

REVISION DEL TIEMPO DE REVERBERACIÓN: EL METODO DE CÁLCULO, LA PRECISIÓN PREDICTIVA Y LA LEY

PACS: 43.55.Br

Higini Arau-Puchades
ARAU ACUSTICA
C/ Travesera de Dalt 118, 3º-1ª
08024 BARCELONA
E-mail: arauacustica@gmail.com

ABSTRACT

Was born 110 years ago in the Theory of Acoustic Reverberation WC Sabine. Since then the competition began in various countries acoustics of the international community. Each country had a different evolutionary development. North America, the pioneer, followed mainly Germany, Britain, France, Holland, Denmark, Norway, Australia etc.

In this period there were several world wars and civil. Spain began forming Acoustics Acoustic Spanish Society in December 1969, at the initiative of Dr. Andres Lara who was also Director of the Institute of Acoustics Torres Quevedo. This institution helped create the emerging Acoustic in Spain through people very significant that some of them, like Mr. Antonio Pérez-López, President, and Mr. Antonio Calvo-Manzano, Secretary, and other of my many friends and colleagues are still at the bottom of the barrel with animosity, boundless energy and dedication.

The political organizations of our country by his need to provide regular or life quality, comfort and Spanish society, began his interest in the regulations, ordinances and laws of acoustics since 1980, taking its maximum interest from 2005 and completed the process in 2007.

In this paper we will discuss a review of most theories of the reverberation that have been developed from the source of Acoustics. Also will discuss the various experimental intercomparisons, which were performed in different countries, evaluating the experimental results achieved compared to what is predicted with the various theories issued. Finally under the analyzed issue some corrective comments of Law DBHR noise protection in the section on acoustic conditioning.

Key: Reverb, news, legislation, law.

DEDICATION: To my friends from the SEA to commemorate my 40th anniversary in the SEA.

RESUMEN

Hace 110 años nació la Acústica con la Teoría de Reverberación de W.C. Sabine. A partir de entonces se inició la competición acústica en diversos países de la Comunidad Internacional.

Cada país tuvo un desarrollo evolutivo diferente. Norteamérica, la pionera, la siguieron principalmente Alemania, Inglaterra, Francia, Holanda, Dinamarca, Noruega, Australia etc.

En este periodo de tiempo hubo diversas guerras mundiales y civiles. España comenzó la Acústica formando la Sociedad Española de Acústica en Diciembre de 1969, por iniciativa del Doctor Andrés Lara quien fue también Director del Instituto de Acústica Torres Quevedo. Esta Institución ayudó a crear en España la naciente Acústica a través de personas muy significativas que algunas de ellas, como D. Antonio Pérez López, Presidente, y D. Antonio Calvo-Manzano, Secretario, y otros de mis muchos amigos y compañeros siguen al pie del cañón con una animosidad, energía y dedicación sin límites.

Los Organismos políticos de nuestro país, por su necesidad de impartir o regular una calidad de vida, confort y bienestar a la sociedad española, empezaron su interés en la normativa, ordenanzas y leyes sobre la Acústica a partir de 1980, cobrando su máximo interés a partir del 2005 y culminado el proceso en 2007.

En esta comunicación expondremos una revisión de la mayoría de las teorías de la reverberación que se han elaborado desde el nacimiento de la Acústica. Expondremos también las diversas intercomparaciones experimentales, que se han realizado en distintos países, valorando el resultado experimental obtenido en comparación a lo que se predecía con las diversas teorías emitidas. Finalmente en virtud de lo analizado emitiremos algunas observaciones correctivas de la Ley DBHR protección frente al ruido en el apartado de acondicionamiento acústico.

Key: Reverberación, noticias, normativa, ley.

DEDICATORIA: A mis amigos de la SEA en conmemoración de mi 40 aniversario en la SEA.

1. INTRODUCCION

En la sección 2 desarrollaremos las diversas teorías que tienen mayor uso en la actualidad en los diversos round robin de intercomparación experimento-teoría. Y en la sección 3 trataremos el tema de la precisión predictiva alcanzado en los round robin, y finalmente en la sección 4 emitiremos las conclusiones y sugerencias de corrección de la Ley DBHR.

En esta introducción hablaremos de los científicos que no expondremos en este texto con objeto de rendir memoria a sus distintas aportaciones científicas. Así tenemos:

W.J.Franklin (1903), quien dedujo teóricamente la fórmula de Sabine que hasta la fecha era una fórmula experimental.

A.Jaeger (1911) que elaboró un método de cálculo del libre camino medio del sonido en una sala.

A. D. Fokker (1924) que realizó diversas aportaciones sobre el tiempo de reverberación.

K. Shuster and E. Waetzman,(1929) quienes elaboraron un trabajo muy próximo a lo que después descubrió Eyring y poco después Norris de manera independiente.

W.H. Sette (1933) quien elaboró una teoría de manera independiente que coincide con la de Millington.

Gomperts (1965) quien elaboró una teoría preciosa donde estudiaba la influencia de la forma sobre el tiempo de reverberación.

