



**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. Diseño y tratamiento acústico para control de reverberación	10
5. Bibliografía	20

Índice de figuras

3.1. Densidad de nodos por banda de tercio de octava	4
3.3. Vista 3D de la sala de conferencias	6
3.2. Vista superior de la sala de conferencias	7
3.4. Boceto del plano de la Sala de Conferencias.	9
4.1. Gráfico de valores de TR_{optimo} y sus bandas de tolerancia	11
4.2. Curvas de TR_{optimo} comparados con la sala ocupada al 75 %, con muebles y materiales	14
4.3. Curvas de TR_{optimo} comparados con la sala ocupada al 75 %, solo con materiales y muebles, y con los materiales fonoabsorbentes	16
4.4. Inteligibilidad de la palabra en función de la distancia del orador hasta el receptor más cercano	19

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
4.0.4. Valores de $TR_{\text{óptimo}}$ comparados con la sala ocupada al 75 %, con materiales y muebles	14
4.0.5. Material fonoabsorbente elegido	15
4.0.6. Valores de $TR_{\text{óptimo}}$ comparados con la sala ocupada al 75 %, solo con materiales y muebles, y con los materiales fonoabsorbentes	16
4.0.7. Contribución de la inteligibilidad de la palabra para cada banda de octava	17

1. Introducción

En el siguiente informe proponemos de forma teórica el tratamiento acústico de una sala de conferencias. Se tiene por objetivo conseguir las condiciones acústicas adecuadas para una buena inteligibilidad de la palabra en dicha sala. 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:

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

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

Siendo estos el largo y ancho de la sala, respectivamente.

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	$V = 354,45m^3$
Superficie de recinto	$S = 354,02m^2$

Cuadro 2.0.1: Medidas de la sala

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

En donde:

- $V = H \cdot L \cdot W = 3,4m \cdot 13,9m \cdot 7,5m = 354,45m^3$
- $S = H \cdot L \cdot 2 + H \cdot W \cdot 2 + W \cdot L \cdot 2 = 3,4m \cdot 13,9m \cdot 2 + 3,4m \cdot 7,5m \cdot 2 + 7,5m \cdot 13,9m \cdot 2 = 354,02m^2$

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.

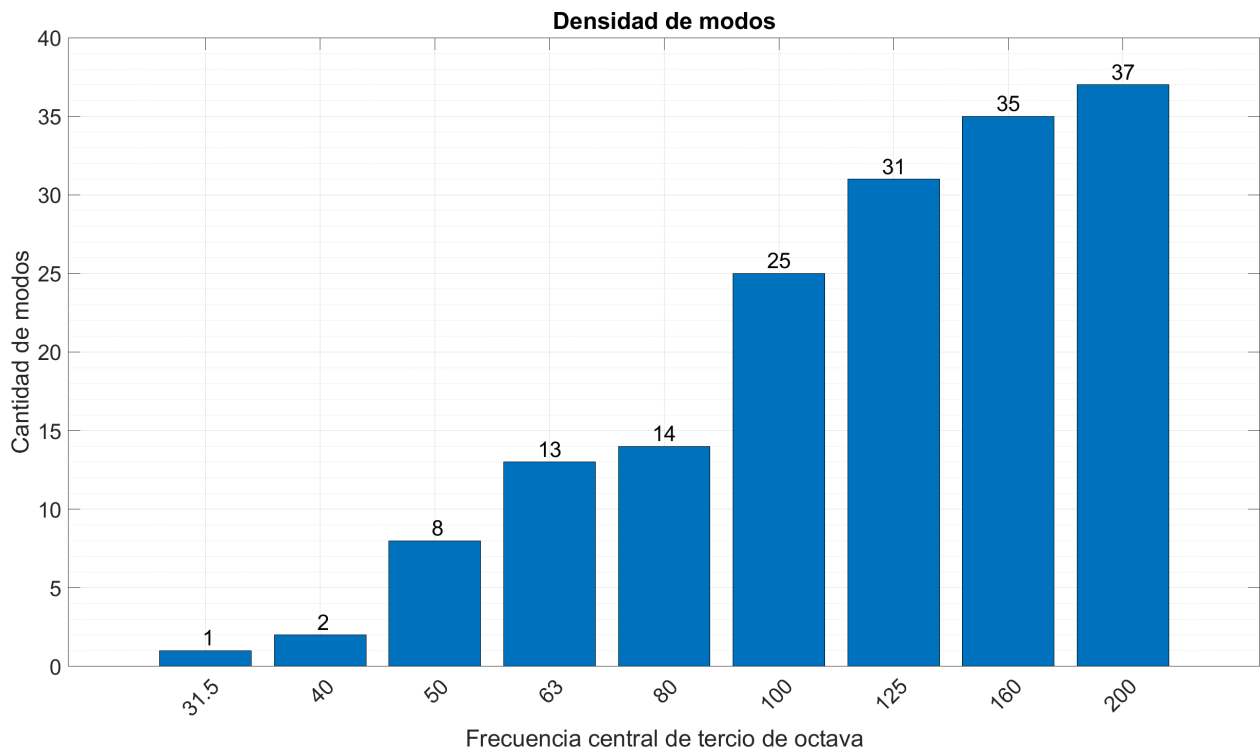


Figura 3.1: Densidad de nodos por banda de tercio de octava

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

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

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 mediante los resultados del programa se obtiene la distancia crítica cuyo valor es igual a $1,2m$, cuyo valor calcularemos nuevamente 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.

