



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

ANÁLISIS DEL TETRAPAK RECICLADO POSTERIOR AL PROCESO DE COMPRESIÓN
TÉRMICA COMO MATERIAL DE ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos establecidos
para optar por el título de Ingeniero en Sonido Y Acústica

Profesora Guía

Msc. María Bertomeu Rodríguez

Autor

Omar Ricardo Chávez Miranda

Año

2015

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el estudiante, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”

María Bertomeu Rodríguez
Máster en Gestión y Evaluación de la Contaminación Acústica
Pasaporte: 210267

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.”

Omar Ricardo Chávez Miranda
C.C.1716245178

AGRADECIMIENTOS

Gracias principalmente a mi madre y mi abuelita Tita, por inculcarme el gusto y amor al estudio y la investigación. A mi familia y amigos que han estado en los buenos y malos momentos. Y gracias Sebastián, espero que te encuentres en un lugar mejor .

DEDICATORIA

Para Tita y mi madre con
todo el cariño infinito que
les tengo.

RESUMEN

El presente trabajo muestra los procedimientos de cálculo y medición necesarios para la obtención de los coeficientes de absorción, mediante el uso de un tubo de impedancias con la normativa UNE-EN ISO 10534-2 bajo el nombre de “Determinación del coeficiente de absorción y de la impedancia acústica en tubos de impedancia”, segunda parte, “Método de la función de transferencia”. Y la curva del factor de reducción sonora según la normativa UNE-EN 12354-1 bajo el nombre de “estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos”, mediante el cálculo del comportamiento del material según la ley de masas en base a su densidad volumétrica, masa superficial, espesor y coeficientes de elasticidad de tres tipos de tableros reciclados, de TetraPak, siendo estos; los tableros de polialuminio de 10 mm y 6mm de espesor y el tablero de TetraPak de 7 mm de espesor. Con el objetivo principal de estimar, el posible uso de estos en el campo del aislamiento y acondicionamiento acústico, en comparación con otros materiales utilizados en el mercado actual.

ABSTRACT

This paper presents the measurement and calculation procedures needed to obtain absorption coefficients, by using an impedance tube with UNE-EN ISO 10534-2 under the name of "Determination of the absorption coefficient and impedance acoustic impedance tubes ", Part II," Method of transfer function ". And the curve of noise reduction factor according to UNE-EN 12354-1 under the name "estimate of the acoustic characteristics of the buildings from the characteristics of its elements" by calculating the behavior of the material under the law mass based on their volumetric density, surface mass, thickness and elasticity coefficients from three types of recycled Tetra Pak boards, being these; polyaluminum boards of 10 mm and 6 mm thickness and TetraPak board 7 mm thickness. With the main objective of estimate the possibility of using it on acoustic insulation, acoustic treatment, compared to other materials used in today's market.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO	7
1.1. Fundamentos del sonido y su propagación	7
1.1.1. Sonido	7
1.1.2. Frecuencia	7
1.1.3. Vibración	8
1.1.4. Campo difuso	8
1.2. Características de los materiales	8
1.2.1. Densidad Superficial o Masa Superficial	8
1.2.2. Densidad Volumétrica	9
1.2.3. Módulo de Young	9
1.2.4. Ley de Hooke	10
1.2.5. Ondas de flexión	11
1.2.6. Frecuencia crítica	12
1.3. Aislamiento Acústico	13
1.3.1. Transmisión del Ruido Aéreo	15
1.3.1.1. Índice de reducción Sonora	15
1.3.1.2. Factor de Transmisión	16
1.3.1.3. Aislamiento acústico específico	16
1.3.2. Ley de masas	18
1.3.2.1. Pared simple, homogénea, elástica e infinita	19
1.3.3. Ley de masas-frecuencia	21
1.4. Acondicionamiento acústico	24
1.4.1. Coeficiente de Absorción	25
1.4.2. Medición en tubo de impedancias	26
1.4.3. Algoritmos función de transferencia	27
1.4.3.1. Transformada FFT	27
1.4.3.2. Correlación	27

1.4.3.3. Conjugado	28
1.4.4. Absorción por materiales.....	28
1.4.4.1. Materiales Porosos o fibrosos.....	29
1.4.4.2. Materiales Homogéneos y blandos.....	31
1.5. Normativas	33
1.5.1. UNE-EN 12354-1	33
1.5.2. UNE-EN ISO 10534-2	33
1.5.3. UNE- EN ISO 717-1	33
1.6. TetraPak.....	34
1.6.1. Reciclaje del TetraPak	36
1.6.2. Reciclaje Cartón	37
1.6.3. Elaboración de los paneles de material reciclado	38
1.6.4. Fabricación de los paneles de Polialuminio	38
1.6.5. Fabricación paneles de TetraPak.....	43
2. METODOLOGÍA	44
2.1. Cálculo Transmisión:.....	44
2.1.1. Procedimiento de Laboratorio	45
2.1.2. Medición de Elasticidad.....	45
2.1.3. Medición de Densidad.....	47
2.1.4. Cálculo del promedio.....	48
2.1.5. Cálculo factor <i>R</i>	49
2.1.6. Consideraciones.....	50
2.2. Procedimiento cálculo de transmisión	50
2.3. Medición Absorción	54
2.3.1. Calibración	55
2.3.1.1 Equipamiento Calibración	55
2.3.2. Grabación y Medición.....	59
2.3.3. Obtención de datos	62
2.3.4. Promedio coeficientes en bandas de octava	63
2.3.4.1 Desarrollo del programa en MATLAB	63

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	68
3.1. Transmisión.....	68
3.1.1. Tablero P10.....	69
3.1.2. Tablero P6.....	73
3.1.3. Tablero T7.....	78
3.1.4. Gráficos comparativos.....	83
3.1.4.1. Gráfico comparativo P10, P6.....	84
3.1.4.2. Gráfico comparativo P10, T7.....	85
3.1.4.3. Gráfico comparativo P6, T7.....	86
3.1.4.4. Gráfico comparativo P10, P6 y T7.....	87
3.2. Absorción.....	88
3.2.1. Curvas y valores de absorción de P6.....	88
3.2.2. Curvas y valores de absorción de P10.....	93
3.2.3. Curvas y valores de absorción de T7.....	98
3.2.4. Consideraciones de resultados.....	102
3.2.5. Gráficos de Comparación entre Algoritmos.....	103
3.2.6. Comparación de Tableros por algoritmos.....	106
4. APLICACIONES.....	108
4.1. Aplicaciones en acondicionamiento.....	110
4.2. Aplicaciones en Aislamiento.....	111
5. ANÁLISIS ECONÓMICO.....	113
5.1. Análisis económico de los tableros.....	113
5.2. Costo de la realización de la investigación.....	115
5.2.1. Costo Nominal.....	115
5.2.2. Costo Real.....	116
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	118
REFERENCIAS.....	122
ANEXOS.....	124

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Compresión y descompresión de las partículas del medio.	7
Figura 2. Zonas de comportamiento de los materiales.....	10
Figura 3: Ley de Hooke.	11
Figura 4. Frecuencia crítica.	13
Figura 5. Transmisión por ruido aéreo y ruido estructural.	14
Figura 6. Transmisión por ruido aéreo.	15
Figura 7. Diferencia de potencias entre recintos.	16
Figura 8. Zonas de la ley de masas.	22
Figura 9 Vista del paso de las partículas de aire en un poro.....	29
Figura 10 Paso de las partículas de aire sobre un material fibroso.....	29
Figura 11 Longitud de onda.....	31
Figura 12 , Capaz del TetraPak.....	35
Figura 13. Proceso de transformación del TetraPak.	36
Figura 14. Recipiente del proceso de Pulper.....	37
Figura 15. Secado de las fibras de polialuminio	39
Figura 16. Fibras de Polialuminio.	38
Figura 17. Trituración de las fibras de polialuminio.	40
Figura 18. Polialuminio pulverizado.....	40
Figura 19, Moldes de las planchas de polialuminio.	41
Figura 20. Compresión Térmica de las planchas.	41
Figura 21. Máquina de Compresión.	42
Figura 22. Panel de Polialuminio, producto listo, previo al cortado.	43
Figura 23. Panel de TetraPak.....	43
Figura 24 Dimensiones de la probeta para medición de Módulo de elasticidad	46
Figura 25. Curva de Aislamiento de la plancha de MDF.	53
Figura 26. Diagrama Tubo de Kundt.	55
Figura 27. Interface de audio Roland Duo Capture.	56
Figura 28. Respuesta de frecuencia del micrófono MM1	56
Figura 29. Micrófono Beyerdynamic MM1.	57

Figura 30. Ecualizador Gráfico Klark Teknik.	57
Figura 31. Generador de Ruido Rosa, AudioTest	58
Figura 32. Respuesta de frecuencia del altavoz.....	59
Figura 33. Vista, software TuboSoft.	60
Figura 34. Posición de micrófonos 1 2.	61
Figura 35. Posición de micrófonos 2 1.	61
Figura 36. Sección, selección de posiciones.....	62
Figura 37. Sección, carga de archivos.	62
Figura 38. Selección de algoritmo.	63
Figura 39. Programa, Método de transferencia: 2 micrófonos.....	63
Figura 40. Curva de Aislamiento P10.....	71
Figura 41. Factor de Reducción Global P10	73
Figura 42. Curva de Aislamiento P6.....	76
Figura 43. Factor de Reducción Global P6	78
Figura 43. Curva de Aislamiento T7	81
Figura 45. Factor de Reducción Global T7.....	83
Figura 44. Gráfico comparativo, P10 y P6.....	84
Figura 45. Gráfico comparativo, P10 y T7	85
Figura 46. Gráfico comparativo, P6 y T7	86
Figura 47. Gráfico comparativo, de todos los paneles.	87
Figura 48. Promedio general tablero P6, correlación.	89
Figura 49. Desviaciones de cada banda del tablero P6, correlación.....	90
Figura 50. Promedio general tablero P6, conjugado.	91
Figura 51. Desviaciones de cada banda del tablero P6, conjugado.....	91
Figura 52. Promedio general tablero P6, FFT.	92
Figura 53. Desviaciones de cada banda del tablero P6, FFT.....	93
Figura 54. Promedio general tablero P10, Correlación.	94
Figura 55. Desviaciones de cada banda del tablero P10, correlación.....	94
Figura 56. Promedio general tablero P10, Conjugado.	95
Figura 57. Desviaciones de cada banda del tablero P10, conjugado.....	96
Figura 58. Promedio general tablero P10, FFT.	97
Figura 59. Desviaciones de cada banda del tablero P10, FFT.....	97

Figura 60. Promedio general tablero T7, correlación.	98
Figura 61. Desviaciones de cada banda del tablero T7, correlación.	99
Figura 62. Promedio general tablero T7, conjugado.	100
Figura 63. Desviaciones de cada banda del tablero T7, conjugado.	100
Figura 64. Promedio general tablero T7, FFT.	101
Figura 65. Desviaciones de cada banda del tablero T7, FFT.	102
Figura 66. Comparación de algoritmos P6.	103
Figura 67. Comparación de algoritmos P10.	104
Figura 68. Comparación de algoritmos T7.	105
Figura 69. Gráfica comparativa entre tableros, algoritmo de correlación	106
Figura 70. Gráfica comparativa entre tableros, algoritmo conjugado.	106
Figura 71. Gráfica comparativa entre tableros, algoritmo FFT.	107
Figura 72. Aislamiento en bandas de octava de cada tablero.	108
Figura 73. Gráfico comparativo del aislamiento en bandas de octava.	109
Figura 74. Resonador diafragmático o de membrana.	110
Figura 75. Gráfico comparativo, frecuencia de coincidencia entre paneles. ..	111
Figura 76. Partición compuesta, con lana de vidrio en su interior.	112
Figura 77. Comparación de precios entre tableros.	113
Figura 78. Comparación de precios entre tableros por m ²	114
Figura 79. Mediciones impares tablero P6, correlación.	129
Figura 80. Mediciones pares tablero P6 correlación.	129
Figura 81. Mediciones impares tablero P6, conjugado.	130
Figura 82. Mediciones pares tablero P6 conjugado.	130
Figura 83. Mediciones impares tablero P6, FFT.	131
Figura 84. Mediciones pares tablero P6 FFT.	131
Figura 85. Mediciones impares tablero P10, correlación.	132
Figura 86. Mediciones pares tablero P10, correlación.	132
Figura 87. Mediciones impares tablero P10, conjugado.	133
Figura 88. Mediciones pares tablero P10, conjugado.	133
Figura 89. Mediciones impares tablero P10, FFT.	134
Figura 90. Mediciones pares tablero P10, FFT.	134
Figura 91. Mediciones impares tablero T7, correlación.	135

Figura 92. Mediciones pares tablero T7, correlación.....	135
Figura 95. Mediciones impares tablero T7, conjugado.....	136
Figura 96. Mediciones pares tablero T7, conjugado.....	136
Figura 93. Mediciones impares tablero T7, FFT.....	137
Figura 94. Mediciones pares tablero T7, FFT.....	137

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Curva de referencia, ISO 717-1.....	18
Tabla 2 Elasticidad Tablero de polialuminio de 10mm	46
Tabla 3 Elasticidad Tablero de polialuminio de 6mm	47
Tabla 4 Elasticidad Tablero de TetraPak de 7 mm.....	47
Tabla 5 Densidad Tablero de polialuminio de 10mm	48
Tabla 6 Densidad Tablero de polialuminio de 6mm	48
Tabla 7 Densidad Tablero de TetraPak de 7 mm.....	48
Tabla 8. Datos de entrada de la plancha de MDF.....	50
Tabla 9. Datos factor de reducción plancha de MDF.	52
Tabla 10. Datos del factor de transmisión de la plancha de MDF.	54
Tabla 11. Codificación De los tableros.	68
Tabla 12. Datos de entrada P10.....	69
Tabla 13. Frecuencia crítica t10.	69
Tabla 14. Masa superficial P10.	69
Tabla 15. Dato. Frecuencia de densidad P10.	69
Tabla 16. Índice de reducción P10.	69
Tabla 17. Valores de Reducción versus frecuencia P10.	70
Tabla 18 Índice Global P10	72
Tabla 19. Datos de entrada P6.....	73
Tabla 20. Frecuencia crítica P6.....	74
Tabla 21. Masa superficial P6.	74
Tabla 22. Frecuencia de densidad P6.....	74
Tabla 23. Factor de reducción P6.	74
Tabla 24. Valores de Reducción versus frecuencia P6.	75
Tabla 25 Índice Global P6	77
Tabla 26. Datos de entrada T7.....	78
Tabla 27. Frecuencia crítica T7	79
Tabla 28. Masa superficial T7	79
Tabla 29. Frecuencia de densidad T7	79
Tabla 30. Factor de reducción T7.....	79

Tabla 31. Valores de Reducción versus frecuencia T7.	80
Tabla 32 Índice Global T7	82
Tabla 33. Codificación De los tableros.	83
Tabla 34. Coeficientes de absorción P6 Correlación.....	89
Tabla 35. Coeficientes de absorción P6 Conjugado.....	90
Tabla 36. Coeficientes de absorción P6 FFT.	92
Tabla 37. Coeficientes de absorción P10 Correlación.....	93
Tabla 38. Coeficientes de absorción P10, Conjugado.....	95
Tabla 39. Coeficientes de absorción P10 FFT.	96
Tabla 40. Coeficientes de absorción T7 Correlación.....	98
Tabla 41. Coeficientes de absorción tablero T7 conjugado.....	99
Tabla 42. Coeficientes de absorción T7 FFT.....	101
Tabla 43. Aislamiento entre materiales.	108
Tabla 44. Coeficientes de absorción entre materiales.....	109
Tabla 45. Frecuencias de coincidencia acorde a la distancia de separación .	111
Tabla 46. Comparación de precios.....	113
Tabla 47. Comparación de precios por metro cuadrado.	114
Tabla 48. Descripción del costo nominal de la investigación.	115
Tabla 49. Descripción del costo real de la investigación.	116
Tabla 50. Coeficientes de absorción P6 mediciones Correlación.....	138
Tabla 51. Coeficientes de absorción P6 mediciones Conjugado.....	139
Tabla 52. Coeficientes de absorción P6 mediciones FFT.	140
Tabla 53. Coeficientes de absorción P10 mediciones Correlación.....	141
Tabla 54. Coeficientes de absorción P10 mediciones Conjugado.....	142
Tabla 55. Coeficientes de absorción P10 mediciones FFT.	143
Tabla 56. Coeficientes de absorción T7 mediciones Correlación.....	144
Tabla 57. Coeficientes de absorción T7 mediciones Conjugado.....	145
Tabla 58. Coeficientes de absorción T7 mediciones FFT.	146

ÍNDICE DE ECUACIONES

(Ecuación 1)	7
(Ecuación 2)	8
(Ecuación 3)	9
(Ecuación 4)	9
(Ecuación 5)	10
(Ecuación 6)	12
(Ecuación 7)	12
(Ecuación 8)	16
(Ecuación 9)	16
(Ecuación 10)	17
(Ecuación 11)	17
(Ecuación 12)	19
(Ecuación 13)	21
(Ecuación 14)	21
(Ecuación 15)	21
(Ecuación 16)	23
(Ecuación 17)	23
(Ecuación 18)	25
(Ecuación 19)	25
(Ecuación 20)	26
(Ecuación 21)	27
(Ecuación 22)	27
(Ecuación 23)	27
(Ecuación 24)	27
(Ecuación 25)	27
(Ecuación 26)	28
(Ecuación 27)	28
(Ecuación 28)	28
(Ecuación 29)	28
(Ecuación 30)	32

(Ecuación 31)	32
(Ecuación 32)	49
(Ecuación 33)	49
(Ecuación 34)	51
(Ecuación 35)	53
(Ecuación 36)	64
(Ecuación 37)	64

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

Los materiales acústicos son una necesidad en el campo de la acústica, ya que presentan solución a la mayoría de los posibles problemas acústicos que pueden existir en cualquier recinto, como la falta de inteligibilidad, frecuencias estacionarias, tiempos de reverberación excedidos, ruido por transmisión estructural, ruido aéreo, etc. Por lo que el diseño, investigación e implementación de nuevos materiales, es necesario, para el tratamiento acústico, dentro del cual se contempla el posible uso de materiales reciclados.

El reciente crecimiento de conciencia ambiental, plantea la problemática nacional del mal manejo de los desechos y la creciente contaminación ambiental por acumulación y falta de reciclaje de la basura. Si unimos esto a la necesidad de producción de materiales acústicos, ya que en Ecuador no existe manufactura, el uso del reciclaje y el desarrollo de aplicaciones para materiales reciclados y ecológicamente sustentables se convierten en una opción viable.

Uno de los materiales más usados por el consumidor es el TetraPak, con un reciclaje de 562 toneladas en 2013, equivalente al 9% del total existente en el mercado y en 2012 con un reciclaje del 6% (EkosNegocios, 2014). El TetraPak se puede utilizar para la creación de paneles del material y a su vez podría ser utilizado para distintas aplicaciones en el área acústica.

En el caso que aplica a este proyecto en particular, nos planteamos el posible uso del material TetraPak como material para el acondicionamiento y aislamiento acústico.

Al ser un material compuesto, muestra beneficio como resistencia, flexibilidad y propiedades acústicas, debido a su composición.

El material adopta el nombre comercial de **Tectan** o tableros de polialuminio. Existe también en producción, planchas, que poseen los tres materiales que componen el TetraPak, Polietileno, aluminio y cartón, estas poseen el nombre comercial de tableros de TetraPak.

El TetraPak (s.f) se compone de tres materiales:

- Cartón: Se utiliza sólo lo suficiente para hacer el paquete estable, sin añadir peso innecesario. Pizarra de papel es una materia prima renovable, hecho de la madera.

- Polietileno: Capas delgadas de polietileno (un plástico de uso general) se añaden para sellar el líquido y proteger el producto contra la humedad externa.