W.B. Joyce (1965) que estudió el tema de la reverberación como proceso ergódico.

Kuttruff (diversos años) elaboró distintas teorías de reverberación, que siempre giraban sobre la fórmula de Eyring como fondo de su formulación efectuando variantes sobre ella.

H. Kuttruff, en boca de Lothar Cremer (1983), me comentó que él es y ha sido el mejor acústico estadístico del mundo, pero tristemente en todos los round robin efectuados sobre sus distintas fórmulas de reverberación, sus predicciones siempre han quedado en penúltimo o último lugar.

M.Tohyama y A.Suzuki,(1986) elaboraron una teoría bidimensional de la reverberación.

2. REVISIÓN DE LAS TEORIAS UTILIZADAS EN LOS ROUND ROBIN

2.1. W.C. SABINE

La teoría de W.C. Sabine [1] se basa en la existencia de campo difuso, (no confundirlo con la energía difusa que se produce debido al scattering que obedece a la Ley de Lambert, u otra similar, y que sólo se produce en el entorno del obstáculo difractor). La energía a la que me refiero es una energía especular que llena la sala con densidad de energía constante. Esto quiere decir que el material absorbente está, o debe estar, uniformemente repartido. En el caso de Sabine se supone que el coeficiente de absorción medio es muy bajo, inferior a $\alpha < 0.3$. Sin embargo esta teoría se aplica siempre para cualquier reparto asimétrico del material absorbente en una sala y para cualquier valor de α .

En esta fórmula no es necesario conocer dónde se coloca el material en las paredes. La curva de decaimiento del sonido dB/s es lineal, o debe serlo, en el caso de distribución homogénea del material en el recinto, que es lo que debiera ser.

La fórmula obedece a la siguiente expresión:

$$T = \frac{0.16V}{S\bar{\alpha} + 4mV} \quad \bar{\alpha} = \frac{1}{S} \sum_i S_i \alpha_i$$

2.2. C.F. EYRING

La expresión de [2] es válida en el rango del coeficiente absorción superior a alfa medio >0.3 . Es una fórmula elaborada bajo la hipótesis de campo difuso, o sea de distribución uniforme de la absorción en el recinto. Tiene las mismas ventajas e inconvenientes que la fórmula de Sabine. Cuando el valor del coeficiente medio de la absorción es muy bajo inferior a 0.3 tiende a la fórmula de Sabine,

$$T = \frac{0.16V}{S\alpha_{Ey} + 4mV} \quad \alpha_{Ey} = -\ln(1 - \bar{\alpha})$$

$$\alpha_{Ey} = -\ln(1 - \bar{\alpha}) = \bar{\alpha} + \frac{\bar{\alpha}^2}{2} + \dots + \frac{\bar{\alpha}^n}{n} \quad , \quad \alpha_{Ey} \approx \bar{\alpha}$$

2.3. G. MILLINGTON

La fórmula de Millington [3] es también de campo difuso, pero quiso resolver el caso de la asimetría de la absorción. Tiene el problema de que cuando una superficie, aunque sea pequeña, con absorción igual o superior a 1 (100 %), el tiempo de reverberación es 0.

Para evitar esta problema Dance y Shield [4] efectuaron una corrección al coeficiente de absorción α Mil.

$$T = \frac{0.16V}{S\alpha_{Mi} + 4mV} = \frac{0.16V}{\sum_i S_i \ln\left(\frac{1}{1 - \alpha_i}\right)}$$

La corrección Dance – Shield se basa esencialmente en realizar el siguiente cálculo:

$$\alpha_{Mil} = 1 - e^{-\alpha_S}$$

donde α_S es el coeficiente de Sabine.

Si esta corrección es aplicada al coeficiente de absorción exponente de Millington entonces obtenemos:

$$a = - (1/S) \sum S_i \ln(1 - \alpha_{Mil}) = - (1/S) \sum S_i \ln(1 - (1 - e^{-\alpha S})) = (1/S) \sum S_i \alpha S$$

Así por tanto tenemos obtenido: $\alpha_{Mil} = (1/S) \sum S_i \alpha S$. Por lo que vemos ésta es la expresión del coeficiente de absorción medio de Sabine por lo que hemos demostrado que la corrección Dance and Shield no tiene sentido.

2.4. L. CREMER

Cremer [5] elaboró un método variante de Millington para soslayar el problema de que cuando la absorción es 1, o superior, el que T valga 0. La fórmula es:

$$T_{Cre} = \frac{0.16 \cdot V}{S a_{Cre} + 4mV}$$

$$a_{Cre} = \frac{1}{S} \sum_i S_i \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{S_i} \sum_j \alpha_{ij} S_{ij} \right) \right]$$

2.5. D. FITZROY

La expresión emitida por D. Fitzroy [6] tuvo la pretensión de que pudiera ser utilizada para calcular el tiempo de reverberación de un campo no difuso, o sea que exista un reparto no homogéneo de la absorción en la sala. La expresión es:

$$T_{Fitz} = 0.16 \frac{V}{S^2} \left[\frac{-S_x}{\ln(1 - \alpha_x) + 4mV} + \frac{-S_y}{\ln(1 - \alpha_y) + 4mV} + \frac{-S_z}{\ln(1 - \alpha_z) + 4mV} \right]$$

Esta fórmula, que fue escrita sin ningún tipo de argumento que la justificara, responde al enunciado de Hope Bagenal (1944) emitido en Practice Acoustics, que dice: La reverberación de una sala está formada por el promedio (no dijo cuál) de los periodos de reverberación en cada dirección establecido en la sala.

