



**FACULTAD
DE INGENIERIA**

Universidad de Buenos Aires

ACÚSTICA - 66.67 / 86.57

Proyecto Acústico de Auditorio

Acondicionamiento acústico interior de una sala para conferencias

Alumnos:

DE AGUIRRE María del Rocío Padrón N° 98734
rocio.de.aguirre@gmail.com

LUNA Diego Padrón N° 75451
diegorluna@gmail.com

RIZZO Gonzalo Gabriel Padrón N° 96772
gonzalorizzo95@gmail.com

Docentes:

Ing. VECHIATTI Nilda.
Dr. Ing. GOMEZ Pablo

21 de Noviembre de 2019

Índice

Índice	I
1. Introducción	1
2. Aplicación del criterio de modos de Bonello	2
3. Análisis de resultados obtenidos	4
4. Etapa 2	10
5. Bibliografía	13

Índice de figuras

3.1. Densidad de nodos por banda de tercio de octava	4
3.2. Vista superior de la sala de conferencias	7
3.3. Vista 3D de la sala de conferencias	8
3.4. Boceto del plano de la Sala de Conferencias.	9
4.1. Gráfico de valores de TR_{optimo} y sus bandas de tolerancia LO TENGO QUE CAMBIAR	11

Índice de cuadros

2.0.1. Medidas de la sala	3
3.0.1. Datos obtenidos por el programa	5
3.0.2. Datos de disposición de butacas	8
4.0.1. Ecuaciones para cálculo de $TR_{\text{óptimos}}$	10
4.0.2. Tiempos de reverberación óptimos para uso de Palabra para la sala estudiada	10
4.0.3. Materiales y objetos para la construcción del recinto	12

1. Introducción

La finalidad es conseguir condiciones acústicas adecuadas para una buena inteligibilidad de la palabra en una sala de conferencias. Se debe lograr que el porcentaje de palabras correctamente interpretadas por el oyente sea mayor que el 90 %. Para ello 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.
- El acondicionamiento acústico interior, adecuando la sala al uso al que estará destinada (dimensiones, forma, materiales, etc.).

En este proyecto consideraremos que el aislamiento acústico adecuado ha sido calculado previamente. Por lo tanto, nos enfocaremos en el tratamiento acústico interior, dividiendo el trabajo en dos etapas:

- Etapa 1: Aplicación del criterio de modos de Bonello.
- Etapa 2: Aplicaciones de criterios de diseño de tratamiento acústico para control de la reverberación.

Contamos con los siguientes datos del proyecto:

$$L_{sala} = 13,9 \text{ m}$$

$$A_{sala} = 7,5 \text{ m}$$

2. Aplicación del criterio de modos de Bonello

Para calcular el volumen del recinto se debe determinar su altura. Esto puede hacerse aplicando el “criterio de modos” o criterio de Bonello. Partiendo de que la existencia de modos propios es inevitable, de acuerdo con este criterio conviene elegir una relación entre las dimensiones de la sala tal que la distribución de los mismos en el eje de frecuencias sea lo más uniforme posible. De esta manera se consigue evitar concentraciones de energía en bandas.

Para el cálculo de frecuencias de modos de resonancia o modos propios, utilizamos la ecuación (2.0.1):

$$f_m = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{p}{L}\right)^2 + \left(\frac{q}{W}\right)^2 + \left(\frac{r}{H}\right)^2} \quad (2.0.1)$$

En donde:

- f_m : Frecuencia del modo de resonancia
- c : La velocidad del sonido en $[m/s]$
- p, q y r : Números enteros $(0, 1, 2, \dots)$, que denotan el número de medias longitudes de onda en las 3 direcciones espaciales.
- L, W, H : Las dimensiones del recinto en $[m]$

De la ecuación (2.0.1) puede notarse que dada la dependencia de la velocidad del sonido con la temperatura, trae como consecuencia que los modos también dependan de la temperatura.

