

# Diseño de salas de locución y acondicionamiento acústico

Luis Enrique Mora Cheza, Ing.  
Mario Cevallos Villacreses, Ing.  
Escuela Politécnica Nacional (EPN), Quito - Ecuador

**Resumen.-** Aplicando los principios básicos de la Acústica y la Sonorización, se determinan la geometría y estructura de las salas, el cálculo de los parámetros acústicos que definen la calidad de la sonoridad y la inteligibilidad de un recinto.

**Índices.-** Acústica, Modos de Resonancia, Reverberación, Ruido de fondo, Inteligibilidad.

**Abstract.-** By applying the basic principles of Acoustic and Sonorization, the geometry and structure of the rooms are determined, as well as the calculation of the acoustic parameters that define the quality of the sonority and the sharpness of an enclosure.

## I. INTRODUCCIÓN

Aplicando los principios básicos de la Acústica y la Sonorización, se determina la geometría y estructura de las salas, el cálculo de los parámetros acústicos que definen la calidad de la sonoridad de un recinto, considerando de manera general el aislamiento de ruidos y vibraciones desde exteriores y los factores interiores influyentes. Mediante el análisis de los modos propios de resonancia, de los niveles de presión sonora, y del control del ruido de fondo se logra estimar el tiempo de reverberación, las dimensiones óptimas del recinto y la inteligibilidad de la palabra.

## II. DISEÑO DE SALAS DE LOCUCIÓN Y ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO

Para el diseño de las salas de locución, de manera general se deben tener las siguientes consideraciones:

- Tratar de aislar ruidos y vibraciones desde exteriores; mediante el uso de paredes, tumbados, puertas y ventanas preparadas para el efecto.
- Determinar el acondicionamiento y aislamiento acústico de las salas de locución, eligiendo recubrimientos interiores y dimensiones adecuadas, para obtener una buena calidad sonora.
- En definitiva, una buena acústica evitará algo tan poco deseado en como las reverberaciones y las resonancias del sonido.

## III. MODOS PROPIOS DE RESONANCIA

Las ondas pueden viajar de ida y vuelta entre cualquier par de paredes opuestas. También pueden viajar alrededor del recinto involucrando así la reflexión en varias paredes con diferentes ángulos de incidencia. Si estos ángulos se eligen adecuadamente, las ondas vuelven al estado original

después de cada viaje redondo y se establecen ondas estacionarias o permanentes. En el rango de frecuencias bajas existen tres modos de frecuencias de resonancia:

### A. Axiales

Involucran reflexiones sobre dos superficies vinculadas con las tres dimensiones principales del recinto (largo, ancho y alto), estableciéndose a partir de dos ondas que se propagan en forma paralela a cada uno de los ejes. Se les conoce como modos dominantes y son los más importantes y fáciles de predecir.

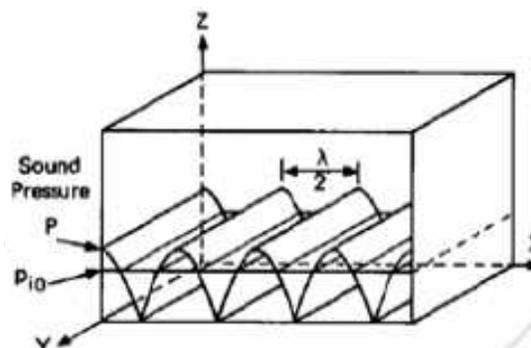


Figura 3.1. Modo de resonancia axial para un recinto rectangular<sup>1</sup>.

### B. Tangenciales

Son los vinculados con las reflexiones sobre dos pares de superficies opuestas, por lo que involucran cuatro superficies con un total de cuatro ondas.

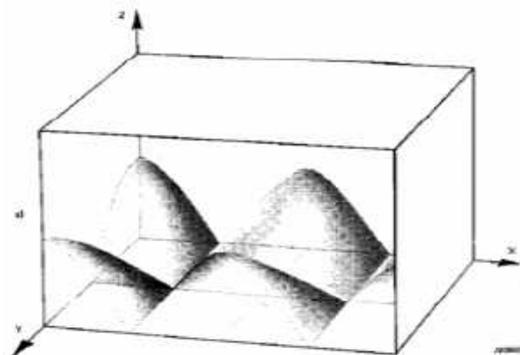


Figura 3.2. Modo de resonancia tangencial para un recinto rectangular<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Acústica. Modos de Resonancia. PDF. LACEAC Ediciones

En cada reflexión, perderán parte de su energía debido a la absorción, esta pérdida corresponde a la mitad de la energía (3dB) de los modos axiales por lo que tendrán menor peso.

### C. Oblicuos

Son aquellos vinculados con las reflexiones sobre las superficies del recinto, con un total de ocho ondas en el trayecto, por lo que tendrán menor peso aun que las axiales (6dB). Estos modos son de frecuencias más altas que el menor modo axial.

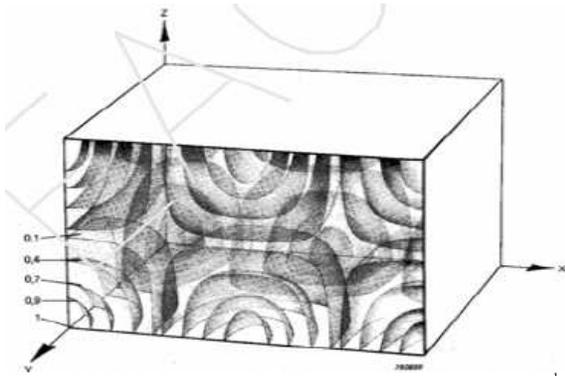


Figura 3.3. Modo de resonancia oblicuo para un recinto rectangular<sup>1</sup>.

La frecuencia de cualquier modo se puede obtener de la siguiente fórmula:

$$f_n = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (1)$$

$f_n$  = frecuencia normal de orden  $n$  en Hz.

$n_x, n_y, n_z$  = enteros que pueden elegirse independientemente con cualquier valor entre 0 e  $\infty$ .

$l_x, l_y, l_z$  = dimensiones del recinto en metros.

$c$  = velocidad del sonido en m/s

Las diferentes combinaciones de  $n_x, n_y, n_z$  proveen la frecuencia de los modos calculados. Por ejemplo:

- $n_x=1, n_y=0, n_z=0$   
Modo (1, 0,0): modo axial: eje mayor de la sala.
- $n_x=0, n_y=1, n_z=0$   
Modo (0, 1,0): modo axial: eje medio de la sala.
- $n_x=0, n_y=0, n_z=1$   
Modo (0, 0,1): modo axial: eje menor de la sala.

Estos enteros no solo proveen la clave para hallar la frecuencia de un modo, sino que también sirven para identificarlos como axiales, tangenciales u oblicuos. Como regla general, podemos decir que con dos ceros (0,3,0) es identificado un modo axial, con un cero (2,0,3) es identificado un modo tangencial y con ningún cero (1,4,2) es identificado un modo oblicuo.

Estos modos de resonancias poseen tres características principales: frecuencia, energía y ancho de banda.