- Aluminio: Los empaques diseñados para almacenar los alimentos sin necesidad de refrigeración también contienen una capa delgada de papel de aluminio. Esto protege al producto de oxígeno, los sabores y la luz.

Si queremos utilizar el Tectan para el desarrollo de materiales acústicos, es necesario que los estudios avancen, ya que no existen parámetros de categorización acústica acerca de absorción y transmisión. Obteniendo estos datos se espera demostrar el posible uso del Tectan como resonador diafragmático debido a su rigidez y elasticidad, entre otras aplicaciones de uso como un resonador perforado, material para usar en conjunto con otros materiales para el uso de particiones dobles o pared simple para el aislamiento acústico.

Alcance

El alcance de este trabajo es la determinación de las propiedades acústicas del Tectan. Este material reciclado se produce en Ecuador. Las principales propiedades que se buscará determinar son:

- coeficiente de absorción
- índice de transmisión

Para la medición y obtención de descriptores de absorción existen varias posibilidades, entre estas cámara reverberante, cámara anecóica y tubo de Kundt, pero debido a las limitaciones de no tener una cámara reverberante u anecóica, y el no tener suficiente material para poder cumplir con los requisitos de la medición, se optó por la utilización del tubo de Kundt con los siguientes algoritmos de la función de transferencia, para la medición de los descriptores de absorción:

- Algoritmo de correlación
- Algoritmo conjugado
- Algoritmo FFT o Transformada rápida de Fourier

Para la obtención de los parámetros de transmisión, utilizaremos métodos matemáticos de modelación acústica, ya que no contamos con una cámara de mediciones.

Una vez obtenidos estos datos se procederá a analizar posibles aplicaciones reales del material, según los resultados obtenidos.

Justificación

Debido al reciente crecimiento de una conciencia ambiental, la falta del uso de materiales reciclados y la falta de información acerca de las propiedades acústicas del Tectan.

Se optó por realizar el estudio para el Tectan en particular debido, en primer lugar a la preocupación medioambiental y segundo, a la existencia de empresas que lo reciclan en Ecuador, pero las cuales no poseen información técnica en el área de parámetros acústicos. El hecho de que sea un material reciclado, y teniendo en cuenta lo comentado anteriormente sobre el problema de gestión de basuras resulta idóneo para cubrir una necesidad reduciendo a la vez en impacto ambiental.

Al poseer los valores técnicos de absorción y transmisión, se logrará caracterizar como un posible material acústico.

Dependiendo de los datos obtenidos se determinará su uso, ya sea para aislamiento o acondicionamiento acústico.

Objetivo General

Determinar, utilizando procesos de medición y cálculo, basados en normas y procedimientos internacionales, los parámetros acústicos de los paneles de TetraPak reciclado.

Objetivos específicos

- Realizar la medición de absorción acústica de los paneles TetraPak, en un tubo de Kundt según las condiciones establecidas para este tipo de experimento.
- Obtener el valor del índice de reducción sonora global y su curva de aislamiento de los paneles TetraPak mediante procedimientos y cálculos matemáticos.
- Analizar los datos obtenidos en las diferentes mediciones del TetraPak para la comparación de los datos más relevantes con materiales utilizados en el acondicionamiento y aislamiento acústico.

Hipótesis

Siguiendo la tendencia del reciclaje, se ha encontrado un material utilizado como material constructivo por lo tanto la hipótesis que se plantea, es que los tableros de polialuminio y TetraPak, poseen propiedades acústicas de absorción y transmisión sonora, con la posibilidad de su utilización como material en acondicionamiento o aislamiento acústico. Y una posible opción existente en el mercado.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Fundamentos del sonido y su propagación

1.1.1. Sonido

El sonido es un fenómeno físico que consiste en la perturbación, por vibración de las partículas en un medio elástico, generando zonas de compresión y descompresión en el medio, creando una sensación auditiva.

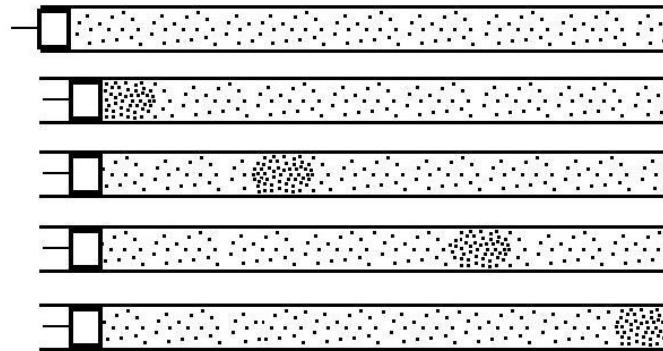


Figura 1. Compresión y descompresión de las partículas del medio.

Tomado de Miyara, 2000, p. 2

1.1.2. Frecuencia

Se denomina como la cantidad de ciclos o perturbaciones que ocurren en un segundo, Su unidad de medida según el S.I (Sistema Internacional) son los Hertz [Hz]. La frecuencia es inversamente proporcional al tiempo:

$$F = \frac{1}{T}$$

(Ecuación 1)

1.1.3. Vibración

La vibración es el cambio de estado de un material, de su punto de equilibrio a un movimiento ondulatorio interno debido a una fuerza o perturbación inicial. La vibración variará según los siguientes parámetros:

- La fuerza inicial
- Densidad del material
- Geometría del material

1.1.4. Campo difuso

Campo difuso según la acústica estadística es el modelamiento analítico para el estudio de un campo reverberante, tomando en cuenta que la intensidad sonora, no solo en el estado estacionario sino en cualquier momento del decaimiento energético, sea igual en todos los puntos del recinto. Y que la distribución de energía acústica sea homogénea para toda la sala (Llinares, Llopis, Sancho, 2011, pp. 191).

1.2. Características de los materiales

1.2.1. Densidad Superficial o Masa Superficial

Descriptor físico, de la propiedad de los materiales que muestra la cantidad de masa sobre una unidad de superficie, en este caso un área, se detalla con la siguiente fórmula:

$$D_s = \frac{m}{S}$$

(Ecuación 2)

Donde:

m Masa del material (kg)

S Superficie del material (m^2)

1.2.2. Densidad Volumétrica

Descriptor físico, de la propiedad de los materiales que muestra la cantidad de masa sobre una unidad de volumen, se detalla con la siguiente fórmula:

$$D_v = \frac{m}{V}$$

(Ecuación 3)

Donde:

m Masa del material en (kg)

V Volumen del material (m^3)

1.2.3. Módulo de Young

Módulo que muestra la relación proporcional, entre una presión ejercida de manera uniaxial en un material, con respecto a la diferencia de la distancia que este se deforma hasta el punto que su comportamiento sigue siendo de manera elástica, antes de pasar a un comportamiento plástico. El módulo de elasticidad se muestra según la siguiente relación:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L}$$

(Ecuación 4)

Donde:

σ Presión ejercida (N/m^2)

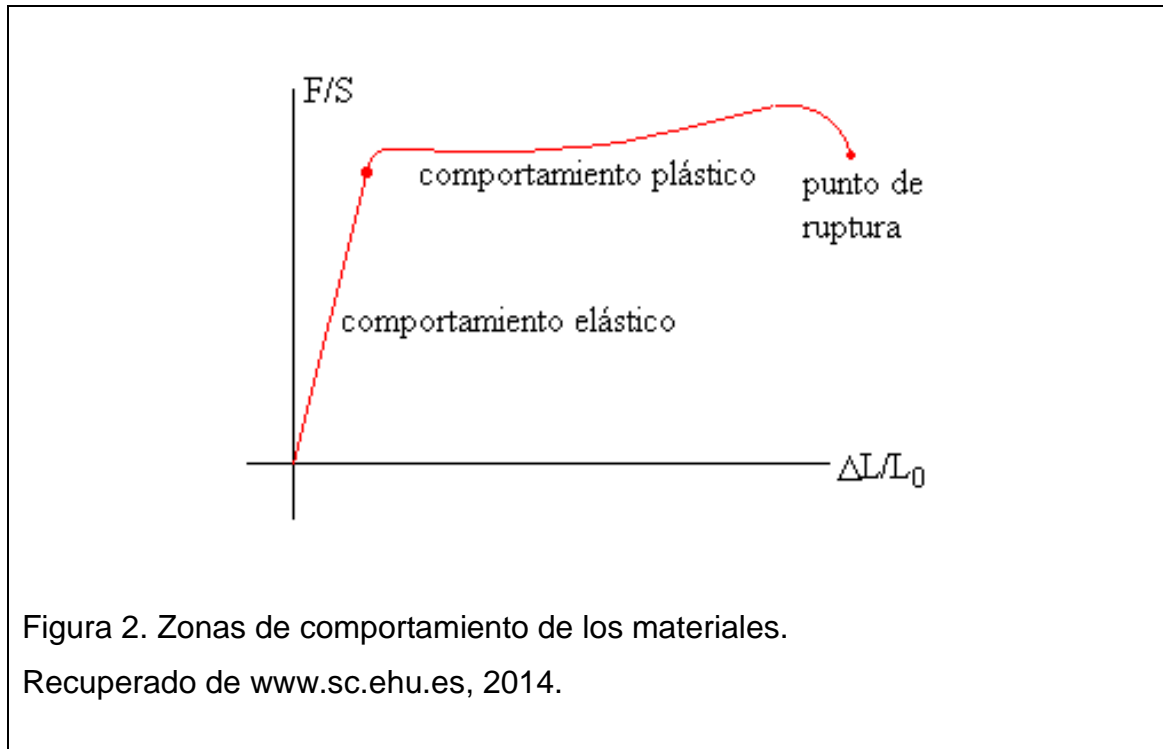
ϵ Relación de distancias de la deformación

F Fuerza ejercida (N)

S Superficie (m^2)

ΔL Distancia final (m)

L Distancia Inicial (m)



1.2.4. Ley de Hooke

La Ley de Hooke determina, que toda fuerza o tensión aplicada sobre un cuerpo, será proporcional a una constante característica del material por la variación de longitud, de su deformación.

$$F = k \cdot \Delta x$$

(Ecuación 5)

Donde:

k Constante de deformación

Δx Variación de longitu

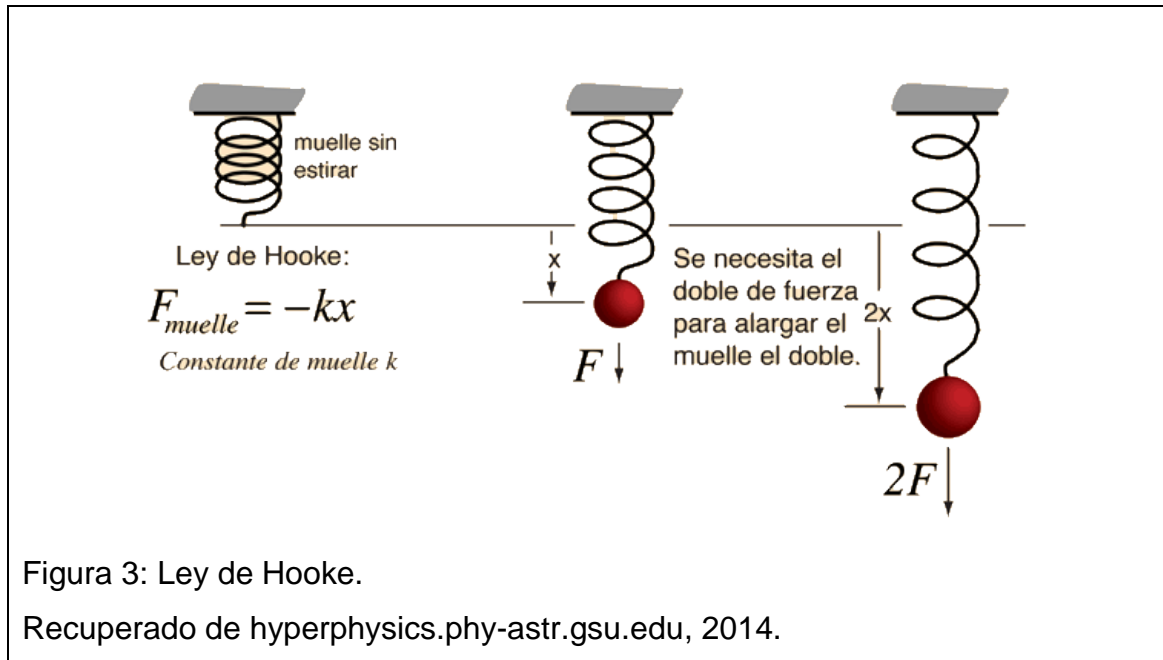


Figura 3: Ley de Hooke.

Recuperado de hyperphysics.phy-astr.gsu.edu, 2014.

Acorde a la ley de Hooke, podemos determinar una relación entre la elasticidad y el módulo de Young. Según la ecuación:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

El módulo de Young es indirectamente proporcional a la deformación del material, porque al aumentar la variación de longitud o deformación, menor será el módulo. Por lo que mayor el valor del módulo, menor será la elasticidad.

1.2.5. Ondas de flexión

Ondas de propagación en los materiales, en la cual la velocidad de propagación, depende directamente de la frecuencia. Las variaciones de la velocidad de propagación se verá afectada por los siguientes parámetros del material:

- Rigidez
- Módulo de Poisson
- Masa superficial

Matemáticamente la velocidad de propagación es:

$$c_f = \omega^4 \sqrt{\frac{B}{m}}$$

(Ecuación 6)

Donde:

ω Frecuencia (Hz)

B Rigidez (N/m)

m Masa superficial (kg/m²)

1.2.6. Frecuencia crítica

También conocida como frecuencia de coincidencia. Es aquel fenómeno en el cual existe un ángulo de incidencia y una frecuencia que coinciden con las ondas de flexión del panel, generalmente siempre en altas frecuencias (Cámara Industrial de cerámica roja [CICR], 2005), ocasionando que estas entren en fase, generando así menor aislamiento en el panel. Matemáticamente en el caso de una partición simple es:

$$f_c = \frac{c^2}{1,8t} \sqrt{\frac{\rho}{E}}$$

(Ecuación 7)

Donde:

t Espesor (m)

c Velocidad del sonido (kg/m)

ρ Densidad Volumétrica (kg/m³)

E Módulo de Young (N/m²)

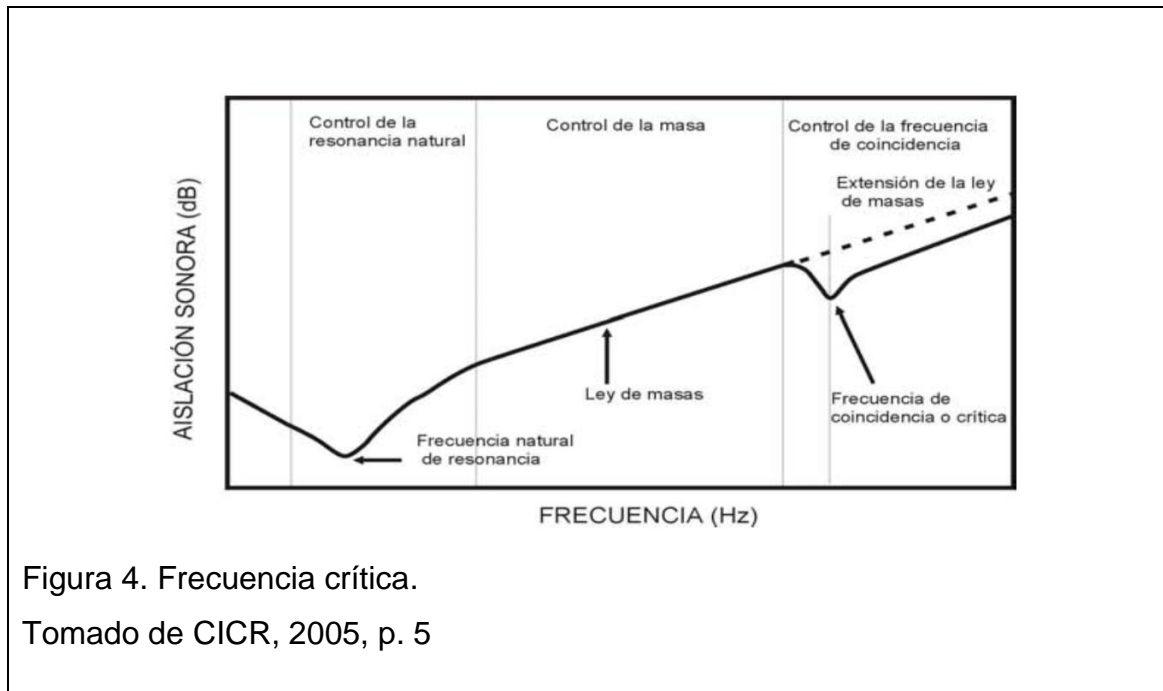


Figura 4. Frecuencia crítica.

Tomado de CICR, 2005, p. 5

1.3. Aislamiento Acústico

Rama de la acústica que se dedica al estudio del diseño y cálculo de la oposición del paso del frente de ondas sobre una estructura o partición desde un frente emisor a un recinto receptor. Por tanto los mecanismos empleados serán los que dificulten en términos energéticos, los que consigan disminuir la energía de ondas acústicas (Llinares y otros, 2011, pp. 251).

El aislamiento acústico tiene como objetivo atacar la transmisión sonora por fuentes externas al interior de un recinto, independientemente del acondicionamiento acústico que el recinto posea.

Es mucho más complicado aislar sonidos graves que los agudos, debido a que por sobre los 1000 Hz la longitud de onda del mismo será mucho más pequeño, y va disminuyendo mientras la frecuencia vaya aumentando, en cambio para frecuencias más graves por debajo de los 1000 Hz, la longitud de onda será mucho mayor, por lo que su transmisión es más fácil, ya que el λ de la frecuencia es mayor al espesor de la superficie.

Podemos suponer, que para un material dado, la pared separadora debe ser mucho más gruesa mientras más baja la frecuencia que se desee aislar (Recuero, 2000).

