



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**T E S I S**

**TRATAMIENTO ACÚSTICO Y DISEÑO  
ELECTROACÚSTICO DE UN ESTUDIO DE  
GRABACIÓN**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERA ELECTRICA-ELECTRONICA**

**PRESENTA:**

**ALVAREZ MOLINA KATYA ALEJANDRA**



**DIRECTOR DE TESIS:**

**ING. ABEL VILLANUEVA PEÑA**

**CD. UNIVERSITARIA, SEPTIEMBRE DE 2008.**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **Agradecimientos**

A Dios por dejarme y darme la oportunidad de vivir hasta ahora. Por estar ahí siempre que lo he necesitado, por hacerme pasar momentos difíciles que me hicieron crecer y momentos increíbles.

A mi papá que aunque no estas físicamente conmigo nunca has dejado de estar en mi mente, has sido el motor que impulsa mi vida, gracias por enseñarme tanto de la vida en tan poco tiempo, espero estés orgulloso como yo de ti. Eres el mejor.

A mi mamá que con unas líneas no me alcanza para agradecerte y decirte cuanto te quiero. Gracias por hacer esto realidad, por los regaños y los no que me dijiste cuando los necesitaba, gracias por ser tan fuerte para nosotras aunque a veces te estabas quebrando por dentro, por estar conmigo siempre que te necesito. Ay ma.

A Lu, mi otra mitad, gracias por ser mas que mi hermana, mi amiga, mi ejemplo. Gracias por compartir toda tu vida conmigo, por siempre estar junto a mi, por ser fuerte cuando yo no lo era, por enseñarme que siempre hay algo más adelante, por ser valiente. No puedo tener mejor hermana mayor que tu. Eres una gran mujer.

A mis abuelitos Pato y Tere, que nunca nos dejaron solas, gracias, porque siempre estuvieron ahí, cuidándonos, apoyándonos, y queriéndonos. Mucho de los logros que he tenido han sido por ustedes. Gracias por compartir conmigo toda su experiencia.

A la reina y en especial a Matilde, por ser como es y darle mucha alegría a mi vida, por quererme tanto, por estar siempre conmigo, y saber que es un reflejo de mí.

Al Ing. Guillermo Solís por ser mi maestro, por compartir sus conocimientos conmigo, gracias por hacerme ver la ingeniería de otra forma, por abrirme las puertas no sólo del trabajo sino también de su familia, por todo lo que me ha ayudado no sólo como estudiante sino como persona.

A mis amigos, que hicieron mis años de estudiante los mejores de mi vida, por compartir risas, tristezas, presiones, etc. A Rodris, Itiel, Rosy, Paty, Yaya, Ily, Isela, Hector, Charcho, todos mis amigos de P6, de ingeniería, mi equipo de fut a todas(os).

A mi familia, por siempre estar unida, a mis primos Osvaldo, Julián, Ita, Cesar Clau y David que hemos crecido como hermanos, a mi tío Cesar, Pepe, Benjamín, mi tía Gisela, y Jose.

A Emilio porque me has apoyado en todo, me das un ejemplo para hacer las cosas sin importan que tan difíciles sean, me has hecho tener nuevos sueños. Gracias por estar conmigo y compartir este tiempo.

A mis profesores de la Facultad por compartir su conocimiento, enseñarme no sólo todo lo que sé de ingeniería, sino enseñarme a enfrentar problemas de manera diferente a la de los demás y darme herramientas para lo siguiente... Y a mi muy querida Facultad de Ingeniería por pasar ahí los mejores años de mi vida.

En memoria

a mi papá

## Tabla de Contenido

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
1.1	Definición del proyecto	1
1.1.1	Objetivo	1
1.1.2	Metas	2
1.1.3	Metodología general	2
1.2	Antecedentes de los estudios de grabación	3
1.3	Características acústicas actuales de los estudios de grabación	8
1.4	Variables Acústicas	9
1.4.1	Sonido	9
1.4.2	Frecuencia	11
1.4.3	Longitud de onda	12
1.4.4	Velocidad del sonido	12
1.4.5	Presión sonora	14
1.4.6	Envolvente	16
1.5	Psicoacústica	17
1.5.1	Tono	17
1.5.2	Intensidad acústica	18
1.5.3	Timbre	19
1.5.4	Calidez acústica y brillo	20
1.5.5	Sonoridad	20
1.6	Acústica de recintos y medios de control	21
1.6.1	Reflexión	21
1.6.2	Reverberación	25
1.6.3	Ecos. Percepción subjetiva de primeras reflexiones	29
1.6.4	Eco Flotante	29
1.6.5	Eco Fugaz o Volante	30
1.6.6	Refracción	30
1.6.7	Difracción	31
1.6.8	Ondas estacionarias	33
1.7	Modos de resonancia	35
1.7.1	Resonadores de membrana	38
1.7.2	Resonadores de Helmholtz	44
1.8	Absorción	50
1.8.1	Grupo 1 Materiales porosos flexibles y no flexibles	50
1.8.2	Grupo 2 Materiales flexibles	54
1.8.3	Grupo 3 Paneles ligeros o membrana	55
1.8.4	Grupo 4 Resonadores Helmholtz múltiples	56
1.9	Aislamiento acústico	59
1.9.1	Paredes simples	63

1.9.2 Paredes dobles.....	67
1.9.3 Elementos constructivos.....	69
1.9.4 Estudios flotantes.....	71
<b>1.10 Elementos de acústica variable_____</b>	<b>72</b>
1.10.1 Cortinas.....	73
1.10.2 Paneles móviles.....	73
1.10.3 Panel móvil reflectante.....	74
1.10.4 Paneles perforados superpuestos.....	74
1.10.5 Panel giratorio de 180°.....	75
1.10.6 Panel giratorio de 90°.....	76
1.10.7 Panel giratorio de 360°.....	76
1.10.8 Paneles en persianas.....	77
<b>2 Ubicación y descripción del proyecto_____</b>	<b>78</b>
<b>3 Análisis de los resultados de las mediciones acústicas en el interior del estudio_____</b>	<b>81</b>
<b>3.1 Geometría_____</b>	<b>81</b>
3.1.1 Volumen.....	81
3.1.2 Formas y dimensiones.....	81
3.1.3 Mediciones del estudio A.....	83
<b>3.2 Geometría_____</b>	<b>90</b>
3.2.1 Volumen.....	90
3.2.2 Formas y dimensiones del estudio B.....	90
3.2.3 Mediciones del estudio B.....	92
<b>3.3 Geometría_____</b>	<b>99</b>
3.3.1 Volumen.....	99
3.3.2 Formas y dimensiones de la cabina de control.....	99
3.3.3 Mediciones de la cabina de control.....	101
<b>4 Equipo de audio_____</b>	<b>108</b>
4.1 Equipo propuesto de audio_____	108
4.2 Instalación de equipos propuestos_____	109
<b>5 Discusión_____</b>	<b>112</b>
5.1 Paredes_____	114
5.2 Techo_____	115
5.3 Ventanas_____	117
5.4 Puertas_____	118
<b>6 Conclusiones_____</b>	<b>120</b>
6.1 Evaluación económica del proyecto_____	120
6.2 Rentabilidad del estudio_____	121

7 Anexos	123
7.1 Anexo I. Estructura de las tablas	123
7.2 Anexo II. Tira de parcheo implementada	125
8 Bibliografía	126
8.1 Bibliografía de ecuaciones	127

<i>Figura 1 Vibración de una partícula en el aire.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2 Espectro de frecuencias.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 3 Velocidad del sonido [c] contra temperatura [°C].....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 4 Incremento de velocidad en % contra la humedad relativa del aire en %.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 5 Representación sinusoidal para la expresión de las magnitudes asociadas a la presión.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 6 Formación de una onda compleja c.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 7 Reflexión del sonido sobre dos superficies perpendiculares entre sí.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 8 Reflexión del sonido sobre dos planos que forman entre sí un ángulo de 60°...22</i>	
<i>Figura 9 Reflexión en un espacio sonoro regular cerrado. a) con radio sonoro r; b) con radio sonoro 2r. 1, foco sonoro en el interior del rectángulo; 2, foco sonoro en una pared; 3, foco sonoro en un vértice.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 10 Reflexión difusa del sonido. La longitud de la onda sonora es igual que el tamaño de las irregularidades de la superficie.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 11 Superposición de sonidos con diferentes retardos.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 12 Refracción. C1 es el sonido incidente y C2 el sonido refractado.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 13 Frente de onda atravesando una abertura.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 14 Distribución de modos estacionarios en dos diferentes tipos de sala.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 15 Gráfica de las dimensiones recomendadas en una sala rectangular para obtener una distribución uniforme de sus modos propios.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 16 Tono puro.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 17 Representación de modos axiales.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 18 Nanograma de cálculo de la frecuencia de resonancia de un resonador membrana.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 19 Circuito análogo de un sistema resonador de membrana.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 20 Resonador sencillo de Helmholtz.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 21. Corte del resonador de Helmholtz.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 22 Resonador Múltiple con cavidad de aire: a) Plafón perforado, b) Material absorbente, c) Cavidad de aire, d) Pared rígida.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 23 Panel perforado con sus dimensiones.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 24 Coeficiente de absorción genéricos de un resonador múltiple, a) con material absorbente pegado al panel, b) con material absorbente pegado a la pared rígida.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 25 Resonador lineal de Helmholtz de estructura periódica.....</i>	<i>49</i>

<i>Figura 26 Variación de la absorción para diferentes espesores de lana de vidrio.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 27 Variación de la absorción de un material absorbente con distintos grados de porosidad.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 28 Curva de absorción típica del grupo 1.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 29 Curva de absorción típica del grupo 2.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 30 Curva de absorción típica del grupo 3.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 31 Curva de absorción típica del grupo 4.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 33 Gráfica para la determinación del factor 4m (m es la constante de atenuación del sonido en el aire).....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 34. Transmisión entre salas reverberantes.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 35. Sala reverberante – espacio y hormigón.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 36 Transmisión de espacio exterior a interior de sala.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 37 Transmisión de la calle a sala reverberante.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 38 Transmisión entre espacios libres.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 39 Métodos comunes en la construcción de estudios flotantes.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 40 Sistema de cortinas.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 41 Panel móvil típico.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 42 a) Posición de mínima absorción, b) Posición de máxima absorción.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 43 a) Posición de máxima absorción (resonador múltiple), b) Posición de mínima absorción.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 44 a) Posición de máxima absorción, b) Posición de mínima absorción.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 45 Panel giratorio de 90° con sentido alternado.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 46 Tres tipos de combinaciones para tener diferente acústica.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 47 Sistema de paneles en persiana.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 47 Vista superior Estudio A. En rojo se muestran los cristales y en azul la puerta.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 48 Vista isométrica SO Estudio A. En rojo se muestran los cristales y en azul la puerta.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 49 Tiempo de reverberación Estudio A Toma 1.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 50 Tiempo de reverberación Estudio A toma 2.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 51 Tiempo de reverberación Estudio A toma 3.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 52 Vista superior Estudio B. En rojo se muestran los cristales y en azul la puerta.....</i>	<i>91</i>

<i>Figura 53 Vista isométrica SO Estudio B. En rojo se muestran los cristales y en azul la puerta.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 54 Tiempo de reverberación Estudio B toma 1.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 55 Tiempo de reverberación Estudio B toma 2.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 56 Tiempo de reverberación Estudio B toma 3.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 57 Vista superior Cabina de Control. En rojo se muestran los cristales y en azul la puerta.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 58 Vista isométrica SO Cabina de Control. En rojo se muestran los cristales y en azul la puerta.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 59 Tiempo de reverberación Cabina de control toma 1.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 60 Tiempo de reverberación Cabina de control toma 2.....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 61 Tiempo de reverberación Cabina de control toma 3.....</i>	<i>106</i>
<i>Figura 62 Equipo de audio.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 63 Sistema de grabación digital y equipo propuesto.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 64 Mueble de la cabina de control.....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 65 Tablero Eléctrico instalado.....</i>	<i>111</i>
<i>Figura 66 Instalación del micrófono del equipo de medición.....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 67 Equipo de medición. Marca TRIO.....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 68 Muros de la cabina de control.....</i>	<i>114</i>
<i>Figura 69 Colocación del techo diseñado acústicamente.....</i>	<i>117</i>
<i>Figura 69 Ventana entre cabina de control y estudio A.....</i>	<i>118</i>

<i>Tabla 1 Valores recomendados de tiempos de reverberación.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 2 variación de la absorción estadística con la masa unitaria del panel flexible m a igual cavidad de aire, L = 10 [cm] y <math>\mu = 2</math> = resistividad de la fibra.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 3 absorción estadística con el espesor de la cavidad haciendo m = 10 [kg/m<sup>2</sup>] y conservando la misma <math>\mu</math>.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 5 Coeficiente de absorción <math>\alpha_{SAB}</math> de materiales habitualmente utilizados en la construcción de recintos.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 6 frecuencia crítica <math>f_c</math>[Hz] y factor de amortiguamiento de diferentes materiales.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 7 materiales a diferentes frecuencias en cuanto a su aislamiento acústico.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 8 Diferentes valores de aislamiento acústico con la combinación de dos materiales de acuerdo a la frecuencia.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 10. Tiempo de reverberación estudio A donde se muestran los materiales utilizados en la segunda toma y sus superficies. ....</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 11. Tiempo de reverberación estudio A donde se muestran los materiales utilizados en la tercera toma y sus superficies.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 12. Tiempo de reverberación estudio B donde se muestran los materiales utilizados en la primera toma y sus superficies. ....</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 13. Tiempo de reverberación estudio B donde se muestran los materiales utilizados en la segunda toma y sus superficies. ....</i>	<i>94</i>
<i>Tabla 14. Tiempo de reverberación estudio B donde se muestran los materiales utilizados en la tercera toma y sus superficies. ....</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 15. Tiempo de reverberación cabina de control donde se muestran los materiales utilizados en la primera toma y sus superficies.....</i>	<i>101</i>
<i>Tabla 16. Tiempo de reverberación de la cabina de control donde se muestran los materiales utilizados en la segunda toma y sus superficies.....</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 17. Tiempo de reverberación estudio A donde se muestran los materiales utilizados en la segunda toma y sus superficies.....</i>	<i>105</i>

# 1 Introducción

## 1.1 Definición del proyecto

El presente proyecto consiste en el diseño y la construcción de un estudio de grabación en Paseo de la Herradura. El proyecto tendrá un enfoque teórico y práctico, para lo cual se implementaran algunas técnicas que serán descritas en el trabajo así como los recursos de medición necesarios para obtener los mejores resultados de acústica y de acondicionamiento técnico; adecuados al uso de un estudio de grabación, producción y masterización.

### 1.1.1 Objetivo

Implementar un estudio de grabación en Paseos de la Herradura en un segundo desnivel con vista hacia una barranca y de acuerdo a las limitaciones arquitectónicas del espacio previo, a través del desarrollo de un proceso de medición acerca de los tiempos de reverberación y espacialidad así como del acondicionamiento acústico, para satisfacer las necesidades del cliente y obtener un estudio de mayores dimensiones a la mayoría de los existentes en el mercado de la ciudad de México, así como la utilización óptima de los equipos preexistentes

### **1.1.2 Metas**

Ofrecer un cómodo ambiente tanto para la parte operativa como para los músicos y productores.

Reducir los tiempos de reverberación por debajo del nivel óptimo sin llegar a tener un sonido seco y eliminar los posibles ruidos dentro de las cabinas.

### **1.1.3 Metodología general**

El diseño y la construcción del estudio de grabación como objetivo propio de la tesis consta de las siguientes etapas metodológicas:

1. Revisión del terreno.
2. Mediciones
3. Análisis de datos
4. Adecuaciones acústicas
5. Instalación de equipo electrónico de audio.

## 1.2 Antecedentes de los estudios de grabación

Durante más de 60 años han existido personas ocupadas por grabar el sonido para tener un mayor control y una mejor calidad del mismo. Durante estos años la gente ha tratado de diseñar estudios, salas y todo tipo de lugares donde se controlen las variables del sonido. Tenemos ejemplos claros en los 40 cuando muchas compañías como RCA, Columbia y después Capitol contaban con mayores facilidades para la grabación. Sin embargo, fue en Universal donde se usó por primera vez una cámara de reverberación natural, además de que fue el primer estudio de grabación independiente.

Con el paso de los años surgió el problema en las salas de control en cuanto a su volumen y geometría, que para ese entonces era muy importante ya que se había desarrollado la alta fidelidad y el sonido estéreo. Otro de los problemas al que se enfrentaban eran las pobres condiciones de monitoreo que existían.

La tecnología fue avanzando y con ello se encontró la solución a algunos problemas de diseño que existían hasta entonces. Fue en los años 60 cuando un diseñador de nombre Hidley introdujo un nuevo estilo de diseño para los estudios. Éste consiste, como lo describe el propio Hidley, en que los altavoces emitan sonido en un espacio casi perfecto de  $2\pi$  con el techo y el piso como la única superficie reflejante y el tiempo de reverberación de casi cero. Pero cuando esta situación es llevada a un caso real, nosotros tenemos un cuarto semianecóico el cual es no deseable por muchas razones. La primera es que esto es casi imposible de realizar dentro de un tamaño pequeño normalmente destinado a la sala de control. Otro problema encontrado fue que el

sonido final dentro de una cámara anecóica no era el mismo que dentro de un cuarto real.

Las observaciones que Hidley dio a la percepción del sonido dentro de la cabina de control fueron llevadas a varias salas con características comunes:

- Un plano de simetría a lo largo del cuarto para crear una imagen estéreo estable y uniforme.
- Evitar reflexiones que vengan de la pared trasera y del techo.
- Monitoreo con altavoces montados sobre un mismo nivel y puestos dentro del cuarto en la pared frontal. (Muro Baffle)
- Un tiempo de reverberación muy corto en el cuarto de control para las frecuencias bajas.
- Pared reflectante que soporte los altavoces (necesaria para una correcta radiación hemisférica de los altavoces), así la Q de los nodos en baja frecuencia es tan ancha que desaparecen y la respuesta tonal de la sala es más uniforme.

Hidley creó también las famosas “trampas para bajas frecuencias” para obtener una mayor absorción de sonido en el rango de las bajas frecuencias. Éstas están formadas básicamente de lana mineral puestas verticalmente de lado a lado, de un tamaño de entre 2 y 3 metros, y el efecto es similar al que se produce en las paredes de una cámara anecóica.

Con el avance en los diseños y los materiales acústicos, nuevos problemas surgieron: primero, que el proceso grabación / reproducción no se escuchaba igual cuando se cambiaba de un estudio a otro, es

decir, la grabación no tenía la certeza en calidad y sonoridad de acuerdo al lugar en donde se escuchara.

Sin importar cuál fuera el método de grabación, la demanda a los diseñadores por preservar el sonido de la grabación fue incrementándose.

Para darle solución al problema nuevamente reapareció Hidley, quien junto a Philip Newell, propuso una controvertida solución en 1991. Contrario a un cuarto anecóico, el cuarto proponía ahora unas condiciones semianecóicas con un tiempo de reverberación bajo -el cual es preferido por los ingenieros de sonido-, donde la pared frontal y el piso estaban fuera acústicamente hablando; el resto de las paredes fueron hechas para una absorción casi total del sonido. Se reintrodujeron las "trampas para bajos". Con un espacio suficiente trabajaron con frecuencias por debajo de los 40[Hz].

Este diseño suele ser algo complicado y costoso por lo que no se han construido muchos estudios con estas características, pero el resultado de la grabación es mucho mejor en un cuarto diseñado por No-ambiente que en otros.

Otra de las tendencias que surgieron para resolver los problemas antes mencionados y que aún se utilizan en la construcción de los nuevos estudios de grabación es el sistema LEDE (Live End / Dead End / lado vivo / lado muerto) que fue creado por Chips y Don Davis en 1979. La idea era una contradicción con lo que se practicaba en ese tiempo. Consiste en evitar que las reflexiones con un alto nivel produzcan un filtrado en peine, que se da cuando a una señal se le suman las réplicas

de ellas, alterando la respuesta en frecuencia, a lo cual se denomina reflexiones enmascaradas.

Para evitar estas reflexiones se hace la pared trasera del cuarto de control muy absorbente (Dead End) y las otras caras de la sala se hacen lo más difusora posible, para crear un tiempo de retardo inicial (ITD) de unos 20ms, y así tener una sensación de estar en una sala grande estando en un lugar reducido (L. Beranek). Ésta es la opción más utilizada actualmente para el diseño de salas de control de sonido con alta calidad de monitoreo.

Otra de las características principales del LEDE es que se requiere un tamaño mínimo en el cuarto, especialmente un mínimo de profundidad en la sala de control.

Continuando con el desarrollo LEDE, otros diseñadores introdujeron el concepto de "zona libre de reflexión" en el año de 1984, el cual se basa en los fundamentos de geometría básicamente. La idea es prescindir de la pared frontal absorbente. La anulación de primeras reflexiones se consigue en las paredes laterales, por lo general en donde incida el sonido emitido por los altavoces de la sala de control, desarrollando una forma geométrica tal que las posibles primeras reflexiones son enviadas directamente hacia la pared trasera, donde son dispersadas por los difusores acústicos de alta eficiencia ideados por Schröder.

Para controlar las reflexiones se estructura la parte donde inciden las ondas sonoras con materiales ligeros que forman a su vez una estructura interna dentro de la habitación. El ITD entre los monitores de control y el operador debe de ser por lo menos 3 [ms] mayor que el ITD

de la sala de grabación y el nivel sonoro de eliminación de primeras reflexiones debe ser inferior a  $-20$  [dB] respecto del sonido directo.

Con estas condiciones, al escuchar en la sala de control, tendremos la percepción de oír una sala de grabación amplia, siendo ésta de un tamaño reducido.

El desarrollo y el diseño de los estudios siguieron avanzando hasta nuestra época. Actualmente se siguen usando las bases de No-ambiente y de LEDE para la construcción y mejora de las salas de grabación y de control. Los estudios se han ido adaptando a las nuevas tecnologías como las grabaciones multicanal, ya que ahora es frecuente encontrar sesiones de grabaciones de entre 24 y 48 o más canales.

Con una extensa colaboración entre la industria discográfica, productores, músicos, etc., se introdujo un nuevo estándar para la construcción de salas y recintos acústicos. La *EBU Tech 3276* "Condiciones acústicas de escucha para el material del programa monofónico y estereofónico de dos canales" (*Listening conditions for the assessment of around programme material: monophonic and two channel stereophonic*) en 1997, estableció todos los requerimientos detallados para la construcción de recintos acústicos. Todos los parámetros discutidos fueron cuantificados en este estándar como los radios y dimensiones del cuarto, la tolerancia límite de la respuesta a la frecuencia, de los tiempos de reverberación, los niveles de las reflexiones y los límites de ruido, por ejemplo.

### 1.3 Características acústicas actuales de los estudios de grabación

Los estudios de grabación son salas que se diseñan para una función específica, es decir las características varían de acuerdo al tipo de grabaciones que se realizarán; por ejemplo, no es lo mismo el acondicionamiento acústico para un estudio de televisión que para un estudio donde se grabarán cuerdas o voces, y es diferente a la acústica de un cuarto para percusiones. Dependiendo del uso tenemos varias opciones en las que nos tenemos que basar para lograr la mejor el mejor balance tonal del sonido.

Otro aspecto que debemos de considerar es el aspecto de la comodidad ya que hoy en día es muy importante para un estudio que el diseño de materiales acústicos no sólo cumple con su función primaria sino que también ayuden a tener una mejor apariencia visual. Es importante cuidar hasta el más mínimo detalle en decoración, el juego de colores, las texturas, la luminosidad, etc., ya que son esenciales para que los ejecutantes se sientan a gusto. La comodidad juega un papel elemental para una buena armonía y grata estancia dentro del recinto ya que muchas veces pasan muchas horas dentro del estudio.

Actualmente, los estudios cuentan con varias áreas específicas para determinado tipo de instrumentos, por ejemplo un área para cuerdas o metales, otra para percusiones y hasta una tercera para voces solistas. El diseño acústico y el material que se usa están determinados por la función que se le asigna a cada área.

Por otro lado, lo ideal es tener un tiempo de reverberación óptimo para tener un sonido más natural, ya que si el tiempo de reverberación está muy por debajo se escucha muy seco por lo que se recurre al uso de

sistemas de reverberación artificiales. En cuanto al nivel de ruido, de acuerdo al criterio de ruido (NC) éste debe de estar entre 15 y 20 [dB] ya que los nuevos micrófonos son capaces de captar sonidos sumamente bajos.

## 1.4 Variables Acústicas

### 1.4.1 Sonido

Es un fenómeno físico que ocurre cuando existen cambios rápidos de presión dentro de un medio elástico (como el aire) provocado por las vibraciones de un cuerpo sonoro. Es necesario que sea un medio elástico ya que una vez que se produce el cambio de presión o perturbación este medio tiende a volver a su estado en reposo, en cambio un medio no elástico una vez que se produce la vibración o perturbación ya no regresa a su estado en reposo y sólo existe una compresión y no la expansión que es necesaria para que las partículas transmitan a la partícula adyacente la vibración y se forme una cadena de movimientos. Este movimiento se desplaza en línea recta y en la misma dirección de la propagación de la onda.

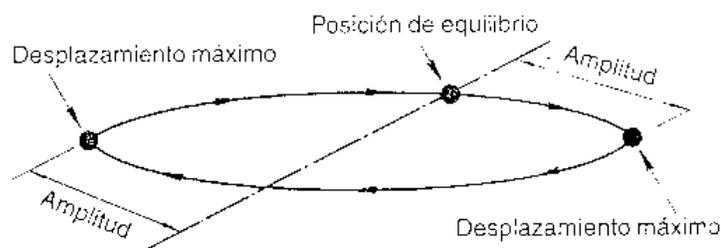


Figura 1 Vibración de una partícula en el aire.

El sonido viaja más rápido en los sólidos que en los líquidos y por último en los gases, en el vacío no se propaga ya que es un medio no elástico.

Las ondas sonoras viajan también en tres dimensiones y sus frentes de onda en medios isótropos son esferas concéntricas que salen en todas direcciones desde el foco sonoro. Los cambios de presión que tienen lugar al paso de una onda de frecuencia  $\nu$  y de longitud de onda  $\lambda$  en un medio isótropo y en reposo viene dada por la diferencial

$$3 \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial p(r, t)}{\partial r} \right) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p(r, t)}{\partial t^2} = 0 \quad \dots 1$$

donde  $r$  es la distancia al centro emisor de la onda, y  $c = \nu \cdot \lambda$  es la de propagación de la onda. La solución de la ecuación, a grandes distancias de la fuente emisora se puede escribir como:

$$p(r, t) = p_0 + \frac{\Delta p}{r} \sin(2\pi \nu t - 2\pi \frac{r}{\lambda} + \phi_0) \quad \dots 2$$

Donde  $p_0, \Delta p$  son respectivamente la presión inicial del fluido y la sobrepresión máxima que ocasiona el paso de la onda.

En cuanto a la percepción del oído humano, éste puede percibir ondas desde los 20 [Hz] hasta los 20 [kHz]. Las ondas que tienen una frecuencia menor a la de los 20 [Hz] se llaman infrasónicas y las superiores a los 20 [kHz] se llaman ultrasónicas.

Los infrasonidos no son perceptibles por el oído humano, tienen una longitud de onda escasa en el medio y recorre grandes distancias. Su rango puede ir desde los 0.001 [Hz] hasta los ya mencionados 20 [Hz]. Su aplicación es la detección de objetos que deben de ser grandes ya que, a tales frecuencias, la longitud de onda es muy grande lo cual

limita el mínimo diámetro del objeto. Los terremotos, tsunamis, y los tornados producen sonidos con la misma longitud de onda que el que produce una bomba atómica pero con una intensidad menor por lo que el oído no es capaz de captarlos; además, pueden provocar en la gente, escalofríos y sentimiento de pena profunda.