También mencionamos que dicha ecuación nos permite calcular todos los modos hasta la frecuencia de Schroederer. Para frecuencias superiores a esta, el espaciamiento entre nodos es considerablemente pequeño y los modos resultan en un continuo produciendo que los efectos de resonancia no sean apreciables.

Se divide el espectro en tercios de octava, pues el análisis según el criterio de Bonello, satisface a la discriminación de frecuencias del oído. Se calcula y grafica la cantidad de modos por cada tercio de octava.

A partir de esto, el criterio establece que:

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

Dado lo expuesto, pasamos a determinar la altura de la sala utilizando el software “**amroc**” recomendado por la cátedra. En el mismo, se mantuvieron los datos de largo y ancho del recinto constantes, y se fue modificando la altura del recinto hasta satisfacer las condiciones y obtener una altura coherente con el fin de la sala.

Se obtuvo como respuesta que la altura para la sala sea de:

$$H_{sala} = 3,4m \quad (2.0.2)$$

Altura de recinto	$H = 3,4m$
Largo de recinto	$L = 13,9m$
Ancho de recinto	$W = 7,5m$
Volumen de recinto	$V = 346,8m^3$
Superficie de recinto	$S = 102m^2$

Cuadro 2.0.1: Medidas de la sala

Los resultados de las dimensiones, se plasman en el cuadro [2.0.1]:

3. Análisis de resultados obtenidos

Pasamos a verificar que se cumple el criterio de Bonello, observando los resultados obtenidos por el programa “amroc”. En la figura [3.1], podemos ver que se observa con el requerimiento de que **la curva resultante debe ser monótona creciente** si consideramos a partir de la octava con frecuencia central de $31,5Hz$, el motivo para descartar las de menor frecuencia, en donde el criterio no se cumple, es que ocurre a frecuencias muy bajas del rango audible.