Para recintos de tipo rectangulares (paralelepípedos) la predicción de las frecuencias de los modos de resonancia es relativamente simple, mientras que para recintos de formas más complejas, es muy difícil y hasta a veces imposible. La energía de los modos de resonancia es función de la posición del oyente y de la fuente, así como de la pérdida

por transmisión de los límites físicos del recinto y de los revestimientos de los mismos.

El problema de una mala distribución modal es un refuerzo o fragilidad en el apoyo resonador que el recinto brinda a los sonidos reproducidos dentro de sí, llevando esto a malas ejecuciones, malas captaciones, falsas equalizaciones en las mezclas finales (en resumen malos trabajos) y degradación de la inteligibilidad. Estos problemas modales se evidencian mayoritariamente en bajas frecuencias (para recintos *grandes*, hasta 50Hz o menos y para recintos *pequeños*, hasta 250 Hz aproximadamente).

Las soluciones “populares” como la *equalización*<sup>2</sup> del sistema de parlantes corrompen el tan buscado trayecto directo de la señal sonora (la respuesta en frecuencia medida en una situación anecoica<sup>3</sup>) y pueden llevar al sistema a distorsionar.

La *angulación de paredes no soluciona nada*, sino que convierte al sistema en uno de difícil cálculo de las frecuencias modales. La *absorción extrema*, que sólo se hace para medianas y altas frecuencias, convierte al recinto en irreal y poco práctico para trabajar con el sonido, sin resolver nada en bajas frecuencias. Las ondas estacionarias son una característica intrínseca de toda cavidad (recinto), por lo tanto es imposible eliminarlas o tratar de hacerlo.

## IV. NIVEL DE PRESIÓN SONORA

$$N_{SPL} = 20 \log \frac{P}{P_{ref}} \quad (2)$$

La presión sonora de referencia  $P_{ref} = 2 \times 10^{-5} Pa$  (Pascuales) llamada también límite umbral. El oído humano es capaz de detectar variaciones de presión acústica comprendidas entre  $20 \times 10^{-6} Pa$  y 200 Pa aproximadamente.

Límite umbral =  $20 \mu Pa$ .

$$N_{SPL} = 20 \log \frac{P}{P_{ref}} = 20 \log \frac{20 \mu Pa}{20 \mu Pa} = 0 dB \quad (3)$$

Límite de dolor =  $200 Pa$ .

$$N_{SPL} = 20 \log \frac{P}{P_{ref}} = 20 \log \frac{200 Pa}{20 \mu Pa} = 140 dB \quad (4)$$

La tabla 4.1 muestra la relación entre la presión eficaz (en Pascal) que ejerce un sonido, los decibeles que genera ( $L_p=NPS$ ) y la percepción del oído humano.

Niveles Sonoros y Respuesta Humana		
Sonidos característicos	Nivel de presión sonora [dB]	Efecto
Zona de lanzamiento de cohetes (sin protección auditiva)	180	Pérdida auditiva irreversible
Operación en pista de jets Sirena antiaérea	140	Dolorosamente fuerte
Trueno	130	

<sup>2</sup> Proceso mediante el cual se modifica el contenido en frecuencias de la señal que procesa. Para ello, cambia las amplitudes de sus coeficientes de Fourier, lo que se traduce en diferentes volúmenes para cada frecuencia.

<sup>3</sup> Una cámara anecoica o anecoide es una sala especialmente diseñada para absorber el sonido que incide sobre las paredes, el suelo y el techo de la misma cámara, anulando los efectos de eco y reverberación del sonido.

Despegue de jets (60 m) Bocina de auto (1 m)	120	Máximo esfuerzo vocal
Martillo neumático Concierto de Rock	110	Extremadamente fuerte
Camión recolector Petardos	100	Muy fuerte
Camión pesado (15 m) Tránsito urbano	90	Muy molesto Daño auditivo (8 Hrs)
Reloj Despertador (0,5 m) Secador de cabello	80	Molesto
Restaurante ruidoso Tránsito por autopista Oficina de negocios	70	Difícil uso del teléfono
Aire acondicionado Conversación normal	60	Intrusivo
Tránsito de vehículos livianos (30 m)	50	Silencio
Living Dormitorio Oficina tranquila	40	
Biblioteca Susurro a 5 m	30	Muy silencioso
Estudio de radiodifusión	20	
	10	Apenas audible
	0	Umbral auditivo

Tabla 4.1. Niveles de Presión sonora correspondientes a sonidos y ruidos típicos y su respuesta humana.

La figura 4.1 muestra los campos de frecuencia y niveles de presión sonora en los que se desarrollan la mayoría de los sonidos que nos rodean.

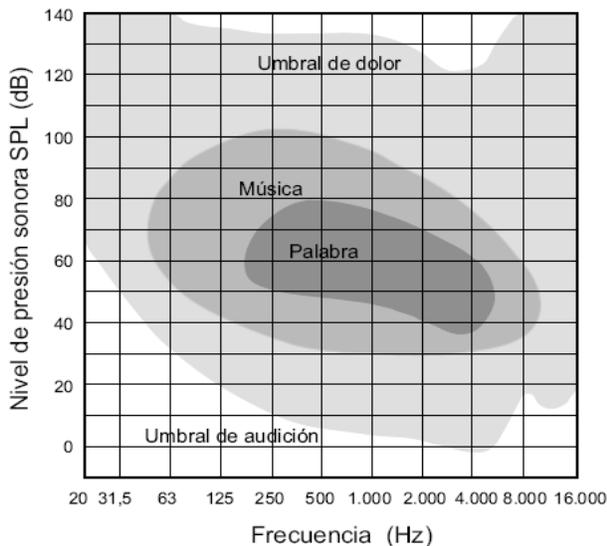


Figura 4.1. Niveles de audición en función de la frecuencia y el Nivel de Intensidad sonora<sup>4</sup>.

## V. COEFICIENTE DE ABSORCIÓN EN UN MEDIO Y DE UN MATERIAL.

Una onda acústica que se mueve en un medio material hace vibrar las partículas, las cuales rozan entre sí. Este roce consume parte de la energía, que se convierte en calor, disminuyendo la energía acústica total. La pérdida de energía, o absorción, depende de cada frecuencia, siendo

generalmente mayor a altas frecuencias que a bajas frecuencias.

Si la onda que incide en el medio tiene intensidad  $I_0$  después de recorrer en el medio la distancia  $x$  tendrá una intensidad  $I$  dada por:

$$I = I_0 e^{-\gamma x} \quad (5)$$

Donde  $\gamma$  es el coeficiente de absorción del medio, que también depende de la frecuencia. La disminución de intensidad en decibelios debido a la absorción cuando las ondas sonoras recorren la distancia  $x$  en el medio se calcula por:

$$\Delta dB = 10 \log \frac{I}{I_0} = -10 \gamma x \log e = -4,34 \gamma x \quad (6)$$

La Tabla 2.10 muestra la absorción del aire a 20° centígrados y humedad del 70% para distintas frecuencias, en dB por kilómetro.

Frecuencia (Hz)	31.5	63	125	250	500	1Khz	2Khz	4Khz	8Khz	16Khz
Absorción (dB/km)	0.2	0.3	0.7	1.3	2.6	5.3	11.0	22.0	53.0	160

Tabla 5.1. Absorción del aire a 20° centígrados y humedad del 70% para distintas frecuencias, en dB por kilómetro<sup>5</sup>.