Como me comentó una vez Lothar Cremer, en comunicación privada, “que toda teoría que intente tener la pretensión de demostrar el caso no difuso debe ser capaz de calcular el tiempo de reverberación T y a su vez el EDT el tiempo de reverberación inmediato”. Con ello quería explicarme que el decay dB/s debe tener cómo mínimo dos pendientes. Viendo que tenía toda la razón del mundo empecé a pensar.

2.6. PUJOLLE

Esta fórmula [7] es otra de campo difuso pero la única variación que tiene es que determinó que el libre camino medio del sonido varía, en relación al estadístico gaussiano $4V/S$, según sea

la forma de la sala. Igualmente hizo Gomperts por vía muy distinta. La expresión determinada por Pujolle es:

$$T = \frac{0,04.l_m}{\alpha + 4mV}$$

$$l_m = \frac{1}{6} \times \left(\sqrt{L^2 + l^2} + \sqrt{L^2 + h^2} + \sqrt{h^2 + l^2} \right)$$

2.7. H. KUTTRUFF

La expresión determinada por Kuttruff [8] es una variante de las de campo difuso, donde él considera que el campo difuso es producido por la Ley de Lambert en la proximidad de las protuberancias de la pared.

Por otro lado esta fórmula basada en la de Eyring y tiene prácticamente las mismas ventajas e inconvenientes. La expresión es:

$$T_r = \frac{0,16.V}{S\alpha_{Kut} + 4mV}$$

$$\alpha_{Kut} = \alpha_{Ey} \cdot \left(1 - \frac{\gamma^2}{2} \alpha_{Ey} \right) + \frac{\sum_i (1 - \alpha_i) \cdot (\bar{\alpha} - \alpha_i) \cdot S_i^2}{S^2 \cdot (1 - \bar{\alpha})^2}$$

$$\gamma^2 \approx 0,4 \text{ for rectangular rooms.}$$

2.8. E. NILSSON o DE LA NORMA EN 12354-Parte 6

La expresión de Nilsson [9] 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.

2.9. ARAU-PUCHADES

Lo que podemos indicar es que esta teoría [10] sí cumple las prescripciones de Lothar Cremer, pues calcula el T y el EDT,[19]. La teoría se basa en el diferente procedimiento de promediar los coeficientes de absorción entre paredes opuestas entre sí y entre las paredes mutuamente perpendiculares. A su vez se compatibiliza el carácter gaussiano del libre camino medio $4V/S$ y la aproximación logarítmico normal (también de tipo gaussiano) de los coeficientes de absorción medios de decay ($a = -\ln(1-\alpha)$) que cumplen las paredes mutuamente perpendiculares. A partir de lo cual se determina el coeficiente de absorción medio global de tipo decay (o exponente) a partir de los de absorción decay determinados para cada grupo de paredes mutuamente perpendiculares.

La expresión final determinada, converge a Sabine o a Eyring según sea el coeficiente de absorción medio, si la distribución del material absorbente es uniforme. Se dice que la fórmula sirve sólo para salas rectangulares, pero en realidad también sirve para salas de forma muy diversa. Sólo hay que fijar cuáles son las paredes enfrentadas e indicar a qué superficie

pertenece, por ejemplo pared derecha o techo, etc., y así sucesivamente, y declarar dónde ubicamos el material absorbente. La importancia de este método es que es muy importante la localización del material dispuesto de manera asimétrica, o no si fuera el caso. Esta teoría está informatizada en diversos programas comerciales internacionales.

$$T = \left[\frac{0.16V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha_x) + 4mV} \right]^{\frac{S_x}{S}} \cdot \left[\frac{0.16V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha_y) + 4mV} \right]^{\frac{S_y}{S}} \cdot \left[\frac{0.16V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha_z) + 4mV} \right]^{\frac{S_z}{S}}$$

$$\alpha_x = \frac{\alpha_{x1}S_{x1} + \alpha_{x2}S_{x2}}{S_x} \quad , \quad \alpha_x \text{ representa el coeficiente de absorción medio del techo y el suelo}$$

$$\text{y } S_x = S_{x1} + S_{x2} \quad S_{x1} \text{ y } S_{x2} \text{ representan las áreas del techo y suelo respectivamente}$$

$$\alpha_y, \alpha_z \text{ designan el coeficiente de absorción medio de las paredes laterales y las frontales- fondo siendo } S_y \text{ y } S_z \\ S_y = S_{y1} + S_{y2}, \text{ área total paredes laterales, y } S_z = S_{z1} + S_{z2}, \text{ área total de paredes frontales y de fondo.}$$