Los ultrasonidos tampoco son percibidos por el oído humano ya que sus frecuencias como ya se mencionó son muy altas mayores a los 20 [kHz]. Las ondas tienen una frecuencia tan alta que rebotan en todos los objetos pudiendo crear una imagen. El ultrasonido tiene muchas aplicaciones tanto en la industria y sobre todo en la medicina.

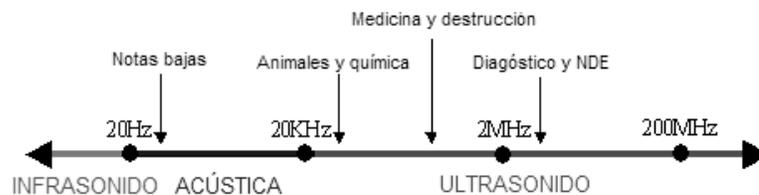


Figura 2 Espectro de frecuencias.

### 1.4.2 Frecuencia

Es una medida para indicar el número de ciclos que ocurren en un tiempo determinado el cual se da por lo general en segundos y su unidad es el [Hz]. Cuando ocurren pocas vibraciones por segundo, decimos que tenemos una frecuencia pequeña a la que llamamos grave, en cambio, si tenemos muchas vibraciones por segundo tenemos una frecuencia mayor por lo que decimos que tenemos tonos agudos. Se calcula:

$$f \text{ [Hz]} = 1/T \text{ [s]} \dots 3$$

### **1.4.3 Longitud de onda**

Es la distancia que existe entre dos puntos de una onda sonora que tienen el mismo valor de presión e igual situación de fase, es decir la distancia necesaria para que la presión aumente ligeramente por arriba de la presión atmosférica, disminuya ligeramente por debajo de la presión atmosférica y regrese a su punto inicial; su valor depende del inverso la frecuencia y la velocidad de propagación. El valor de la longitud de onda decrecerá a medida que aumente la frecuencia. Así pues la longitud de onda menor dentro de las frecuencias audibles es de 1.7 [cm] para la frecuencia más alta y la longitud de onda mayor es de 17.25 [m] para la frecuencia audible más baja. Para calcular la longitud de onda podemos utilizar la siguiente fórmula:

$$\lambda = c \text{ [m/s]} / f \text{ [Hz]} = c \text{ [m/s]} T \text{ [s]} \dots 4$$

### **1.4.4 Velocidad del sonido**

Indica la distancia recorrida de una onda sonora en un segundo. Esta velocidad depende de las características del medio donde se propague como su temperatura, la humedad, la presión, entre otros, por ejemplo en el aire seco a cero [°C] y a 1[atm] de presión atmosférica la velocidad es de 331.45 [m/s]. Cuando mayor sea la densidad del medio, mayor será la velocidad de propagación del sonido. Newton creó una ecuación para describir este fenómeno y después fue perfeccionada por Laplace involucrando una variable de importancia como lo es la temperatura. La fórmula se desprende de

$$c = (\gamma Pa / \rho)^{1/2} \dots 5$$

donde:

$P_a$  es la presión atmosférica ambiental.

$\rho$  es la densidad del fluido.

$\gamma$  es la relación de los calores específicos del fluido a presión y volumen constantes.

Si sustituimos en esta expresión  $\rho = m[\text{kg}]V[\text{v}]$ , tomamos en consideración que el aire se compone moléculas diatómicas por lo que  $\gamma = 1.40$  y sustituimos la ecuación de estado sólido de un gas natural  $pV = RT$  tendremos la siguiente expresión

$$c = 1(1.4RT/M)^{1/2} \dots 6$$

donde:

$R$  es la constante universal de los gases.

$T$  es la temperatura en grados Kelvin.

$M$  es el peso molecular medio del gas.

Con lo que tenemos la siguiente expresión y en donde observamos la variable de la temperatura como factor importante en la velocidad del sonido.

$$c = 331.45(1 + t/273)^{1/2} \dots 7$$

a continuación se muestran dos graficas, en la primera tenemos la temperatura en  $[\text{°C}]$  contra la velocidad  $[\text{m/s}]$ , y la segunda tenemos la

variable de humedad que también es un factor para la determinación de la velocidad.

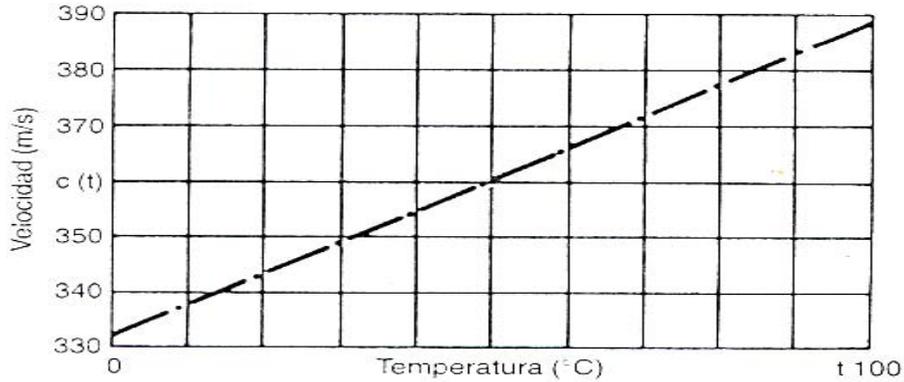


Figura 3 Velocidad del sonido [c] contra temperatura [°C]

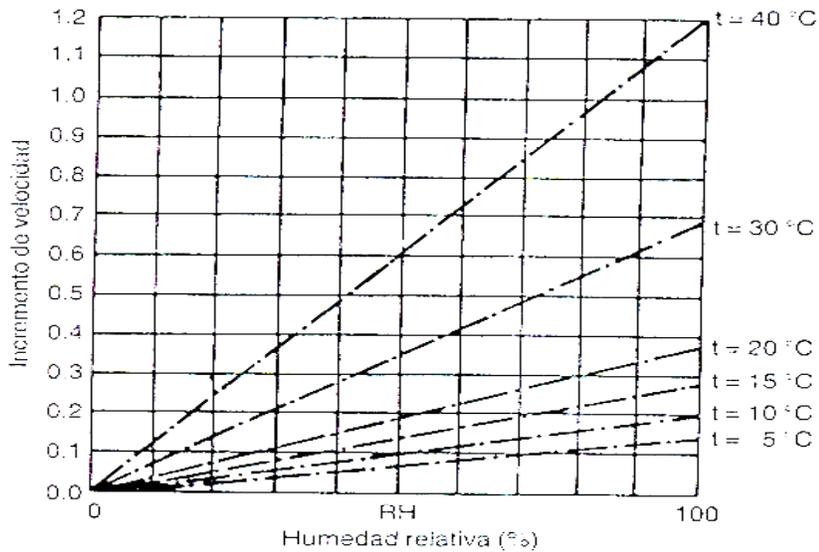


Figura 4 Incremento de velocidad en % contra la humedad relativa del aire en %

### 1.4.5 Presión sonora

Es la diferencia entre la presión actual en un punto determinado en presencia de sonido y la presión que tendría en ese mismo punto en ausencia de sonido; es decir, que existen áreas donde hay mayor

concentración de partículas (zonas de concentración) y otras áreas donde hay menor concentración de partículas (zonas de rarefacción). Cuando estas ondas llegan al oído la presión que ejercen no es la misma para toda la longitud de onda. La sobrepresión acústica varía sinusoidalmente con el tiempo, la diferencia entre la presión atmosférica y la acústica es que alterna muy rápido entre valores negativos (menores que la presión atmosférica) y valores positivos (valores mayores que la presión atmosférica) la presión es la responsable directa de la amplitud de la onda y la amplitud determina la cantidad de energía que tiene una onda, o sea su potencia acústica.

Para calcular la presión acústica podemos utilizar las leyes del movimiento armónico con la que tenemos la presión sonora en un determinado instante  $p$ :

$$p = A_m \cos(\omega t - kx) \dots 8$$

donde:

$A_m$  es la amplitud de la presión sonora de un tono puro  $A_m = P_m$

$$\omega = 2\pi f$$

$k = \omega/a$  es el número de la onda.

$x$  es la posición que tiene en el espacio y con una dirección.

$p_m$  será la presión sonora máxima emitida es igual a la suma algebraica de las amplitudes de presión  $p_m$  de cada una de las sinusoidales que forman la onda compleja.

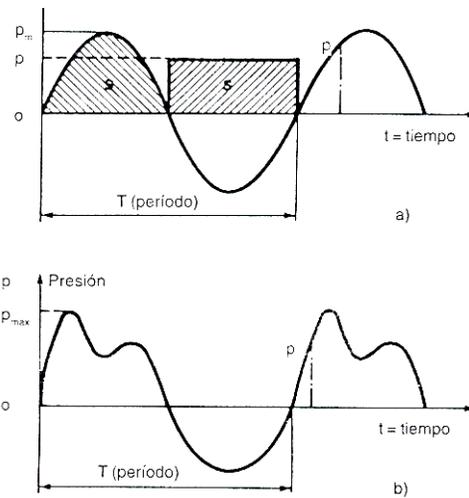


Figura 5 Representación sinusoidal para la expresión de las magnitudes asociadas a la presión

Así pues, el valor eficaz de nuestra señal equivale a la magnitud de una señal continua que produce en un ciclo el mismo efecto que una señal alterna, variable con el tiempo.

Si relacionamos la amplitud de la presión sonora  $p_m$  y el valor eficaz  $p$ :

$$p = p_m / (2)^{1/2} \dots 9$$

### 1.4.6 Envolvente

La palabra envolvente como su nombre lo indica se refiere a envolver. En nuestro contexto del audio es el comportamiento de un sonido referido a su amplitud en función del tiempo. Una envolvente se compone de 4 elementos principalmente:

**Ataque:** Es el tiempo inicial. Lo que tarda en escucharse un sonido después de haber sido producido.

**Decaimiento:** Es el sobrepaso, es decir el tiempo que tarda la amplitud en llegar al valor deseado o al sostenimiento.

**Sostenimiento:** Es la amplitud que se mantiene constante durante un tiempo determinado hasta que llega la relajación.

**Relajación:** El tiempo que tarda el sonido en desaparecer.

## 1.5 Psicoacústica

### 1.5.1 Tono

El tono de un sonido depende únicamente de su frecuencia, mientras mayor sea su frecuencia más agudo será el sonido. La sensación de altura tonal se denomina **tonía** y su unidad es el **mel**. La frecuencia se representa en escala logarítmica al igual que el oído escucha el sonido. Se puede definir al tono como una serie de armónicos de un sonido de los cuales el primero es el fundamental y los siguientes que tienen un número de orden de acuerdo al análisis de la serie de Fourier que sea una potencia de 2 (2, 4, 8...) tienen una sensación similar de tono que el fundamental solo que está una octava más arriba por lo que es más agudo, los demás parciales armónicos distintos al fundamental enriquecen al sonido con lo que podemos completar por ejemplo una escala musical. Cada vez que doblamos la frecuencia se produce un incremento de una octava en la escala tonal. Para nuestro oído, la variación de altura tonal no es proporcional a la variación de frecuencia, sino a una ley logarítmica de su variación. Por convención en acústica se denominan como tonos graves las dos octavas centradas sobre frecuencias de 125 y 250 [Hz], tonos medios las dos octavas centradas

sobre las frecuencias de 500 y 1000 [Hz] , y para los tonos agudos las dos octavas centradas sobre las frecuencias de 2000 y 4000 [Hz] .

### **1.5.2 Intensidad acústica**

Es la cantidad de energía que fluye en el medio cuando la onda sonora se propaga, dependiendo de la cantidad de energía podemos escuchar como fuerte o débil un sonido. Se define como la potencia acústica radiada por unidad de superficie  $W/m^2$  (watts/metros cuadrados). La intensidad de una onda sonora es proporcional al cuadrado de su frecuencia y al cuadrado de su amplitud y disminuye con la distancia al foco. La frecuencia está muy relacionada con la intensidad, ya que un aumento de intensidad sonora en una frecuencia determinada provoca un aumento en el nivel de la sensación sonora. El nivel de intensidad acústica está dado en [dB] (decibelios) y se calcula con la siguiente expresión:

$$LI = 10 \text{ Log } (I/I_0) \dots 10$$

donde:

LI, la intensidad acústica considerada, en  $[W/m^2]$

$I_0$ , intensidad acústica de referencia que se establece en  $10^{-12} [W/m^2]$

### 1.5.3 Timbre

Es una cualidad del sonido que nos permite distinguir entre dos frecuencias iguales producidas por dos fuentes diferentes por ejemplo dos instrumentos diferentes. El timbre depende de la cantidad de armónicos que tenga un sonido y de la intensidad de cada uno de ellos, está relacionada con la complejidad de la onda sonora que percibe el oído humano. Una onda sonora dada por cualquier cuerpo vibrante es una combinación de varias frecuencias presentes en la vibración.

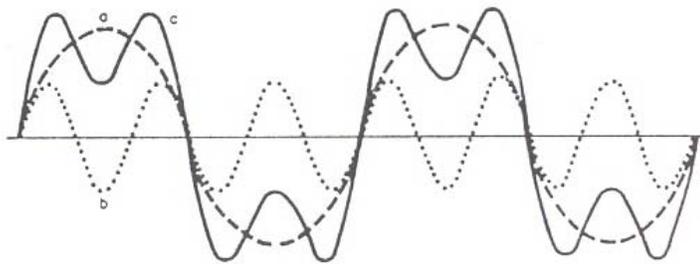


Figura 6 Formación de una onda compleja c

Esta onda se da por la suma de una frecuencia natural dada que llamamos a y otra frecuencia al triple de la anterior que llamaremos b y obtendremos la onda c que es la combinación de las dos ondas o frecuencias anteriores. En cada punto, la presión es igual a la suma algebraica de las presiones individuales. Así pues el timbre está dado por los armónicos del tono puro y su amplitud relativa, recordando que todos los cuerpos vibran a más de una frecuencia originando ondas complejas.

#### **1.5.4 Calidez acústica y brillo**

Se dice que una sala tiene calidez acústica cuando hay una buena respuesta a las bajas frecuencias es decir una riqueza de graves. Se suele utilizar el parámetro BR (*Bass Ratio*) y se define como la relación entre la suma de los tiempos de reverberación a frecuencias bajas (125[Hz] y 250[Hz]) y la suma de los tiempos de reverberación correspondientes a frecuencias medias (500[Hz] y 1[kHz]).

Por otra parte el término brillante (Br) se refiere a que el sonido en una sala sea claro y rico en armónicos y se define como la relación entre la suma de los tiempos de reverberación a frecuencias altas (2[kHz] y 4[kHz]) y la suma de los tiempos de reverberación correspondientes para frecuencias medias cuyos valores son iguales que para la calidez acústica. Debemos tener presente que el brillo no será mayor a 1 debido a las pérdidas de energía que sufren las ondas sonoras al propagarse por el aire sobretodo cuando aumenta la frecuencia a más de 2[kHz] y también aumenta a medida que la humedad disminuye.

#### **1.5.5 Sonoridad.**

Depende de la intensidad del sonido, su amplitud y su frecuencia y duración, además de la sensibilidad del oído humano. La sensación de intensidad se agudiza con sonidos débiles y disminuye para sonidos fuertes debido a que nuestro sistema auditivo es logarítmico. Para determinar el nivel de sonoridad se compara entre dos sonidos. Según Lehmann, se define como la diferencia de presión sonora  $L_p$  producido por una fuente omnidireccional en un determinado punto dentro de una sala y el nivel de presión sonora producido por la misma fuente situada

en campo libre y medido a una distancia de 10m. Para medir el nivel de sonoridad existen dos unidades: el **fon** y el **son**.

El fon está referido para una onda senoidal a 1[kHz] con una intensidad de cero [dB] que equivale a 0 fon y 120 [dB] es igual a 120 [fon] por lo que tenemos:

$$S = 10 \cdot \log_{10} (I/I_0) \text{ [fon]} \dots 11$$

El fon hace referencia el nivel de sonoridad que tiene una sola señal. Para medir o comparar dos señales o sonidos utilizamos el sonio que está definido como la sonoridad de una señal senoidal a 1[kHz] con una intensidad o nivel de presión sonora de 40 [dB].

## 1.6 Acústica de recintos y medios de control

### 1.6.1 Reflexión

Podemos clasificar dos tipos de reflexiones, unas llamadas reflexiones tempranas o primeras, y otras denominadas reflexiones tardías y forman parte de la cola reverberante.

Las primeras reflexiones tienen un orden bajo por lo general de  $\leq 3$  dB por lo que llegan de forma más discreta que las tardías. Podemos ver las reflexiones en secciones planas como si tenemos un foco sonoro (S) del que parte un impulso de onda sonora propagándose en forma de membrana esférica. Tenemos que para dos planos que forman un ángulo de  $360/n$  se formarán  $n-1$  ondas reflejadas (siendo  $n$  un número

entero). Si tenemos dos planos que forman ángulos mayores o menores que  $360^\circ$ .

El orden ( $n$ ) se refiere a las veces que un onda sonora ha incidido sobre las diferentes superficies antes de ser escuchado por el receptor. Por esta razón el nivel energético de las primeras reflexiones es mayor debido a que su orden es menor que las reflexiones tardías; además, dependen de la forma geométrica de la sala y determinan la acústica propia del recinto junto con el sonido directo.

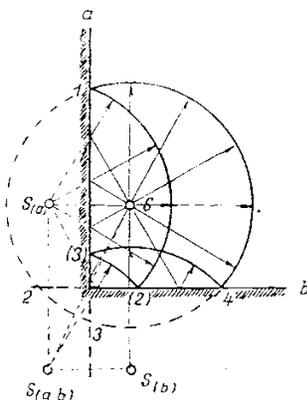


Figura 7 Reflexión del sonido sobre dos superficies perpendiculares entre sí

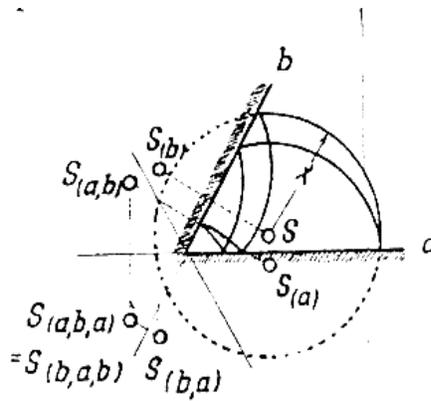


Figura 8 Reflexión del sonido sobre dos planos que forman entre sí un ángulo de  $60^\circ$

En lugares cerrados de forma rectangular la onda directa con las reflexiones forman una serie de arcos unidos por sus extremos y las reflexiones en un punto cualquiera del recinto aumentan de forma cuadrática con el tiempo.

En la siguiente Figura tenemos un frente de onda  $S$  que se ve en  $a_1$  donde se ven las ondas reflejadas, y tenemos que en  $a_2$  estos frentes de onda se reducen a la mitad debido a que colocamos ahora nuestro foco sonoro en uno de los lados del rectángulo ( $a_2$ ) y también tenemos que en  $a_3$  se reducen los frentes de onda a una cuarta parte cuando se coloca el foco en uno de los vértices. Esto se da porque la onda reflejada por las paredes en que está el foco coincide con la onda directa. En la misma Figura 9 pero ahora en  $b$  aumentamos el radio sonoro al doble y conservamos los mismos focos sonoros que en  $a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$  para  $b_1$ ,  $b_2$  y  $b_3$  respectivamente, observamos que cuando aumentamos el radio sonoro aumenta también el número de ondas o frentes reflejados en el mismo espacio.

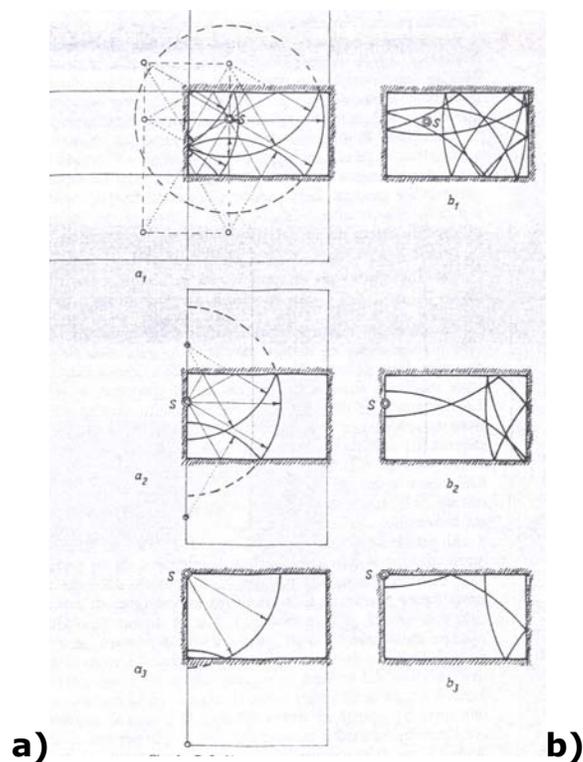


Figura 9 Reflexión en un espacio sonoro regular cerrado. a) con radio sonoro  $r$ ; b) con radio sonoro  $2r$ . 1, foco sonoro en el interior del rectángulo; 2, foco sonoro en una pared; 3, foco sonoro en un vértice

Para evitar lo más posible un gran número de reflexiones se debe de considerar el foco sonoro en la pared principal o frontal del lugar. Cuando tenemos paredes curvas la onda pierde su forma circular. Las ondas reflejadas tienden a converger cuando el foco sonoro y el centro de curvatura caen hacia un mismo lado de manera análoga a un espejo cóncavo, en caso contrario las ondas tienden a separarse unas de otras.

En lugares donde las paredes son curvas se suelen hacer modificaciones cuando se termina el levantamiento del local, todos los rayos que vienen del foco de una parábola se reflejan sobre ésta en dirección paralela al eje.

Para las reflexiones en superficies arquitectónicas irregulares se debe comparar el tamaño de los entrantes y salientes de la superficie no lisa

con la longitud de onda del sonido, si las irregularidades de la superficie no lisa son menores que la longitud de onda sonora las reflexiones son geométricas o se comportan como si no hubiera superficie no lisa. Cuando la longitud de onda es igual que el tamaño de la superficie no lisa se producen reflexiones difusas o irregulares; y si la longitud de onda es menor que la superficie no lisa hay una reflexión regular no sobre la superficie total sino sobre cada saliente y entrante.

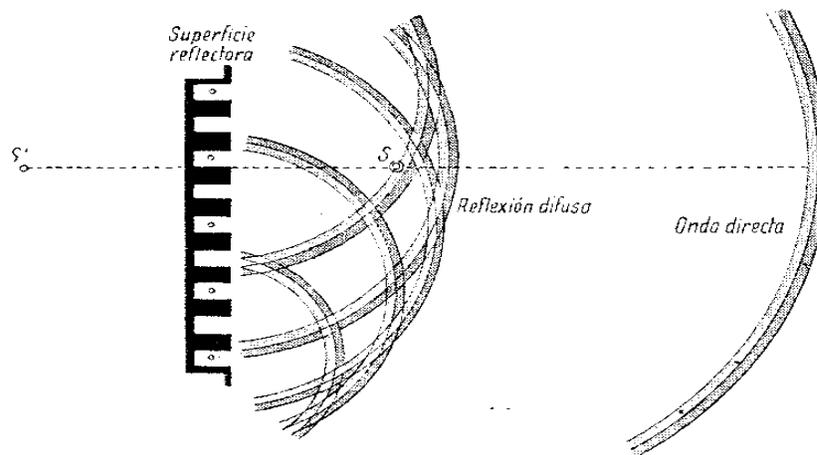


Figura 10 Reflexión difusa del sonido. La longitud de la onda sonora es igual que el tamaño de las irregularidades de la superficie

Se pueden formar reflexiones regulares y difusas cuando hay salientes y entrantes menores y mayores que la longitud de onda.

La reflexión del sonido sobre la superficie irregular reflectora se forma como si cada saliente o entrante se convirtiese en un nuevo manantial sonoro en el momento en que es alcanzada por la onda sonora, y como evidentemente una onda sonora esférica no llega a la vez a todas las irregularidades de la superficie, sino que las alcanza una tras otra, los

nuevos frentes de onda que en cada momento se forman tienen radio distinto. Los frentes esféricos de las ondas reflejadas en los diferentes puntos de la superficie son tangentes al frente de la onda (no existente) reflejada por la superficie total, considerada como plana y lisa.

### **1.6.2 Reverberación**

Un lugar con buenas características acústicas está determinado por la duración de resonancia o tiempo de reverberación natural. Podemos definir el tiempo de reverberación como el tiempo que pasa desde que se emite una determinada señal audible hasta el momento en que ésta cae 60dB en su presión sonora SLP respecto a su valor inicial.

Por lo general el tiempo de reverberación varía para cada frecuencia. Donde por lo general el tiempo de reverberación aumenta para las bajas frecuencias mientras que para las altas y medias se tienen valores más uniformes.

No existe un valor para el tiempo de reverberación único ya que los valores dependen del volumen del recinto.

La siguiente tabla nos muestra algunos valores recomendados del tiempo de reverberación según diversas aplicaciones:

TIPO DE SALA	RT, sala ocupada [s]
<b>Sala de conferencias</b>	<b>0,7 - 1,0</b>
<b>Cine</b>	<b>1,0 - 1,2</b>
<b>Sala polivolante</b>	<b>1,2 - 1,5</b>
<b>Teatro de ópera</b>	<b>1,2 - 1,5</b>
<b>Sala de conciertos ( música de cámara)</b>	<b>1,2 - 1,7</b>
<b>Sala de conciertos ( música sinfónica)</b>	<b>1,8 - 2,0</b>
<b>Iglesia/catedral (órgano y canto coral)</b>	<b>2,0 - 3,0</b>
<b>Locutor de radio</b>	<b>0,2 - 0,4</b>

Tabla 1 Valores recomendados de tiempos de reverberación

Las primeras investigaciones sobre esta disminución en la presión sonora se la debemos al físico americano W. C. Sabine (1900), quien dio a conocer la definición sobre el tiempo de reverberación mencionada anteriormente. Este tiempo de reverberación se calcula con la fórmula de Sabine que se muestra enseguida:

$$RT = (0.161 \cdot V) / \Sigma(S \cdot \alpha) \text{ [s]} \dots 12$$

T = tiempo de reverberación en segundos

V = volumen del local en metros cúbicos

$\Sigma(S \cdot \alpha)$  = la suma de los productos de todas las áreas de la superficie que limita el local por su correspondiente coeficiente de absorción  $\alpha$ .

En la fórmula RT es el tiempo de reverberación; V, el volumen del local en metros cúbicos, y  $\Sigma(S \cdot \alpha)$  es la sumatoria de todas las áreas de las superficies que componen al local por su correspondiente coeficiente de absorción.

El coeficiente de absorción se define como la relación entre la energía absorbida por dicho material y la energía incidente sobre el mismo:

$$\alpha = \text{Energía absorbida} / \text{Energía incidente}$$

el valor de  $\alpha$  está directamente relacionado con las propiedades físicas del material, que tan absorbente o no y a que determinada frecuencia. Sus valores están comprendidos entre cero si es muy reflectante o 1 si absorbe todo.

Para la fórmula del cálculo del tiempo de reverberación tenemos en el denominador:

$$A_{\text{tot}} = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \alpha_3 S_3 + \dots + \alpha_n S_n = \Sigma(S \cdot \alpha) \dots 13$$

donde:

$S$ , área de cada superficie del local

a partir de esto, es posible calcular el coeficiente medio de absorción con la siguiente fórmula:

$$\alpha = A_{\text{tot}} / S_t \dots 14$$

la expresión anterior nos indica la división de la absorción total entre el área de la superficie total del local.

donde:

$S_t = S_1 + S_2 + \dots + S_n =$  área total de la superficie del local (techos, paredes, suelo, etc.)