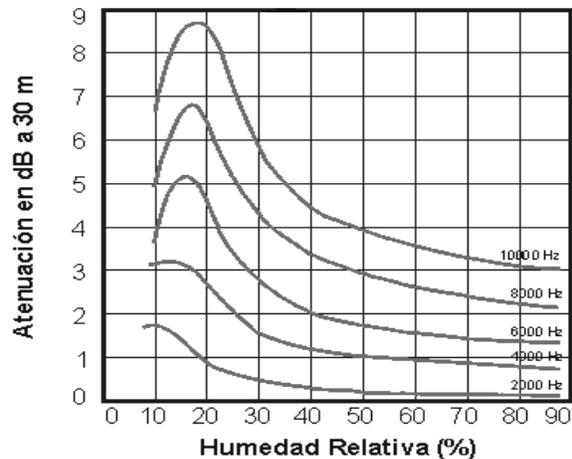


Figura 5.1. Muestra que la absorción es mayor en altas frecuencias que en bajas y mayor en aire seco que en aire húmedo<sup>5</sup>.

También existe otro parámetro de la absorción, y es el que se usa en las especificaciones de materiales acústicos. Se suele llamar coeficiente de absorción  $\alpha$ , es adimensional y sus valores van de 0 a 1, siendo 0 equivalente a absorción nula y 1 a máxima absorción. Este valor se usa principalmente para calcular los tiempos de reverberación de salas. El coeficiente  $\alpha$  de un panel acústico depende principalmente del espesor, porosidad y forma que tenga.

Sea  $I$  la intensidad de la onda sonora incidente e  $I_r$  la de la onda reflejada por una pared o un objeto. La diferencia entre estas dos intensidades,  $I_a$ , se denomina intensidad absorbida y es la suma de las intensidades disipada  $I_d$  y transmitida  $I_t$ :

$$I_a = I - I_r = I_d + I_t \quad (7)$$

<sup>4</sup> Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Antoni Carrión Isbert. Ediciones UPC. 1998. Primera Edición. Cataluña. España.

<sup>5</sup> Ondas y acústica. Sistemas y medios técnicos de sonido. Ciclo superior de sonido. I.E.S. "Ramón y Cajal". J.A.S.B. Huesca Septiembre 2005

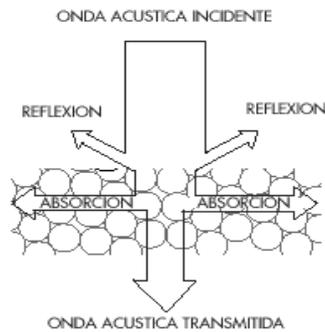


Figura 5.2. Absorción en un medio y direcciones de las ondas estacionarias<sup>5</sup>.

Se define el coeficiente de absorción  $\alpha$  de un material como:

$$\alpha = \frac{I_a}{I} \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (8)$$

El coeficiente de absorción no tiene unidades. Los coeficientes de absorción de un material dependen de la frecuencia del sonido.

Material	Espesor cm	Coeficientes					
		125	250	500	1000	2000	4000
Pared de ladrillo, sin pintar	45	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
Pared de ladrillo, pintada	45	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Revoque, yeso, sobre ladrillos huecos, pintado o no	..	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04
Revoque, yeso, primera y segunda capa de enlucido sobre metal desplegado, sobre tarugos de madera	..	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06	0,03
Revoque, mortero de cal, terminación a la arena sobre metal desplegado	2	0,04	0,05	0,06	0,08	0,04	0,06
Revoque, sobre lana de madera	..	0,40	0,30	0,20	0,15	0,10	0,10
Revoque fibroso	5	0,35	0,30	0,20	0,55	0,10	0,04
Hormigón, sin pintar	..	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Hormigón, pintado	..	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Madera maciza y pulida	5	0,1	..	0,05	..	0,04	0,04
Madera en paneles, con espacio de aire (5 a 10 cm) detrás	1-1,5	0,30	0,25	0,20	0,17	0,15	0,10
Madera, plataforma con gran espacio de aire debajo	..	0,4	0,3	0,2	0,17	0,15	0,1
Vidrio	..	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,20
Pisos:							
Pizarra sobre contrapiso	..	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Madera sobre contrapiso	..	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02
Corcho, linóleo, yeso o goma sobre contrapiso	4,5	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03	0,02
Bloques de madera, pino resinoso	..	0,05	0,03	0,06	0,09	0,10	0,22
Alfombras:							
De lana, acolchadas	1,5	0,20	0,25	0,35	0,40	0,50	0,75
De lana, sobre hormigón	1,0	0,09	0,08	0,21	0,26	0,27	0,37
Colgaduras y tejidos:							
Aterciopelados, extendidos:							
0,35 Kg/m <sup>2</sup>	..	0,04	0,05	0,11	0,18	0,30	0,35
0,45 Kg/m <sup>2</sup>	..	0,05	0,07	0,13	0,22	0,32	0,35
0,60 Kg/m <sup>2</sup>	..	0,05	0,12	0,35	0,48	0,38	0,36
Aterciopelados, drapados a la mitad de la superficie:							
0,45 Kg/m <sup>2</sup>	..	0,07	0,31	0,49	0,75	0,70	0,60
0,60 Kg/m <sup>2</sup>	..	0,14	0,35	0,55	0,75	0,70	0,60
Asientos y personas ( $\alpha_n S$ en metro cuadrado por persona o asiento):							
Asientos:							
Sillas, respaldo sin tapizar, asiento de cuero	..	0,2	0,25	0,30	0,30	0,30	0,25
Butacas, de teatro, tapizado grueso	..	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Sillas de orquesta, de madera	..	0,01	0,015	0,02	0,035	0,05	0,06
Cojines para bancos de iglesia, por persona	4	0,1	0,15	0,17	0,17	0,16	0,14
Personas:							
En asientos sin tapizar (sumar a la absorción de las sillas con asiento de cuero)	..	0,07	0,06	0,05	0,13	0,16	0,2

<sup>†</sup> Reunidos y promediados por el autor según datos publicados. Las numerosas divergencias observables en la literatura corriente no permiten ofrecer cifras exactas.

Tabla 5.2. Valores del coeficiente de absorción de diferentes materiales a diferentes frecuencias<sup>6</sup>.

Se observa que en general el coeficiente de absorción:

- Aumenta con la frecuencia

- Es grande en materiales blandos y ligeros, porosos y fibrosos como espumas, alfombras, madera, etc.
- Es pequeño en materiales duros y pesados como hormigón, ladrillo, mármol.

Sus valores se determinan normalmente a las frecuencias de 125, 250, 500, 1000, 2000 y 4000 Hz respectivamente. Al discutir en general las propiedades de los materiales absorbentes es común especificar su comportamiento a 500 Hz.