Siendo $S = S_x + S_y + S_z$ el área total de superficies del recinto.

otra forma de expresar la misma fórmula es:

$$T = \frac{0,16 \cdot V}{S \alpha_{ArP} + 4mV}$$

$$\alpha_{ArP} = [-\ln(1 - \alpha_x)]^{S_x/S} \times [-\ln(1 - \alpha_y)]^{S_y/S} \times [-\ln(1 - \alpha_z)]^{S_z/S} = [a_x]^{S_x/S} \times [a_y]^{S_y/S} \times [a_z]^{S_z/S}$$

siendo el Early Decay Time EDT, o Tiempo de Reverberación Inmediato el que se indica ahora:

$$EDT = D \cdot d = 60 \cdot d / T \quad , \quad d \text{ es el factor de distribución de la distribución logaritmico normal, dado por:}$$

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

2.10. 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 irradiación 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 perimetrales (paredes frontales y fondo + las superficies laterales), sólo distingue el techo + suelo.

En los Round Robin que citaremos no la consideran incluirla, excepto Ivana Rosell [15], aunque algún otro la ha citado.

Esta teoría incumple las prescripciones de campo no difuso de Lothar Cremer antes descritas, pues no determina el EDT.

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

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 surface area of ceiling and floor, in m^2

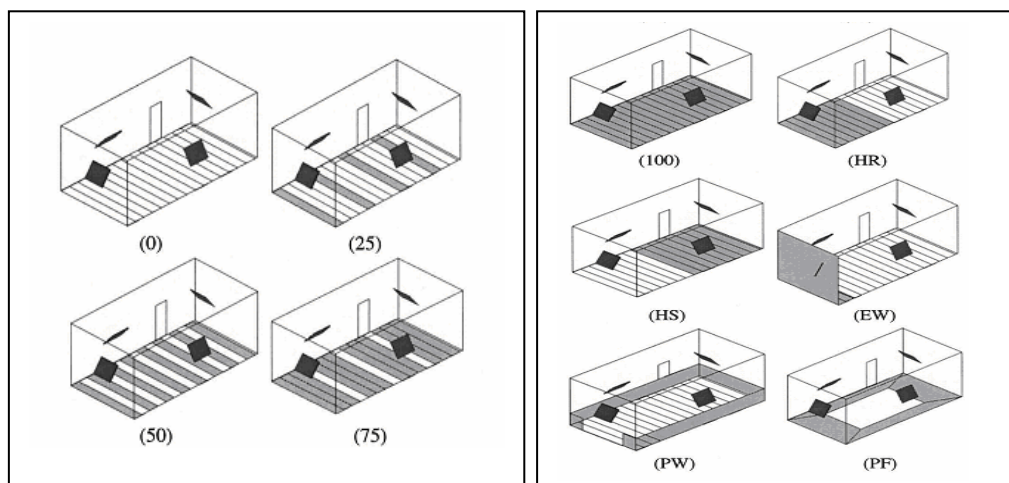
$S_{WW} = 2lh + 2hw$; is the surface area of the walls, in m^2

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

3. EXPERIMENTO – TEORIA: ROUND ROBIN INTERNACIONALES Y LA CAPACIDAD PREDICTIVA DE LAS TEORÍAS

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 sus resultados.

Los casos analizados sólo veremos la forma, donde se muestra las zonas de ubicación del material absorbente.



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:

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

En la tabla que se muestra hemos eliminado las filas de Cremer y Millington por el motivo de que Bistafa y Bradley han aplicado la corrección de Dance y Shield que en nuestra opinión falsea las propuestas originales de los autores. Esto mismo no hemos podido anularlo en el gráfico para no estropearlo.

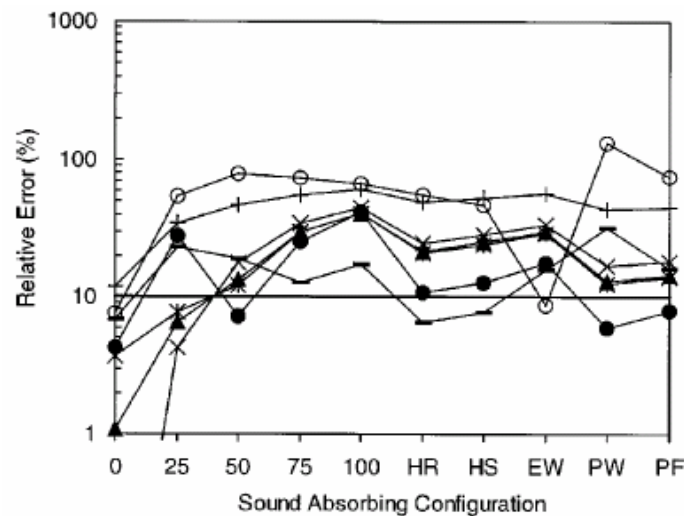


FIG. 3. Average relative error in reverberation time prediction across the six octave bands from 125 Hz to 4 kHz, for each sound-absorbing configuration. Analytical predictions using absorption exponents of: (\blacktriangle) a_{Sab} , (\times) a_{Eyr} , ($*$) a_{Mil} , (\bullet) a_{Cre} , ($+$) a_{Kut} , (\circ) a_{Fit} , and ($-$) a_{Ara} . Also shown in this figure is a horizontal line across the plot area that corresponds to an accuracy of 10%.