Con las expresiones anteriores podemos resumir la fórmula para el cálculo del tiempo de reverberación de la siguiente manera:

$$T = (0.161 \cdot V) / a S_t \dots 15$$

Esta fórmula es única para cada recinto y sólo es válida para recintos con las siguientes características:

- Decaimiento energético exponencial asociado a un campo sonoro perfectamente difuso ( la energía se propaga con la misma probabilidad en todas las direcciones).
- Geometría regular de la sala.
- Pequeños coeficientes de absorción iguales o menores a 0.2.

Para factores mayores debemos ocupar el "exponente de absorción"  $\alpha'$  en lugar de  $\alpha$ , según I. Cremer por lo que

$$\alpha' = -\log_{10}(1 - \alpha) \dots 16$$

este exponente de absorción  $\alpha'$  aumenta cuando aumenta el coeficiente de absorción  $\alpha$  como se muestra a continuación:

$$\alpha = 0 \quad 0.63 \quad 0.86 \quad 0.95 \quad 0.98 \quad 1.0$$

$$\alpha' = 0 \quad \approx 1 \quad \approx 2 \quad \approx 3 \quad \approx 4 \quad \infty$$

como unidad para la absorción tomamos 1 m<sup>2</sup> de superficie de una ventana abierta (F=1,  $\alpha=1$ ), esta superficie no refleja ningún sonido.

Se consideran seis frecuencias básicas entre los 128 y los 4096 [Hz] para los coeficientes de absorción.

### 1.6.3 Ecos. Percepción subjetiva de primeras reflexiones

Los ecos ocurren cuando una reflexión recorre 17 [m] desde la fuente directa hasta el oído humano con un retardo mayor a 50 [ms], lo podemos percibir como una repetición del sonido directo.

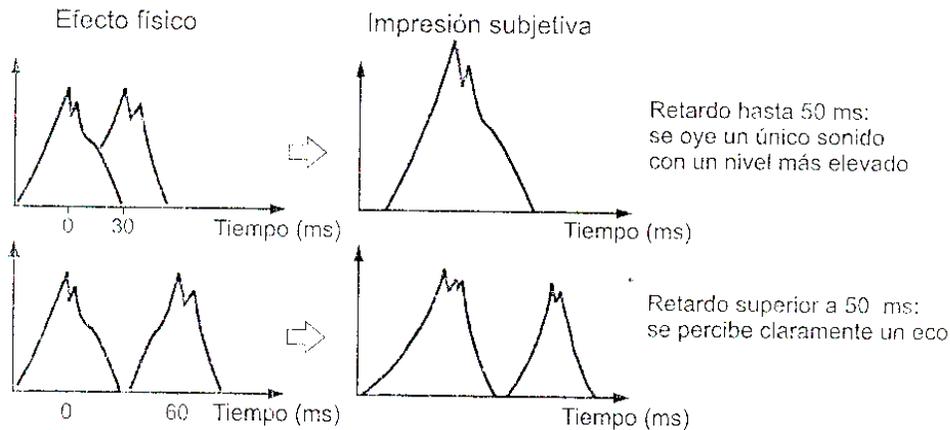


Figura 11 Superposición de sonidos con diferentes retardos

### 1.6.4 Eco Flotante

Aparece cuando colocamos una fuente sonora entre dos paredes paralelas, lisas y reflectantes, se puede escuchar como una repetición múltiple del sonido.

### 1.6.5 Eco Fugaz o Volante

Se forma cuando tenemos paredes absorbentes y paredes reflectantes situadas en parejas una frente a otra. Estos ecos se perciben en el sitio donde se encuentra la fuente sonora y en el centro del local, estos ecos son inofensivos ya que a diferencia de otros ecos éste no se forma en todo el plano de audición.

### 1.6.6 Refracción

La refracción es el cambio de dirección que tiene una onda cuando pasa de un medio material a otro medio diferente, es decir que tengan índices de refracción diferentes. Nos referimos a índice de refracción a la relación que existe entre la velocidad de la onda en un medio de referencia y la velocidad que toma en el medio donde se propague. Se puede calcular la refracción mediante la Ley de Snell que aplicada al sonido nos dice que relación entre el seno del ángulo de incidencia y el seno del ángulo de refracción es igual a la razón entre la velocidad de la onda en el primer medio y la velocidad de la onda en el segundo medio:

$$n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2 \dots 17$$

donde:

$n_1$  y  $n_2$  son el índice de refracción del primer medio y del segundo medio respectivamente y  $\theta$  es el ángulo de incidencia.

A diferencia de lo que ocurre en el fenómeno de la reflexión, en la refracción, el ángulo de refracción ya no es igual al de incidencia.

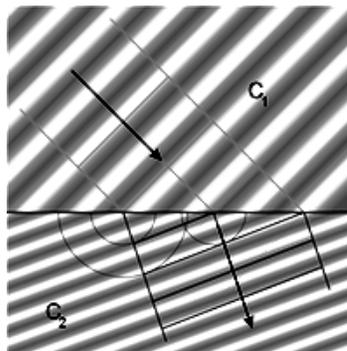


Figura 12 Refracción. C1 es el sonido incidente y C2 el sonido refractado

La refracción en el sonido se da cuando el sonido directo de una fuente es alterado debido a cambios en el medio en que se propaga, en este caso del sonido puede variar su velocidad. Este cambio es debido a la temperatura ambiental en que se propague, sobre todo en áreas abiertas. La velocidad del sonido es más rápida en un clima cálido, donde las ondas sonoras se inclinan hacia temperaturas más frías.

### **1.6.7 Difracción**

Consiste en la dispersión de las ondas cuando encuentran un obstáculo, se observa cuando se distorsiona una onda por uno de éstos, cuyas dimensiones son comparables a su longitud de onda. Como sabemos el sonido viaja en líneas rectas hasta que algo cruza por su camino provocando un cambio en la dirección original que tenía. A este fenómeno se le conoce como difracción. Cuando una onda incide en un obstáculo o abertura que impide su propagación, todos los puntos de su plano se convierten en fuentes secundarias de ondas, emitiendo nuevas ondas, denominadas ondas difractadas. El que un obstáculo sea bueno en la difracción del sonido esta determinado por el tamaño acústico del obstáculo que se mide de acuerdo a la longitud de onda. Los obstáculos capaces de difractar el sonido deben ser más grandes comparados con la longitud de onda que envuelve al sonido. Es decir, si una obstáculo es grande en comparación con la longitud de onda, el efecto de la difracción es pequeño, y la onda se propaga en líneas rectas o rayos; sin embargo, cuando el tamaño del obstáculo es comparable a la longitud de onda, los efectos de la difracción son grandes y la onda no se propaga simplemente en la dirección de los rayos rectilíneos, sino que se dispersa como si procediese de una fuente puntual localizada en la

abertura. Las bajas frecuencias son más capaces de rodear los obstáculos que las altas. Esto es posible porque las longitudes de onda en el espectro audible están entre 3 [cm] y 12 [m], por lo que son lo suficientemente grandes para superar la mayor parte de los obstáculos que encuentran.

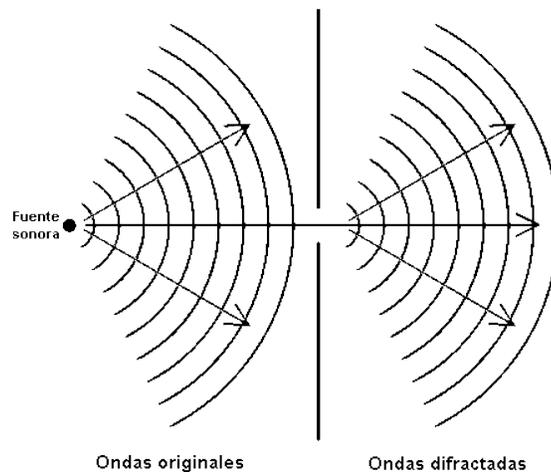


Figura 13 Frente de onda atravesando una abertura

### **1.6.8 Ondas estacionarias**

Son causadas por la onda incidente y la onda reflejada en una superficie en que ambas se encuentran dando como resultado una serie de nodos y antinodos, estas ondas deben de tener la misma amplitud, longitud de onda y frecuencia. Los puntos donde no se encuentra vibración al chocar estas dos ondas son los llamados nodos y permanecen inmóviles o estacionarios; mientras que los otros llamados antinodos o vientres lo hacen con el doble de la amplitud de cada una de las ondas originales y con una energía máxima. Las dimensiones del cuarto sobre las que este fenómeno ocurre están dadas por la expresión de la longitud de onda:

$$l = n\lambda/2 \dots 18$$

donde:

$l$  es la dimensión del cuarto.

$\lambda$  es la longitud de onda y  $n$  es un número entero.

Los modos propios como también se le conoce a las ondas estacionarias dependen de la geometría del recinto así como de sus dimensiones. Su cálculo resulta sencillo si hablamos de recintos paralelepípedos y con superficies totalmente reflectantes y los podemos calcular para cada combinación de valores  $k$ ,  $m$ ,  $n$  para una frecuencia y un modo propio asociado mediante la fórmula de Rayleigh:

$$f_{k,m,n} = (c/2) \left( (k/L_x)^2 + (m/L_y)^2 + (n/L_z)^2 \right)^{1/2} \dots 19$$

donde:

$L_x$ ,  $L_y$  y  $L_z$  representan las dimensiones de la sala en metros.

$k$ ,  $m$ ,  $n$  pueden tomar cualquier valor entero (0, 1, 2,...)

La presencia de los modos propios es inevitable por lo que es conveniente hacer una buena distribución en el tamaño de la sala para que los modos propios sean lo más uniforme posible. En la Figura podemos ver una distribución uniforme de los modos propios ya que tenemos una sala rectangular de óptimas proporciones; en cambio, en la Figura 14 b) vemos una concentración de modos propios para determinadas frecuencias ya que es una sala cúbica.

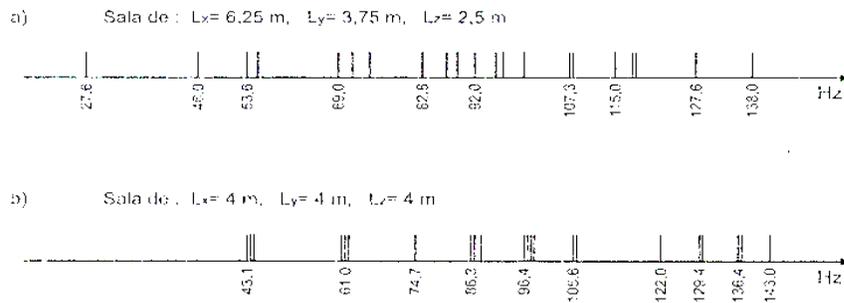


Figura 14 Distribución de modos estacionarios en dos diferentes tipos de sala

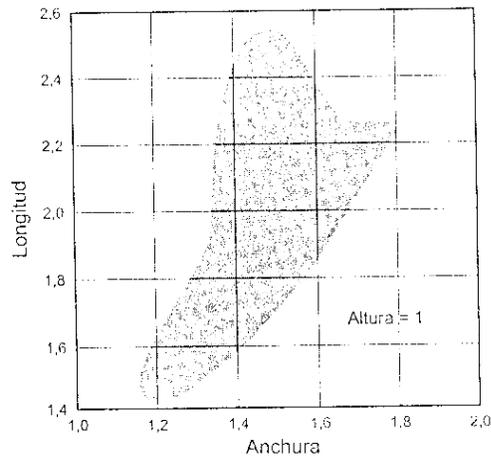


Figura 15 Gráfica de las dimensiones recomendadas en una sala rectangular para obtener una distribución uniforme de sus modos propios

La densidad de modos propios aumenta con la frecuencia, y cuando tenemos una gran densidad de modos propios dejan de existir concentraciones discretas de energía lo que significa que ya no hay modos propios. Una fórmula que nos permite calcular la frecuencia máxima en la que todavía tenemos modos propios y estos no desaparecen es la siguiente:

$$f_{\max} = 1849(RT_{\text{mid}}/V)^{1/2} \dots 20$$

donde:

$RT_{mid}$  es el valor del tiempo de reverberación promedio.

V es el volumen de la sala en  $m^3$ .

Cuando más pequeña es la sala existe mayor incidencia de modos propios. Existen diferentes manera para minimizar este efecto, ya sea con el uso de resonadores o sistemas de absorción específicamente ubicados.

## 1.7 Modos de resonancia

La resonancia de un cuerpo se da cuando al hacer vibrar a cuerpo de forma periódica, éste genera una respuesta de la misma frecuencia o periodo de vibración máxima posible sobre el mismo cuerpo. De este modo el cuerpo vibra cada vez más ya que va aumentando en forma progresiva la amplitud del movimiento. Los modos de resonancia están ligados a los modos propios ya que en una sala al producirse un sonido, se produce el fenómeno de resonancia que depende de la naturaleza de la sala, su geometría, sus dimensiones, el material de que está formada así como las características del sonido en cuestión básicamente su intensidad y su frecuencia. Todo objeto posee una serie de frecuencia o modos de vibración que son característicos de él. Podemos decir que las frecuencias propias de resonancia de un local vienen dadas por la fórmula ya antes mencionada

$$f_{k,m,n} = (c/2) \left( (k/L_x)^2 + (m/L_y)^2 + (n/L_z)^2 \right)^{1/2} \dots 21$$

donde:

$L_x$ ,  $L_y$  y  $L_z$  representan las dimensiones de la sala en metros.

$K$ ,  $m$ ,  $n$  pueden tomar cualquier valor entero (0, 1, 2,...)

Ahora bien, la presión acústica de las correspondientes ondas estacionarias está dada por:

$$P = A \cos\left(\frac{n_x \pi}{l_x} x\right) \cos\left(\frac{n_y \pi}{l_y} y\right) \cos\left(\frac{n_z \pi}{l_z} z\right) \cos 2\pi ft \quad \dots 22$$

donde:

$$A = A_1 A_2 A_3 D$$

$D$  = distancia

En los puntos en que los cosenos son cero, se producirán presiones acústicas nulas. Estos puntos producirán tres conjuntos de planos equidistantes, que se llaman planos nodales, que son ortogonales entre sí.

Los modos naturales de vibración de una sala se pueden clasificar como:

**Modos axiales:** se produce cuando dos de los argumentos de los cosenos es cero.

**Modos tangenciales:** se produce cuando uno de los argumentos de los cosenos es cero.

**Modos oblicuos:** se produce cuando ninguno de los argumentos de los cosenos es cero.

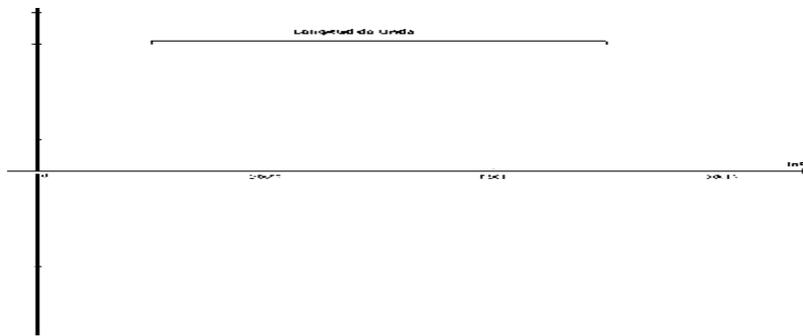


Figura 16 Tono puro

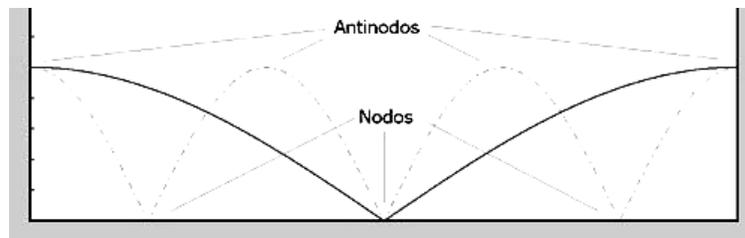


Figura 17 Representación de modos axiales

A altas frecuencias existen múltiples modos de resonancia, y también aumentan cuando aumenta el volumen de la sala. La siguiente expresión es experimental y nos da la frecuencia de corte en la que los modos se debilitan

$$f = \frac{v^2 t_r}{8,8\pi V} \dots 23$$

donde:

v es la velocidad del sonido en el aire.

V el volumen de la sala.

T es el tiempo de reverberación de la sala.

Si tenemos frecuencias por arriba de  $f$  tendremos un número grande de modos propios y por lo tanto tendremos un campo difuso. Si tenemos frecuencias inferiores a  $f$  los fenómenos de resonancia pueden afectar nuestro campo acústico creando máximos y mínimos de presión acústica y evitando una distribución uniforme del campo sonoro. Por lo tanto los modos de resonancia pueden causar problemas acústicos sobretodo en salas pequeñas a bajas frecuencias.

### **1.7.1 Resonadores de membrana**

En una sala los modos de resonancia son capaces de acoplarse acústicamente a los elementos estructurales de la sala. Un panel puede vibrar sólo en un cierto rango de frecuencias  $f_{m,n}$

$$f_{m,n} = (hc_L / 4n\sqrt{3}) [(mn / l_1)^2 + (nn / l_2)^2] m,n = 1, 2 \text{ y } 3... \dots 24$$

donde:

$c_L$  es la velocidad longitudinal del sonido en la placa.

si  $m = n = 1$ , entonces  $f_{1,1}$  es igual a la frecuencia característica del modo fundamental.

Si tenemos una placa suspendida en una sala ésta puede resonar cuando esté cerca de su frecuencia fundamental y alcanzará su máxima amplitud actuando como un absorbedor del sonido, lo mismo sucede cuando la cavidad de aire no es tan grande, es decir cuando se coloca una placa frente a una pared rígida a cierta distancia, esta reducción de aire provoca que éste actúe como un elemento elástico formando con el

panel un sistema resonante y su frecuencia de resonancia está dado por la siguiente fórmula:

$$f_R = 1/2\pi \sqrt{1/LC} = 600/\sqrt{md)...25$$

donde:

m está en  $[\text{kg}/\text{m}^2]$  y d en  $[\text{cm}]$ ,

y al igual que en el panel con gran cavidad de aire, absorberá energía por amortiguamiento. Podemos incrementar en un mayor campo de frecuencias la absorción poniendo material absorbente poroso entre la pared rígida y el panel. La siguiente gráfica nos presenta un rango de frecuencias de resonancia.

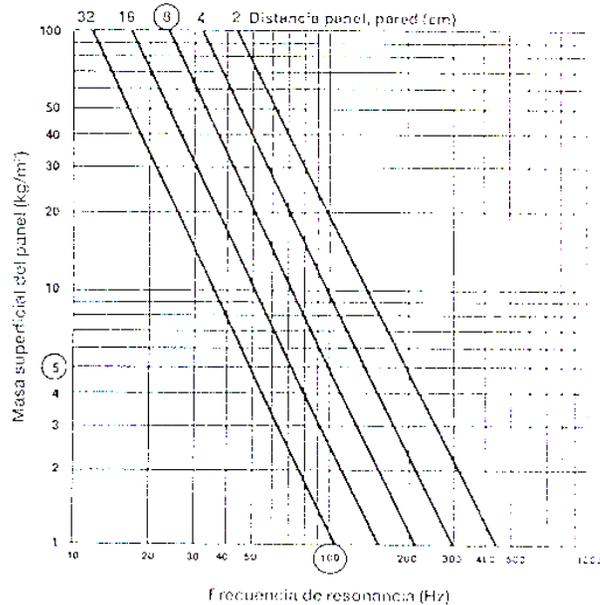


Figura 18 Nanograma de cálculo de la frecuencia de resonancia de un resonador membrana

Para comprender mejor el funcionamiento de los paneles de membrana podemos hacer una analogía con un sistema de impedancias como el que se muestra a continuación

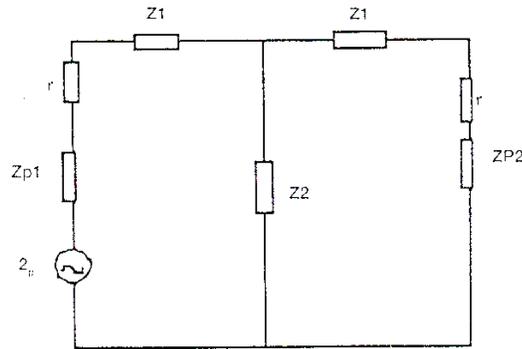


Figura 19 Circuito análogo de un sistema resonador de membrana

donde:

$r$  es la resistividad de la fibra

$Z_{p1} = j\omega m$  = impedancia del panel flexible

$Z_{p2} = j\omega M$  = impedancia de la pared dorsal

$Z_1$  y  $Z_2$  impedancias de la cavidad del aire.

$Z = r + Z_{p1} + Z_1 + Z_2 = r + j\omega m + jpc \operatorname{tg}\beta - (jpc / \operatorname{sen}2\beta)$ ,      donde

$Z_{p2} \gg Z_{p1} \dots 26$

$Z = r + j\omega m - jpc \operatorname{cotg}2\beta$       ,       $\beta = (\omega L / 2c)\operatorname{cos}\varphi \dots 27$

$\operatorname{cotg}2\beta = 1/2\beta - 2\beta/3 \dots 28$

ahora el coeficiente de absorción en función con el ángulo de incidencia podemos obtenerlo de la siguiente expresión:

$$\alpha(\varphi) = [4\text{Re}(Z)/\rho c \cos\varphi] / [(\text{Re}(Z)/\rho c \cos\varphi + 1)^2 + [(\text{Im}(Z) / \rho c) \cos\varphi]^2] \dots 29$$

donde  $\varphi$  es el ángulo de incidencia del sonido

sustituyendo  $Z$  y  $\cotg 2\beta$  vistas anteriormente en esta nueva expresión tenemos:

$$\alpha(\varphi) = (4\mu \cos\varphi) / (\mu \cos\varphi + 1)^2 + [(\omega m / \rho c) \cos\varphi - c / \omega L + (1/3) (\omega L / c) \cos^2\varphi]^2 \dots 30$$

donde  $\mu = r / \rho c =$  resistividad específica de la fibra

con esta expresión nos hemos aproximado a las expresiones de Costeen:

$$\alpha(\varphi) = (4\mu \cos\varphi) / (\mu \cos\varphi + 1)^2 + [(\omega m / \rho c) \cos\varphi - c / \omega L]^2 \dots 31$$

y Cremer:

$$\alpha(\varphi) = (4\mu \cos\varphi) / (\mu \cos\varphi + 1)^2 + [(\omega m / \rho c) \cos\varphi]^2 \dots 32$$

ahora para el cálculo de la frecuencia de resonancia de nuestro circuito podemos plantear a  $\omega = \omega_0$ ,  $f_0 = \omega_0 / 2\pi$  para reducir nuestra ecuación a

$$\alpha(\varphi) = (4\mu \cos\varphi) / (\mu \cos\varphi + 1)^2 \dots 33$$

y despejando  $\omega_0$  de nuestro término que eliminamos en la expresión anterior nuestra frecuencia de resonancia la podemos calcular mediante

$$\omega_0 = [1 / (m / \rho c + 1/3(L/c) \cos\varphi)] * (L/c) \cos\varphi^{1/2} \dots 34$$

para el calculo del coeficiente de absorción estadístico del sistema de membrana se calcula con la siguiente expresión:

$$a_{est} = a_0 + 2 \int^{n/2} a(\varphi) \cos \varphi d(\cos \varphi) \dots 35$$

de la que obtenemos:

$$a_{est} = a_0 + 8 \int^1 \mu x^2 dx / (\mu x + 1)^2 + [\omega m x / \rho c - c / \omega L + 1/3 (\omega L / c) x^2]^2 \dots 36$$

donde  $a_0$  es un coeficiente de absorción de corrección que expresa la absorción acústica básica del material que lo constituye sin tener en cuenta el efecto membrana.

A continuación se muestran tres tablas; en la primera, vemos la variación de la absorción estadística con la masa unitaria del panel flexible  $m$  a igual cavidad de aire,  $L = 10$  [cm] y  $\mu = 2$  = resistividad de la fibra.

Mása unitaria $m$ (kg/m <sup>2</sup> )	Frecuencia de resonancia ([Hz])	Coeficiente de absorción					
		31	63	125	250	500	1000
2,5	117,9	0,059	0,141	0,741	0,327	0,092	0,051
5	83,7	0,062	0,213	0,526	0,113	0,053	0,043
10	59,3	0,068	0,584	0,171	0,056	0,043	0,041
20	42	0,093	0,315	0,067	0,044	0,04	0,04
40	29,7	0,434	0,098	0,045	0,041	0,04	0,04

Tabla 2 variación de la absorción estadística con la masa unitaria del panel flexible  $m$  a igual cavidad de aire,  $L = 10$  [cm] y  $\mu = 2$  = resistividad de la fibra

En esta segunda tabla vemos la absorción estadística con el espesor de la cavidad haciendo  $m = 10$  [kg/m<sup>2</sup>] y conservando la misma  $\mu$ .

Espesor cavidad (cm)	Frecuencia de resonancia ([Hz] )	Coeficient e de absorción					
		31	63	125	250	500	1000
5	84	0,046	0,093	0,315	0,067	0,044	0,041
10	59	0,068	0,584	0,171	0,056	0,043	0,041
15	48	0,119	0,624	0,131	0,054	0,043	0,041
20	42	0,213	0,526	0,113	0,053	0,043	0,041
30	34	0,512	0,395	0,098	0,052	0,043	0,041
40	30	0,741	0,327	0,892	0,051	0,043	0,041
60	24	0,812	0,263	0,086	0,051	0,043	0,041
80	21	0,750	0,233	0,083	0,050	0,043	0,041

Tabla 3 absorción estadística con el espesor de la cavidad haciendo  $m = 10$  [kg/m<sup>2</sup>] y conservando la misma  $\mu$ .

Y por último tenemos la misma variación de la absorción estadística variando la resistividad de la fibra y con  $m = 10$  [kg/m<sup>2</sup>] y  $L = 2.5$  [cm] siendo igual el espesor de la cavidad.

Resistivida d $\mu$	Coeficient e de absorción					
	31	63	125	250	500	1000
1	0,041	0,044	0,385	0,073	0,043	0,040
2	0,041	0,047	0,434	0,098	0,045	0,041
3	0,042	0,051	0,430	0,117	0,048	0,041
4	0,042	0,054	0,414	0,113	0,050	0,042
6	0,042	0,061	0,378	0,153	0,054	0,042

Tabla 4 variación de la absorción estadística variando la resistividad de la fibra y con  $m = 10$  [kg/m<sup>2</sup>] y  $L = 2.5$  [cm] siendo igual el espesor de la cavidad.

### 1.7.2 Resonadores de Helmholtz

El más simple consiste en una cavidad de aire entre paredes rígidas conectada al exterior por una pequeña abertura llamada cuello.

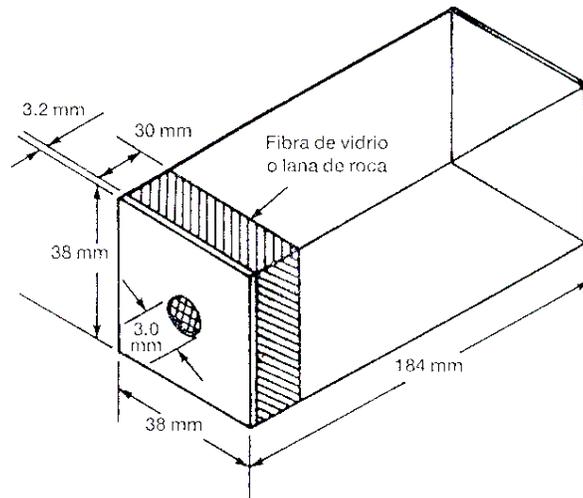


Figura 20 Resonador sencillo de Helmholtz

Las ondas que entran al resonador hacen vibrar las partículas de aire que se encuentra dentro del resonador y que esta como masa resonante. Sólo elimina ciertas frecuencias en particular dependiendo de su diseño. Se puede calcular la frecuencia de resonancia mediante la siguiente fórmula:

$$f_R = (c/2\pi) (1/LC)^{1/2} \dots 37$$

$$\text{Si } M_N = \rho(1+1.7r)/\pi r^2$$

donde:

$v$  = radio del cuello

$l$  = longitud del cuello

$\rho$  = densidad del aire

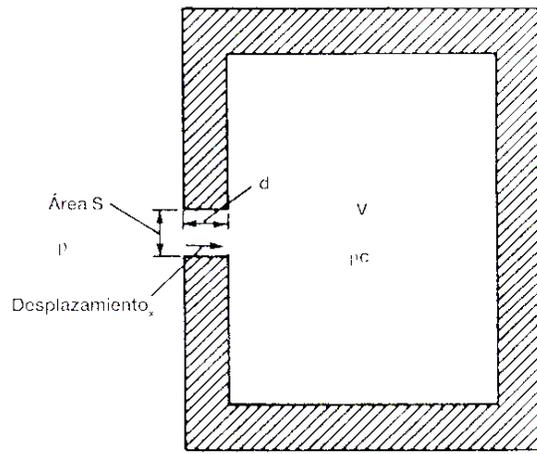


Figura 21. Corte del resonador de Helmholtz

y  $C_N = V/\rho c^2$  sustituyendo en  $f_R$  tenemos:

$$f_R = (c/2\pi) (S/(l+1.7r)V)^{1/2} \dots 38$$

donde:

$S$  = área del cuello de la Botella.