Asignemos a cada superficie reflectora un coeficiente de absorción sonora  $\alpha_n$  definido como la relación de la energía absorbida a la energía incidente sobre la superficie. A medida que la onda se propaga por la habitación, encuentra las diversas superficies a diversos ángulos de incidencia. En una habitación grande e irregular, el número de ondas que están propagándose simultáneamente es tan grande que todos los ángulos de incidencia son igualmente probables en cada una y todas las superficies. El coeficiente de absorción sonora debe tomarse entonces como promedio para todos los ángulos de incidencia.

Además de promediar el coeficiente de absorción para todos los ángulos de incidencia sobre una superficie, podemos promediar los coeficientes de absorción de las diferentes superficies de la habitación, asignándoles un "peso" de acuerdo con el área de cada una de las superficies, del siguiente modo:

$$\bar{\alpha} = \frac{S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + S_3\alpha_3 + \dots + S_n\alpha_n}{S} \quad (9)$$

$$S = S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_n$$

Donde:

$S_1, S_2, S_3, \dots$  son las áreas de las superficies absorbentes individuales, en m<sup>2</sup>.

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots$  son los coeficientes de absorción asociados respectivamente con esas áreas; y  $\bar{\alpha}$  es el coeficiente de absorción medio para la habitación en conjunto.

Obsérvese que el coeficiente de absorción  $\alpha_n$  es en realidad una medida del poder de absorción por unidad de área de una superficie límite de una habitación. Si hay una ventana abierta en la habitación, toda la energía incidente sale y ninguna se refleja. Por tanto, para una ventana abierta,  $\alpha_n=1$ .

Todos los materiales tienen coeficientes de absorción diferentes a diferentes frecuencias. Para la especificación completa de las propiedades de absorción de un material se necesita una curva de  $\alpha$  en función de la frecuencia. El efecto acústico de las personas, sillas, asientos, mesas, escritorios, etc., que son objetos que forman parte de las superficies límites de la habitación, debe también tomarse en cuenta.

## VI. REVERBERACIÓN Y TIEMPO DE REVERBERACIÓN (TR)

Todos los espacios cerrados y la mayoría de los espacios parcialmente cerrados, tienden a crear un efecto de persistencia de sonido más conocido como reverberación, que es el fenómeno de sucesivas reflexiones del sonido en distintas superficies.

<sup>6</sup> Acústica. Leo L. Beranek. Segunda Edición. Editorial Hispano. Versión castellana por el Ing. Adolfo Di Marco.

Al emitir un sonido en un local, se refleja en las paredes, suelo, techo y en todos los obstáculos que impiden su libre propagación. Si los obstáculos son buenos reflectores del sonido éste persiste un largo tiempo, dando ocasión a que sean percibidos por el auditorio varios sonidos a la vez, alterándose la belleza musical de un concierto o haciéndose ininteligible un orador.

Se evita la reverberación con la aplicación de la acústica, por medio de cuerpos absorbentes del sonido (cortinas, yeso poroso, etc.); el sonido reflejándose en tales cuerpos pierde intensidad en las sucesivas reflexiones.

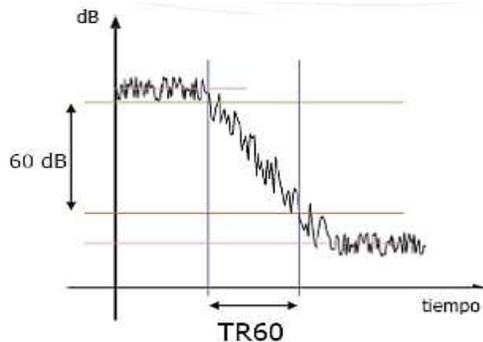


Figura 6.1. Cuantificación como SPL del tiempo de reverberación<sup>7</sup>.

Cuando se establece un único valor recomendado de TR o TR<sub>mid</sub> para un recinto dado, se suele hacer referencia al obtenido como media aritmética de los valores correspondientes a las frecuencias de 500 Hz y 1 KHz. Los tiempos óptimos de reverberación fueron determinados experimentalmente en función del volumen del local y de su uso. Además deben considerarse otros factores como los materiales constitutivos del local. El tiempo óptimo es una función del volumen, y generalmente se prefieren tiempos óptimos mayores cuando las salas son más grandes, y viceversa.

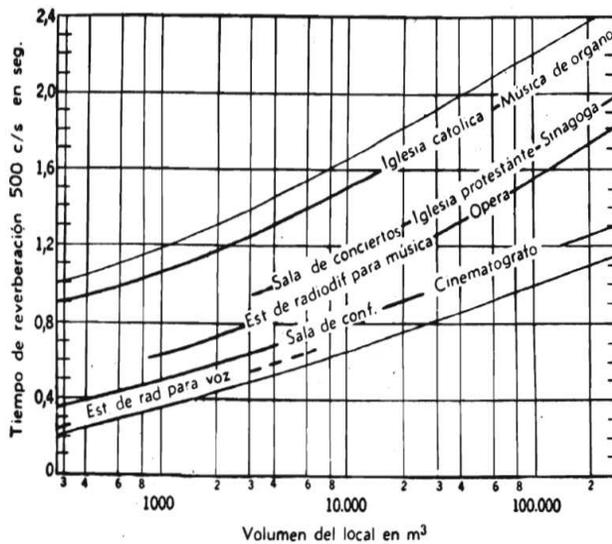


Figura 6.2: TR óptimo en función del volumen y uso de las salas a  $f = 500$  Hz<sup>8</sup>.

<sup>7</sup>[http://acusticaweb.com/index.php?option=com\\_content&task=view&id=98&Itemid=79](http://acusticaweb.com/index.php?option=com_content&task=view&id=98&Itemid=79)

<sup>8</sup> Acústica. Leo L. Beranek. Segunda Edición. Editorial Hispano. Versión castellana por el Ing. Adolfo Di Marco.

### A. Fórmula de Sabine

El TR en segundos, que es distinto para cada frecuencia se puede calcular mediante la fórmula:

$$T_{rev} = \frac{0,161.V}{S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + \dots} \quad (10)$$

Donde:

V es el volumen de la sala en m<sup>3</sup>;

S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>... son las superficies en m<sup>2</sup>;

α<sub>1</sub>, α<sub>2</sub> son los coeficientes de absorción.

El tiempo de reverberación aumenta con el volumen de la sala y disminuye cuanto mayor son las superficies y los coeficientes de absorción.

La fórmula de Sabine se utiliza cuando los coeficientes de absorción no son muy altos (hasta 0,15), los materiales absorbentes están uniformemente distribuidos y no se conocen con mucha exactitud los coeficientes de absorción de los materiales o no se requiere gran precisión. Además no toma en cuenta la absorción del aire, la cual es importante en las salas grandes.

### B. Fórmula de Eyring

$$T_{rev} = \frac{-0,161.V}{S_T \ln(1 - \alpha_m)} \quad (11)$$

S<sub>T</sub> = S<sub>1</sub> + S<sub>2</sub> + ... (m<sup>2</sup>), superficie total

α<sub>m</sub> =  $\frac{S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + \dots}{S_1 + S_2 + \dots}$  Coeficiente de absorción medio

V es el volumen del local (m<sup>3</sup>)

Esta fórmula es la más utilizada en estudios acústicos de salas y es aplicable cuando la distribución de materiales absorbentes es uniforme y se conocen con exactitud los coeficientes de absorción. Los resultados que da son precisos.

