TEORÍAS DE REVERBERACIÓN

Introducción

Este capítulo pretende recorrer un itinerario de teorías de reverberación desde la primera teoría enunciada por Sabine, hasta las últimas teorías publicadas en los últimos años.
Es un compendio bastante completo pero no contempla la totalidad de teorías que han existido. Pretende dar una visión suficientemente amplia para que el alumno entienda la manera de llegar a diferentes expresiones analíticas para el cálculo del tiempo de reverberación.

Actualmente se usan pocas ecuaciones: La teoría de Sabine sigue siendo usada (sobretodo en salas con poca absorción y campo muy difuso), y la teoría de Arau también se usa, sobretodo en casos de salas tratadas y con audiencia, tipo teatros o auditorios. En los últimos años se ha demostrado que la Teoría de Arau, para los casos mencionados, suele ser la más realista.

Los resultados de las teorías analíticas generalmente se contrastan con los resultados de TR de los softwares de simulación basados en teoría de rayos. Cuando se realiza un proyecto, es bueno contrastar diferentes resultados de TR y no quedarse sólo con el proporcionado por una teoría o método.

Existe una teoría reformulada recientemente que junto con la de Arau, también da muy buenos resultados. Es una teoría no explicada en este capítulo, desarrollada por Gerretsen y explicada en la normativa UNE-EN-ISO 12354-6.

Este capítulo no pretende confundir con mil fórmulas y ecuaciones, sino que pretende mostrar que el tema del cálculo de la reverberación está vivo y que existen muchos autores que han estudiado y siguen estudiando estas ecuaciones. Para el alumno, lo que interesa es tener esta visión genérica y saber entender las diferencias, por ejemplo entre las teorías clásicas (Sabine y Eyring) y las teorías nuevas (Arau).

Desarrollo histórico.

1 Wallace Clement Sabine (1902)

Dada la importancia de este autor en el tema que estamos tratando, y en el que haremos especial hincapié, aportaremos una breve biografía yun amplio estudio de la su Teoría.

<u>Biografía</u>

WallaceClement Sabine (1868-1919), fue un físico estadounidense y miembro del Departamento de Física de la Universidad de Harvard desde 1889 hastasu muerte. Inicialmente se dedicaba únicamente a la docencia en esta misma Universidad, y publicó un manual de laboratorio para sus alumnos.

Trabajócon otros profesores de Harvard principalmente en el fenómeno de la oscilación eléctrica, hasta que su carrera dio un giro reorientándosehacia al campo de la acústica,gracias a la propuesta derealizar un estudio del Fogg Art Museum de Harvard para poder mejorar las propiedades acústicas. Aquel estudiohizo que Sabine se interesase porlos problemas físicos de la acústica arquitectónica.

Sabine dedicó íntegramente el resto de su carrera a la acústica de recintos, obteniendo un amplio conocimiento de la influencia de la Reverberación en la recepción del sonido en espacios cerradosy desarrollandosu conocida teoría, que relacionaba por primera vez el Tiempo de Reverberación con el volumen de la sala y con la cantidad de material absorbente.

La unidad que expresa la absorción del sonido ha recibido su nombre.

<u>Desarrollo Teórico</u>

Ley de extinción del sonido:

$$I(t) = I_0 \cdot e^{-N \cdot \alpha_{Sab.} \cdot t}$$

En la que:

$$N = \frac{c}{l_m} = \frac{c \cdot S}{4 \cdot V}$$ Número de reflexiones.

$$l_m = \frac{4 \cdot V}{S}$$ Recorrido libre medio.

$\bar{\alpha}_{Sab.}$ es el coeficiente de absorción medio de Sabine, definido como:

$$\bar{\alpha}_{Sab.} = \frac{\alpha_1 \cdot S_1 + \alpha_2 \cdot S_2 + ... + \alpha_n \cdot S_n}{S} = \frac{1}{S}\sum_{i=1}^{n} \alpha_i \cdot S_i$$

Tiempo de Reverberación:

$$TR60 = \frac{0.163 \cdot V}{S \cdot \bar{\alpha}_{Sab.}}$$

La aproximación de Sabine, es válida, únicamentepara recintos con las siguientes características:

1. Distribución uniforme y difusa de la energía sonora en todoslos puntos del recinto.
2. Igual probabilidad de propagación del sonido en todaslas direcciones.
3. Absorción continua y constante de la absorción sonora en todoslos puntos e instantes del recinto.