$V$  = volumen de la cavidad.

Este tipo de resonadores se usa especialmente para controlar las bajas frecuencias (entre 50[Hz] y 300[Hz]) y control de ruido. En algunas ocasiones se suele introducir material absorbente dentro del resonador dejando libre la parte del cuello para tener una mejor absorción, según Kosten y Zwicker existe un valor de absorción máximo posible  $A_{\text{máx}}$  para estos resonadores no amortiguados que se calcula con la siguiente fórmula:

$$A_{\text{máx}} = 0.139(c/f_R)^2 \dots 39$$

El resonador múltiple de Helmholtz es otro tipo de resonador que se basa en los principios del resonador simple aunque tiene mayores ventajas tanto económicas como funcionales. Prácticamente consiste en una pared o membrana robusta con múltiples perforaciones separada por una cavidad de aire de una pared rígida trasera, se puede poner algún material absorbente como lana mineral o fibra de vidrio para incrementar el rango de frecuencias que se absorbe. Cada absortor de membrana tiene una frecuencia fundamental de oscilación determinada por el peso, la flexibilidad de la membrana, el material de que está echa y la distancia de la cavidad del aire.

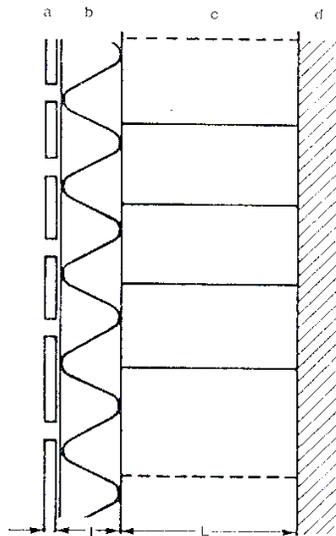


Figura 22 Resonador Múltiple con cavidad de aire: a) Plafón perforado, b)Material absorbente, c)Cavidad de aire, d)Pared rígida

Cuando un frente de onda se acerca al absortor y tiene la misma frecuencia de resonancia que éste, la membrana se pone en movimiento al igual que la cavidad de aire. La fibra o material absorbente sólo actúa

para las altas frecuencias ya que debido a la difracción no actúa sobre las bajas frecuencias y las perforaciones son acústicamente transparentes. La frecuencia de resonancia para este tipo de resonador la podemos calcular mediante la expresión:

$$f_R = (c/2\pi) (p/L(d+1.7r)V)^{1/2} \dots 40$$

donde:

L es la distancia a la pared.

d el espesor del panel perforado.

r el radio del agujero o perforación.

p tasa de área perforada =  $\pi/4(a/s)^2$ .

a es el diámetro de la perforación = 2r.

s la distancia entre centros.

Para un panel perforado la distancia efectiva de las perforaciones se puede calcular de la siguiente manera estando S y r expresado en [cm]:

$$S' = S - 1.7r \dots 41$$

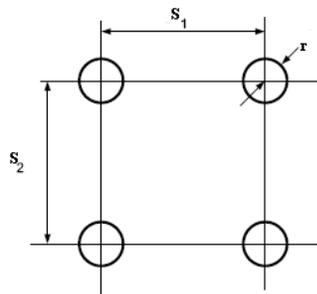


Figura 23 Panel perforado con sus dimensiones

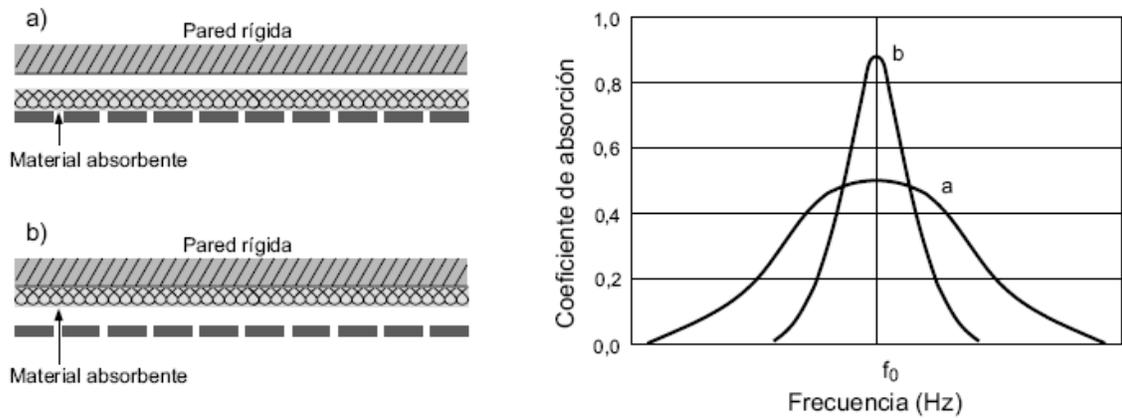


Figura 24 Coeficiente de absorción genéricos de un resonador múltiple, a) con material absorbente pegado al panel, b) con material absorbente pegado a la pared rígida

Los resonadores lineales de Helmholtz son similares a los resonadores múltiples que se mencionaron anteriormente solamente que ahora se toma en cuenta la masa de aire que está entre los espacios intermedios de los listones de madera. Este tipo de resonador está construido por láminas periódicas de espesor  $d$ , anchura  $B-b$ , y  $L$  el espesor de la cavidad de aire rellena o no con materiales absorbentes.

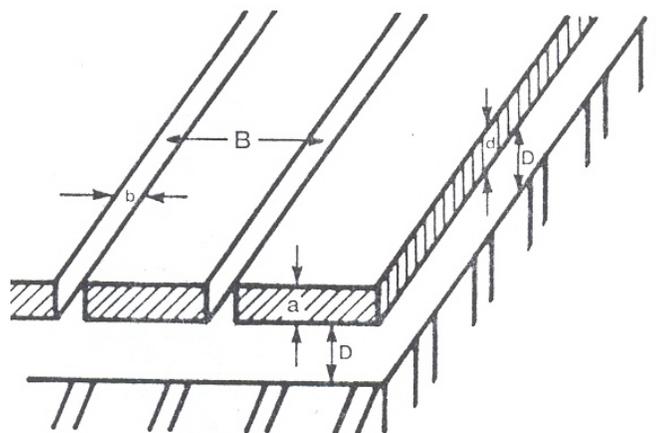


Figura 25 Resonador lineal de Helmholtz de estructura periódica

Para conocer su frecuencia de resonancia primero tenemos saber las siguientes expresiones:

$$1/K = B[(d/b) + (e/b)]...42$$

$$e = (2/\pi) b \ln \operatorname{cosec}[(\pi/2)(b/B)]...43$$

y ahora podemos obtener la expresión para calcular la frecuencia de resonancia que es:

$$f_0 = (c/2\pi) \{ [B(d/b + e/b)] / L \}^{1/2}...44$$

## 1.8 Absorción

El fenómeno de absorción muchas veces no lo tenemos muy claro, se basa principalmente en el principio de la conservación de la energía que nos dice que la energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma; con este principio partimos de que la energía total incidente sobre una superficie no desaparece, sino que, se transforma como se muestra en la siguiente expresión en su balance energético:

$$E_i = E_a + E_r + E_t...45$$

y normalizando respecto a  $E_i$  tenemos:

$$1 = \alpha + r + t...46$$

donde :

$\alpha = E_a/E_i =$  coeficiente de absorción acústica

$r = E_r/E_i =$  coeficiente de reflexión

$t = E_t/E_i =$  coeficiente de transmisión

Existen diferentes tipos de materiales que nos ayudan a absorber las ondas sonoras y los cuales se clasifican en cuatro grupos.

### **1.8.1 Grupo 1 Materiales porosos flexibles y no flexibles**

Estos materiales funcionan cuando la onda sonora incidente provoca la vibración del aire dentro de los poros del material provocando un movimiento del material que provoca que la energía sonora se disipe en calor por la fricción del movimiento.

En los materiales fibrosos la energía es absorbida por difracción de las ondas entre las fibras y por la vibración de las fibras individuales.

Entre estos materiales podemos encontrar los yesos acústicos, bloques de hormigón porosos, fibras de vidrio, lanas de roca, fieltros, etc.

Los valores del coeficiente de absorción dependerán de la frecuencia del sonido, el espesor del material y su montaje.

Los parámetros de medición que se involucran en este tipo de materiales son:

#### **Espesor de la capa del material**

La absorción en función del espesor del material es baja cuando el espesor  $D$  es menor que la longitud de onda dentro del material. Mientras mayor sea el espesor del material mayor será el camino que recorra la onda sonora dentro de éste por lo que las partículas del aire se mueven a mayor velocidad.

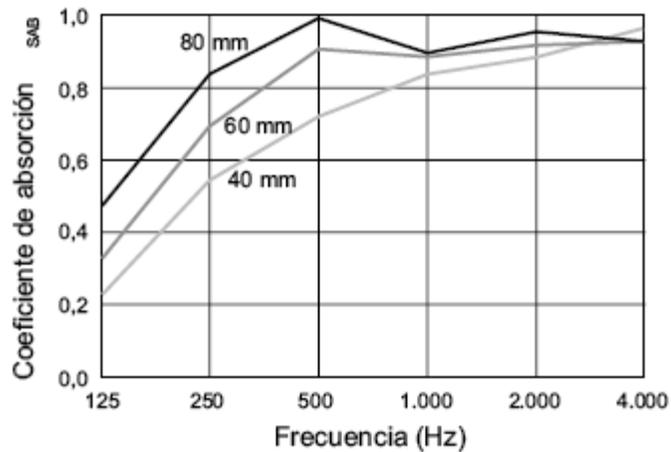


Figura 26 Variación de la absorción para diferentes espesores de lana de vidrio

## **Frecuencia del sonido**

## **Resistencia del flujo del aire**

Esta relacionado con la impedancia acústica del material o sea su capacidad de absorción, se puede hacer una analogía a una resistencia eléctrica. La resistencia específica esta dada por esta expresión:

$$Re = \Delta p / Ta...47$$

donde:

Re (MKS Rayls/m)

$\Delta p$  = caída de presión.

T = espesor del material.

a = velocidad del aire.

por lo que la resistencia al flujo está dada por:

$$R = ReT...48$$

Que nos indica que la resistencia depende del tamaño, volumen, orientación y forma de las fibras, del espesor del material y de la densidad superficial.

## Porosidad

Es la razón entre el volumen del aire del espacio vacío contenido en la muestra y el volumen total de la muestra y se expresa

$$\phi = Va/Vt...49$$

donde:

Va es volumen del aire en espacio vacío.

Vt es volumen total de la muestra.

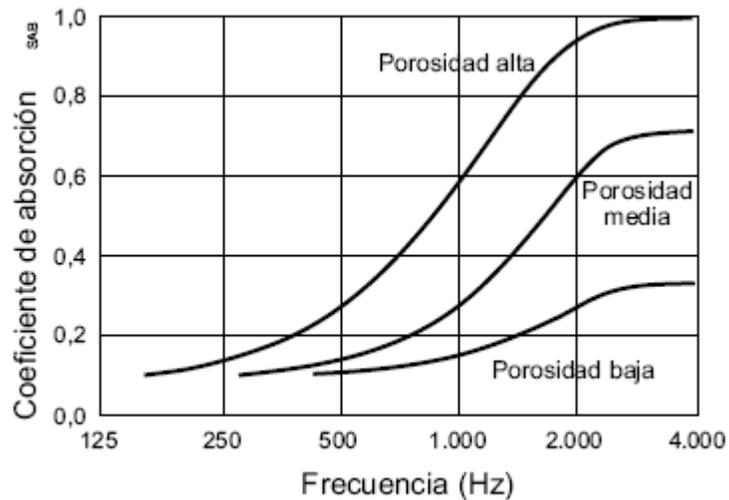


Figura 27 Variación de la absorción de un material absorbente con distintos grados de porosidad

## Factor de estructura

Mide las irregularidades en la forma de los poros y su distribución direccional. La composición interna de la estructura afecta a la conducta acústica de los materiales porosos.

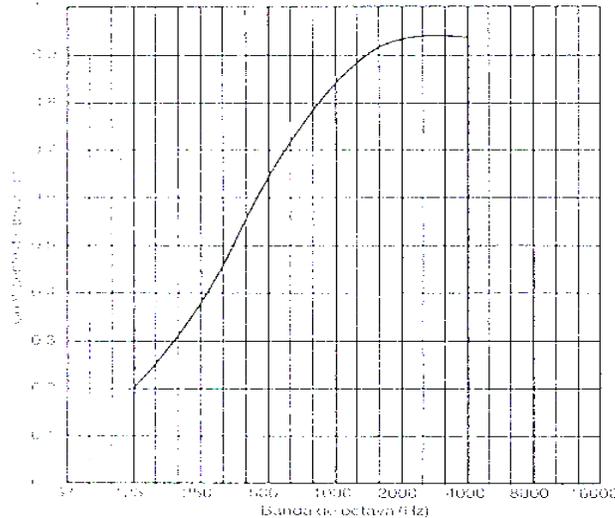


Figura 28 Curva de absorción típica del grupo 1

### 1.8.2 Grupo 2 Materiales flexibles

En su interior tienen una gran porosidad para ser lo suficientemente flexibles ya que en el exterior por lo general están cubiertos de una superficie no porosa muy ligera. Su funcionamiento es parecido al del grupo 1 ya que existen fricciones internas entre el esqueleto elástico y el aire provocando un intercambio de calor entre estos.

Los parámetros de medición que se involucran en este tipo de materiales son:

**Espesor de la capa del material**

**Frecuencia del sonido**

**Resistencia del paso del flujo del aire**

**Porosidad**

**Factor de estructura**

**Densidad superficial de la superficie que lo cubre**

**Rigidez y densidad del esqueleto**

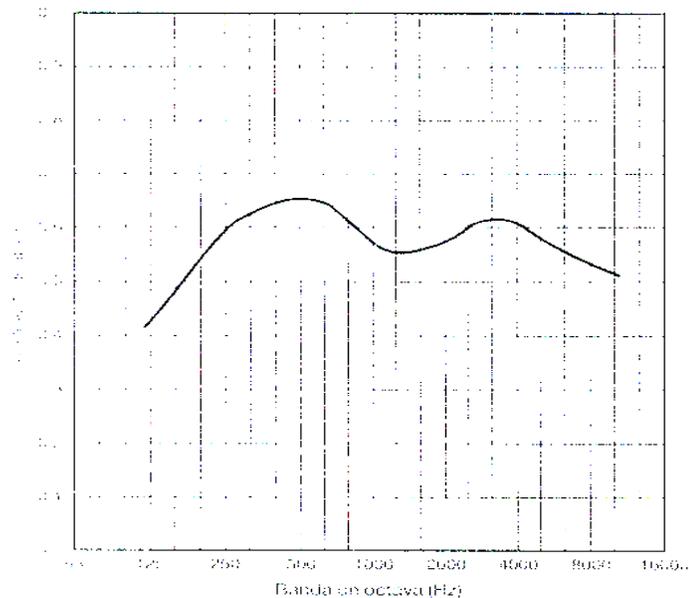


Figura 29 Curva de absorción típica del grupo 2

### **1.8.3 Grupo 3 Paneles ligeros o membrana**

Son montados a una determinada distancia de una pared rígida dejando entre estas una cavidad de aire que nos ayuda a absorber, también dentro de esta cavidad se puede utilizar material poroso como fibra de vidrio.

Los parámetros de medición que se involucran en este tipo de materiales son:

**Masa superficial del panel**

**Espesor de la capa de aire**

**Cantidad de amortiguamiento por fricción**

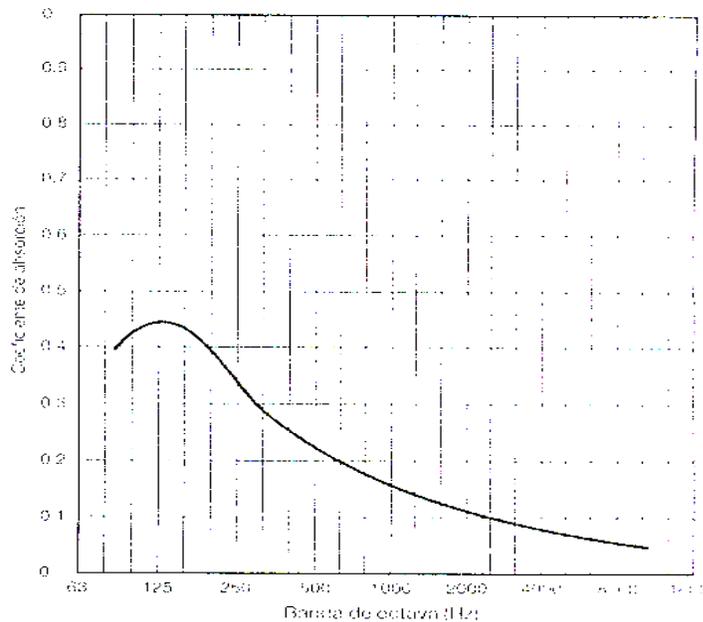


Figura 30 Curva de absorción típica del grupo 3

#### **1.8.4 Grupo 4 Resonadores Helmholtz múltiples**

Son básicamente láminas o placas perforadas que en su interior contienen material absorbente poroso.

Los parámetros de medición que se involucran en este tipo de materiales son:

**Geometría de la perforación**  
**Espesor de la lámina pesada**  
**Espesor de la capa de aire**  
**Efecto de disipación debida al relleno poroso**

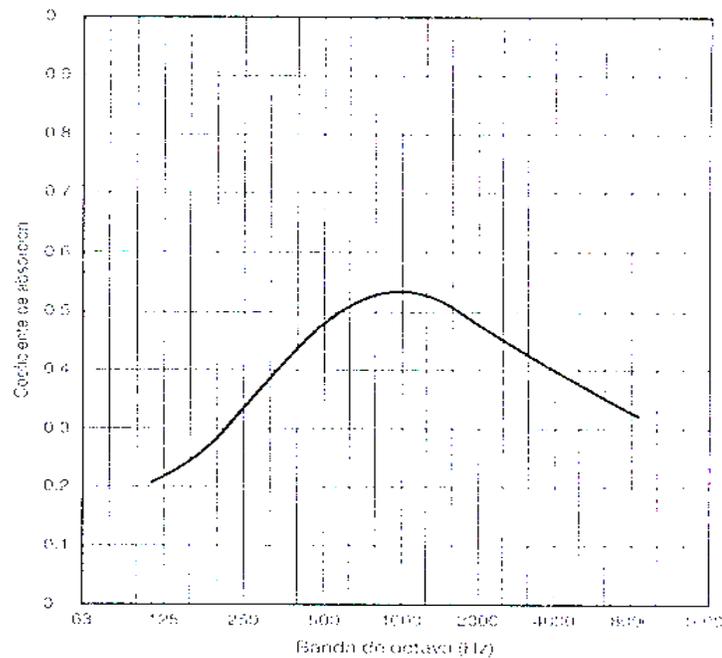


Figura 31 Curva de absorción típica del grupo 4

Otros factores que intervienen en la absorción del sonido son el público, las sillas y el aire.

La absorción de los materiales que se utilizan para la construcción de las paredes y los techos es casi nula ya que es material muy rígido y con poca porosidad. La disipación de la energía así como la absorción del sonido se da en las capas de aire adyacentes a cada una de las superficies consideradas. A mayor rugosidad en los materiales encontraremos coeficientes de absorción más elevados como se muestra en la tabla.

FRECUENCIA (Hz)	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Hormigón macizo	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04
Bloques de hormigón pintados	0,10	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08
Ladrillo revestido con yeso	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04

Tabla 5 Coeficiente de absorción  $\alpha_{SAB}$  de materiales habitualmente utilizados en la construcción de recintos

Por otro lado, la absorción producida por el aire poco si hablamos de recintos pequeños, y significativa en lugares de grandes dimensiones a frecuencias mayores a 2.2 [kHz]. El tiempo de reverberación tomando en cuenta el efecto que provoca el aire esta dado por la siguiente expresión:

$$RT = (0.161 * V) / (\Sigma(S * \alpha) + 4mV) [s] \dots 50$$

T = tiempo de reverberación en [s]

V = volumen del local en metros cúbicos

$\Sigma(S * \alpha)$  = la suma de los productos de todas la áreas de la superficie que limita el local por su correspondiente coeficiente de absorción  $\alpha$ .

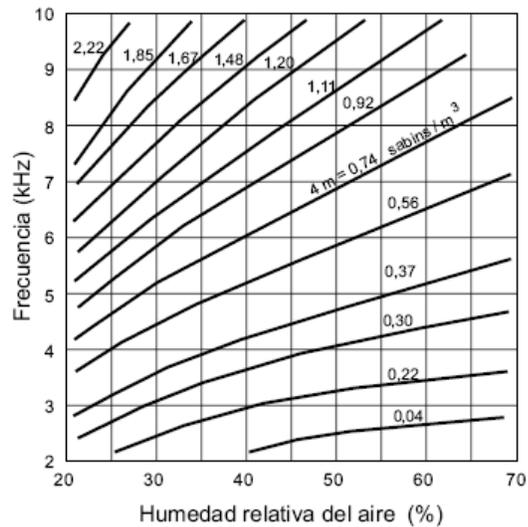


Figura 33 Gráfica para la determinación del factor 4m (m es la constante de atenuación del sonido en el aire)

Por otro lado tenemos también superficies vibrantes que también afectan en la acústica de un recinto, éstas superficies pueden ser puertas, ventanas y paredes ligeras. En estas superficies una parte de la energía es reflejada hacia el exterior, la energía no es disipada, el efecto es equivalente a una real absorción ya que dicha energía es sustraída de la energía sonora incidente.

Podemos calcular el coeficiente de absorción de estas superficies en función de su frecuencia con la siguiente expresión:

$$\alpha = (2\rho_0 c / \omega M)^{1/2} \dots 51$$

donde:

$\rho_0$  es la densidad del aire.

$$\Omega = 2\pi f$$

M es la masa por unidad de superficie en  $[\text{kg}/\text{m}^2]$

Esta expresión es válida cuando el numerador sea menor con el denominador.

## 1.9 Aislamiento acústico

Cuando tenemos una pared que divide a dos salas y una onda sonora incide sobre la pared se provoca una vibración que afecta ambas salas. A la relación que existe entre la potencia sonora transmitida y la incidente se le llama factor de transmisión y esta dado por la siguiente expresión:

$\tau = W_T/W_i =$  potencia sonora transmitida/potencia sonora incidente

y el aislamiento acústico de una pared lo podemos definir de una forma sencilla como:

$$R = 10\log(W_i / W_T)...52$$

Existen diferentes casos en los que tenemos transmisión de ondas sonoras entre salas.

### **Sala reverberante /sala reverberante**

Si en una sala tenemos un campo sonoro  $W_i$  ( $W_i = I_i S$ ) sobre una superficie y en la otra sala tenemos una potencia transmitida  $W_T = W_a$  ( $W_a = I_a A$ ) tenemos:

$$R = L_{p1} - L_{p2} + 10\log S / A...53$$

donde:

L es el nivel de presión sonora respectivamente.

S es el área de la pared que divide las salas.

A son las unidades de absorción instaladas en la sala receptora.

El aislamiento acústico bruto se puede expresar como:

$$D = L_{p1} - L_{p2}$$

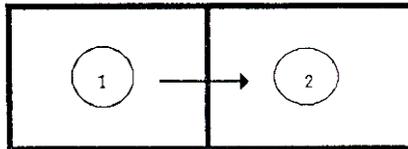


Figura 34. Transmisión entre salas reverberantes.

Para el cálculo del aislamiento acústico bruto e integrando la fórmula de Sabine se puede calcular también de la siguiente forma:

$$R = L_{p1} - L_{p2} + 10 \log (T / T_0) + 10 \log (S / 0.32V) \dots 54$$

donde:

T = tiempo de reverberación de la sala receptora.

V = volumen del recinto.

### **Sala reverberante / Espacio exterior libre**

En la sala tenemos la fuente emisora que va a transmitir hacia el espacio exterior de forma esférica ya que una onda sonora se comporta

de forma esférica para espacios al aire libre. Para este caso tenemos nuestro aislamiento acústico específico de la siguiente forma:

$$R = R = L_{p1} - L_{p2} - 6 \dots 55$$

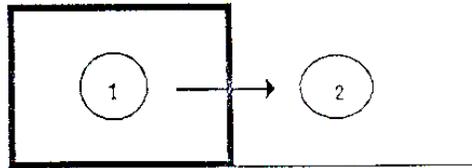


Figura 35. Sala reverberante – espacio y hormigón.

### **Onda Plana desde un espacio y hormigón hacia una sala reverberante**

En este caso la energía absorbida es igual a la transmitida debido a que tenemos que la onda sonora transmitida llega a un espacio difuso por las condiciones de la sala, por lo que tenemos

$$R = L_{p1} - L_{p2} + 10\log S/A + 6 \dots 56$$

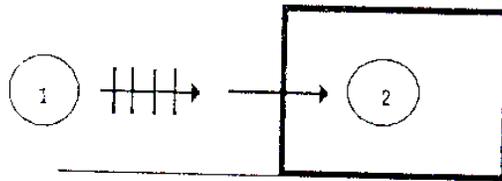


Figura 36 Transmisión de espacio exterior a interior de sala

## Ruido de la calle a una sala reverberante.

En este caso hablamos de ondas planas semiesféricas ya que en los espacios urbanos el aislamiento acústico depende del ángulo de incidencia del sonido sobre las fachadas.

$$R = L_{p1} - L_{p2} + 10 \log S/A + 10 \log 2 \cos\theta \dots 57$$

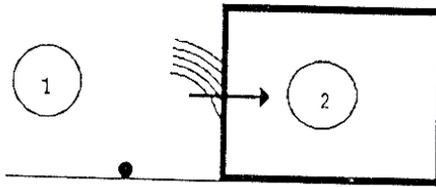


Figura 37 Transmisión de la calle a sala reverberante

## Pared muy alta / dos espacios exteriores

Suponiendo que la onda sonora es plana e incide con un ángulo  $\theta$  tenemos

$$R = L_{p1} - L_{p2} + 10 \log \cos\theta \dots 58$$

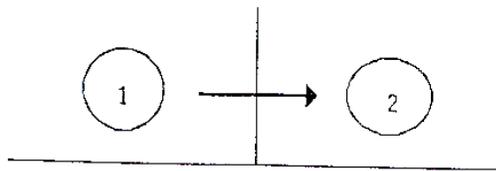


Figura 38 Transmisión entre espacios libres

Como ya se mencionó la transmisión de ruido entre una fuente sonora y el receptor se da por el efecto de la vibración a que se somete la pared

que perturba el espacio aéreo del receptor y no lo hace como si fuera una transmisión fluida del aire entre ambos puntos.