El aislamiento se lleva a cabo mediante el uso de materiales aislantes, y el resultado estará en función de la masa y también de la colocación por el desacoplamiento mecánico, atacando así la transmisión de:

- Ruido Aéreo
- Ruido Estructural

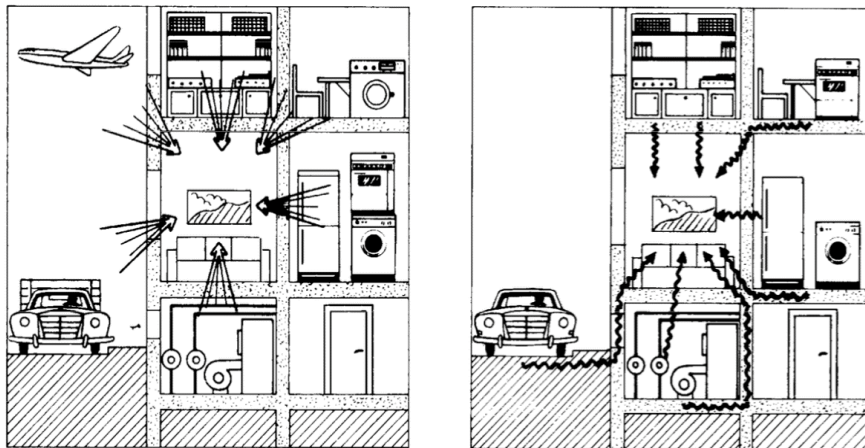


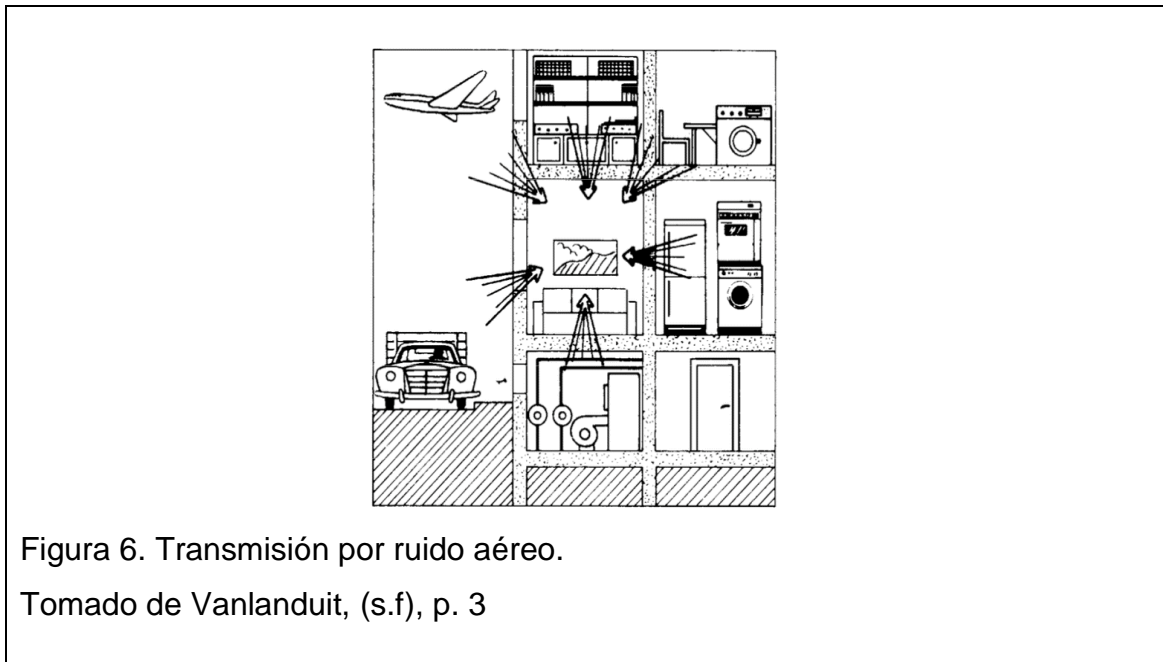
Figura 5. Transmisión por ruido aéreo y ruido estructural.

Tomado de Vanlanduit, (s.f), p. 3

Dentro del ruido estructural, existen dos posibles causas, debido a la naturaleza de la fuente emisora, estas pueden ser ruido por impacto, generado por ruidos de corta duración y ruido por vibración, generado por otros elementos externos como maquinarias, motores, etc.

1.3.1. Transmisión del Ruido Aéreo

La transmisión por ruido aéreo, se da a través de los cerramientos de un recinto receptor ya sea paredes contiguas o elementos exteriores como la fachada o cubiertas. La transmisión ocurre cuando las ondas sonoras ya sean directas o reverberantes chocan contra los cerramientos generando vibración, esta vibración representa parte de la energía de la onda sonora, por lo que al atravesar la separación las partículas de aire vibren y generen nuevas ondas sonoras. La transmisión depende de la amplitud y frecuencia de la onda sonora inicial. Los mecanismos de aislamiento a ruido aéreo tienen como objeto el reducir al mínimo la energía inicial que se produce en el local receptor.



1.3.1.1. Índice de reducción Sonora

Factor de reducción usado en aislamiento acústico, que se obtiene del menos diez logaritmo del factor de transmisión τ , siendo este el cociente entre la potencia del recinto receptor con el elemento separador (Long, 2006), el factor variará según la frecuencia analizada. Se denomina según:

$$R = -10 \log \left(\frac{w_t}{w_i} \right)$$

(Ecuación 8)

1.3.1.2. Factor de Transmisión

Descriptor de la relación de potencias acústicas entre un recinto emisor y un receptor. Donde el factor de transmisión es igual a:

$$\tau = \frac{w_t}{w_i}$$

(Ecuación 9)

Donde:

w_t Potencia acústica del recinto receptor

w_i Potencia acústica sobre el elemento separador

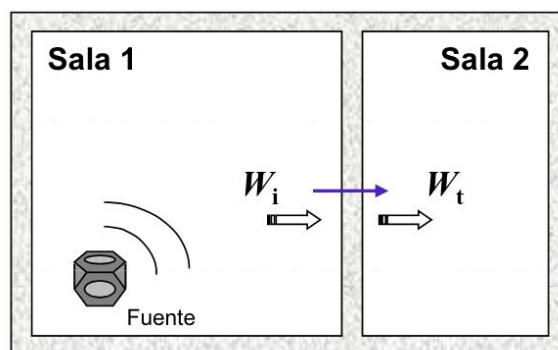


Figura 7. Diferencia de potencias entre recintos.

Tomado de Soler (2011-2012), p. 99

1.3.1.3. Aislamiento acústico específico

Descriptor que estudia la relación entre la intensidad incidente versus la transmitida, utilizado únicamente para el análisis entre las transmisión de vía directa entre recintos.

$$\alpha = 10 \log\left(\frac{I_i}{I_t}\right)$$

(Ecuación 10)

Donde:

i_t Intensidad acústica del recinto receptor.

i_i Intensidad acústica sobre el elemento separador.

Y posee relación con el factor de transmisión:

$$\tau = \frac{I_t}{I_i} ;$$

$$\alpha = 10 \log\left(\frac{1}{\tau}\right)$$

(Ecuación 11)

1.3.1.3. Índice de Reducción global

Parámetro de categorización del aislamiento de un material, mediante la comparación de una curva de referencia determinada en el normativa UNE-EN ISO-717-1, detallada posteriormente. La curva de referencia será, muestra la posibilidad de ser desplazada en pasos de más , menos 1dB hasta que la suma de las diferencias favorables sume un máximo de 32dB, estas diferencias se las obtiene, restando el valor de la curva de referencia con la curva R, del material estudiado. El resultado será un único valor, acorde al obtenido en la frecuencia de 500Hz.

Los valores de la curva de referencia, son de 100Hz a 3.15KHz, estos son:

Tabla 1. Curva de referencia, ISO 717-1

<i>Frecuencia (Hz)</i>	<i>Nivel (dB)</i>
100	33
125	36
160	39
200	42
250	45
315	48
400	51
500	52
630	53
800	54
1000	55
1250	56
1600	56
2000	56
2500	56
3150	56

1.3.2. Ley de masas

La ley de masas, es una propiedad que ocurre en todos los materiales, asociada en aislamiento, con el grosor del material, su rigidez, donde una de las consecuencias de la ley, estipula que al duplicar la densidad volumétrica de una partición el factor de reducción sonora R , de la partición aumenta en 6dB, así mismo cuando se duplica la frecuencia, emitido por la fuente, está provocará un aumento de en R de 6dB.

El Factor R de una partición simple, puede ser determinado con el uso de la teoría de la ley de masas, analizando primeramente el caso hipotético de una

incidencia perpendicular o incidencia directa. Matemáticamente según la siguiente fórmula:

$$R = 20 \log \left(\frac{t \rho \pi f}{\rho_0 c_0} \right)$$

(Ecuación 12)

O a su vez:

$$R = 20 \log(mf) - 42dB$$

Donde la impedancia del medio será:

$$Z = \rho_0 c_0 = 415 \text{ Rayls.}$$

Donde:

t Espesor de la partición (m)

ρ Densidad volumétrica (kg/m^3)

f Frecuencia (Hz)

ρ_0 Densidad del aire

c_0 Velocidad del sonido

1.3.2.1 Pared simple, homogénea, elástica e infinita

Caso de estudio en aislamiento y el cuál tomaremos, para el análisis posterior para la sección de transmisión del material. Sus características son:

- Pared Simple

Pared simple o partición simple, dentro de aislamiento, es el caso en que una separación entre recintos de una sola pared, en este caso el recinto emisor y el recinto receptor, de un solo material homogéneo, sin poseer un espacio de aire o material absorbente en su interior, por lo que no produce una ruptura de la continuidad del material (Torregrosa, 2011).

- **Homogeneidad**

Una pared es homogénea cuando al analizar todos sus puntos de masa, resultan iguales entre si respecto a la normal cuando esta entra en vibración. No necesariamente, una pared es homogénea cuando está compuesta de un solo material, también lo es en paredes compuestas, siempre y cuando cumplan la condición inicial de este teorema.

- **Elasticidad**

La elasticidad es una propiedad mecánica de los materiales. Definiéndose como al momento de aplicar una fuerza externa en el material, este tiene la capacidad de regresar a su posición original, sin sobrepasar el límite de ruptura del material.

La magnitud física para determinar el grado de elasticidad de los cuerpos, se lo conoce como módulo de Young.

Como se observa en la Figura 2, las distintas secciones muestran estados distintos del comportamiento del material. En la sección de comportamiento elástico se muestra la relación proporcional de la presión aplicada versus cuanto se fleja el material, teniendo una característica lineal. Esto quiere decir que a mayor fuerza, mayor será su compresión. El caso a analizar sola y únicamente será en esta sección debido a que en el comportamiento plástico, el material, ya no posee un comportamiento proporcional, donde el ya no retorna a su posición inicial y si se aplica un valor más de presión, este entra en el punto de ruptura.

- **Pared simple infinita**

Suposición, únicamente para la sección de cálculo en la cual, no existe dimensiones finitas, ocasionando que las ondas de flexión en el material no retornen y no se generen frecuencias estacionarias en el material.

1.3.3. Ley de masas-frecuencia

Dentro de la ley de masas existen dos extensiones de la fórmula de R , dependientes de la incidencia.

El primer caso es cuando tenemos incidencia oblicua, determinado por un ángulo de incidencia:

$$R = 20 \log \left(\frac{\pi m f \cos \phi}{\rho_0 c_0} \right)$$

(Ecuación 13)

Donde

ϕ Ángulo de incidencia (rad)

f Frecuencia de la banda analizada

m Masa superficial (kg/m^2)

ρ Densidad volumétrica (kg/m^3)

ρ_0 Densidad del aire

c_0 Velocidad del sonido

El segundo caso es cuando tenemos incidencia aleatoria en campo difuso, donde el cálculo para todos los ángulos de incidencia produce un aislamiento de 5 dB:

$$R = 20 \log \left(\frac{\pi m f}{\rho_0 c_0} \right) - 5 \text{dB}$$

(Ecuación 14)

O

$$R = 20 \log(mf) - 47 \text{dB}$$

(Ecuación 15)

Donde la impedancia del medio será:

$$Z = \rho_0 c_0 = 415 \text{ Rayls.}$$

La ley de masas en base de la frecuencia en una partición simple, muestra tres zonas de análisis, debido a que en estas el comportamiento de las ondas de flexión del panel se comportan de manera distinta:

- Zona I, controlada por la masa.
- Zona II, controlada por la frecuencia crítica o de coincidencia.
- Zona III, controlada por la masa.

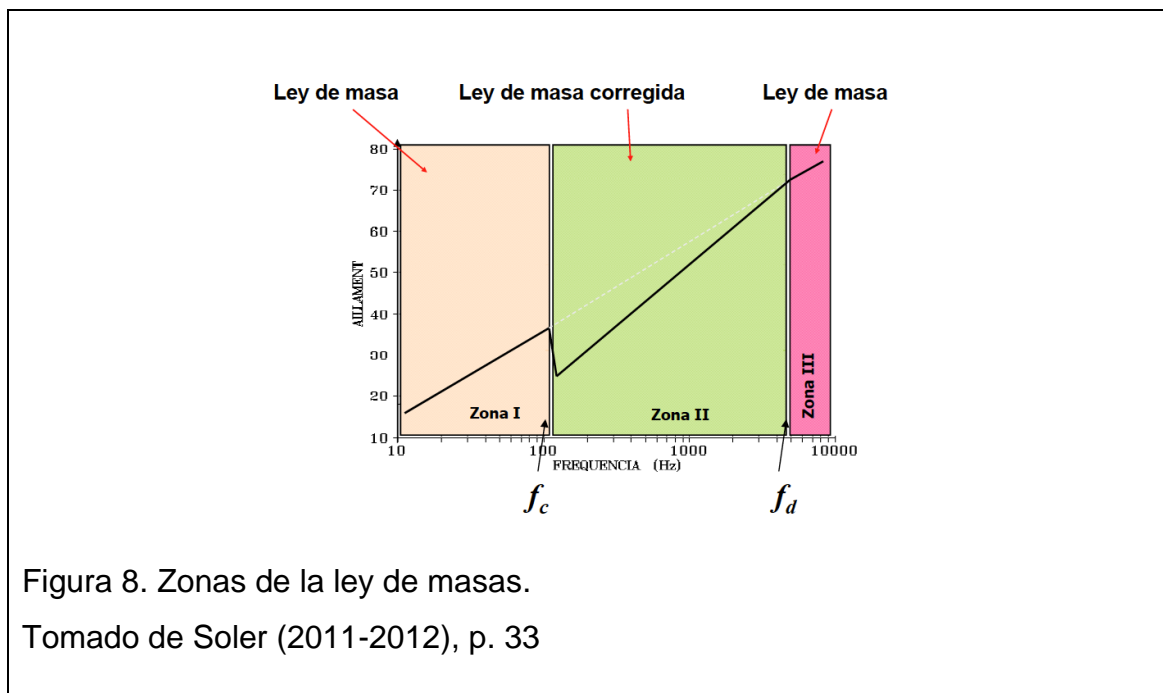


Figura 8. Zonas de la ley de masas.

Tomado de Soler (2011-2012), p. 33

- Zona I

Zona de control desde la frecuencia natural del material, en la cuál es controlado por la masa. En esta zona en una partición simple, de manera homogénea, elástica e infinita (sin dimensiones de largo y ancho), en incidencia aleatoria, la determinación del TL, será mediante el uso de la ecuación 13 o la ecuación 14.

- Zona II

Zona de control de la frecuencia crítica o de coincidencia, se encuentra determinada en el rango espectral, desde frecuencia crítica y la frecuencia de densidad. Para el cálculo del TL en incidencia aleatoria, se utiliza la fórmula de ley de la masa corregida:

$$TL = 20 \log \left(\frac{fm}{2\rho_0 c_0} \right) - 10 \log \left(\frac{\pi}{4\eta} \right) + 10 \log \left(\frac{f}{f_c} \right) + 10 \log \left(1 - \frac{f_c}{f} \right) - 5$$

(Ecuación 16)

Donde:

η Factor de amortiguamiento del material

f Frecuencia de la banda analizada

f_c Frecuencia crítica

m Masa superficial (kg/m^2)

ρ Densidad volumétrica (kg/m^3)

ρ_0 Densidad del aire

c_0 Velocidad del sonido

- Zona III

Zona que comienza a partir de la frecuencia de densidad, en la cual el material tiene de nuevo un comportamiento según la ley de masas, generalmente, en la mayoría de materiales, la frecuencia es tan alta que no afecta en los cálculos.

$$f_d = \frac{K}{2\pi\rho} \sqrt{\frac{m}{B}}$$

(Ecuación 17)

Donde:

K Módulo de compresión del material.

B Rigidez (N/m)

1.4. Acondicionamiento acústico

Rama de la acústica, cuyo enfoque y principal parámetro de tratamiento es el tiempo reverberación. Dicho parámetro caracterizará las propiedades audibles de una fuente sonora en el interior de un recinto. Generando cambios de tiempo debido a reflexiones tempranas, alterando su espectro de frecuencia, el incremento de su nivel por la energía añadida de las reflexiones y creando condiciones de escucha distintas, en varias secciones del recinto (Recuero, 2000).

El acondicionamiento busca que estos cambios sean útiles y aporten con la sonoridad, creando un confort desde el punto de vista de la percepción auditiva. El diseño para el tratamiento de estos cambios se lo realiza principalmente con el uso de materiales absorbentes, rediseñando la geometría de la sala y el re direccionamiento de las reflexiones para que aporten con la sonoridad de la fuente. Esta absorción podrá ser dos tipos, la primera generada por pérdida energética por calor y la segundo por la capacidad de transformar la energía acústica en energía mecánica. El objetivo principal del uso de estos materiales es el control del tiempo de reverberación, obteniendo como resultados:

- Mejor inteligibilidad o claridad en la palabra.
- Distribución homogénea de sonoridad.
- Aporte de las reflexiones para la amplificación de la señal inicial.
- Música con más animación.

El recinto juega un papel muy importante dentro de la percepción auditiva del receptor y una influencia significativa en la calidad del mismo. El proceso de persistencia y disminución de la energía en un recinto, una vez desconectada la fuente sonora, lleva el nombre de reverberación (Recuero, 2000). Si la reverberación es muy grande, la palabra pierde su claridad y por lo tanto su mensaje y la música pierden su musicalidad, por el solapamiento de notas.

1.4.1. Coeficiente de Absorción

Relación, cociente, adimensional entre la cantidad de energía absorbida y la energía incidente.

$$\alpha = \frac{L_a}{L_i}$$

(Ecuación 18)

Donde:

L_a Nivel Absorbido (dB)

L_i Nivel Incidente (dB)

La absorción de una superficie dependerá de varios factores:

- Tipo de material
- Forma de montaje
- Mecanismo de absorción

Estos factores determinarán la impedancia de la superficie. La absorción depende también, de la frecuencia y el ángulo de incidencia. Para altas frecuencias si el espesor de la superficie, es de grosor elevado, mayor será su absorción, pero, no es el caso para las bajas frecuencias. Debido a que su λ es muy elevado, por lo que su tratamiento es mediante el uso de membranas y resonadores (Llinares y otros, 2011, pp.179).

Dentro de una ficha técnica, el coeficiente de absorción, al ser dependiente de la frecuencia, se lo muestra en bandas de octava de 125 Hz a 4000 Hz.

Mediante el uso del coeficiente de absorción, podemos establecer el la absorción de una superficie, definido como el producto del coeficiente por su superficie en metros cuadrados, este producto se lo mide en SABINES:

$$S_{ab} = \alpha S$$

(Ecuación 19)

Donde:

α Coeficiente de Absorción

S Superficie del material (m^2)

1.4.2. Medición en tubo de impedancias

La medición en un tubo de impedancias presenta una ventaja logística, para la obtención de parámetros acústicos de un material como la impedancia del material y su coeficiente de absorción, debido a la poca cantidad de muestra que se necesita, mediante la generación de ondas planas.

- Método de Función de transferencia 2 Micrófonos

Este método al permitir la utilización de funciones de transferencias, se puede utilizar señales de prueba que contengan información de un rango de frecuencias determinado, como lo es un ruido rosa, un ruido blanco o un barrido de frecuencias y poder obtener las incógnitas de la siguiente ecuación para todos las frecuencias existentes dentro de la señal de prueba (Cueva, D. García C, 2014, pp. 7):

$$p = A(e^{jkz} + R e^{-jkz})$$

(Ecuación 20)

Donde:

R Coeficiente de Reflexión

k Número de onda

z Muestra $z=0$

Se optó por la utilización del tubo de Kundt con los siguientes algoritmos de la función de transferencia, para la medición de los descriptores de absorción:

- Algoritmo de correlación
- Algoritmo conjugado
- Algoritmo FFT o Transformada rápida de Fourier

1.4.3. Algoritmos función de transferencia

1.4.3.1. Transformada FFT

Con el uso de la transformada rápida de Fourier, podemos determinar la función de transferencia de dos funciones continuas. Su procedimiento consiste en el paso del dominio del tiempo a la frecuencia de una función continua determinado por una potencia de dos el número de muestras analizadas.

