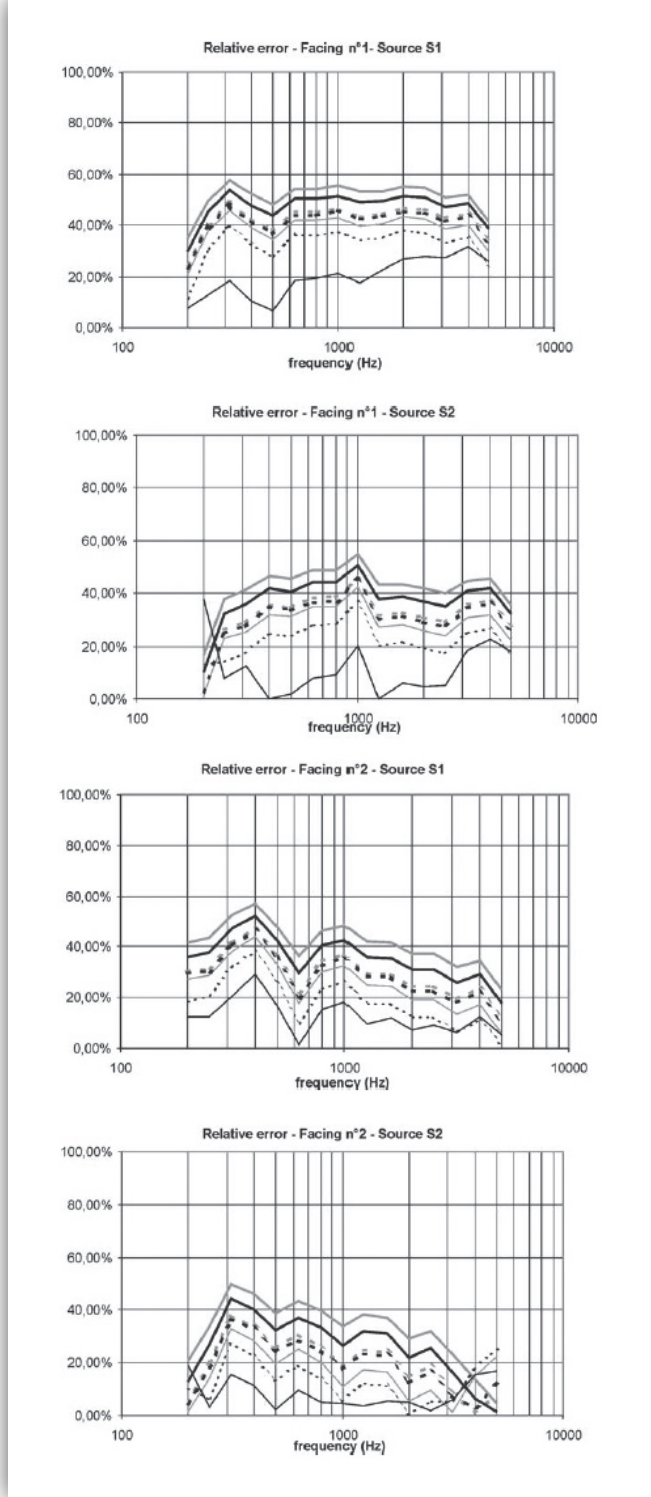

Figura 3. Reverberation time relative error between the experiments and analytical predictions for facings nos. 1 and 2 and for each source: — Sabine's model; – – Eyring's model; - - Millington's model; - - Pujolle's model; — Kuttruff's model; — Arau Puchade's model; —— Fitzroy's model.

Como conclusion se obtiene:

El error relativo máximo se halla entre el 40 al 60 % estando en esos lugares de mayor a menor Kuttruff, Fitzroy y Millington.

Situados entre el 20 y el 40 % de mayor a menor: Eyring, Sabine y Pujolle.

Y situado entre el 0 al 20 % está Arau-Puchades.

4.3. ROUND ROBIN 3:

Efectuado por Mehta-Muholland [17] y comentado por Dance-Shields [18]

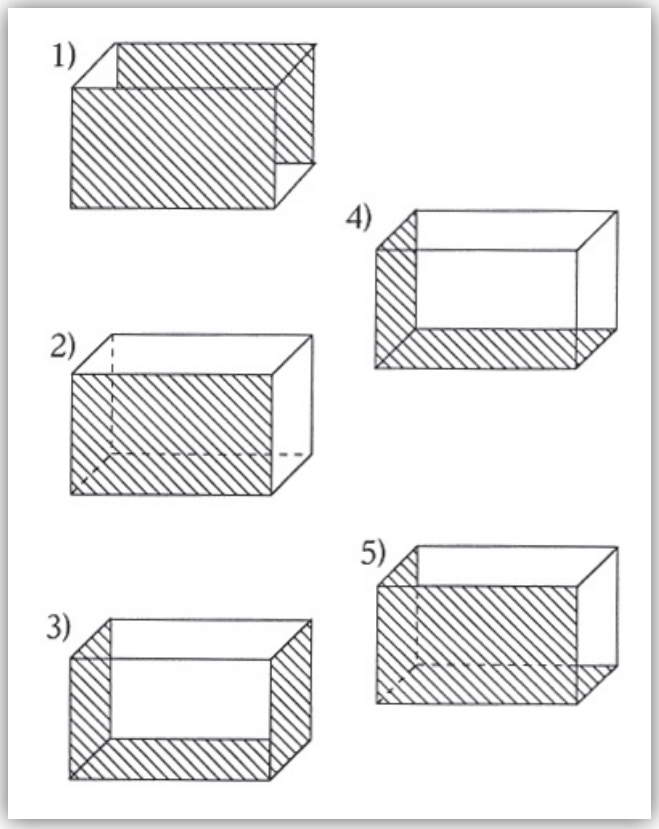

Figura 4. The five configurations of the Mehta and Mulholland experimental room with absorptive material on the room surfaces.

