



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

EFFECTO ACÚSTICO DEL PÚBLICO EN UNA SALA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

FRANCISCO JAVIER SILVA GHISOLFO

PROFESOR GUÍA:

CLAUDIO ALEJANDRO POO BARRERA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

GABRIEL DARÍO RODRÍGUEZ JAQUE

DAVID ALBERTO CAMPUSANO BROWN

SANTIAGO DE CHILE

AGOSTO 2008

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

EFFECTO ACÚSTICO DEL PÚBLICO EN UNA SALA

FRANCISCO JAVIER SILVA GHISOLFO

COMISION EXAMINADORA	NOTA	CALIFICACIONES	
		(Letras)	FIRMA
PROFESOR GUIA SR. CLAUDIO POO B. :
PROFESOR CO-GUIA SR. GABRIEL RODRIGUEZ J.:
PROFESOR INTEGRANTE SR. DAVID CAMPUSANO B.:
 NOTA FINAL:

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

SANTIAGO DE CHILE
AGOSTO 2006

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
POR: FRANCISCO JAVIER SILVA G.
FECHA: 25/08/2008
PROF. GUIA: Sr. CLAUDIO POO

“EFECTO ACÚSTICO DEL PÚBLICO EN UNA SALA”

En Chile la calidad acústica poco a poco va adquiriendo fuerza como concepto. Aunque los esfuerzos que se han hecho han mostrado resultados positivos en algunas salas de clases, salas de ensayo, estudios de televisión y radio, y sobre todo en grandes auditorios. Sin embargo el diseño de estos recintos se basan en antecedentes que en muchos casos se obtienen de la bibliografía existente. Tal es el caso de la absorción acústica de las personas que ha sido determinada en otros países

En esta memoria, se estudió la inherencia de las personas en los tiempos de reverberación en una sala, pues estos influyen en lo bien que una persona logra escuchar un determinado mensaje. Para esto se evaluó en forma experimental, en una cámara acústica reverberante, dos casos posibles, la absorción de adultos con ropa de invierno y la absorción de adultos con ropa de verano.

A partir de estos casos se seleccionó el caso de la absorción de adultos con ropa de invierno y se analizó en forma experimental la influencia de estas personas en dos salas de clases con diferentes dimensiones.

En forma complementaria a esta evaluación in situ, se realizó la modelación teórica de estas salas con los datos aportados por la experiencia de laboratorio realizada. Con esto se compararon los valores obtenidos y se determinó la pertinencia de la modelación realizada y de los datos utilizados para esta, satisfactoriamente. También se calculó la inteligibilidad de la sala cuyos valores entregados demostró que ambas salas poseen valores aceptables de inteligibilidad.

Se concluye finalmente que los valores obtenidos en laboratorio son correctos y que la inteligibilidad de la sala se puede mejorar agregando materiales absorbentes o cambiado un material por otro con un mayor coeficiente de absorción.

Finalmente, estos valores podrán ser utilizados como valores reales para el diseño de aulas.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer sinceramente:

A mis papás, Francisco y Anamaría, por apoyarme incondicionalmente en toda mi vida, gracias por enseñarme el camino correcto y recordármelo innumerables veces, gracias estar conmigo siempre que los necesité y por darme una infancia y adolescencia increíble, lástima que todo termina, pero fue buenísimo mientras duró, se que vendrán tiempos mejores.

A mis hermanos María Fernanda e Ignacio, por todos los momentos en los que estábamos triste y nos ayudamos mutuamente a salir ellos, espero que siga siendo así por siempre, no por envejecer uno pierde los sentimientos, gracias también por los recreos diarios y por dejarme ocupar el computador.

A mis abuelos Sergio, Ana María y Lia, por el cariño infinito que me tienen, sin importar con el genio que me encuentre, gracias por ser así. Yo también los quiero mucho aunque a veces no lo demuestre.

Al Profesor Claudio Poo, al cual me acerque buscando un tema de memoria y encontré un amigo, el cual me enseñó todo lo que se dé acústica, gracias por el tiempo, la dedicación, la disponibilidad y la buena onda.

A Pedro del Laboratorio de Acústica del IDIEM, gracias por la excelente disposición a prestar ayuda siempre, gracias a él los ensayos, fueron un éxito.

A Mónica, Laura, Alfonso, Kamil, Kike, Felipe, Ignacio y Gabriel, gracias por apoyarme durante los ensayos, fueron de gran ayuda y sin ustedes este trabajo no sería posible.

A Anton, Litro, Mauchi, Santiago, Yogui, Chino, Jesús, Comez, Fabiola, Huaipe, Rufo, Jugoman y tantos otros, que hicieron que mi largo paso por la facultad fuera increíble, gracias por el jugo y aguante la banca.

Finalmente quiero agradecer a la mujer que le dio sentido a mi vida, Lorena. Su apoyo incondicional, su amor, su cariño, su alegría, su paciencia y las innumerables veces que me dijo que me aplicara con la memoria, hacen de ella la piedra angular de mi vida. Te amo.

*It's a long way to the Top...
...if you wanna rock n' roll*

INDICE DE CONTENIDOS.

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.	1
1.1. Introducción.	1
1.2. Organización de la memoria.	2
CAPITULO 2. MARCO TEORICO.	3
2.1. Tipos de ondas y sus características.	3
2.1.1. Desarrollo modos normales de vibración en un recinto.	5
2.2. Niveles acústicos.	8
2.3. Características de la Audición.	10
2.4. Absorción del sonido debido a los materiales, objetos y aire.	11
2.4.1. Coeficientes de absorción sonora.	11
2.4.2. Absorción debida al aire.	15
2.4.3. Absorción acústica total en un recinto.	16
2.4.4. Tiempo de Reverberación.	19
2.4.5. Medición experimental de la Absorción.	27
2.5. Criterios generales de diseño	28
2.5.1. Inteligibilidad de la palabra.	28
2.5.2. Calculo de la inteligibilidad de la palabra.	30
2.5.3. Relación entre el tiempo de reverberación y la inteligibilidad de la palabra	35
2.5.4. Valor optimo del tiempo de reverberación.	36
CAPITULO 3. ABSORCION EXPERIMENTAL.	41
3.1. Consideraciones.	41
3.1.1. Mobiliario.	41
3.1.2. Individuos.	43
3.1.3. Cantidad de Ensayos.	43
3.2. Procedimiento.	44
3.3. Valores Obtenidos.	45
CAPITULO 4. ABSORCION DE LA SALA DE CLASE.	54
4.1. Obtención de los tiempos de absorción de la sala.	54
4.1.1. Consideraciones	54
4.1.2. Procedimiento	56
4.1.3. Valores Obtenidos.	57
4.2. Obtención de la absorción utilizando los datos de laboratorio.	62
4.2.1. Traspaso de datos	62
4.2.2. Absorción de las salas	64
CAPITULO 5. ANALISIS DE DATOS.	66
5.1. Desarrollo de los modos normales de vibración	66
5.2. Cálculo de la inteligibilidad de las salas	67
5.3. Comparación de las absorciones totales.	68
5.4. Comparación de los T_{60} de diferentes autores.	71

CAPITULO 6.	CONCLUSIONES.....	75
CAPITULO 7.	BIBLIOGRAFIA.....	78

INDICE DE TABLAS.

Tabla 1: “Características más relevantes del mensaje oral”.....	29
Tabla 2: “Relación entre %ALCons, STI / RASTI y la valoración subjetiva del grado de inteligibilidad”	34
Tabla 3: “Medidas mobiliario”.....	42
Tabla 4: “Ensayos”.....	44
Tabla 5: “Valores T_{60} posición de pie con ropa de invierno”.....	46
Tabla 6: “Valores T_{60} posición sentados con ropa de invierno”	47
Tabla 7: “Valores T_{60} posición sentados con ropa de verano”	48
Tabla 8: “Valores T_{60} posición de pie con ropa de verano”	49
Tabla 9: “Valores T_{60} posición solo sillas”	50
Tabla 10: “Valores T_{60} sala vacía”.....	51
Tabla 11: “Áreas de Absorción”	52
Tabla 12: “Áreas de Absorción por objeto”	53
Tabla 13: “Caracterización de las salas”	55
Tabla 14: “Valores T_{60} Sala B205 con personas”	58
Tabla 15: “Valores T_{60} Sala B205 vacía”	59
Tabla 16: “Valores T_{60} Sala B206 con personas”	60
Tabla 17: “Valores T_{60} Sala B206 vacía”	60
Tabla 18: “Valores áreas de absorción”	61
Tabla 19: “Valores de tercios a bandas de octava para las primeras 9 frecuencias”	63
Tabla 20: “Valores de tercios a bandas de octava para las últimas 9 frecuencias”	64
Tabla 21: “Absorción existente sala B205”	64
Tabla 22: “Absorción existente sala B206”	65
Tabla 23: “Absorción total existente sala B205”	65
Tabla 24: “Absorción total existente sala B206”	65
Tabla 25: “Inteligibilidad para la sala B205”	67
Tabla 26: “Inteligibilidad para la sala B206”	68
Tabla 27: “comparación de la absorción de la sala B205”	68
Tabla 28: “comparación de la absorción de la sala B206”	69
Tabla 29: “Valores para superficies de ambas salas en las direcciones principales”	71
Tabla 30: “Comparación de los T_{60} en la sala B205”	71
Tabla 31: “Comparación de los T_{60} en la sala B206”	71

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.

1.1. Introducción.

En Chile la calidad acústica poco a poco va adquiriendo fuerza como concepto, apoyada por la puesta en vigencia de una serie de normas y regulaciones relacionadas con el tema. Aunque los esfuerzos que se han hecho han mostrado resultados positivos en algunas salas de clases, salas de ensayo, estudios de televisión y radio, y sobre todo en grandes auditorios. Sin embargo el diseño de estos recintos se basas en antecedentes que en muchos casos se obtienen de la bibliografía existente. Tal es el caso de la absorción acústica de las personas que ha sido determinada en otros países.

En el presente trabajo de título, se estudia la inherencia de las personas en los tiempos de reverberación en una sala, los que influyen de gran manera en lo bien que una persona logra escuchar un determinado mensaje. Para esto se evalúa en forma experimental, en una cámara acústica reverberante, dos casos posibles, los cuales se indican a continuación: la absorción de adultos con ropa de invierno y la absorción de adultos con ropa de verano. A partir de esto se selecciona uno de los casos mencionados y se analiza en forma experimental la influencia de estas personas en dos salas de clases con diferentes dimensiones. En forma complementaria a esta evaluación in situ, se realiza la modelación teórica de estas salas con los datos aportados por la experiencia de laboratorio realizada. Con esto se comparan los valores obtenidos y se determina la pertinencia de la modelación realizada y de los datos utilizados para esta. De esta manera podrán ser utilizados como valores reales para el diseño de aulas.

1.2. Organización de la memoria.

En el capítulo 2 se presenta la información teórica necesaria para lograr comprender los alcances de este trabajo.

En el capítulo 3 se muestra la forma en que se caracteriza a los cuatro casos de individuos según norma ISO 354, junto con la metodología empleada para lograr esto. Se discuten los resultados obtenidos. Además, se indica consideraciones hechas durante la experimentación.

El capítulo 4 presenta los criterios y la metodología empleada durante la caracterización del comportamiento acústico de la salas. Además de los diferentes casos, es decir para las 2 salas de clases de diferente tamaño.

El capítulo 5 trata del análisis de datos, es decir, se hace una comparación de los valores obtenidos en los diferentes casos con los valores teóricos y se analiza la opción de realizar un modelo matemático

En el capítulo final, de discusión y conclusiones se presentan las conclusiones y recomendaciones propuestas sobre la base de los resultados obtenidos.

CAPITULO 2. MARCO TEORICO.

En este capítulo se expone la teoría necesaria para desarrollar esta memoria, se presenta una pequeña introducción de ondas, para luego desarrollar brevemente el tema acústico, finalizando con el sonido, y en especial la absorción de este en diferentes aspectos.

En adelante se emplea las unidades del sistema internacional, con la excepción de la potencia que se expresa en Watts W.

2.1. Tipos de ondas y sus características.

Se entiende por sonido una alteración física en un medio, que puede ser sólido, líquido o gaseoso, siendo posible detectarla mediante el oído de los seres humanos. Para que estas perturbaciones se puedan propagar a través de un medio es necesario que el mismo tenga inercia y elasticidad, ya que si no es así la propagación de las ondas sonoras no es posible, es decir las ondas sonoras no se propagan a través del vacío. Las ondas sonoras se propagan a través del aire, son originadas por variaciones de presión por encima y por debajo del valor elástico de la presión atmosférica que tiene un valor de 10^5 N/m^2 , siendo 1 N/m^2 igual a 1 Pa al nivel del mar a 0°C , y $1 \mu\text{Pa}$ igual a 10^{-6} Pa ¹.

El sonido consiste en fluctuaciones de presión muy pequeñas que se propagan a la velocidad del sonido². La magnitud de las fluctuaciones varía generalmente entre $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ y 20 Pa (0 – 120 dB), si se compara con la presión atmosférica estándar de

¹ Las variaciones de presión se pueden obtener por múltiples procedimientos, como por ejemplo las vibraciones de superficies.

² Es la velocidad a la que viajan las ondas sonoras. El valor de esta velocidad a una temperatura cualquiera t ($^\circ\text{C}$), con relación a una velocidad a 0°C , será: $C = C_0 + 0.6 \cdot t$ (m/s) con C_0 igual a 331.6 (m/s)

101.325 Pa. Los oídos cancelan la presión estacionaria, respondiendo únicamente a la fluctuación.

Cuando una onda sonora que se propaga a través de un medio encuentra una superficie de separación con otro medio, se origina una onda reflejada en el primer medio y una transmitida en el segundo medio. Generalmente una onda sonora experimentara una reflexión siempre que exista una discontinuidad o un cambio en el medio a través del cual se propaga la onda. Una reflexión la escuchamos normalmente como un eco, cuando esta retrasada respecto al sonido directo alrededor de 100 ms, y con la suficiente intensidad como para poder escucharla con claridad. Como se aprecia en el diagrama energías/tiempo (figura 1), llega primero el sonido directo, que es el que viaja por el camino más corto, y después el sonido reflejado en la pared que se encuentra situada detrás de punto de recepción.

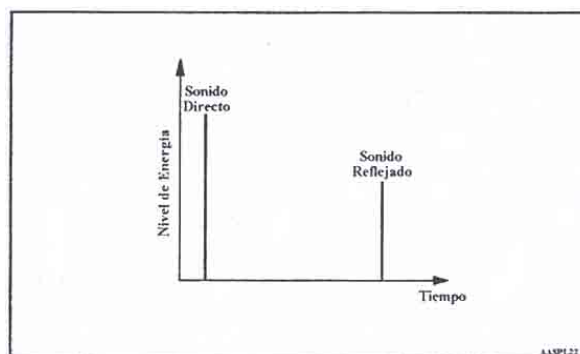


Ilustración 1: "Diagrama energía/tiempo de la onda directa y reflejada"

Un sonido que se refleja 1/10 de segundo después del sonido directo no se detecta por el oído, de forma que los dos sonidos se confunden originando lo que se conoce como reverberación.

Según se ha expuesto cuando las ondas sonoras inciden sobre un plano límite se forman dos tipos de ondas las reflejadas y las transmitidas, la dirección de propagación de estas últimas no es la misma que la de las ondas incidentes, ya que se desvían

alejándose o acercándose a la normal al plano limite, de acuerdo con las velocidades de propagación en los medios, este es el fenómeno conocido como refracción del sonido.

2.1.1. Desarrollo modos normales de vibración en un recinto

Para las longitudes de onda grandes con respecto al recinto se producen fenómenos de resonancias por interferencia de la señal con los reflexiones.

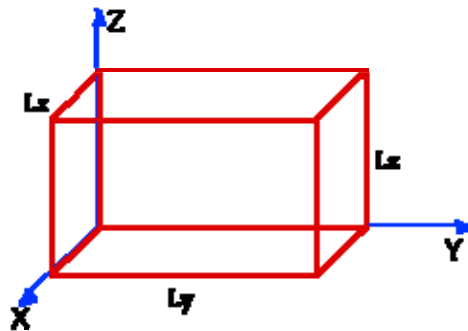


Ilustración 2: "Dimensiones y coordenadas para un espacio rectangular"

Este fenómeno es muy difícil para ser analizado en edificaciones de geometría compleja. En el caso de un recinto de dimensiones rectangulares como el de la figura anterior se tiene que la ecuación de onda que define el comportamiento de las ondas sonoras puede expresarse en coordenadas cartesianas como:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + k^2 p = 0 \quad (1)$$

La solución a la ecuación anterior podemos separarla en tres factores:

$$p(x, y, z) = p_1(x)p_2(y)p_3(z) \quad (2)$$

Las cuales solo dependen respectivamente solo de x, solo de y, y solo de z. Esto separa la ecuación de onda en tres ecuaciones diferenciales ordinarias. Para las condiciones de borde también se cumple lo anterior, por lo cual:

$$\frac{d^2 p_1}{dx^2} + k_x^2 p_1 = 0 \quad (3)$$

Con su condición de borde para $x=0$ y $x=Lx$:

$$\frac{dp_1}{dx} = 0 \quad (4)$$

Adicionalmente se tiene que cumplir la siguiente relación para las constantes k_i :

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = k^2 \quad (5)$$

La ecuación V.3 tiene la siguiente solución general:

$$p_1(x) = A_1 \cos(k_x x) + B_1 \sin(k_x x) \quad (6)$$

Donde se tiene que $B_1 = 0$ para cumplir con la ecuación V.4 en $x=0$. Mientras que para $x=L_x$ la ecuación V.4 obliga a que se cumpla:

$$\cos(k_x L_x) = \pm 1 \quad (7)$$

Por lo cual se tiene que:

$$k_x = \frac{n_x \pi}{L_x} \quad (8)$$

Con el mismo procedimiento tenemos que:

$$k_y = \frac{n_y \pi}{L_y} \quad (9)$$

$$k_z = \frac{n_z \pi}{L_z} \quad (10)$$

Operando con estas ecuaciones obtenemos que:

$$k_{n_x n_y n_z} = \pi \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2} \quad (11)$$

Luego tenemos que la dependencia de la presión sonora respecto a las coordenadas x , y y z es igual a:

$$p_{n_x n_y n_z}(x, y, z) = C \cos\left(\frac{n_x \pi x}{L_x}\right) \cos\left(\frac{n_y \pi y}{L_y}\right) \cos\left(\frac{n_z \pi z}{L_z}\right) \quad (12)$$

Donde se tiene que los modos de resonancia ocurren para las frecuencias:

$$f_{n_x n_y n_z} = \frac{c}{2\pi} k_{n_x n_y n_z} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2} \quad (13)$$

2.2. Niveles acústicos.

Es normal al estudiar los fenómenos acústicos, en vez de emplear las magnitudes presión e intensidad sonora, el emplear escalas logarítmicas como niveles acústicos. Esto se debe al rango de presiones e intensidades sonoras con los que frecuentemente se trabaja³, por lo que se usa una escala logarítmica con el fin de comprimir el rango de intensidades tan ancho.