Si tengo dos funciones $S_1(t)$ y $S_2(t)$. Y aplicando:

$$P_n(w) = \text{fft}\{S_n(t)\} \quad (\text{Ecuación 21})$$

La Función de transferencia será definida por:

$$H = \frac{P_2}{P_1} \quad (\text{Ecuación 22})$$

1.4.3.2. Correlación

Mediante la correlación cruzada de dos funciones, se puede determinar la función de transferencia entre dos funciones $S_1(t)$ y $S_2(t)$, con la medida de dependencia entre dos funciones $Z_{12}(t)$ (Souza, 2013, p.1) donde:

$$Z_{12}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S_1(\tau)S_2(t + \tau) \quad (\text{Ecuación 23})$$

Donde τ es el desplazamiento de una función en relación a la otra, entonces:

$$Z_{21}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S_2(\tau)S_1(t + \tau) \quad (\text{Ecuación 24})$$

Si ambas funciones son iguales, obtenemos la siguiente función denominada, función de auto-correlación:

$$Z_{11}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S_1(\tau)S_1(t + \tau) \quad (\text{Ecuación 25})$$

Aplicando el teorema de Fourier, para el cambio de dominio del tiempo a frecuencia:

$$P_n(w) = F\{S_n(t)\}$$

(Ecuación 26)

La función de transferencia se obtendrá mediante:

$$H_{21} = \frac{P_{21}}{P_{11}}$$

(Ecuación 27)

1.4.3.3. Conjugado

Mediante el uso del operador conjugado de un número complejo, podemos determinar la función de transferencia, (Cueva, D. García C, 2014, pp. 22) teniendo dos funciones $S_1(t)$ y $S_2(t)$, en dominio del tiempo:

$$G_{21}(t) = P_2(w) P_1(w)^*$$

(Ecuación 28)

Donde * representa el conjugado de la función compleja. Si ambas funciones son iguales y aplicamos la ecuación 24, obtenemos, que:

$$G_{11}(t) = P_1(w) P_1(w)^*$$

(Ecuación 29)

La función de transferencia se verá definida, así mismo por la ecuación 25

$$H_{21} = \frac{P_{21}}{P_{11}}$$

1.4.4. Absorción por materiales

Dentro de un recinto, la disminución del tiempo de reverberación, frecuencias estacionarias debida a las características geométricas de la sala, será mediante el uso de materiales con dos tipos de mecanismos de absorción, el primero siendo la absorción por perdida calórica (materiales porosos o fibrosos) y absorción por transformación de energía acústica a mecánica (materiales homogéneos y blandos).

1.4.4.1. Materiales Porosos o fibrosos

Sustancias absorbentes, que producen amortiguamiento en la presencia de ondas sonoras. Las partículas de aire en contacto con el material, atraviesan sus canales, disminuyendo su energía cinética debido al mayor recorrido, reflexiones internas y aumento del rozamiento, dentro de los poros o canales. Transformando la energía cinética de las partículas en energía calórica.

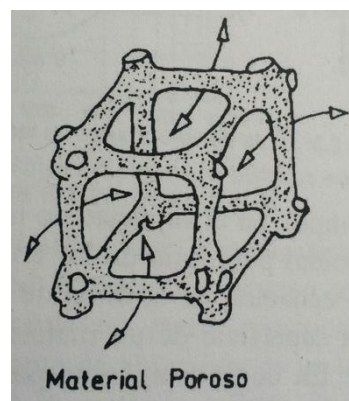


Figura 9 Vista del paso de las partículas de aire en un poro.

Tomado de (Linares y otros, 2011, pp. 173)

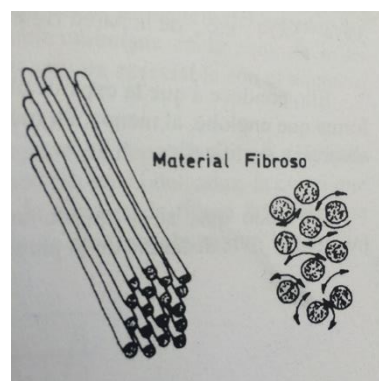


Figura 10 Paso de las partículas de aire sobre un material fibroso.

Tomado de (Linares y otros, 2011, pp. 173)

La rigidez del material determina un punto importante, puesto que a mayor rigidez la velocidad relativa de las partículas será mayor y así el rozamiento de las partículas, generando más pérdida calórica. Para este caso nos interesa que la impedancia del material sea muy baja para permitir el paso de la onda en su interior, para que se produzca fricción en los poros internos del material (Llinares y otros, 2011, pp. 173).

Dentro de los materiales porosos poseemos dos tipos:

- Materiales porosos de esqueleto rígido
- Materiales porosos de esqueleto flexible.

- **Materiales porosos de esqueleto rígido**

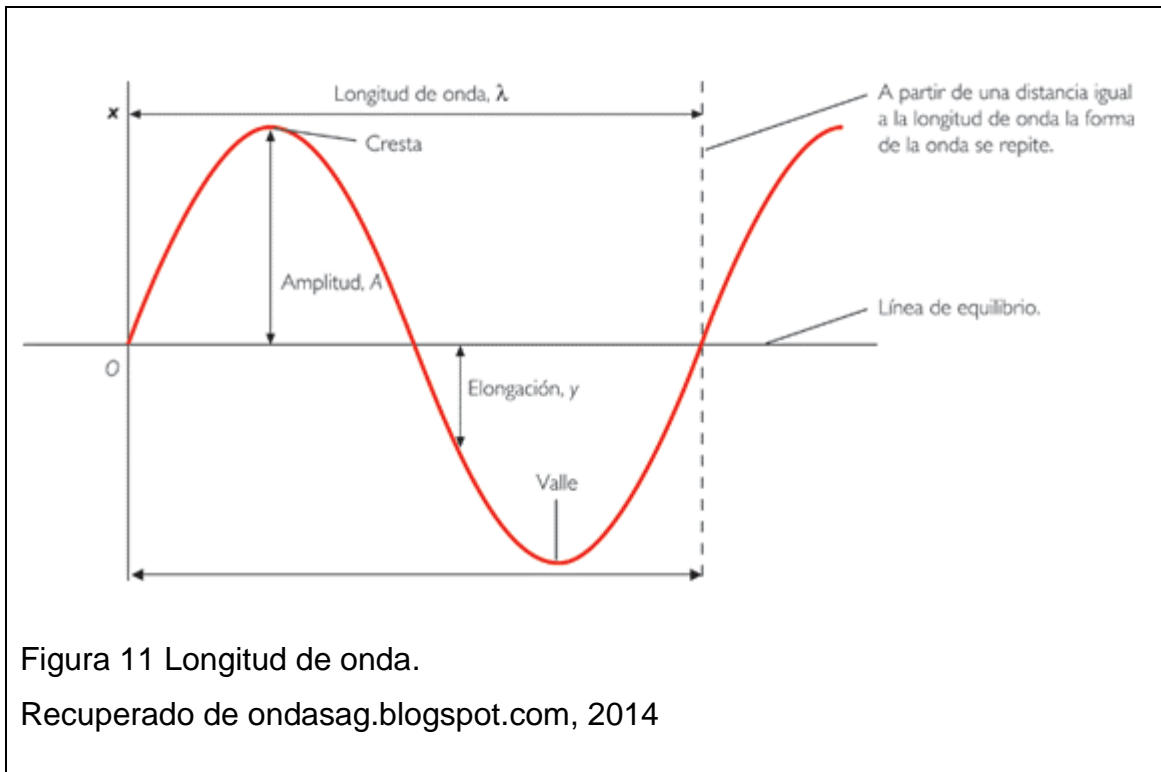
Estos materiales, poseen la características de poseer una rigidez más elevada, poroso, pero con una impedancia no tan alta como para permitir, el paso de las ondas sonoras a su interior.

A mayor espesor del material, mayor será su absorción, el espacio de aire entre el material y la pared rígida, favorece su absorción, además su absorción es menor en bajas frecuencias (Llinares y otros, 2011, pp. 174).

- **Materiales porosos de esqueleto flexible**

Estos materiales, poseen las características de poseer una rigidez más baja. Son más flexibles y poseen la capacidad de vibrar en presencia de ondas sonoras en su interior. Así mismo poseen una impedancia no tan elevada para permitir el paso de las ondas sonoras.

Para lograr una absorción de hasta el 99 %, el grosor del material poroso colocado debe coincidir con $\lambda/4$ de la frecuencia que se desee atacar. Debido a que en $\lambda/4$ es el pico de mayor cantidad energética de una frecuencia (Llinares y otros, 2011, pp. 174).



1.4.4.2. Materiales Homogéneos y blandos.

Dispositivos, de absorción de frecuencias específicas, los cuales generan absorción mediante la deformación del material, transformando la energía acústica en energía mecánica. Esta deformación dependerá de la masa, densidad y facilidad de movimiento por su elasticidad. Estos factores son dependientes de la frecuencia que se desee atenuar. Los materiales son más comúnmente utilizados para la atenuación de bajas frecuencias, debido la cantidad energética que estas poseen.

- Membranas

Dispositivo de absorción, con la capacidad de transformación de energía como método de absorción, tomando la energía acústica incidente y transformándola en energía mecánica. Esta energía mecánica se verá en un movimiento vibratorio, la absorción será máxima cuando la frecuencia incidente coincida con la frecuencia natural de la membrana, esta membrana tiene que ser

delgada, ya que el dispositivo también es dependiente de su masa superficial para su efectividad.

La frecuencia propia o natural de vibración de una membrana delgada y rígida es:

$$f_0 = \frac{600}{\sqrt{md}}$$

(Ecuación 30)

Donde:

m Masa superficial (kg/m^2)

d Distancia entre el panel y el muro (cm)

- Resonadores de Helmholtz

Dispositivos de absorción. Son recipientes cerrados con un volumen de aire en su interior, con una abertura muy estrecha como comunicación con el exterior. Cuando la masa de aire del canal se somete a cambios de movimiento el volumen interno del resonador actúa como un amortiguador, la presión existente dentro del canal, posee una velocidad mayor, cuando la frecuencia incidente es más parecida a la frecuencia de resonancia se da por (Alton Everest, F. Pohlmann Ken, C, 2009, pp. 209):

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi R^2}{(L + 1,6R)V}}$$

(Ecuación 31)

Donde:

c Velocidad del sonido (m/s)

R Radio del cuello (m)

L Longitud del cuello (m)

V Volumen del resonador (m^3)

1.5. Normativas

1.5.1. UNE-EN 12354-1

Normativa europea bajo el nombre de “Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos”, primera parte, “Aislamiento acústico del ruido aéreo entre recintos”. La presente normativa determina procedimiento de cálculo y medición in-situ para determinar los parámetros de aislamiento acústico de una partición simple o compuesta. Expondremos el uso del descriptor del índice de reducción sonora y el coeficiente de transmisión.

1.5.2. UNE-EN ISO 10534-2

Normativa europea bajo el nombre de “Determinación del coeficiente de absorción y de la impedancia acústica en tubos de impedancia”, segunda parte, “Método de la función de transferencia”. La presente normativa muestra las características de diseño, cálculo, desarrollo e implementación para la medición y obtención de los coeficientes de absorción de una muestra, en un tubo de impedancias, expondremos rápidamente los distintos parámetros utilizados y el desarrollo para la obtención del coeficiente de absorción.

1.5.3. UNE- EN ISO 717-1

Normativa europea bajo el nombre de “Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y los elementos de construcción”, primera parte, “Aislamiento a ruido Aéreo”. La presente normativa muestra la categorización del aislamiento de una material, con un solo valor, en base a la comparación y suma de diferencias favorables de una curva de referencia, determinada en la normativa, con la curva de aislamiento obtenida del material, sobre el valor obtenido en 500Hz.

1.6. TetraPak

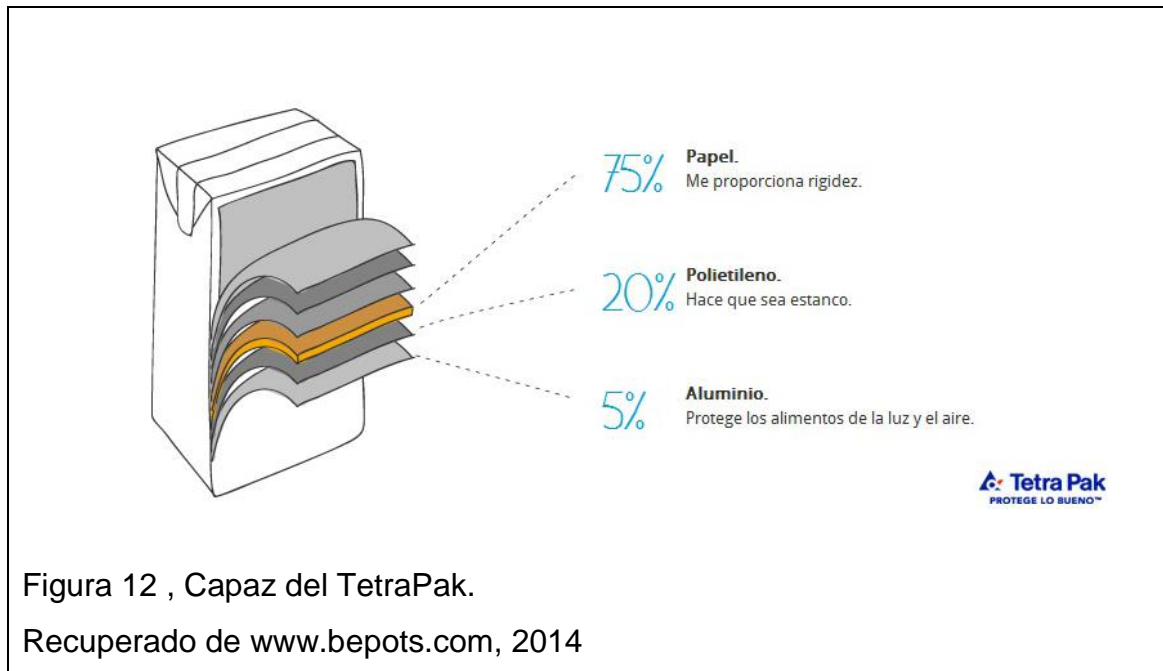
TetraPak, es uno de los envases más utilizados a nivel mundial, para el almacenamiento de productos alimenticios, con la particularidad de ser un producto compuesto por tres materiales, abriendo la posibilidad de almacenar su contenido para el consumo por el tiempo aproximado de un año.

Los envases de TetraPak poseen tres tipos, para funciones distintas, cada uno con sus subdivisiones de productos (TetraPak, s.f):

- Envases Asépticos
 - Tetra Brik
 - Tetra Prisma
 - Tetra Gemina
 - Tetra Evero
 - Tetra Classic
 - Tetra Wedge
- Envases refrigerados
 - Tetra Top
- Envases para sólidos
 - Tetra Recart

El TetraPak se compone de tres materiales en las siguientes proporciones (Bepots, 2013):

- Cartón, el 75% del material.
- Polietileno, el 20% del material.
- Aluminio, el 5% del material



El TetraPak, posee seis capas, cada una con una función en específico. Siguiendo del exterior al interior (TetraPak, s,f):

- Primera Capa: Polietileno que impermeabiliza el envase y protege los alimentos de la humedad atmosférica externa.
- Segunda Capa: Cartón que le da forma, estabilidad y rigidez al envase y en donde se realiza la impresión del diseño.
- Tercera Capa: Polietileno que permite la adhesión entre el cartón y la capa de aluminio.
- Cuarta Capa: Aluminio que actúa como barrera contra la luz y el oxígeno, es la capa más importante del envase. Gracias a este material, los alimentos permanecen completamente protegidos del medio ambiente, se garantiza la protección de sus vitaminas y nutrientes, evitando la formación de bacterias. La capa de aluminio es el elemento que marca la diferencia en los envases de TetraPak.
- Quinta Capa: Polietileno que optimiza la adhesión del aluminio.
- Sexta Capa: Polietileno que previene el contacto del producto con las otras capas del material de envase.

De esta forma ningún agente externo consigue atravesar el envase y contaminar los elementos. Además el sellado del envase se realiza por aplicación de presión y alta frecuencia, sin utilizar pegamento alguno.

1.6.1. Reciclaje del TetraPak

Actualmente del reciclaje del TetraPak, tras un proceso de separación de materiales, el polialuminio, el cartón y el envase entero poseen procesos de transformación diferentes, de los cuales se pueden obtener tres productos:

- Paneles de Polialuminio
- Paneles de TetraPak
- Cartón

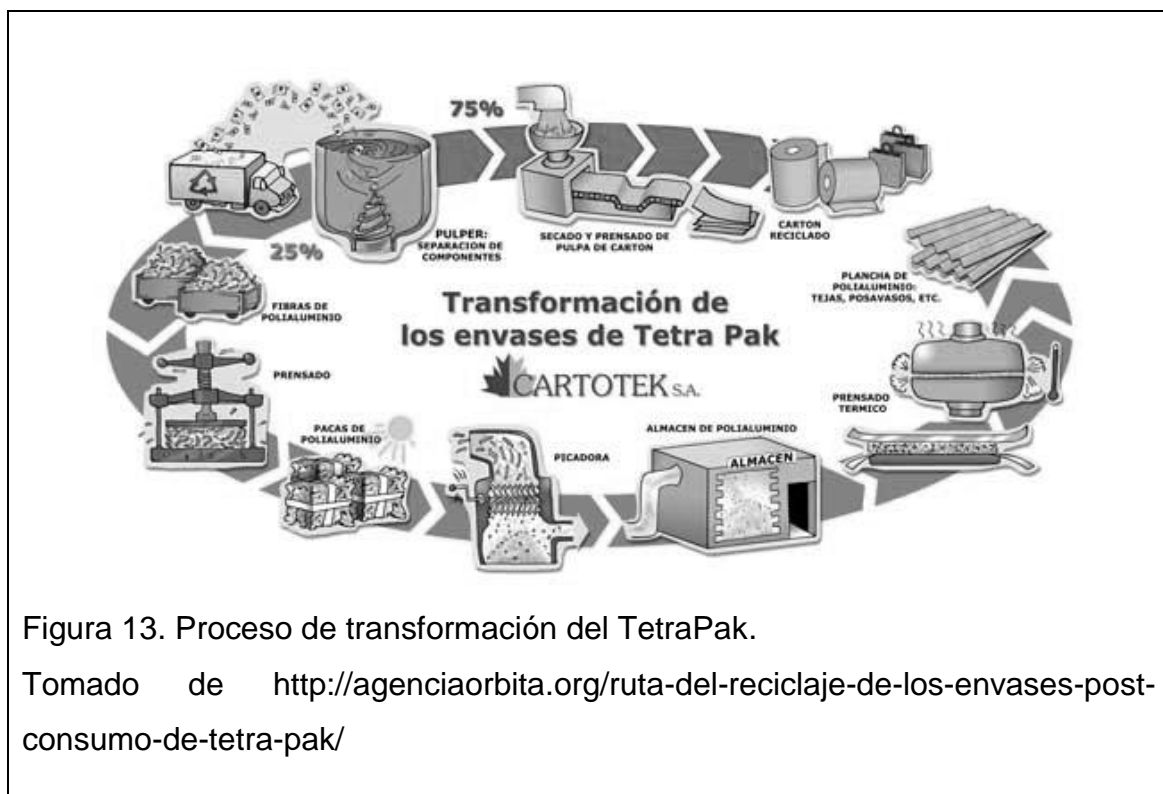


Figura 13. Proceso de transformación del TetraPak.

Tomado de <http://agenciaorbita.org/ruta-del-reciclaje-de-los-envases-post-consumo-de-tetra-pak/>

1.6.2. Reciclaje Cartón

Finalmente del TetraPak, podemos obtener el reciclado del cartón. Su proceso de reciclaje, es más corto debido a su composición, las etapas son las siguientes:

- Primera Etapa (Pulper): Una vez separado el cartón del polialuminio, procedemos a colocar el cartón en un recipiente con una hélice en el fondo donde la pulpa de cartón se obtiene, mientras al material se le agrega agua para obtener una pasta de la pulpa de cartón.
- Segunda Etapa (Secado y Prensado): Obtenida la pulpa de cartón, procedemos a secarla y prensarla en el nuevo cartón, de las dimensiones deseadas, siendo este un cartón 100% reciclado.



Figura 14. Recipiente del proceso de Pulper.