Algunos seguidores de Sabine, fueron: Franklin (1902), Eckhard (1923), Buckingham (1925), Davis (1925), Strutt (1929), Schuster-Waetzmann (1929) yCremer (1937).

2 Eyring y Norris (1930-1932)

Ley de extinción del sonido:

$$I(t) = I_0 \cdot e^{-N \cdot \bar{\alpha}_{E\&N.} \cdot t}$$

En la que:

$N = \frac{c}{l_m} = \frac{c \cdot S}{4 \cdot V}$ Número de reflexiones.

$l_m = \frac{4 \cdot V}{S}$ Recorrido libre medio.

$\bar{\alpha}_{E\&N.}$ es el coeficiente de absorción medio de Eyring yNorris, definido como:

$$\bar{\alpha}_{E\&N.} = -\ln\left(1 - \bar{\alpha}_{Sab.}\right)$$

Tiempo de Reverberación:

$$TR60 = \frac{0.163 \cdot V}{S \cdot \bar{\alpha}_{E\&N.}} = \frac{0.163 \cdot V}{-S \cdot \ln\left(1 - \bar{\alpha}_{Sab.}\right)}$$

3 Millington y Sette (1932-1933)

Ley de extinción del sonido:

$$I(t) = I_0 \cdot e^{-N \cdot \bar{\alpha}_{M\&S.} \cdot t}$$

En la que:

$N = \frac{c}{l_m} = \frac{c \cdot S}{4 \cdot V}$ Número de reflexiones.

$l_m = \frac{4 \cdot V}{S}$ Recorrido libre medio.

$\bar{\alpha}_{M\&S.}$ es el coeficiente de absorción medio de Millington ySette, definido como:

$$\bar{\alpha}_{M\&S.} = -\ln(\bar{r})$$

En la que:

$\bar{r}$ es el coeficiente de reflexión medio, que se define como:

$$\bar{r} = (r_1)^{\frac{S_1}{S}} \cdot (r_2)^{\frac{S_2}{S}} \cdot \ldots \cdot (r_n)^{\frac{S_n}{S}}$$

Siendo $r_i = (1-\alpha_i)$, en la que α_i es el coeficiente de absorción energético de cada material, y S_i la superfície recubierta por este material.

Si aplicamos logaritmo neperiano por ambos lados de la ecuación, tenemos que:

$$\bar{\alpha}_{M\&S.} = -\ln(\bar{r}) = -\ln\left[(1-\alpha_1)^{\frac{S_1}{S}} \cdot (1-\alpha_2)^{\frac{S_2}{S}} \cdot \ldots \cdot (1-\alpha_n)^{\frac{S_n}{S}}\right] =$$

$$= -\left[\left(\frac{S_1}{S}\ln(1-\alpha_1)\right) + \left(\frac{S_2}{S}\ln(1-\alpha_2)\right) + \ldots + \left(\frac{S_n}{S}\ln(1-\alpha_n)\right)\right] =$$

$$= -\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{S_i}{S}\ln(1-\alpha_i)\right)$$

Tiempo de Reverberación:

$$TR60 = \frac{0.163 \cdot V}{S \cdot \bar{\alpha}_{M\&S.}} = \frac{0.163 \cdot V}{-\sum_{i=1}^{n} S_i \cdot \ln(1-\alpha_i)}$$

En la que cada α_i, es el coeficiente de absorción de cada material que recubre cada una de las superfícies.

4 Fitzroy (1959)

Ley de extinción del sonido: No dedujo ninguna Ley.

Tiempo de Reverberación: La fórmula que presentó sin demostración alguna, fue la siguiente:

$$\boxed{TR60=\left[\left(\frac{S_x}{S}\right)\cdot\left(\frac{0.163\cdot V}{-S\cdot\ln(1-\bar{\alpha}_x)}\right)\right]+\left[\left(\frac{S_y}{S}\right)\cdot\left(\frac{0.163\cdot V}{-S\cdot\ln(1-\bar{\alpha}_y)}\right)\right]+\left[\left(\frac{S_z}{S}\right)\cdot\left(\frac{0.163\cdot V}{-S\cdot\ln(1-\bar{\alpha}_z)}\right)\right]}$$

En la que:

$S_x = S_{x_1} + S_{x_2}$, es el área del techo másel suelo.

$S_y = S_{y_1} + S_{y_2}$, es el área de las paredes laterales.