TABLE I. Overall average relative errors of the analytical predictions of reverberation time for ten sound-absorbing configurations in the simulated classroom.

Absorption exponent	Overall average relative error (%)		
	Frequency bands included in the averages		
	1 kHz	500 Hz–2 kHz	125 Hz–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 1 kHz 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.

ROUND ROBIN 2: E. Guerretsen [14]. Las salas estudiadas tienen las siguientes características:

Table I. Dimensions, absorption coefficients (α) and scattering coefficient (δ) for four room types, each under two conditions.

enclosed space	α	125	250	500	1000	2000	4000
large, cubic room 7x7x7 m ³	A1. all surfaces	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06
	A2. + abs. ceiling	0.45	0.70	0.80	0.90	0.90	0.80
normal room 6x4x3 m ³	B1. floor	0.02	0.03	0.03	0.04	0.06	0.05
	walls	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05
	abs. ceiling	0.45	0.70	0.80	0.90	0.90	0.80
	B2. floor+carpet hard ceiling	0.02	0.04	0.06	0.20	0.30	0.35
	B3. floor+carpet + abs. ceiling	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05
flat room 16x8x3 m ³	C1. floor	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05
	sidewalls	0.25	0.15	0.10	0.05	0.03	0.03
	walls	0.03	0.03	0.02	0.04	0.05	0.08
	ceiling	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05
	C2. floor+carpet C3. +abs.ceiling	0.02	0.04	0.06	0.20	0.30	0.35
long room 32x4x3 m ³	D1. floor	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03
	walls	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05
	ceiling	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05
	D2. floor+carpet abs.ceiling	0.02	0.04	0.06	0.20	0.30	0.35
	D3. only abs.ceiling	0.45	0.70	0.80	0.90	0.90	0.80
all rooms	δ	125	250	500	1000	2000	4000
	smooth	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	rough (façade)	0.05	0.05	0.20	0.40	0.60	0.60

A continuación mostramos las intercomparaciones que efectúa entre modelos de cálculo y el programa informático CESAR (en este caso el simulador según Gerretsen sustituye al experimento). Cosa que Ivana Rosell et al. comenta que no es muy adecuado porque los programas informáticos tienen muchas imprecisiones. Cuestión que también comenta Bistafa y Bradley en su análisis advirtiendo que el T calculado por simulación depende en alto grado del scattering que se indique al ordenador.

Los resultados deducidos por Ivana Rosell de este caso son mostrados a continuación, habiéndolos obtenido a partir de los de Guerretsen.

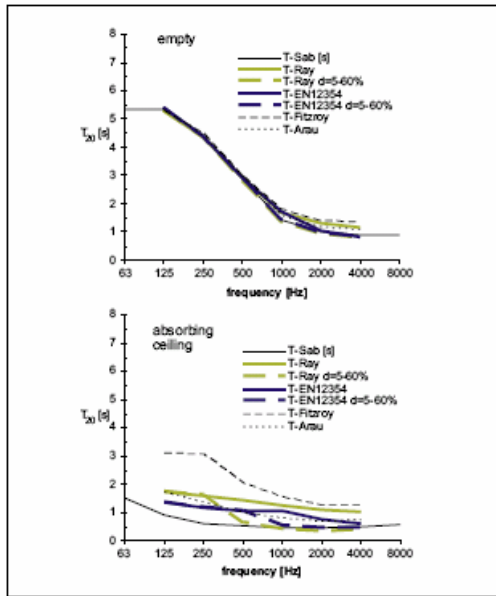


Figure 7. Normal room; empty and with absorbing material (B2, B1); reverberation time (T_{20}) according to five different models as indicated.

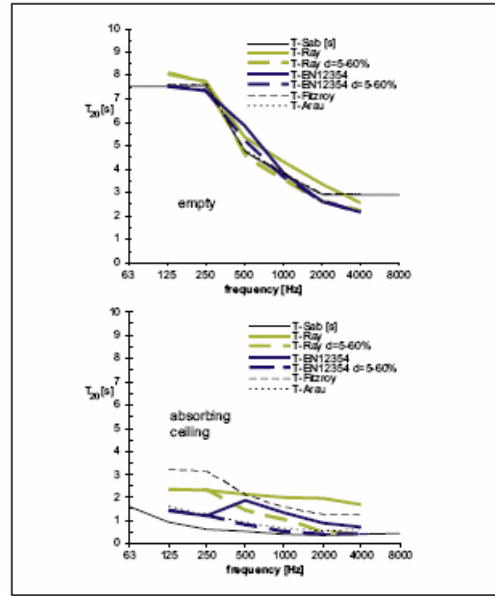


Figure 9. Long room; empty and with absorbing material (D1, D3); reverberation time (T_{20}) according to five different models as indicated.