Tomado de <http://www.fedroniclub.com/sabias/sabias-que-es-el-pulper/>

1.6.3. Elaboración de los paneles de material reciclado

Tras la recolección del TetraPak, el material pasa luego al procedimiento de separación de sus componentes, entre estos el polietileno y el aluminio del cartón, los cuales son triturados para luego ser juntados en un molde de medidas 2.3m por 1.1m con espesores de 5 a 20mm. Posteriormente se somete a una compresión a temperaturas elevadas, creando así paneles del material, siendo más flexibles que los paneles de zinc y con una resistencia similar a las planchas MDF (medium density fibreboard) dependiendo del espesor de las planchas.

1.6.4. Fabricación de los paneles de Polialuminio

El reciclado del polialuminio, posee el proceso de fabricación más extenso, debido a la composición del aluminio y el polietileno, el proceso posee las siguientes etapas:

- Primera Etapa (Separación): Una vez, separado el polialuminio del cartón, el polialuminio tiene la forma de fibras, las cuales son prensadas para formar pacas de polialuminio, pero estas fibras poseen humedad.



Figura 15. Fibras de Polialuminio.

- Segunda Etapa (Secado): Debido a que las fibras de polialuminio, poseen humedad por el proceso de separación del cartón con el

polialuminio, se tiene que secar al punto en que son prácticamente quebradizas.



Figura 16. Secado de las fibras de polialuminio

- Tercera Etapa (Triturado): Una vez secas las fibras de polialuminio, procedemos a la trituración, hasta el punto de estar pulverizadas para su mejor acoplamiento entre partículas en las planchas durante la etapa de compresión. Luego se procede al empaquetamiento de las mismas en los moldes de las planchas dentro de un filamento de vinilo, muy delgado para evitar que el material se desprenda.

Este vinil es perforado para evitar que cavidades de aire, se mantengan dentro de la plancha y esta se debilite por esta razón.



Figura 17. Trituración de las fibras de polialuminio.



Figura 18. Polialuminio pulverizado.



Figura 19, Moldes de las planchas de polialuminio.

- Cuarta etapa (Compresión): Una vez colocado, el polialuminio en los moldes de las planchas, se procede a la etapa de compresión térmica, esta etapa consiste en la compresión a altas temperaturas de los moldes a más de 2000 PSI, el grosor de las planchas dependerá de la cantidad de tiempo de compresión y la cantidad de material que se añada en los moldes.



Figura 20. Compresión Térmica de las planchas.

El tiempo de compresión de las planchas variará según el espesor que se desee obtener debido, a que el polialuminio pulverizado obtiene mayor densidad mientras menos cámaras de aire interna posean. Por confidencialidad el valor de tiempo de compresión para los distintos tableros no se pudo tener de conocimiento.



Figura 21. Máquina de Compresión.

- Quinta etapa (Almacenamiento y Distribución): Finalmente, la última etapa, obtenemos el producto final, pero antes se los corta en las dimensiones finales, donde el material sobrante se vuelve a triturar y reutilizar para el procesos de elaboración de nuevas planchas.



Figura 22. Panel de Polialuminio, producto listo, previo al cortado.

1.6.5. Fabricación paneles de TetraPak

Existe otro tipo de Panel que se puede fabricar, es el panel de TetraPak, el cuál a diferencia de los paneles de polialuminio, se añade el cartón.

Su proceso de fabricación es exactamente igual al de los paneles de polialuminio, con la excepción, de que el tiempo de compresión es menor.



Figura 23. Panel de TetraPak.

2. METODOLOGÍA

Debida a la poca variedad en el mercado, y principalmente a la existencia de una sola empresa de reciclaje y fabricación de los tableros a partir de TetraPak, sólo se ha podido acceder a un número limitado de muestras. Se tomaron tres, tableros o planchas de TetraPak reciclado, en base a ser los más vendidos dentro la empresa EcuPlastic y a ser equivalentes en sus dimensiones a los tableros de aglomerado similares, estos son:

- Tablero de polialuminio de 10mm de espesor
- Tablero de polialuminio de 6 mm de espesor
- Tablero de TetraPak de 7mm de espesor.

2.1. Cálculo Transmisión:

Para el cálculo de la transmisión se midió en laboratorio las siguientes magnitudes de cada tablero:

- Ancho
- Largo
- Espesor
- Módulo de elasticidad o Módulo de Young
- Masa
- Densidad Superficial
- Densidad Volumétrica

Los valores de ancho, largo y masa se determinaran según las dimensiones de las probetas.

Dentro del distrito metropolitano se eligió el laboratorio de materiales de la Pontificia Universidad Católica, por su experiencia respecto a las mediciones de materiales nuevos, la posesión de equipos, para las mediciones de densidad y módulo de elasticidad.

2.1.1. Procedimiento de Laboratorio

Para las pruebas de Laboratorio se procedió a realizar dos mediciones:

- Medición de Elasticidad
- Medición de Densidad

En la medición de elasticidad se obtendrán los datos del módulo de elasticidad o Módulo de Young.

En la medición de Densidad se obtendrán los datos de las magnitudes o incógnitas restantes, siendo estas, ancho, largo, espesor, masa, densidad superficial y densidad volumétrica.

2.1.2. Medición de Elasticidad

Para la medición de elasticidad, primeramente se procedió a determinar la normativa a utilizar, para las dimensiones de la probeta de laboratorio. Debido a que los tableros de TetraPak, no han sido medidos antes, se utilizó una aproximación de la normativa acorde a sus características por ser un material del tipo aglomerado.

La normativa a utilizar sería la ASTM D1037-12, con el nombre de “Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials” o Métodos de prueba estándar para la evaluación de propiedades de la madera - fibra base y de paneles de partículas de material.

El laboratorio exigió según la normativa, la realización de tres mediciones por cada muestra de material, teniendo que las mediciones totales a realizarse serán 9.

La razón principal es debida, a las posibles inconsistencias que podrían encontrarse en el proceso de medición y a los datos obtenidos, entre una muestra y otra.

Como está determinado en la normativa, las dimensiones de la probeta para cada muestra de los tableros serán como muestra la Figura:

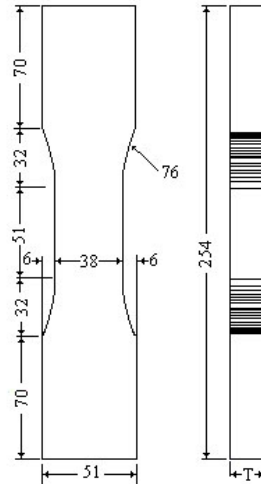


Figura 1. Dimensiones de la probeta para el ensayo de tracción paralela a la superficie (mm).

Figura 24 Dimensiones de la probeta para medición de Módulo de elasticidad

Los 76 mm son de radio de curvatura entre ente los extremos y la sección reducida.

Los datos obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 2 Elasticidad Tablero de polialuminio de 10mm

DATOS	Tablero de polialuminio 10mm		
Ensayo	1	2	3
Ancho(mm)	100,37	100,44	100,26
Largo(mm)	100,62	100,41	100,43
Espesor(mm)	10,61	11,11	11,52
Módulo de elasticidad (N/m ²)	3,64E+08	3,70,E+08	3,85,E+08

Tabla 3 Elasticidad Tablero de polialuminio de 6mm

DATOS	Tablero de polialuminio 6mm		
Ensayo	1	2	3
Ancho(mm)	100,71	100,59	100,1
Largo(mm)	100,15	100,16	100,67
Espesor(mm)	5,08	5,32	5,8
Módulo de elasticidad (N/m ²)	4,92,E+08	4,65,E+08	4,65,E+08

Tabla 4 Elasticidad Tablero de TetraPak de 7 mm

DATOS	Tablero de TetraPak 7mm		
Ensayo	1	2	3
Ancho(mm)	100,54	100,59	100,52
Largo(mm)	100,13	100,53	100,22
Espesor(mm)	6,87	6,74	6,72
Módulo de elasticidad (N/m ²)	7,84,E+08	8,26,E+08	8,27,E+08

2.1.3. Medición de Densidad

Como los tableros no han sido medidos con anterioridad por la empresa, no poseen datos acerca de sus valores de densidad, por lo que, como en la medición de elasticidad, se estimará según una normativa de un material similar el proceso de obtención de datos, según el laboratorio.

Para la medición de densidad, se utilizará la normativa ecuatoriana INEN 896:2013 bajo el nombre de "Tableros de madera aglomerada, contrachapada y de fibras de madera (MDF). Determinación del contenido de humedad".

La normativa dispone que las probetas sean de 100 cm² y se realicen al menos 3 mediciones por material por la posible incertidumbre, siendo en total 18

mediciones, 9 para la comprobación de la densidad superficial y 9 para la comprobación de la densidad volumétrica.

Los datos obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 5 Densidad Tablero de polialuminio de 10mm

DATOS	Tablero de polialuminio 10mm		
Ensayo	1	2	3
Densidad Superficial (Kg/m ²)	576,53	560,4	547,33
Densidad Volumétrica (Kg/m ³)	1081,7	1004,8	947,4

Tabla 6 Densidad Tablero de polialuminio de 6mm

DATOS	Tablero de polialuminio 6mm		
Ensayo	1	2	3
Densidad Superficial (Kg/m ²)	302,41	277,17	294,17
Densidad Volumétrica (Kg/m ³)	1185,5	1037,6	1011,4

Tabla 7 Densidad Tablero de TetraPak de 7 mm

DATOS	Tablero de TetraPak 7mm		
Ensayo	1	2	3
Densidad Superficial (Kg/m ²)	320,84	286,1	294,06
Densidad Volumétrica (Kg/m ³)	930,6	844,6	872

2.1.4. Cálculo del promedio

Puesto que poseemos tres ensayos para cada parámetro, en cada uno de los tableros.

Para la poseer un solo valor aplicamos el método de la media aritmética según la fórmula:

$$x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n}$$

(Ecuación 32)

Donde:

n Cantidad de datos de entrada

a_i i -ésimo valor del espacio muestral

Adicional calcularemos la desviación estándar. Debido a la diferencia de datos entre ensayos y así se determina cuánto varían los datos entre sí. Según la fórmula:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x)^2}$$

(Ecuación 33)

Donde:

n Cantidad de datos de entrada

x Media aritmética

x_i i -ésimo valor del espacio muestral

2.1.5. Cálculo factor R .

Para este caso, utilizaremos las fórmulas y la teoría de la ley de masas, encontrando primeramente la frecuencia crítica del material. Posteriormente en la sección de análisis de resultados mostraremos los datos obtenidos con las planchas de polialuminio y TetraPak.

Con estos datos procederemos a obtener el valor R , según la zona de la ley de masas que se encuentre.

2.1.6. Consideraciones

- El cálculo se realizará tomando en cuenta que la incidencia sobre el material es de manera aleatoria, suponiendo así un campo difuso.
- Los resultados se presentarán en intervalos de bandas de octava, de 125 Hz a 4KHz.
- Se tomará en cuenta, debido a su facilidad de cálculo y obtención de datos de entrada el uso de la ley de masas, sobre una partición simple, de comportamiento elástico, homogéneo e infinito.

2.2. Procedimiento cálculo de transmisión

- Obtener los datos de entrada, de:
 - Densidad superficial
 - Densidad Volumétrica
 - Módulo de Young
 - Espesor
- Cálculo de la frecuencia crítica del material.
- Cálculo masa superficial
- Cálculo factor R , según las zonas de la ley de masas.
- Obtención de la curva de aislamiento versus frecuencia.
- Cálculo del factor de transmisión
- **Datos de entrada**

Tabla 8. Datos de entrada de la plancha de MDF

Datos tomados de (Soler, 2011), p. 32.

Datos	Plancha de MDF
Densidad Superficial (kg/m^2)	9,9
Densidad Volumétrica (kg/m^3)	660
Espesor (m)	3×10^{-3}
Módulo de Young (N/m^2)	$2,45 \times 10^9$

- **Frecuencia Crítica**

La frecuencia crítica, nos muestra la frecuencia de coincidencia del material. La frecuencia crítica se determina según la siguiente ecuación:

$$f_c = \frac{c^2}{1,8t} \sqrt{\frac{\rho}{E}}$$

Donde:

t Espesor (m)

ρ Densidad Volumétrica (kg/m³)

E Módulo de Young (N/m²)

Esta frecuencia muestra la delimitación entra la zona 1 y la zona 2 de la ley de las masas como podemos observar en la figura 9.

- **Masa superficial**

Para el cálculo de la masa superficial, necesitamos dos datos:

- Densidad volumétrica
- Espesor

La masa superficial nos servirá posteriormente para el cálculo de R según la ley de masas, se determina según la siguiente ecuación:

$$m = \rho t$$

(Ecuación 34)

Donde:

t Espesor (m)

ρ Densidad Volumétrica (kg/m³)

- **Cálculo de R , según las zonas de la ley de masas**

El cálculo de R , según la ley de masas dependerá de los valores obtenidos de:

- La frecuencia crítica
- La frecuencia de densidad

Obtenido esos datos, podremos determinar las zonas de la ley de las masas y que fórmula utilizar.

En la zona I y la Zona III utilizaremos la ecuación de la ley de masas, para radiación aleatoria:

$$R = 20 \log(mf) - 47 \text{dB}$$

En la zona II procederemos a utilizar la ecuación de la ley de masas corregida, para incidencia aleatoria:

$$R = 20 \log \left(\frac{fm}{2\rho_0 c_0} \right) - 10 \log \left(\frac{\pi}{4\eta} \right) + 10 \log \left(\frac{f}{f_c} \right) + 10 \log \left(1 - \frac{f_c}{f} \right) - 5$$

Para poder proceder con el cálculo de R , necesitamos medir previamente la frecuencia de densidad, determinada por la ecuación:

$$f_d = \frac{K}{2\pi\rho} \sqrt{\frac{m}{B}}$$

Donde para el cálculo el módulo de compresión K es igual al módulo de elasticidad.

La tabla de los valores de reducción en intervalos de bandas de octava, se aprecian de la siguiente manera:

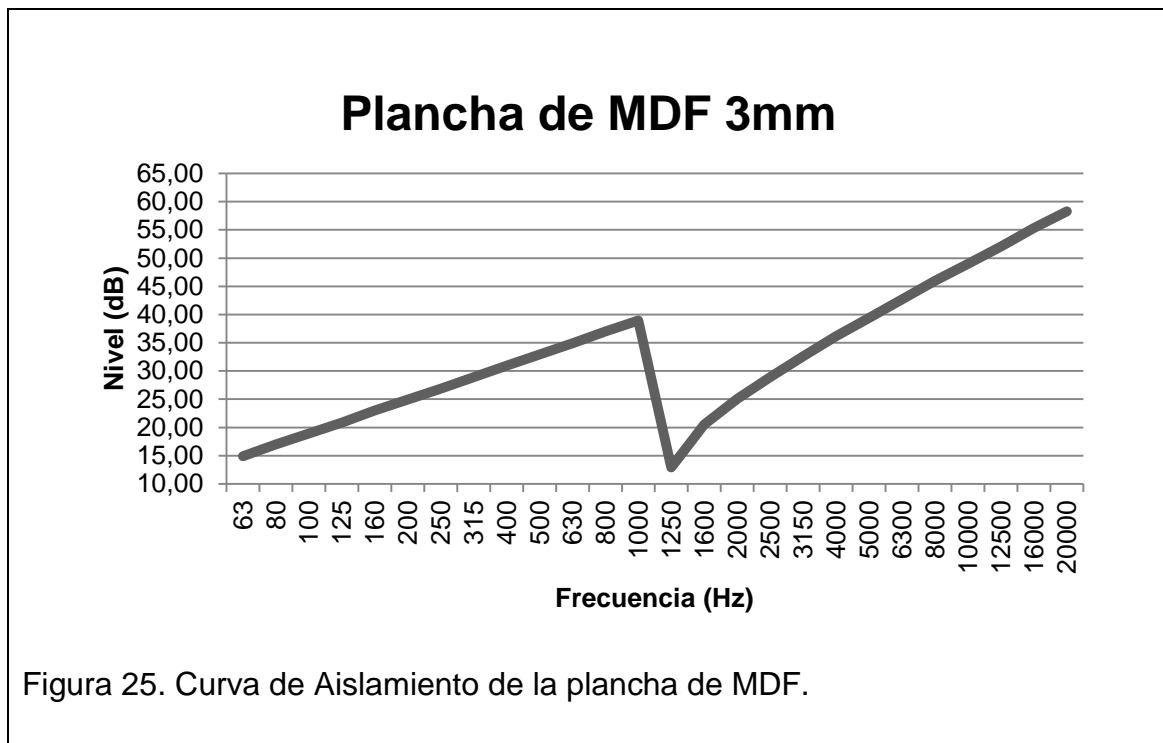
Tabla 9. Datos factor de reducción plancha de MDF.

Datos	Plancha de MDF					
Banda (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
R (dB)	20,87	26,89	32,91	38,93	25,03	36,17

- Curva de Aislamiento versus frecuencia

Para la obtención de esta curva, utilizaremos como datos de entrada los valores de R, en intervalos de tercio de octava, debido a la exigencia de una precisión mayor para la observación de la caída de aislamiento en la frecuencia crítica y posibles frecuencias de resonancias que puedan aparecer.

Obtenemos la tabla de valores, ejemplo:



- Cálculo del factor de transmisión

Finalmente calcularemos el factor de transmisión, despejando de la fórmula del índice de reducción sonora:

$$R = 10 \log(\tau)$$

Obteniendo:

$$\tau = 10^{\frac{R}{10}}$$

(Ecuación 35)

Obteniendo la siguiente tabla:

Tabla 10. Datos del factor de transmisión de la plancha de MDF.

Datos	Plancha de MDF						
	Banda (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
τ		0,03273	0,00818	0,00205	0,00051	0,00013	0,00003

2.3. Medición Absorción

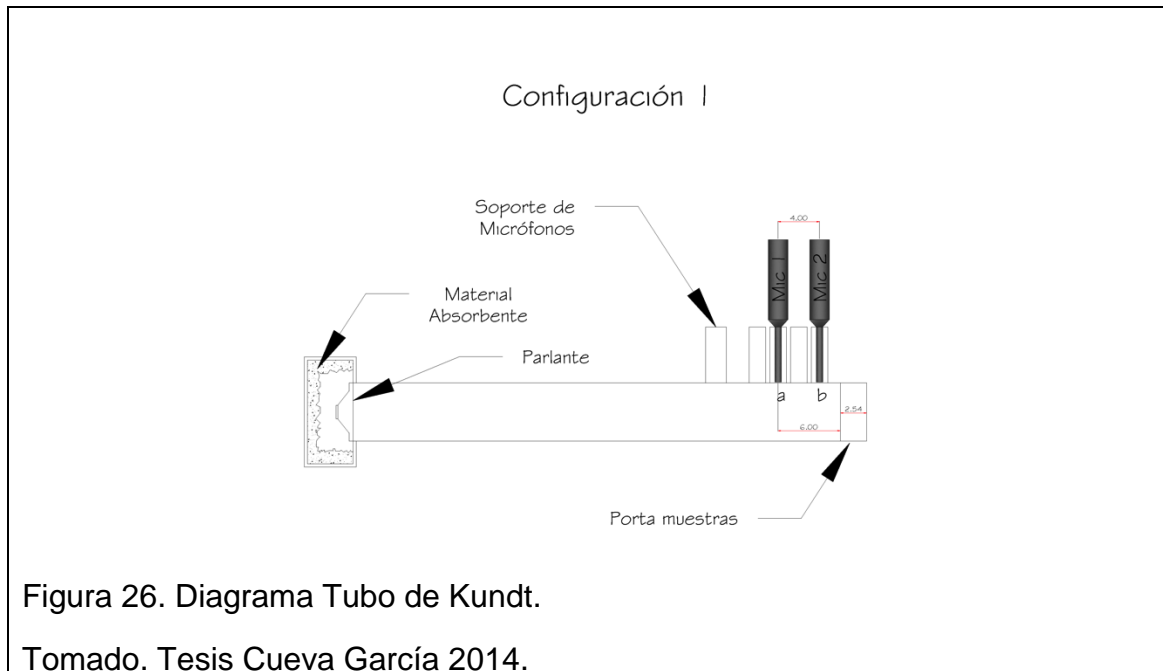
Al no poseer una cámara reverberante se optó por la medición de los coeficientes de absorción con el tubo de Kundt.