³ Por ejemplo para el rango audible la intensidad varía desde 10^{-12} a 10 wat/m^2 .

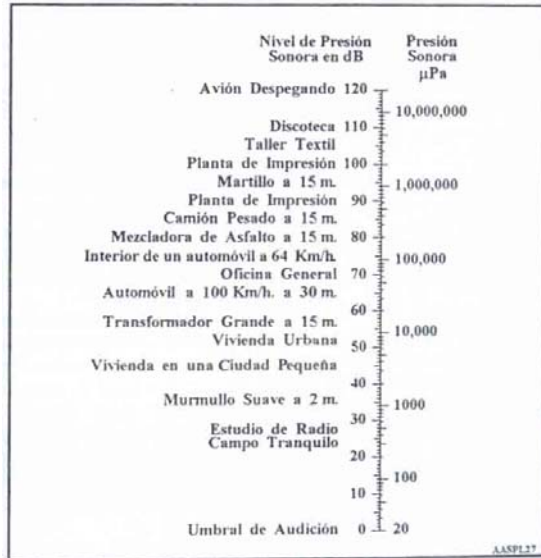


Ilustración 3: "Relación entre la presión acústica en Pa y el nivel de presión sonora en dB"

La presión sonora expresada según una escala lineal, en la figura 2, se muestra a la derecha, mientras que el nivel de presión sonora se presenta a la izquierda. Otra razón se debe a que el oído humano, desde el punto de vista subjetivo, tiene una respuesta de tipo logarítmico y no lineal, cuando percibe una perturbación sonora. Debido al empleo de niveles acústicos de tipo logarítmico es por lo que los términos multiplicativos que aparecen en las ecuaciones fundamentales en acústica son términos aditivos en las ecuaciones logarítmicas correspondientes. El nivel es el logaritmo de la relación entre la magnitud determinada con relación a otra de referencia de la misma clase. Por tanto, debe indicarse la base del logaritmo, la magnitud de referencia y el tipo de nivel.

El término nivel indica que se está empleando escala logarítmica y las unidades están expresadas en la unidad decibelio (dB), que es una unidad de nivel que representa la relación entre dos cantidades que son proporcionales a la potencia, el número de decibelios correspondiente a esta relación es 10 veces el logaritmo (en base 10) de esa relación. Las relaciones de presión sonora no son siempre proporcionales a las

correspondientes relaciones de potencia sonoras, pero es una práctica común extender el uso de la unidad a esos casos⁴

Con el fin de proporcionar una escala adecuada, la presión sonora rms real se divide por la presión sonora de referencia, $2 * 10^{-5}$ Pa, antes de tomar el logaritmo. Dado que la presión de referencia es aproximadamente igual a la presión audible mínima a 1 KHz, la relación para cualquier sonido audible es mayor que la unidad y el nivel de presión sonora, en dB, es positivo, correspondiendo 0 dB aproximadamente al umbral de audición a 1 KHz. La escala se extiende hacia arriba, típicamente hasta los 120 dB antes de que el sonido llegue a ser tan sonoro que comience a hacer daño. La palabra “nivel” se incluye siempre que se emplee la escala de decibelios

2.3. Características de la Audición.

De la misma forma que un sonido excesivamente débil no se percibe, uno excesivamente fuerte produce una sensación dolorosa y molesta, existiendo por lo tanto, unos límites de intensidad por el estímulo físico, por debajo y por encima de los cuales la audición es imposible. Esto se logra apreciar en la figura 4.

⁴ Esta escala logarítmica de adapta muy bien a la audición humana, tiene un carácter mas logarítmico que lineal: Cambios en el nivel de presión sonora de unos 5 dB, originan de modo aproximado, el mismo cambio en la sensación de audición, sea cualquiera el nivel del que se parta, excepto cerca del umbral de audición: Mientras que un cambio en la presión sonora de unos 0.01 Pa sería equivalente a un cambio subjetivo muy grande a niveles bajos mientras que apenas sería observable a niveles altos.

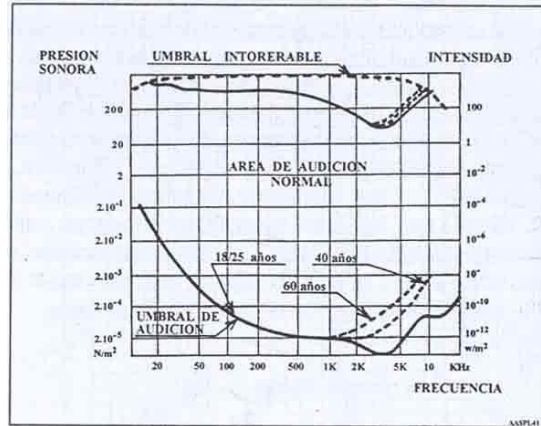


Ilustración 4: "Variación de la presión sonora del oído con la frecuencia"

El área comprendida entre las dos curvas que representan los niveles superior e inferior, es la denominada zona de audición, en estas curvas se puede apreciar la dependencia que existe entre la sensibilidad del oído y la frecuencia, encontrándose la máxima sensibilidad a la frecuencia de 3000 Hz.

2.4. Absorción del sonido debido a los materiales, objetos y aire.

2.4.1. Coeficientes de absorción sonora.

Las pérdidas de energía acústica en los materiales se pueden caracterizar mediante el *coeficiente de absorción acústica* α , entendiéndose por tal a la relación entre la energía acústica absorbida por un material y la energía acústica incidente sobre dicho material, por unidad de superficie y que puede variar desde un 1 o 2 % al 100 %, para diferentes materiales, en el primer caso la reflexión es total y en el segundo lo es la absorción. Para que la superficie de un material absorba energía acústica es necesario:

- a) Que la superficie sea relativamente transparente al sonido.

- b) Que el medio sea capaz de transformar más o menos completamente la energía vibratoria de las ondas en energía calorífica de fricción.

La transparencia acústica se puede conseguir mediante una superficie expuesta a un material altamente poroso, o bien una lamina perforada usada como revestimiento poroso, también mediante una membrana ligera flexible impermeable al aire o perforaciones o grietas mecánicas en el cuerpo de un material poroso, pudiendo ser la superficie externa impermeable.

El coeficiente de absorción acústica de un material depende de la naturaleza del mismo, de la frecuencia de la onda y del ángulo con el que la onda incide sobre la superficie. Ya que el coeficiente de absorción varía con la frecuencia, se suelen dar los mismos a las frecuencias de 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz.

Un elemento que interviene en la absorción acústica, principalmente en el campo de las bajas frecuencias, es el espesor del volumen del aire existente entre la cara del material y la superficie rígida que lo soporta. Este volumen puede variar en la práctica desde cero cuando el material se monta directamente sobre el soporte rígido, hasta algunos metros como en el caso de los techos acústicos suspendidos. Es necesaria una anchura de al menos 10 cm. para mantener una alta absorción a las bajas frecuencias. En general, los materiales acústicos presentan una curva de absorción en función de la frecuencia, en forma de campana, con un pico más o menos agudo en función de la anchura de volumen de aire.

El coeficiente de absorción de cualquier material varía considerablemente con el ángulo de incidencia de las ondas. Como los materiales que se emplean para recubrir las superficies de un recinto, están expuestos normalmente a las ondas que inciden bajo diferentes ángulos aleatoriamente distribuidos. Se define como *coeficiente difuso de*

absorción acústica α , a la relación entre la energía sonora absorbida por una superficie uniforme, y la energía que incide uniformemente sobre dicha superficie. Este coeficiente, definido teniendo en cuenta la gran variedad de ángulos de incidencia de las ondas distribuidas en el recinto, puede caracterizar al mismo, solo si las superficies que lo forman son suficientemente uniformes en sus propiedades físicas. Si no es así, pero ocupan áreas iguales, el coeficiente medio viene expresado por:

$$\alpha_m = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} \alpha_i \quad (14)$$

Siendo $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ los coeficientes difusos de absorción acústica de cada material. Si las unidades de diferentes propiedades físicas ocupan áreas distintas, tendremos:

$$\alpha_m = \alpha_1 \frac{S_1}{S} + \alpha_2 \frac{S_2}{S} + \dots + \alpha_n \frac{S_n}{S} = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^{i=n} (\alpha_i * S_i) \quad (15)$$

Donde S_1, S_2, \dots son las áreas de las distintas unidades no uniformes; $\alpha_1, \alpha_2, \dots$ son los coeficientes difusos de absorción acústica de cada material y S el área total de todas las superficies internas del recinto. Como consecuencia de esto, los coeficientes de absorción acústica comerciales se determinan por el método de la cámara reverberante⁵.

Esto es básicamente un método de integración, en el que las ondas chocan con la muestra de ensayo simultáneamente desde diferentes direcciones. El coeficiente se calcula a partir del efecto medio de la muestra en el campo acústico de la cámara, considerando el resultado como un valor medio para todos los ángulos de incidencia.

⁵ Norma UNE 74041-80 “**Medida de coeficientes de absorción en cámara reverberante**”, equivalente a la Norma ISO-354-2003 “*Measurement of sound absorption in a reverberation room*”

Este coeficiente se llama de **Sabine** α_s , para distinguirlo del coeficiente de incidencia normal o de **Kundt** α_{90} , que se aplica al caso de ondas que chocan perpendicularmente con la superficie y que se mide por el método de Kundt.

No existe una relación fija o exacta entre el coeficiente de incidencia normal o de Kundt y el de incidencia aleatoria o de Sabine, para los diversos materiales. Es decir, dos materiales que tengan el mismo coeficiente de incidencia normal, no tienen por qué tener el mismo coeficiente de incidencia aleatoria. El coeficiente de absorción de Sabine tiene un valor superior al coeficiente de Kundt. Para materiales muy absorbentes, el valor de α_s puede exceder a la unidad hasta en un 20 o 30 %, como consecuencia de las técnicas de medida empleadas en su cálculo. Como ya se ha indicado, el coeficiente de absorción encontrado en el tubo de ondas estacionarias es inferior al encontrado en cámara reverberante, y de una forma aproximada, se puede observar una relación entre estos dos valores en la figura 4

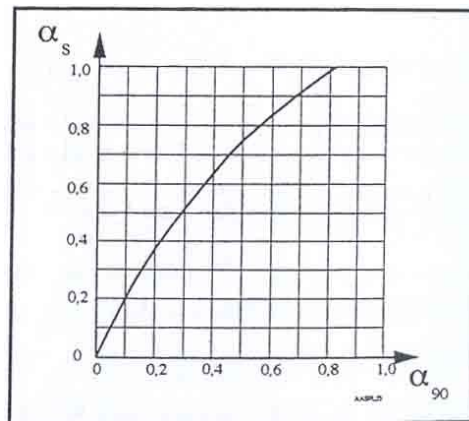


Ilustración 5: "Relación entre el coeficiente de absorción Sabine y el de Kundt"

Si en el interior de un local existen diferentes objetos y personas para encontrar la absorción total de un número de objetos del mismo tipo, se multiplica la absorción equivalente de un objeto por el número total de objetos en el recinto. Se define como

coeficiente de absorción equivalente de un objeto a la absorción total de un metro cuadrado de superficie, cuyo coeficiente de absorción es numéricamente igual a la absorción producida por un objeto.

Según estudios realizados por Leo L. Beranek⁶, cuando sobre una superficie se colocan un gran número de personas, y por consiguiente, se crea en un recinto una superficie muy absorbente, la absorción debida al público no se obtiene multiplicando el coeficiente de absorción de una persona por el número de personas, sino que se aproxima más a la realidad, multiplicar el área de la superficie ocupada por el público, por unos coeficientes de absorción experimentales obtenidos⁷

2.4.2. Absorción debida al aire.

El coeficiente de absorción m de la energía acústica en el aire, se encuentra a partir de:

$$m = 8,94 * 10^{-4} \left(\frac{f^2}{\rho_0 c^3} \right) (m^{-1}) \quad (16)$$

Donde f es el valor de la frecuencia y $\rho_0 c$ la densidad del aire y la velocidad del sonido en el aire, que en condiciones normales de presión y temperatura vale:

$$m = 1,89 * 10^{-11} * f^2$$

⁶“Analysis of Sabine and Eyring equations their application to concert hall audience and chair absorption” Leo L. Beranek, 2006

⁷ 125 Hz – 0.44; 250 Hz – 0.60; 500 Hz – 0.77 etc.

En la figura 5 se dan valores de m en función de la humedad relativa para distintas frecuencias a una temperatura de 20° C. La dispersión geométrica, supone que la potencia acústica total permanece constante al alejarse de la fuente. Esto no es del todo cierto, de hecho, una parte de la energía se convierte en calor cuando viaja a través del aire; aunque esta conversión normalmente solo es importante para las frecuencias altas y cuando se consideran grandes distancias. La absorción “clásica” es debida a la viscosidad y a la conductividad térmica del aire, pero ambas son despreciables cuando se las compara con la absorción “molecular”.

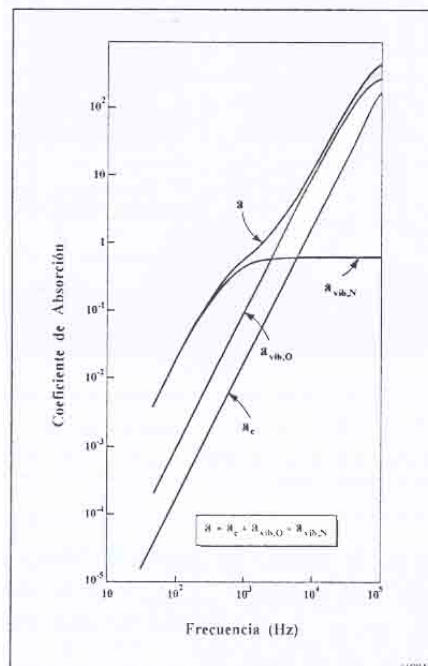


Ilustración 6: Valor coeficiente absorción total m en función del % de humedad relativa para aire a 20° C y presión atmosférica normal para frecuencias entre 2000 y 12500 Hz.

2.4.3. Absorción acústica total en un recinto.

La absorción total en un recinto es igual a la suma de la absorción debida a las diferentes superficies límites del recinto $A_{\text{superficies}}$, más la absorción debida a los objetos,

mobiliario, personas, etc. $A_{objetos}$, y por último la absorción debida al aire A_{aire} . Por consiguiente la absorción total estará dada por:

$$A_{total} = A_{sup} + A_{obj} + A_{aire} (m^2) \quad (17)$$

La unidad de absorción es el equivalente a 1 m² de superficie absorbente perfecta.

La **absorción A** es la magnitud que cuantifica la energía extraída del campo acústico, cuando la onda atraviesa un medio determinado, o el choque de la misma con las superficies límites del recinto. Está dada para la absorción a la frecuencia f por:

$$A_f = \alpha_f * S (m^2) \quad (18)$$

Donde S es el área total de las superficies en m², y α_f es el coeficiente de absorción acústica del material a la frecuencia f.

La absorción acústica debida a las superficies límites del local será:

$$A_{sup} = \alpha_m * S = \sum_{i=1}^{i=n} (\alpha_i S_i) (m^2) \quad (19)$$

Si en el interior del recinto existen diferentes objetos y personas, para encontrar la absorción debida a los mismos multiplicamos la absorción equivalente de un objeto por el número total de objetos que hay en el recinto, es decir:

$$A_{obj} = \alpha_1 * n_1 + \alpha_2 * n_2 + \dots = \sum_{j=1}^{j=m} (\alpha_j n_j) (m^2) \quad (20)$$

Donde α_j es la absorción equivalente de cada elemento y n_j el número de elementos.

La absorción del aire esta dada por la expresión:

$$A_{aire} = 4mV (m^2) \quad (21)$$

Donde m es el coeficiente de absorción del aire por metro y V es el volumen del recinto en m^3 .

Por consiguiente, la absorción total será:

$$A_t = A_s + A_o + A_a = \sum_{i=1}^{i=n} (\alpha_i S_i) + \sum_{j=1}^{j=m} (\alpha_j n_j) + 4mV (m^2) \quad (22)$$

Siendo el coeficiente de absorción acústica:

$$\alpha_m = \frac{A_s + A_o + A_a}{S} = \frac{1}{S} \left[\sum_{i=1}^{i=n} (\alpha_i S_i) + \sum_{j=1}^{j=m} (\alpha_j n_j) + 4mV \right] \quad (23)$$

2.4.4. Tiempo de Reverberación.

Un concepto básico para obtener la absorción experimentalmente, es el tiempo de reverberación, este se define como el tiempo⁸ requerido por un sonido para decaer en 60 dB después de que la fuente del sonido se detuvo, es decir, un millonésimo de su valor anterior. El decaimiento del sonido es lineal cuando se ve en escala logarítmica, como se aprecia en la figura 6.

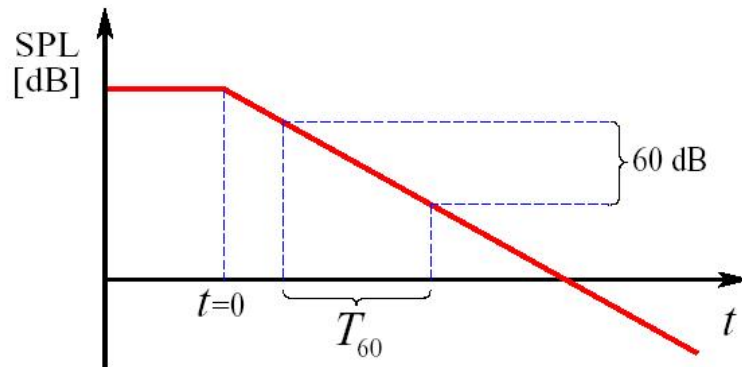


Ilustración 7: Decaimiento del sonido.

Wallace Clement Sabine desarrolló alrededor de 1890 una teoría sobre el decaimiento del sonido y comprobó que el tiempo de reverberación podría ser útil para evaluar la calidad acústica de la sala. Sabine se basó para desarrollar su teoría en dos condiciones:

- el campo dentro del recinto es difuso (su intensidad no decae en ningún punto).
- las partículas sonoras son incoherentes, con lo que se pueden sumar energías.