Observando los gráficos de Guerretsen se hace imposible ver el detalle exacto, pero en la figura 7 vemos que para la sala vacía, sin absorción, todas las teorías convergen aproximadamente incluso la de Fitzroy; pero cuando distribuimos el material de manera no uniforme se observa que a 500 Hz el T_{Fitzroy} es 2 s, T_{Ray} es 1.5 s, T_{EN12354} es 1.3 s, y $T_{\text{Arau-Puchades}}$ es 1.3 s y T_{Sabine} es 0.8 s. En este caso Nilsson y Arau-Puchades coinciden, (pero no en la figura 9), y el de Sabine queda muy por debajo.

El importante estudio realizado por Ivana Rosell et al. [15] consiste en estudiar el caso de Guerretsen tomando el método de Sabine, en lugar del simulador Cesar, como referencia. La ventaja de su aportación es que ha estudiado más casos que Guerretsen con sus propios datos, que vemos a continuación.

Valores de T y ϵ % a 500 Hz

Casos	CU2		NR2		L2		VL2	
	T	ϵ	T	ϵ	T	ϵ	T	ϵ
Fitzroy	4	300	4	300	2.8	180	2	150
EN12354	2,8	180	2.9	170	2.8	180	2.1	162
Arau P.	2.3	130	2.1	110	1.1	10	0.9	26
Sabine	1	Vref	1.1	*	1	*	0.8	*
Eyring	0.95	*	1	*	1	*	0.8	*
Neubauer	0.9	*	0.95	*	1	*	0.8	*

* Valor muy aproximado a Sabine

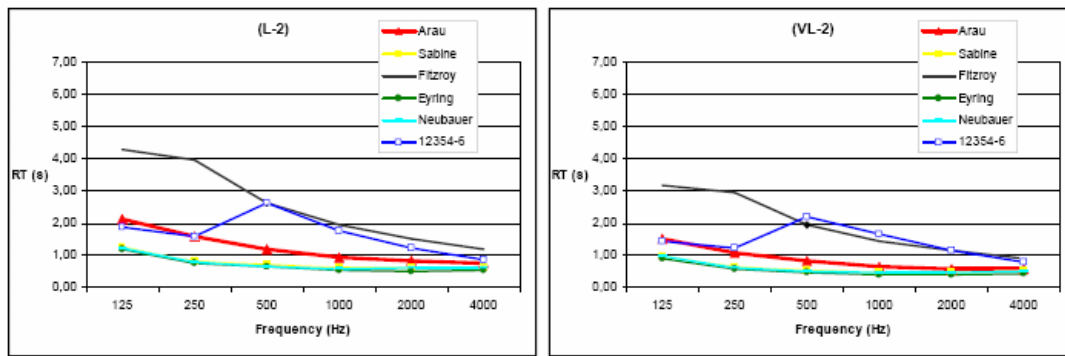


Figure 3.-Long and very long room with an absorption ceiling.

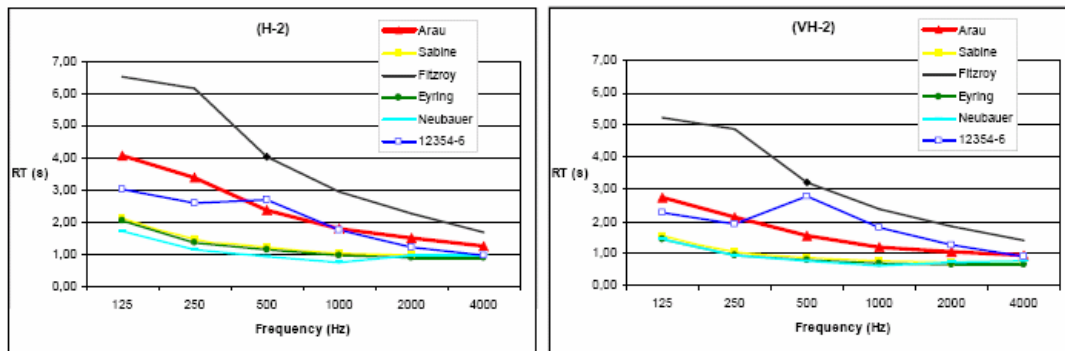


Figure 4.-High and very high room with an absorption ceiling.