### **1.9.1 Paredes simples**

Por lo general cuando realizamos una construcción usamos los muros de materiales rígidos por lo que están provistas de elasticidad. La expresión que rige este movimiento esta dada como:

$$P_1 - P_2 = [jm\omega - j(B\omega^3 \text{sen}^4\theta/c^4)][v]...59$$

donde:

B es la rigidez de la pared.

Otro factor que tomamos en cuenta es la frecuencia crítica, que es inversamente proporcional al espesor de la pared. La frecuencia crítica no se relaciona con la más baja frecuencia de resonancia. Para las paredes gruesas existe una frecuencia crítica cuando haya una baja frecuencia, en cambio, para las paredes delgadas la frecuencia crítica estará en las frecuencias altas. La expresión que nos da esta frecuencia crítica está dada por:

$$f_c = (c^2 / 1.8h \cdot (\rho_p/E)^{1/2})...60$$

donde:

$\rho_p$  es la densidad del material de la pared.

H es el espesor de la placa.

F es la frecuencia.

Para aumentar la frecuencia crítica de una pared podemos añadir masa sin alterar la rigidez de la placa.

Otro parámetro que tomamos en consideración es el factor de amortiguamiento que es una fricción a la fuerza dinámica de excitación. El factor de amortiguamiento en función de la frecuencia esta dado por la expresión:

$$n_f(f) = n_c(f_c/f)^{1/2} \dots 61$$

donde:

$n_f$  es el factor de amortiguamiento interno del material a la frecuencia crítica de la pared.

Por lo tanto:

$$n_{total} = (1/f)^{1/2} \cdot (1 + n_c f_n) \dots 62$$

La tabla muestra la frecuencia crítica  $f_c$ [Hz] y factor de amortiguamiento de diferentes materiales.

Material	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Frecuencia crítica para 1 cm ([Hz] .-	Factor de amortiguamiento n
<b>Ladrillo macizo</b>	<b>1650</b>	<b>2380</b>	<b><math>6.1 \times 10^{-03}</math></b>
<b>66ormigón denso</b>	<b>2350</b>	<b>2100</b>	<b><math>5.1 \times 10^{-03}</math></b>
<b>Yeso</b>	<b>1070</b>	<b>3325</b>	<b><math>3.0 \times 10^{-03}</math></b>
<b>Acero</b>	<b>7850</b>	<b>1000</b>	<b><math>6.0 \times 10^{-05}</math></b>
<b>Aluminio</b>	<b>2700</b>	<b>1260</b>	<b><math>3.5 \times 10^{-03}</math></b>
<b>Plomo</b>	<b>11300</b>	<b>5000</b>	<b><math>2.1 \times 10^{-03}</math></b>
<b>Fibro cement o</b>	<b>1090</b>	<b>3700</b>	<b><math>7.0 \times 10^{-03}</math></b>
<b>Madera-cemento</b>	<b>1200</b>	<b>5000</b>	<b><math>3.0 \times 10^{-03}</math></b>
<b>Cartón-Yeso</b>	<b>875</b>	<b>4670</b>	<b><math>6.3 \times 10^{-02}</math></b>
<b>Vidrio</b>	<b>2500</b>	<b>1200</b>	<b><math>2.0 \times 10^{-03}</math></b> <b>monolítico</b>
			<b><math>2.0 \times 10^{-02}</math></b> <b>laminar</b>
<b>Madera aglomerada</b>	<b>750</b>	<b>2960</b>	<b><math>2.0 \times 10^{-03}</math></b>
<b>Madera pino</b>	<b>700</b>	<b>1670</b>	<b><math>4.1 \times 10^{-02}</math></b>
<b>Madera contraplanchada</b>	<b>600</b>	<b>2075</b>	<b><math>2.8 \times 10^{-03}</math></b>
<b>Madera Flandes</b>	<b>640</b>	<b>1714</b>	<b><math>2.1 \times 10^{-02}</math></b>
<b>Caucho espumado</b>	<b>480</b>	<b>27078</b>	<b><math>2.0 \times 10^{-02}</math></b>
<b>Caucho normal</b>	<b>1000</b>	<b>85000</b>	<b><math>5.0 \times 10^{-02}</math></b>
<b>Poliestireno extrusionado</b>	<b>33</b>	<b>10880</b>	<b><math>1.0 \times 10^{-02}</math></b>

Tabla 6 frecuencia crítica  $f_c$ [Hz] y factor de amortiguamiento de diferentes materiales

El cálculo de R para diferentes valores de  $f_c$  se puede hacer con las siguientes fórmulas

$$1. f < f_c, R = 20 \log m + 20 \log f - 48 \dots 63$$

$$2. f > f_c, R = 20 \log (\omega m / 2 \rho c) - 10 \log n / 2n - 10 \log [f_c / f (1 - f_c / c)] \dots 64$$

$$3. f = f_c, R = 20 \log (\omega m / 2 \rho c) - 10 \log n / n \dots 65$$

la siguiente tabla nos muestra el comportamiento de diferentes materiales a diferentes frecuencias en cuanto a su aislamiento acústico.

MATERIALES	FRECUENCIAS [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
Pared de yeso de 75mm	29	34	27	31	41	49
Pared ladrillo macizo de 50mm	31	36	30	34	42	50
Pared ladrillo macizo de 140mm	38	30	38	46	54	61
Pared ladrillo de 220mm	39	39	45	52	59	66
Pared hormigón 140mm	42	42	48	55	62	68
Pared hormigón 200mm	41	45	52	58	65	72
Madera aglomerada 12mm	13	18	23	26	27	22

Tabla 7 materiales a diferentes frecuencias en cuanto a su aislamiento acústico

### 1.9.2 Paredes dobles

Consiste prácticamente en dos paredes simples puestas simétricamente un frente a otra separadas por una cavidad de aire en la que dentro de esta cavidad podemos poner material absorbente. El aire actúa como un muelle entre las dos paredes y por lo tanto también tenemos una frecuencia de resonancia  $f_0$  que la podemos expresar así:

$$f_0 = 1/2\pi[\rho c(m_1 + m_2)/m_1 m_2 L]^{1/2} \dots 66$$

donde L es el espesor de la cavidad de aire en [m]

También tenemos una frecuencia límite o de cavidad:

$$f_L = c/2L = 170/L \dots 67$$

donde L está en metros

a los múltiplos de esta expresión se les denomina frecuencias de espesor y para evitarlas se coloca material absorbente entre las paredes. Este material absorbente puede mejorar unos 5 y 10 [dB] el aislamiento acústico de la pared doble y disminuir la frecuencia de resonancia hacia las frecuencias graves.

Existen cuatro regiones para calcular el aislamiento acústico en función de la frecuencia y estas son:

$$1. f < f_0, R = R(m_1 + m_2) = 20 \log(m_1 + m_2)f - 48 \dots 68$$

$$2. f_0 < f < f_L, R = R_{m1} + R_{m2} + 20 \log f_L - 29 - R_{mi} = 20 \log m_i f - 48 \dots 69$$

$$3. f > f_L, R = R_{m1} + R_{m2} + 6 \dots 70$$

$$4. f > f_{ci}, R = 40 \log(\omega m / \rho c) + 10 \log(n^3 / 2\pi)(f/f_c)(1 - f_c/f) \dots 71$$

en la siguiente tabla se muestra los diferentes valores de aislamiento acústico que tienen la combinación de dos materiales de acuerdo a la frecuencia.

MATERIALES	FRECUENCIA [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
Pared ladrillo macizo 30mm + cavidad de aire 60mm + placa de cartón-yeso 13mm	32	38	44	51	58	59
Placa cartón-yeso 13mm + cavidad de aire 50mm + placa cartón-yeso 13mm	19	25	30	37	44	46
Placa cartón-yeso 15mm + cavidad de aire 200mm + placa cartón-yeso 15mm	23	26	32	38	45	48
Madera aglomerada 12mm + cavidad de aire 100mm + madera aglomerada 12mm	17	22	27	34	40	43
Pared ladrillo macizo 200mm enyesada 10mm por cara vista + cavidad aire 150mm + pared ladrillo 150mm enyesada 10mm cara vista	40	53	61	69	78	87
Placa yeso 10mm + lámina plomo 1,5mm adherida + fibra mineral 200mm + lámina plomo 1,5mm + placa yeso 10mm	23	32	44	56	69	72

Tabla 8 Diferentes valores de aislamiento acústico con la combinación de dos materiales de acuerdo a la frecuencia

### 1.9.3 Elementos constructivos

Entre los elementos que se ocupan en una construcción tenemos lo que son las ventanas, puertas, paredes y que todos se ven involucrados en la acústica y aislamiento del lugar. Todos ellos tienen un factor de transmisión acústica distinto.

#### a) Ventanas

Las frecuencias que chocan contra una ventana son ocasionadas por diversas fuentes como el tráfico, en los que predominan las bajas frecuencias, los días lluviosos, que provocan altas frecuencias, el paso

de transporte público, el tránsito de aviones, etc; lo que nos importa sobre todo son las provocadas por la voz que van de 500[Hz] a 2000[Hz] . Existen diferentes tipos de vidrios:

**Monolítico ordinario.** Nos da 6dB cada que doblamos su espesor, pero si la superficie es grande sólo nos da 4dB/octava y su frecuencia crítica es de  $f_c = 1200/h$ , donde h es el espesor del vidrio en cm.

**Templado y reforzado con hilos.** Acústicamente es similar al ordinario.

**Texturado.** Semejante a los anteriores.

**Laminado.** Hecho de butiral de polivinilo o de polimetilmetacrilato y nos da un gran aumento en el factor de amortiguamiento de 10 veces más que el monolítico y por lo tanto mayor aislamiento acústico.

Existen frecuencias de resonancia entre los 400 y los 10000[Hz] debido al uso de vidrios dobles con una cavidad de aire entre los 6 [mm] y los 20 [mm] lo que solo nos da una aislamiento térmico, esta se puede evitar poniendo una cavidad de aire mayor entre los 50 [mm] y los 200 [mm]. Es conveniente que los vidrios tengan diferentes espesores en un 30% entre ambos para aumentar el aislamiento acústico.

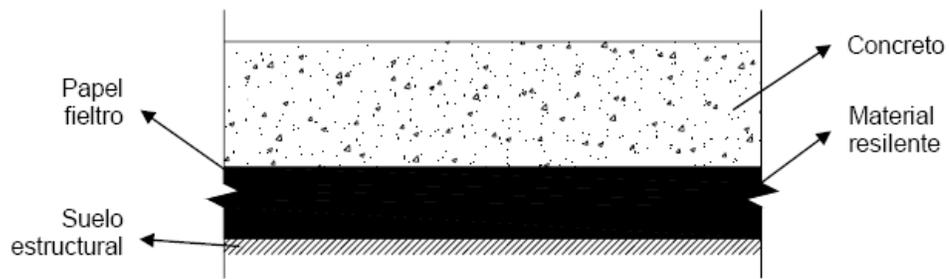
También es bueno tener una inclinación de las ventanas ya que así nos proporciona un máximo de aislamiento acústico ya que a medida que disminuye el ángulo de incidencia del sonido aumenta el aislamiento. También se recomienda un sellado hermético alrededor del perímetro del vidrio contra el marco.

## **b) Paredes**

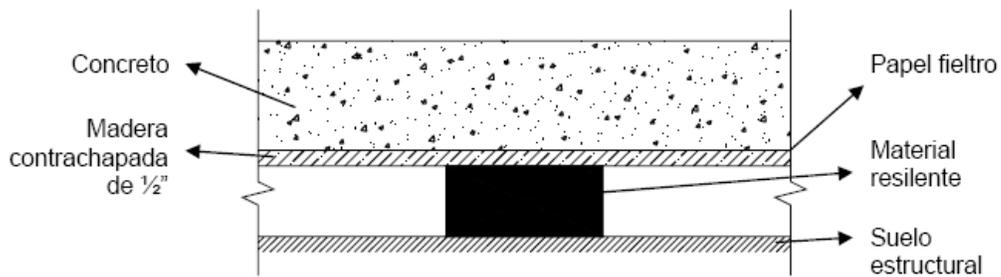
Las paredes de fachada de un edificio no necesitan un aislamiento acústico muy alto, puesto que éste debe depender de ventanas de la fachada y de su aislamiento acústico específico por ejemplo el hormigón de 14 [cm] o la pared de ladrillo de 12 [cm] o paredes dobles con fibra mineral pueden funcionar y ser buen aislante.

### **1.9.4 Estudios flotantes**

Para aislar una sala de las vibraciones y ruidos de baja frecuencia por lo general se recurre a esta técnica en la que el piso es suspendido utilizando materiales como goma o corcho entre el piso de la sala y el suelo estructural. Los métodos más comunes que se utilizan es el poner capas continuas y el sistema de monturas aislantes. En el primero se pone una capa de lana mineral de unos 2.5 [cm] de espesor sobre el suelo estructural y sobre esta un papel fieltro o lámina de plástico para evitar la humedad del cemento, sobre esta capa se pone el concreto logrando así que la lana mineral se comprima con el objeto de que alcance una frecuencia de resonancia de 100 [Hz]. En el perímetro se puede poner una goma de neopreno para tener así aislado totalmente el piso. El segundo método consiste en poner unas monturas de neopreno sobre el suelo estructural y sobre ellas una capa de madera contrachapada de  $\frac{1}{2}$  '' y otra capa de lámina de plástico o papel fieltro para igual que en el otro método evitar la humedad, después se pone la capa de concreto o una capa de hormigón. Con estas dos técnicas podemos obtener atenuaciones de 20[dB] a 100[Hz] .



(a) Capa continua



(b) Sistema de monturas aislantes

Figura 39 Métodos comunes en la construcción de estudios flotantes

## 1.10 Elementos de acústica variable

Estos elementos son una buena alternativa cuando una sala es ocupada para diferentes funciones, por ejemplo si queremos grabar voces o percusiones o trompetas la acústica debe ser un tanto diferente, los elementos de acústica variable nos ayudan a no tener que modificar todo el lugar o a no tener salas específicamente diseñadas para cada instrumento por lo que resulta práctico y más económico tenerlos presentes en nuestro diseño.

### 1.10.1 Cortinas

Este método sólo altera frecuencias altas y medias, las graves se conservan igual. Son cortinas corredizas de una densidad superior a los  $0.5 \text{ [kg/m}^2\text{]}$  puestas sobre una pared que es muy reflejante, a mayor distancia se encuentren de la pared es mejor, consiguiendo un bajo tiempo de reverberación con las cortinas cerradas y variando este tiempo dependiendo de que tanto se abren o cierran.

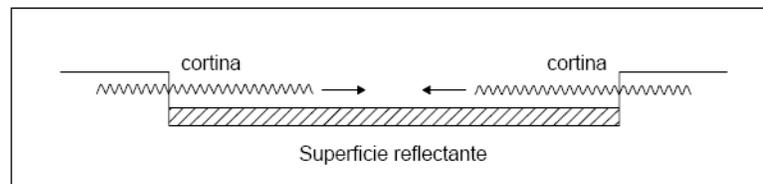


Figura 40 Sistema de cortinas

### 1.10.2 Paneles móviles

Son un tipo de pared movable formada por una capa rígida y una superficie blanda o absorbente este tipo de paneles permite que sean puestos en determinados lugares por ejemplo alrededor de un locutor para secar esa zona de la sala.

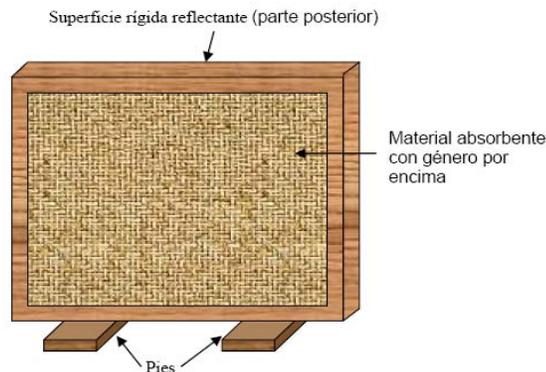


Figura 41 Panel móvil típico

### 1.10.3 Panel móvil reflectante

Estos paneles se instalan sobre la pared de forma corrediza y son el 50% de material absorbente y el otro 50% de material reflectante. Cada panel se mueve independientemente y así podemos tener determinado grado de reverberación continuo según abramos los paneles y cuantos abramos. Los paneles reflectantes tienen una forma convexa para evitar los ecos y coloraciones.

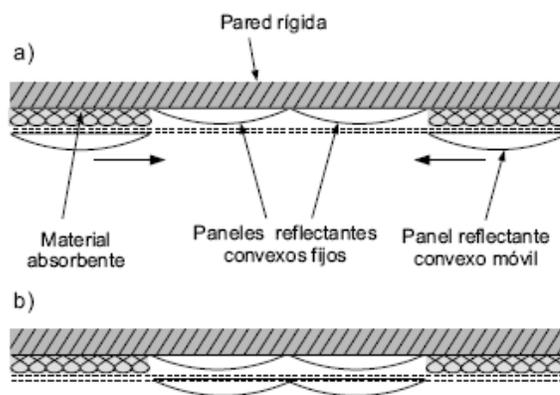


Figura 42 a) Posición de mínima absorción, b) Posición de máxima absorción

### 1.10.4 Paneles perforados superpuestos

Este tipo de paneles simulan un resonador. Constan de dos paneles perforados reflectantes (uno fijo y otro móvil) Montados sobre una capa de material absorbente que esta fija sobre la pared. Cuando el panel de arriba queda alineado con el fijo se forma un resonador múltiple, cuando sucede lo contrario el material absorbente queda totalmente oculto. En este sistema el tiempo de reverberación es poco uniforme ya que disminuye notablemente cuando encuentra la frecuencia de resonancia.

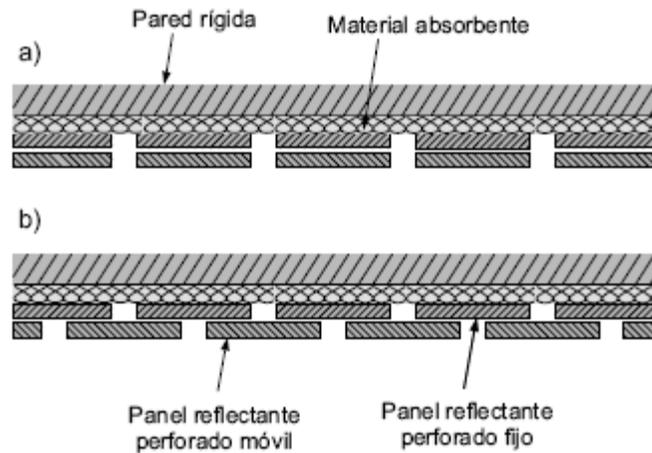


Figura 43 a) Posición de máxima absorción (resonador múltiple), b) Posición de mínima absorción

### 1.10.5 Panel giratorio de 180°

Este sistema consta de paneles con una cara reflectante y una cara absorbente que gira hasta 180° colocados sobre la pared que tiene un 50% de material absorbente.

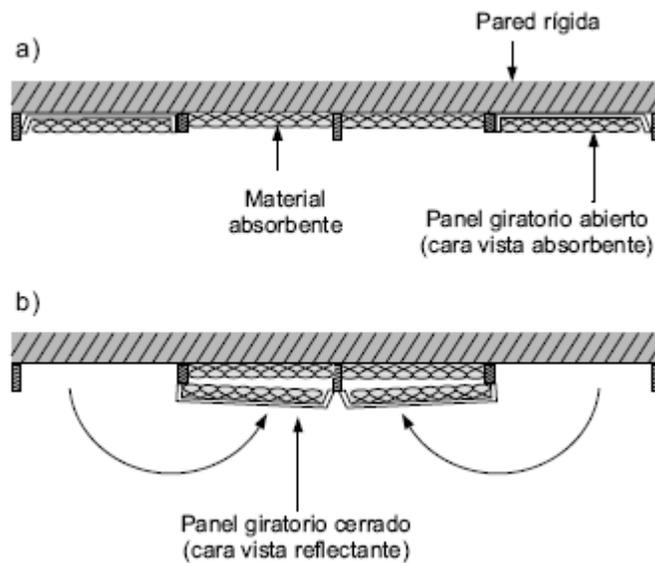


Figura 44 a) Posición de máxima absorción, b) Posición de mínima absorción

### 1.10.6 Panel giratorio de 90°

Es el mismo concepto y montaje que los paneles de 180° con la variante de que el giro es alternado y la superficie reflectora es de forma convexa para evitar ecos o coloraciones.

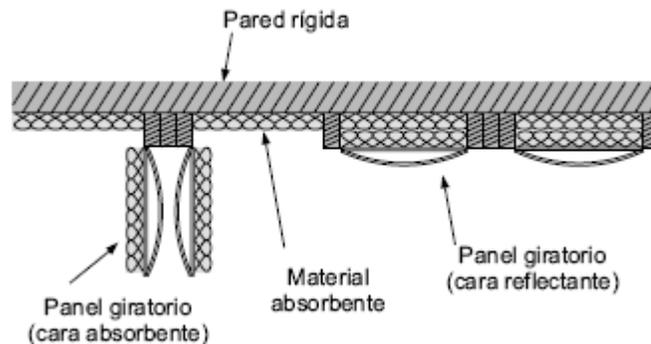


Figura 45 Panel giratorio de 90° con sentido alternado

### 1.10.7 Panel giratorio de 360°

Estos paneles ofrecen la mayor versatilidad en una sala ya que giran a 360° sobre su eje, por lo general tienen una forma de prisma en la que en una cara tienen una superficie reflectante, en otra material absorbente y en la otra un difusor; cuando se tienen varios paneles y todos puestos con la cara absorbente tenemos el máximo de absorción, por el contrario si son puestos con la cara reflectante tenemos la mínima absorción. Estos paneles nos permiten tener una gran variedad de combinaciones para tener diferentes tiempos de reverberación.

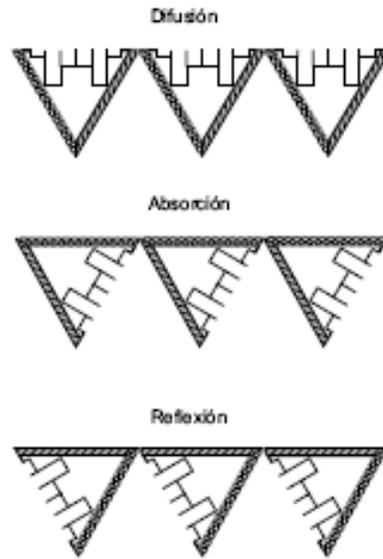


Figura 46 Tres tipos de combinaciones para tener diferente acústica

### 1.10.8 Paneles en persianas

Es el mismo principio que los paneles anteriores instalados en forma de persiana veneciana ya sea enlazadas por un sistema de apertura / cierre o por un par de cordones o placa.

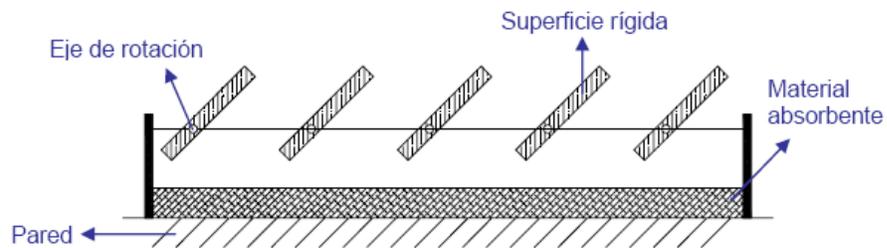


Figura 47 Sistema de paneles en persiana

## 2 Ubicación y descripción del proyecto

Se tiene una casa habitación en Paseos de la Herradura con vista a la barranca y construida en desniveles. En el último desnivel (2º desnivel) se tiene un cuarto de juegos el cual se va a desmantelar y adaptar como estudio de grabación.

Debido a su ubicación hacia una barranca donde no hay construcciones sino mucha vegetación no se tienen problemas de ruido en el segundo desnivel que es un parámetro a considerar dentro del proyecto. La calle en donde se accesa al inmueble no es muy transitada ya que es una zona residencial y sólo se permite el paso a residentes, por lo que no hay vibraciones mecánicas de consideración ocasionadas por el paso de transporte pesado. En el primer desnivel la mayor parte del área es un jardín y una pequeña estancia adaptada a cuarto de televisión, por el cual se accesa al área destinada para el proyecto.

El área donde está planeado dicho estudio es mayor a la de muchos estudios profesionales comerciales que actualmente operan en la zona. El uso original para el área destinada consideraba el área en su totalidad sin divisiones excepto cuatro áreas ocupadas como pequeñas bodegas y baños.

De acuerdo a la distribución propuesta y aprobada por el dueño, se planea tener dos salas de grabación y una cabina de control, en la cabina de mayor volumen se realizarán las grabaciones de percusiones, baterías, etc., en la otra cabina se grabarán las cuerdas y metales así como voces.

Esta situación obligó a redefinir las áreas para el proyecto y así hacer uso de obra civil para levantar nuevos muros que dividan el área de las cabinas de grabación y el área de la cabina de control así como el acceso al área. Dos de los nuevos muros tendrán ventanas diseñadas acústicamente y amplias para tener contacto visual entre las personas que están en las salas de grabación y el cuarto de control. Se pondrán puertas acústicas diseñadas específicamente para estudios para aislar el ruido entre los cuartos. Se cambió el piso y adecuó con material acústico para evitar las vibraciones originadas por los pasos de las personas. También se hizo cambios al techo ya que el techo original solo consideraba el aspecto estético. Las paredes se recubrirán con materiales acústicos calculados para los tiempos de reverberación determinados por los cálculos y las mediciones.

En general, en cuanto a lo acústico se busca obtener un tiempo de reverberación ligeramente arriba del tiempo óptimo para lograr un sonido más natural según las necesidades del productor, mediante el uso de materiales acústicos, difusores y obra civil ya que por el uso a la que se tenía asignada ésta área el diseño es poco funcional.

En cuanto a la parte electrónica se buscó obtener el óptimo desempeño de cada equipo así como la máxima flexibilidad en el aspecto operativo diseñando para esto el ínter conectado de todos los equipos periféricos con ayuda de una serie de tiras de parcheo para una máxima flexibilidad y versatilidad en su manejo.

Para superar la acústica y electrónica del pequeño estudio instalado hace diez años dentro de la casa en un área muy restringida el cual era muy básico y austero y debido a que las necesidades y la competencia cada vez mayor exigen espacio específico para la grabación, más

comodidad para los usuarios y un uso del equipo electrónico más dinámico. Se busca reutilizar el material y el equipo del primer estudio para reducir los costos del proyecto, sobre todo en cuanto a equipo electrónico.