Durante un proceso de aumento y decaimiento sonoro en un recinto podemos distinguir tres fases:

⁸ Tiempo en segundos.

- La primera es un régimen transitorio en el que la densidad de energía (energía por unidad de volumen) aumenta. Existirá un balance energético entre la energía que se gana y que se pierde durante el proceso.
- La segunda es un régimen estacionario en el que ambas densidades de energía se compensan.
- La tercera corresponde al período en el que la fuente sonora ha dejado de emitir.

Idealmente en un recinto cerrado donde el coeficiente de absorción es cero o aproximadamente cero , se tiene una ganancia de 3 dB en cada reflexión , en la práctica esto no sucede por la absorción que existe siempre en los materiales , entonces esta energía crece gradualmente hasta llegar a un máximo o estado estacionario de energía sonora . Para llegar a la expresión matemática nos valemos de la ley de conservación de energía.

$$\frac{d[\text{ener.acustica}]}{dt} = W_{\text{fuente}} - W_{\text{abs}} \quad (24)$$

W_{fuente} : potencia de la fuente que esta en el recinto.

$W_{\text{abs.}}$: potencia absorbida por los materiales en forma de calor (resistiva).

Sabemos que: Densidad de energía = Energía / volumen

$$\frac{d[VD(t)]}{dt} = W_{fuente} - W_{abs} \quad (25)$$

La potencia acústica absorbida esta relacionada con el coeficiente de absorción, quiere decir que la onda sonora pierde energía cada vez que rebota con una superficie, y ésta perdida esta relacionada con el coeficiente de absorción de esta superficie.

$$W_{abs} = Energia * \bar{\alpha} \quad (26)$$

Esto es para una reflexión, para 'n' reflexiones se multiplica esta expresión 'n' veces. Esta letra 'n' tiene un significado temporal, es decir, es una variable por unidad de tiempo.

Es de interés conocer la distancia promedio que recorre un rayo entre reflexiones sucesivas hasta extinguirse, este concepto es valido si suponemos que el campo es difuso. La expresión es la siguiente:

$$\bar{d} = \frac{4V}{S} \quad (27)$$

V: volumen del recinto

S: Superficie del recinto

Juntando esta ecuación con la ecuación de movimiento del sonido $C = d / t$, y teniendo en cuenta la variable 'n' como $1 / t$, se tiene:

$$n = \frac{CS}{4V} \quad (28)$$

Entonces la energía absorbida para 'n' reflexiones es:

$$W_{abs} = DV * \bar{\alpha} * \frac{CS}{4V} \quad (29)$$

Reemplazando en la ecuación (25) y haciendo $A = \alpha S$.

$$V \frac{dD}{dT} + \frac{CA}{4} D = W_{fuente} \quad (30)$$

Resolviendo esta ecuación diferencial se obtiene lo siguiente.

$$D(t) = \frac{4W}{CA} \left[1 - e^{-\frac{CA}{4V}t} \right] \quad (31)$$

Este es el comportamiento del sonido en un recinto cerrado. La energía crece exponencialmente a medida que pasa el tiempo hasta un valor máximo estacionario que vale:

$$D = \frac{4W}{CA} \quad (32)$$

La energía acústica en el recinto decae de una manera progresiva al apagar la fuente, o lo que es lo mismo, hacer W (fuente) igual a cero. Al momento de interrumpir la fuente el sonido decae con cierta rapidez, la cual va a depender de las características geométricas del recinto, así como también de la cantidad de material absorbente de que están revestidas las superficies. Haciendo un análisis simple, la velocidad con la que decae el sonido en un recinto 'vivo' o reverberante es más lenta que en una sala seca o con algún material absorbente. También podemos imaginar que para dos salas con igual absorción, pero con tamaños distintos, la velocidad con que decae el sonido es mayor para salas pequeñas que para las más grandes. Con todo esto podemos concluir que la disminución de la energía sonora esta relacionada directamente con la absorción e inversamente relacionada con el volumen. Podemos demostrar esto con la ecuación diferencial de la energía sonora.

Desarrollamos:

$$\frac{dD}{dT} + \frac{CA}{4V} D = 0 \quad (33)$$

$$D(t) = D(0) \left[e^{-\frac{CA}{4V}t} \right] \quad (34)$$

Con esta expresión podemos definir el tiempo de reverberación, como el tiempo que demora la energía sonora en disminuir en una millonésima parte una vez que se apaga la fuente sonora, es decir:

$$\frac{D(0)}{D(T_{60})} = 10^6 \quad \frac{D(0)}{D(0) * e^{-\frac{AC}{4V} * T_{60}}} = 10^6 \quad (35) \text{ y } (36)$$

Despejando el T60 de la expresión nos queda:

$$T_{60} = \frac{55.3V}{CA} \quad (37)$$

Donde:

V: volumen del recinto

A: absorción del recinto

C: velocidad del sonido

La fórmula de Eyring para el tiempo de reverberación, solo es aplicable cuando los coeficientes de absorción sonora son de valores numéricos parecidos para todas las superficies límites, es:

$$T_{60} = 0.161 * \frac{V}{4mV - S \ln(1 - \alpha_m)} (s) \quad (38)$$

Donde m es el coeficiente de atenuación de energía sonora en el aire⁹.

Las pérdidas de energía sonora en un recinto, debidas al aire, solo tienen influencia a altas frecuencias (2000 – 4000 Hz), y en recintos de gran volumen¹⁰. Luego para recintos pequeños y frecuencias inferiores a 4000 Hz, se puede despreciar el término 4mV, por lo tanto:

$$T_{60} = 0.161 * \frac{V}{-S \ln(1 - \alpha_m)} (s) \quad (39)$$

Cuando la variedad de materiales en el recinto es grande, y la diferencia entre los valores de los coeficientes de absorción también, la mayor aproximación al tiempo de reverberación se obtiene empleando la ecuación de Millington–Sette:

⁹ Ver ecuación (3), del capítulo 2.4.2 absorción debida al aire.

¹⁰ Superior a 5000 m³.

$$T_{60} = 0.161 * \frac{V}{-\sum_{i=1}^{i=n} S_i \ln(1 - \alpha_i)} (s) \quad (40)$$

Donde S_i es el área del material i ésimo y α_i el coeficiente de absorción de dicho material.

Además de las ecuaciones antes mencionadas existen otras como la de Fitzroy:

$$T_{60} = \frac{0.161V}{S^2} [S_x T_x + S_y T_y + S_z T_z] (s) \quad (41)$$

Con:

$$T_i = \frac{1}{-\ln(1 - \alpha_i)} \quad (42)$$

Esta fórmula es más exacta para salas rectangulares o cuadradas, pues considera distintas absorciones en las 3 direcciones principales a diferencia de las ecuaciones de Sabine, Eyring y Millington–Sette.

Para finalizar también se evaluará la ecuación de Arau-Puchades:

$$T_{60} = \left[\frac{0.161V}{S} * T_x \right]^{\frac{S_x}{S}} \left[\frac{0.161V}{S} * T_y \right]^{\frac{S_y}{S}} \left[\frac{0.161V}{S} * T_z \right]^{\frac{S_z}{S}} (s) \quad (43)$$

El tiempo de reverberación depende además de la forma del recinto, de las posiciones de la fuente sonora y de los materiales absorbentes, no siendo constante para todas las frecuencias, ya que la absorción sonora tanto en el aire como en las superficies interiores, depende de la frecuencia.

Entre los diversos inconvenientes de cada fórmula, podemos citar:

- La fórmula de Sabine no da nunca un tiempo de absorción nulo, incluso aunque los cerramientos tuvieran una absorción perfecta. En salas absorbentes se obtienen tiempos de reverberación superiores a los reales.
- Las fórmulas de Sabine y Eyring permiten obtener valores de coeficientes de absorción superiores a la unidad, lo cual es absurdo.
- Si entre los materiales hay alguno que tenga un coeficiente de absorción unidad, la fórmula de Millington siempre da un tiempo de reverberación nulo.

La fórmula de Sabine produce buenos resultados para materiales de baja absorción, mientras que a medida que los materiales son más difusores y están distribuidos más uniformemente, las fórmulas de Eyring o Millington proporcionan mejores resultados bastante similares entre sí. Por otra parte no hay que olvidar que a medida que las absorciones aumentan, nos alejamos más de las condiciones de campo difuso, con lo que el concepto de tiempo de reverberación va perdiendo un poco de sentido. En general, hoy en día el tiempo de reverberación se puede calcular o medir directamente. En este último caso se suelen dar los tiempos de reverberación para diversas bandas de octava.

2.4.5. Medición experimental de la Absorción.

Luego de explicar estos conceptos, se puede llegar a una metodología para medir experimentalmente la absorción esto se realiza colocando una “muestra” en la cámara

reverberante, para luego medir el efecto de esta en el tiempo de reverberación. La dificultad de este método reside en la ubicación de la muestra y de ondas en otras frecuencias en la cámara.

$$A_s = A_{sala_con_muestra} - A_{sala_sin_muestra} \quad (44)$$

$$A_s = 0.161V \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_0} \right) (m^2) \quad (45)$$

Donde A_s es la absorción de la muestra en m^2 , V el volumen de la cámara en m^3 , T_s es el tiempo de reverberación con la muestra en la cámara y T_0 es el tiempo de reverberación con la cámara vacía. Esta fórmula difiere de la que se presenta en la norma, por el hecho de que considera la velocidad del sonido constante.

2.5. Criterios generales de diseño

Existen variadas formas de decir que la calidad de sonido es óptima, acá se mencionarán las más utilizadas. Estos criterios buscan cumplir los siguientes objetivos:

- Garantizar la existencia de confort acústico.
- Asegurar una correcta inteligibilidad de la palabra.

2.5.1. Inteligibilidad de la palabra

Cuando una persona emite un mensaje, emplea un tiempo mayor en la emisión de las vocales que en la de las consonantes. Es por ello que las vocales constituyen el

llamado régimen permanente del habla, mientras que las consonantes se asocian al régimen transitorio.

La duración en promedio de una vocal es del orden de 90 ms, reduciéndose a 20 ms en el caso de una consonante. El hecho de que la duración de las vocales sea más elevada hace que el nivel de presión sonora asociado a las mismas sea, en promedio, del orden de 12 dB mayor que el correspondiente a las consonantes. Por otra parte, su contenido frecuencial es más rico en bajas frecuencias, mientras que las consonantes presentan una mayor contribución de altas frecuencias. Por otro lado, el grado de inteligibilidad de la palabra está estrechamente relacionado con la correcta percepción de las altas frecuencias. En consecuencia, son las consonantes las que determinan la comprensión del mensaje oral. En cambio, la información contenida en las vocales es redundante. En la tabla siguiente se resumen las características mencionadas.

Tabla 1: “Características más relevantes del mensaje oral”

	DURACIÓN (PROMEDIO)	CONTENIDO FRECUENCIAL DOMINANTE	NIVEL (PROMEDIO)	CONTRIBUCIÓN A LA INTELIGIBILIDAD DE LA PALABRA
VOCALES	≈ 90 ms	bajas frecuencias	nivel vocales ≈ nivel consonantes +	baja
CONSONANTES	≈ 20 ms	altas frecuencias	12 dB	alta

En la ilustración 8 se muestra la contribución de cada banda de frecuencias de octava al nivel de la voz y a la inteligibilidad de la palabra. Según se puede observar, la máxima contribución al nivel de la voz se sitúa en la zona de frecuencias medias, destacando la banda de 500 Hz con un 46%. En cambio, la máxima contribución a la inteligibilidad de la palabra está situada a frecuencias más elevadas (57% sumando la contribución de las bandas de 2 y 4 kHz).

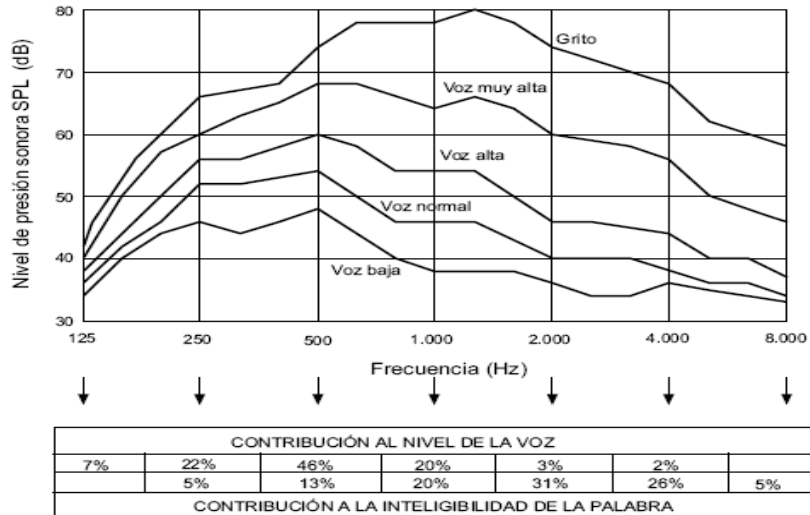


Ilustración 8: “Contribución frecuencial al nivel de la voz y a la inteligibilidad de la palabra”.

2.5.2. Calculo de la inteligibilidad de la palabra.

Aparte del perjuicio que representa para la inteligibilidad de la palabra la existencia de eco o de eco flotante en una sala, la comprensión de un mensaje oral depende fundamentalmente de la correcta percepción de sus consonantes. A principios de la década de los años 70, el investigador holandés V.M.A. Peutz llevó a cabo un exhaustivo trabajo a partir del cual estableció una fórmula para el cálculo de la inteligibilidad.

El trabajo se dividió en dos partes perfectamente diferenciadas: la primera consistió en realizar una serie de pruebas de audiencia en diferentes recintos basadas en la emisión de un conjunto preestablecido de “logatomos” (palabras sin significado formadas por: consonante-vocal-consonante). Cada individuo receptor tomaba nota de lo que escuchaba y, posteriormente, se procesaba toda la información recogida y se establecía una estadística de los resultados obtenidos. Si, por ejemplo, el porcentaje medio de logatomos detectados correctamente en uno de los recintos era de un 85%,

entonces se consideraba que la pérdida de información era de un 15%. Como dicha pérdida se asociaba a una percepción incorrecta de las consonantes, Peutz la denominó: % de Pérdida de Articulación de Consonantes, o lo que es lo mismo, %ALCons (“Articulation Loss of Consonants”). En el ejemplo anterior, se tendría un %ALCons de un 15%. Huelga decir que, al tratarse de un parámetro indicativo de una pérdida, cuanto mayor sea, peor será el grado de inteligibilidad existente.

La segunda parte del trabajo consistió en encontrar una ley matemática que, a partir del conocimiento de una serie de parámetros acústicos del recinto en estudio, permitiese hallar el valor de %ALCons en cada punto del mismo, sin necesidad de tener que realizar las laboriosas pruebas de audiencia. Lógicamente, una vez establecida dicha ley, sería posible predecir la inteligibilidad de la palabra en cualquier punto de un recinto todavía por construir. Haciendo uso de la teoría acústica estadística, Peutz dedujo que el valor de %ALCons en un punto dado se podía determinar, simplemente, a partir del conocimiento del tiempo de reverberación RT y de la diferencia entre los niveles de presión sonora de campo directo L_D y de campo reverberante L_R en dicho punto. La ley en cuestión, expresada de forma gráfica, se presenta en la ilustración 9.

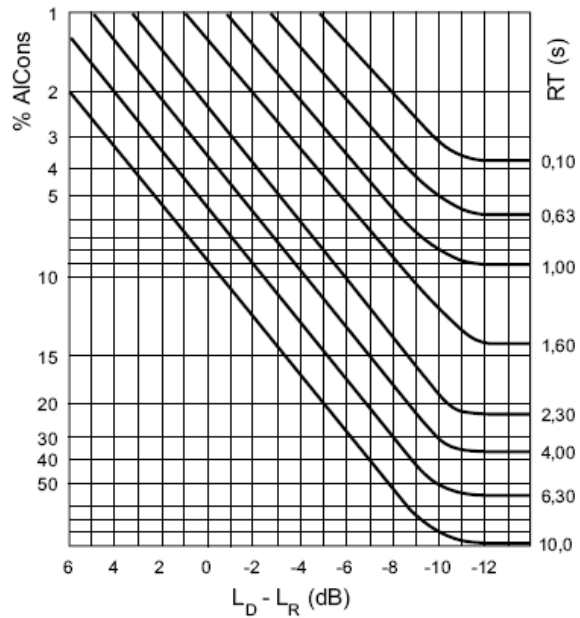


Ilustración 9: “Obtención del %ALCons a partir de RT y $L_D - L_R$ ”.

El valor de %ALCons (eje de ordenadas izquierdo) se determina a partir de los valores de RT (eje de ordenadas derecho) y de la diferencia $L_D - L_R$ (eje de abscisas). Para el cálculo de $L_D - L_R$, la fórmula a emplear es la siguiente:

$$L_D - L_R = 10 * \log\left(\frac{QR}{r^2}\right) - 17(dB) \quad (46)$$

Donde:

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 m²)

r = distancia del punto considerado a la fuente sonora (en m)

Como tanto RT como R dependen del coeficiente medio de absorción $\bar{\alpha}$, su conocimiento, junto con el del volumen V y el de la superficie total St permiten calcular los valores de RT 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. De la observación de la figura anterior se desprende lo siguiente:

- Cuanto más cerca esté situado el receptor de la fuente sonora (L_D-L_R mayor), menor será el valor de %ALCons, es decir, mayor inteligibilidad.
- Cuanto menor sea el RT, igualmente menor será el %ALCons, es decir, mayor inteligibilidad.
- El valor de %ALCons va aumentando a medida que el receptor se aleja de la fuente, hasta una distancia: $r = 3,16 Dc^{11}$. Para distancias $r > 3,16 Dc$, equivalentes a $(L_D - L_R) < -10$ dB, el valor de %ALCons tiende a ser constante. Ello significa que, a partir de dicha distancia, la inteligibilidad de la palabra ya no empeora.

Otro factor no mencionado hasta el momento, pero que contribuye sustancialmente a la pérdida de inteligibilidad, es el ruido de fondo presente en la sala. Desde un punto de vista práctico, y sin entrar en aspectos cuantitativos, se considera que su efecto es despreciable cuando el correspondiente nivel de ruido de fondo está, como mínimo, 12 dB por debajo del nivel de la señal.

