


PROYECTO:

"Diseño acústico de una sala de conferencias"

Acústica de Recintos




PROPÓSITO:

En el diseño de una sala de conferencias, el objetivo es:

- Conseguir **condiciones de confort acústico adecuadas** para lograr una **buena inteligibilidad de la palabra**.

Se recomienda lograr que el porcentaje de palabras correctamente interpretadas por el oyente sea **mayor que el 90%**.

Acústica de Recintos




Confort acústico adecuado:

Es necesario atender dos aspectos fundamentales:

- El aislamiento acústico que brinde la envolvente del recinto, para protegerlo del ruido exterior y evitar que interfiera con las condiciones de audición exigidas por la actividad a desarrollar en él (tema no incluido en este proyecto).
- El acondicionamiento acústico interior, adecuando la sala al uso al que estará destinada (dimensiones, forma, materiales, sistema de refuerzo sonoro, etc.)


Acústica de Recintos



DATOS de PROYECTO:

- Dimensiones del local en planta (largo y ancho)
- Recinto destinado "a la palabra"
- Porcentaje de palabras correctamente interpretadas por el oyente sea **mayor que el 90%**


Acústica de Recintos



Etapla 1:
Determinación del volumen del recinto

Etapla 2:
Diseño de tratamiento acústico para la sala

Acústica de Recintos




Etapla 1: Determinar el volumen del recinto, en m³

Debemos minimizar la formación de ondas estacionarias en el recinto:

1. Elección de la altura para que la sala cumpla con el **Criterio de Densidad de Modos.**
2. Si la altura que resulte de aplicar este criterio no es adecuada para el proyecto, se deberá elegir otra y justificar la elección.
3. Recordar que se puede recurrir a otras soluciones técnicas que contribuyan a evitar las ondas estacionarias:
 - Superficies no paralelas
 - Colocación de difusores

Acústica de Recintos



Criterio de Bonello o de “Densidad de Modos”

- Se calculan todos los modos hasta la banda de 200 Hz.
- Se divide el espectro en tercios de octava graficando la cantidad de modos por cada tercio (la “densidad de modos”). El análisis por tercios satisface a la discriminación de frecuencias del oído.

f ₁	f ₀	f ₂
45	50	56
56	63	71
71	80	90
89	100	112
111	125	140
143	160	180
178	200	224

“Acústica de Recintos”

FACULTAD DE INGENIERIA
 Universidad de Buenos Aires

Criterio de Bonello o de “Densidad de Modos”

Criterio:

- La curva de densidad de modos debe ser monótona creciente, o a lo sumo tener la misma cantidad de modos en dos tercios sucesivos.
- No deben existir modos dobles y, si los hubiera, se los tolera en tercios de octava con densidad de modos mayor que cinco.

8

FACULTAD DE INGENIERIA
 Universidad de Buenos Aires

CURSO: ACÚSTICA (66.67)

IACAC
 Instituto Argentino de Acústica y Control Acústico

Reflexión y ondas estacionarias

Cálculo de frecuencias de modos de resonancia o modos propios:

$$f_m = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{p}{L}\right)^2 + \left(\frac{q}{W}\right)^2 + \left(\frac{r}{H}\right)^2}$$

Siendo:

f_m : la frecuencia del modo de resonancia

c : la velocidad del sonido, en m/s

p, q, r : números enteros que denotan el número de medias longitudes de onda en las 3 direcciones (0, 1, 2,...)

L, W, H : las dimensiones del recinto, en m

Según el valor que tomen p, q y r :

- Si uno es distinto de cero, son modos axiales,
- Si dos son distintos de cero, son modos tangenciales,
- Si los tres son distintos de cero, son modos oblicuos.

9

FACULTAD DE INGENIERIA
 Universidad de Buenos Aires

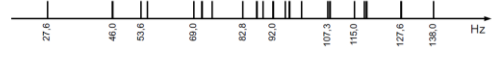
CURSO: ACÚSTICA (66.67)

IACAC
 Instituto Argentino de Acústica y Control Acústico

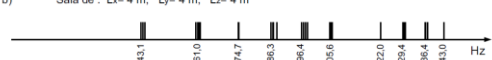
Criterio de Bonello o de "Densidad de Modos"

Ejemplos de obtención de modos:

a) Sala de : $L_x=6,25\text{ m}$, $L_y=3,75\text{ m}$, $L_z=2,5\text{ m}$



b) Sala de : $L_x=4\text{ m}$, $L_y=4\text{ m}$, $L_z=4\text{ m}$



Distribución de las frecuencias propias para:

- a) Una sala rectangular de proporciones óptimas (modos más distribuidos)
- b) Una sala cúbica (notar la agrupación de modos)

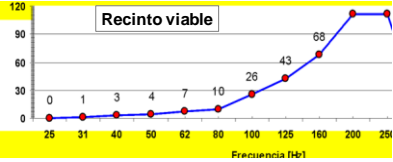
Acústica de Recintos

FACULTAD DE INGENIERIA
Universidad de Buenos Aires

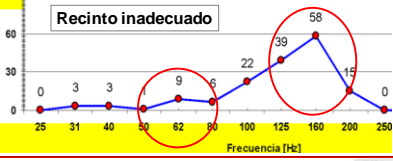
Criterio de Bonello o de "Densidad de Modos"

Ejemplos de gráficos de densidad de modos:

Recinto viable



Recinto inadecuado

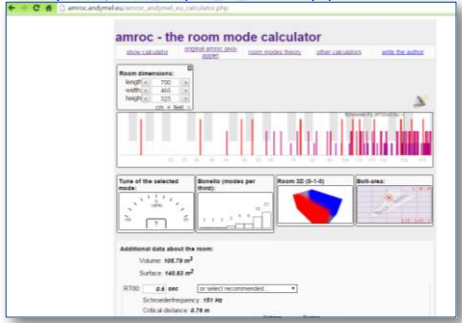


Acústica de Recintos

FACULTAD DE INGENIERIA
Universidad de Buenos Aires

Criterio de Bonello o de "Densidad de Modos"

Ejemplo de software para cálculo de modos: "AMROC"
http://amroc.andymel.eu/amroc_andymel_eu_calculator.php



Acústica de Recintos

FACULTAD DE INGENIERIA
Universidad de Buenos Aires

4

Criterio de Bonello o de "Densidad de Modos"

Ejemplo de software para cálculo de modos: "AMROC"

http://amroc.andymel.eu/amroc_andymel_eu_calculator.php

1) Anotamos las dimensiones del recinto, en cm (debe seleccionarse la unidad correctamente al pie del menú)

Criterio de Bonello o de "Densidad de Modos"

Ejemplo de software para cálculo de modos: "AMROC"

http://amroc.andymel.eu/amroc_andymel_eu_calculator.php

2) Del menú desplegable, seleccionamos la norma correspondiente para tener un valor de TR adecuado:

Criterio de Bonello o de "Densidad de Modos"

Ejemplo de software para cálculo de modos: "AMROC"

http://amroc.andymel.eu/amroc_andymel_eu_calculator.php

3) Esto permite que el programa calcule la frecuencia de Schroeder:

Criterio de Bonello o de "Densidad de Modos"


Ejemplo de software para cálculo de modos: "AMROC"
http://amroc.andymel.eu/amroc_andymel_eu_calculator.php

6) El usuario debe analizar si se cumplen las pautas del "Criterio de modos de Bonello":

- La curva de densidad de modos debe ser monótonamente creciente, o a lo sumo tener la misma cantidad de modos en dos tercios sucesivos.
- No deben existir modos dobles y, si los hubiera, se los tolera en tercios de octava con densidad de modos mayor que cinco.

1	12.25 Hz	G-1	1-0-0	ax
2	24.5 Hz	G0	2-0-0	ax
3	24.5 Hz	G0	0-1-0	ax
4	27.39 Hz	A0	1-1-0	tan
5	34.65 Hz	C1#	2-1-0	tan
6	36.75 Hz	D1	3-0-0	ax
7	44.17 Hz	F1	3-1-0	tan
8	49 Hz	G1	0-2-0	ax
9	49 Hz	G1	4-0-0	ax
10	49 Hz	G1	0-0-1	ax
11	50.51 Hz	G1#	1-0-1	tan
12	50.51 Hz	G1#	1-2-0	tan
13	54.78 Hz	A1	4-1-0	tan
14	54.78 Hz	A1	2-2-0	tan
15	54.78 Hz	A1	2-0-1	tan
16	54.78 Hz	A1	0-1-1	tan
17	56.14 Hz	A1	1-1-1	obl
18	60.01 Hz	B1	2-1-1	obl
19	61.25 Hz	B1	3-2-0	tan
20	61.25 Hz	B1	5-0-0	ax