### C. Fórmula de Fitzroy

Esta ecuación es la más utilizada en la actualidad, sobre todo cuando no se tiene una distribución uniforme de la absorción. En su forma original la ecuación de Fitzroy empleó los Eyrings en lugar de los Sabines por el tipo de absorción, así:

$$T_{rev} = \frac{0,161.V}{S^2} \left( \frac{S_x}{-\ln(1 - \alpha_x)} + \frac{S_y}{-\ln(1 - \alpha_y)} + \frac{S_z}{-\ln(1 - \alpha_z)} \right) \quad (12)$$

Donde:

V: volumen de la sala

S: Área total de superficie de la sala

S<sub>x</sub>: Superficie de las paredes laterales.

S<sub>y</sub>: Superficie de las paredes posterior y anterior.

S<sub>z</sub>: Superficie del piso y del techo.

α<sub>x</sub>: Absorción promedio: paredes laterales.

α<sub>y</sub>: Absorción promedio: paredes posterior y anterior.

α<sub>z</sub>: Absorción promedio: piso y techo.

x, y: Áreas de paredes laterales (x), paredes frontal y posterior (y).

z: Área del techo y del piso

A<sub>x</sub>, A<sub>y</sub>, A<sub>z</sub>: Absorción total según Sabine.  $A = \alpha_1.S_1 + \alpha_2.S_2 + \alpha_3.S_3 \dots$

La ecuación de Fitzroy proporciona períodos de reverberación calculados más acorde a los valores medidos en salas que tienen material de absorción sonora concentrado en una o dos paredes, mientras un par o incluso dos pares de superficies paralelas en la sala permanecen altamente reflexivas.

Sin embargo debe señalarse que todas las ecuaciones de TR publicadas a la fecha, están basadas, explícita o implícitamente, en las condiciones de energía sonora difusa en el contorno bajo consideración. La ecuación de Fitzroy no es la excepción, aunque toma en cuenta las no uniformidades de la absorción en la sala.

Sin embargo, la ecuación expresada en esta forma es solo de importancia para salas o recintos con un relativamente tiempo pequeño de reverberación.

Para ilustrar las diferencias en los TR's calculados a partir de las cuatro ecuaciones, consideramos una sala cúbica de 10 ft (3.048 m) de lado, en la cual un primer par, luego un segundo y finalmente un tercer par de paredes opuestas es tratado con un material acústico de 0.80 de absorción con las paredes restantes tratadas con 0,04 de absorción.

La siguiente tabla muestra los resultados de los cálculos:

Ecuación de Reverberación	Tiempo de reverberación en una sala cúbica de 10 ft de lado con un número de paredes opuestas tratadas con un material absorbente de 0,80		
	1 par	2 pares	3 pares
Sabine	0,278 seg.	0,145 seg.	0,102 seg.
Eyring	0,236 seg.	0,102 seg.	0,051 seg.
Fitzroy, con absorción de Sabine	1,395 seg.	0,749 seg.	0,102 seg.
Fitzroy, con absorción de Eyring	1,375 seg.	0,715 seg.	0,051 seg.

Tabla 6.1. Cuadro comparativo de los distintos TR's calculados con las ecuaciones citadas anteriormente.

Aunque los TR's recomendados generalmente se refieren a habitaciones llenas a la mitad o a dos tercios, las medidas de dichos tiempos en la práctica tienen que realizarse en habitaciones vacías.

El volumen de la habitación, su forma, la cantidad de material absorbente y el carácter difuso también determinarán el tiempo de reverberación. La cantidad total de absorción sonora en una habitación y, por consiguiente, el TR es de vital importancia para la inteligibilidad, la privacidad y los niveles de sonido, entre otras cosas.

## VII. CRITERIOS DE EVALUACIÓN DEL RUIDO DE FONDO EN UN RECINTO

Existen diferentes métodos que nos permiten evaluar el confort acústico en actividades realizadas en interiores, en las que se encuentra presente un ruido de fondo más o menos estable. Algunos de los más conocidos son:

- Curvas NC (*Noise Criteria*),
- Curvas de valoración NR (*Noise Rating*),
- Curvas PNC (*Preferred Noise Criteria*).

Todos ellos se encuentran caracterizados por una representación gráfica de curvas, o familia de curvas, que establece los niveles de presión sonora en decibelios, para cada frecuencia central en bandas de octava<sup>9</sup>, que se recomienda no superar para conseguir una situación de confort acústico.

La evaluación objetiva del grado de molestia que un determinado ruido ambiental provoca en un oyente se realiza por comparación de los niveles de ruido existentes en un recinto, en cada banda de octava comprendida entre 63Hz y 8 KHz, con un conjunto de curvas de referencia denominadas NC (*Noise Criteria*).

Las curvas NC son, además, utilizadas de forma generalizada para establecer los niveles de ruido máximos recomendables para diferentes tipos de recintos en función de su aplicación (oficinas, salas de conferencias, teatros, salas de conciertos, etc.) Se dice que un recinto cumple una determinada especificación NC (por ejemplo: NC-20) cuando los niveles de ruido de fondo, medidos en cada una de dichas bandas de octava, están por debajo de la curva NC correspondiente.

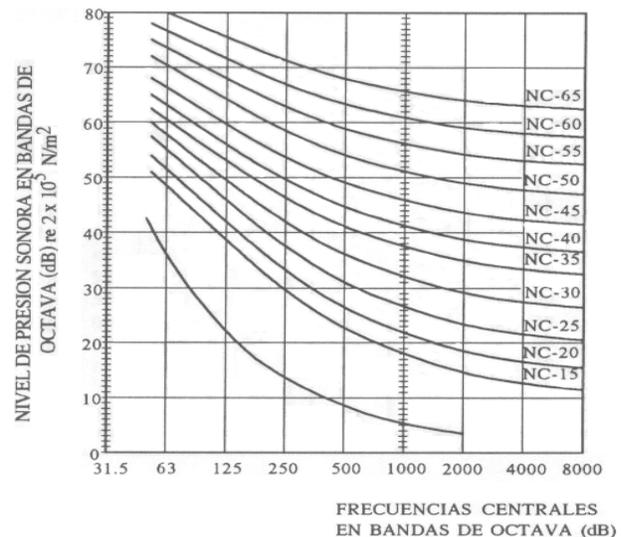


Figura 7.1. Curvas NC (*Noise Criteria*)<sup>10</sup>

Según se observa, las curvas NC siguen de forma aproximada la evolución de la sensibilidad del oído en función de la frecuencia. Ello significa que, para una determinada curva NC, los Niveles de Presión Sonora (NPS) máximos permitidos a bajas frecuencias (sonidos graves) son siempre más elevados que los correspondientes a frecuencias altas (sonidos agudos), ya que el oído es menos sensible a medida que la frecuencias considerada es menor.