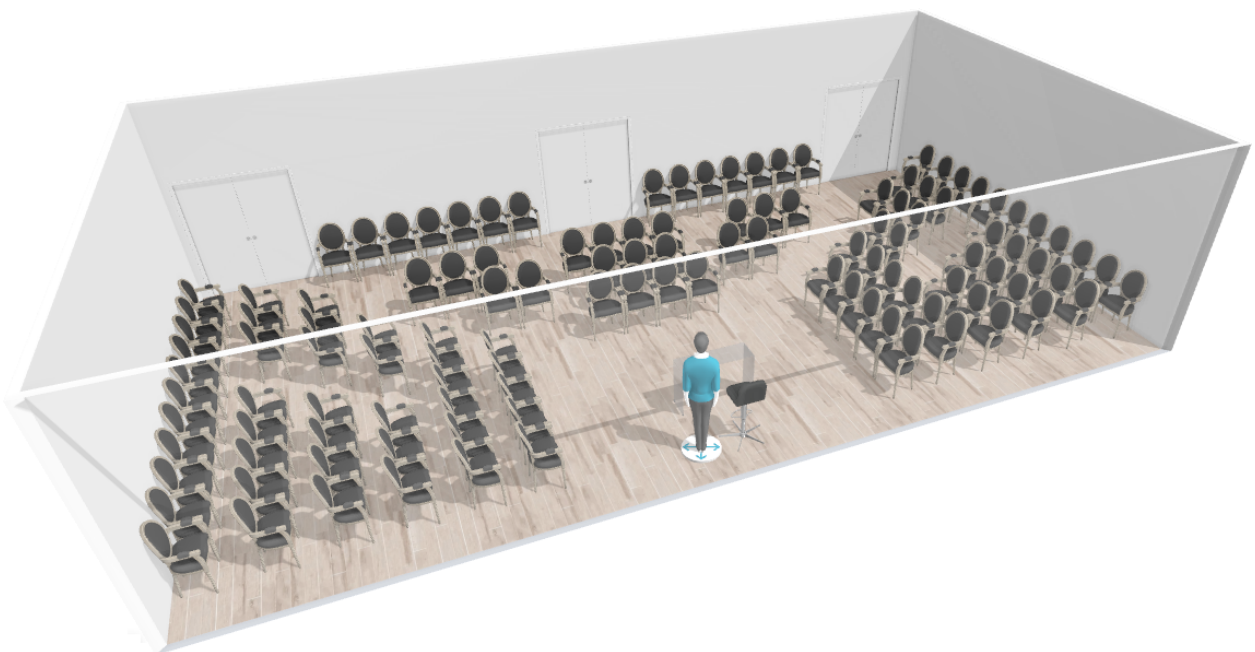


Figura 3.3: Vista 3D de la sala de conferencias

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



Figura 3.2: Vista superior de la sala de conferencias

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.