Finalmente, es preciso indicar que existe otro parámetro alternativo que permite 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). Asimismo, existe una versión simplificada del STI denominada RASTI (“Rapid Speech Transmission Index”). Habitualmente, el RASTI es el parámetro medido en recintos, debido a su rapidez de

¹¹ Distancia crítica: Distancia para la cual $L_D = L_R$. Se puede demostrar que $Dc = 0.14 * (QR)^{-1/2}$

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 ilustración 10 y en la tabla 1.6. En esta última aparece también la valoración subjetiva del grado de inteligibilidad.

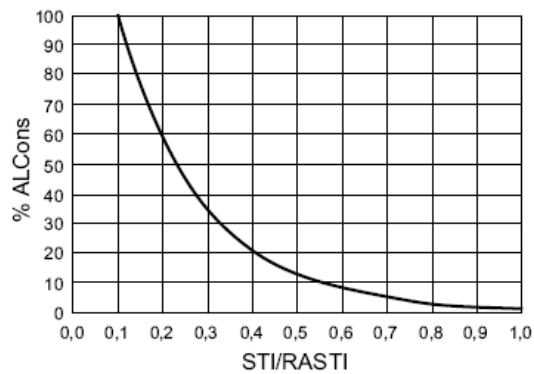


Ilustración 10: “Correspondencia entre STI/RASTI y %”.

Tabla 2: “Relación entre %ALCons, STI / RASTI y la valoración subjetiva del grado de inteligibilidad”

%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

2.5.3. Relación entre el tiempo de reverberación y la inteligibilidad de la palabra

Seguidamente se da la explicación de por qué en un recinto muy “vivo” la palabra resulta ininteligible.

Al emitir un mensaje oral, la duración de las vocales y su correspondiente nivel de presión sonora es mayor que el de las consonantes. Además, el contenido frecuencial de las vocales es más rico en bajas frecuencias, en tanto que las consonantes presentan un mayor contenido de altas frecuencias. En una sala con un tiempo de reverberación alto, el decaimiento energético de una vocal emitida en la misma es apreciablemente más lento que su decaimiento propio (aquél que se observaría si la vocal se emitiese en el espacio libre). Tal hecho, junto con la mayor duración y nivel comentados anteriormente, provoca un solapamiento temporal de la vocal con la consonante emitida inmediatamente después, según se observa en la ilustración 11. La simultaneidad temporal de la vocal y de la consonante con sus correspondientes niveles, así como las características espectrales de ambos sonidos, son las causantes del enmascaramiento parcial o total de la consonante, producido por la vocal, pues un tono de baja frecuencia y nivel elevado enmascara otro tono de frecuencia más elevada y nivel inferior.

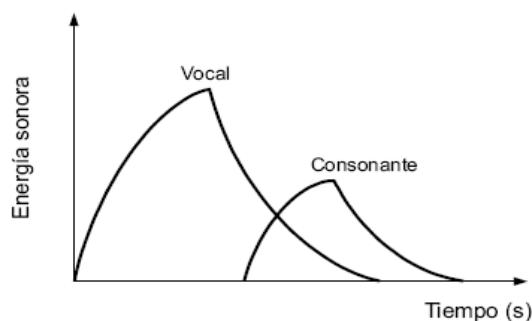


Ilustración 11: “Evolución temporal de la energía sonora correspondiente a la emisión de una vocal seguida de una consonante en un recinto cerrado (según Kurtovic)”

Finalmente, como quiera que el grado de inteligibilidad está estrechamente ligado a la correcta percepción de las consonantes por su importante contenido de altas frecuencias, el enmascaramiento de las mismas debido a un exceso de reverberación provoca indefectiblemente una pérdida de inteligibilidad en la sala, es decir el grado de inteligibilidad aumenta a medida que el tiempo de reverberación obtenido es menor.

2.5.4. Valor óptimo del tiempo de reverberación.

El valor óptimo del tiempo de reverberación depende del uso que tenga la sala. Si el tiempo de reverberación es largo, todos los sonidos individuales sonarán simultáneamente, por lo que debe conseguirse un compromiso entre aquellos valores que nos dan claridad por un lado y suficiente nivel sonoro por otro. En salas utilizadas para conferencias, la claridad es primordial, y deben situarse suficientes elementos absorbentes para disminuir el tiempo de reverberación lo más posible. En estos casos, si el nivel de intensidad es bajo, es mejor instalar amplificación eléctrica. Sin embargo, en el caso de salas dedicadas a escuchar música, puede alargarse el tiempo de reverberación, consiguiendo de esta forma una buena intensidad sonora. Este valor es el que proporciona la mejor calidad del sonido en un recinto y solo se puede determinar por métodos experimentales, esto es en base a los criterios de la audiencia sobre calidad acústica. Aquí se presenta un gráfico que abarca todas las opciones de óptimos para frecuencias medias.

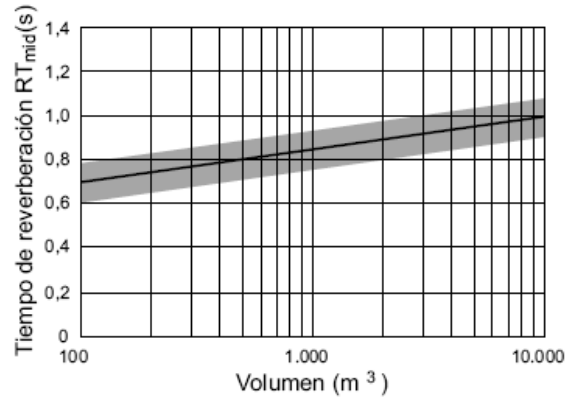


Ilustración 12: “Tiempos de reverberación óptimos para salas de distintos volúmenes”.

Como se puede observar en la ilustración, el valor de T_{60} recomendado, considerando volúmenes situados entre 100 y 10000 m³, se halla entre:

$$0,7 \leq T_{60} \leq 1(s)$$

Por otro lado, es conveniente que la variación de dicho valor en función del grado de ocupación de la sala sea lo menor posible con objeto de independizar al máximo sus características acústicas del número de personas.

Finalmente, es conveniente que el T_{60} se mantenga lo más constante posible con respecto a la frecuencia, especialmente a frecuencias bajas (bandas de octava centradas en 125 Hz y 250 Hz) como se ve en la ilustración 13, ya que un aumento de reverberación a baja frecuencia produce un empeoramiento del grado de inteligibilidad de la palabra. Por otro lado, a partir de la banda de octava centrada en 2 kHz, existe una disminución inevitable de los valores de T_{60} debida a la absorción producida por el aire. Dicha disminución se hace particularmente patente cuando se trata de espacios grandes.

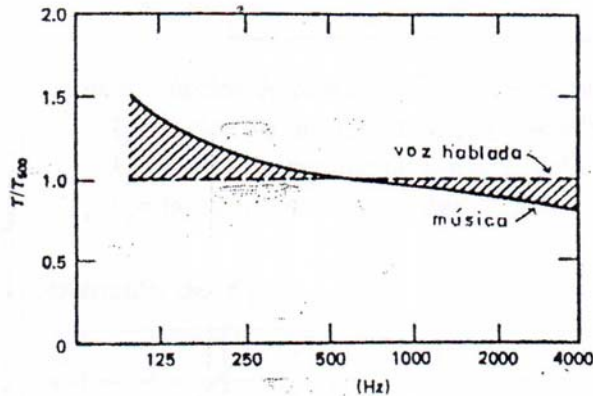


Ilustración 13: “Tiempos de reverberación óptimos para salas de distintas frecuencias”.

Sin embargo también es importante el volumen de la sala, pues el oído percibe cambios entre la densidad de energía reverberante a la densidad de energía directa. El parámetro que permite cuantificar esta sensación subjetiva se denomina efecto sala.

$$B = \frac{\text{densidad de energía reverberante}}{\text{densidad de energía directa}} \quad (47)$$

$$B = \frac{16 * \pi * r^2}{R} \quad (48)$$

Donde: B es el efecto de la sala.

r es la distancia entre el auditor y la fuente.

R es la constante del local definida como:

$$R = \frac{S \bar{\alpha}}{1 - \alpha} = \frac{A}{1 - \alpha} \quad (49)$$

Este parámetro se relaciona con el T_{60} en reemplazando en la ecuación 48, la ecuación 49 y la ecuación de Sabine para la absorción luego:

$$B = \frac{100\pi T(1 - \bar{\alpha})r^2}{V} \quad (50)$$

$$T = \frac{BV}{100\pi T(1 - \bar{\alpha})r^2} \quad (51)$$

Luego el volumen de la sala lo podemos expresar como $V = \sqrt[3]{V} x^2$ para reemplazarlo en la ecuación 51

$$T = \frac{\sqrt[3]{V} Bx^2}{100\pi T(1 - \bar{\alpha})r^2} \quad (52)$$

$$T = K\sqrt[3]{V} \quad (53)$$

Donde K es constante y es diferente para tipo de actividad que se realice en el recinto. El valor sugerido para una sala de clases es de 0,04 para un volumen menor a 1000 (m³)

Otra forma más reciente de designar el tiempo de reverberación óptimo característico de una sala, es en términos de la constante de la sala (Room constant) R,

Al igual que los tiempos de reverberación, esta constante posee un rango en el cual es óptima, este rango se aprecia en la siguiente figura:

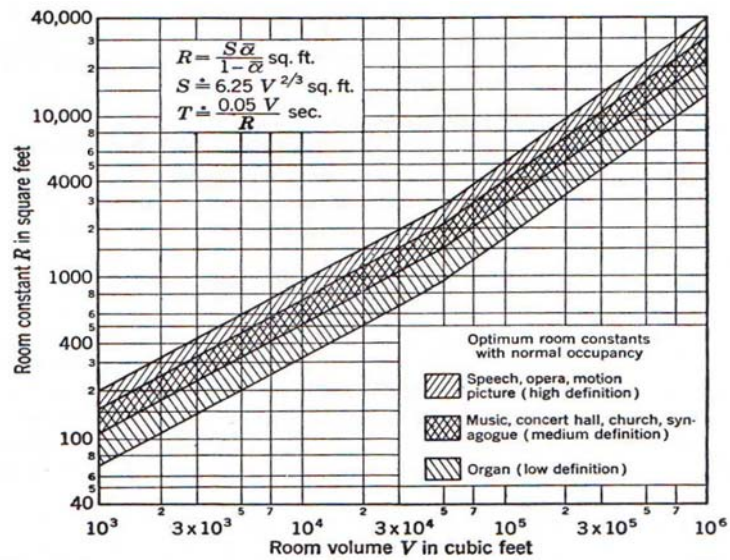


Ilustración 14: “Valores óptimos de la constante R a una frecuencia de 1000 y en función del volumen de la sala para tres tipos”.

CAPITULO 3. ABSORCION EXPERIMENTAL.

3.1. Consideraciones.

Antes de realizar la experiencia se tomaron varias consideraciones la mayoría de estas mencionadas en la norma ISO 354-2003 y otras de carácter práctico, para tener el menor margen de error y para poder comparar los resultados obtenidos con otros valores conseguidos en experiencias de este tipo. En esta experiencia se obtendrá el coeficiente de absorción (A) para personas, sillas y personas sentadas en ellas para dos condiciones, es decir verano e invierno.

3.1.1. Mobiliario.

La elección del mobiliario se realizó de manera tal de contar con los muebles más frecuentes de las salas de la facultad, además se evaluó que estos pudiesen entrar a la sala reverberante del IDIEM. Los muebles elegidos se muestran en las figuras 8 y 9 estos son el mobiliario típico del hall sur que también se encuentra en el edificio de computación.¹²

¹² Estos lugares pertenecen a la facultad de Ingeniería de la Universidad de Chile.



Ilustración 15: “Silla tipo”.



Ilustración 17: “Inmobiliario tipo”



Ilustración 16: “Mesa tipo”

Estos poseen las siguientes medidas:

Tabla 3: “Medidas mobiliario”

Elemento	Alto (m)	Ancho (m)	Largo (m)
Sillas	0,8	0,5	0,54
Mesas 1	0,75	0,4	1,08
Mesas 2	0,75	0,7	1,2

3.1.2. Individuos.

La primera consideración que se tomó con respecto a las personas, fue la cantidad de personas a utilizar en la prueba, ésta corresponde a un total de 7 personas mixtas, es decir hombres y mujeres, este número de personas se eligió por ser un número entre el mínimo dado por la norma¹³(3) y un máximo de 10 personas. Otra consideración fue la del tipo de vestimenta que vestirían los individuos al hacer la prueba, se les pidió que abajo de la ropa de abrigo que se utiliza en invierno, trajeran ropa de verano, como son short, faldas y poleras. El último reparo que se tuvo fue el de la protección auditiva de los individuos, dado que en la sala reverberante se alcanzan sonidos de nivel de 110 dB por lo que se les facilitaron protectores auditivos.

3.1.3. Cantidad de Ensayos.

El número de ensayos que se realizará serán seis ensayos, en los cuales se tratará de abarcar la mayor cantidad de variables y situaciones, es decir se medirá con las personas de pie, sentadas y sentadas con mesas, esto se hará con las 2 condiciones de temperatura. La cantidad de ensayo y las diferentes situaciones se realizara para tener datos útiles en la experiencia siguiente y para poder corroborar los datos entre cada medición. Además en cada ensayo se tomaran distintos tiempos, decaimientos, para cada caso es decir se cambiará al micrófono de posición y se realizará nuevamente, para esto se procederá según la norma, por lo tanto se tomarán más de 10 decaimientos. Los ensayos que se realizarán se aprecian en la siguiente tabla:

¹³ Norma ISO 354-2003 punto 6.2.2.3.

Tabla 4: “Ensayos”

Ensayo	Tipo
1	Personas de pie con ropa de invierno
2	Personas sentadas con ropa de invierno
3	Personas sentadas con ropa de verano
4	Personas de pie con ropa de verano
5	Solo sillas
6	Sala vacía

3.2. Procedimiento.

La experiencia se realizó, en la sala reverberante del IDIEM, el día lunes 10 de junio del 2008, a las 14:00 hrs. La temperatura en la sala era de 17 ° C y de las siete personas, dos eran mujeres.

Lo primero que se realizó fue marca la sala para determinar la ubicación de los individuos en esta, esta posición era la que debían ocupar durante todas las experiencias, además se entregaron los protectores acústicos y se hizo una pequeña explicación sobre el procedimiento de la experiencia. Una vez ubicados, se procedió a realizar la primera toma de datos, esta era en la posición de pie y con ropa de invierno, se realizaron 12 posiciones de micrófono, cada una de estas posiciones duraba alrededor de un minuto y medio. Concluida la primera experiencia, se procedió a ingresar las sillas a la sala, esto no fue del todo sencillo, pues las sillas no cabían por la puerta de la sala reverberante, por lo tanto se tuvo de desarmar todas las sillas e ingresarlas por partes, para así, poder realizar la segunda toma de datos en la posición sentados con ropa de invierno.

Luego de realizar las 12 posiciones de micrófono se paso a la tercera posición, la cual era sentados con ropa de verano y luego se procedió a medir dos posiciones restantes, las cuales era de pie con ropa de verano y la sala solo con sillas. Las posiciones con la mesa no se realizaron por el hecho de que el valor de absorción de la

mesa era muy pequeño y no variaría el valor de la absorción final. Para finalizar se tomaron valores de la sala vacía.

3.3. Valores Obtenidos

Los resultados obtenidos se presentan en las próximas 6 tablas, en ellas se muestran los tiempos de reverberación en cada posición y para cada frecuencia, además del valor de la absorción del aire, el valor promedio de los tiempos y del área de absorción para cada frecuencia.

Tabla 5: “Valores T_{60} posición de pie con ropa de invierno”

T60 (s)	Frecuencias (Hz)																	
Posición	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
pie invierno 01	6,28	7,21	7,21	8,7	7,15	6,01	7,21	4,43	3,57	4,11	3,94	3,56	3,45	2,81	3,13	2,47	1,99	1,47
pie invierno 02	5,83	5,9	6,84	5,91	6,84	6,08	8,45	4,81	5,3	5,42	3,72	3,62	4,17	2,97	1,93	2,37	1,72	1,65
pie invierno 03	7,32	5,08	5,83	6,2	8,27	7,79	5,52	4,57	4,84	5,65	4,05	3,78	2,88	3,34	3,25	2,43	2,11	1,69
pie invierno 04	6,54	6,92	6,99	8,36	8,23	5,38	6,5	4,49	5,43	5,76	4,66	4,17	4,53	2,99	3,04	2,61	2,24	1,78
pie invierno 05	8,17	4,53	5,94	9,77	6,49	9,24	6,17	5,79	4,7	3,94	3,31	3,9	3,62	2,99	3,17	2,68	1,86	1,56
pie invierno 06	4,96	6,63	5,63	8,94	8,41	6,76	7,08	4,38	4,32	3,29	4,57	3,48	3,44	2,88	2,85	2,3	2,38	1,74
pie invierno 07	6,02	6,87	7,54	7,46	7,62	5,48	6,08	5,65	4,05	4,05	4,49	3,28	2,94	2,94	3,18	2,48	2,06	1,77
pie invierno 08	5,68	6,57	7,24	6,47	8,59	7,21	5,33	4,69	4,36	4,07	3,39	3,49	3,48	2,6	2,43	2,41	2,05	2,03
pie invierno 09	6,28	4,71	5,72	9,15	8,6	5,45	5,93	5,68	4,38	3,5	3,46	3,6	3,27	2,93	2,85	2,92	2,4	1,57
pie invierno 10	4,72	7,22	5,75	6,84	8,04	9,08	4,38	5,33	4,81	4,06	3,85	3,32	2,91	2,47	2,78	2,49	1,91	1,81
pie invierno 11	7,24	5,94	6,97	8,27	8,06	6,23	6,09	3,66	4,66	4,64	3,62	3,39	3,68	2,71	2,92	2,22	1,88	1,59
pie invierno 12	6,28	4,23	7,58	7,74	8,17	7,75	6,68	4,45	4,6	4,54	3,87	4,35	3,67	2,38	2,59	2,39	1,93	1,62
m1 (m^{-1})	2E-07	3E-07	5E-07	8E-07	1E-06	2E-06	3E-06	5E-06	8E-06	1E-05	2E-05	3E-05	5E-05	8E-05	1E-04	2E-04	0,0003	0,0005
Promedio (s)	6,28	5,87	6,60	7,82	7,87	6,87	6,29	4,83	4,59	4,42	3,91	3,66	3,50	2,83	2,84	2,48	2,04	1,69
pie inv A1 (m^2)	6,44	6,89	6,12	5,17	5,14	5,88	6,43	8,37	8,81	9,14	10,32	11,02	11,50	14,20	14,11	16,12	19,48	23,46