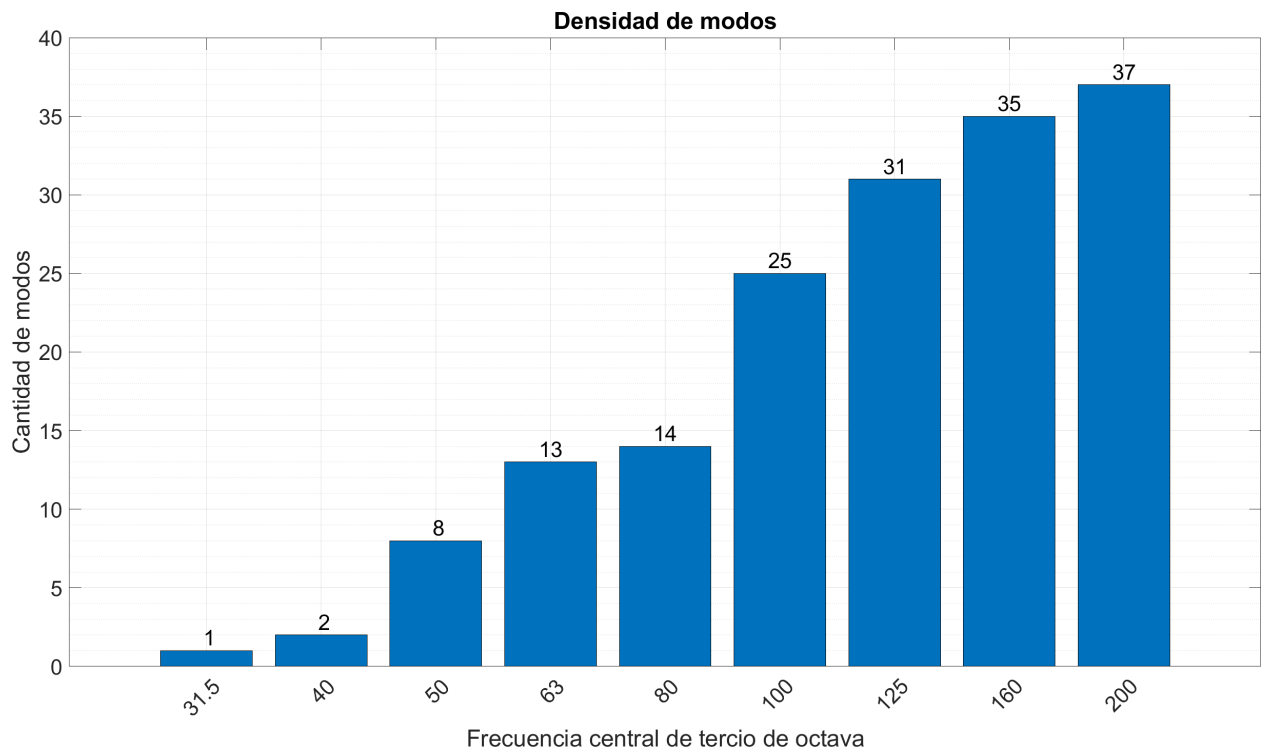


Figura 3.1: Densidad de nodos por banda de tercio de octava

N° It.	Frecuencia	Nota	p,q,r	Dirección	N° It.	Frecuencia	Nota	p,q,r	Dirección
1	12.34 Hz	G-1	1-0-0	ax	48	89.58 Hz	F2	6-0-1	tan
2	22.87 Hz	F0#	0-1-0	ax	49	91.47 Hz	F2#	0-4-0	ax
3	24.68 Hz	G0	2-0-0	ax	50	91.88 Hz	F2#	5-2-1	obl
4	25.98 Hz	G0#	1-1-0	tan	51	92.26 Hz	F2#	5-3-0	tan
5	33.64 Hz	C1	2-1-0	tan	52	92.3 Hz	F2#	1-4-0	tan
6	37.01 Hz	D1	3-0-0	ax	53	92.45 Hz	F2#	6-1-1	obl
7	43.51 Hz	F1	3-1-0	tan	54	92.85 Hz	F2#	3-3-1	obl
8	45.73 Hz	F1#	0-2-0	ax	55	94.74 Hz	F2#	2-4-0	tan
9	47.37 Hz	F1#	1-2-0	tan	56	97.73 Hz	G2	7-2-0	tan
10	49.35 Hz	G1	4-0-0	ax	57	98.42 Hz	G2	4-3-1	obl
11	50.44 Hz	G1#	0-0-1	ax	58	98.67 Hz	G2	3-4-0	tan
12	51.93 Hz	G1#	1-0-1	tan	59	98.71 Hz	G2	8-0-0	ax
13	51.97 Hz	G1#	2-2-0	tan	60	100.02 Hz	G2	7-0-1	tan
14	54.39 Hz	A1	4-1-0	tan	61	100.58 Hz	G2	6-2-1	obl
15	55.38 Hz	A1	0-1-1	tan	62	100.88 Hz	G2#	0-0-2	ax
16	56.15 Hz	A1	2-0-1	tan	63	100.93 Hz	G2#	6-3-0	tan
17	56.74 Hz	A1#	1-1-1	obl	64	101.32 Hz	G2#	8-1-0	tan
18	58.84 Hz	A1#	3-2-0	tan	65	101.63 Hz	G2#	1-0-2	tan
19	60.63 Hz	B1	2-1-1	obl	66	102.6 Hz	G2#	7-1-1	obl
20	61.69 Hz	B1	5-0-0	ax	67	103.44 Hz	G2#	0-1-2	tan
21	62.56 Hz	B1	3-0-1	tan	68	103.86 Hz	G2#	2-0-2	tan
22	65.79 Hz	C2	5-1-0	tan	69	103.93 Hz	G2#	4-4-0	tan
23	66.61 Hz	C2	3-1-1	obl	70	104.17 Hz	G2#	1-1-2	obl
24	67.28 Hz	C2	4-2-0	tan	71	104.45 Hz	G2#	0-4-1	tan
25	68.09 Hz	C2#	0-2-1	tan	72	105.15 Hz	G2#	5-3-1	obl
26	68.6 Hz	C2#	0-3-0	ax	73	105.18 Hz	G2#	1-4-1	obl
27	69.2 Hz	C2#	1-2-1	obl	74	106.34 Hz	G2#	2-1-2	obl
28	69.7 Hz	C2#	1-3-0	tan	75	107.33 Hz	A2	2-4-1	obl
29	70.57 Hz	C2#	4-0-1	tan	76	107.46 Hz	A2	3-0-2	tan
30	72.42 Hz	D2	2-2-1	obl	77	108.79 Hz	A2	8-2-0	tan
31	72.9 Hz	D2	2-3-0	tan	78	109.86 Hz	A2	3-1-2	obl
32	74.03 Hz	D2	6-0-0	axv	79	109.98 Hz	A2	7-2-1	obl
33	74.18 Hz	D2	4-1-1	obl	80	110.3 Hz	A2	7-3-0	tan
34	76.79 Hz	D2#	5-2-0	tan	81	110.33 Hz	A2	5-4-0	tan
35	77.48 Hz	D2#	6-1-0	tan	82	110.76 Hz	A2	0-2-2	tan
36	77.5 Hz	D2#	3-2-1	obl	83	110.82 Hz	A2	3-4-1	obl
37	77.95 Hz	D2#	3-3-0	tan	84	110.85 Hz	A2	8-0-1	tan
38	79.69 Hz	D2#	5-0-1	tan	85	111.04 Hz	A2	9-0-0	ax
39	82.9 Hz	E2	5-1-1	obl	86	111.45 Hz	A2	1-2-2	obl
40	84.09 Hz	E2	4-2-1	obl	87	112.31 Hz	A2	4-0-2	tan
41	84.51 Hz	E2	4-3-0	tan	88	112.83 Hz	A2	6-3-1	obl
42	85.15 Hz	F2	0-3-1	tan	89	113.18 Hz	A2	8-1-1	obl
43	86.04 Hz	F2	1-3-1	obl	90	113.37 Hz	A2#	9-1-0	tan
44	86.37 Hz	F2	7-0-0	ax	91	113.48 Hz	A2#	2-2-2	obl
45	87.02 Hz	F2	6-2-0	tan	92	114.33 Hz	A2#	0-5-0	ax
46	88.65 Hz	F2	2-3-1	obl	93	114.61 Hz	A2#	4-1-2	obl
47	89.34 Hz	F2	7-1-0	tan	94	115 Hz	A2#	1-5-0	tan