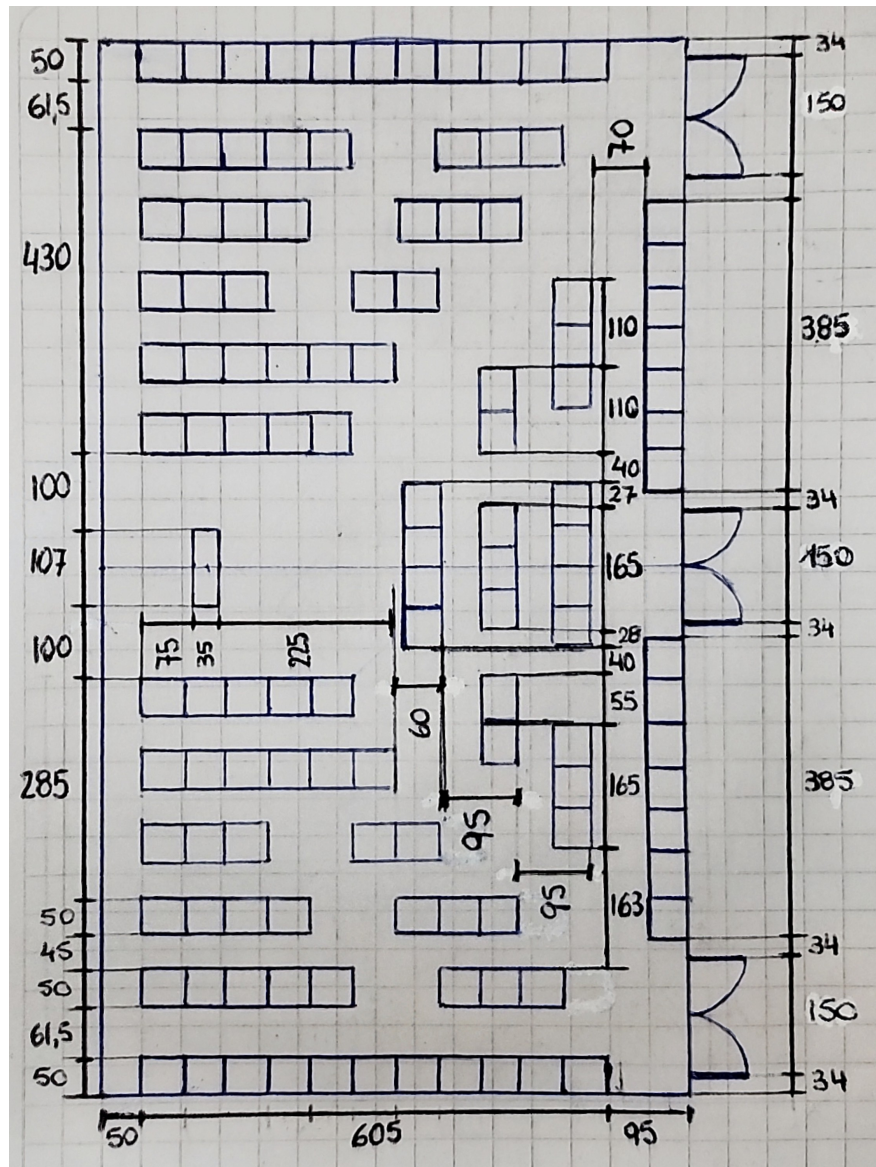


Figura 3.4: Boceto del plano de la Sala de Conferencias.

4. Diseño y tratamiento acústico para control de reverberación

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 en paredes y asientos.

Para realizar este tratamiento, comenzamos calculando el tiempo de reverberación (TR) óptimo considerando el volumen de la sala y el uso que se le dará a la misma (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 presentes en el cuadro [4.0.1] :

Frecuencia [Hz]	$TR_{opt}(V)$ [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 $TR_{optimos}$

A partir del volumen resultante de la sala, $V = 354,45m^3$, se obtiene el cuadro [2.0.1]. Por lo tanto, los $TR_{optimos}$ 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 %. Dichos valores fueron redondeados a 1 decimal, debido a que no podemos asegurar mayor precisión con la aproximación utilizada.

$TR_{optimos}$ [seg]	ΔTR [seg]
$TR_{125} = 1,1$	0,2
$TR_{250} = 0,9$	0,2
$TR_{500} = 0,7$	0,1

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

En la figura [4.1] se muestran los valores obtenidos junto con sus bandas de tolerancia para frecuencias de octavas comprendidas entre 125 y 4000Hz.

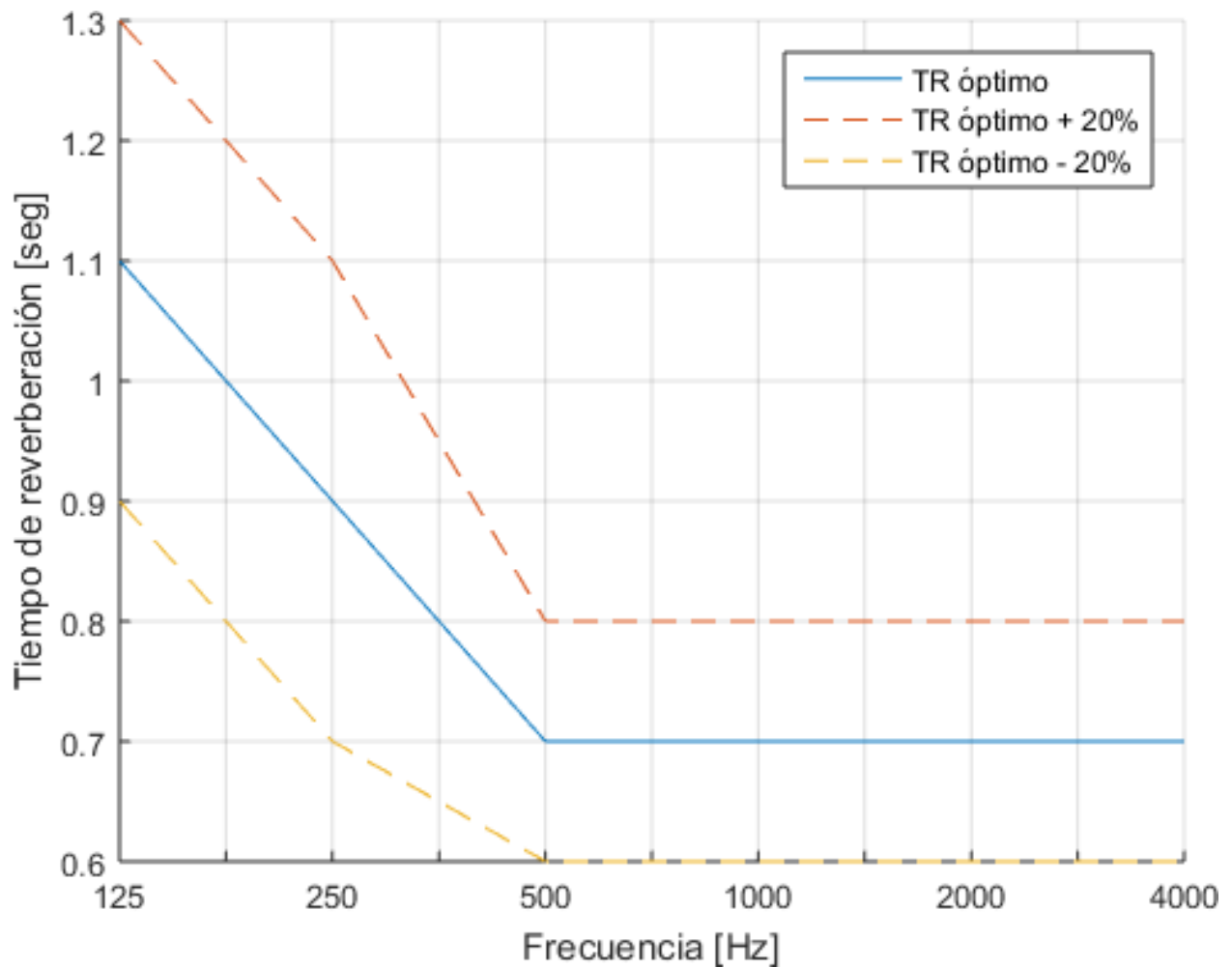


Figura 4.1: Gráfico de valores de TR_{optimo} y sus bandas de tolerancia

A continuación, seleccionamos los materiales con que estarán construidas las superficies interiores del recinto (piso, techo, paredes, puertas) y la 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].