## 3 Análisis de los resultados de las mediciones acústicas en el interior del estudio

### Diseño Estudio A

#### 3.1 Geometría

##### 3.1.1 Volumen

El volumen obtenido en la sub-división de las áreas de este estudio quedo con un volumen de  $181.83\text{m}^3$

##### 3.1.2 Formas y dimensiones

Área muro concreto lateral izq. =  $27.48\text{m}^2$

Área pared tablaroca rectángulo lateral der. =  $6.075\text{m}^2$

Área muro concreto posterior =  $14.499\text{m}^2$

Área muro concreto frontal =  $10.586\text{m}^2$

Área pared tablaroca c/puerta =  $12.5\text{m}^2$

Área pared tablaroca ventana lateral =  $17.8678\text{m}^2$

Área piso =  $55.949\text{m}^2$

Área techo =  $55.949\text{m}^2$

Área ventana frontal =  $3.973\text{m}^2$

Área ventana lateral =  $7.4612\text{m}^2$

Área puerta =  $2.2\text{m}^2$

Área cubo del árbol =  $10.1875\text{m}^2$

Área total <sub>muros</sub> =  $52.565\text{m}^2$

Área total <sub>pared tablaroca</sub> =  $36.4428\text{m}^2$

Área total <sub>cristal</sub> =  $23.8217\text{m}^2$

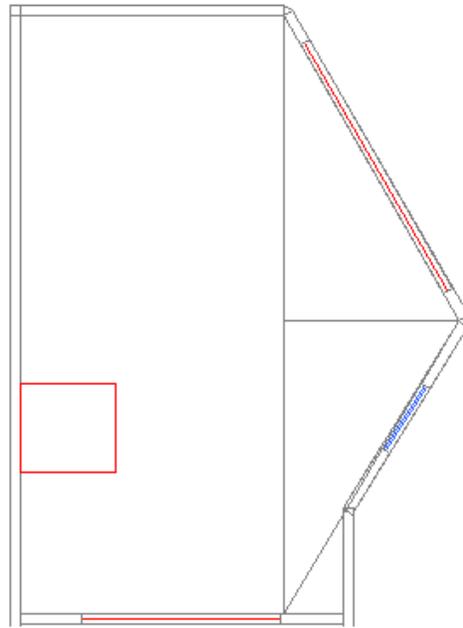


Figura 47 Vista superior Estudio A. En rojo se muestran los cristales y en azul la puerta

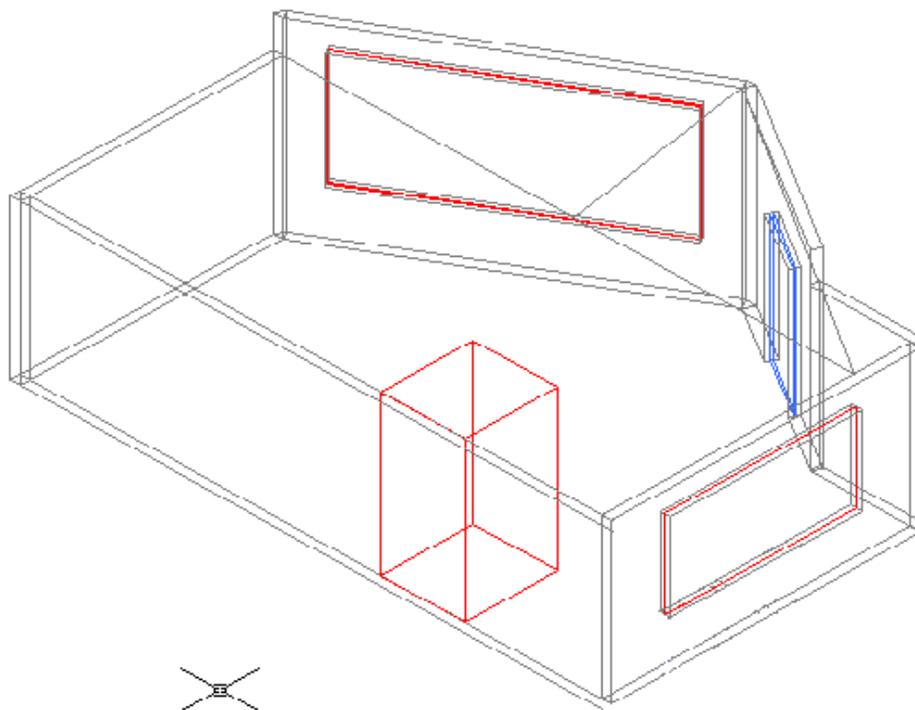


Figura 48 Vista isométrica SO Estudio A. En rojo se muestran los cristales y en azul la puerta

### 3.1.3 Mediciones del estudio A

Conforme a la distribución de materiales encontrada se calculó el tiempo de reverberación teórico mediante la fórmula de Sabine. Los resultados se muestran en las siguientes tablas y gráficas. En el Anexo II se detalla la

#### Primera toma:

MATERIAL	SUPERFICIE [m <sup>2</sup> ]	[[ Hz] ]					
		125	250	500	1000	2000	4000
CRISTAL 3MM VENTANA	23,822	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
		8,338	5,955	4,288	2,859	1,668	0,953
AIRE m <sup>3</sup>	181,834	0,0	0,0	0,0	0,00	0,01	0,02
		0,0	0,0	0,0	0,546	1,273	3,637
MUROS CONCRETO PINTADO	52,565	0,10	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08
		5,257	2,628	3,154	3,680	4,731	4,205
PLAFON TABLAROCA TABLERO DE YESO DE 15MM MONTADO EN IDENTICAS CONDICIONES	36,443	0,20	0,08	0,05	0,05	0,05	0,05
		7,289	2,915	1,822	1,822	1,822	7,000
PLAFON TECHO	55,949	0,14	0,27	0,33	0,37	0,36	0,36
		7,833	15,106	18,463	20,701	20,142	20,142
PISO PARQUE SOBRE HORMIGON	55,949	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
		2,238	2,238	3,916	3,357	3,357	3,916
SUPERFICIE m <sup>3</sup>	181,834	30,954	28,843	31,644	32,964	32,992	39,853
TIEMPO DE REVER TEO [s]		0,946	1,015	0,925	0,888	0,887	0,735
TIEMPO DE REVER PRAC [s]	1er toma	0,42	0,48	0,50	0,70	0,70	0,65

Tabla 9. Tiempo de reverberación estudio A donde se muestran los materiales utilizados en la primera toma y sus superficies.

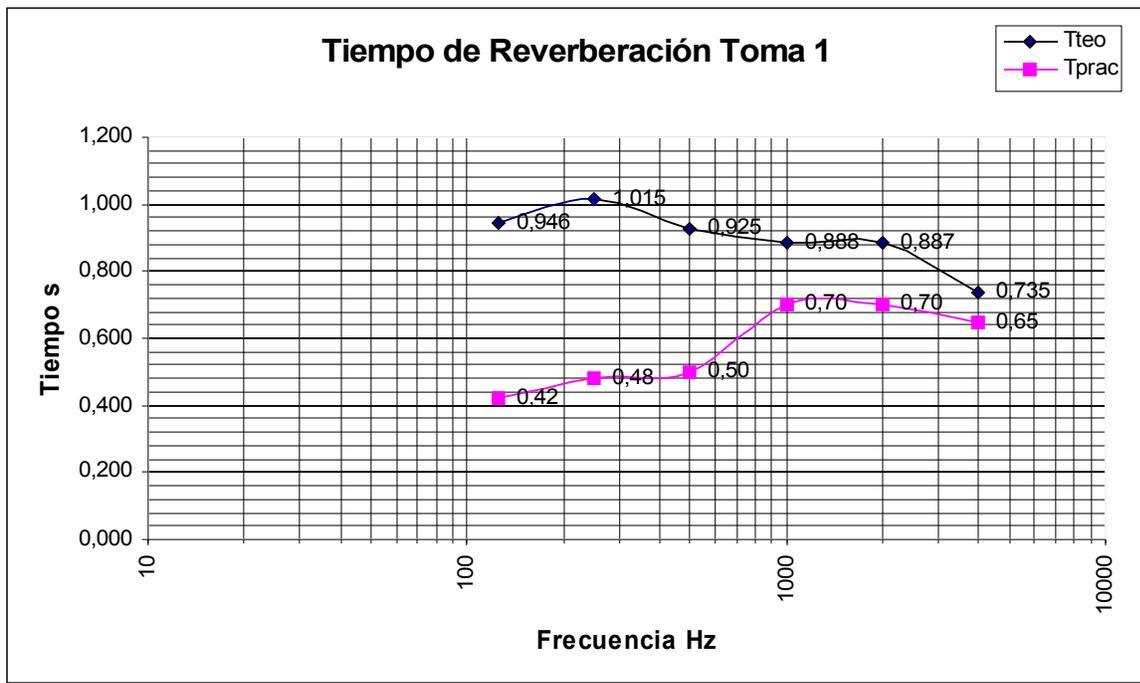


Figura 49 Tiempo de reverberación Estudio A Toma 1

Estas mediciones fueron tomadas antes de poner algún material acústico teniendo sólo la construcción con las separaciones de los estudios A, B, la cabina de control y los materiales que se enlistan en la tabla 1. se observa que entre los 125 [Hz] y los 250 [Hz] tenemos aún tiempo de reverberación práctico más o menos constante con una variación sólo del 0.08 [s] , entre los 125 [Hz] y los 500 [Hz], y también tenemos una lectura práctica homogénea entre los 1000 [Hz] y los 4000 [Hz] con una variación de 0.05 [s] entre ellos; la diferencia entre estos dos bloques es de 0.3 [s] siendo de consideración. Por otro lado, en el tiempo de reverberación teórico vemos que la gráfica desciende de los 125 [Hz] a los 4000 [Hz] habiendo entre estas frecuencias una diferencia de solo 0.221 [s], y una diferencia máxima de 0.535 [s] en los 250 [Hz] entre el valor teórico del práctico.

## Segunda toma:

Estas mediciones fueron tomadas con la incorporación de la trampa para bajos puesta alrededor de los muros por lo que ya se fue agregando el material acústico que se encuentra en la siguiente tabla.

MATERIAL	SUPERFICIE [m <sup>2</sup> ]	[Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000
CRISTAL 3MM VENTANA	23,822	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
		8,338	5,955	4,288	2,859	1,668	0,953
AIRE m <sup>3</sup>	181,834	0,0	0,0	0,0	0,00	0,01	0,02
		0,0	0,0	0,0	0,546	1,273	3,637
MUROS CONCRETO PINTADO	38,547	0,10	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08
		3,855	1,927	2,313	2,698	3,469	3,084
PLAFON TABLAROCA TABLERO DE YESO DE 15MM MONTADO EN IDENTICAS CONDICIONES	29,154	0,20	0,08	0,05	0,05	0,05	0,05
		5,831	2,332	1,458	1,458	1,458	7,000
PISO PARQUE SOBRE HORMIGON	55,949	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
		2,238	2,238	3,916	3,357	3,357	3,916
PLAFON TECHO PREEXISTENTE	55,949	0,14	0,27	0,33	0,37	0,36	0,36
		7,833	15,106	18,463	20,701	20,142	20,142
PERFOACEL PERFORADO AL 7.7% A 4 CM	7,01	0,17	0,50	0,90	0,49	0,34	0,34
		1,19	3,505	6,309	3,435	2,383	2,383
PERFOACEL PERFORADO AL 19.6% A 4 CM	7,01	0,12	0,47	1,00	0,83	0,60	0,50
		0,84	3,295	7,010	5,818	4,206	3,505
POLYURETANO 1 1/2 DENSIDAD 22 A 24KG/M3	14,02	0,11	0,14	0,36	0,82	0,90	0,97
		1,54	1,963	5,047	11,496	12,618	13,599
SUPERFICIE m <sup>3</sup>	181,834	31,669	36,322	48,804	52,368	50,573	58,219
TIEMPO DE REVER TEO [s]		0,924	0,806	0,600	0,559	0,579	0,503
TIEMPO DE REVER PRAC [s]	2A TOMA	0,28	0,32	0,28	0,36	0,26	0,26

Tabla 10. Tiempo de reverberación estudio A donde se muestran los materiales utilizados en la segunda toma y sus superficies.

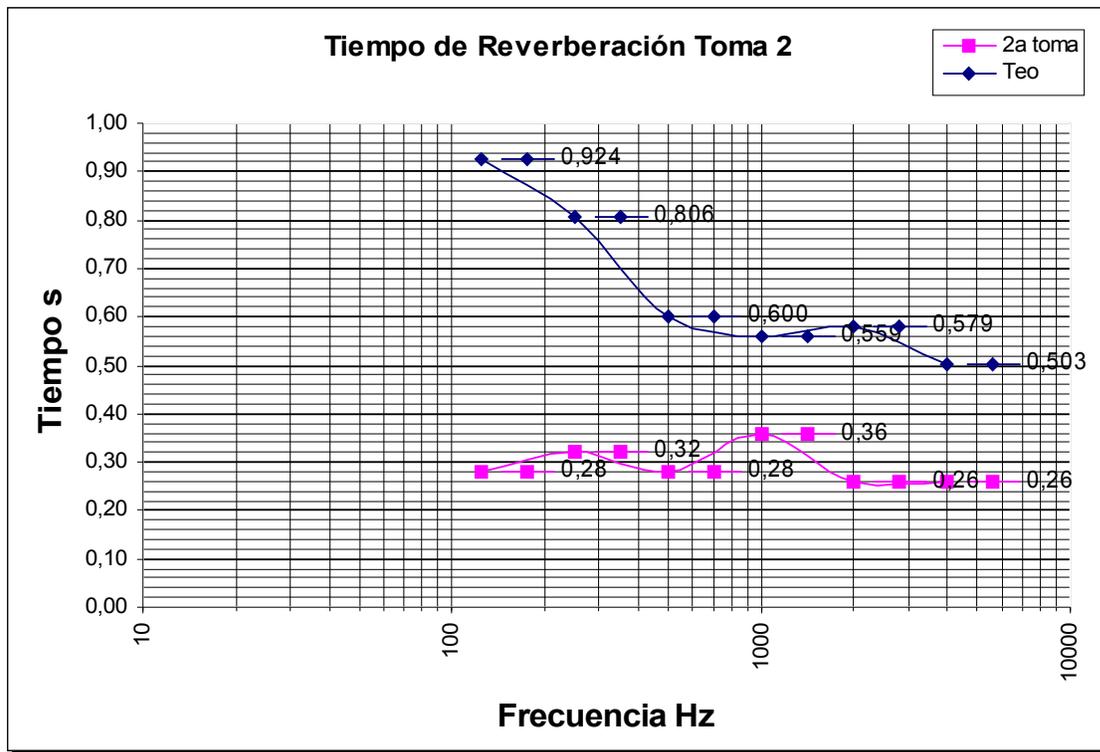


Figura 50 Tiempo de reverberación Estudio A toma 2

En esta toma observamos que los valores prácticos obtenidos son bastante uniformes entre los 125 [Hz] y los 4000 [Hz], teniendo como máximo 0.36 [s] a los 1000 [Hz]. Por otro lado, tenemos valores descendentes más pronunciados en los tiempos de reverberación teóricos, con una diferencia de 0.421 [s] entre los 125 [Hz] y los 4000 [Hz]. La diferencia máxima se da a los 125 [Hz] siendo de 0.644 [s] entre el valor práctico y el teórico. Y una diferencia mínima de 0.243 [s] en los 4000 [Hz] entre el valor práctico y el teórico.

### Tercera toma:

Las mediciones de esta toma ya se realizaron con la incorporación de todos los materiales acústicos.

MATERIAL	SUPERFICIE [m <sup>2</sup> ]	[Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000
CRISTAL 6MM AREA GRANDE	23,822	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
		4,288	1,429	0,953	0,715	0,476	0,429
AIRE m <sup>3</sup>	181,834	0,0	0,0	0,0	0,00	0,01	0,02
		0,0	0,0	0,0	0,546	1,273	3,637
MUROS CONCRETO PINTADO	38,547	0,10	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08
		3,855	1,927	2,313	2,698	3,469	3,084
PLAFON TABLAROCA TABLERO DE YESO DE 15MM MONTADO EN IDENTICAS CONDICIONES	29,154	0,20	0,08	0,05	0,05	0,05	0,05
		5,831	2,332	1,458	1,458	1,458	7,000
PISO PARQUE SOBRE HORMIGON	55,949	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
		2,238	2,238	3,916	3,357	3,357	3,916
TECHO PERFOACEL PERFORADO AL 7.7% A 20 CM	27,945	0,17	0,50	0,76	0,52	0,34	0,30
		4,751	13,972	21,238	14,531	9,501	8,383
TECHO PERFOACEL PERFORADO AL 19,6% A 20 CM	27,945	0,17	0,71	0,94	0,90	0,59	0,47
		4,751	19,841	26,268	25,150	16,487	13,134
PERFOACEL PERFORADO AL 7.7% A 4 CM	7,01	0,17	0,50	0,90	0,48	0,34	0,34
		1,19	3,504	6,307	3,364	2,383	2,383
PERFOACEL PERFORADO AL 19.6% A 4 CM	7,01	0,12	0,47	1,00	0,83	0,60	0,52
		0,84	3,294	7,008	5,817	4,205	3,644
TELA DE ALGODÓN TRAMA ABIERTA	69,97	0,03	0,070	0,130	0,220	0,320	0,350
		2,10	4,90	9,096	15,393	22,390	24,489
POLYURETANO 1 1/2'' DENSIDAD 22 A 24KG/M3	69,97	0,11	0,14	0,36	0,82	0,90	0,97
		7,70	9,796	25,189	57,375	62,972	67,870
SUPERFICIE m <sup>3</sup>	181,834	32,790	43,39	77,478	105,252	111,484	124,83
TIEMPO DE REVER TEO [s]		0,893	0,675	0,378	0,278	0,263	0,235
TIEMPO DE REVER PRAC [s]	3A TOMA	0,82	0,80	0,72	0,90	1,02	0,95

Tabla 11. Tiempo de reverberación estudio A donde se muestran los materiales utilizados en la tercera toma y sus superficies.

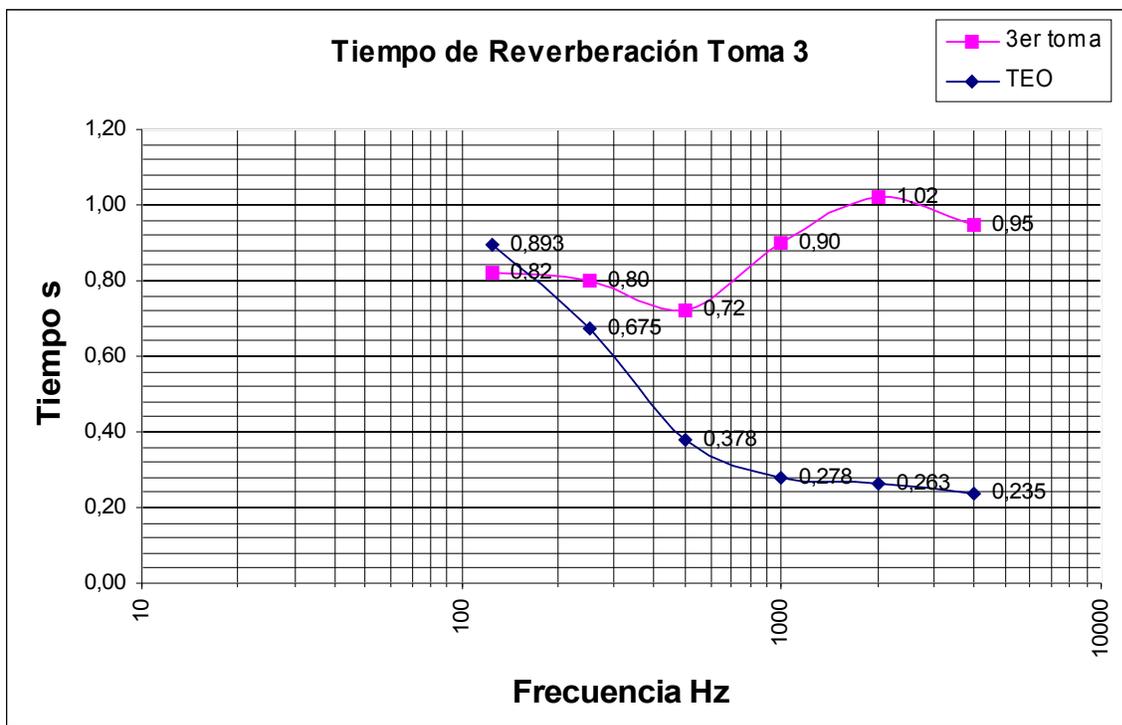


Figura 51 Tiempo de reverberación Estudio A toma 3

En esta toma tenemos un aumento en el tiempo de reverberación práctico y una disminución en el teórico. Para los valores teóricos en la frecuencia de 125 [Hz] tenemos una mínima diferencia de 0.073 [s], mientras que para los 2000 [Hz] tenemos la máxima diferencia con 0.757 [s]. Observamos un cambio descenso del tiempo de reverberación prolongado de 0.515 [s] entre los 125 [Hz] y los 500 [Hz], para las frecuencias de 1000 [Hz] a 4000 [Hz] el tiempo no varía tanto, sólo un 0.043 [s] entre estas. Para los valores prácticos tenemos una gráfica más constante donde la diferencia máxima se da entre los 500 [Hz] a los 2000 [Hz] siendo de 0.3 [s].

Se puede observar cómo fue variando el tiempo de reverberación teórico en las diferentes etapas de la incorporación de materiales bajando los

tiempos de reverberación para las altas frecuencias de los 500 [Hz] a los 4000 [Hz]. También observamos el aumento de los tiempos de reverberación prácticos en las altas frecuencias de los 500 [Hz] a los 4000 [Hz].

## **Diseño Estudio B**

### 3.2 Geometría

#### **3.2.1 Volumen**

El volumen óptimo obtenido en este estudio después de la obra civil fueron = 160.2559 m<sup>3</sup>.

#### **3.2.2 Formas y dimensiones del estudio B**

Área pared tablaroca = 59.95685 m<sup>2</sup>

Área pared tablaroca c/puerta = 5.1745 m<sup>2</sup>

Área muro = 34.5128 m<sup>2</sup>

Área piso = 45.7874 m<sup>2</sup>

Área techo = 45.7874 m<sup>2</sup>

Área ventanas = 4.5 m<sup>2</sup>

Área puerta entrada = 2.2 m<sup>2</sup>

Área puerta cabina control = 3.1122 m<sup>2</sup>

Área puerta bodega = 5.25 m<sup>2</sup>

Área total <sub>muros</sub> = 34.5128 m<sup>2</sup>

Área total <sub>pared tablaroca</sub> = 59.9585 m<sup>2</sup>

Área total <sub>crystal</sub> = 15.0622 m<sup>2</sup>

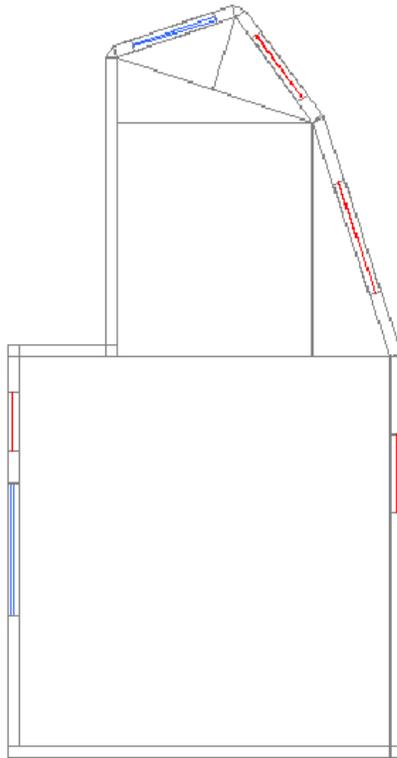


Figura 52 Vista superior Estudio B. En rojo se muestran los cristales y en azul la puerta

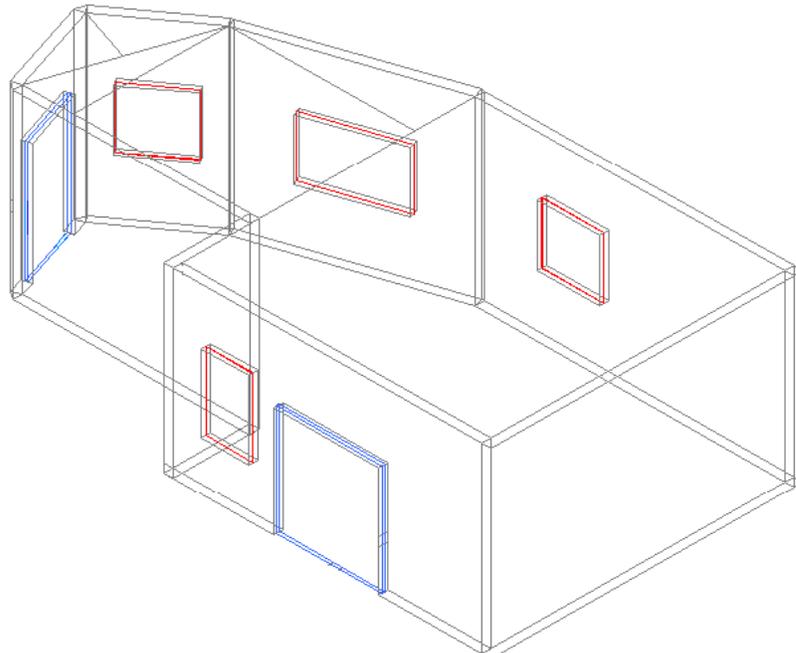


Figura 53 Vista isométrica SO Estudio B. En rojo se muestran los cristales y en azul la puerta

### 3.2.3 Mediciones del estudio B

Conforme a la distribución de materiales encontrada se calculó el tiempo de reverberación teórico mediante la fórmula de Sabine. Los resultados se muestran en las siguientes tablas y gráficas.

#### Primera toma:

MATERIAL	SUPERFICIE [m <sup>2</sup> ]	[Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000
CRISTAL 3MM VENTANA	15,062	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
		5,272	3,766	2,711	1,807	1,054	0,602
AIRE m <sup>3</sup>	160,256	0,0	0,0	0,0	0,00	0,01	0,02
		0,0	0,0	0,0	0,481	1,122	3,205
MUROS CONCRETO PINTADO	34,513	0,10	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08
		3,451	1,726	2,071	2,416	3,106	2,761
PLAFON TABLAROCA TABLERO DE YESO DE 15MM MONTADO EN IDENTICAS CONDICIONES	59,959	0,20	0,08	0,05	0,05	0,05	0,05
		11,992	4,797	2,998	2,998	2,998	7,000
PLAFON TECHO	45,787	0,14	0,27	0,33	0,37	0,36	0,36
		6,410	12,362	15,110	16,941	16,483	16,483
PISO PARQUE SOBRE HORMIGON	45,787	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
		1,831	1,831	3,205	2,747	2,747	3,205
SUPERFICIE m <sup>3</sup>	160,256	28,956	24,482	26,095	27,390	27,511	33,257
TIEMPO DE REVERTEO [s]		0,891	1,054	0,989	0,942	0,938	0,776
TIEMPO DE REVERPRAC [s]	1er toma	0,38	0,46	0,48	0,60	0,62	0,65

Tabla 12. Tiempo de reverberación estudio B donde se muestran los materiales utilizados en la primera toma y sus superficies.

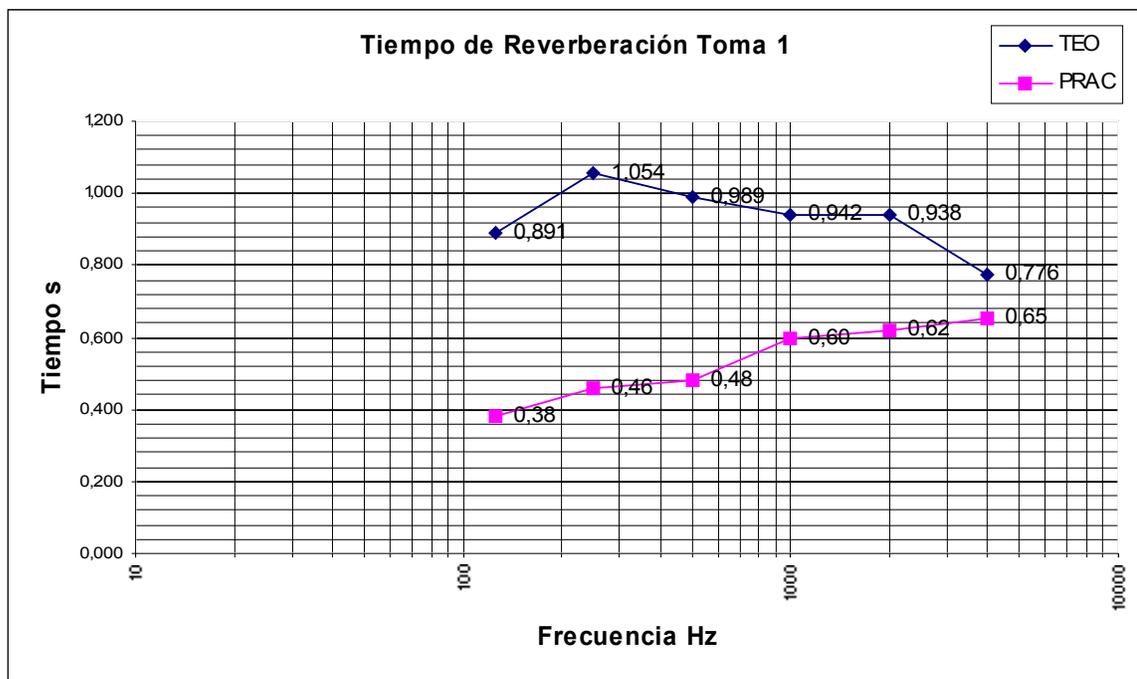


Figura 54 Tiempo de reverberación Estudio B toma 1

Estas mediciones fueron tomadas antes de poner algún material acústico teniendo sólo la construcción con las separaciones de los estudios A, B, la cabina de control y los materiales que se enlistan en la siguiente tabla anterior.