En la presente sección, se mostrará brevemente el procedimiento utilizado para la medición del coeficiente de absorción, mediante el uso del tubo de Kundt desarrollado en el proyecto de titulación (Cueva, D. García C. 2014) con el método de dos micrófonos. La presente tesis fue desarrollada en base a la normativa técnica UNE-ISO 10534-2.

Las dimensiones del tubo son, 5 cm de diámetro interno, y el largo del tubo de 47 cm. La cadena electroacústica del tubo posee, un altavoz y un amplificador:

- El altavoz utilizado es el VIFA, modelo NE-65W-04
- El amplificador de señal, utilizado es el TDA7492.

Para más información de datos técnicos de cada dispositivo revisar en (Cueva, D. García C, 2014, pp. 33)



2.3.1. Calibración

La calibración del altavoz, se la realizó mediante el uso del analizador SMAART 7 de función de transferencia. Se eligió el software SMAART 7, por poseer la función de la transformada rápida de Fourier (FFT), que cumple con él mínimo de rango dinámico de 65dB, desde el nivel de ruido de fondo determinado en la sección de instrumentación del procesado de la normativa UNE-ISO 10534-2 y su fácil uso. Dicha herramienta analiza la señal captada en este caso de los micrófonos y una señal de referencia, siendo esta la copia de la señal enviada hacia el altavoz y una señal de referencia, SMAART 7 necesita un kit o equipamiento para su funcionalidad, estos equipos se detallaran en la sección posterior.

2.3.1.1 Equipamiento Calibración

- Interface de Audio

La interface utilizada fue la Roland Duo Capture, se eligió esta interface por las siguientes características:

- Interface de dos canales con preamplificador independiente para cada entrada.
- Posee Phantom power o Fuente Fantasma de +48V.
- Control de nivel de salida.
- Es reconocible por el software SMAART7.



Figura 27. Interface de audio Roland Duo Capture.

Recuperado de: www.mydukkan.com, 2015

- Micrófonos

El diseño del tubo fue realizado en base a las dimensiones físicas de los micrófonos Beyerdynamic MM1. Se utilizaron dos de estos, para la medición, del método de función de transferencia a dos micrófonos. Sus características son:

- Rango de 50 Hz a 16KHz con una variación de 1.5 dB
- Espectro uniforme en incidencia de 90 grados.
- Micrófono de condensador tipo electret, sensibilidad alta.

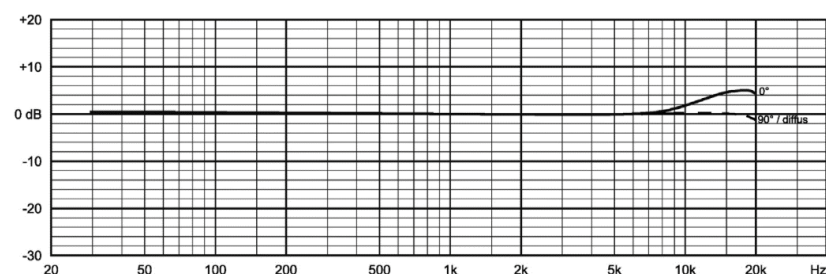


Figura 28. Respuesta de frecuencia del micrófono MM1

Recuperado de: north-america.beyerdynamic.com, 2015



Figura 29. Micrófono Beyerdynamic MM1.

Tomado de: <http://north-america.beyerdynamic.com/shop/mm-1.html>

- **Ecualizador**

Se utilizó un ecualizador gráfico de 31 bandas en 1/3 de octavas, Klark Teknik DN370, para la corrección de la curva del altavoz. Sus características son:

- Rango de 12 dB
- Distorsión armónica muy baja, THD<0,0003% @ 1KHz
- Factor de calidad en cada banda alto. Q = 32

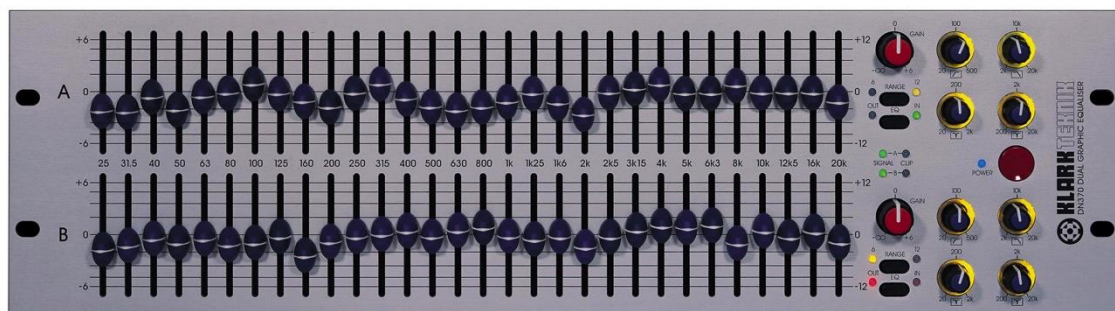


Figura 30. Ecualizador Gráfico Klark Teknik.

Recuperado de: medias.audiofanzine.com, 2015

- Procedimiento de Calibración

El objetivo de la etapa de calibración según la normativa UNE-ISO 10534-2, fija el obtener una respuesta de frecuencia del altavoz en el tubo lo más plana posible, para que los datos de la curva de los coeficientes no posea inconsistencias.

El Generador AudioTools fue utilizado para generar ruido rosa gracias a su compatibilidad con SMAART 7. A pesar de que nuestro rango frecuencial del tubo es menor al rango de 20Hz a 20KHz, pero por debajo y por sobre este rango existe información frecuencial que aporta energéticamente al rango de medición, porque son múltiplos de las mismas.

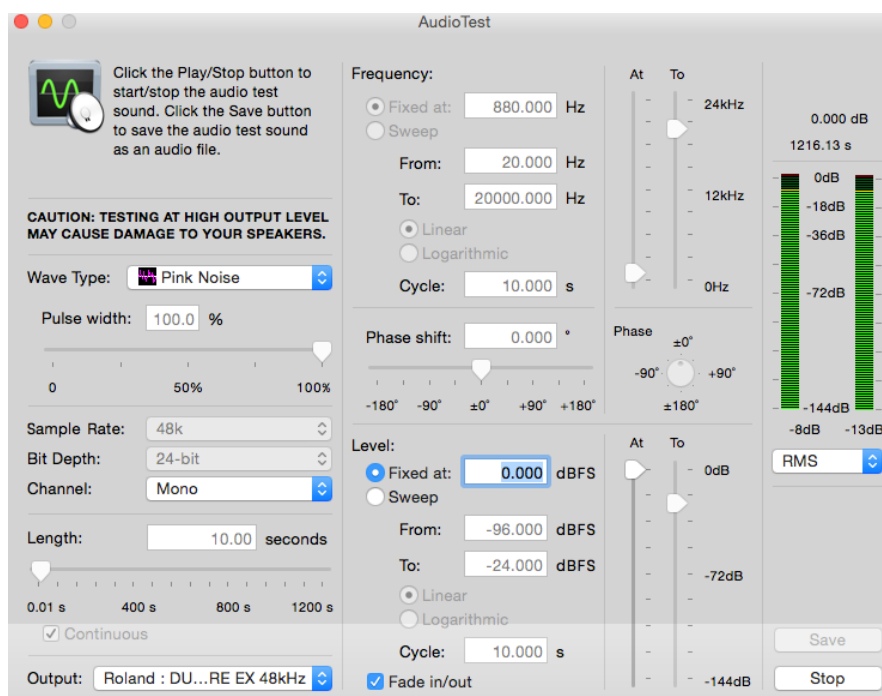


Figura 31. Generador de Ruido Rosa, AudioTest

Y con el uso de la función de transferencia dentro del software, procedió a realizar las correcciones necesarias, con el uso del ecualizador DN370, el cual, gracias a su precisión y su rango de 12 dB, se logró obtener una curva, lo más uniforme posible. Según la sección, de selección de amplitud de señales de la normativa UNE-ISO 10534-2, dictamina que toda frecuencia que sea menor en

60 dB al máximo, no se lo tomará en cuenta para la corrección. Al ser nuestro rango de interés es de 125 Hz a 4KHz, nuestro mínimo logra ser reproducido por el altavoz y el máximo se determinó en 4Khz.

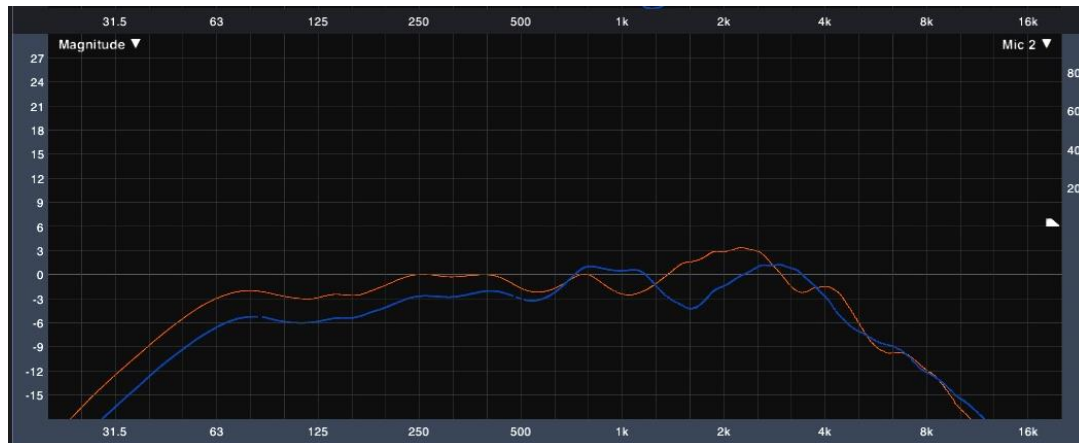


Figura 32. Respuesta de frecuencia del altavoz.

La respuesta de frecuencia del altavoz en base a la referencia de los micrófonos son los BeyerDynamic MM1. Como existen dos micrófonos similares, pero en posiciones distintas, se la calibró en base a la respuesta de cada micrófono y se obtuvo a una curva promedio, para que los micrófonos reciban una respuesta uniforme por parte del altavoz.

Al observar la gráfica se puede apreciar la diferencia de respuesta entre micrófonos debido a su distancia respecto al altavoz.

2.3.2. Grabación y Medición

Los siguientes procedimientos están determinados en base a la normativa UNE-10534-2. Como primer paso, procedemos a la grabación de las señales de audio captadas por los micrófonos MM1, mediante el uso del software TuboSoft. Existen 4 secciones dentro del software para poder conseguir los audios, que contienen la información requerida.

Primeramente tenemos que cargar el archivo con la extensión *Rosa.wav*, archivo de audio de una señal de ruido rosa con una duración de 10 segundos. Como segundo paso, es elevar la amplitud de la señal de entrada. Previamente, los desarrolladores han determinado un valor de 120 cumpliendo el mínimo de amplitud de la señal de entrada de 10 dB sobre el ruido de fondo, la programación para la sección del análisis de datos es con dicho rango dinámico. Finalmente podemos inicializar el programa con el pulsador de nombre *obtener datos* una vez que hemos monitoreado las señales de entrada, consecuentemente en su sección. El resultado serán 4 señales, 2 de corrección y dos de medición.

Como los audios son estéreos, la información de cada micrófono se encuentra un canal independiente.

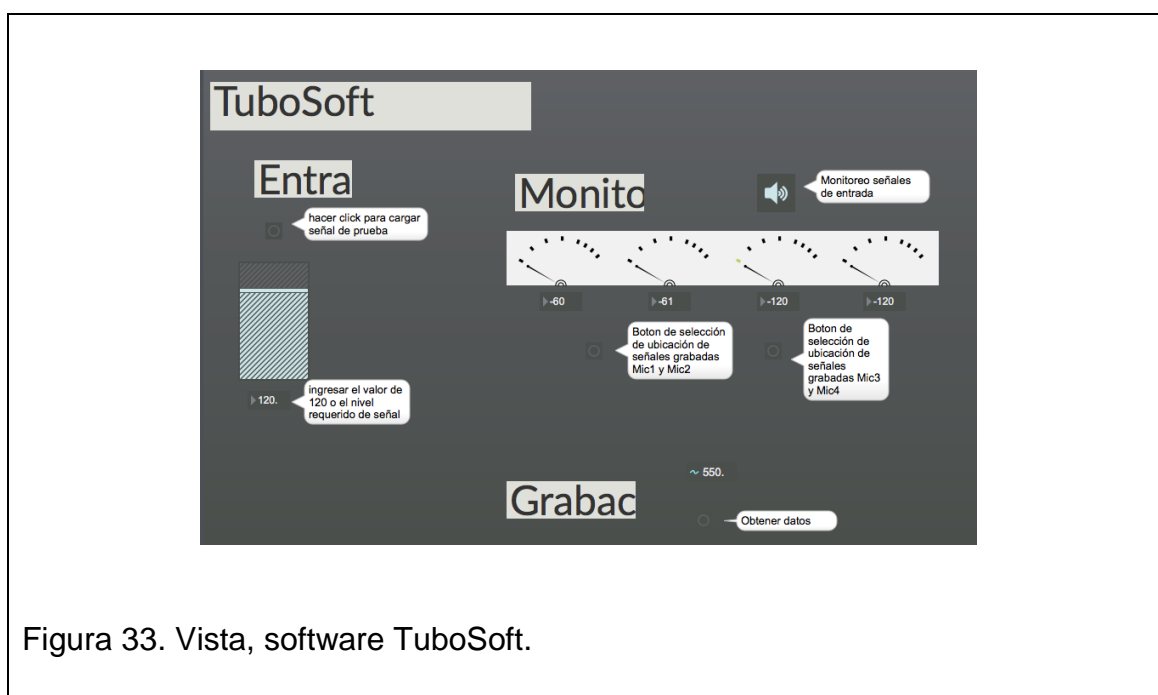


Figura 33. Vista, software TuboSoft.

Como se especifica en la sección de corrección por desajuste de micrófonos de la normativa UNE-10534-2, se debe realizar dos mediciones cada una con la posición distinta de los micrófonos una de la otra para evitar errores por desajustes.

- c12: Señal de corrección, posición de micrófonos 1 2.
- c21: Señal de corrección, posición de micrófonos 2 1.

Y 2 señales con el material a medir en el porta muestras e intercambiando la posición de los micrófonos, estas señales serán etiquetadas como:

- m12: Señal con material, posición de micrófonos 1 2.
- m21: Señal con material, posición de micrófonos 2 1.



Figura 34. Posición de micrófonos 1 2.



Figura 35. Posición de micrófonos 2 1.

2.3.3. Obtención de datos

Finalmente para la obtención de la curva de absorción para los paneles, procedemos a la utilización del programa desarrollado en la plataforma MATLAB, bajo el nombre “Método de función de transferencia: 2 micrófonos”.

Dentro del programa existen tres etapas, la primera consiste en la selección de posiciones, dependiendo del método utilizado, durante la grabación de los audios, dependerá de la posición que seleccionemos. La posición de los micrófonos m12 y m21, corresponde a la Posición 1 dentro de la selección.

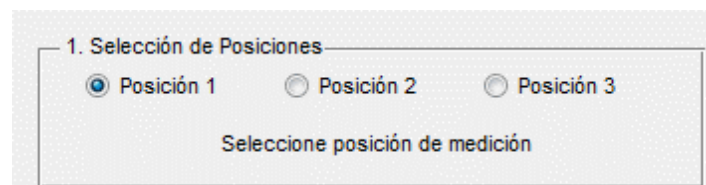


Figura 36. Sección, selección de posiciones.

La segunda sección es la carga de los archivos grabados en el software TuboSoft.

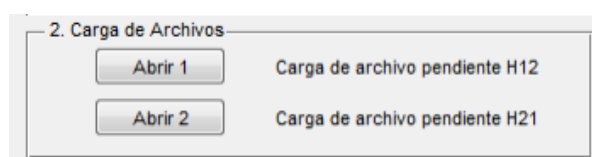


Figura 37. Sección, carga de archivos.

Finalmente la última sección, es la carga del tipo de algoritmo de cálculo y el cálculo para obtener finalmente la curva de absorción según el tipo de algoritmo elegido. Los algoritmos existentes son:

- Correlación
- Conjugada
- FFT.

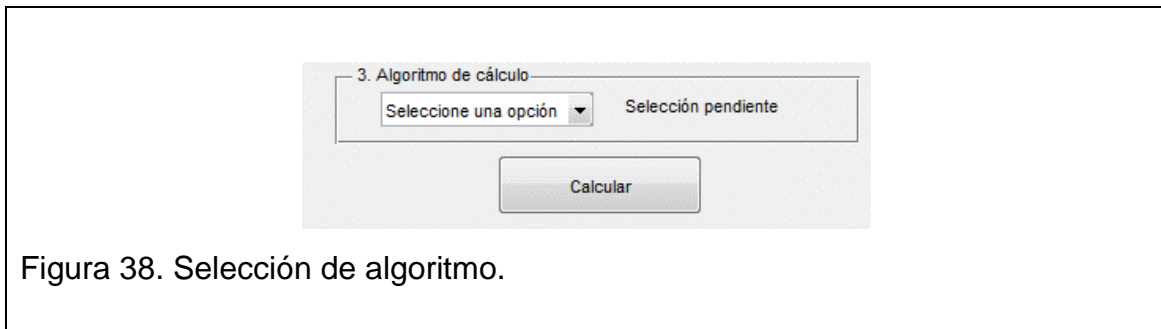


Figura 38. Selección de algoritmo.

Finalmente podremos visualizar, la curva de absorción.

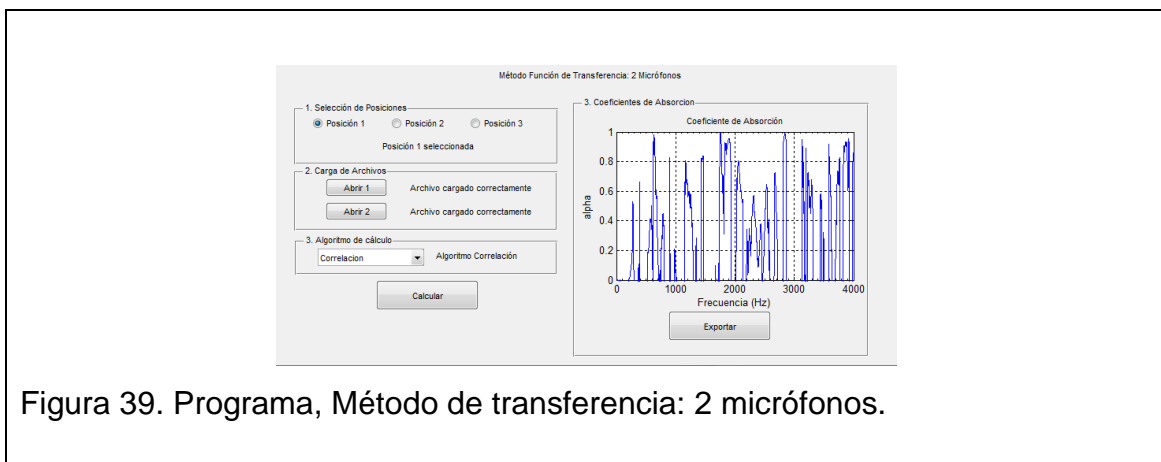


Figura 39. Programa, Método de transferencia: 2 micrófonos.