Tipo	Material elegido	Sup./Cant.	Coeficiente α / Área equivalente $[m^2]$					
Frecuencia [Hz]:			125	250	500	1000	2000	4000
Piso	Baldosa enlozada	$104.25m^2$	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04
Techo	Hormigón	$104.25m^2$	0.01	0.01	0.02	0.02	0.05	0.07
Paredes (frente orador)	Papel Pintado	$89.26\ m^2$	0.01	0.20	0.04	0.10	0.20	0.30
Pared (detrás orador)	Ladrillo pintado	$47.26\ m^2$	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
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 1	120 Unid.	0.12	0.20	0.28	0.30	0.31	0.37
Butaca	Madera	1 Unid.	0.01	0.02	0.02	0.04	0.04	0.04

Cuadro 4.0.3: Materiales y objetos para la construcción del recinto

En donde:

- La superficie del piso se calcula: $S_{piso} = L \cdot W = 13,9 \cdot 7,5m^2 = 104,25m^2$
- La superficie del techo es la misma que la del piso, por lo tanto $S_{techo} = 104,25m^2$
- La superficie de las 3 paredes que se encuentran al frente del orador se calculan:
 $S_{frenteOrador} = H \cdot L + H \cdot W \cdot 2 - S_{puertas} = 3,4 \cdot 13,9m^2 + 3,4 \cdot 7,5 \cdot 2m^2 - 3 \cdot 3m^2 = 89,26m^2$
- La superficie de la pared detrás del orador: $S_{detrásOrador} = H \cdot L = 3,4 \cdot 13,9m^2 = 47,26m^2$
- La superficie que cubren las puertas de madera se calculan sabiendo que las mismas son 3 y cada una cubre $3m^2$
- Para las butacas, tenemos 120 unidades de las butacas con tapizado tipo 1 y 1 butaca de madera para el presentador

A partir de la elección de los materiales, se esperará cumplir con los tiempos de reverberación óptimos para una **ocupación del 75 %**. En caso de no cumplirlo, se realizará un tratamiento acústico a la sala.

A continuación, procedemos a calcular el tiempo de reverberación inicial correspondiente a la sala equipada con los elementos y muebles elegidos, para tener una noción inicial que sirva de referencia. Para esto, utilizamos la ecuación (4.0.1), a partir de la cual se puede calcular el tiempo de reverberación, la cuál considera el área equivalente resultante.

$$TR = \frac{0,163 \cdot V}{A_T} \quad (4.0.1)$$

Donde:

- V : Es el volumen de la sala en m^3
- A_T : Es el área equivalente de absorción total en el recinto, expresado en m^2

Para utilizarla, es necesario obtener la expresión de A . Primero, calculamos el área equivalente del local sin muebles ni personas, A_L , mediante la siguiente expresión:

$$A_L = S_{\text{piso}} * \alpha_{\text{piso}} + S_{\text{techo}} * \alpha_{\text{techo}} + S_{\text{pared}} * \alpha_{\text{pared}} + S_{\text{puertas}} * \alpha_{\text{puertas}} \quad (4.0.2)$$

Donde, S_i corresponde a las múltiples superficies presentes en la sala y α_i , corresponde al coeficiente de absorción asociado a cada material. Estos últimos son datos extraídos de la guía de materiales utilizada para el trabajo.

Como segunda instancia, incorporamos los muebles elegidos. Entonces, a la ecuación previa, le sumamos el área equivalente de las butacas a instalar y multiplicamos por la cantidad utilizada:

$$A_1 = A_L + n_{\text{Butacas}} \cdot A_{\text{Butacas}} \quad (4.0.3)$$

Luego, considerando el efecto que tienen las personas dentro del recinto, y asumiendo que las butacas se ocupan un 75 %. De acuerdo al tipo de butacas elegido, tapizada tipo 1, el área equivalente de absorción sonora provocado por un adulto en dicha butaca, surge de la expresión:

$$A_2 = A_L + n_{\text{ButacasVacías}} \cdot A_{\text{Butacas}} + n_{\text{ButacasOcupadas}} \cdot A_{\text{ButacasOcupadas}} \quad (4.0.4)$$

Dadas estas consideraciones, obtenemos la figura [4.2] y el cuadro [4.0.4] como resultado:

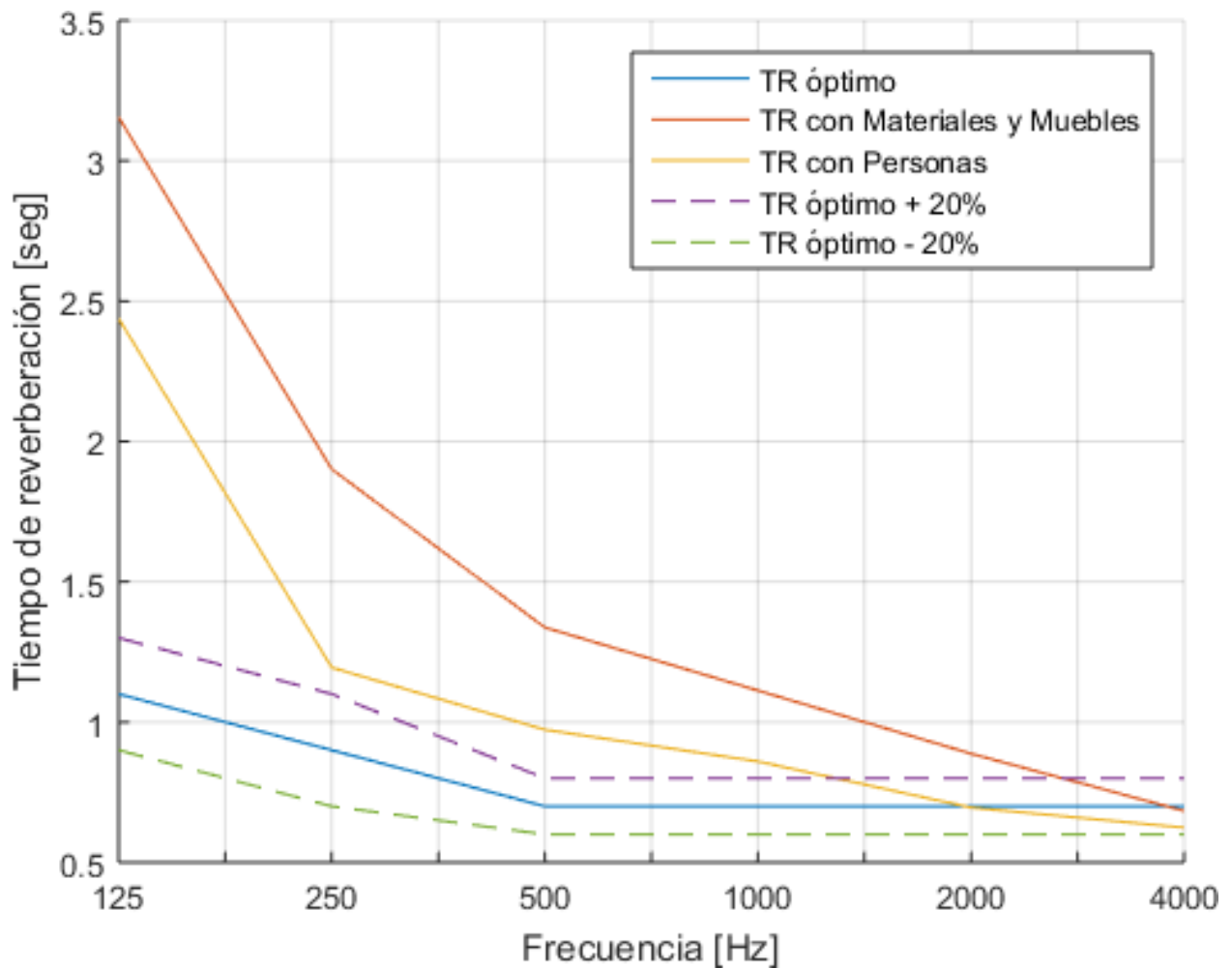


Figura 4.2: Curvas de $TR_{\text{óptimo}}$ comparados con la sala ocupada al 75 %, con muebles y materiales

Frec. [Hz]	$TR_{\text{óptimo}}(-20\%)$	$TR_{\text{óptimo}}$	$TR_{\text{óptimo}}(+20\%)$	$TR_{\text{Sin Personas}}$	$TR_{\text{Con Personas}}$
125	0.9 seg	1.1 seg	1.3 seg	2.44 seg	3.16 seg
250	0.7 seg	0.9 seg	1.1 seg	1.19 seg	1.90 seg
500	0.6 seg	0.7 seg	0.8 seg	0.97 seg	1.34 seg
1k	0.6 seg	0.7 seg	0.8 seg	0.86 seg	1.11 seg
2k	0.6 seg	0.7 seg	0.8 seg	0.70 seg	0.89 seg
4k	0.6 seg	0.7 seg	0.8 seg	0.62 seg	0.68 seg

Cuadro 4.0.4: Valores de $TR_{\text{óptimo}}$ comparados con la sala ocupada al 75 %, con materiales y muebles

Observamos que aún considerando el efecto de las personas en la sala, se necesita un tratamiento fonoabsorbente. Observamos que es necesario bajar los valores de tiempo de reverberación para las frecuencias mas bajas y bajar las frecuencias altas a menor medida. Para esto, se considera la recomendación de diseño que indica colocar materiales fonoabsorbentes en el las paredes opuestas al orador

y en el techo, mientras que la pared detrás de este, sea de un material reflejante (es por eso que se optó Ladrillo pintado para la pared detrás del orador, que tiene bajos valores de α). Por lo tanto se resolvió colocar paneles de madera, aglomerado 6 mm, sobre 50 mm lana de vidrio en el 40 % de la superficie de las paredes que se encuentran frente al orador, y en el caso del techo, se decidió cubrirlo un 10 % con cielorraso 4, el cuál consta de un panel yeso acanalado + lana 50mm, 35 kg/m² + 85 cm aire. Dichos materiales poseen las características que se indican en el cuadro [4.0.5].