Valores de T y ϵ % a 500 Hz

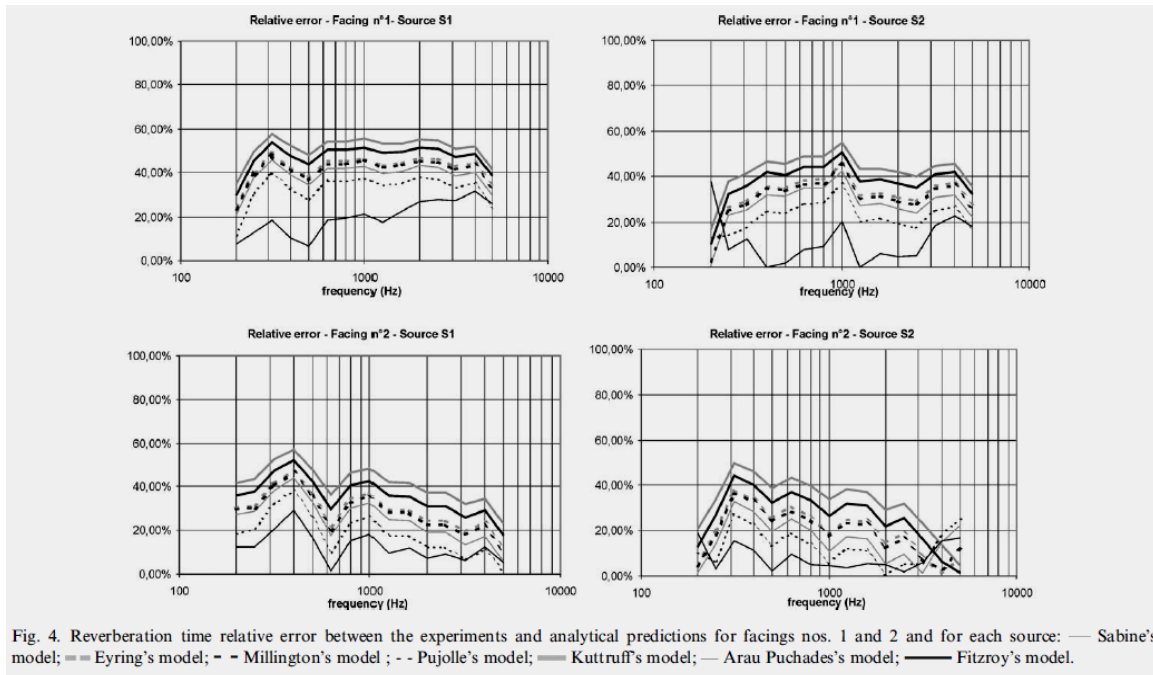
Casos	H2		VH2	
	T	ϵ	T	ϵ
Fitzroy	4	300	3.1	210
EN12354	2,8	180	2.9	190
Arau P.	2.6	160	1.6	60
Sabine	1.05	Vref	1	*
Eyring	1	*	0.95	*
Neubauer	0.95	*	0.9	*

* Valor muy aproximado a Sabine

Como conclusión final vemos que las fórmulas de Fitzroy y Kuttruff son altamente discrepantes. Por otro lado vemos que la propuesta de Neubauer da resultados casi iguales a las fórmulas clásicas, es como si la corrección de Kuttruff sobre la fórmula de Fitzroy simetrizara el efecto asimétrico de la absorción distribuida uniformemente en la sala.

Vemos que la norma EN 12354 se aleja mucho de lo que predice Sabine y las fórmulas clásicas, y Arau-Puchades queda más entremedio de todas, aunque a veces se acerca a la EN 12354.

ROUND ROBIN 3: Round Robin efectuado por J. Ducourneau, U. Planeau [16]



Como conclusión 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.

ROUND ROBIN 4: Round Robin efectuado por Mehta-Muholland y comentado por Dance-Shields [17]

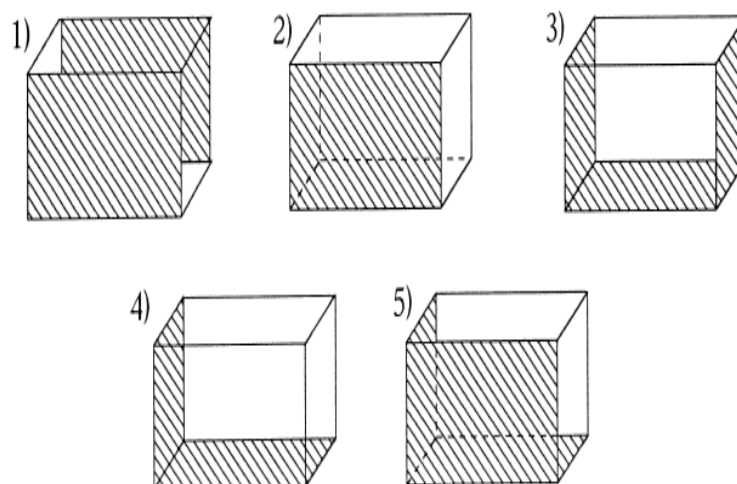


Fig. 2. The five configurations of the Mehta and Muiholland experimental room with absorptive material on the room surfaces.

El caso 0 es el caso de sala sin tratamiento acústico

Table 1
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

Valores de T y ϵ % a 500 Hz

Casos	0		1		2		3		4		5	
	T	ϵ	T	ϵ	T	ϵ	T	ϵ	T	ϵ	T	ϵ
Measured	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

4. CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

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 ϵ 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. Y las fórmulas de Fitzroy y Kuttruff, deben descartarse por sus discrepancias al valor medido tan exageradas.