Cuadro 3.0.1: Datos obtenidos por el programa

Luego en el cuadro [3.0.1], verificamos el criterio el cuál **no deben existir modos dobles**, para las frecuencias obtenidas cuando la densidad de modos es menor a cinco.

Previamente, mencionamos que los modos son calculados hasta alcanzar la *frecuencia de Schroeder*. Dicha frecuencia se calcula según la ecuación (3.0.1).

Considerando, la norma **DIN 18041** pensada para discurso en sala, se establece un tiempo de reverberación $RT60 = 0,8s$ por lo tanto, según el software **amroc**, se obtiene que la frecuencia de Schroeder es:

$$f_s = 1893 \cdot \sqrt{\frac{TR}{V}} = 95Hz \quad (3.0.1)$$

La frecuencia de Schroeder está en la zona de transición de la respuesta en frecuencia de un recinto que separa la región de baja frecuencia, dominada por modos separados, y la región de frecuencias dominada por una gran superposición de modos, hasta percibirse como un continuo.

También se obtiene la distancia crítica mediante la ecuación (3.0.2):

$$D_{critica} = 0,057 \cdot \sqrt{\frac{Q \cdot V}{T_{60}}} = 1,2m \quad (3.0.2)$$

Cuyo valor necesitaremos para analizar los materiales que se incluirán en la sala para la *ETAPA 2*.

Finalmente, dados las medidas de la sala, se realizó un bosquejo de como esta será construida. Utilizando el software *Home By Me* se presenta en la figura [3.2] una vista superior de la sala a construir, y en la figura [3.3] una vista 3D.