Acústica de Recintos



Etapa 1: Informe de resultados

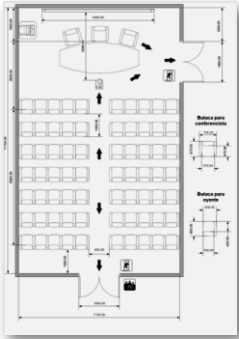
- Cálculo y verificación de los modos presentes (gráfico de distribución de modos por tercios de octava).
- Altura elegida del recinto. Justificación.
- Capacidad de la sala (# de asientos)
- Esquema de planta con indicación de ubicación de:
 - butacas para el público
 - mesa y butacas para oradores
 - puertas principales y de emergencia

Acústica de Recintos




Etapa 1:

Ejemplo de esquema de planta: ubicación de butacas, oradores y puertas



Acústica de Recintos



Etapla 1:

Ejemplo de esquema de planta: ubicación de butacas, oradores y puertas

Etapla 2: Determinar los valores de TR del recinto, T_{60} en s

- Trabajar en 6 bandas de octavas (de 125 a 4000 Hz)
- Calcular los valores de **TR óptimos** para el recinto
- Calcular los **TR iniciales** correspondientes a la sala con ocupación parcial y con muebles
- Diseñar un **tratamiento acústico** con diversos fonoabsorbentes para ajustar los TR en cada octava (si fuese necesario)
- Calcular los **TR finales** (esperables por proyecto), correspondientes a la sala con muebles y con la cantidad de personas que se haya elegido.

Inicialmente, el área equivalente del **local SIN muebles y SIN público** será:

$$A_{LOCAL\ VACÍO} = A_L = A_{PISO} + A_{TECHO} + A_{PAREDES} + A_{PUERTAS} + A_{VENTANAS}$$
$$\Rightarrow A_L = [S_{pi} \cdot \alpha_{pi} + S_{re} \cdot \alpha_{re} + S_{pa} \cdot \alpha_{pa} + S_{pu} \cdot \alpha_{pu} + S_{ve} \cdot \alpha_{ve}]$$

Para tener en cuenta la **absorción sonora que aportan los muebles**, se deberán considerar:

- las butacas
- las mesas de oradores
- Las tarimas (si las hay)

El área equivalente del **local CON muebles y SIN público** (A_1), será:


$$A_1 = A_L + A_{MUEBLES} = A_L + A_{MESAS} + A_{BUTACAS\ VACÍAS}$$

$$A_1 = \sum_{i=1}^n S_{MAi} \cdot \alpha_{MAi} + \sum_{j=1}^n n_{MUj} \cdot A_{MUj}$$

$$A_1 = \overbrace{S_{pi} \cdot \alpha_{pi} + S_{te} \cdot \alpha_{te} + S_{pa} \cdot \alpha_{pa} + S_{pu} \cdot \alpha_{pu} + S_{ve} \cdot \alpha_{ve}}^{A_L} + N_{me} \cdot A_{me} + N_{bu} \cdot A_{bu}$$

$$\Rightarrow A_1 = A_L + N_{me} \cdot A_{me} + N_{bu} \cdot A_{bu}$$

"Acústica de Recintos"



Para tener en cuenta la **absorción sonora que aportan las personas**, se deberá elegir:

- El porcentaje de ocupación (cantidad de personas para los cálculos)


Como **criterio de diseño**, se deberá elegir la cantidad de personas que deberían estar presentes para lograr los valores de TR recomendados.

Un buen criterio puede ser elegir: $70 \leq p\% \leq 80$

Un valor típico podría ser: $p\% = 75\%$

***NOTA:** con este criterio se tiene en cuenta que la sala no suene "muy reverberante" aunque no esté completamente ocupada.*

"Acústica de Recintos"



El área equivalente del **local CON muebles y CON público** (A_2 , con p% de ocupación), será:


$$A_2 = A_L + A_{MESAS} + A_{BUTACAS\ VACÍAS} + A_{PERSONAS\ EN\ BUTACAS}$$

$$A_2 = A_L + N_{me} \cdot A_{me} + N_{bu\ vac} \cdot A_{bu} + N_{per} \cdot A_{per}$$

siendo:

$N_{bu\ vac}$: Número de butacas desocupadas
 A_{bu} : Absorción sonora equivalente de cada butaca vacía, en m²
 N_{per} : Número de personas sentadas en las butacas
 A_{per} : Absorción sonora equivalente de cada persona sentada en butaca, en m²