2.3.4. Promedio coeficientes en bandas de octava

Como los valores de los coeficientes se encuentran de manera discreta para cada frecuencia, es necesario realizar un promedio de estos, para poseer la curva de absorción del material en bandas de octava desde 125Hz a 4KHz.

2.3.4.1 Desarrollo del programa en MATLAB

El desarrollo de esta etapa de programación, se la realizó posteriormente al código implementado en el trabajo de titulación (Cueva, D. García C, 2014, pp.7).

- **Delimitación de los límites para cada banda**

Primeramente tenemos que delimitar los límites de las bandas, para así asumir a para el promedio solo la información correspondiente.

Los límites se los calculó con las siguientes fórmulas:

Para el límite inferior:

$$f_{inf} = \frac{f}{\sqrt{2}}$$

(Ecuación 36)

Para el límite superior:

$$f_{sup} = \sqrt{2}f$$

(Ecuación 37)

`%Delimitación de los límites inferior y superior`

```
li125=125/sqrt(2);
ls125=125*sqrt(2);
li250=250/sqrt(2);
ls250=250*sqrt(2);
li500=500/sqrt(2);
ls500=500*sqrt(2);
li1k=1000/sqrt(2);
ls1k=1000*sqrt(2);
li2k=2000/sqrt(2);
ls2k=2000*sqrt(2);
li4k=4000/sqrt(2);
ls4k=4000*sqrt(2);
```

Luego creamos 12 variables que representaran los contadores, tanto para la parte positiva y negativa, de señal analizada, inicializándoles en cero.

`%contadores para valores positivos`

```
cont1=0;
cont2=0;
cont3=0;
cont4=0;
cont5=0;
cont6=0;
```

```

%contadores para valores negativos
cont1n=0;
cont2n=0;
cont3n=0;
cont4n=0;
cont5n=0;
cont6n=0;

```

Como la función de transferencia no determina un límite, delimitamos los límites para los valores de los vectores que sobrepasen el máximo de 1 y el mínimo de 0, colocando su respectivo valor.

```

%Determinación de límites de los coeficientes
for a=1:size(f,2)
    if alpha(a) >= 1;
        alpha(a) = 1;
    end
    if alpha(a) <= 0;
        alpha(a) = 0;
    end
end
end

```

Posteriormente desarrollamos un contador para cada banda en el dominio de la frecuencia, mediante el uso de los contadores previamente creados. El código consiste en un barrido de los valores de absorción por cada frecuencia, entre el límite inferior al límite superior de cada banda, almacenándolos en una variable que detallaremos como por ejemplo `sum125` para los valores positivos de la banda de 125Hz y para los valores negativos de la banda de 125Hz. Al final existirán 6 variables correspondientes a cada banda.

```

%Discretización de valores
for a=1:size(f,2)
    if (abs(f(a))>1i125 && abs(f(a))<1s125) %125Hz
        if f(a)<0
            cont1n=cont1n+1;
            nsum125(cont1n)=alpha(a);
        end
        if f(a)>0
            cont1=cont1+1;

```

```

        sum125(cont1)=alpha(a);
    end
end

if(abs(f(a))>1i250 && abs(f(a))<1s250)           %250Hz
    if f(a)<0
        cont2n=cont2n+1;
        nsum250(cont2n)=alpha(a);
    end
    if f(a)>0
        cont2=cont2+1;
        sum250(cont2)=alpha(a);
    end
end

if(abs(f(a))>1i500 && abs(f(a))<1s500)           %500Hz
    if f(a)<0
        cont3n=cont3n+1;
        nsum500(cont3n)=alpha(a);
    end
    if f(a)>0
        cont3=cont3+1;
        sum500(cont3)=alpha(a);
    end
end

if(abs(f(a))>1i1k && abs(f(a))<1s1k)             %1000Hz
    if f(a)<0
        cont4n=cont4n+1;
        nsum1k(cont4n)=alpha(a);
    end
    if f(a)>0
        cont4=cont4+1;
        sum1k(cont4)=alpha(a);
    end
end

if(abs(f(a))>1i2k && abs(f(a))<1s2k)           %2000Hz
    if f(a)<0

```

```

        cont5n=cont5n+1;
        nsum2k(cont5n)=alpha(a);
    end
    if f(a)>0
        cont5=cont5+1;
        sum2k(cont5)=alpha(a);
    end
end

if(abs(f(a))>1i4k && abs(f(a))<1s4k)           %4000Hz
    if f(a)<0
        cont6n=cont6n+1;
        nsum4k(cont6n)=alpha(a);
    end
    if f(a)>0
        cont6=cont6+1;
        sum4k(cont6)=alpha(a);
    end
end

end

```

Finalmente, una vez almacenados los datos de los coeficientes de cada banda, procedemos a realizar obtener la media y la desviación estándar por la variación existente de los datos. Obtenido estos valores, los sumamos y obtenemos un único valor que representa el coeficiente de absorción de cada banda.

```

%Valores de las bandas de octava obtenidos del promedio + desviación
estándar
Valor125 = mean(sum125)+ std(sum125)
Valor250 = mean(sum250)+ std(sum250)
Valor500 = mean(sum500)+ std(sum500)
Valor1k = mean(sum1k)+ std(sum1k)
Valor2k = mean(sum2k)+ std(sum2k)
Valor4k = mean(sum4k)+ std(sum4k)

```

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

3.1. Transmisión

En la presente sección, se mostrará los datos obtenidos según el siguiente procedimiento, detallado en la sección de metodología, subsección Transmisión:

- Datos de entrada, de:
 - Densidad superficial
 - Densidad Volumétrica
 - Módulo de Young
 - Espesor
- Frecuencia crítica del material.
- Masa superficial
- Tabla de aislamiento versus frecuencia
- Curva de aislamiento versus frecuencia.
- Índice de Reducción Global.

Tabla 11. Codificación De los tableros.

Tablero	Código
Tablero de polialuminio de 10 mm de espesor	P10
Tablero de polialuminio de 6 mm de espesor	P6
Tablero de TetraPak de 7 mm de espesor	T7

Los datos obtenidos serán de los paneles propuestos para el su estudio, siendo estos los tableros de polialuminio de 6 y 10 mm de espesor y el tablero TetraPak de 7 mm de espesor.

3.1.1. Tablero P10

- Datos de Entrada

Tabla 12. Datos de entrada P10.

Datos	Tablero de Polialuminio de 10 mm
Densidad Superficial (kg/m ²)	12,44
Densidad Volumétrica (kg/m ³)	1078,69
Espesor (m)	1,2x10 ⁻²
Módulo de Young (N/m ²)	3,84x10 ⁸

- Frecuencia crítica del Material

Tabla 13. Frecuencia crítica t10.

Datos	Tablero de Polialuminio de 10 mm
Frecuencia crítica(Hz)	9330,48

- Masa Superficial

Tabla 14. Masa superficial P10.

Datos	Tablero de Polialuminio de 10 mm
Masa superficial (kg/m ²)	12,44

- Frecuencia de densidad

Tabla 15. Dato. Frecuencia de densidad P10.

Datos	Tablero de Polialuminio de 10 mm
Frecuencia de densidad (Hz)	41653,6

- Tabla factores de reducción sonora

Tabla 16. Índice de reducción P10.

Datos	Tablero de Polialuminio de 10 mm					
Banda (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
R (dB)	16,84	22,86	28,88	34,90	40,92	46,94

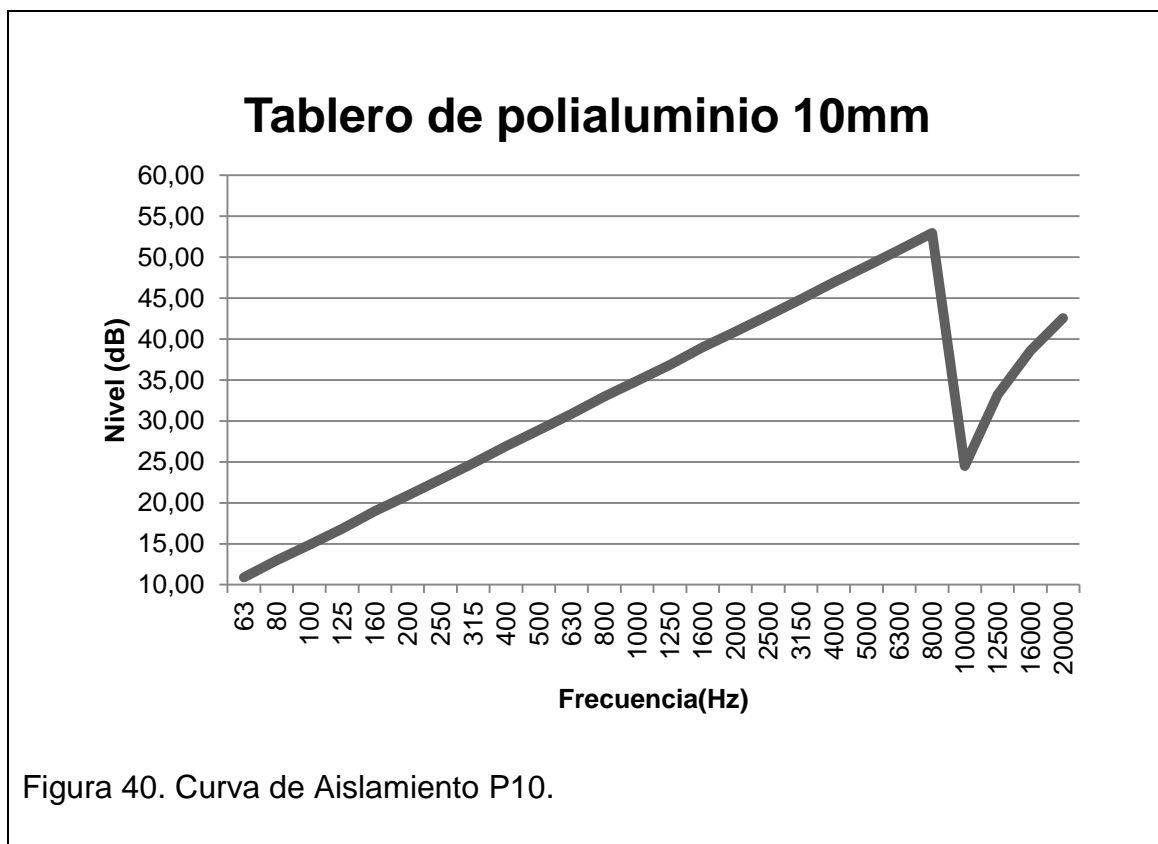
- **Tabla factores de reducción sonora (1/3 de octava)**

El valor de R total será de 48.19 dB.

Tabla 17. Valores de Reducción versus frecuencia P10.

Frecuencia (Hz)	R (dB) Tablero de polialuminio 10mm
63	10,89
80	12,96
100	14,90
125	16,84
160	18,98
200	20,92
250	22,86
315	24,87
400	26,94
500	28,88
630	30,89
800	32,96
1000	34,90
1250	36,84
1600	38,98
2000	40,92
2500	42,86
3150	44,87
4000	46,94
5000	48,88
6300	50,89
8000	52,96
10000	24,51
12500	33,20
16000	38,57
20000	42,55

- Curva de aislamiento, del tablero de Polialuminio de 10mm.



En la presente gráfica, la tendencia hasta 8 KHz, muestra un comportamiento lineal siguiendo la ley de masas, mostrando el aislamiento proporcional a la frecuencia. Pero en la zona de los 10000 Hz existe una caída aproximadamente de 25dB, ocasionado por la frecuencia crítica o de coincidencia, debido a la suma con las ondas de flexión características del material. Pasada esta caída, observamos que el aislamiento vuelve a aumentar, pero ahora siguiendo la ley de masas corregida.

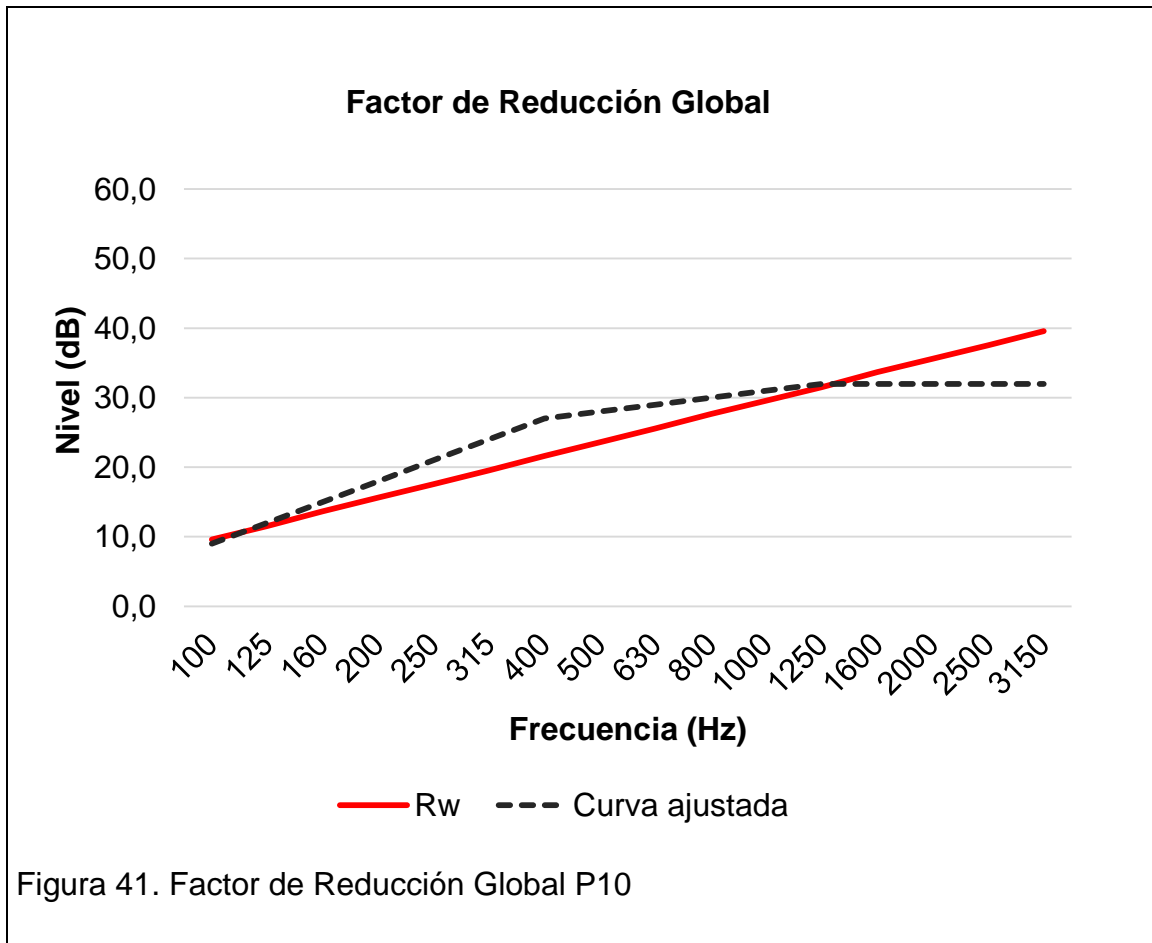
- Índice de Reducción Global

Tabla 18 Índice Global P10

Frecuencia (Hz)	Rw (dB)	Curva de referencia, desplazada -20 dB (dB)
100	14.9	12
125	16.8	15
160	19.0	18
200	20.9	21
250	22.9	24
315	24.9	27
400	26.9	30
500	28.9	31
630	30.9	32
800	33.0	33
1000	34.9	34
1250	36.8	35
1600	39.0	35
2000	40.9	35
2500	42.9	35
3150	44.9	35

La suma de las desviaciones desfavorables, con un ajuste de -20dB será de 26.14 dB. Cumpliendo el no sobrepasar los 32dB. El índice de reducción global será:

$$R_T = 33 \text{ dB}$$



3.1.2. Tablero P6

- Datos de Entrada

Tabla 19. Datos de entrada P6.

Datos	Tablero de Polialuminio de 6 mm
Densidad Superficial (kg/m ²)	6,76
Densidad Volumétrica (kg/m ³)	1172,04
Espesor (m)	$0,58 \times 10^{-2}$
Módulo de Young (N/m ²)	$4,9 \times 10^8$

- **Frecuencia crítica del material**

Tabla 20. Frecuencia crítica P6.

Datos	Tablero de Polialuminio de 6 mm
Frecuencia crítica(Hz)	17228,66

- **Masa Superficial**

Tabla 21. Masa superficial P6.

Datos	Tablero de Polialuminio de 6 mm
Masa superficial (kg/m ²)	6,76

- **Frecuencia de densidad**

Tabla 22. Frecuencia de densidad P6.

Datos	Tablero de Polialuminio de 6 mm
Frecuencia de densidad (Hz)	49689,06

- **Tabla factores de reducción sonora**

Tabla 23. Factor de reducción P6.

Datos	Tablero de Polialuminio de 6 mm					
Banda (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
R (dB)	11,54	17,56	23,58	29,6	35,62	41,64

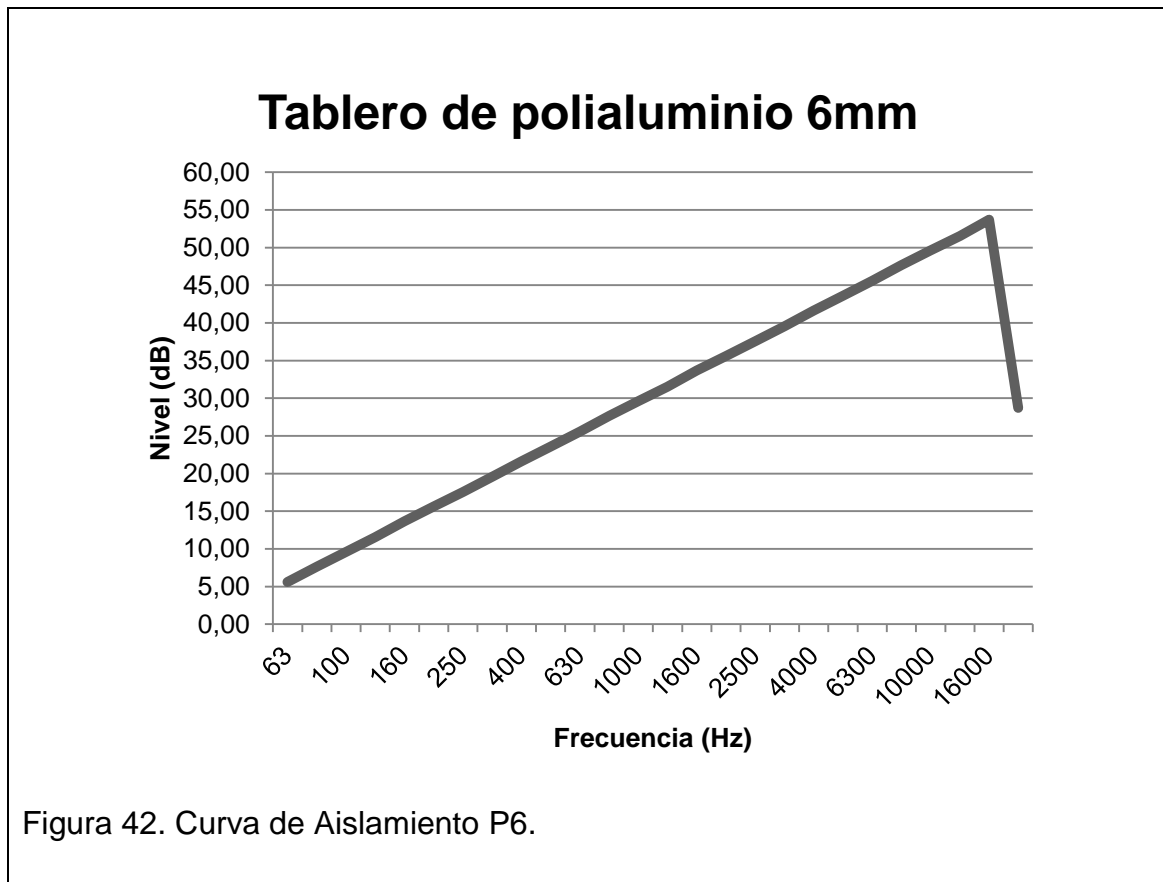
- **Tabla factores de reducción sonora (1/3 de octava)**

El valor de R total será de 42.89 dB.