$S_z = S_{z_1} + S_{z_2}$, es el área de la pared frontal y de la pared posterior.

$S = S_x + S_y + S_z$, es el área total del recinto.

$\bar{\alpha}_x = \dfrac{S_{x_1}\cdot\bar{\alpha}_{x_1} + S_{x_2}\cdot\bar{\alpha}_{x_2}}{S_x}$, es el valor medio (aritmética ponderada) delos coeficientes de absorción de cada superficie en dirección x, esdecir del techo y del suelo.

$\bar{\alpha}_y = \dfrac{S_{y_1}\cdot\bar{\alpha}_{y_1} + S_{y_2}\cdot\bar{\alpha}_{y_2}}{S_y}$, el mismo para las superficies en dirección y.

$\bar{\alpha}_z = \dfrac{S_{z_1}\cdot\bar{\alpha}_{z_1} + S_{z_2}\cdot\bar{\alpha}_{z_2}}{S_z}$, y también para las superficies en dirección z.

Si ahora definimos unos nuevos coeficientes de absorción:

$$\bar{\alpha}_{Fitz,x} = -\ln(1-\bar{\alpha}_x)$$
$$\bar{\alpha}_{Fitz,y} = -\ln(1-\bar{\alpha}_y)$$
$$\bar{\alpha}_{Fitz,z} = -\ln(1-\bar{\alpha}_z)$$

Podemos expresar el TR60, de la siguiente manera:

$$\boxed{TR60 = \left[\left(\frac{S_x}{S}\right)\cdot\left(\frac{0.163\cdot V}{S\cdot\hat{\alpha}_{Fitz,x}}\right)\right] + \left[\left(\frac{S_y}{S}\right)\cdot\left(\frac{0.163\cdot V}{S\cdot\hat{\alpha}_{Fitz,y}}\right)\right] + \left[\left(\frac{S_z}{S}\right)\cdot\left(\frac{0.163\cdot V}{S\cdot\hat{\alpha}_{Fitz,z}}\right)\right]}$$

Podemos también definir los períodos de reverberación en las tres direcciones de la sala, representada por Coordenadas Cartesianas:

$$T_x = \frac{0.163\cdot V}{S\cdot\hat{\alpha}_{Fitz,x}}$$

$$T_y = \frac{0.163\cdot V}{S\cdot\hat{\alpha}_{Fitz,y}}$$

$$T_z = \frac{0.163\cdot V}{S\cdot\hat{\alpha}_{Fitz,z}}$$

Y entonces la expresión del TR60 de la sala nos quedará:

$$TR60 = \left(\frac{S_x}{S}\right)\cdot T_x + \left(\frac{S_y}{S}\right)\cdot T_y + \left(\frac{S_z}{S}\right)\cdot T_z$$

Como vemos el Tiempo de Reverberación queda definido como la media aritmética ponderada de los períodos de reverberación en cada dirección.

De esta Teoría hay que destacar que es la primera que tiene en cuenta la ubicación del material absorbente en la sala. Las teorías que tienen en cuenta este hecho se llaman direccionales. Las fórmulas de Fitzroy, Arau y Neubauer, son direccionales.

5 Gomperts (1965)

Ley de extinción del sonido:

Gomperts, define una ley de extinción del sonido probabilística, expresada con la siguiente ecuación:

$$I(t) = I_0 \int_{-\infty}^{\infty} e^{-N \cdot t \cdot \ln(1-\alpha)} \cdot \left[p \cdot N^2 + q \cdot N + r \right] \cdot dN$$

En la que:

$N = \frac{c}{l_m}$ Número de reflexiones.

p, q y r son las constantes de una función de distribución parabólica, las cuales se deben ajustar en cada caso.

Tiempo de Reverberación:

Gomperts demostró, partiendo de la ecuación de Eyring y Norris, que la constante 0.163 se debía calcular dependiendo del caso en el que se quisiese aplicar, debido a que dependía de las proporciones de la sala.

Hizo el estudio de cuatro salas con diferentes formatos, y definió las constantes de cada uno de ellos.

Los cuatro formatos que estudió, tenían la misma longitud media ($l_m = \frac{4 \cdot V}{S} = \frac{2 \cdot a}{3}$), y por este motivo según la Teoría clásica, deberían tener un único valor del tiempo de reverberación.