Figura 3.2: Vista superior de la sala de conferencias

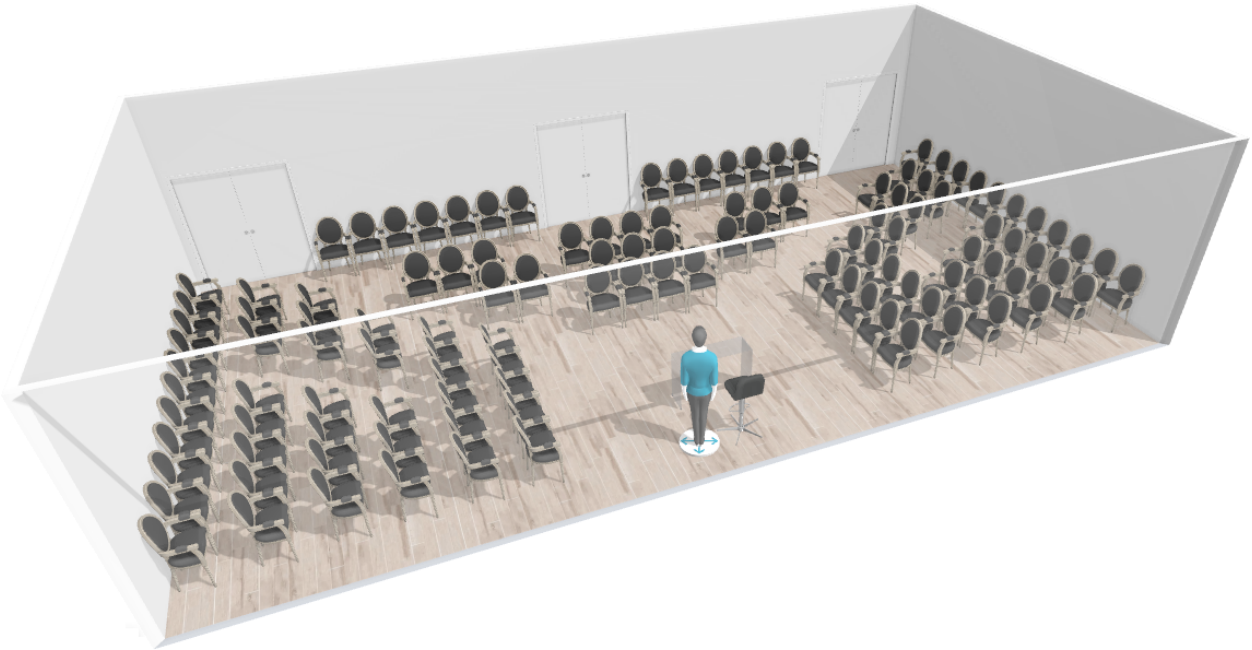


Figura 3.3: Vista 3D de la sala de conferencias

En el cuadro se presentan los datos de las distancias entre butacas:

Distancia horizontal entre butacas	0 cm
Distancia posterior entre butacas	45 cm
Cantidad de butacas	120

Cuadro 3.0.2: Datos de disposición de butacas

Para el diseño de la sala se consideró mantener equidistante al orador, respecto al público. Se presentan pasillos entre las filas de las butacas para el fácil acceso a los asientos, tres puertas dobles para reducir el tiempo de desalojo en caso de emergencia. Se consideraron filas de butacas contra las paredes con pasillos amplios en su frente, destinadas a posibles tareas periodísticas. La sala posee capacidad para 120 personas. Se adjunta (Figura [3.4]) a continuación el boceto de un plano estimado de la sala propuesta, este podrá modificarse en la implementación de fonoabsorbentes.