El caso 0 es el caso de sala sin tratamiento acústico.

Tabla 2. The measured and predicted reverberation times (s) 1 kHz.

Case	Measured	Arau-Puchades	Eyring	Sabine	Millington
0	2.20	2.07	2.18	2.23	2.18
1	0.52	0.51	0.20	0.24	0.23
2	0.71	0.79	0.39	0.43	0.41
3	0.29	0.28	0.16	0.21	0.20
4	0.40	0.37	0.23	0.27	0.26
5	0.17	0.14	0.14	0.18	0.17

Tabla 3. Valores de T y ε % a 500 Hz.

	0		1		2		3		4		5	
Casos	**T**	**ε**	**T**	**ε**	**T**	**ε**	**T**	**ε**	**T**	**ε**	**T**	**ε**
Measue	2.30	Vref	0.52	Vref	0.71	Vref	0.29	Vref	0.40	Vref	0.17	Vref
Arau P	2.07	23	0.51	1.9	0.79	11.2	0.28	3.4	0.37	7.5	0.14	17.6
Eyring	2.18	12	0.20	61.5	0.39	450.7	0.16	44.8	0.23	42.5	0.14	17.6
Sabine	2.23	7	0.24	53.8	0.43	394.4	0.21	0.27	0.27	32.5	0.18	5.8
Millingt. *	2.18	12	0.23	55.7	0.41	422.5	0.20	0.31	0.26	35	0.17	0

* Aplica corrección de Dance, Shield.

5. Conclusiones

Como puede verse de los experimentos citados las discrepancias con relación entre las teorías de cada modelo y el experimento depende de la sala y también de la distribución del material en la misma.

Lo cierto es que la fórmula de Arau-Puchades según todos los Round Robin realizados hasta la fecha es la que se aproxima mejor al resultado experimental, sólo a veces según sea la distribución del material absorbente la fórmula EN 12354 se le aproxima.

Lo que sí hemos advertido de los Round Robin realizados que la fórmula de Sabine tiene una aproximación al valor medido **E** entre el 25 al 50 % de error relativo.

La fórmula de Eyring se aproxima a la de Sabine pero con mayor discrepancia ε.

La fórmula de Neubauer no tiene sentido pues prácticamente coincide con las fórmulas Clásicas (aunque en esta sección no la hemos comentado). Y las fórmulas de Fitzroy, Kuttruff, deben descartarse por sus gran discrepancia al valor medido.

6. Referencias

[1] W.C. Sabine 1900 Dover Pub; 1664.

[2] C. F. Eyring, 1930 «Reverberation time in “dead” rooms» J. Acoust. Soc. Am. **1**, 217-241.

[3] G. Millington, 1932 «A modified formula for reverberation,» J. Acoust. Soc. Am. **4**, 69-82.

[4] L. Cremer and H. A. Muller, *Principles and Applications of Room Acous-tics* , Applied Science, London, 1982, Vol. 1, p. 235. Woodbury, NY, pp. 85-88.

[5] H. Kuttruff 1991 *Room Acoustics,* Elsevier Applied Science, London,, pp. 204-207, 123-128, 118-120, 255.

[6] H. Arau-Puchades, 1988 «An improved reverberation formula,» Acustica **65**, 163-180.

[7] D. Fitzroy, 1959 «Reverberation formula which seems to be more accurate with nonuniform distribution of absorption,» J. Acoust. Soc. Am. **31**, 893-897.

[8] Hope Bagenal , (1941) Practical acoustics. Edition Methuen.

[9] E. Nilsson. (2004) Dec<ay process in roos with non-difuse fields. Part I: Ceiling treatment with absorbent material., Part 2: Effect of irregularities. Building Acoustics 11, 39-60; 133-144.

[11] Neubauer RO. Estimation of reverberation time in rectangular rooms with non-uniformly distributed absortion using a modified Fitzroy equation.BuildingAcoustics2001;8(2): 115-37.

[12] H. Kuttruff 1976, Nachhall und effective absorption in raumen mit diffuses wandreflexion, Acustica, 35,3, 141-153.

[13] S. R. Bistafa and J. S. Bradley, Predicting reverberation times in a simulated classroom. Journal of Acoustical Society of America 2000;108(4):1721-31.

[16] DucourneauJ,PlaneauV. 2003, Applied Acoustics 64, 845-862.

[17] Mehta, M.L. and Mulholland, K.A.,(1976), Effect of non-uniform distribution on reverberation time. J. Sound Vib. 46, 209.

[18] Dance. S,Shield, 2000,. B.Modelling of sound fields in enclosed spaces with absorbent room II: Absorptive panels. Applied Acoustics;61:373-84.

DataKustik

NUEVO!
Visualización 3D estereoscópica

Cálculo acústico y visualización con

Cadna A® y Cadna R®

DataKustik

DataKustik GmbH - Oficina España
C/Calera, 3 – Loft 49
28760 – Tres Cantos (Madrid)

Teléfono: 91 219 08 78
info@datakustik.de
www.datakustik.de