"Acústica de Recintos"



Ejemplos de valores de **área equivalente de absorción sonora de butacas:**

Hz	125	250	500	1000	2000	4000
BAJO	0.35	0.45	0.57	0.61	0.59	0.55
MEDIO	0.56	0.64	0.7	0.72	0.68	0.62
ALTO	0.72	0.79	0.83	0.84	0.83	0.79

Hz	125	250	500	1000	2000	4000
BAJO	0.56	0.68	0.79	0.83	0.86	0.86
MEDIO	0.68	0.75	0.82	0.85	0.86	0.86
ALTO	0.76	0.83	0.88	0.91	0.91	0.89

29

"Acústica de Recintos"

Ejemplos de valores de **área equivalente de absorción sonora de personas:**

Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Persona de pie sin abrigo	0.12	0.24	0.59	0.98	1.13	1.12
Persona de pie con abrigo	0.17	0.41	0.91	1.3	1.43	1.47

29

"Acústica de Recintos"

El área equivalente del **local CON muebles y CON público** (A_2 , con p% de ocupación), será:

$$A_2 = A_L + A_{MESAS} + A_{BUTACAS\ VACÍAS} + A_{PERSONAS\ EN\ BUTACAS}$$

$$A_2 = A_L + N_{me} \cdot A_{me} + N_{bu\ vac} \cdot A_{bu} + N_{per} \cdot A_{per}$$

El valor de TR_2 , de la sala ocupada un p%, será:

$$TR_2 = \frac{0.161 V}{A_2}$$

Si $TR_2 > TR_{ÓPTIMO} \Rightarrow$ **TRATAMIENTO FONOABSORBENTE**

"Acústica de Recintos"

Si $TR_2 > TR_{\text{ÓPTIMO}} \Rightarrow \text{TRATAMIENTO FONOABSORBENTE}$

Si con TR_2 , no se han logrado los TR óptimos (aun teniendo en cuenta una banda de tolerancia):

- será necesario agregar materiales fonoabsorbentes,
- tener en cuenta la factibilidad de realización del tratamiento propuesto: tipo de materiales seleccionados, ubicación de los mismos, funcionalidad del diseño, etc.

Agregado de materiales fonoabsorbentes:

Cuando se deban agregar materiales fonoabsorbentes, cubriendo algunas superficies interiores, estos materiales aportarán un área de absorción equivalente A_F :

$$A_F = \sum_{k=1}^n S_{Fk} \alpha_{Fk}$$

Siendo:

- α_{Fk} : coeficiente de absorción sonora del material k
- S_{Fk} : superficie del local cubierta con el material k

NOTA: Se deberá descontar la absorción de la superficie que se cubra con cada nuevo material, y que ya no estará expuesta al sonido.

El área equivalente del **local con muebles, con público y con tratamiento fonoabsorbente** será:

$$A_3 = A_{LOCAL} + A_{MESAS} + A_{BUTACAS \text{ VACÍAS}} + A_{PERSONAS \text{ EN BUTACAS}}$$

$$A_3 = \left[S_{pl} \cdot \alpha_{pl} + S_{le} \cdot \alpha_{le} + S_{pu} \cdot \alpha_{pu} + S_{pu} \cdot \alpha_{pu} + S_{ve} \cdot \alpha_{ve} + \sum_{k=1}^n S_{Fk} \alpha_{Fk} \right] +$$

$$+ [N_{me} \cdot A_{me}] + [N_{bu \text{ vacías}} \cdot A_{bu \text{ vacías}}] + [N_{per} \cdot A_{per}]$$

Expresión completa de A_{TOTAL}

Siendo S_L la superficie interior total del local:

$$S_L = S_{pl} + S_{le} + S_{pu} + S_{pu} + S_{ve} + \sum_{k=1}^n S_k$$

⇒ **Tiempo de reverberación final:**

$$TR_F = TR_3 = \frac{0,163 \cdot V}{A_3}$$

Recordar que:
Los cálculos deben realizarse para cada una de las 6 bandas de octavas (de 125 a 4000 Hz)

Código Técnico de la Edificación (CTE de España)
Recomendaciones de diseño acústico para aulas y salas de conferencias

En el caso de aulas y salas de conferencias de volumen hasta 350 m³, para mejorar la inteligibilidad de la palabra se recomienda:

1. Evitar los recintos cúbicos o con proporciones entre lados que sean números enteros.
2. Comenzar por aplicar materiales fonoabsorbentes en el techo