1. Formato (a, a, a):

$$TR60_{(a,a,a)} = \frac{0.177 \cdot V}{- S \cdot \ln(1 - \bar{\alpha}_{Sab.})}$$

2. Formato $\left(\frac{2}{3}a, a, 2a\right)$:

$$TR60_{\left(\frac{2}{3}a,a,2a\right)} = \frac{0.263 \cdot V}{-S \cdot \ln\left(1-\bar{\alpha}_{Sab.}\right)}$$

3. Formato $\left(\frac{2}{3}a, \frac{2}{3}a, \frac{2000}{3}a\right)$:

$$TR60_{\left(\frac{2}{3}a,\frac{2}{3}a,\frac{2000}{3}a\right)} = \frac{9.9 \cdot V}{-S \cdot \ln\left(1-\bar{\alpha}_{Sab.}\right)}$$

4. Formato $\left(\frac{1}{3}a, \frac{1000}{3}a, \frac{1000}{3}a\right)$:

$$TR60_{\left(\frac{1}{3}a,\frac{1000}{3}a,\frac{1000}{3}a\right)} = \frac{31 \cdot V}{-S \cdot \ln\left(1-\bar{\alpha}_{Sab.}\right)}$$

De estas relaciones, se deduce que cuanto más nos alejamos de la simetría cilíndrica, más grande tiene que ser el coeficiente constante de la fórmula del tiempo de reverberación.

6 W.C. Kosten (1965-1966)

Kosten desarrolló una Teoría, basada en la de Sabine, pero con alguna diferencia. Kosten separa lo que él cree que son los elementos más determinantes a la hora de hacer un estudio acústico de una sala, como por ejemplo, audiencia, escenario y otros materiales especialmente absorbentes, y les da un mayor peso multiplicándolos por el área que determinan.

Ley de extinción del sonido:

La misma que la enunciada por Sabine. Pero con diferente ponderación de los elementos, tal y como hemos visto. El coeficiente de absorción medio de toda la sala, que propone es el que sigue a continuación:

$$\bar{\alpha}_{Kost.} = \frac{S_T \cdot \bar{\alpha}_T + S_R \cdot \bar{\alpha}_R + S_1 \cdot \alpha_1 + \ldots + S_n \cdot \alpha_n}{S_T}$$

Define:

- $S_T = S_A + S_O$, en la que S_A es el área ocupada por la audiencia, S_O es el área ocupada por elescenario, y por consiguiente S_T es el área total del suelo.
- $\bar{\alpha}_T$, es la media de los coeficientes de absorción del suelo.
- S_R, es la superficie de las paredes restantes del recinto, con un coeficiente de absorción medio $\bar{\alpha}_R$.
- S_i, es la superficie de cualquier material que destaque por ser suficientemente absorbente, yquedará multiplicado por su coeficiente de absorción α_i.

Tiempo de Reverberación:

$$TR60 = \frac{0.163 \cdot V}{S \cdot \bar{\alpha}_{Kost.}} = \frac{0.163 \cdot V}{S \cdot \left(\frac{S_T \cdot \bar{\alpha}_T + S_R \cdot \bar{\alpha}_R + S_1 \cdot \alpha_1 + \ldots + S_n \cdot \alpha_n}{S_T} \right)}$$

7 Pujolle (1970)

Ley de extinción del sonido:

$$I(t) = I_0 \cdot e^{-N \cdot \bar{\alpha}_{Puj.} \cdot t}$$

En la que:

$N = \frac{c}{l_m}$ Número de reflexiones.

$$l_m = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \left(L_x{}^2 \cdot L_y{}^2 + L_y{}^2 \cdot L_z{}^2 + L_z{}^2 \cdot L_x{}^2\right)^{\frac{1}{4}}$$ Recorrido libre medio.

$\bar{\alpha}_{Puj.}$ es el coeficiente de absorción medio de Pujolle, definido como:

$$\bar{\alpha}_{Puj.} = \bar{\alpha}_{E\&N} = -\ln\left(1 - \bar{\alpha}_{Sab.}\right)$$

Tiempo de Reverberación:

$$TR60 = \frac{0.0406 \cdot l_m}{\bar{\alpha}_{Puj.}}$$

8 H. Kuttruff (1970-1976)

La distribución del sonido que propone Kuttruff, es una distribución estadística que considera variables aleatorias gaussianas independientes, y que por lo tanto sigue la Ley de probabilidad de Rayleigh, que viene dada por la siguiente fórmula:

$$P_N(t) = \frac{c}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot N} \cdot \gamma \cdot l^2} \cdot e^{-\frac{c \cdot t - N \cdot \bar{l}^2}{2 \cdot N \cdot \gamma^2 \cdot \bar{l}^2}}$$

En la que:

$\gamma = \frac{\overline{l^2} - \bar{l}^2}{\bar{l}^2}$, es la variancia.