En esta gráfica podemos ver que el tiempo teórico de reverberación varía poco y es grande teniendo valores entre los 1.054 [s] y los 0.776 [s], y en donde tenemos una diferencia máxima de 0.278 [s]. Entre la frecuencia de los 250 [Hz] y los 4000 [Hz]. Por otro lado, en los valores del tiempo de reverberación prácticos tenemos una variación constante ascendente entre los 0.38 [s] a los 0.65 [s] siendo tiempo s de reverberación bajos y con una diferencia máxima de 0.27 [s] entre el valor mínimo ubicado en los 125 [Hz] y el valor máximo ubicado en los 4000 [Hz]. Entre el tiempo de reverberación teórico y el práctico existe un mínimo a los 4000 [Hz] de 0.126 [s], y un tiempo máximo en los 250 [Hz] de 0.594 [s].

## Segunda toma:

En estas mediciones ya se tomó en cuenta igual que para el estudio A algo de material acústico.

MATERIAL	SUPERFICIE m <sup>2</sup>	[Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000
CRISTAL 3MM VENTANA	15,062	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
		5,272	3,766	2,711	1,807	1,054	0,602
AIRE m <sup>3</sup>	160,2559	0,0	0,0	0,0	0,00	0,01	0,02
		0,0	0,0	0,0	0,481	1,122	3,205
MUROS CONCRETO PINTADO	26,624	0,10	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08
		2,662	1,331	1,597	1,864	2,396	2,130
PLAFON TABLAROCA TABLERO DE YESO DE 15MM MONTADO EN 94ENSIDAD94 CONDICIONES	46,2537	0,20	0,08	0,05	0,05	0,05	0,05
		9,251	3,700	2,313	2,313	2,313	7,000
PISO PARQUE SOBRE HORMIGON	45,7874	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
		1,831	1,831	3,205	2,747	2,747	3,205
PLAFON TECHO PREEXISTENTE	45,7874	0,14	0,27	0,33	0,37	0,36	0,36
		6,410	12,363	15,110	16,941	16,483	16,483
PERFOACEL PERFORADO AL 7.7% A 4 CM	10,796	0,17	0,50	0,90	0,49	0,34	0,34
		1,84	5,398	9,716	5,290	3,671	3,671
PERFOACEL PERFORADO AL 19.6% A 4 CM	10,796	0,12	0,47	1,00	0,83	0,60	0,50
		1,30	5,074	10,796	8,961	6,478	5,398
POLYURETANO 1 1/2 '' 94ENSIDAD 22 A 24KG/M3	21,593	0,11	0,14	0,36	0,82	0,90	0,97
		2,38	3,023	7,773	17,706	19,434	20,945
SUPERFICIE m <sup>3</sup>	160,2559	30,933	36,486	53,222	58,110	55,698	62,640
TIEMPO DE REVER TEO [s]		0,834	0,707	0,485	0,444	0,463	0,412
TIEMPO DE REVER PRAC [s]	2ª TOMA	0,30	0,38	0,28	0,32	0,32	0,28

Tabla 13. Tiempo de reverberación estudio B donde se muestran los materiales utilizados en la segunda toma y sus superficies.

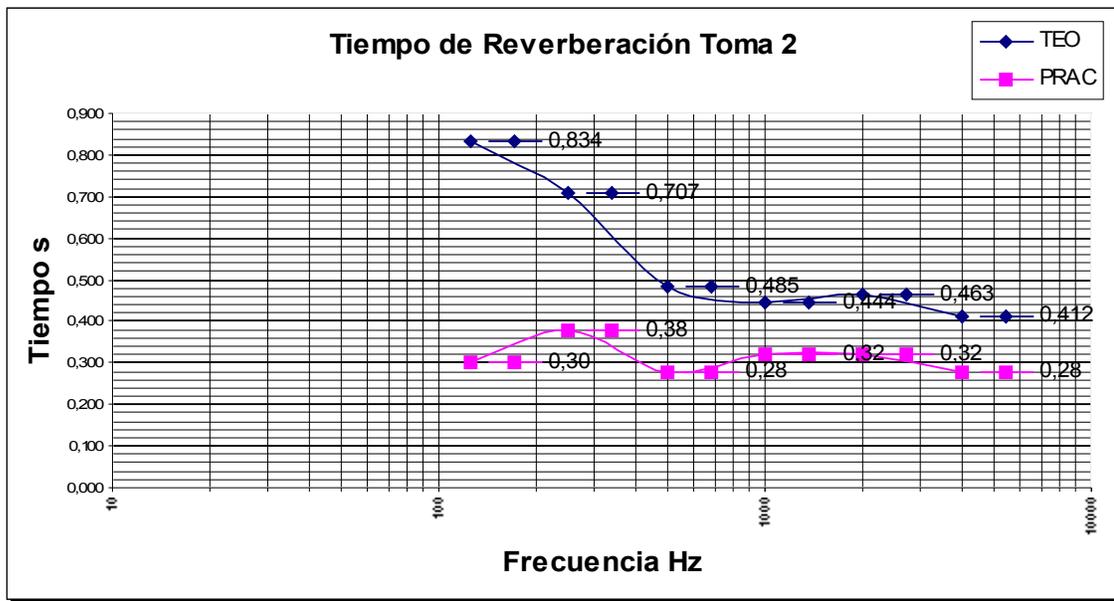


Figura 55 Tiempo de reverberación Estudio B toma 2

En esta gráfica observamos un cambio en el tiempo de reverberación teórico en comparación con la primera medición. Tenemos una pendiente pronunciada entre los 125 [Hz] y los 500 [Hz] con una diferencia en el tiempo de reverberación de 0.349 [s] y después se vuelve constante entre los 500 [Hz] a los 4000 [Hz] con una diferencia de tan sólo 0.073 [s] entre estas bajando los tiempos de reverberación en las altas frecuencias. Por otra parte, la gráfica del tiempo de reverberación práctico se muestra con valores más estables entre los 0.38 [s] y los 0.28 [s], siendo la máxima diferencia de 0.1 [s]. Entre los tiempos de reverberación teóricos y los prácticos tenemos una máxima diferencia en los 125 [Hz] de 0.534 [s], y una mínima diferencia en los 1000 [Hz] de 0.124 [s].

### Tercera toma:

En esta última toma ya contamos con todas las adecuaciones acústicas que necesitamos para los tiempos de reverberación deseados.

MATERIAL	SUPERFICIE [m <sup>2</sup> ]	[Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000
CRISTAL 6MM AREA GRANDE	15,062	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
		2,711	0,904	0,602	0,452	0,301	0,271
AIRE m <sup>3</sup>	160,2559	0,0	0,0	0,0	0,00	0,01	0,02
		0,0	0,0	0,0	0,481	1,122	3,205
MUROS CONCRETO PINTADO	26,624	0,10	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08
		2,662	1,331	1,597	1,864	2,396	2,130
PLAFON TABLAROCA TABLERO DE YESO DE 15MM MONTADO EN IDENTICAS CONDICIONES	46,2537	0,20	0,08	0,05	0,05	0,05	0,05
		9,251	3,700	2,313	2,313	2,313	7,000
PISO PARQUE SOBRE HORMIGON	45,7874	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
		1,831	1,831	3,205	2,747	2,747	3,205
TECHO PERFOACEL PERFORADO AL 7.7% A 20 CM	22,8935	0,17	0,50	0,76	0,52	0,34	0,30
		3,892	11,447	17,399	11,905	7,784	6,868
TECHO PERFOACEL PERFORADO AL 19,6% A 20 CM	22,8935	0,17	0,71	0,94	0,90	0,59	0,47
		3,892	16,254	21,520	20,604	13,507	10,760
PERFOACEL PERFORADO AL 7.7% A 4 CM	10,796	0,17	0,50	0,90	0,48	0,34	0,34
		1,84	5,398	9,716	5,182	3,671	3,671
PERFOACEL PERFORADO AL 19.6% A 4 CM	10,796	0,12	0,47	1,00	0,83	0,60	0,52
		1,30	5,074	10,796	8,961	6,478	5,614
TELA DE ALGODÓN TRAMA ABIERTA	67,3794	0,03	0,070	0,130	0,220	0,320	0,350
		2,02	4,72	8,759	14,823	21,561	23,583
POLYURETANO 1 1/2'' DENSIDAD 22 A 24KG/M3	67,3794	0,11	0,14	0,36	0,82	0,90	0,97
		7,41	9,433	24,257	55,251	60,641	65,358
SUPERFICIE m <sup>3</sup>	160,2559	32,912	43,835	78,645	103,97	109,01	120,90
TIEMPO DE REVER TEO [s]		0,784	0,589	0,328	0,248	0,237	0,213
TIEMPO DE REVER PRAC [s]	3A TOMA	0,43	0,52	0,54	0,58	0,68	0,60

Tabla 14. Tiempo de reverberación estudio B donde se muestran los materiales utilizados en la tercera toma y sus superficies.

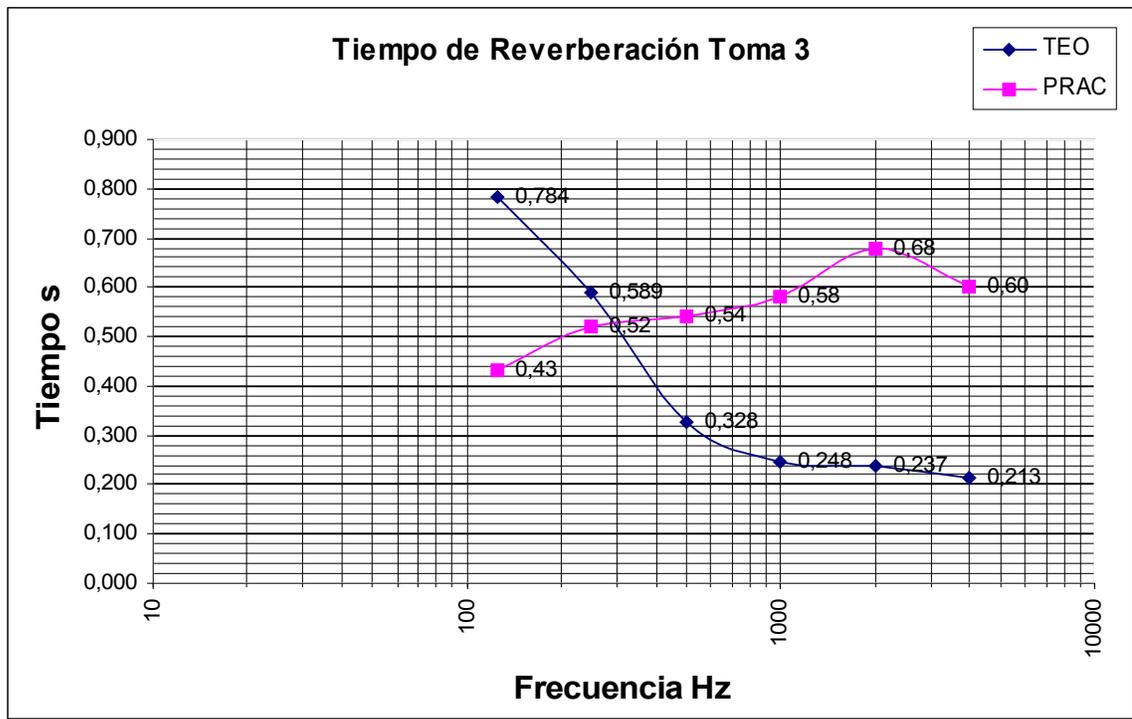


Figura 56 Tiempo de reverberación Estudio B toma 3

En esta gráfica podemos ver que el tiempo de reverberación práctico aumento y ahora está entre los 0.43 [s] y los 0.68 [s] habiendo una diferencia de 0.25 [s] entre el valor mínimo de tiempo de reverberación en los 125 [Hz] y el valor máximo en los 2000 [Hz]. El tiempo de reverberación teórico bajó sobre todo en las altas frecuencias de 500 [Hz] a los 4000 [Hz] con valores constantes entre los 1000 [Hz] y los 4000 [Hz] cuya variación es de 0.035 [s], tenemos un cruce entre las dos gráficas en los 300 [Hz], de 0.525 [s] aproximadamente, y un valor máximo de 0.443 [s] en los 2000 [Hz].

En estas tres mediciones vemos como el tiempo de reverberación teórico disminuye para las altas frecuencias a partir de los 500 [Hz] y se mantiene más o menos constante, mientras que para el tiempo de

reverberación practico tenemos un aumento en el tiempo de reverberación para las latas frecuencias.

## Diseño cabina de control

### 3.3 Geometría

#### 3.3.1 Volumen

El volumen óptimo obtenido en el diseño de este estudio tuvo un volumen de  $128.0631 \text{ m}^3$

#### 3.3.2 Formas y dimensiones de la cabina de control

1ª toma:

Área muro concreto =  $12.5693 \text{ m}^2$

Área muro tablaroca =  $12.5693 \text{ m}^2$

Área piso =  $42.6877 \text{ m}^2$

Área techo =  $42.6877 \text{ m}^2$

Área ventanas =  $4.9382 \text{ m}^2$

Área puerta entrada =  $3.1122 \text{ m}^2$

Área 4 puertas madera bodega =  $7.056 \text{ m}^2$

2ª toma:

Área muro concreto =  $17.138 \text{ m}^2$

Área muro tablaroca =  $8 \text{ m}^2$

Área 4 puertas madera bodega =  $7.056 \text{ m}^2$

Área total <sub>muros</sub> =  $25.1386 \text{ m}^2$

Área total <sub>cristal</sub> =  $14.8634 \text{ m}^2$

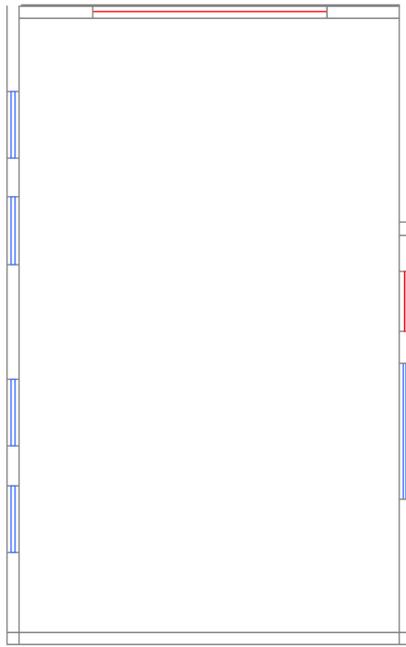


Figura 57 Vista superior Cabina de Control. En rojo se muestran los cristales y en azul la puerta

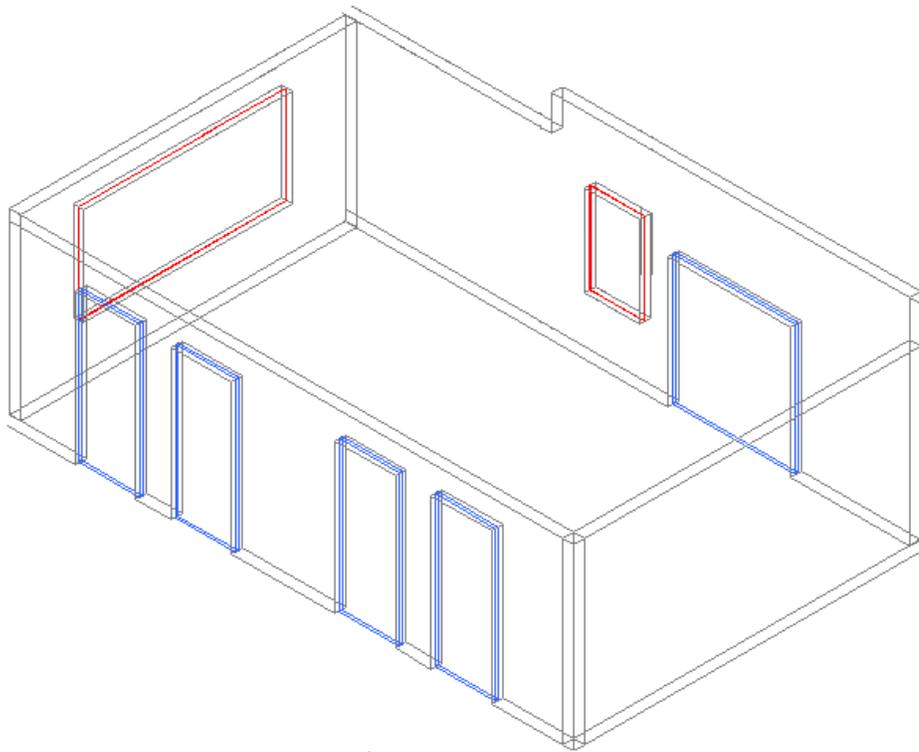


Figura 58 Vista isométrica SO Cabina de Control. En rojo se muestran los cristales y en azul la puerta

### 3.3.3 Mediciones de la cabina de control

Conforme a la distribución de materiales encontrada se calculó el tiempo de reverberación teórico mediante la fórmula de Sabine. Los resultados se muestran en las siguientes tablas y gráficas.

#### Primera toma:

MATERIAL	SUPERFICIE [m <sup>2</sup> ]	[Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000
CRISTAL 3MM VENTANA	14,863	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
		5,202	3,716	2,675	1,784	1,040	0,595
AIRE m <sup>3</sup>	128,031	0,0	0,0	0,0	0,00	0,01	0,02
		0,0	0,0	0,0	0,384	0,896	2,561
MUROS CONCRETO PINTADO	12,935	0,10	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08
		1,294	0,647	0,776	0,905	1,164	1,035
PLAFON TABLAROCA TABLERO DE YESO DE 15MM MONTADO EN IDENTICAS CONDICIONES	12,935	0,20	0,08	0,05	0,05	0,05	0,05
		2,587	1,035	0,647	0,647	0,647	0,647
PLAFON TECHO	42,688	0,14	0,27	0,33	0,37	0,36	0,36
		5,976	11,526	14,087	15,794	15,368	15,368
PISO PARQUE SOBRE HORMIGÓN	42,688	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
		1,708	1,708	2,988	2,561	2,561	2,988
PUERTAS MADERA	7,056	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
		0,282	0,282	0,494	0,423	0,423	0,494
SUPERFICIE m <sup>3</sup>	128,031	17,049	18,913	21,667	22,499	22,100	23,686
TIEMPO DE REVER TEO [s]		1,209	1,090	0,951	0,916	0,933	0,870
TIEMPO DE REVER PRAC [s]	1er toma	0,82	0,88	0,42	0,50	0,82	0,03

Tabla15. Tiempo de reverberación cabina de control donde se muestran los materiales utilizados en la primera toma y sus superficies.

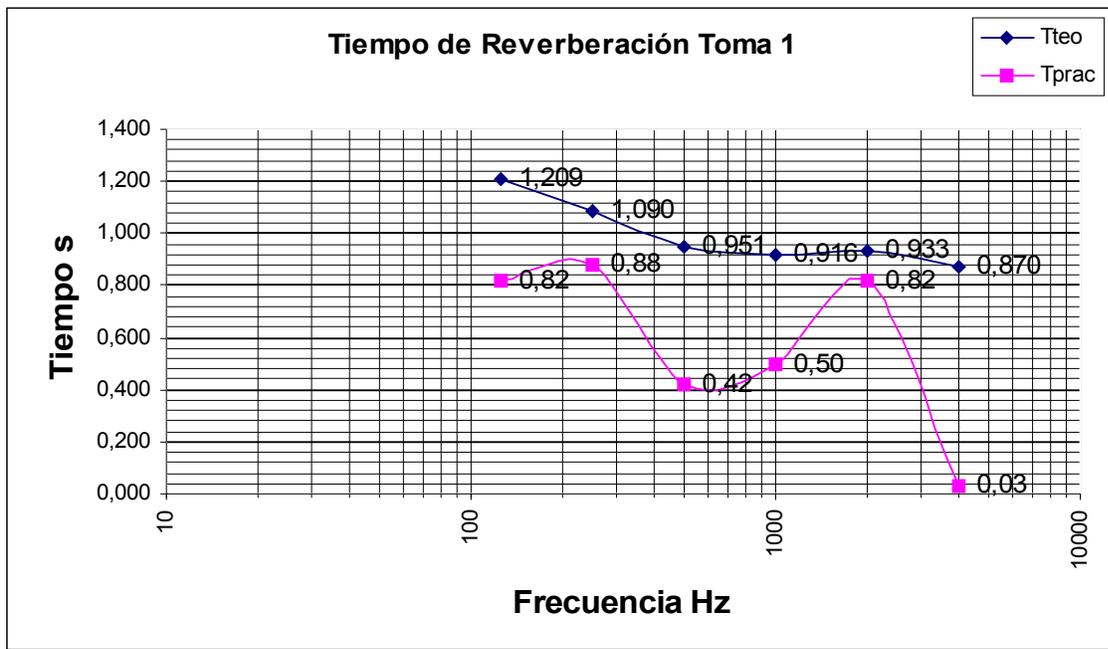


Figura 59 Tiempo de reverberación Cabina de control toma 1

En esta toma tenemos un cuarto de forma paralelepípeda con un área de muros de tablaroca y concreto diferente a la que se tomo en la 2ª y 3er toma lo que también afecta al tiempo de reverberación. Como en los dos casos anteriores en esta toma no teníamos incorporado ningún material acústico.

En esta toma vemos un tiempo de reverberación teórico bastante constante que va de forma descendente entre los 1.209 [s] como valor máximo en los 125 [Hz] y hasta los 0.870 [s] en los 4000 [Hz] habiendo una diferencia entre estas frecuencias de 0.339 [s]; en comparación, el tiempo de reverberación práctico varia mucho habiendo diferencias máximas de hasta 0.85 [s] entre los 250 [Hz] y los 4000 [Hz], teniendo además un valor muy bajo en los 4000 [Hz] de 0.03 [s] en el tiempo de reverberación.

## Segunda toma:

En esta toma lo único que se modificó fueron las áreas de los muros de concreto y tablaroca.

MATERIAL	SUPERFICIE [m <sup>2</sup> ]	[Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000
CRISTAL 3MM VENTANA	14,863	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
		5,202	3,716	2,675	1,784	1,040	0,595
AIRE m <sup>3</sup>	128,031	0,0	0,0	0,0	0,00	0,01	0,02
		0,0	0,0	0,0	0,384	0,896	2,561
MUROS CONCRETO PINTADO	17,138	0,10	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08
		1,714	0,857	1,028	1,200	1,542	1,371
MUROS TABLAROCA	8	0,20	0,08	0,05	0,05	0,05	0,05
		1,600	0,640	0,400	0,400	0,400	0,400
PLAFON TECHO	42,688	0,14	0,27	0,33	0,37	0,36	0,36
		5,976	11,526	14,087	15,794	15,368	15,368
PUERTAS MADERA	7,056	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
		0,282	0,282	0,494	0,423	0,423	0,494
PISO MADERA CONTRAPARCHADA	42,688	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
		1,708	1,708	2,988	2,561	2,561	2,988
SUPERFICIE m <sup>3</sup>	128,031	16,482	18,728	21,673	22,546	22,231	23,776
TIEMPO DE REVER TEO [s]		1,251	1,101	0,951	0,914	0,927	0,867
TIEMPO DE REVER PRAC [s]	2a toma	0,82	0,88	0,42	0,50	0,82	0,03

Tabla 16. Tiempo de reverberación de la cabina de control donde se muestran los materiales utilizados en la segunda toma y sus superficies.

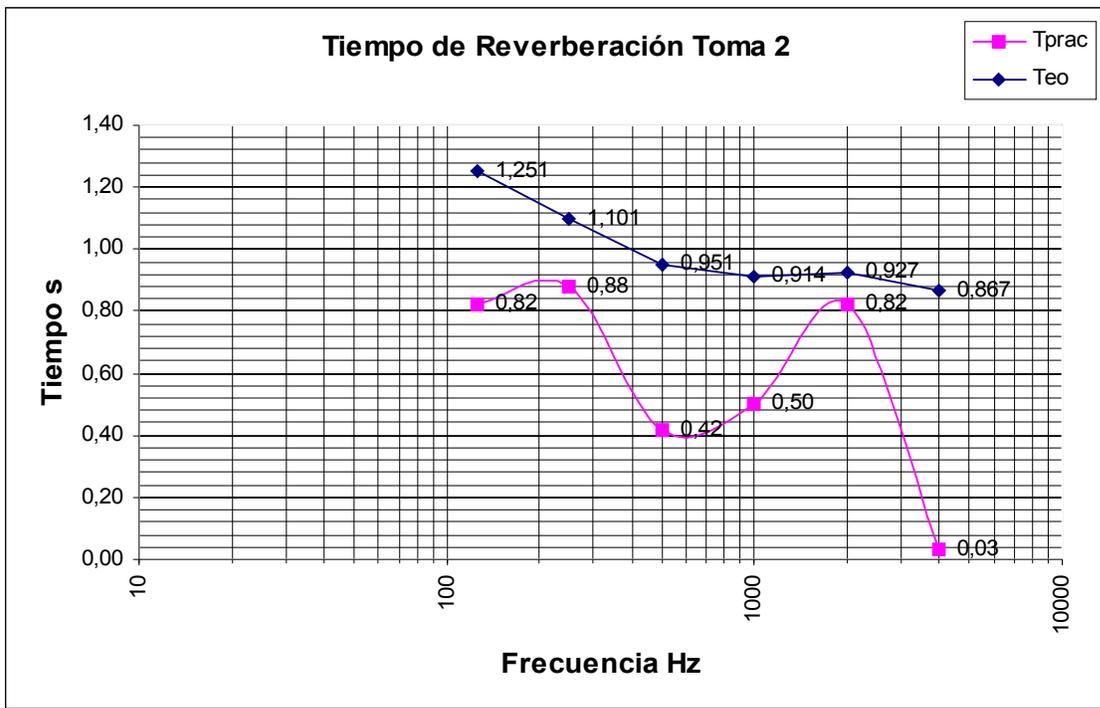


Figura 60 Tiempo de reverberación Cabina de control toma 2

En esta gráfica tenemos un comportamiento muy semejante al de la Figura 59 en el tiempo de reverberación teórico y el tiempo de reverberación práctico es igual al práctico de la Figura anterior.

### Tercera toma:

MATERIAL	SUPERFICIE [m <sup>2</sup> ]	[Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000
CRISTAL 6MM AREA GRANDE	14,863	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
		2,675	0,892	0,595	0,446	0,297	0,268
AIRE m <sup>3</sup>	128,031	0,0	0,0	0,0	0,00	0,01	0,02
		0,000	0,0	0,0	0,384	0,896	2,561
MUROS CONCRETO PINTADO	17,138	0,10	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08
		1,714	0,857	1,028	1,200	1,542	1,371
MUROS TABLAROCA	8	0,20	0,08	0,05	0,05	0,05	0,05
		1,600	0,640	0,400	0,400	0,400	0,400
TECHO PERFOACEL PERFORADO AL 7.7% A 20 CM	21,344	0,17	0,50	0,76	0,52	0,34	0,30
		3,628	10,672	16,221	11,099	7,257	6,403
TECHO PERFOACEL PERFORADO AL 19,6% A 20 CM	21,344	0,17	0,71	0,94	0,90	0,59	0,47
		3,628	15,154	20,063	19,210	12,593	10,032
PUERTAS MADERA	7,056	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
		0,282	0,282	0,494	0,423	0,423	0,494
TELA DE ALGODÓN TRAMA ABIERTA	42,69	0,03	0,070	0,130	0,220	0,320	0,350
		1,28	2,99	5,549	9,391	13,660	14,941
POLYURETANO 1 1/2'' DENSIDAD 22 A 24KG/M3	42,69	0,11	0,14	0,36	0,82	0,90	0,97
		4,70	5,976	15,368	35,004	38,419	41,407
PISO MADERA CONTRAPARCHADA	42,688	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
		1,708	1,708	2,988	2,561	2,561	2,988
SUPERFICIE m <sup>3</sup>	128,031	21,212	39,169	62,707	80,118	78,050	80,864
TIEMPO DE REVER TEO [s]		0,972	0,526	0,329	0,257	0,264	0,255
TIEMPO DE REVER PRAC [s]	3er toma	0,78	0,84	0,75	0,94	1,10	1,00

Tabla 17. Tiempo de reverberación estudio A donde se muestran los materiales utilizados en la segunda toma y sus superficies.