<sup>9</sup> La banda de octava es un grupo de frecuencias entorno a una frecuencia central que cumplen la siguiente relación:  $f_2 = 2f_1$ , y además  $f_c = \sqrt{f_1 f_2}$ . Las frecuencias centrales ( $f_c$ ) toman valores normalizados según la Norma anteriormente citada. Se deduce fácilmente que:  $f_1 = \frac{f_c}{\sqrt{2}}$ , y también

$$f_2 = \sqrt{2} f_c$$

<sup>10</sup> Acoustic Design and Noise Control. Michael Rettinger. Consultant Acoustic. 1973. Chemical Publishing Co., Inc. New York, N. Y.

TIPOS DE RECINTOS	CURVA NC RECOMENDADA
Estudios de grabación	15
Salas de conciertos y teatros	15-25
Hoteles (habitaciones individuales)	20-30
Salas de conferencias / Aulas	20-30
Despachos de oficinas / Bibliotecas	30-35
Hoteles (vestibulos y pasillos)	35-40
Restaurantes	35-40
Salas de ordenadores	35-45
Cafeterías	40-45
Polideportivos	40-50
Talleres (maquinaria ligera)	45-55
Talleres (maquinaria pesada)	50-65

Tabla 7.1. Curvas NC para diferentes tipos de recintos<sup>10</sup>.

En la siguiente tabla se muestran los valores recomendados de índices de ruido de fondo para diferentes tipos de recintos, donde se ha subrayado los rangos y valores de las áreas de interés.

Tipo de recinto	Índices de ruido			Nivel de ruido
	NR	NC	PNC	dB
Estudios de radio, televisión	30	20	30	30
Salas de música, auditorios	25	25	20	35
Teatros	25	30	20	35
Hospitales	20	35	40	40
Iglesias	35	30	35	40
Viviendas, hoteles	45	35	40	45
Salas lectura, aulas	30	35	40	40
Salas de conferencia pequeñas	35	30	40	45
Oficinas, restaurantes	45	45	45	45
Juzgados	40	35	40	40
Oficinas medias	50	50	50	45
Bibliotecas	40	35	40	40
Bancos, tiendas, oficinas grandes	55	45	45	50
Gimnasios, salas deporte y piscinas	50	45	45	55
Cines	35	35	35	35

Tabla 7.2: Valores máximos de los índices de ruido permitidos.

## VIII. GEOMETRÍA Y DIMENSIONES DE LAS SALAS DE LOCUCIÓN

Partiendo de que la existencia de modos propios es inevitable, conviene elegir una relación entre las dimensiones de la sala tal que la distribución de los mismos en el eje frecuencial sea lo más uniforme posible. De esta manera se consigue evitar concentraciones de energía en bandas estrechas de frecuencias o, lo que es lo mismo, coloraciones intensas del sonido.

A continuación se muestra un ejemplo gráfico de la distribución de los modos propios más significativos de dos salas, la primera con una relación óptima de sus dimensiones (2.5 x 3.75 x 6.25 m), y la segunda, de forma cúbica (4 x 4 x 4 m)

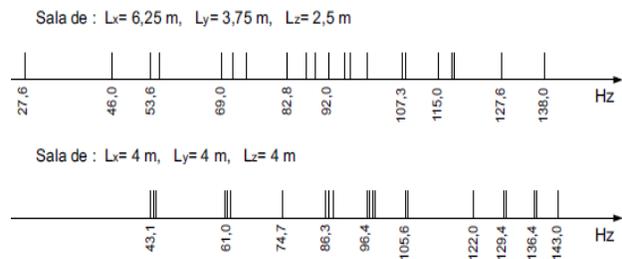


Figura 8.1. Distribución de las frecuencias propias en el eje frecuencial para: a) una sala rectangular de proporciones óptimas; b) una sala cúbica<sup>11</sup>.

En el primer caso, la distribución es uniforme, mientras que en el segundo existe una concentración de nodos propios que provocará, la aparición de coloraciones<sup>12</sup>. Por otra parte la densidad de los modos propios aumenta con la frecuencia.

Esto significa que a partir de una cierta frecuencia, el concepto de coloración de sonido deja de tener sentido, ya que una gran densidad de modos propios es equivalente a la ausencia de éstos, por el hecho de que dejan de existir concentraciones discretas de energía.

Se tienen muchos criterios sobre las proporciones de las salas para estudios de radio, reproducción de música o de grabación, siendo los más conocidos los siguientes:



Tabla 8.1. Proporciones de las dimensiones de un recinto.

Las proporciones normalizadas, calculadas para volumen igual, no son tan diferentes de las originales a simple vista. Por esta razón, las salas construidas según uno u otro criterio, no son significativamente diferentes a su oído, lo cual no es razón que permita decir que uno es mucho mejor que otro.

En la figura siguiente se representa una zona sombreada indicativa del conjunto de relaciones recomendadas entre la longitud y la anchura de una sala rectangular (suponiendo una altura normalizada de valor 1), con objeto de obtener una distribución lo más uniforme posible de sus frecuencias propias.

Esta figura recibe el nombre de área de Bolt o ameba de Bolt y muestra gráficamente el rango de las mejores proporciones.

<sup>11</sup> Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Antoni Carrión Isbert. Ediciones UPC. 1998. Primera Edición. Cataluña, España.

<sup>12</sup> Coloraciones es la concentración de energía alrededor de las diversas frecuencias propias que normalmente se pone en manifiesto en espacios de dimensiones relativamente reducidas, por ejemplo: los estudios de grabación.

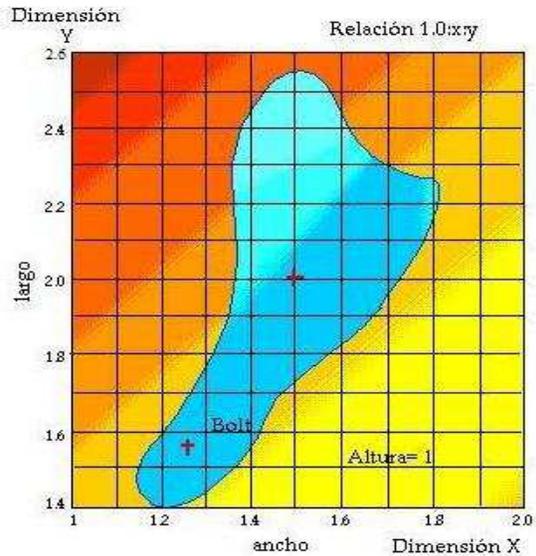


Figura 8.2. Diagrama de Bolt<sup>13</sup>.

Al diseñar una sala de música con las dimensiones óptimas, se debe tener presente la buena reproducción de frecuencias bajas, deberíamos entonces enfocarnos hacia la obtención de un período de reverberación satisfactorio en el contorno. Desgraciadamente, para permitir el alojamiento de una amplia variedad de programas, la reverberación debe ser variable; ya que la música jazz y música rock necesitan sonar en un ambiente "muerto", no así sucede con la ópera cuya reproducción será reforzada por un tiempo de reverberación ligeramente más largo (aproximadamente 10%) lo que da origen a los llamados ambientes "vivos".

### IX. INTELIGIBILIDAD DE LA PALABRA

La Inteligibilidad de la Palabra es otro criterio importante para determinar si una sala destinada para transmitir la voz hablada tiene buena acústica. Los sonidos correspondientes a las vocales no son tan críticos en lo que respecta a la inteligibilidad de la palabra como los de las consonantes. Es desafortunado que las consonantes sean tan débiles como para ser enmascaradas fácilmente por el ruido.