$\bar{l}$, es el valor medio delos diferentes trayectos del sonido.

N, es el número de reflexiones.

Podemos hacer una aproximación de la ecuación anterior, expresándola en función del número de reflexiones N (en la que N no tiene que ser necesariamente un número entero), durante un intervalo de tiempo determinado. En la ecuación anterior, si el producto c·t no es demasiado pequeño, el valor queda determinado sobretodo por la N del numerador del exponencial; mientras que la N del denominador de la exponencial se puede simplificar substituyéndolo por su media durante el intervalo especificado.

$$\bar{n} \cdot t = \frac{c \cdot t}{\bar{l}}$$

Por lo tanto la ecuación queda:

$$P_t(N) \sim \frac{l}{\sqrt{t}} \cdot e^{-\frac{c \cdot t - N \cdot \bar{l}^2}{2 \cdot c \cdot t \cdot \gamma^2 \cdot \bar{l}^2}}$$

Tiempo de Reverberación:

$$TR60 = \frac{0{,}163 \cdot V}{S \cdot \alpha_{Kutt}}$$

$$\alpha_{Kutt} = -\ln(1-\overline{\alpha}) \cdot \left(1 + \frac{\gamma^2}{2} \cdot \ln(1-\overline{\alpha})\right)$$

9 Wernly (1978)

Ley de extinción del sonido:

$$I(t) = I_0 \cdot e^{-N \cdot \bar{\alpha}_{Wer.} \cdot t}$$

En la que:

$N = \frac{c}{l_m} = \frac{c \cdot S}{4 \cdot V}$, Número de reflexiones.

$l_m = \langle L_i \rangle = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} L_i(\theta, \varphi) d\Omega$, Recorrido libre medio (fórmula dada por Hunt).

$\bar{\alpha}_{Wer.}$ es el coeficiente de absorción medio de Wernly, definido como:

$$\bar{\alpha}_{Wer.} = \bar{\alpha}_{E\&N} = -\ln(1 - \bar{\alpha}_{Sab.})$$

Tiempo de Reverberación:

$$TR60 = \frac{0.0406 \cdot l_m}{\bar{\alpha}_{Werb.}}$$

10 H. Arau (1988)

Ley de extinción del sonido:

HiginiArau, no define una única pendiente en la ley de extinción del sonido, debido a que su teoría contempla de la misma manera los casos en los que tenemos distribución de material uniforme,y los casos en los que la distribución del material no es uniforme. Y por lo tanto, cuando se trata de una sala rectangular, define tres pendientes diferentes sobrepuestas, que podemos representar con la siguiente fórmula:

$$E(t) = E_1 \cdot e^{-k \cdot D_i \cdot t} + E_2 \cdot e^{-k \cdot \overline{D} \cdot t} + E_3 \cdot e^{-k \cdot D_f \cdot t}$$

Si lo expresamos en términos de intensidad, tendremos:

$$I(t) = I_1 \cdot e^{-N \cdot \alpha_i \cdot t} + I_2 \cdot e^{-N \cdot \overline{\alpha} \cdot t} + I_3 \cdot e^{-N \cdot \alpha_f \cdot t}$$

Y las tres pendientes de las que hemos hablado antes son:

- D_i : factor de caída inicial.
- $\overline{D}$: factor de caída media.
- D_f :factor de caída final. Aunque normalmente será de poco interés.

Además, como las paredes tienen coeficientes de absorción bastante diferentes entre sí, tendremos una distribución no homogénea del sonido, y por tanto, resultará un campo sonoro no difuso.

Por lo tanto, no sería demasiado correcto partir de una distribución de las variables normales, sabiendo que los coeficientes de absorción de las superficies x, y y z son bastante diferentes entre sí, y como son proporcionales a los factores de caída, implicaría sobreponer una única pendiente, y por consiguiente cometer un error importante en caso de no homogeneidad.