Material Elegido	Sup.	Coeficiente α					
Frecuencia [Hz]:		125	250	500	1000	2000	4000
Panel madera, aglomerado 6 mm, sobre 50 mm lana de vidrio	35.70m ²	0.61	0.65	0.24	0.12	0.10	0.06
Cielorraso 4: Panel yeso acanalado + lana 50mm, 35 kg/m ² + 85 cm aire	10.43m ²	0.56	0.60	1.00	0.83	0.49	0.31

Cuadro 4.0.5: Material fonoabsorbente elegido

En donde:

- La superficie cubierta por el panel de madera en la pared se calcula como:

$$S_{PanelMadera} = S_{FrenteOrador} \cdot 0,4 = 89,26m^2 \cdot 0,4 = 35,70m^2$$

- La superficie cubierta por el panel de Yeso en el techo se calcula como:

$$S_{PanelYeso} = S_{Techo} \cdot 0,1 = 104,25m^2 \cdot 0,1 = 10,43m^2$$

Finalmente, volvemos a calcular el tiempo de reverberación considerando los cambios del fonoabsorbente elegido mediante:

$$A_T = A_2 - (0,4 \cdot S_{ParedFrenteOrador} \cdot \alpha_{ParedFrenteOrador}) + (0,4 \cdot S_{ParedFrenteOrador} \cdot \alpha_{PanelMadera}) - (0,1 \cdot S_{Techo} \cdot \alpha_{Techo}) + (0,1 \cdot S_{Techo} \cdot \alpha_{PanelYeso})$$

Obteniendose la figura [4.3] y el cuadro [4.0.6] :

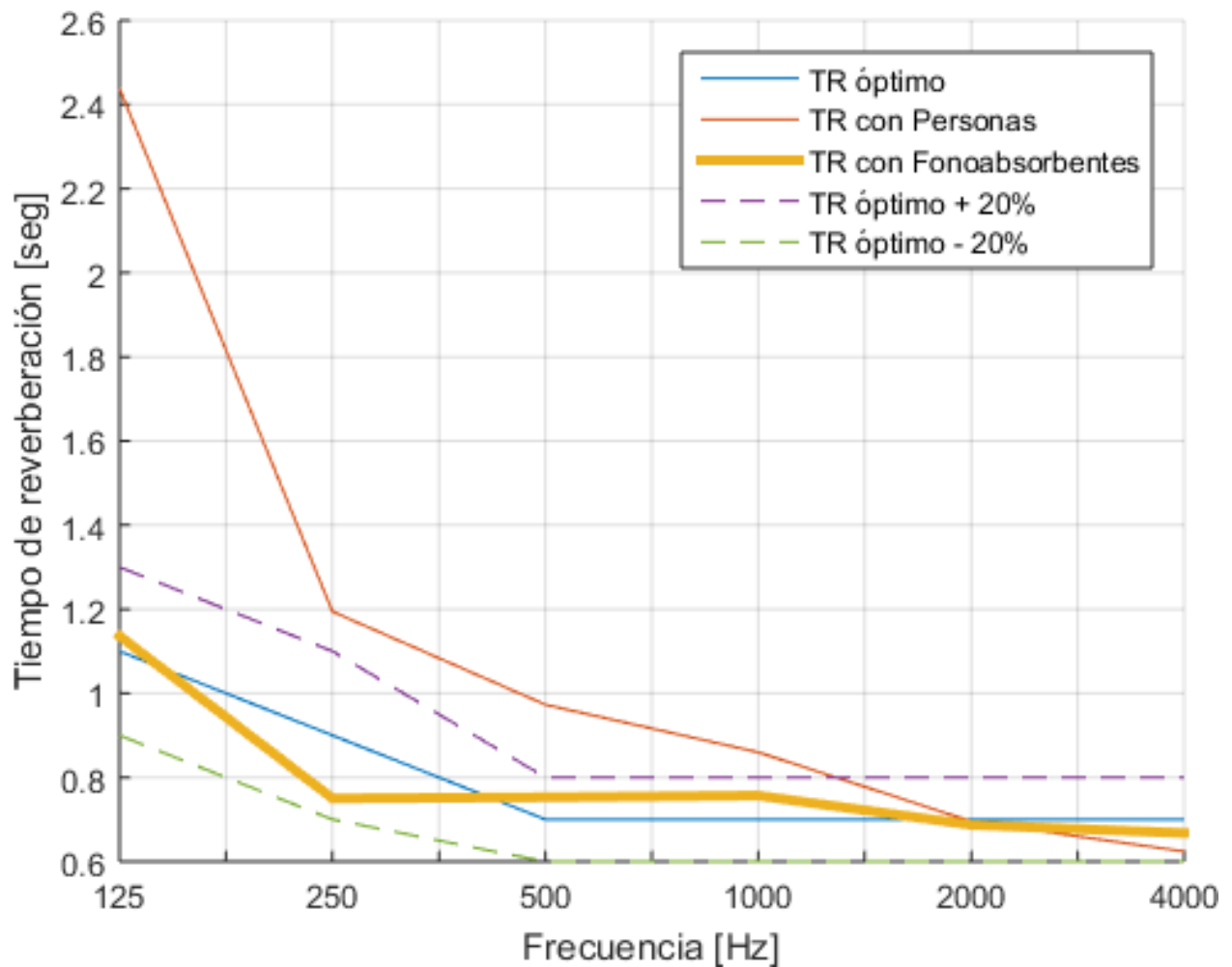


Figura 4.3: Curvas de $TR_{\text{óptimo}}$ comparados con la sala ocupada al 75 %, solo con materiales y muebles, y con los materiales fonoabsorbentes