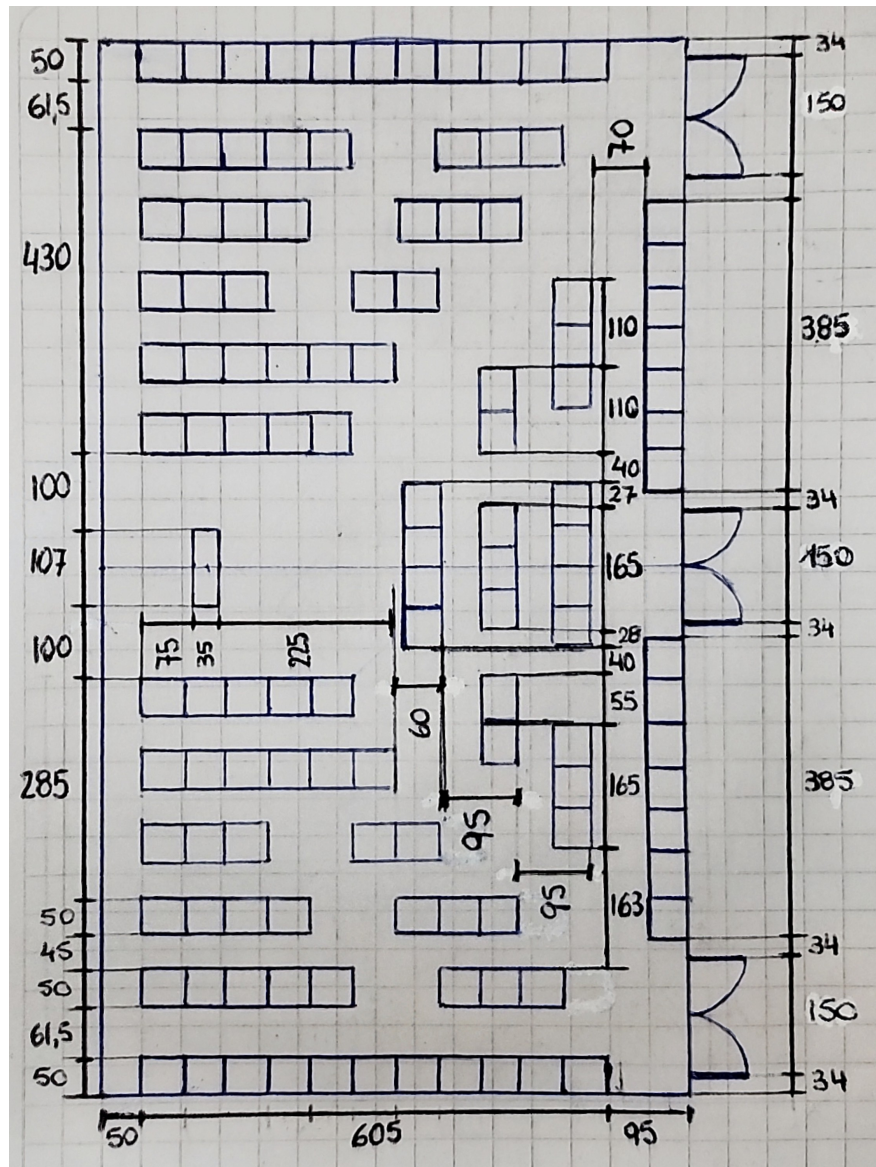


Figura 3.4: Boceto del plano de la Sala de Conferencias.

4. Etapa 2

Para esta etapa se busca calcular los tiempos de reverberación óptimos y diseñar el tratamiento acústico de la sala, teniendo en cuenta que la misma va a ser utilizada para palabra. Dicho tratamiento consta de la utilización de materiales fonoabsorbentes.