Para no cometer este error, deberíamos suponer una distribución gaussiana, pero una manera más sencilla de hacerlo siendo una buena aproximación, es considerar una distribución logaritmo-normal de la cual se obtienen unas nuevas variables que son: $\log\bar{\alpha}_x, \log\bar{\alpha}_y, \log\bar{\alpha}_z$.

El valor medio de estas magnitudes, lo calcularemos como:

$$\log\bar{\alpha} = \frac{S_x \cdot \log\bar{\alpha}_x + S_y \cdot \log\bar{\alpha}_y + S_z \cdot \log\bar{\alpha}_z}{S}$$

También podemos expresar esta ecuación, sacando los logaritmos:

$$\log\bar{\alpha} = \log\bar{\alpha}_x^{\frac{S_x}{S}} + \log\bar{\alpha}_y^{\frac{S_y}{S}} + \log\bar{\alpha}_z^{\frac{S_z}{S}} = \log\left(\bar{\alpha}_x^{\frac{S_x}{S}} \cdot \bar{\alpha}_y^{\frac{S_y}{S}} \cdot \bar{\alpha}_z^{\frac{S_z}{S}}\right)$$

$$\bar{\alpha} = \bar{\alpha}_x^{\frac{S_x}{S}} \cdot \bar{\alpha}_y^{\frac{S_y}{S}} \cdot \bar{\alpha}_z^{\frac{S_z}{S}}$$

Éste es el valor medio, pero para saber la magnitud de los valores máximos y mínimos se debe calcular el factor de dispersión de la distribución logaritmo-normal, que viene dada por la expresión que sigue a continuación:

$$d = \log^{-1}\left[\left(\frac{1}{6+\beta}\right) \cdot \left\{ \begin{array}{l} \frac{S_x}{S}\left(\log\bar{\alpha}_x\right)^2 + \frac{S_y}{S}\left(\log\bar{\alpha}_y\right)^2 + \frac{S_z}{S}\left(\log\bar{\alpha}_z\right)^2 - \\ -\left[\frac{S_x}{S}\log\bar{\alpha}_x + \frac{S_y}{S}\log\bar{\alpha}_y + \frac{S_z}{S}\log\bar{\alpha}_z\right]^2 \end{array} \right\}^{\frac{1}{2}}\right]$$

Este factor de dispersión de la distribución logarítmico-normal fue mejorar con un término corrector β, que experimentalmente se le asignaron los siguientes valores:

- Para salas de muy baja difusión: β = {-5, -4};
- Para salas con una difusión regular:β = {-3, -2};
- Para salas con buena difusión: β = {-1, 0};
- Para salas con muy buena difusión:β = 1;

Por tanto, el valor máximo de nuestra variable es:

$$\alpha_i = \bar{\alpha} \cdot d$$

Y el valor mínimo:

$$\alpha_f = \frac{\bar{\alpha}}{d}$$

En el caso que tengamos una distribución uniforme, y por tanto $\bar{\alpha}_x = \bar{\alpha}_y = \bar{\alpha}_z$, tendremos d = 1 y la Ley de extinción del sonido será:

$$I(t) = I_2 \cdot e^{-N \cdot \bar{\alpha}_{Arau} \cdot t}$$

En la que, en este caso:

$$\bar{\alpha}_{Arau} = -\ln(1 - \bar{\alpha}_{Sab.})$$

Para un caso genérico, tendremos:

$$I(t) = I_1 \cdot e^{-N \cdot \bar{\alpha}_i \cdot t} + I_2 \cdot e^{-N \cdot \bar{\alpha}_{Arau} \cdot t} + I_3 \cdot e^{-N \cdot \bar{\alpha}_f \cdot t}$$

En la que:

$N = \frac{c}{l_m} = \frac{c \cdot S}{4 \cdot V}$, Número de reflexiones.

$l_m = \frac{4 \cdot V}{S}$, Recorrido libre medio.