Frec. [Hz]	$TR_{\text{óptimo}}(-20\%)$	$TR_{\text{óptimo}}$	$TR_{\text{con Fonoabsorbente}}$	$TR_{\text{óptimo}}(+20\%)$
125	0.9 seg	1.1 seg	1.10 seg	1.3 seg
250	0.7 seg	0.9 seg	0.75 seg	1.1 seg
500	0.6 seg	0.7 seg	0.75 seg	0.8 seg
1k	0.6 seg	0.7 seg	0.76 seg	0.8 seg
2k	0.6 seg	0.7 seg	0.69 seg	0.8 seg
4k	0.6 seg	0.7 seg	0.67 seg	0.8 seg

Cuadro 4.0.6: Valores de $TR_{\text{óptimo}}$ comparados con la sala ocupada al 75 %, solo con materiales y muebles, y con los materiales fonoabsorbentes

Dada la figura previa, observamos que la curva de TR con el recinto tratado con fonoabsorbentes se mantiene dentro de los límites de tolerancia considerados.

Dado esto, pasamos a calcular la inteligibilidad de la palabra dentro del recinto. Sabemos que una palabra consta de vocales y consonantes. La comprensión de un mensaje oral depende fundamentalmente de la correcta percepción de sus consonantes, por lo tanto es de vital importancia percibir bien las altas frecuencias.

En la tabla [4.0.7] podemos observar una clasificación, en bandas de octavas, de la contribución de las frecuencias a la inteligibilidad de la palabra y al nivel sonoro. En ella se aprecia que las frecuencias de la octava centrada en 2 kHz son las que tienen mayor influencia en la inteligibilidad de la palabra. Por este motivo en la práctica, se suelen hacer los cálculos para 2 kHz.

Frecuencias [Hz]	250	500	1k	2k	4k
Nivel sonoro	22 %	46 %	20 %	3 %	2 %
Inteligibilidad	5 %	13 %	20 %	31 %	26 %

Cuadro 4.0.7: Contribución de la inteligibilidad de la palabra para cada banda de octava

Para evaluar la inteligibilidad hay varios métodos, de los cuales, uno de los más difundidos es el que se basa en el estudio de la pérdida real de consonantes.

En una sala que tiene un valor bajo de %Alcons (*Articulation Loss of Consonants* ó Pérdida de consonantes) es más sencillo entenderse que en una que tiene un valor alto de %Alcons. El valor se basa exclusivamente en el porcentaje de consonantes medio que no pueden llegar a entender los oyentes de una sala, ya que las vocales no son tan necesarias para entender un mensaje.

Existe un modelo matemático para el cálculo de dicho valor utilizando uso de la teoría acústica estadística. Peutz dedujo el valor de %Alcons como la diferencia entre los niveles sonoros de campo directo y de campo reverberante. La ecuación (4.0.5) muestra el cálculo de dicho valor el cuál debe interpretarse como la relación señal/ruido en lo que respecta la comprensión del lenguaje.

$$L_D - L_R = 10 \cdot \log \left(\frac{Q \cdot R}{d^2} \right) - 17dB \quad (4.0.5)$$

En donde:

- Q : El 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).
- d : La distancia entre el emisor (orador) y el receptor, en m .
- R : La constante acústica de la sala, en m^2

Recordando que la constante R esta dada por:

$$R = \frac{A}{1 - \bar{\alpha}} = \frac{0,161 \cdot V}{T_{60}(1 - \bar{\alpha})} \quad (4.0.6)$$

En donde:

- A : El área equivalente de absorción sonora de la sala, m^2 .
- V : Volumen de la sala, en m^3 .
- T_{60} : Tiempo de reverberación de la sala, en seg .
- $\bar{\alpha}$: Coeficiente medio de absorción de la sala (adimensional).
- S_L : Superficie interior del local, en m^2 .

Con:

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_1 \cdot S_1 + \alpha_2 \cdot S_2 + \dots + \alpha_n \cdot S_n}{S_1 + S_2 + \dots + S_n} \approx \frac{A}{S_L} \quad (4.0.7)$$

Según Peutz, se define el *nivel de inteligibilidad*, $IL\%$ como:

$$IL\% = 100 - AL\% \quad (4.0.8)$$

Y la pérdida de articulación de consonantes $\%Alcons$:

$$AL\% = 9 \cdot T_{60} \quad (4.0.9)$$

Dicha ecuación, se utiliza para distancia de público $d > 3,16 \cdot D_c$, donde D_c es la distancia crítica, en m , que se calcula como:

$$D_c = 0,06 \cdot \sqrt{\frac{Q \cdot V}{T_{60}(1 - \bar{\alpha})}} = 0,15 \cdot \sqrt{Q \cdot R} \quad (4.0.10)$$

Como los cálculos se realizan para el público que se encuentra a mayor distancia del orador (es decir, 7.5m), estamos utilizando la ecuación de $Alcons\%$ correcta.