Tabla 6: “Valores T_{60} posición sentados con ropa de invierno”

T60 (s)	Frecuencias (Hz)																	
Posición	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
sentado invierno 13	9,87	9,37	6,5	4,9	7,06	5,55	4,57	4,82	3,64	4,45	4,21	3,06	3,4	3,24	2,79	2,62	1,78	2,05
sentado invierno 14	8,14	7,88	6,5	5,89	4,78	4,9	5,16	3,89	3,66	4,11	3,73	3,85	3,12	3,44	3,53	2,54	2,25	1,6
sentado invierno 15	3,9	5,01	6,93	5,94	7,07	6,21	5,39	4,16	3,01	4,1	3,63	4,7	3,35	3,25	2,9	2,89	1,85	1,71
sentado invierno 16	5,48	7,87	6,04	7,06	4,79	6,01	5,66	3,75	3,87	3,11	4,05	3,63	3,11	3,14	2,62	2,43	2,24	2,05
sentado invierno 17	7,39	7,94	6,64	7,14	4,5	5,87	4,01	4,19	5,3	4,84	4	4,01	4,47	2,99	2,72	2,03	2,17	1,85
sentado invierno 18	6,48	6,58	6,5	7,77	6,14	5,1	3,5	4,11	4,14	4,66	3,41	3	3,22	3,04	3,01	2,33	2,04	1,84
sentado invierno 19	6,26	6,58	4,97	6,26	5,85	5,23	3,94	4,12	3,83	3,82	4,16	5,43	4,14	2,74	2,91	2,21	2,27	1,85
sentado invierno 20	6,96	6,64	6,5	7,58	6,18	5,49	4,98	4,56	3,92	4,11	2,93	4,36	4,24	3,01	2,8	2,45	2,07	1,81
sentado invierno 21	4,43	7,08	5,21	5,05	5,23	4,98	5,83	4,72	4,71	3,4	4,12	3,47	3,8	3,13	2,93	2,6	2,22	1,73
sentado invierno 22	6,26	9,78	6,71	7,14	5,04	5,54	3,69	4,98	3,64	3,63	4,2	3,49	3,4	2,83	2,9	2,33	1,96	1,64
sentado invierno 23	8,6	7,45	6,53	6,3	5,83	6,23	5,3	3,5	4,69	3,48	3,26	3,98	3,23	3,23	2,91	2,46	2,48	1,99
sentado invierno 24	6,83	5,03	6,49	7,14	6,54	5,32	5,11	3,53	3,58	4,33	3,77	2,76	3,25	3,21	3,18	2,49	2,33	1,54
m1 (m ⁻¹)	2E-07	3E-07	5E-07	8E-07	1E-06	2E-06	3E-06	5E-06	8E-06	1E-05	2E-05	3E-05	5E-05	8E-05	1E-04	2E-04	0,0003	0,0005
Promedio (s)	6,26	7,00	6,25	6,74	5,72	5,60	4,74	4,16	4,07	3,95	3,75	3,88	3,62	3,06	2,89	2,42	2,16	1,80
sit inv A2 (m²)	6,46	5,78	6,47	6,00	7,07	7,22	8,53	9,71	9,93	10,23	10,76	10,39	11,12	13,16	13,89	16,51	18,40	21,99

Tabla 7: “Valores T_{60} posición sentados con ropa de verano”

T60 (s)	Frecuencias (Hz)																	
Posición	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
sentado verano 25	6,55	7,72	7,11	6,59	6,71	7,38	7,53	5,09	4,26	5,15	4,07	3,19	3,71	3,72	2,66	2,78	2,69	1,87
sentado verano 26	6,57	9,06	7,48	6,83	5,54	7,17	5,5	4,77	5,5	5,19	6,22	3,72	3,21	3,43	3,89	2,95	2,37	1,96
sentado verano 27	7,9	8,33	4,82	4,86	6,28	6,05	7,38	5,19	5,71	3,6	4,04	5,2	3,48	3,43	2,63	2,51	2,17	1,76
sentado verano 28	5,81	6,14	7,12	9,33	7,97	7,23	5,53	4,61	5,64	3,76	3,96	4,33	3,33	3,38	3,16	2,77	2,42	1,57
sentado verano 29	6,65	7,13	6,49	7,22	9,79	9,02	6,56	4,43	3,8	5,41	3,84	3,95	3,26	3,16	2,73	2,65	2,73	2,05
sentado verano 30	6,34	6,14	7,45	7,22	8,98	6,3	4,01	6,32	3,79	3,75	3,88	4,08	3,86	4,12	2,96	3,06	2,27	2,13
sentado verano 31	6,93	6,38	4,81	5,85	8,05	7,14	8,37	4,5	4,44	4,98	4,38	3,88	3,72	3,46	2,76	3,03	2,42	2,19
sentado verano 32	7,23	5,71	5,46	8,46	4,45	5,47	6,14	5,12	4,17	4,96	3,09	3,29	3,75	3,71	2,95	2,71	2,05	1,59
sentado verano 33	6,56	7,75	9,97	8,06	6,06	6,52	9,23	6,35	4,13	3,22	3,97	4	4,19	3,52	3,15	2,8	2,61	2,17
sentado verano 34	4,89	5,44	9,3	7,22	8,53	7,54	6,01	6,61	5,12	4,71	5,82	5,35	3,5	3,57	3,92	2,71	2,21	1,73
sentado verano 35	6,34	6,14	5,5	7,64	5,83	6,21	6,42	6,25	5,81	3,54	3,62	3,69	4,07	3,84	3,07	2,94	2,41	1,68
sentado verano 36	5,88	5,98	8,15	6,34	5	7,99	7,81	5,09	4,87	4,62	5,45	3,98	3,87	3,52	3,29	3,18	2,32	2,09
m1 (m ⁻¹)	2E-07	3E-07	5E-07	8E-07	1E-06	2E-06	3E-06	5E-06	8E-06	1E-05	2E-05	3E-05	5E-05	8E-05	1E-04	2E-04	0,0003	0,0005
Promedio (s)	6,45	6,51	6,91	7,22	7,09	6,95	6,75	5,45	4,75	4,26	4,21	4,18	3,70	3,57	3,06	2,84	2,36	1,90
sit ver A3 (m²)	6,27	6,21	5,86	5,60	5,70	5,82	5,99	7,42	8,51	9,49	9,60	9,66	10,87	11,25	13,09	14,07	16,83	20,86

Tabla 8: “Valores T₆₀ posición de pie con ropa de verano”

T60 (s)	Frecuencias (Hz)																	
Posición	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
pie verano 37	6,86	6,91	7,23	6,63	7,33	6,28	5,07	7,25	5,74	5,54	3,93	4,22	3,87	2,94	2,11	2,88	2,46	1,53
pie verano 38	5,87	7,38	6,52	8,94	9,03	7,23	9,51	6,2	5,35	5,12	5,12	4,16	4,39	3,55	2,77	2,87	2,01	1,95
pie verano 39	6,12	6,17	6,89	7,39	8,15	6,59	6,68	7	6,32	7,32	4,73	4,01	3,28	3,71	3,57	2,98	2,14	1,71
pie verano 40	7,52	8,23	6,35	6,76	9,71	8,18	9,22	5,73	6,68	4,87	5,32	3,56	4,75	3,07	2,83	2,63	1,99	1,99
pie verano 41	5,45	5,14	4,9	7,69	8,76	6,57	5,59	8,27	5,43	3,79	4,26	4,35	3,11	3,68	3,16	2,7	1,91	1,76
pie verano 42	7,05	5,6	6,45	6,82	5,58	8	7,4	5,37	5,75	4,95	5,68	4,81	3,1	3,41	2,9	2,26	2,14	1,84
pie verano 43	7,66	8,38	5,07	6,37	8,69	8,48	8,34	5,46	5,78	5,44	6,01	3,71	4,77	3,67	2,92	2,61	2,27	1,84
pie verano 44	7,99	4,71	6,26	7,69	8,69	7,29	9,3	6,84	6,15	5,29	5,35	3,99	3,53	3,37	3,04	2,67	2,46	1,79
pie verano 45	7,13	6,03	6,7	6,87	9,25	5,99	5,28	7,44	5,79	4,83	4,28	3,45	3,3	4,6	2,82	2,97	2,23	1,68
pie verano 46	5,55	8,01	4,8	9,01	7,58	6,33	6,72	6,34	5,74	5,76	3,91	4,04	3,36	3,18	3,48	2,82	2,42	1,95
pie verano 47	7	5,93	6,68	8,12	8,49	7,59	7,6	5,42	6,05	5,01	5,33	4,5	4,19	3,06	3,05	2,76	2,5	1,76
pie verano 48	7,77	5,22	5,42	8,55	9,9	7,22	6,32	6,59	5,16	7,17	5,55	5,04	3,58	4,17	3,3	2,86	2,37	2,09
m1 (m ⁻¹)	2E-07	3E-07	5E-07	8E-07	1E-06	2E-06	3E-06	5E-06	8E-06	1E-05	2E-05	3E-05	5E-05	8E-05	1E-04	2E-04	0,0003	0,0005
Promedio (s)	6,92	6,34	5,95	7,53	8,48	7,22	7,25	6,45	5,89	5,44	5,04	4,15	3,70	3,59	3,11	2,73	2,24	1,84
pie ver A4 (m²)	5,84	6,38	6,80	5,37	4,77	5,60	5,58	6,27	6,87	7,42	8,00	9,73	10,89	11,18	12,90	14,65	17,73	21,50

Tabla 9: “Valores T_{60} posición solo sillas”

T60 (s)	Frecuencias (Hz)																	
Posición	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
vacío con sillas 49	5,81	7,77	7,76	8,5	7,56	8,55	5,19	5,5	6,68	4,4	5,57	4,57	4,72	3,58	2,9	3,26	2,62	2,44
vacío con sillas 50	8,42	8,73	6	5,76	5,89	7,48	7,22	5,75	7,13	5,47	4,52	4,29	4,77	4,49	3,26	2,89	3,18	2,37
vacío con sillas 51	6,63	9,26	7,22	7,36	8,02	6,66	8,79	6,7	6,19	6,47	5,45	4,54	4,37	3,97	3,45	3,65	2,92	2,35
vacío con sillas 52	6,82	6,78	7,65	9,44	7,76	6,34	6,42	6,89	6,25	6,31	4,42	5,67	4,35	4,05	4,23	3,48	2,88	2,28
vacío con sillas 53	5,41	5,71	7,76	8,27	8,13	6,31	6,92	7,22	5,26	6,45	4,92	5,32	4,39	3,91	3,59	3,26	2,55	2,31
vacío con sillas 54	5,1	7,46	7,76	8,16	8,04	8,51	6,11	4,64	5,79	6,49	5,78	4,12	4,91	4,79	3,8	2,79	2,58	2,23
vacío con sillas 55	7,13	4,45	8,15	7,53	8,4	9,34	7,5	5,69	7,12	3,63	4,84	4,45	4,58	4,48	4,27	4,12	2,75	2,93
vacío con sillas 56	8,48	5,46	6,64	7,36	9,21	7,68	9,11	5,96	5,39	5,82	6,35	4,74	3,56	3,95	4,08	3,27	2,98	2,2
vacío con sillas 57	4,51	5,55	9,19	6,04	7,6	5,29	5,92	6,28	4,88	5,78	5,33	3,83	4,14	4,07	3,39	2,97	2,74	2,32
vacío con sillas 58	6,83	5,11	8,22	7,36	9,71	5,88	7,72	6,15	4,18	4,75	4,47	4,74	4,36	3,9	3,95	2,75	3	2,23
vacío con sillas 59	7,65	8,68	8,64	7,12	8,22	9,48	5,66	7,15	7,32	5,82	4,96	5,13	4,21	3,75	4,44	3,69	2,76	2,45
vacío con sillas 60	8,05	8,64	6,35	7,24	8,13	7,29	5,49	5,5	4,77	5,37	4,96	4,83	3,6	4,27	3,77	3,19	3,04	2,03
m1 (m^{-1})	2E-07	3E-07	5E-07	8E-07	1E-06	2E-06	3E-06	5E-06	8E-06	1E-05	2E-05	3E-05	5E-05	8E-05	1E-04	2E-04	0,0003	0,0005
Promedio (s)	6,66	6,71	7,76	7,59	8,32	7,28	6,96	6,22	5,72	5,69	5,15	4,74	4,25	4,11	3,90	3,32	2,82	2,33
sillas A5 (m^2)	6,07	6,03	5,21	5,33	4,86	5,56	5,81	6,50	7,07	7,10	7,84	8,51	9,48	9,76	10,26	12,01	14,04	16,86

Tabla 10: “Valores T₆₀ sala vacía”

T60 (s)	Frecuencias (Hz)																	
Posición	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
vacío 01	8,27	8,32	9,82	8,13	9,35	6,27	7,95	9,96	9,53	6,73	7,91	8,59	6,16	5,83	4,66	4	3,62	2,65
vacío 02	6,94	8,68	7,95	9,7	7,85	10,39	11,36	9,08	8,03	11,47	7,48	8,35	7,11	5,83	4,6	3,68	2,95	2,74
vacío 03	7,13	8,73	7,12	8,57	9,31	9,14	8,89	8,48	8,01	9,75	7,9	7,93	7,55	5,99	4,58	3,75	3,17	2,59
vacío 04	6,74	6,66	7,38	9,39	11	8,49	10,25	7,19	6,17	8,13	7,62	7,71	4,98	5,89	5,53	3,74	3,27	2,78
vacío 05	7,19	5,11	10	8,13	8,2	11,4	8,95	7,81	6,3	8,58	8,01	8,2	6,82	6,15	4,52	4,39	3,43	2,29
vacío 06	5,61	7,62	7,95	7,59	11,69	5,74	8,15	9,48	6,77	8,54	7,32	7,72	5,84	6,22	4,96	4,18	3,18	2,37
vacío 07	8,09	9,83	8,94	6,99	9,01	9,67	7,67	9,96	7,9	9,37	8,36	7,44	5,78	5,69	5,02	3,22	2,82	2,5
vacío 08	8,43	8,35	9,23	7,61	11,53	8,04	10,56	8,44	7,88	6,76	8,14	7,72	6,17	5,78	4,87	3,99	3,6	2,24
vacío 09	5,13	7,46	7,67	8,13	8,05	7,9	8,2	8,82	8,74	10,48	7,78	7,87	6,63	6,05	5,33	4,11	3,47	2,5
vacío 10	7,19	10,23	7,51	9,02	8,19	11,67	8,38	8,93	8,41	7,54	7,29	7,21	7,12	5,34	4,39	3,93	3,26	2,32
vacío 11	5,44	7,41	7,95	8,92	8,41	5,89	8,65	7,91	6,97	8,65	7,67	6,96	6,26	5,89	4,71	3,77	2,86	2,34
vacío 12	8,42	7,05	7,32	8,13	8,96	6,93	8,94	7,38	7,5	7,61	9,67	7,49	6,64	6,22	5,13	3,78	3,17	2,32
m1 (m ⁻¹)	2E-07	3E-07	5E-07	8E-07	1E-06	2E-06	3E-06	5E-06	8E-06	1E-05	2E-05	3E-05	5E-05	8E-05	1E-04	2E-04	0,0003	0,0005
Promedio (s)	6,94	7,85	8,11	8,25	9,44	8,49	8,86	8,44	7,47	8,54	7,98	7,63	6,38	5,92	4,90	4,11	3,22	2,43
vacío A6 (m²)	5,83	5,16	4,99	4,90	4,29	4,76	4,56	4,79	5,41	4,72	5,05	5,28	6,29	6,75	8,13	10,21	12,25	16,21

Finalmente con los valores de la superficie de absorción para los distintos casos, se restaron con el valor de la sala vacía y luego se obtuvo el cociente de estas por el número de objetos para obtener el área de absorción por objeto.

Tabla 11: “Áreas de Absorción”

Frecuencia (Hz)	A_t sillas (m²)	A_t personas verano (m²)	A_t personas invierno (m²)	A_t personas sentadas invierno (m²)	A_t personas sentadas verano (m²)
100	0,242	0,011	0,614	0,632	0,437
125	0,872	1,222	1,732	0,626	1,053
160	0,224	1,806	1,136	1,480	0,867
200	0,427	0,470	0,270	1,099	0,698
250	0,573	0,483	0,851	2,788	1,415
315	0,792	0,833	1,120	2,460	1,056
400	1,245	1,020	1,872	3,968	1,433
500	1,713	1,482	3,586	4,926	2,633
630	1,659	1,455	3,403	4,522	3,101
800	2,374	2,695	4,417	5,509	4,770
1000	2,786	2,951	5,271	5,706	4,548
1250	3,234	4,451	5,742	5,112	4,383
1600	3,183	4,600	5,205	4,830	4,582
2000	3,002	4,430	7,441	6,401	4,497
2500	2,131	4,770	5,978	5,758	4,962
3150	1,796	4,440	5,906	6,302	3,864
4000	1,793	5,483	7,237	6,150	4,582
5000	0,658	5,291	7,254	5,779	4,654

Tabla 12: “Áreas de Absorción por objeto”

Frecuencia (Hz)	A_i cada silla (m^2)	A_i una persona verano (m^2)	A_i una persona invierno (m^2)	A_i una persona sentada invierno (m^2)	A_i una persona sentada verano (m^2)
100	0,035	0,002	0,088	0,090	0,062
125	0,125	0,175	0,247	0,089	0,150
160	0,032	0,258	0,162	0,211	0,124
200	0,061	0,067	0,039	0,157	0,100
250	0,082	0,069	0,122	0,398	0,202
315	0,113	0,119	0,160	0,351	0,151
400	0,178	0,146	0,267	0,567	0,205
500	0,245	0,212	0,512	0,704	0,376
630	0,237	0,208	0,486	0,646	0,443
800	0,339	0,385	0,631	0,787	0,681
1000	0,398	0,422	0,753	0,815	0,650
1250	0,462	0,636	0,820	0,730	0,626
1600	0,455	0,657	0,744	0,690	0,655
2000	0,429	0,633	1,063	0,914	0,642
2500	0,304	0,681	0,854	0,823	0,709
3150	0,257	0,634	0,844	0,900	0,552
4000	0,256	0,783	1,034	0,879	0,655
5000	0,094	0,756	1,036	0,826	0,665

CAPITULO 4. ABSORCION DE LA SALA DE CLASE.

En este capítulo se realizará la parte más llamativa de este trabajo de título, esta se puede mencionar en dos grandes partes, la primera es la obtención de los tiempos de absorción de las salas de clases de manera experimental y la segunda, la obtención de estos a través de cálculos utilizando los datos obtenidos en el laboratorio.