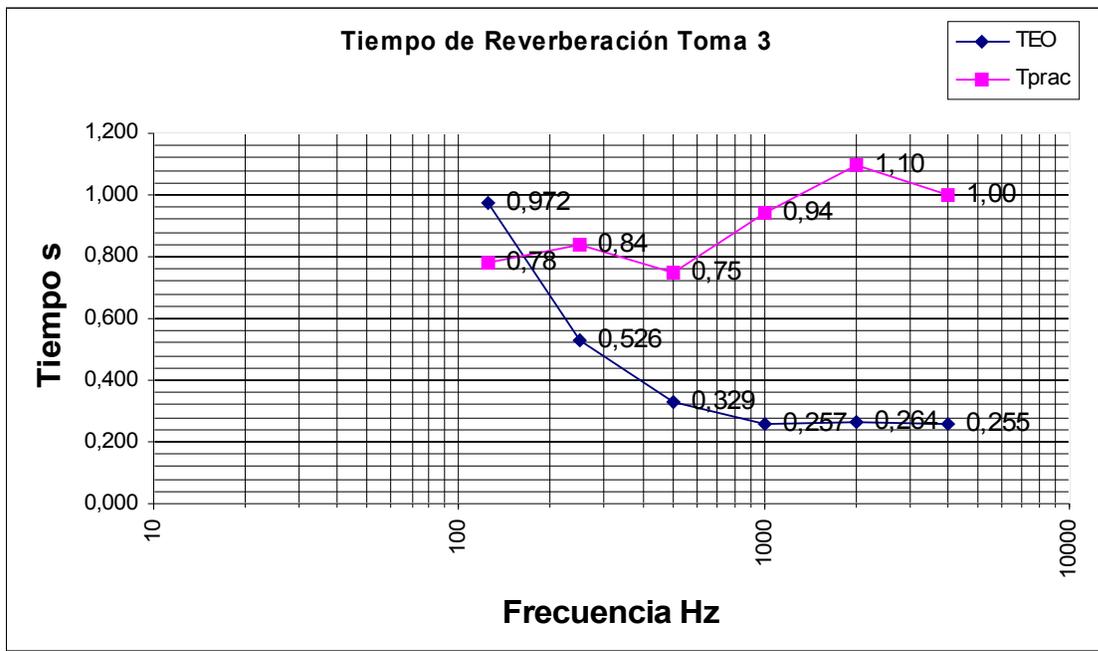


Figura 61 Tiempo de reverberación Cabina de control toma 3

En esta gráfica tenemos un tiempo de reverberación teórico con una pendiente pronunciada entre los 125 [Hz] y los 1000 [Hz] con una diferencia entre estos de 0.715 [s], un valores constantes entre los 1000 [Hz] y los 4000 [Hz] con variación sólo de 0.002 [s] entre ellos, teniendo tiempos de reverberación bajos para las altas frecuencias de los 1000 [Hz] a los 4000 [Hz]. En el tiempo de reverberación práctico tenemos valores constantes entre los 125 [Hz] y los 500 [Hz] con una variación máxima de 0.09 [s] entre estos, y entre los 500 [Hz] a los 4000 [Hz] tenemos una pendiente ascendente más pronunciada cuya diferencia máxima es de 0.35 [s]. Tenemos un cruce entre los valores prácticos y los teóricos llegando a los 200 [Hz] de aproximadamente 0.8 [s], también existe una máxima diferencia en los 2000 [Hz] de 0.836 [s].

En estas tomas vemos, como en las anteriores, cómo se va modificando el tiempo de reverberación teórico para obtener tiempos de reverberación bajos en las altas frecuencias a partir de 500 [Hz] hasta los 4000 [Hz] y sobre todo vemos como en las dos primeras tomas el tiempo de reverberación práctico no se modificó hasta la tercera toma en la que obtuvimos un tiempo de reverberación práctico alto en las altas frecuencias a partir de los 500 [Hz].

## 4Equipo de audio

### 4.1Equipo propuesto de audio

Para el funcionamiento del estudio se propuso la instalación del equipo que se enlista a continuación. La mayoría de este equipo ya se encontraba instalado en el estudio anterior, sólo se actualizó el sistema de grabación digital y el resto se reutilizó en las adecuaciones de la cabina de control para reducir los costos del nuevo estudio.

- Sistema de grabación digital marca *Pro Tools* modelo HD3 con 32 I/O. Sobre plataforma *Macintosh G5* con controlador de superficie marca *Digidesign* modelo control 24.
- Preamplificadores de micrófonos tipo *vintage* de válvula.
- Compresores limitadores de válvulas y estado sólido del mismo tipo
- Procesadores de efectos digitales de diversas marcas.
- Monitoreo de campo medio activo y pasivo de campo cercano



Figura 62 Equipo de audio



Figura 63 Sistema de grabación digital y equipo propuesto

## 4.2 Instalación de equipos propuestos

Para la instalación de estos equipos se escogieron los materiales de la más alta calidad disponibles en el mercado a saber. El cable de micrófonos que se utilizó fue de la marca CANARE del tipo *Starquad* debido a su construcción que nos garantiza una notable inmunidad a los campos electromagnéticos y la RF circundante. Respecto a las líneas de nivel nominal se utilizó cable de la misma marca pero de construcción balanceada simple de dos hilos.

Respecto a los conectores y las tiras de parcheo se eligió la marca Neutrik de su línea de conectores de baño de oro, esto es debido a que el lugar presenta altos niveles de humedad con el fin de prevenir la oxidación de los contactos y la falla prematura de estos. Nota ver anexo 1. Respecto a la configuración de acuerdo a las necesidades del dueño del estudio se configuraron unas tiras de parcheo de la menara descrita en el Anexo II con el objeto de aprovechar las facilidades de

normalización de las tiras y presentar una instalación lo más limpia posible, además de la versatilidad que presentan para el operador en lo que a equipo se refiere.



Figura 64 Mueble de la cabina de control

Respecto a la computadora se decidió instalarla en un cuarto de máquinas especialmente destinado para ella y parte del equipo *Pro Tools* por razones de los ruidos generados de los ventiladores de los equipos, lo que nos obligó a instalar una extensión del monitor así como del teclado y el *mouse* logrando con esto un nivel de ruido muy bajo dentro de la cabina de control así como una temperatura ideal dentro de la misma.

La instalación eléctrica se separó en dos fases distintas, una destinada para la iluminación y la otra para la alimentación de todos los equipos a través de reguladores y acondicionadores de línea para evitar transmisión de ruido al estar todo conectado en una sola línea.

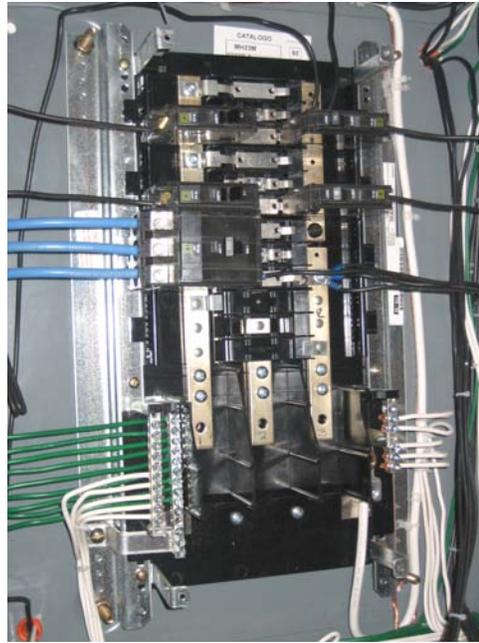


Figura 65 Tablero Eléctrico instalado

En el rubro del mobiliario se diseñó de acuerdo a la forma de trabajar del productor en donde se definieron las posiciones de los equipos periféricos de acuerdo a su género y su utilización buscando con ello la comodidad propia de los espacios y una agradable estética.

Por razones de control de temperatura se decidió la instalación de tres unidades de aire acondicionado de frío /calor del tipo *minisplit* debido a su alta eficiencia y su bajo nivel de ruido.

## 5 Discusión

Se realizaron tres mediciones para cada cuarto, la primera se realizó cuando se estaba construyendo la obra civil de los muros, la segunda se realizó cuando se tenía instalado ya parte del material acústico en las salas A y B; para la cabina de control, en esta segunda toma teníamos sólo el cambio del material con que estaban hechos los muros sin tener material acústico instalado. En la tercer toma el estudio ya estaba con todas las adecuaciones acústicas necesarias tanto en los estudios A y B como en la cabina de control. Las mediciones se realizaron con el equipo marca TRIO que se muestra en la Figura 67. Se conectó un amplificador de guitarra a la salida del equipo de medición el cual producía tonos provenientes del equipo de medición a diferentes frecuencias como 125[Hz], 250[Hz], 500[Hz], 1000 [Hz], 2000[Hz] y 4000[Hz] mientras nos daba la medición en diferentes lugares dentro de cada sala obteniendo un promedio de los tiempos de reverberación, también se colocó un micrófono propio del equipo de medición conectado a la entrada de éste para captar el sonido emitido del amplificador dentro del estudio, así las ondas que captaba el micrófono eran registradas por el equipo y obteníamos la medición.



Figura 66 Instalación del micrófono del equipo de medición

En lo que respecta a la adecuación acústica de los estudios A y B se realizó de la misma manera y con los mismos materiales variando solamente las superficies destinada de cada material por lo que hablaré en general de las paredes, techo, ventanas y puertas.



Figura 67 Equipo de medición. Marca TRIO

## 5.1 Paredes

Lo primero que se realizó fueron los cerramientos de la propia cabina de control ya que esta no existía en el proyecto original. Estos muros se construyeron con tabicón de arena utilizándolos en sentido transversal con el objeto de lograr un muro de mayor densidad de lo comercial y con esto un nivel de atenuación de más de 40 dB propios del muro.



Figura 68 Muros de la cabina de control

Se colocó una trampa para bajos para controlar las bajas frecuencias como se observa en las tablas 2 y 5 con sus respectivas gráficas. Esta trampa para bajos se puso alrededor de las paredes con una altura de 0.80 m del piso hacia arriba. Se colocó perfoacel perforado de 7.7% y de 19.6% a 1 cm de la pared para permitir la vibración del perfoacel y evitar que toda la pared vibre con estas frecuencias; se puso de forma intercalada -una lamina de 7.7% y otra de 19.6%- para evitar que el sistema funcione como una membrana o caja de resonancia para determinadas frecuencias y así tener mejor control de las bajas

frecuencias. Se colocaron bastidores de madera para montar la espuma de polyuretano de 1 ½' ' de densidad de 20 a 24 kg/m<sup>3</sup> para absorber las altas frecuencias. que son atrapadas al incidir sobre la espuma y las que logren atravesar la espuma son dispersas en la vibración del perfoacel y la cavidad de aire.

Sobre los bastidores y la espuma de polyuretano se colocó tela de algodón de trama abierta para forrar las trampas. La trama abierta nos permite que absorba y no se reflejen las frecuencias bajas.

El resto de la pared se conservó de concreto y tablaroca según fue el caso.

## 5.2Techo

Se tenía un techo preexistente con plafón falso colgado del techo y siendo la perforación del plafón del mismo porcentaje por lo que funcionaba como una membrana o un resonador en bajas frecuencias provocándonos la absorción de éstas en las mediciones que se realizaron y que se observan en las tablas 1, 2, 4, 5, 7 y 8 con sus respectivas gráficas. Este problema lo controlamos hasta la tercera medición donde quitamos este techo de plafón falso preexistente y colocamos plafón de las mismas características que en la trampa para bajos con perforación de 7.7% y 19.6% intercaladas para evitar que se comporte como una membrana y vuelva a actuar como un resonador a 20 cm del techo original.. También se colocó dentro entre el techo original y el plafón de madera la espuma de polyuretano de 1 ½' ' de densidad de 20 a 24 [kg/m<sup>3</sup>] montada sobre bastidores de madera.

El hecho de que el orden del material a pesar de ser el mismo esté colocado de diferente forma es para tener control en diferente rango de frecuencias. en la trampa para bajos -como ya se comentó en el apartado de paredes- las ondas de bajas frecuencias inciden sobre la tela de algodón penetrando la mayoría, después estas inciden sobre la espuma de polyretano donde son disipadas en su mayoría y las que logran atravesar se dispersan debido a la vibración del perfoacel y la cavidad de aire. En cuanto al techo las ondas inciden sobre la tela de algodón por lo que la mayoría la traspasa, después llegan al perfoacel donde algunas frecuencias son reflejadas debido a la característica de este material y las que logran pasar quedan atrapadas entre la cavidad de aire y la espuma de polyurtano impidiendo ésta que regresen a la sala. Y así logramos controlar las medias y bajas frecuencias como lo vemos en la tabla 3, 6 y 9 con sus respectivas gráficas. Notamos un aumento en el tiempo de reverberación a bajas frecuencias debido al control que nos da el nuevo techo. Los valores para las medias y altas frecuencias aumentaron en su tiempo de reverberación ya que las necesidades del productor era tener un sonido más brillante y más abierto ya que es más fácil de controlas y conseguir un sonido deseado cuando se está másterizando.



Figura 69 Colocación del techo diseñado acústicamente

### 5.3 Ventanas

Todas las ventanas fueron puestas con dos vidrios dobles, una parte con un vidrio 6mm una cavidad de 12 mm y otro vidrio de 6mm, después se dejó una cavidad de aire y se colocó el otro par de vidrios ahora uno de 6mm, una cavidad de aire de 6 mm y otro de 12 mm de 6mm con una cavidad de aire de 2 cm entre ellos y sal sílica para evitar la humedad.

Las ventanas que son utilizadas como comunicación visual entre el estudio A y la cabina de control tiene dos cristales de 6mm cada uno y entre ellos una cavidad de aire mayor con sal sílica entre ellos para evitar humedad. Tienen marco de PVC.



Figura 69 Ventana entre cabina de control y estudio A

## 5.4 Puertas

Se utilizaron puertas de la marca Kommerling con sistema Eurodur que tienen como principales ventajas su hermeticidad, su gran capacidad de aislamiento térmico y acústico (lo que significa mayor confort e importantes ahorros de energía), larga duración y escaso mantenimiento. El diseño de los perfiles, tiene una profundidad de 58 mm. El tipo de puerta es oscilobatiente que permite una ventilación sin que esté totalmente abierta.

Debemos tomar en cuenta que el resultado teórico de las tablas varía con el práctico ya que no sólo depende del material que se esté utilizando sino también de la colocación en que se pongan dentro de un diseño según su función o lo que se requiera como se explicó en el párrafo anterior; también varía ya que las características de los coeficientes de absorción varían por lote, el coeficiente de absorción que

nos da el proveedor es un aproximado o un promedio general de todos los lotes.

## 6 Conclusiones

### 6.1 Evaluación económica del proyecto

Este proyecto nació de un antiguo estudio casero propiedad de la familia instalado dentro del mismo predio con grandes limitantes de espacio tanto en la cabina de control como en el estudio. La opción viable consistía en la adecuación de un área anexa a la casa originalmente concedida como sala de juegos. La razón de la utilización de dicha área obedeció a que en forma natural dicho espacio cumplía con las especificaciones mínimas para la aplicación, tanto en tamaño de espacios como en nivel de ruido exterior debido a que se encuentra en la parte posterior de la casa a 6m bajo nivel de la calle justo dentro de una barranca. Lo que representaba un ahorro considerable en costos de obra civil. El mayor impacto en el costo de estas adecuaciones consistió en los cerramientos de la propia cabina de control ya que esta no existía en el proyecto original. Estos muros se construyeron con tabicón de arena utilizándolos en sentido transversal con el objeto de lograr un muro de mayor densidad de lo comercial y con esto un nivel de atenuación de más de 40 dB propios del muro.

No existía la posibilidad de muros de mayor densidad debido a que la estructura original sólo permitía el levantamiento del muro descrito.

En cuanto al equipamiento de audio se utilizó el que ya se encontraba instalado en el estudio anterior ya que la gran mayoría de estos se encontraba en perfecto estado y representaban una gran ventaja que el productor buscaba. La única limitante del equipo anterior consistía en el medio de almacenamiento basado en cintas magnéticas tanto análogas

como digitales lo que obligó a buscar alternativas de medios de almacenamiento de mayor versatilidad como lo son los sistemas de grabación y edición digital basados en plataformas de cómputo.

## 6.2 Rentabilidad del estudio

De acuerdo a las condiciones anteriores del estudio comercialmente hablando se presentaba un problema insalvable; la falta de espacio en la sala de grabación cosa que obligaba a subarrendar segundos estudios en caso de requerir la grabación con varios ejecutantes a la vez como sesiones de cuerdas o metales.

Sin embargo aun con estos problemas la calidad de las grabaciones ejecutadas era ampliamente reconocida en la industria musical lo que forzó a hacer un estudio de mercado para la ampliación del estudio.

Después de dicho estudio y viendo el potencial del área de juegos y la costumbre de los clientes al lugar y el servicio se encontró como la mejor opción la adecuación objeto de este tema ya que opciones fuera de este sitio representaban inversiones de ocho a 10 veces la realizada. De acuerdo a la incertidumbre actual de la industria musical mundial una inversión de esta naturaleza se transforma en una de alto riesgo, por lo que se decidió por la opción realizada.

De acuerdo al estudio financiero y los resultados de los últimos 3 años de operación del estudio se encontró que la recuperación de la inversión se daría en los 3 años siguientes de acuerdo al volumen de trabajo mantenido.

Basándose en estos cálculos el nuevo estudio tiene la rentabilidad de hacer autofinanciable el reequipamiento y mantenimiento preventivo de este tipo de instalaciones ya que una gran mayoría de los equipos tienen válvulas electrónicas las cuales presentan un deterioro considerable por tiempo lo que nos obliga a reponerlas para mantener el rendimiento óptimo.

## 7Anexos

### 7.1Anexo I. Estructura de las tablas

Forma en que están estructuradas las tablas de las mediciones para el estudio A, B y la cabina de control:

Se muestra en la primera fila de cada casillero marcada con azul los coeficientes de absorción de cada material a determinada frecuencia.

		[[Hz] ]					
<b>MATERIAL</b>	<b>SUPERFICIE [m<sup>2</sup>]</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>
CRISTAL 3MM VENTANA	23,622	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
		8,338	5,955	4,288	2,859	1,668	0,953
AIRE m <sup>3</sup>	181,834	0,0	0,0	0,0	0,00	0,01	0,02
		0,0	0,0	0,0	0,546	1,273	3,637

Se muestra en rosa la casilla en la que se presenta la superficie en m<sup>2</sup> de cada material.

		[[Hz] ]					
<b>MATERIAL</b>	<b>SUPERFICIE [m<sup>2</sup>]</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>
CRISTAL 3MM VENTANA	23,622	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
		8,338	5,955	4,288	2,859	1,668	0,953
AIRE m <sup>3</sup>	181,834	0,0	0,0	0,0	0,00	0,01	0,02
		0,0	0,0	0,0	0,546	1,273	3,637

Por último en la siguiente tabla se muestra en amarillo la fila en la que se encuentra el resultado de multiplicar el coeficiente de absorción por la superficie del material para cada frecuencia.

				<b>[[Hz]</b>			
<b>MATERIAL</b>	<b>SUPERFICIE [m<sup>2</sup>]</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>
CRISTAL 3MM VENTANA	23,622	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
		8,338	5,955	4,288	2,859	1,668	0,953
AIRE m <sup>3</sup>	181,834	0,0	0,0	0,0	0,00	0,01	0,02
		0,0	0,0	0,0	0,546	1,273	3,637

En la fila marcada con color naranja se muestra el lugar en donde va el resultado de la sumatoria de la multiplicación del coeficiente de absorción con la superficie de cada material para cada valor de frecuencia. Y en color azul, el cual aparece en todas las tablas se muestra el resultado de la multiplicación del volumen en m<sup>3</sup> por 0.161 (según Sabine) entre el resultado de la sumatoria anterior.

		2,238	2,238	3,916	3,357	3,357	3,916
SUPERFICIE m	181,834	30,954	28,843	31,644	32,964	32,992	39,853
TIEMPO DE REVERTEO [s]		0,946	1,015	0,925	0,888	0,887	0,735

## 7.2 Anexo II. Tira de parcheo implementada

C-24 MONITOR IN 1-5																							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
APX	APX	APX	APX	APX	APX	APX	APX	APX	APX	APX	APX	APX	APX	APX	APX	APX	APX	APX	APX	APX	APX	APX	APX
501	501	501	501	501	501	501	501	501	501	501	501	501	501	501	501	501	501	501	501	501	501	501	501
LINE INPUT API 1-5										LINE INPUT API 1-5													
PRO TOOLS OUTS 25-32										PRO TOOLS OUTS 25-32													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON
L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R
PROTOCOLS INPUTS 25-32										PROTOCOLS INPUTS 25-32													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
ADAM	ADAM	ADAM	ADAM	ADAM	ADAM	ADAM	ADAM	ADAM	ADAM	ADAM	ADAM	ADAM	ADAM	ADAM	ADAM	ADAM	ADAM	ADAM	ADAM	ADAM	ADAM	ADAM	ADAM
L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R
DIRECT OUT API 1-3										DIRECT OUT API 1-3													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
707	707	707	707	707	707	707	707	707	707	707	707	707	707	707	707	707	707	707	707	707	707	707	707
MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS
US	US	US	US	US	US	US	US	US	US	US	US	US	US	US	US	US	US	US	US	US	US	US	US
CUE OUTPUT										CUE OUTPUT													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS
31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
AUX OUT API SUMMING										AUX OUT API SUMMING													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS
31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
C-24 MONITOR IN 1-5										C-24 MONITOR IN 1-5													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
APX	APX	APX	APX	APX	APX	APX	APX	APX	APX	APX	APX	APX	APX	APX	APX	APX	APX	APX	APX	APX	APX	APX	APX
501	501	501	501	501	501	501	501	501	501	501	501	501	501	501	501	501	501	501	501	501	501	501	501
LINE INPUT API 1-5										LINE INPUT API 1-5													
PRO TOOLS OUTS 25-32										PRO TOOLS OUTS 25-32													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON
L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R
PROTOCOLS INPUTS 25-32										PROTOCOLS INPUTS 25-32													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
ADAM	ADAM	ADAM	ADAM	ADAM	ADAM	ADAM	ADAM	ADAM	ADAM	ADAM	ADAM	ADAM	ADAM	ADAM	ADAM	ADAM	ADAM	ADAM	ADAM	ADAM	ADAM	ADAM	ADAM
L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R
DIRECT OUT API 1-3										DIRECT OUT API 1-3													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
707	707	707	707	707	707	707	707	707	707	707	707	707	707	707	707	707	707	707	707	707	707	707	707
MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS
US	US	US	US	US	US	US	US	US	US	US	US	US	US	US	US	US	US	US	US	US	US	US	US
AUX OUT API SUMMING										AUX OUT API SUMMING													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS
31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
CUE OUTPUT										CUE OUTPUT													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS
31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31

## 8Bibliografía

Alten, Stanley. "Audio in media". 3era. Ed. Edit. Wadsworth Publishing Inc. EUA, 1990.

Auralex Acoustics Inc. <http://www.masacoustics.com>

Beranek, Leo. "Acoustics". 2ª ed. Edit. Acoustical Society of America. EUA, 1993.

Carrión, Antoni. "Diseño acústico de espacios arquitectónicos". 1era ed. Edit. UPC. España, 1998.

Everest, Alton. "The Master Handbook of Acoustics". 4a ed. Edit. Mcgraw-Hill. EUA, 1976.

Horning, Klaus. "Diseño de un estudio de grabación con sala de control LEDE". Tesis. Universidad Austral de Chile. Chile, 2001.

[http://www.teicontrols.com/notes /Engineering Acoustics.pdf](http://www.teicontrols.com/notes/EngineeringAcoustics.pdf)

<http://www.wikipedia.com>

Olson, Harry. "Music, physics and engineering". 2a. ed. Edit. Dover Publications Inc. EUA, 1967.

Recuero, M. "Acústica arquitectónica". Edit. Artes Gráficas BENZAL. España, 1992.

Solís, Guillermo. "Reacondicionamiento acústico y electrónico del estudio A de grabación de discos Musart". Tesis. Instituto Politécnico Nacional. México, 1984.

## 8.1 Bibliografía de ecuaciones

- 1...<http://www.wikipedia.com>
- 2...<http://www.wikipedia.com>
- 3...Arau, Higini:1999
- 4...Arau, Higini:1999
- 5...Arau, Higini:1999
- 6...Arau, Higini:1999
- 7...Arau, Higini :1999
- 8...Arau, Higini :1999
- 9...Arau, Higini :1999
- 10...<http://www.wikipedia.com>
- 11...<http://www.wikipedia.com>
- 12...Carrión, Antoni: 1998
- 13...Carrión, Antoni : 1998
- 14...Carrión, Antoni: 1998
- 15...Carrión, Antoni:1998
- 16...Carrión, Antoni:1998
- 17...<http://www.wikipedia.com>
- 18...
- 19...Carrión, Antoni:1998
- 20...Carrión, Antoni: 1998
- 21... <http://fisica.laguia2000.com/acustica/acustica-de-recintos-i>
- 22... <http://fisica.laguia2000.com/acustica/acustica-de-recintos-i>
- 23... <http://fisica.laguia2000.com/acustica/acustica-de-recintos-i>
- 24...Arau, Higini:1999
- 25...Arau, Higini:1999
- 26...Arau, Higini :1999
- 27...Arau, Higini :1999
- 28...Arau, Higini :1999
- 29...Arau, Higini :1999
- 30...Arau, Higini :1999
- 31...Arau, Higini :1999
- 32...Arau, Higini :1999
- 33...Arau :Higini :1999
- 34...Arau, Higini :1999
- 35...Arau, Higini :1999
- 36...Arau, Higini :1999
- 37...Arau, Higini :1999
- 38...Arau, Higini :1999
- 39...Arau, Higini :1999

40...Arau, Higini : 1999

41...Arau, Higini : 1999

42...Arau, Higini : 1999

43...Arau, Higini : 1999

44...Arau, Higini : 1999

45...Arau, Higini : 1999

46...Arau, Higini : 1999

47...Arau, Higini : 1999

48...Arau, Higini : 1999

49...Arau, Higini : 1999

50...Arau, Higini : 1999

51...Arau, Higini : 1999

52...Arau, Higini : 1999

53...Arau, Higini : 1999

54...Arau, Higini : 1999

55...Arau, Higini : 1999

56...Arau, Higini : 1999

57...Arau, Higini : 1999

58...Arau, Higini : 1999

59...Arau, Higini : 1999

60...Arau, Higini : 1999

61...Arau, Higini : 1999

62...Arau, Higini : 1999

63...Arau, Higini : 1999

64...Arau, Higini : 1999

65...Arau, Higini : 1999

66...Arau, Higini : 1999

67...Arau, Higini : 1999

68...Arau, Higini : 1999

69...Arau, Higini : 1999

70...Arau, Higini : 1999

71...Arau, Higini : 1999