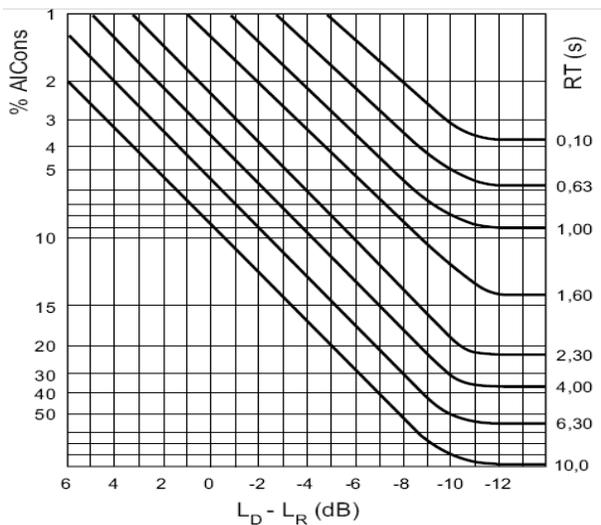


Figura 9.1: Obtención del %ALCons a partir de TR y de  $L_D-L_R$ <sup>11</sup>

La inteligibilidad de la palabra puede determinarse a partir del tiempo de reverberación (TR) y de la diferencia entre los niveles de presión sonora de campo directo  $L_D$  y de campo reverberante  $L_R$  en dicho punto. Para el cálculo de  $L_D-L_R$ , la fórmula a emplear es la siguiente:

$$L_D - L_R = 10 \log \left( \frac{QR}{r^2} \right) - 17 \text{ [dB]} \quad (13)$$

Donde:

Log: logaritmo en base 10

Q: factor de directividad de la fuente sonora en la dirección considerada (Q=2 en el caso de la voz humana, considerando la dirección frontal del orador)

R: Constante de la sala (en  $m^2$ )

r: Distancia del punto considerado a la fuente sonora (en m)

Como el TR y el R dependen del coeficiente de absorción  $\bar{\alpha}$ , su conocimiento, junto con el del volumen  $V$  y el de la superficie total  $S$ , permiten calcular los valores de TR y de  $L_D-L_R$ . A nivel práctico, se suele elegir para el cálculo el valor de  $\bar{\alpha}$  correspondiente a la banda de 2 KHz, por ser la de máxima contribución a la inteligibilidad de la palabra.

#### A. Constante de las Salas (R)

Esencialmente, R es un valor modificado de la absorción total en la sala:

$$R = \frac{S\bar{\alpha}}{1-\bar{\alpha}} \text{ [m}^2\text{]} \quad (14)$$

Una pequeña constante de la sala indica una sala muy viva, y una gran constante de la sala describe una sala que tiene un alto grado de absorción. Se mencionó que la constante de la sala se relaciona a la absorción total de un espacio adjunto, pero que es diferente de la absorción total representada por  $S\alpha$ . Los valores de la constante de la habitación R en función del volumen y para habitaciones de formas normales se dan en la siguiente figura.

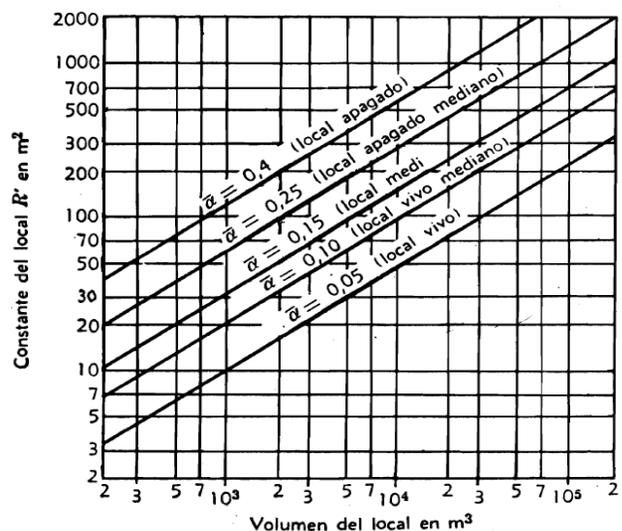


Figura 9.2. Valor de la constante de la habitación R en función del volumen de la habitación de proporciones aproximadas a 1:1,5:2. El parámetro es el coeficiente medio de absorción. Las calificaciones subjetivas "apagado", "vivo", etc., son a criterio del autor y no necesariamente de uso común<sup>10</sup>

<sup>13</sup> Davis, D. y Davis, C.: " Sound System Engineering", Howard W. Sams & Co, Macmillan, inc, 1987. p 218.

### B. Distancia Crítica ( $D_c$ )

La distancia crítica es la distancia del centro acústico de una fuente sonora, a lo largo de un eje especificado, a un punto en que las densidades de los campos sonoros directo y reverberante son iguales. La distancia crítica es afectada por las características direccionales de la fuente sonora.

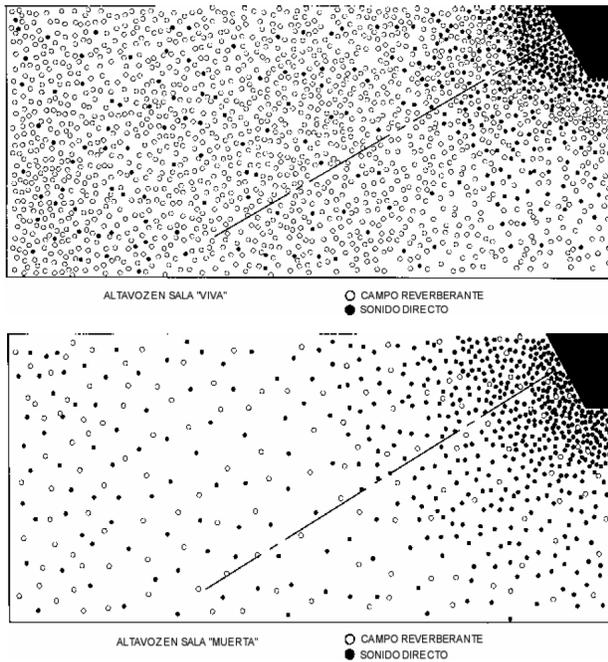


Figura 9.3. a) Campo reverberante en sala viva<sup>11</sup>. b) Campo reverberante en sala muerta<sup>11</sup>.

Para terminar el diseño acústico de las salas de locución, se hará mención de otro factor alternativo para cuantificar el grado de inteligibilidad de la palabra. Dicho parámetro, conceptualmente más complejo, se denomina STI (*Speech Transmission Index*) y su valor oscila entre 0 (inteligibilidad nula) y 1 (inteligibilidad total). Así mismo, existe una versión simplificada del STI denominada RASTI (*Rapid Speech Transmission Index*). Habitualmente, el RASTI es el parámetro medido en los recintos, debido a su rapidez de cálculo en relación con el STI.

Se ha podido demostrar que existe una muy buena correlación entre los valores de %ALCons y de STI/RASTI. Dicha correspondencia se muestra en la figura 9.3 y en la tabla 9.1. En esta última aparece también la valoración subjetiva del grado de inteligibilidad.