Por otro lado las fórmulas de Millington y Cremer deben descartarse excepto si se les realiza la aproximación de Dance-Shield, pero entonces sus discrepancias con el valor medido serán del mismo orden que lo citado para las fórmulas clásicas.

SUGERENCIA

La Ley de DBHR Protección al ruido en el redactado del CTE indica en el tema de Acondicionamiento Acústico que las aulas, comedores, restaurante, etc, deben calcularse por el método general con la fórmula de Sabine, y con el método simplificado con unas fórmulas que se obtienen fácilmente desde la fórmula de Sabine.

En el método simplificado la absorción preferentemente está en el techo y en el caso general dependerá de quien diseñe, que muy probablemente no sea de manera uniformemente distribuida, como exige la fórmula de Sabine.

Por otro lado la Ley en sus exigencias de final de obra, dice que la discrepancia con lo calculado no sea superior a 0.1 s.

Vemos que la exigencia de la Ley sólo es realizable en el caso de distribución uniforme (ver caso 0) o en tres paredes mutuamente perpendiculares como se indica en el Round Robin 4. Pero si hay distribución no uniforme, Sabine puede tener un error relativo entre 30 al 50 %.

Tomemos sea el 30 % y que el Aula tenga que cumplir $T = 0.7$ s (y supongamos que éste es el resultado de la medición). Con la fórmula del error relativo vemos que la fórmula de Sabine tendría el siguiente resultado aproximado: $T_{\text{teo (sabine)}} = 0.7 - 0.3 \times 0.7 = 0.49$ s y éste sería el valor de Sabine calculado con las fichas justificativas.

Por otro lado, si calculamos un valor de 0.7 s según Sabine, entonces tendremos que el resultado probable que se mida después de la ejecución es: $x - 0.3x = 0.7$, $x = 1$ s. Vemos que el valor calculado por el CTE puede conducir a mucha gente a muchos disgustos con la Ley, a pesar de haber cumplido con exactitud el procedimiento, como indica el CTE.

Por otro lado quiero manifestar que los valores de m , atenuación del aire para 500, 1000 y 2000 Hz son incorrectos, por exceso, son respectivamente: 0.003, 0.005, 0.006 y debieran ser 0.0003, 0.0005, 0.002.

Las medidas correctoras que se han de realizar en el CTE, por lo citado al largo del texto, son obviamente claras. Y si el Ministerio no desea cambiar nada, aconsejo a todos los acústicos a calcular por el método de Arau-Puchades hasta ajustar el valor deseado y a realizar la ficha justificativa por el método de Sabine.

5. 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] Dance-Shields, 1999 Modeling of sound fields in enclosure spaces with absorbent roofs Part 1. Performance Spaces, Applied Acoustics, 58, 1-18.
- [5] L. Cremer and H. A. Muller, Principles and Applications of Room Acoustics, Applied Science, London, 1982, Vol. 1, p. 235. Woodbury, NY, pp. 85–88.
- [6] D. Fitzroy, 1959 "Reverberation formula which seems to be more accurate with nonuniform distribution of absorption," J. Acoust. Soc. Am. **31**, 893–897.
- [7] J. Pujolle, .Nouvelle formule pour la durée de reverberation. Revue d'Acoustique 1975; 19:107–13.
- [8] H. Kuttruff 1991 *Room Acoustics*, Elsevier Applied Science, London, pp. 204–207, 123–128, 118–120, 255.
- [9] E. Nilsson. (2004) Decay process in rooms with non-diffuse fields. Part I: Ceiling treatment

- with absorbent material., Part 2: Effect of irregularities. *Building Acoustics* 11, 39-60; 133-144.
- [10] H. Arau - Puchades, 1988 "An improved reverberation formula," *Acustica* **65**, 163–180
- [11] Neubauer RO. Estimation of reverberation time in rectangular rooms with non-uniformly distributed absorption using a modified Fitzroy equation. *Building Acoustics* 2001;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.
- [14] E. Gerretsen, 2006, Acta Acustica Estimation Methods for Sound Levels and Reverberation Time in a Room with Irregular Shape or Absorption Distribution..Acta Acustica United with Acustica, Vol. 92, 797-806
- [15] I. Rosell, P. Artís, I 2007, Reverberation Time in rooms non diffuse sound fields. ICA 2007 (ISRA Seville)
- [16] Ducourneau J, Planeau V. 2003, *Applied Acoustics* 64, 845-862
- [17] Dance. S, Shield, 2000,. B. Modelling of sound fields in enclosed spaces with absorbent room II: Absorptive panels. *Applied Acoustics*; 61:373–84.
- [18] Dr. Ir. H.J. Martin Prof. Ir. E. Gerretsen, Februari 2006 Nagalmtijd in ruimten met ongelijkmatig verdeelde absorptie, Geeft de voorgestelde berekeningsmethode in NEN-EN 12354-6 Annex D een aanvaardbare benadering? Masterproject 3 Mastertrack Physics of the Built Environment Unit Building Physics and Systems Faculteit Bouwkunde Technische Universiteit Eindhoven.
- [19] Higini Arau, 1999, ABC de la Acústica Arquitectónica. Editorial Ceac.