Ahora podemos calcular la inteligibilidad de la palabra utilizando las ecuaciones dadas:

$$R = \frac{0,161 \cdot V}{TR_{2kHz}(1 - \alpha_{2kHz})} = \frac{0,161 \cdot 354,45m^3}{0,6872seg \cdot (1 - 0,2375)} = 108,9m^2$$

$$D_c = 0,15\sqrt{Q \cdot R} = 0,15\sqrt{2 \cdot 108,9m^2} = 2,21m$$

Entonces como $D_c \cdot 3,16 = 6,99m < d = 7,5m$, podemos decir que utilizamos la correcta expresión de $\%Alcons$:

$$IL\% = 100 - AL\% = 100 - 9 \cdot TR_{2kHz} = 93,82\%$$

93.8152

Entonces $IL\% = 93,82\% > 90\%$ lo cuál era el objetivo principal del diseño. Por lo tanto se cumple lo pedido.

Dado que $D_c = 2,21m$, observamos que existen butacas que se encuentran a $1m$ del orador, y en ese caso deberíamos cambiar la expresión (4.0.9) para calcular la pérdida de consonantes por la expresión (4), utilizando $d = 1m$:

$$AL\% = \frac{200 \cdot d^2 \cdot TR_{2kHz}^2}{Q \cdot V} = \frac{200 \cdot 1m^2 \cdot 0,6872seg^2}{2 \cdot 354,45m^3} = 0,1939$$

Por lo tanto, tendríamos un nivel de inteligibilidad de la palabra de $IL\% = 99.81\%$. Por lo tanto, no importante hacer que todas las filas de butacas se encuentren a partir de la distancia crítica para el recinto diseñado. Para verificar, podemos ver en la figura [4.4] un gráfico de la ecuación (4), en el cuál verificamos que el nivel de inteligibilidad se mantiene por encima de 90% hasta la distancia crítica.

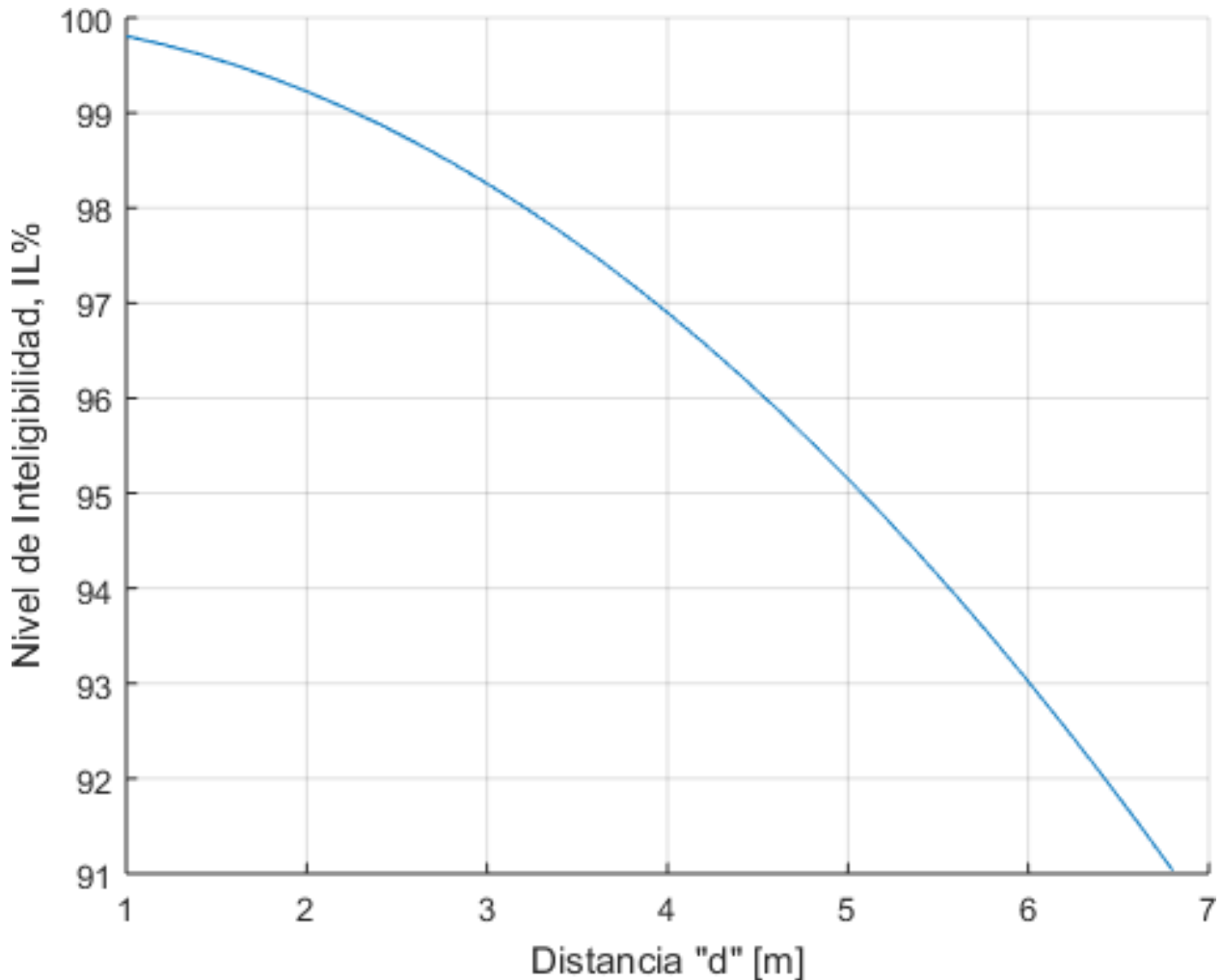


Figura 4.4: Inteligibilidad de la palabra en función de la distancia del orador hasta el receptor más cercano

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>