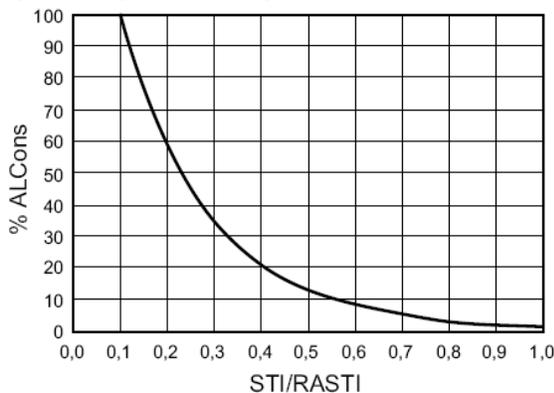


Figura 9.3. Correspondencia entre STI / RASTI y %ALCons<sup>11</sup>

%ALCons	STI / RASTI	VALORACIÓN SUBJETIVA
1,4% - 0%	0,88 - 1	Excelente
4,8% - 1,6%	0,66 - 0,86	Buena
11,4% - 5,3%	0,50 - 0,64	Aceptable
24,2% - 12%	0,36 - 0,49	Pobre
46,5% - 27%	0,24 - 0,34	Mala

Tabla 9.1. Relación entre %ALCons, STI / RASTI y la valoración subjetiva del grado de inteligibilidad<sup>11</sup>.

### X. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El acondicionamiento acústico pretende mejorar la acústica del recinto, controlando parámetros como la naturaleza de las reflexiones sonoras, resonancias modales, TR, ruido de fondo, etc.
- Los modos propios de resonancia tienen una mayor incidencia cuanto más pequeña es la sala en consideración, como locutorios y salas de control.
- Es imprescindible para la construcción de un estudio, contar con materiales que absorban y minimicen la reflexión del sonido, además de aislarlo. Es muy importante adecuar las salas para obtener las condiciones sonoras óptimas, con el fin de evitar las reverberaciones y las resonancias del sonido.
- Tratar de aislar ruidos y vibraciones desde exteriores; desde la calle, aviones, tráfico, sirenas, etc., mediante el uso de paredes, tumbados, puertas y ventanas preparadas para el efecto.
- Tratar de eliminar ruidos provenientes desde el interior: baños, tacos de zapatos, arranques de fluorescentes, etc.
- Determinar el aislamiento acústico de los Estudios y demás dependencias interiores, conforme a las recomendaciones para cada caso, con el fin de garantizar niveles de ruido de fondo, acordes con la actividad a realizar en cada una de ellas.
- Determinar el acondicionamiento acústico de los locutorios y sala de control, eligiendo recubrimientos interiores y dimensiones adecuadas a los recintos, con la finalidad de que estas salas sean aptas para la radiodifusión, cumpliendo con algunas recomendaciones reunidas para tiempo de reverberación, distribución de frecuencias modales e inteligibilidad de la palabra.
- Otro detalle a tener en cuenta es la colocación de las ventanas que separan los estudios. Para evitar que el sonido rebote, éstas se instalan en ángulos y son siempre dobles con diversos grosores de vidrio. En definitiva, una buena acústica evitará algo tan poco deseado en la producción radiofónica como son las reverberaciones y las resonancias del sonido.

### XI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

#### Libros

- [1] Carrión Isbert Antoni. "Diseño acústico de espacios arquitectónicos". EDICIONES UPC. 1998. Primera Edición. Cataluña. España.
- [2] Beranek Leo. "Acústica". Segunda Edición. EDITORIAL HISPANO. Versión castellana por el Ing. Adolfo Di Marco.

[3] Rettinger Michael. "Acoustic Design and Noise Control". Consultant Acoustic. 1973. CHEMICAL PUBLISHING CO., Inc. New York.

*Libros y revistas digitales*

[4] Lacey Ediciones. "Acústica. Modos de Resonancia". PDF.

[5] J.A.S.B. "Ondas y acústica". Sistemas y medios técnicos de sonido. Ciclo superior de sonido. I.E.S. "Ramón y Cajal". Huesca Septiembre 2005. doc

[6] Davis, D. y Davis, C.: "Sound System Engineering", Howard W. Sams & Co, Macmillan, inc, 1987. p 218. PDF

[7] Navarro Juan Carlos. "Diseño y Evaluación de un Proyecto de una Estación de Radio". Universidad Austral De Chile. 2006. PDF

[8] Saposhkov, M. A. "Electroacústica". PDF

[9] Pueo Ortega Basilio. "Electroacústica". Pearson Educación. PDF

[10] Florido Díaz Francisco Javier. "Confort acústico: Examen de diferentes Metodologías de evaluación del riesgo". Málaga- España. PDF

[11] Sommerhoff Jorge. "Apuntes asignatura Acústica de Locales". Instituto de Acústica. Universidad Austral de Chile. doc

[12] Recuero Manuel. "Acústica de Estudios para Grabación Sonora". 1993. Ediciones del IORTVE. PDF

*Direcciones electrónicas*

[13] [http://acusticaweb.com/index.php?option=com\\_content&task=view&id=98&Itemid=79](http://acusticaweb.com/index.php?option=com_content&task=view&id=98&Itemid=79)

## XII. BIOGRAFÍAS



**Luis Enrique Mora**, Nació el 4 de Octubre de 1981 en Julio Andrade, Tulcán, Prov. del Carchi, Ecuador. En el año de 1999 obtuvo su Título de Bachiller Técnico en Electrónica en el Instituto Técnico Superior "Vicente Fierro", siendo el Mejor Egresado de su promoción tanto de la Especialidad de Electrónica como de la Institución. Los estudios superiores los realizó en la Escuela Politécnica Nacional obteniendo el título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones en Septiembre del 2010.

Prestó sus servicios en la Escuela Politécnica Nacional como Asistente Técnico Administrativo en el Subdecanato de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Actualmente se desempeña como Ingeniero Preventa e Ingeniero de Proyectos en Unión Eléctrica, encargado del desarrollo e integración de soluciones de Seguridad Electrónica, Telecomunicaciones y Networking.

Áreas de interés: Ethernet industrial, informática y redes, fibra óptica, seguridad electrónica y videovigilancia.

E-mail: [lmora@uniongr.com](mailto:lmora@uniongr.com)  
[luigimora@hotmail.com](mailto:luigimora@hotmail.com)

**Mario Cevallos Villacreses**, Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones de la Escuela Politécnica Nacional. Profesor Principal a tiempo completo, cursos de Post-Grado en Philips International Institute, Eindhoven Holanda 1968-1969. Programa de Investigación en Técnicas de Microondas en Eindhoven Technical University en Eindhoven Holanda 1974-1975. Director y Colaborador de varios proyectos de titulación de estudios superior a nivel nacional e internacional.

Áreas de especialidad: Teoría Electromagnética, Tecnologías de Alta Frecuencia, Antenas, Micro ondas, Propagación, Compatibilidad Electromagnética.

E-mail: [mario.cevallos@epn.edu.ec](mailto:mario.cevallos@epn.edu.ec)