4.1. Obtención de los tiempos de absorción de la sala.

4.1.1. Consideraciones

Antes de realizar la experiencia se tomaron varias consideraciones la mayoría de estas mencionadas en la norma ISO 354-2003 y otras de carácter práctico, para tener el menor margen de error y para poder utilizar correctamente los valores obtenidos antes en el laboratorio.

4.1.1.1. Locación

Las salas elegidas fueron las salas B205 y B206 de la facultad de ciencias físicas y matemáticas de la Universidad de Chile dado que estas salas poseen las características del mobiliario mencionado anteriormente. La sala es más grande que la sala B206 y posee más sillas y mesas. Las diferencias de estas, se aprecia en la siguiente tabla, además se muestran una figura característica de cada sala.

Tabla 13: “Caracterización de las salas”

Sala	altura (m)	ancho (m)	Largo (m)	V (m ³)	Pizarra (m ²)	Ventanas (m ²)	Puertas (m ²)	sillas	Mesas	Superficie total (m ²)
B205	3,60	11,96	6,08	261,78	9,35	37,48	4,788	73	21	275,32
B206	2,60	3,96	9,96	102,55	4,77	20,78	2,814	25	13	151,27



Ilustración 18: “Sala B205”



Ilustración 19: “Sala B206”

4.1.1.2. Individuos

La consideración que se tomo con respecto a las personas, era que el total de ellas debía ser cercana a las 15 personas, pues de ser muy pocas no representarían una diferencia notoria en los resultados obtenidos por el sonómetro. Además se decidió que estas permanecerían sentadas en las salas.

4.1.1.3. Cantidad de Ensayos

La cantidad de ensayos que se realizaran en las salas son un total de 24 posiciones para la sala B205 con personas y de 12 para la sala vacía, esto se debe a la disponibilidad de la sala y que se prefirió tomar más datos cuando las personas estén dentro de la sala pues los valores están más propensos a error. Para la sala pequeña, la sala B206, se optó por realizar menos ensayos en los dos casos.

4.1.2. Procedimiento

La experiencia se realizó en el edificio de computación de la facultad de ciencias físicas y matemáticas de la Universidad de Chile, el día 9 de julio de 2008 a las 17:00 hrs. La temperatura en las salas era 19 °C y se contó con la participación de 13 personas de las cuales 3 eran mujeres.

Lo primero que se realizó fue marcar la sala B205 para determinar la ubicación de los puntos del micrófono en esta, luego se asignó una posición a cada persona en la sala, esta posición era la que debían ocupar durante todas las experiencias, además se entregaron los protectores acústicos y se hizo una pequeña explicación sobre el procedimiento de la experiencia. Una vez ubicados, se procedió a realizar la primera

toma de datos. Después de esto se procedió a abandonar la sala y se tomaron los datos de la sala vacía.

Luego pasamos a la sala siguiente, la sala B206, en la cual se realizó un procedimiento similar al anterior.

4.1.3. Valores Obtenidos

A continuación se presentan los valores del tiempo de reverberación obtenidos en las 2 salas, para cada frecuencia y para cada posición del micrófono, además se presentan los tiempos promedios, el valor del coeficiente m que corresponde a la absorción del sonido debido al aire y el área de absorción para cada frecuencia.

Tabla 14: “Valores T₆₀ Sala B205 con personas”

T60 (s)	Frecuencias (Hz)																	
Posición	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
1	0,64	0,82	2,03	0,87	1,02	0,78	0,29	0,47	0,42	0,58	0,42	0,54	0,16	0,47	0,5	0,42	0,32	0,26
2	0,3	1	1,43	1,22	1,56	0,63	1,15	0,66	0,11	0,4	0,89	0,43	0,48	0,42	0,22	0,48	0,53	0,4
3	0,57	1,14	1,74	0,98	1,44	0,59	0,52	0,52	0,6	0,75	0,6	0,21	0,35	0,36	0,37	0,51	0,37	0,27
4	0,26	1,11	0,16	0,4	1,05	0,23	0,38	1,23	0,55	0,34	0,53	0,36	0,35	0,48	0,59	0,55	0,42	0,31
5	0,75	1,31	1,11	1	0,72	0,62	0,25	0,64	0,4	0,36	0,45	0,63	0,46	0,59	0,47	0,44	0,39	0,25
6	1,98	0,96	1,05	1,07	2,2	0,68	0,45	1,55	0,61	0,56	0,36	0,58	0,3	0,42	0,33	0,45	0,43	0,33
7	0,48	0,74	1,48	0,52	0,97	0,47	0,41	0,72	0,15	0,15	0,89	0,35	0,22	0,44	0,2	0,13	0,35	0,17
8	2,06	0,58	0,47	0,87	0,76	0,59	0,4	1,57	0,63	0,05	0,67	0,37	0,19	0,52	0,26	0,09	0,51	0,11
9	0,88	1,06	0,99	2,07	0,6	0,47	0,41	0,65	0,83	0,31	0,56	0,36	0,53	0,36	0,44	0,2	0,44	0,27
10	1,88	1,03	1,15	1,45	0,92	0,74	0,46	1,78	0,79	0,28	0,36	0,39	0,3	0,33	0,36	0,32	0,35	0,29
11	1,21	1,07	0,65	1,21	0,78	0,97	0,71	0,54	0,86	0,85	0,65	0,35	0,43	0,39	0,41	0,39	0,51	0,34
12	1,76	0,88	0,78	1,7	0,99	0,3	0,85	0,36	0,84	0,72	0,53	0,26	0,24	0,36	0,31	0,4	0,41	0,34
13	0,17	1,54	1,14	1,02	1,66	0,49	0,7	0,78	0,71	0,57	0,61	0,26	0,17	0,59	0,27	0,22	0,56	0,12
14	0,14	1,21	1,54	0,86	1,84	0,25	1,38	1,44	0,9	0,63	0,77	0,32	0,28	0,48	0,4	0,25	0,6	0,17
15	1,97	1,17	1,93	0,23	0,57	0,83	1,39	1,11	0,92	0,32	0,71	0,17	0,26	0,31	0,21	0,31	0,59	0,19
16	2,33	0,99	0,57	1,03	0,48	0,74	0,73	0,88	0,35	0,3	0,54	0,57	0,28	0,5	0,18	0,41	0,58	0,29
17	1,15	0,88	0,56	1,01	0,88	0,59	0,53	0,45	0,52	0,64	0,82	0,45	0,24	0,41	0,41	0,35	0,26	0,34
18	0,71	1,01	1,54	0,51	1,12	0,48	1,5	0,5	0,38	0,49	0,49	0,23	0,34	0,45	0,38	0,46	0,64	0,38
19	0,49	1,44	0,48	1,66	0,73	0,05	1,07	1,09	0,5	0,26	0,39	0,3	0,39	0,53	0,49	0,36	0,46	0,38
20	1,21	1,23	0,84	0,45	1,24	1,04	1,06	0,87	0,5	0,41	0,46	0,39	0,28	0,58	0,41	0,59	0,57	0,46
21	0,54	0,93	0,23	1,19	0,81	0,99	0,14	0,7	0,35	0,45	0,53	0,38	0,45	0,41	0,49	0,43	0,33	0,39
22	0,36	1,69	1,34	1,73	2,5	0,52	0,17	1,31	0,38	0,59	0,54	0,5	0,3	0,41	0,34	0,42	0,46	0,32
23	2,44	1,09	0,74	0,93	1,3	1,01	0,42	0,56	0,49	0,43	0,41	0,22	0,26	0,38	0,5	0,37	0,35	0,48
24	1,21	0,91	1,01	1,18	0,52	1,11	1,04	1,08	0,71	0,47	0,56	0,51	0,35	0,43	0,34	0,18	0,34	0,35
25	0,39	1,06	1,22	0,62	1,48	0,21	0,63	1,05	0,54	0,47	0,55	0,37	0,36	0,43	0,44	0,43	0,44	0,33
m1 (m ⁻¹)	2E-07	3E-07	5E-07	8E-07	1E-06	2E-06	3E-06	5E-06	8E-06	1E-05	2E-05	3E-05	5E-05	8E-05	0,0001	0,0002	0,0003	0,0005
Promedio (s)	1,04	1,07	1,05	1,03	1,13	0,62	0,68	0,90	0,56	0,46	0,57	0,38	0,32	0,44	0,37	0,37	0,45	0,30
A11 (m ²)	40,77	39,30	40,30	40,93	37,49	68,60	61,92	46,87	75,14	92,71	73,82	111,04	132,34	95,41	113,09	114,99	93,81	139,44

Tabla 15: “Valores T₆₀ Sala B205 vacía”

T60 (s)	Frecuencias (Hz)																	
Posición	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
sala 1 vacía 01	1,3	0,65	0,4	1,01	0,81	0,66	0,77	0,98	0,34	0,46	0,41	0,55	0,32	0,48	0,51	0,47	0,55	0,5
sala 1 vacía 02	3,18	1,41	0,95	0,45	1,19	1,05	0,45	0,7	0,88	0,19	0,53	0,15	0,39	0,38	0,43	0,31	0,61	0,33
sala 1 vacía 03	2,35	0,81	2,2	0,5	0,85	1,03	0,78	0,68	0,67	0,78	0,34	0,57	0,61	0,36	0,36	0,33	0,59	0,24
sala 1 vacía 04	0,98	1,44	2,34	1,66	1,26	0,9	0,68	0,79	1,12	0,21	1,11	0,26	0,6	0,47	0,56	0,19	0,53	0,11
sala 1 vacía 05	0,36	0,56	1,21	2	1,45	1,18	0,68	0,86	0,45	0,87	0,32	0,22	0,36	0,38	0,42	0,41	0,41	0,45
sala 1 vacía 06	1,03	1,52	0,26	1,09	1,01	1,19	0,63	0,88	0,51	0,7	0,66	0,43	0,44	0,42	0,34	0,5	0,35	0,24
sala 1 vacía 07	1,12	1,39	1,82	1,44	1,33	0,66	0,82	1,01	0,23	0,43	0,47	0,34	0,68	0,36	0,22	0,45	0,48	0,31
sala 1 vacía 08	0,96	1,22	1,72	0,98	1,41	0,45	0,91	1,12	0,72	0,85	0,92	0,26	0,54	0,51	0,25	0,49	0,47	0,27
sala 1 vacía 09	2,06	0,64	2,01	1,73	0,88	0,98	0,87	0,8	0,4	0,38	0,56	0,54	0,31	0,44	0,42	0,36	0,39	0,51
sala 1 vacía 10	0,42	0,98	0,64	1,11	0,79	0,78	0,45	1,26	0,71	0,61	0,31	0,59	0,63	0,27	0,27	0,5	0,36	0,43
sala 1 vacía 11	1,2	0,88	0,68	0,44	1,37	0,52	0,72	1,22	0,38	0,49	0,93	0,44	0,4	0,33	0,47	0,57	0,4	0,34
sala 1 vacía 12	1,4	1,55	1,8	0,62	1,35	0,67	0,94	0,82	1,04	0,35	0,39	0,48	0,31	1,15	0,44	0,24	0,34	0,24
m1 (m ⁻¹)	2E-07	3E-07	5E-07	8E-07	1E-06	2E-06	3E-06	5E-06	8E-06	1E-05	2E-05	3E-05	5E-05	8E-05	0,0001	0,0002	0,0003	0,0005
Promedio (s)	1,36	1,09	1,34	1,09	1,14	0,84	0,73	0,93	0,62	0,53	0,58	0,40	0,47	0,46	0,39	0,40	0,46	0,33
A12 (m ²)	30,96	38,81	31,59	38,87	36,97	50,29	58,21	45,54	67,97	80,12	72,85	104,83	90,55	91,18	107,86	104,88	92,10	127,08

Tabla 16: “Valores T₆₀ Sala B206 con personas”

T60 (s)	Frecuencias (Hz)																	
Posición	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
1	0,51	0,41	0,29	0,83	0,71	0,31	0,59	0,45	0,27	0,19	0,37	0,28	0,16	0,28	0,29	0,32	0,31	0,22
2	0,18	0,77	1,76	0,4	0,56	0,75	0,18	0,38	0,36	0,19	0,41	0,29	0,24	0,2	0,22	0,34	0,18	0,21
3	0,64	0,73	0,53	0,39	0,68	0,57	0,62	0,32	0,29	0,27	0,49	0,24	0,47	0,31	0,53	0,43	0,37	0,29
4	0,58	0,84	1,14	0,19	0,79	0,17	0,33	0,33	0,27	0,32	0,36	0,26	0,27	0,55	0,22	0,39	0,31	0,27
5	0,45	0,73	0,57	0,57	0,78	0,29	0,27	0,8	0,55	0,41	0,31	0,26	0,24	0,44	0,43	0,4	0,42	0,29
6	0,76	1,07	0,69	0,78	0,75	0,45	0,88	0,87	0,31	0,45	0,3	0,29	0,16	0,23	0,26	0,34	0,22	0,28
7	0,63	0,88	1,4	0,74	0,66	0,69	0,16	0,61	0,19	0,38	0,4	0,37	0,32	0,29	0,62	0,37	0,42	0,35
8	0,45	0,38	1,12	0,64	0,34	0,46	0,81	0,37	0,22	0,25	0,43	0,23	0,29	0,21	0,44	0,45	0,37	0,25
m1 (m ⁻¹)	2E-07	3E-07	5E-07	8E-07	1E-06	2E-06	3E-06	5E-06	8E-06	1E-05	2E-05	3E-05	5E-05	8E-05	0,0001	0,0002	0,0003	0,0005
Promedio (s)	0,53	0,73	0,94	0,57	0,66	0,46	0,48	0,52	0,31	0,31	0,38	0,28	0,27	0,31	0,38	0,38	0,33	0,27
A21 (m ²)	31,49	22,77	17,64	29,13	25,10	35,84	34,44	32,02	53,76	53,76	43,08	59,57	61,50	52,66	43,89	43,43	50,75	61,04

Tabla 17: “Valores T₆₀ Sala B206 vacía”

T60 (s)	Frecuencias (Hz)																	
Posición	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
sala 2 vacía 01	0,66	0,86	1,05	0,69	1,18	0,51	0,98	0,54	0,7	0,3	0,41	0,33	0,26	0,33	0,58	0,36	0,45	0,4
sala 2 vacía 02	0,92	1,06	0,69	0,92	0,53	1,19	0,58	0,4	0,34	0,67	0,4	0,35	0,37	0,41	0,38	0,38	0,35	0,3
sala 2 vacía 03	0,99	0,96	2,21	0,33	0,76	0,64	0,5	0,55	0,53	0,47	0,52	0,36	0,35	0,53	0,48	0,49	0,41	0,35
sala 2 vacía 04	0,62	1,86	0,98	0,86	0,44	0,41	0,22	0,85	0,56	0,57	0,4	0,41	0,42	0,37	0,3	0,36	0,26	0,3
sala 2 vacía 05	0,37	0,48	2,14	0,71	0,6	0,54	0,44	0,73	0,34	0,44	0,32	0,21	0,32	0,33	0,37	0,37	0,34	0,35
sala 2 vacía 06	0,5	1,12	1,27	0,47	1,07	0,66	0,55	0,4	0,65	0,49	0,41	0,28	0,3	0,37	0,47	0,41	0,41	0,32
sala 2 vacía 07	0,99	0,87	0,43	0,63	0,31	1,03	0,3	0,7	0,16	0,49	0,32	0,31	0,25	0,37	0,39	0,36	0,22	0,25
sala 2 vacía 08	0,55	1,03	1,25	0,93	0,63	0,27	0,57	0,26	0,19	0,26	0,33	0,32	0,19	0,39	0,41	0,37	0,3	0,29
m1 (m ⁻¹)	2E-07	3E-07	5E-07	8E-07	1E-06	2E-06	3E-06	5E-06	8E-06	1E-05	2E-05	3E-05	5E-05	8E-05	0,0001	0,0002	0,0003	0,0005
Promedio (s)	0,70	1,03	1,25	0,69	0,69	0,66	0,52	0,55	0,43	0,46	0,39	0,32	0,31	0,39	0,42	0,39	0,34	0,32
A22 (m ²)	23,62	16,05	13,20	23,87	23,96	25,19	31,95	29,85	38,11	35,84	42,52	51,45	53,75	42,64	39,08	42,59	48,15	51,47

Para finalizar se presentan los datos de las diferencias de las dos áreas de absorción, es decir, del área de absorción de la sala con personas y sin ellas, esto se presenta para ambas salas.

Tabla 18: “Valores áreas de absorción”

Posición	sala 1 con personas A11 (m²)	sala 1 vacía A12 (m²)	A11-A12	sala 2 con personas A21 (m²)	sala 2 vacía (m²)	A21-A22
100	40,770	30,957	9,813	31,492	23,619	7,873
125	39,297	38,809	0,488	22,765	16,052	6,714
160	40,303	31,594	8,708	17,635	13,200	4,435
200	40,928	38,868	2,059	29,133	23,874	5,259
250	37,495	36,967	0,528	25,097	23,961	1,137
315	68,602	50,292	18,310	35,844	25,193	10,651
400	61,918	58,211	3,707	34,443	31,947	2,496
500	46,869	45,540	1,329	32,024	29,855	2,169
630	75,144	67,974	7,170	53,764	38,114	15,650
800	92,706	80,124	12,582	53,762	35,840	17,922
1000	73,818	72,853	0,965	43,076	42,522	0,554
1250	111,036	104,827	6,209	59,567	51,453	8,114
1600	132,338	90,551	41,786	61,499	53,747	7,752
2000	95,408	91,176	4,232	52,665	42,636	10,029
2500	113,088	107,865	5,224	43,894	39,084	4,810
3150	114,993	104,879	10,114	43,432	42,590	0,842
4000	93,808	92,104	1,704	50,748	48,148	2,599
5000	139,444	127,078	12,365	61,041	51,473	9,568

Con esto realizado se da por concluida la primera parte de este capítulo, ahora se procederá a la segunda parte, que es la obtención de estos valores, utilizando los datos obtenidos en el laboratorio.

4.2. Obtención de la absorción utilizando los datos de laboratorio.

Se realizará el cálculo de la absorción total de la sala, considerando a las personas sentadas y a todos los materiales absorbentes en ella. Los valores que se utilizarán para este cálculo serán para el caso de las personas sentadas y de las sillas, los valores obtenidos en el laboratorio, en cambio para los materiales absorbentes serán los valores que entregan los fabricantes de estos. Estos valores se encuentran en bandas de octava por lo que, necesariamente, se realizará un cálculo para llevar los valores obtenidos experimentalmente en tercios de octava a bandas de octava.