Para realizar este tratamiento, seguiremos los pasos indicados en la guía de informe del proyecto. En primer lugar, calculamos el tiempo de reverberación (TR) óptimo dado el volumen y el uso que se le dará a la sala (en nuestro caso, la palabra). Utilizando las curvas de “TR óptimos según el volumen y destino de uso” de *Knudsen*, y gracias a las fórmulas provistas por la cátedra que modelan dichas curvas, podemos calcular los tiempos de reverberación óptimos como se muestra en el cuadro 4.0.1:

Frecuencia [Hz]	$TR_{\text{óptimos}}$ [seg] (V en m^3)
125	$TR_{125} = 0,41 + 0,26 \cdot \log(V)$
250	$TR_{250} = 0,32 + 0,21 \cdot \log(V)$
>500	$TR_{500} = 0,28 + 0,18 \cdot \log(V)$

Cuadro 4.0.1: Ecuaciones para cálculo de $TR_{\text{óptimos}}$

Utilizando el dato del volumen de la sala que se tiene el cuadro 2.0.1, tenemos que $V = 346,8m^3$. Por lo tanto los $TR_{\text{óptimos}}$ obtenidos se presentan en el cuadro 4.0.2. Como criterio de diseño, debemos considerar una banda de tolerancia para los valores obtenidos. Consideramos prudente una banda de tolerancia del 20 %:

$TR_{\text{óptimos}}$ [seg]	$\pm Tolerancia$ [seg]
$TR_{125} = 1,0704$	0,2141
$TR_{250} = 0,8534$	0,1707
$TR_{500} = 0,7372$	0,1474

Cuadro 4.0.2: Tiempos de reverberación óptimos para uso de Palabra para la sala estudiada

En el gráfico 4.1 se muestran los valores obtenidos junto con sus bandas de tolerancia para frecuencias de octavas comprendidas entre 125 y 4000Hz.