Código Técnico de la Edificación (CTE de España)
Recomendaciones de diseño acústico para aulas y salas de conferencias

3. Para la distribución de materiales fonoabsorbentes, se recomienda adoptar una de las siguientes opciones:

Opción 1:

- Disponer material absorbente acústico en toda la superficie del techo
- La pared frontal reflectante
- La pared trasera absorbente



Código Técnico de la Edificación (CTE de España)

Recomendaciones de diseño acústico para aulas y salas de conferencias

Opción 2:

- Disponer material absorbente acústico en el techo, cubriendo sólo la parte trasera, dejando una banda de 3 m de ancho de material reflectante en la parte delantera del techo.
- La pared frontal será reflectante.
- En la pared trasera se dispondrá un material absorbente acústico.

"Acústica de Recintos"

FACULTAD DE INGENIERIA
Universidad de Burgos, Spain

Etap 2: Cálculo de inteligibilidad dentro del recinto

El nivel de inteligibilidad *IL* depende de la pérdida de articulación de consonantes *AL* y está dado por:

$$\%IL = 100 - \%AL$$

Se debe lograr que el porcentaje de palabras correctamente interpretadas por el oyente sea **mayor que el 90%**

"Acústica de Recintos"

FACULTAD DE INGENIERIA
Universidad de Burgos, Spain

Cálculo de inteligibilidad dentro del recinto

Pérdida de articulación de consonantes (%ALCons):

$$\%AL = \frac{200 d^2 T_{60}^2}{Q V} \quad \text{para } d \leq 3,16 Dc$$

$$\%AL = 9 T_{60} \quad \text{para } d > 3,16 Dc$$

siendo:

- d* distancia entre el orador y el receptor, en m
- T*₆₀ tiempo de reverberación de la sala, en s (**para f = 1 kHz**)
- Q* factor de directividad de la fuente sonora
- V* volumen de la sala, en m³
- Dc* distancia crítica, en m

"Acústica de Recintos"

FACULTAD DE INGENIERIA
Universidad de Burgos, Spain

Cálculo de inteligibilidad dentro del recinto

Distancia crítica (Dc):

$$Dc = 0,06 \sqrt{\frac{Q \cdot V}{T_{60}(1-\bar{\alpha})}} = 0,15 \sqrt{Q \cdot R}$$


con : $\left(R = \frac{A}{1-\bar{\alpha}} = \frac{0,161 \cdot V}{T_{60}(1-\bar{\alpha})} \right)$

Siendo:

- R constante de la sala, en m²
- A área equivalente de absorción sonora de la sala, en m²
- $\bar{\alpha}$ coeficiente medio de absorción de la sala (adimensional, para f = 1 kHz)

Directividad de la fuente:
En este caso, la fuente sonora será una persona hablando.
Su directividad se puede considerar: Q = 2


Acústica de Recintos



Directividad de la voz humana

- En general, cualquier fuente sonora radia más potencia en unas direcciones que en otras y, por tanto, presenta una cierta directividad.
- Dicha directividad depende de la frecuencia y aumenta con la misma.
- La **directividad de la voz humana** está determinada por el sistema de fonación y por la forma de la cabeza, siendo la dirección frontal la de mayor directividad.

Acústica de Recintos



Directividad de la voz humana

- Si bien la directividad aumenta con la frecuencia, a los efectos prácticos se considera que **el factor de directividad de la voz humana en la dirección frontal es: Q = 2**

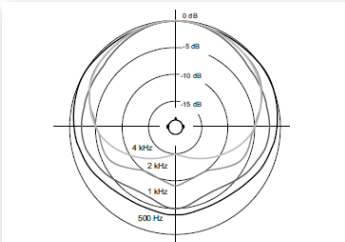



Fig. 1.24 Directividad de la voz humana en las bandas de octava comprendidas entre 500 Hz y 4 kHz (según Moreno y Pfitzschner)

Acústica de Recintos



14

Etapa 2: Informe de resultados

- Cálculo de TR óptimos según uso de Sala (125 a 4000 Hz)
- Porcentaje de ocupación de la sala elegido para el cálculo (p%)
- Cálculo de los TR considerando ocupación parcial (p%)
- Lista de materiales elegidos para lograr el TR requerido (tipo, cantidad, ubicación)
- Tiempos de reverberación esperables (125 a 4000 Hz)
- Cálculo de la inteligibilidad

"Acústica de Recintos"