4.2.1. Traspaso de datos

Este cálculo consiste en asumir que todos los decaimientos se inician en un nivel de 100 dB, con esta hipótesis se pueden formar, a partir de tercios de octava, bandas de octava. Esto se realiza componiendo una recta, correspondiente a la frecuencia de la banda, con 3 rectas, correspondientes a la misma frecuencia y a las 2 frecuencias colindantes en tercios de octava.

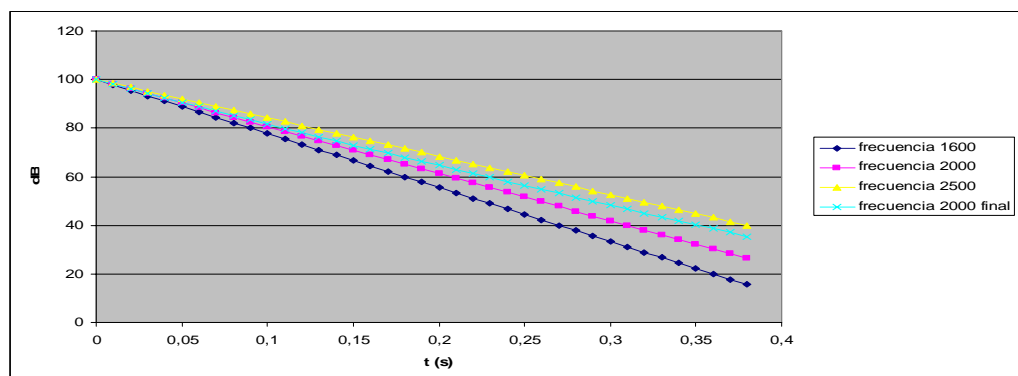


Ilustración 20: “Decaimientos para distintas frecuencias”

Como se aprecia en la ilustración 13, se tiene 3 decaimientos, los cuales de 100 dB bajan a 40 dB, para luego crear uno nuevo para la banda de octava.

Para obtener el nuevo decaimiento se ocupa la fórmula de intensidad total:

$$Lp_{suma} = 10 * \text{Log} \left(10^{\frac{Lp_1}{10}} + 10^{\frac{Lp_2}{10}} + 10^{\frac{Lp_3}{10}} \right) \quad (54)$$

En esta fórmula se ingresaban los valores para cada tiempo de las rectas y con los resultados de todos los tiempos se genera la recta definitiva. Es importante mencionar que los tiempos que se utilizaron para generar las rectas fueron los tiempos promedio de cada frecuencia, es decir no se hizo este procedimiento para cada posición. En las tablas 17 y 18 se puede observar los valores obtenidos luego de traspasarlos de tercios a bandas de octavas.

Tabla 19: “Valores de tercios a bandas de octava para las primeras 9 frecuencias”

Posición	T60 (s)	Frecuencias (Hz)								
		100	125	160	200	250	315	400	500	630
Lab con per. sentadas inv	T60 Tercios	6,26	7,00	6,25	6,74	5,72	5,60	4,74	4,16	4,07
	T60 Bandas	-	6,62	-	-	6,28	-	-	4,45	-
Lab solo sillas	T60 Tercios	6,66	6,71	7,76	7,59	8,32	7,28	6,96	6,22	5,72
	T60 Bandas	-	7,27	-	-	7,88	-	-	6,53	-
Lab vacío	T60 Tercios	6,94	7,85	8,11	8,25	9,44	8,49	8,86	8,44	7,47
	T60 Bandas	-	7,79	-	-	8,91	-	-	8,46	-
Sala B205 con personas	T60 Tercios	1,04	1,07	1,05	1,03	1,13	0,62	0,68	0,90	0,56
	T60 Bandas	-	1,06	-	-	1,07	-	-	0,83	-
Sala B205 vacía	T60 Tercios	1,36	1,09	1,34	1,09	1,14	0,84	0,73	0,93	0,62
	T60 Bandas	-	1,31	-	-	1,09	-	-	0,86	-
Sala B206 con personas	T60 Tercios	0,53	0,73	0,94	0,57	0,66	0,46	0,48	0,52	0,31
	T60 Bandas	-	0,86	-	-	0,62	-	-	0,49	-
Sala B206 vacía	T60 Tercios	0,70	1,03	1,25	0,69	0,69	0,66	0,52	0,55	0,43
	T60 Bandas	-	1,15	-	-	0,69	-	-	0,53	-

Tabla 20: “Valores de tercios a bandas de octava para las últimas 9 frecuencias”

Posición	T60 (s)	Frecuencias (Hz)								
		800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
Lab con per. sentadas inv.	T60 Tercios	3,95	3,75	3,88	3,62	3,06	2,89	2,42	2,16	1,80
	T60 Bandas	-	3,87	-	-	3,36	-	-	2,26	-
Lab solo sillas	T60 Tercios	5,69	5,15	4,74	4,25	4,11	3,90	3,32	2,82	2,33
	T60 Bandas	-	5,35	-	-	4,11	-	-	3,08	-
Lab vacío	T60 Tercios	8,54	7,98	7,63	6,38	5,92	4,90	4,11	3,22	2,43
	T60 Bandas	-	8,15	-	-	6,02	-	-	3,79	-
Sala B205 con personas	T60 Tercios	0,46	0,57	0,38	0,32	0,44	0,37	0,37	0,45	0,30
	T60 Bandas	-	0,53	-	-	0,41	-	-	0,42	-
Sala B205 vacía	T60 Tercios	0,53	0,58	0,40	0,47	0,46	0,39	0,40	0,46	0,33
	T60 Bandas	-	0,55	-	-	0,46	-	-	0,43	-
Sala B206 con personas	T60 Tercios	0,31	0,38	0,28	0,27	0,31	0,38	0,38	0,33	0,27
	T60 Bandas	-	0,36	-	-	0,35	-	-	0,35	-
Sala B206 vacía	T60 Tercios	0,46	0,39	0,32	0,31	0,39	0,42	0,39	0,34	0,32
	T60 Bandas	-	0,42	-	-	0,39	-	-	0,36	-

Luego de la realización de esto, se procede al cálculo de la absorción en las salas.

4.2.2. Absorción de las salas

El cálculo de la absorción se aprecia en las siguientes tablas.

Tabla 21: “Absorción existente sala B205”

Materiales Sala B205	Area o numero de elementos	Absorción acústica a la frecuencia de (Hz)											
		125		250		500		1000		2000		4000	
		α	A	α	A	α	A	α	A	α	A	α	A
Paredes Ho	78,270	0,004	0,313	0,004	0,313	0,005	0,391	0,006	0,470	0,008	0,626	0,015	1,174
alfombra (m2)	72,717	0,150	10,908	0,170	12,362	0,120	8,726	0,320	23,269	0,520	37,813	0,570	41,449
Techo yeso	42,869	0,200	8,574	0,290	12,432	0,190	8,145	0,170	7,288	0,160	6,859	0,180	7,716
Techo Ho	29,848	0,010	0,298	0,012	0,358	0,020	0,597	0,020	0,597	0,023	0,687	0,035	1,045
Ventanas	37,482	0,035	1,312	0,040	1,499	0,027	1,012	0,030	1,124	0,020	0,750	0,020	0,750
Puertas	4,788	0,250	1,197	0,340	1,628	0,180	0,862	0,100	0,479	0,100	0,479	0,100	0,479
Mueble	3,98	0,100	0,398	0,110	0,437	0,100	0,398	0,080	0,318	0,080	0,318	0,110	0,437
sillas	60	0,053	3,183	0,085	5,086	0,202	12,112	0,371	22,263	0,446	26,763	0,267	15,991
Mesas	21	0,090	1,890	0,090	1,890	0,080	1,680	0,090	1,890	0,100	2,100	0,070	1,470
personas sentadas	13	0,131	1,704	0,272	3,531	0,615	8,001	0,784	10,193	0,760	9,878	0,947	12,314
Absorción existente		29,777		39,536		41,924		67,892		86,273		82,824	

Tabla 22: “Absorción existente sala B206”

Materiales Sala B206	Area o numero de elementos	Absorción acústica a la frecuencia de (Hz)											
		125		250		500		1000		2000		4000	
		α	A	α	A	α	A	α	A	α	A	α	A
Paredes Ho	44,019	0,004	0,176	0,004	0,176	0,005	0,220	0,006	0,264	0,008	0,352	0,015	0,860
alfombra (m2)	39,442	0,150	5,916	0,170	6,705	0,120	4,733	0,320	12,621	0,520	20,510	0,570	22,482
Techo yeso	32,470	0,200	6,494	0,290	9,416	0,190	6,169	0,170	5,520	0,160	5,195	0,180	5,845
Techo Ho	6,972	0,010	0,070	0,012	0,084	0,020	0,139	0,020	0,139	0,023	0,160	0,035	0,244
Ventanas	20,778	0,035	0,727	0,040	0,831	0,027	0,561	0,030	0,623	0,020	0,416	0,020	0,416
Puertas madera	2,814	0,250	0,704	0,340	0,957	0,180	0,507	0,100	0,281	0,100	0,281	0,100	0,281
sillas	25	0,053	1,326	0,085	2,119	0,202	5,047	0,371	9,276	0,446	11,151	0,267	6,663
Mesas	13	0,090	1,170	0,090	1,170	0,080	1,040	0,090	1,170	0,100	1,300	0,070	0,910
personas sentadas	13	0,131	1,704	0,272	3,531	0,615	8,001	0,784	10,193	0,760	9,878	0,947	12,314
Absorción existente		18,287		24,989		26,417		40,089		49,244		49,814	

A estos valores aun falta sumar la absorción debida al aire, luego de hacer el cálculo se podrá proceder a comparar los resultados.

Tabla 23: “Absorción total existente sala B205”

Frecuencia (Hz)	Absorción existente B205 (m ²)	Absorción Aire (m ²)	Absorción total (m ²)
125	29,777	0,0003	29,777
250	39,536	0,0012	39,538
500	41,924	0,0049	41,929
1000	67,892	0,0198	67,912
2000	86,273	0,0792	86,352
4000	82,824	0,3166	83,141

Tabla 24: “Absorción total existente sala B206”

Frecuencia (Hz)	Absorción existente B206 (m ²)	Absorción Aire (m ²)	Absorción total (m ²)
125	18,287	0,0001	18,287
250	24,989	0,0005	24,989
500	26,417	0,0019	26,419
1000	40,089	0,0078	40,097
2000	49,244	0,0310	49,275
4000	48,664	0,1240	48,788

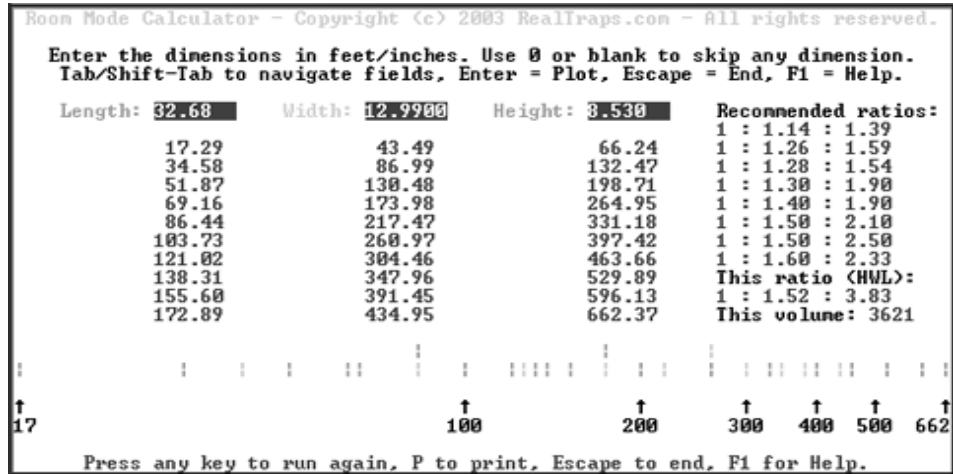


Ilustración 22: “Modos normales B206”

5.2. Cálculo de la inteligibilidad de las salas

Se definió la distancia desde el punto considerado a la fuente sonora (r), de tal forma que es la mitad del largo de la sala, donde se encuentran los oyentes (receptores) y considerando que el profesor (fuente sonora) se encuentra a un metro del pizarrón o un metro más cerca de los alumnos solo para el caso de la sala B206. Para el caso de la sala B205 se utilizó $r=3,5$ porque se considera que los oyentes están a un costado del orador. Es importante recordar que este cálculo se realizó para los casos estudiados en esta memoria, es decir con asistencia de 13 personas con ropa de invierno. Los valores obtenidos se presentan en las siguientes tablas:

Tabla 25: “Inteligibilidad para la sala B205”

B205							
Frecuencia (Hz)	r	Q	α/S	R	Ld-Lr	%ALCons	Inteligibilidad
125	3,5	2	0,11	33,39	-9,64	8,2	Aceptable
250	3,5	2	0,14	46,17	-8,23	6	Buena
500	3,5	2	0,15	49,46	-7,93	4,5	Buena
1000	3,5	2	0,25	90,15	-5,32	1	Excelente
2000	3,5	2	0,31	125,81	-3,87	1	Excelente
4000	3,5	2	0,30	119,11	-4,11	1	Excelente

Tabla 26: “Inteligibilidad para la sala B206”

B206							
Frecuencia (Hz)	r	Q	α/S	R	Ld-Lr	%ALCons	Inteligibilidad
125	3,98	2	0,12	20,80	-12,81	8	Aceptable
250	3,98	2	0,17	29,93	-11,23	5,5	Aceptable
500	3,98	2	0,17	32,01	-10,93	3,75	Buena
1000	3,98	2	0,27	54,56	-8,62	2,75	Buena
2000	3,98	2	0,33	73,08	-7,35	2,25	Buena
4000	3,98	2	0,33	74,55	-7,26	2,2	Buena

Se logra apreciar que la inteligibilidad de las salas es buena para las frecuencias medias, sin embargo si la distancia r creciera en un metro, las salas tendrían valores aceptables de inteligibilidad.

5.3. Comparación de las absorciones totales

Para esto se realizó una tabla resumen, en la cual se aprecian ambos resultados para las distintas frecuencias, además se presentan un gráfico de ambas tablas.

Tabla 27: “comparación de la absorción de la sala B205”

Frecuencia (Hz)	Absorción total experimental (m²)	Absorción total teórica (m²)
125	39,816	29,777
250	39,443	39,538
500	50,845	41,929
1000	79,613	67,912
2000	102,861	86,352
4000	100,172	83,141

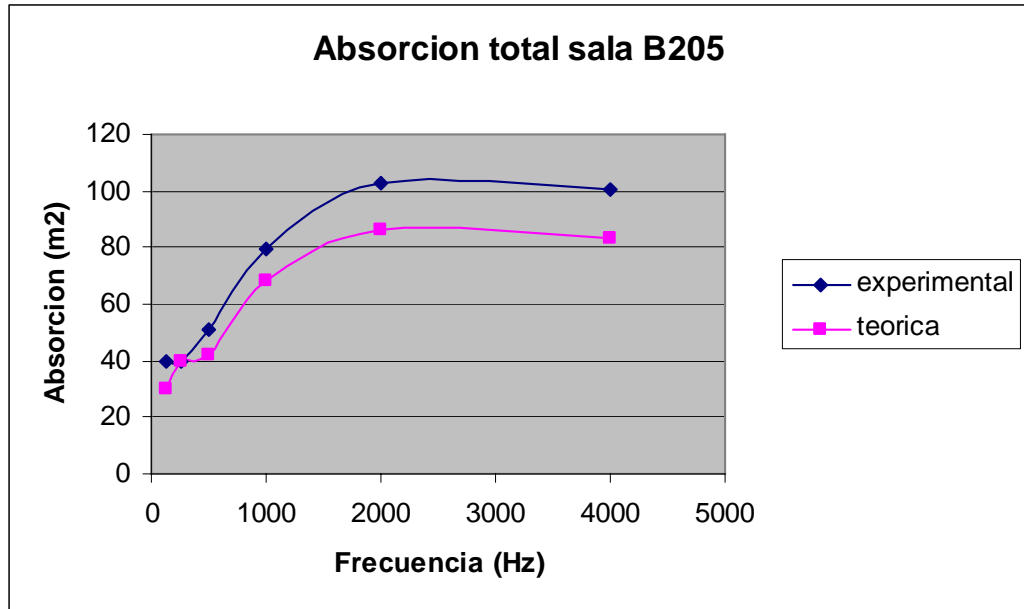


Ilustración 23: "Absorción vs. Frecuencia B205"

Tabla 28: "comparación de la absorción de la sala B206"

Frecuencia (Hz)	Absorción total experimental (m ²)	Absorción total teórica (m ²)
125	19,225	18,287
250	26,666	24,989
500	33,739	26,419
1000	45,918	40,097
2000	47,207	49,275
4000	47,114	49,938

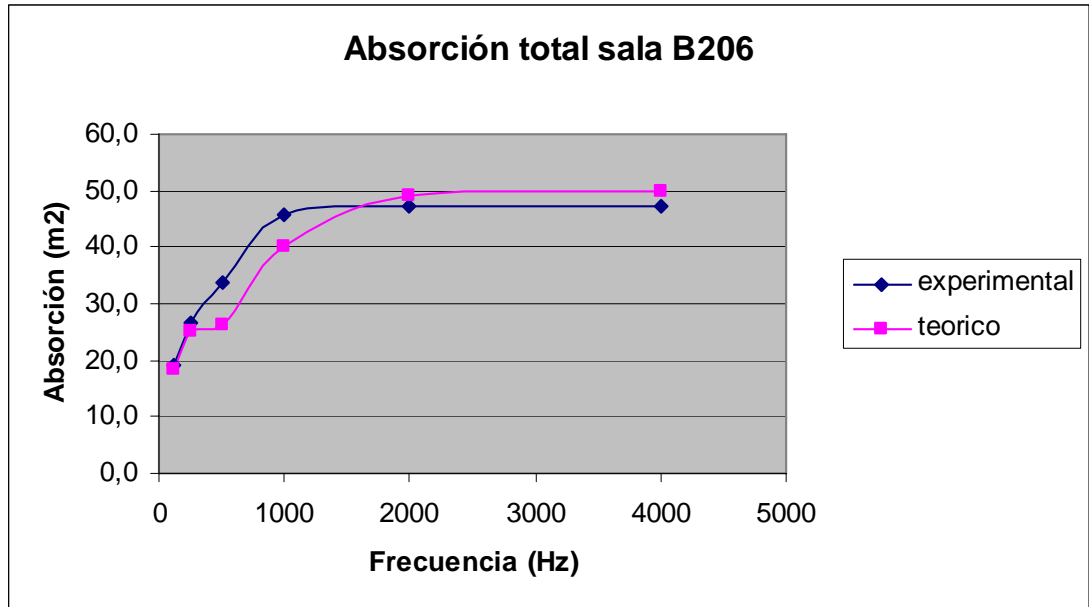


Ilustración 24: “Absorción vs. Frecuencia B206”

Al ver los resultados se aprecia que los valores obtenidos experimentalmente son mayores a los obtenidos teóricamente, pero es una diferencia insignificante, esta se debe a que la absorción, se obtuvo con coeficientes de absorción para cada material en específico, buscando valores que fueran los correspondientes a cada material en la bibliografía, sin embargo se encontraron diferentes valores para el mismo material. Otro factor que puede haber causado esta situación, es la forma de la sala, pues se considero una sala rectangular, pero las dos salas no eran perfectamente rectangulares.