$\bar{\alpha}_i = \bar{\alpha}_{Arau} \cdot d$

$\bar{\alpha}_f = \frac{\bar{\alpha}_{Arau}}{d}$

$\bar{\alpha}_{Arau} = \bar{\alpha}_{Arau,x}{}^{S_x/S} \cdot \bar{\alpha}_{Arau,y}{}^{S_y/S} \cdot \bar{\alpha}_{Arau,z}{}^{S_z/S}$, es el coeficiente medio de absorción definido por HiginiArau, en el que:

$$\bar{\alpha}_{Arau,x} = -\ln(1 - \bar{\alpha}_x)$$

$$\alpha_{Arau,y} = -\ln(1-\alpha_y)$$

$$\alpha_{Arau,z} = -\ln(1-\alpha_z)$$

Tiempo de Reverberación:

$$TR60 = \left[\frac{0.163 \cdot V}{S \cdot \alpha_{Arau,x}}\right]^{\frac{S_x}{S}} \cdot \left[\frac{0.163 \cdot V}{S \cdot \alpha_{Arau,y}}\right]^{\frac{S_y}{S}} \cdot \left[\frac{0.163 \cdot V}{S \cdot \alpha_{Arau,z}}\right]^{\frac{S_z}{S}}$$

En la que:

$S_x = S_{x_1} + S_{x_2}$, es el área del techo más la del suelo.

$S_y = S_{y_1} + S_{y_2}$, es el área de las paredes laterales.

$S_z = S_{z_1} + S_{z_2}$, es el área de la pared frontal y la de la pared posterior.

$S = S_x + S_y + S_z$, es el área total del recinto.

$\alpha_x = \dfrac{S_{x_1} \cdot \alpha_{x_1} + S_{x_2} \cdot \alpha_{x_2}}{S_x}$, es el valor medio (aritmética ponderada) delos coeficientes de absorción de cada superficie en dirección x, es decir del techoy del suelo.

$\alpha_y = \dfrac{S_{y_1} \cdot \alpha_{y_1} + S_{y_2} \cdot \alpha_{y_2}}{S_y}$, el mismo para las superficies en dirección y.

$\alpha_z = \dfrac{S_{z_1} \cdot \alpha_{z_1} + S_{z_2} \cdot \alpha_{z_2}}{S_z}$, y también para las superficies en dirección z.

Podemos expresar el TR60, de la siguiente manera:

$$TR60 = T_x^{\frac{S_x}{S}} \cdot T_y^{\frac{S_y}{S}} \cdot T_z^{\frac{S_z}{S}}$$

Además, también podemos calcular:

$T_i = \dfrac{60}{D_i}; D_i = \overline{D} \cdot d$, en la que T_i es el tiempo de reverberación inmediato.

$T_f = \frac{60}{D_f}; D_f = \frac{\overline{D}}{d}$, en la que T_f es el tiempo de reverberación final.

Los tiempos de reverberación inmediatos, medidos dentro delos primeros 10dB de extinción del sonido, coincidencon el conocido EDT (EarlyDecay Time).

11 Fitzroy modificadapor Neubauer, R.O. (2000)

Tiempo de reverberación:

$$TR60 = \left(\frac{0.32 \cdot V}{S^2}\right) \cdot \left(\frac{h \cdot (l + w)}{\overline{\alpha}_{WW}} + \frac{l \cdot w}{\overline{\alpha}_{CF}}\right)$$

En la que:

V, es el Volumen en m^3.
$S = S_{CF} + S_{WW}$, es la superficie total en m^2.
h, l, w: son las dimensiones del recinto en metros, altura, profundidad y anchura respectivamente.
$\overline{\alpha}_{WW}$, es el coeficiente de absorción medio de las paredes laterales, anteriores y posteriores, definido como:

$$\overline{\alpha}_{WW} = -\ln(1 - \overline{\alpha}_{Sab.}) + \left[\frac{(1 - \overline{\alpha}_{WW,Sab.}) \cdot (\overline{\alpha}_{Sab.} - \overline{\alpha}_{WW,Sab.}) \cdot S_{WW}^{\;2}}{(1 - \overline{\alpha}_{Sab.})^2 \cdot S^2}\right]$$

$\overline{\alpha}_{CF}$, es el coeficiente de absorción medio del techoy del suelo, definido como:

$$\overline{\alpha}_{CF} = -\ln(1 - \overline{\alpha}_{Sab.}) + \left[\frac{(1 - \overline{\alpha}_{CF,Sab.}) \cdot (\overline{\alpha}_{Sab.} - \overline{\alpha}_{CF,Sab.}) \cdot S_{CF}^{\;2}}{(1 - \overline{\alpha}_{Sab.})^2 \cdot S^2}\right]$$

$S_{CF} = 2 \cdot l \cdot w$, es la superficie del techo ydel suelo en m^2.

$S_{WW} = 2 \cdot l \cdot h + 2 \cdot h \cdot w$, es la superficie de las paredes laterales, frontal y posterior en m^2.