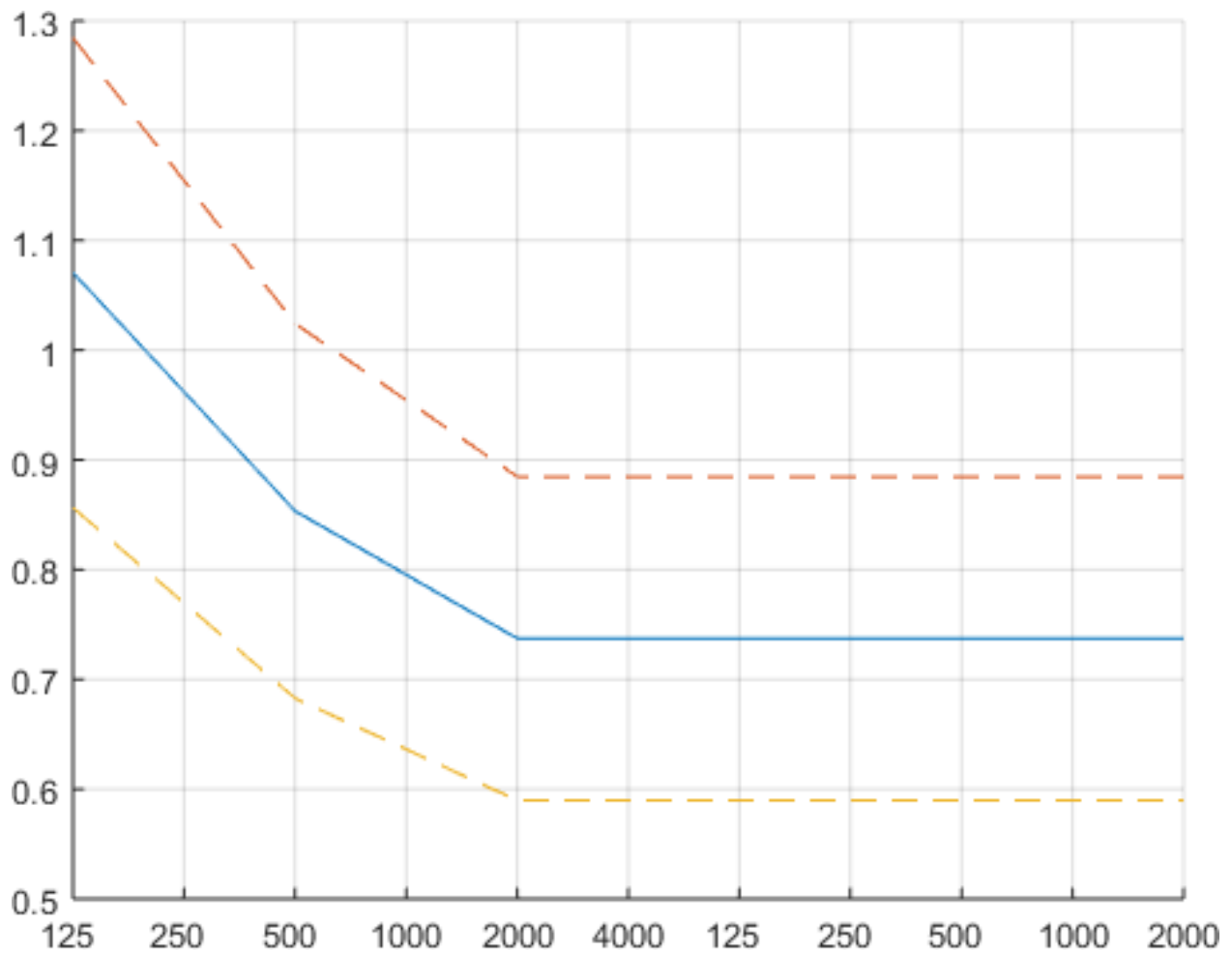


Figura 4.1: Gráfico de valores de TR_{optimo} y sus bandas de tolerancia LO TENGO QUE CAMBIAR

A continuación seleccionamos los materiales con que estarán construidas las superficies interiores del recinto (piso, techo, paredes, puertas) y el tipo y cantidad de muebles. Para esto, consideramos las recomendaciones de diseño acústico para aulas y salas de conferencias del “*Código Técnico de la Edificación*” (CTE España), donde se recomienda material absorbente acústico en toda la superficie del techo, una pared detrás del orador reflectante y las demás absorbentes. Los materiales para el recinto se muestran en el cuadro 4.0.3.

Para las paredes en donde el orador se enfrenta desde el escenario, la recomendación indica que deben ponerse materiales absorbentes, por lo tanto, se eligieron las paredes de papel pintado cuyos coeficientes de absorción sonora era más alta que los demás materiales. Lo mismo para el piso y techo se siguió el mismo criterio. Luego, como buscamos una pared reflejante detrás del orador, se optó por construir dicha pared con ladrillo pintado.

Se esperá cumplir con los tiempos de reverberación óptimos para una **ocupación del 75 %**.

Tipo	Material elegido	Sup./Cant.	Coeficiente α , Área equivalente [m^2]					
Frecuencia [Hz]:			125	250	500	1000	2000	4000
Piso	Baldosa enlozada	$13.9m^2$	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04
Paredes (frente orador)	Ladrillo Pintado	$118.66\ m^2$	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
Pared (detrás orador)	Ladrillo pintado	$47.26\ m^2$	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
Techo	Enlucido	$13.9m^2$	0.01	0.03	0.04	0.05	0.08	0.17
Puertas (1.5m x 2m)	Madera maciza	$3 \times 3m^2$	0.05	0.11	0.10	0.09	0.08	0.10
Butacas	Tapizado 2	(CANT)	0.12	0.20	0.28	0.30	0.31	0.37
Butaca	Madera	1	0.01	0.02	0.02	0.04	0.04	0.04

Cuadro 4.0.3: Materiales y objetos para la construcción del recinto

A continuación, procedemos con calcular el tiempo de reverberación inicial correspondiente a la sala con muebles y con el estado de ocupación definido, para las octavas con frecuencias centrales comprendidas entre 125 y 4000Hz.

5. Bibliografía

Referencias

- [1] *Noise and Vibration Control (1st Edition)*

Author: Beranek Leo

Publisher: Mc. Graw Hill Book Co

Copyright: © 1971, McGraw-Hill

ISBN 13: 978-0070048416

Website: <https://www.biblio.com/book/noise-vibration-control-beranek-leo-l/d/1139003044>