Sin embargo los valores obtenidos en laboratorio se asemejan a los conocidos internacionalmente, por lo que la experiencia en laboratorio entrega resultados gratificantes, los cuales se podrán utilizar, a futuro, en el diseño de salas.

5.4. Comparación de los T_{60} de diferentes autores

Se compararon todos los tiempos de reverberación (T_{60}) obtenidos por las diferentes teorías, es decir, 2 curvas para Sabine y Eyring, pues se utilizaron los valores teóricos y reales, y 1 curva para Millington, Fitzroy y H. Arau, pues estas fórmulas no consideran la absorción total en ellas, si no que la superficie y el coeficiente de absorción separados, por lo tanto solo se pudo obtener la curva teórica. Los valores de las superficies para cada dirección principal, los T_{60} para cada autor además de gráficos de estos tiempos para cada frecuencia y autor para cada sala, se presentan a continuación.

Tabla 29: “Valores para superficies de ambas salas en las direcciones principales”

Sala	S_x (m ²)	S_y (m ²)	S_z (m ²)
B205	43,06	21,89	72,72
B206	10,30	25,90	39,44

Tabla 30: “Comparación de los T_{60} en la sala B205”

Sala B205	T60 exp	Sabine	Eyring	Millington	Fitzroy	H. Arau
Frecuencia (Hz)		T60 teo	T60 teo	T60 teo	T60 teo	T60 teo
125	1,060	1,417	1,339	1,310	0,777	1,031
250	1,070	1,067	0,989	0,953	0,564	0,880
500	0,830	1,007	0,928	0,854	0,607	0,975
1000	0,530	0,621	0,541	0,475	0,495	0,794
2000	0,410	0,489	0,407	0,352	0,461	0,683
4000	0,420	0,508	0,426	0,319	0,446	0,648

Tabla 31: “Comparación de los T_{60} en la sala B206”

Sala B206	T60 exp	Sabine	Eyring	Millington	Fitzroy	H. Arau
Frecuencia (Hz)		T60 teo	T60 teo	T60 teo	T60 teo	T60 teo
125	0,860	0,904	0,848	0,916	1,235	0,947
250	0,620	0,662	0,605	0,684	0,786	0,693
500	0,490	0,626	0,569	0,823	0,459	0,726
1000	0,360	0,412	0,355	0,467	0,322	0,593
2000	0,350	0,336	0,277	0,318	0,288	0,511
4000	0,351	0,331	0,273	0,330	0,272	0,481

Ilustración 25: “ T_{60} de diferentes autores para la sala B205”

T60 sala B205

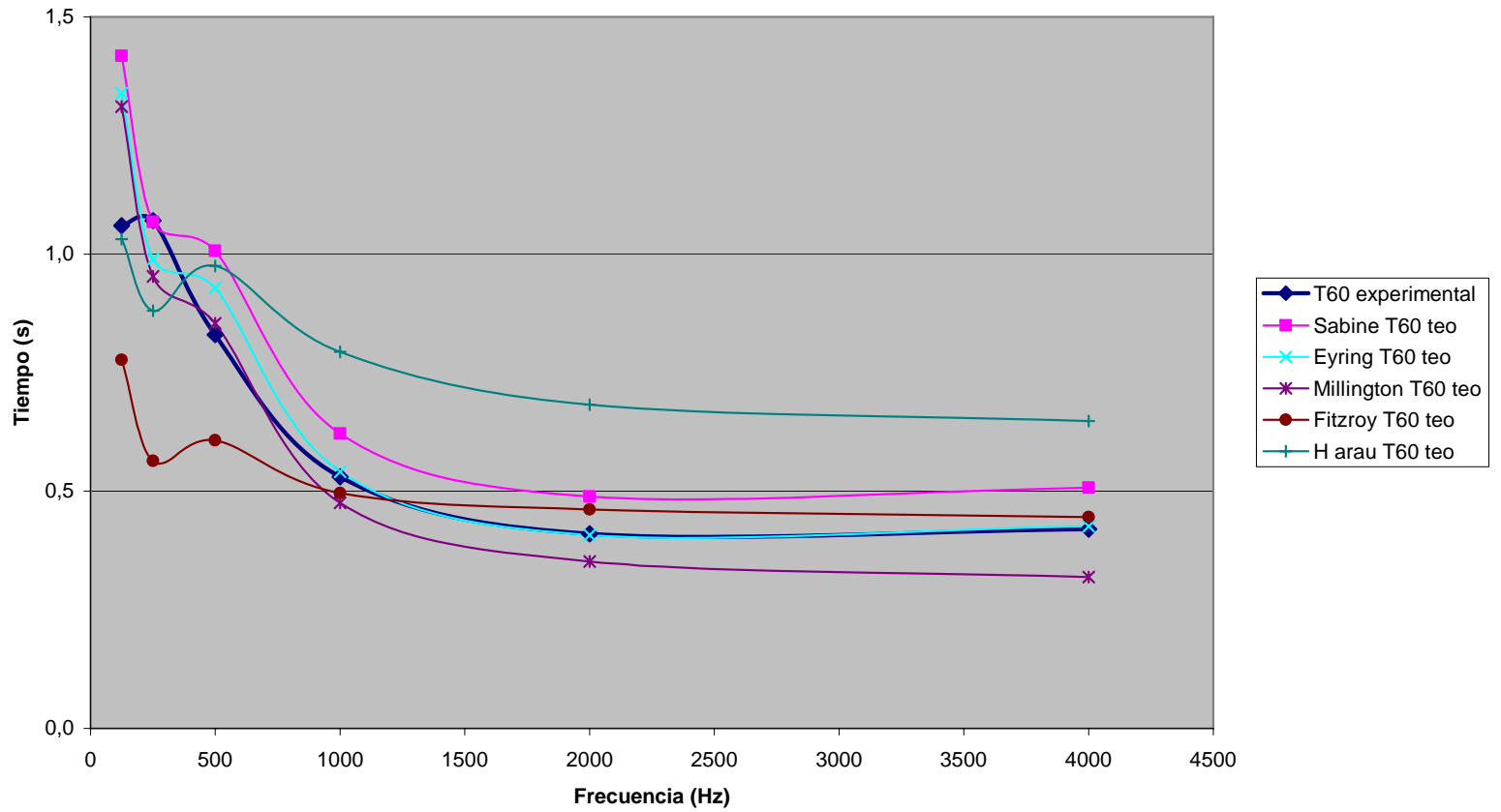
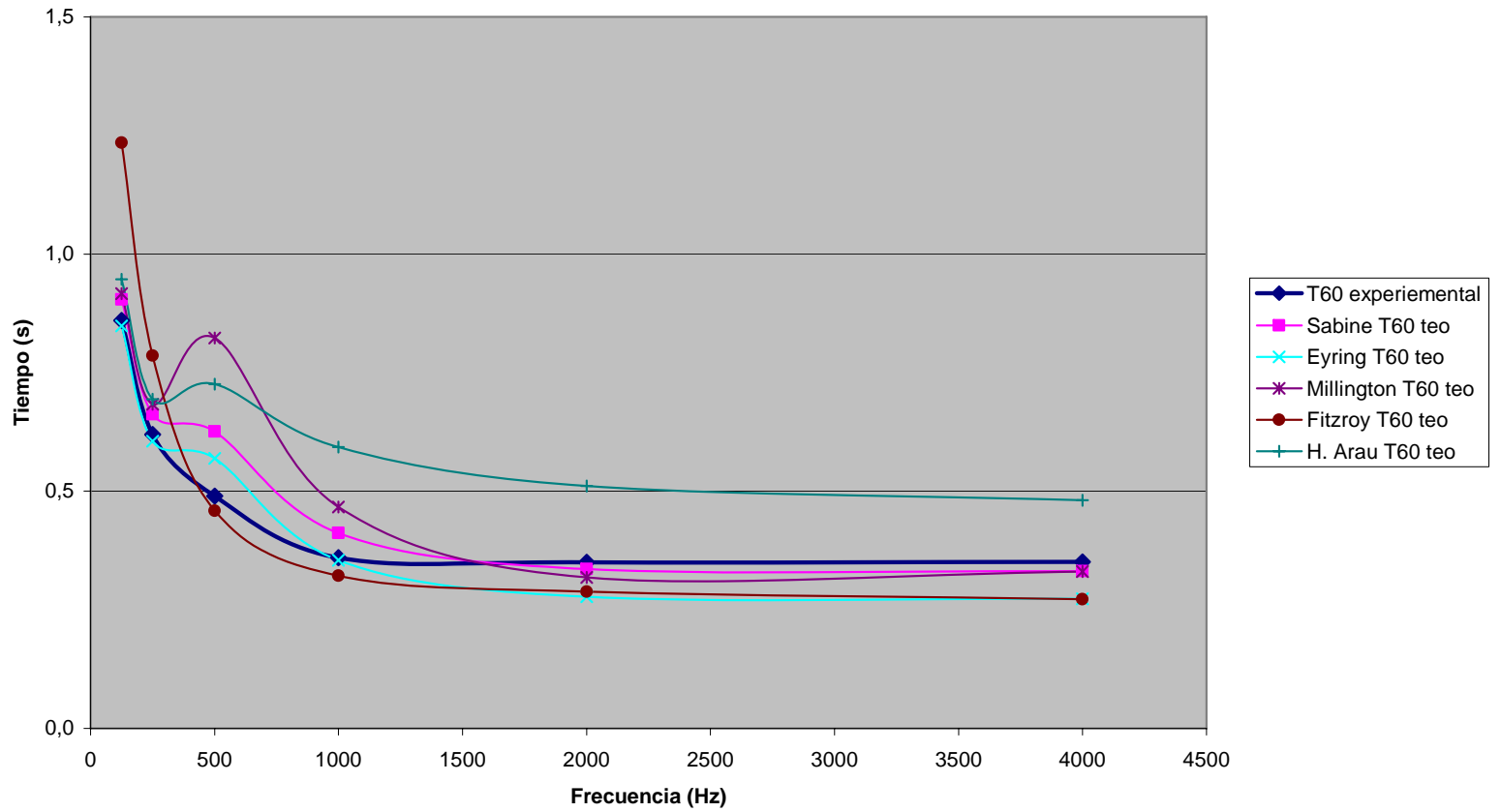


Ilustración 26: “ T_{60} de diferentes autores para la sala B206”

T60 sala B206



Lo primero que se aprecia es la poca diferencia que se obtuvo entre los valores teóricos y prácticos, reafirmando la idea que los valores obtenidos son correctos. Además los valores de las frecuencias medias para la sala B205 están en el rango óptimo recomendado por la bibliografía, no así para la sala B206, pues en el gráfico correspondiente se aprecian que tres de las siete curvas muestran valores menores que 0,5 segundo, en todo caso dos de estas tres son las obtenidas experimentalmente.

En el caso de la sala B205 la curva que más se asemeja a los valores experimentales es la curva obtenida por la ecuación de Millington, sin embargo para la sala B206 la curva que más se asemeja es la de Fitzroy.

CAPITULO 6. CONCLUSIONES

El valor del tiempo de reverberación obtenido para la sala B205 en lo que respecta a las frecuencias medias, se encuentra en el rango de T_{60} óptimo recomendado para el volumen de la sala. En cambio para la sala B206 el valor obtenido experimentalmente se encuentra bajo el rango óptimo de T_{60} para su volumen. Sin embargo, al estudiar la bibliografía se encontró diferentes rangos óptimos sugeridos, es decir, según otros autores el valor obtenido para la sala B206 sería óptimo. Esto se debe a que lo que se entiende como audición óptima es un valor obtenido a partir de estudios de valorización realizados por oyentes, pudiendo diferir en poblaciones distintas, para la misma sala. Por lo tanto esta valorización puede ser subjetiva, siendo recomendable complementarla con otras características de las salas tales como forma, distribución de materiales absorbentes. etc.

Si se consideran las frecuencias medias, que representan gran parte de la energía acústica emitida por la voz hablada, las dos salas presentan una buena inteligibilidad. Si en la sala B206, la distancia r se aumenta en 1 metro, la inteligibilidad se califica como aceptable en toda la sala, pues al tener valores del $L_D-L_R < -12$ la inteligibilidad se mantiene constante. Para mejorar esta calificación de la sala se puede agregar un material absorbente o en su defecto, cambiar algún material por uno con mayor coeficiente de absorción, logrando disminuir el tiempo de reverberación que como se ha indicado, tiene una relación directa con la inteligibilidad de la palabra que mejora a medida que el tiempo de reverberación obtenido es menor. Con estas consideraciones la sala B206 tendría una buena inteligibilidad. Para el caso de la sala B205 la inteligibilidad cambia solo a aceptable cuando se aumenta la distancia estudiada (3,5 metros), sin embargo el puesto más lejano a la fuente sonora (considerando que esta se encuentra en la mitad de la sala con respecto al ancho) se encuentra a 6 metros por lo

tanto la sala B205 logra una inteligibilidad aceptable para los últimos puestos de la sala y buena para el resto de los puestos.

Al realizar el análisis de modos normales de las salas se observó que estos aumentan su densidad a medida que aumenta la frecuencia para ambas salas. Además la relación de las dimensiones de ambas salas no concuerdan con la mencionada en la bibliografía.

Al comparar los valores experimentales de tiempos de reverberación con los teóricos existe una pequeña diferencia, que en la mayoría de las frecuencias es del orden de una décima de segundo. Esta diferencia se puede haber producido por el ruido ambiental pues los valores teóricos fueron obtenidos en condiciones óptimas en el laboratorio y la experiencia, como se mencionó anteriormente, se realizó a las 17:00 hrs. para la sala B205 y a las 18:00 hrs. para la sala B206 siendo esta una hora de mucho tráfico vehicular. Otro factor que puede haber producido esa pequeña diferencia es que el sonómetro toma valores solo en decaimientos de 10 dB y luego interpola a los 60 dB del tiempo de reverberación, esto puede inducir a un gran error en bajas frecuencias si por ejemplo, si 2 o más modos de vibración estuvieran decayendo simultáneamente, cada uno tendría su propia constante de decaimiento, en ese caso la magnitud de la curva tendría un decaimiento con 2 o más declives, produciendo que el sonómetro, no necesariamente tome datos reales.

Las ecuaciones que más se asemejan a los valores experimentales son la de Eyring para la sala B205 y la de Sabine para la sala B206, Esto sucede porque las ecuaciones de Sabine y de Eyring se comportan de manera semejante para valores del coeficiente de absorción medio pequeño, como se aprecia en las tablas 25 y 26. Para ambas salas no se consideró en la comparación la curva de Millington, por el hecho de que el valor del coeficiente de absorción de una persona sentada para las salas es 0.947 para la frecuencia de 4000 (Hz) un valor muy cercano a 1. Esto conduciría a una

conclusión inaceptable de que la absorción puede ser tan grande como queramos y por ende, el tiempo de reverberación decrecientemente pequeño.

Los valores obtenidos para la absorción de las personas sentadas con ropa de invierno son menores a los encontrados en la bibliografía, esto se debe a que las personas chilenas pueden tener características físicas distintas a las personas con las cuales se han logrado determinar estos valores en otros países. Además los valores obtenidos para las mismas personas con ropa de verano son menores a los anteriores, estos se podrían ocupar con la misma confianza que los utilizados en este trabajo de título. Estos valores podrán ser utilizados como valores reales para el diseño de aulas.

CAPITULO 7. BIBLIOGRAFIA.

- RECUERO, Manuel. Acústica arquitectónica aplicada. Madrid: Paraninfo, 1999. 773 p.
- SANCHO, Mestre. Curso de acústica en arquitectura. Madrid: COAM, 1982. 215 p.
- ISO. Acoustics -- Measurement of sound absorption in a reverberation room. 354. Geneva, Suiza: ISO, 1985.
- ISO. Acoustics -- Measurement of sound absorption in a reverberation room. 354. 2. Geneva, Suiza: ISO, 2003.
- PIERCE, Allan D. Acoustics An Introduction to Its Physical Principles and Applications. 2^{da} ed. New York: Acoustical Society of America, 1994. 678 p.
- HARRIS, Cyril M. Noise control in Buildings. New York: McGraw-Hill, 1994. 410 p.
- HARRIS, Cyril M. Manual de medidas acústicas y control del ruido. 3^{ra} ed. New York: McGraw-Hill, 1995. 800 p.
- BERANEK, Leo L. Acoustics. 2^{da} ed. New York: Acoustical Society of America, 1993. 491 p.
- BERANEK, Leo L. Analysis of Sabine and Eyring equations and their application to concert hall audience and chair absorption. New York: Acoustical Society of America, 2006. 12 p.
- CARRION, Antoni. Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Barcelona: Ediciones UPC, 1998. 421 p.
- FITZROY, Dariel. Reverberation Formula Which Seems to Be More Accurate with Nonuniform Distribution of Absorption. New York: Acoustical Society of America, 1959. 5 p.

- DIAZ, Cesar. Sobre la utilización de los coeficientes de absorción de los materiales en la expresión de Eyring del tiempo de reverberación de una sala. Revista de Acústica. 18(3): 66-67, 2005.
- ACUSTICA ARQUITECTONICA. campo sonoro en recintos [en línea] http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_02_03/Acustica_arquitectonica/practica/CAMPO.HTM [consulta: 15 Julio 2008]
- ROOM MODE / STANDING WAVE CALCULATOR. A Room Mode / Standing Wave calculator to help you avoid some number crunching. [en línea] <http://www.marktaw.com/recording/Acoustics/RoomModeStandingWaveCalculator.html> [consulta: 23 Agosto 2008]