Tabla 24. Valores de Reducción versus frecuencia P6.

Frecuencia (Hz)	R (dB) Tablero de polialuminio 6mm
63	5,58
80	7,66
100	9,60
125	11,54
160	13,68
200	15,62
250	17,56
315	19,56
400	21,64
500	23,58
630	25,58
800	27,66
1000	29,60
1250	31,54
1600	33,68
2000	35,62
2500	37,56
3150	39,56
4000	41,64
5000	43,58
6300	45,58
8000	47,66
10000	49,60
12500	51,54
16000	53,68
20000	28,73

- Curva de aislamiento, tablero de Polialuminio de 6mm



En la presente gráfica, el comportamiento hasta alrededor de los 16000 Hz, se muestra un comportamiento lineal siguiendo la ley de masas, mostrando el aislamiento muestra una proporción versus la frecuencia. Pero en la zona de los 17000 Hz existe una caída aproximadamente de 20dB, ocasionado por la frecuencia crítica o de coincidencia, debido a la suma con las ondas de flexión características del material. Esta frecuencia va a variar según el espesor del material, mientras menos sea el espesor, mayor va a ser la frecuencia crítica. Pasada esta caída, observamos que el aislamiento vuelve a aumentar, pero ahora siguiendo la ley de masas corregida.

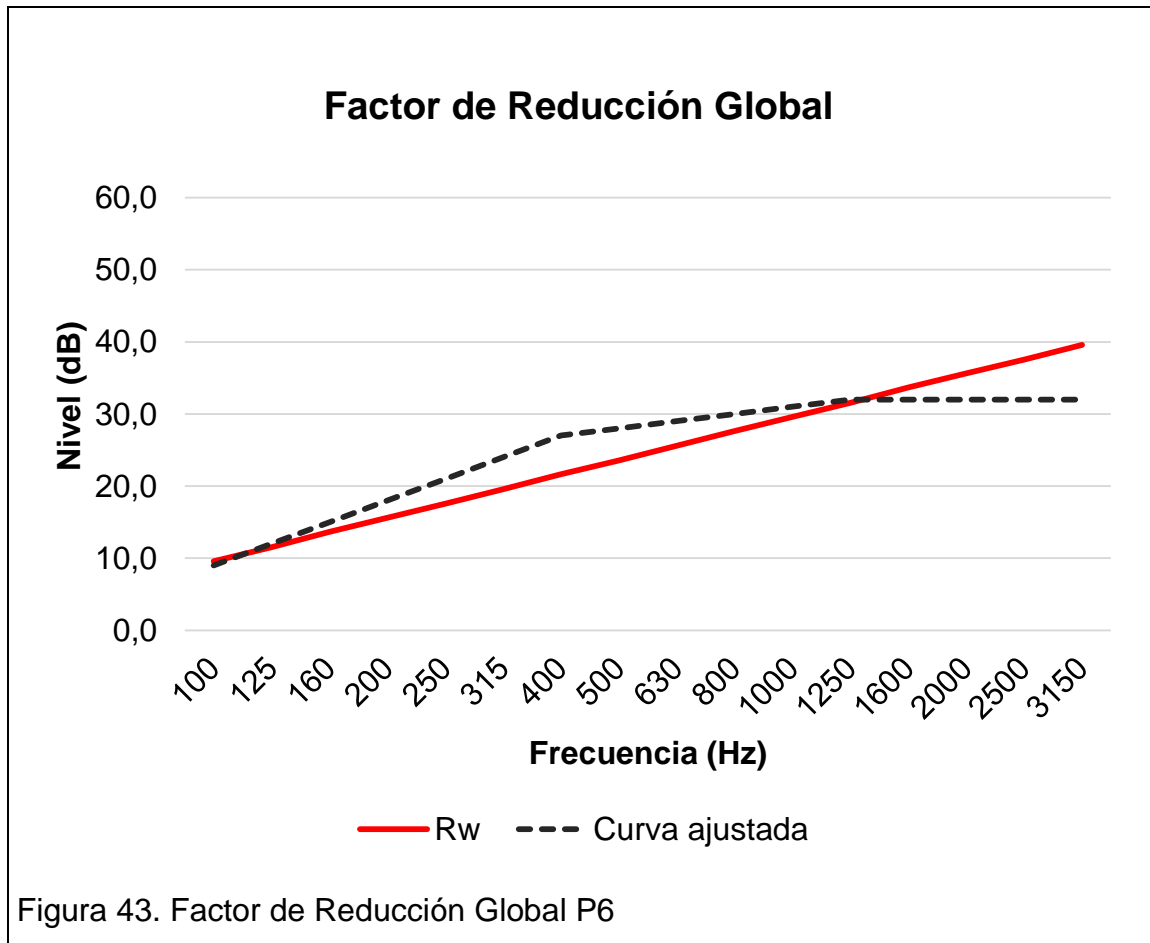
- Índice de Reducción Global

Tabla 25 Índice Global P6

Frecuencia (Hz)	Rw (dB)	Curva de referencia, desplazada -25 dB (dB)
100	9.6	8
125	11.5	11
160	13.7	14
200	15.6	17
250	17.6	20
315	19.6	23
400	21.6	26
500	23.6	27
630	25.6	28
800	27.7	29
1000	29.6	30
1250	31.5	31
1600	33.7	31
2000	35.6	31
2500	37.6	31
3150	39.6	31

La suma de las desviaciones desfavorables, con un ajuste de -25dB será de 29.45 dB. Cumpliendo el no sobrepasar los 32dB. El índice de reducción global será:

$$R_T = 28 \text{ dB}$$



3.1.3. Tablero T7

- Datos de Entrada

Tabla 26. Datos de entrada T7

Datos	Tablero de TetraPak de 7 mm
Densidad Superficial (kg/m ²)	6,35
Densidad Volumétrica (kg/m ³)	926,33
Espesor (m)	$0,69 \times 10^{-2}$
Módulo de Young (N/m ²)	$8,36 \times 10^8$

- **Frecuencia crítica del Material**

Tabla 27. Frecuencia crítica T7

Datos	Tablero de TetraPak de 7 mm
Frecuencia crítica(Hz)	9855,56

- **Masa Superficial**

Tabla 28. Masa superficial T7

Datos	Tablero de TetraPak de 7 mm
Masa superficial (kg/m ²)	6,35

- **Frecuencia de densidad**

Tabla 29. Frecuencia de densidad T7

Datos	Tablero de TetraPak de 7 mm
Frecuencia de densidad (Hz)	61413,29

- **Tabla factores de reducción sonora**

Tabla 30. Factor de reducción T7

Datos	Tablero de TetraPak de 7 mm					
Banda (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
R (dB)	11,00	17,02	23,04	29,06	35,08	41,10

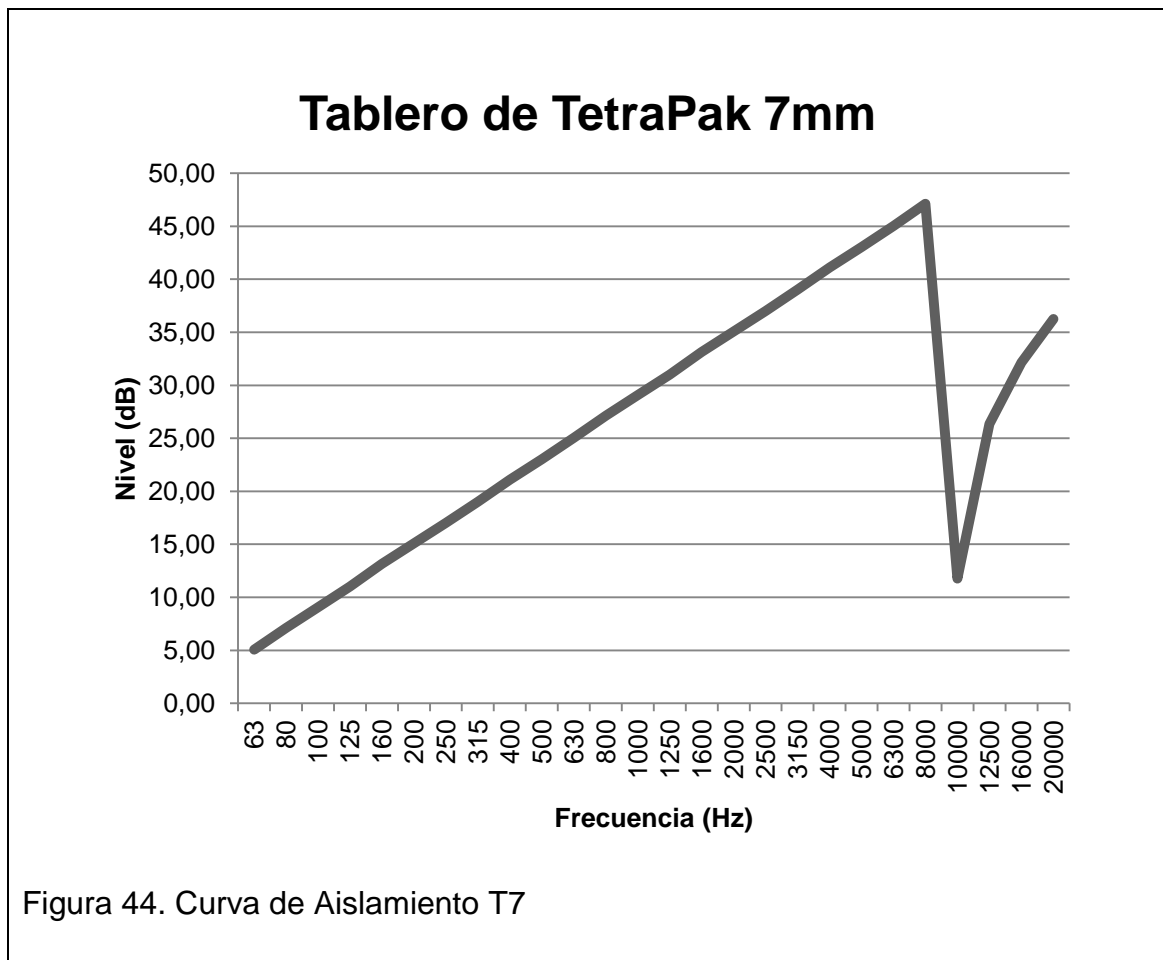
- **Tabla factores de reducción sonora (1/3 de octava)**

El valor de R total será de 42.34 dB.

Tabla 31. Valores de Reducción versus frecuencia T7.

Frecuencia (Hz)	R(dB) Tablero de TetraPak 7mm
63	5,05
80	7,12
100	9,06
125	11,00
160	13,14
200	15,08
250	17,02
315	19,03
400	21,10
500	23,04
630	25,05
800	27,12
1000	29,06
1250	31,00
1600	33,14
2000	35,08
2500	37,02
3150	39,03
4000	41,10
5000	43,04
6300	45,05
8000	47,12
10000	11,77
12500	26,33
16000	32,14
20000	5,05

- Curva de aislamiento, del tablero de TetraPak de 7mm.



En la presente gráfica, el comportamiento hasta alrededor de los 8000 Hz, se muestra un comportamiento lineal siguiendo la ley de masas, mostrando el aislamiento muestra una proporción versus la frecuencia. Pero en la zona de los 9000 Hz existe una caída aproximadamente de 30dB, ocasionado por la frecuencia crítica o de coincidencia, debido a la suma con las ondas de flexión características del material. Pasada esta caída, observamos que el aislamiento vuelve a aumentar, pero ahora siguiendo la ley de masas corregida.

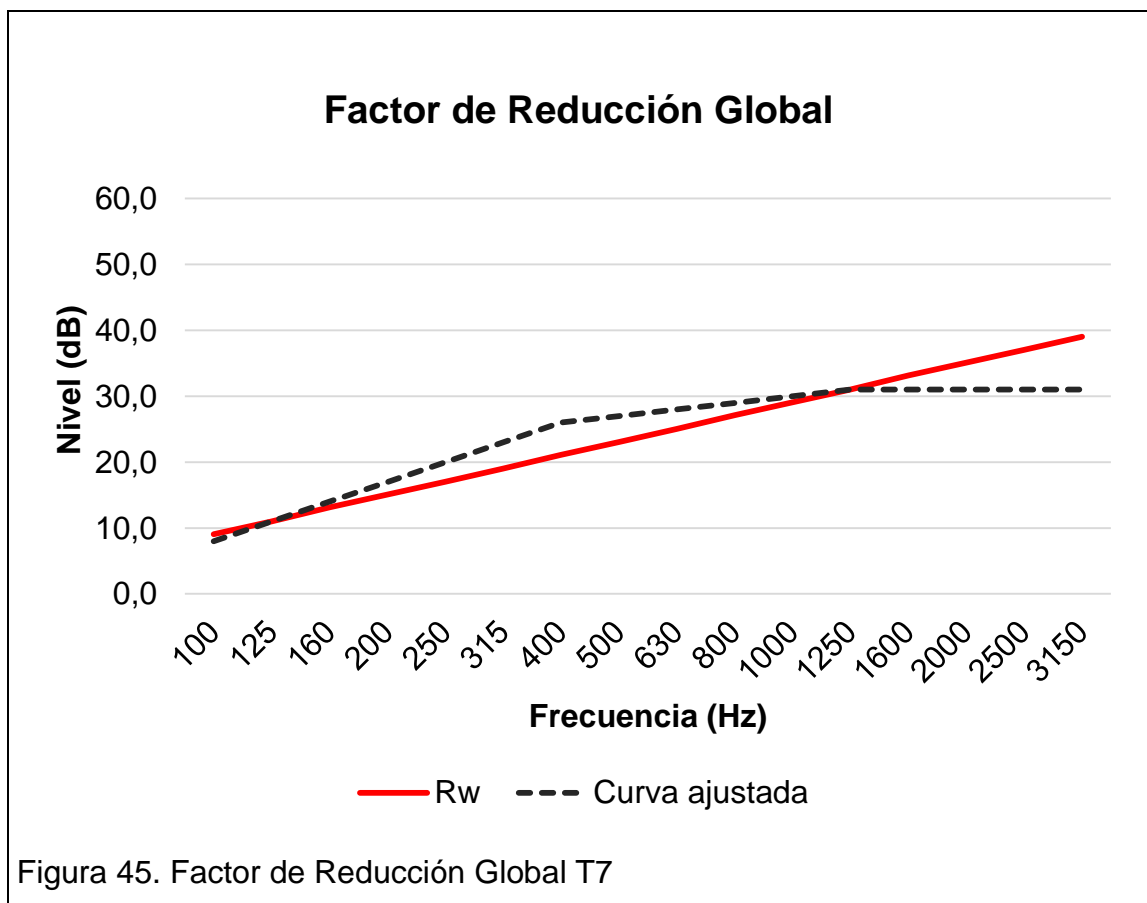
- Índice de Reducción Global

Tabla 32 Índice Global T7

Frecuencia (Hz)	Rw (dB)	Curva de referencia, desplazada -26 dB (dB)
100	9.1	7
125	11.0	10
160	13.1	13
200	15.1	16
250	17.0	19
315	19.0	22
400	21.1	25
500	23.0	26
630	25.0	27
800	27.1	28
1000	29.1	29
1250	31.0	30
1600	33.1	30
2000	35.1	30
2500	37.0	30
3150	39.0	30

La suma de las desviaciones desfavorables, con un ajuste de -26dB será de 24.37 dB. Cumpliendo el no sobrepasar los 32dB. El índice de reducción global será:

$$R_T = 27 \text{ dB}$$



3.1.4. Gráficos comparativos

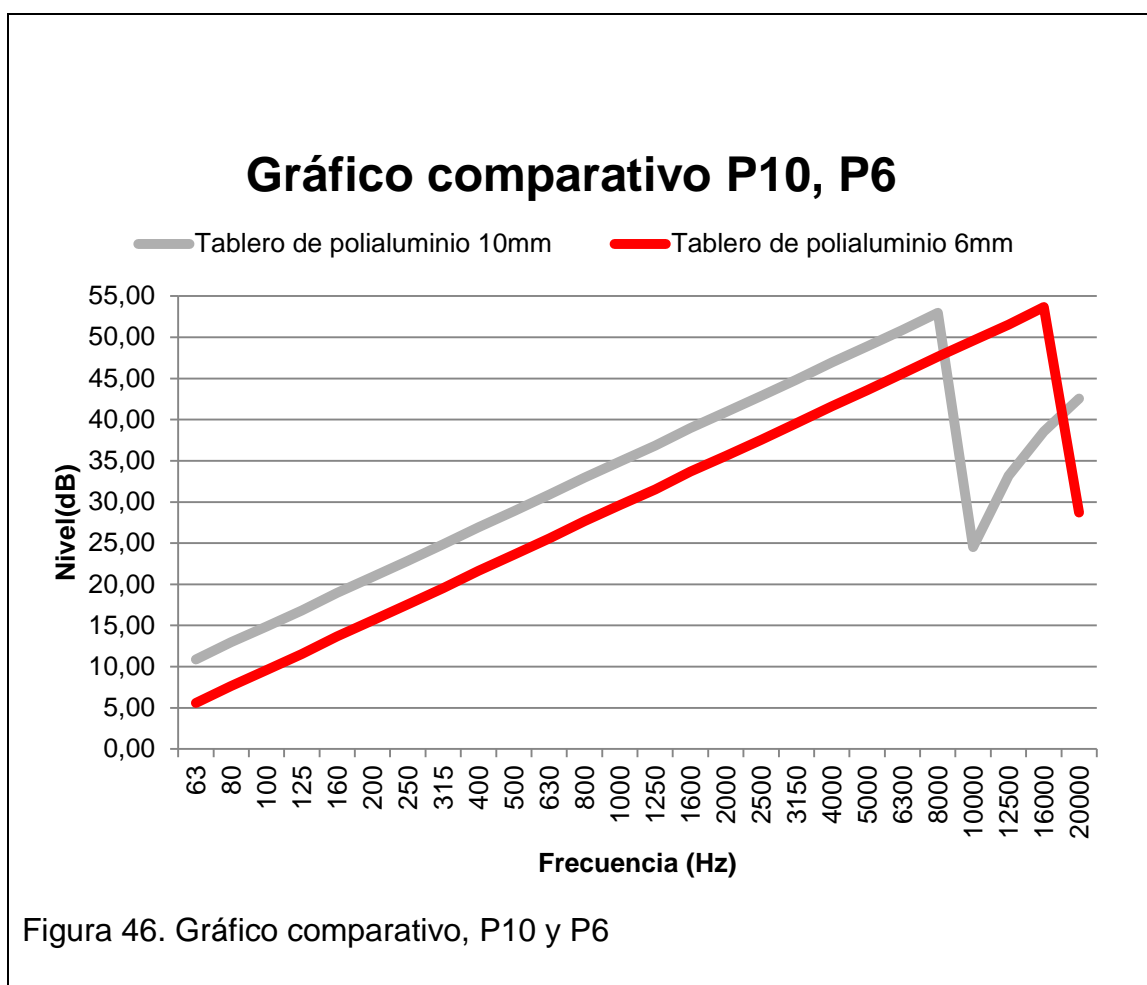
Por facilidad, se utilizará la siguiente codificación para los títulos de los gráficos:

Tabla 33. Codificación De los tableros.

Tablero	Código
Tablero de polialuminio de 10 mm de espesor	P10
Tablero de polialuminio de 6 mm de espesor	P6
Tablero de TetraPak de 7 mm de espesor	T7

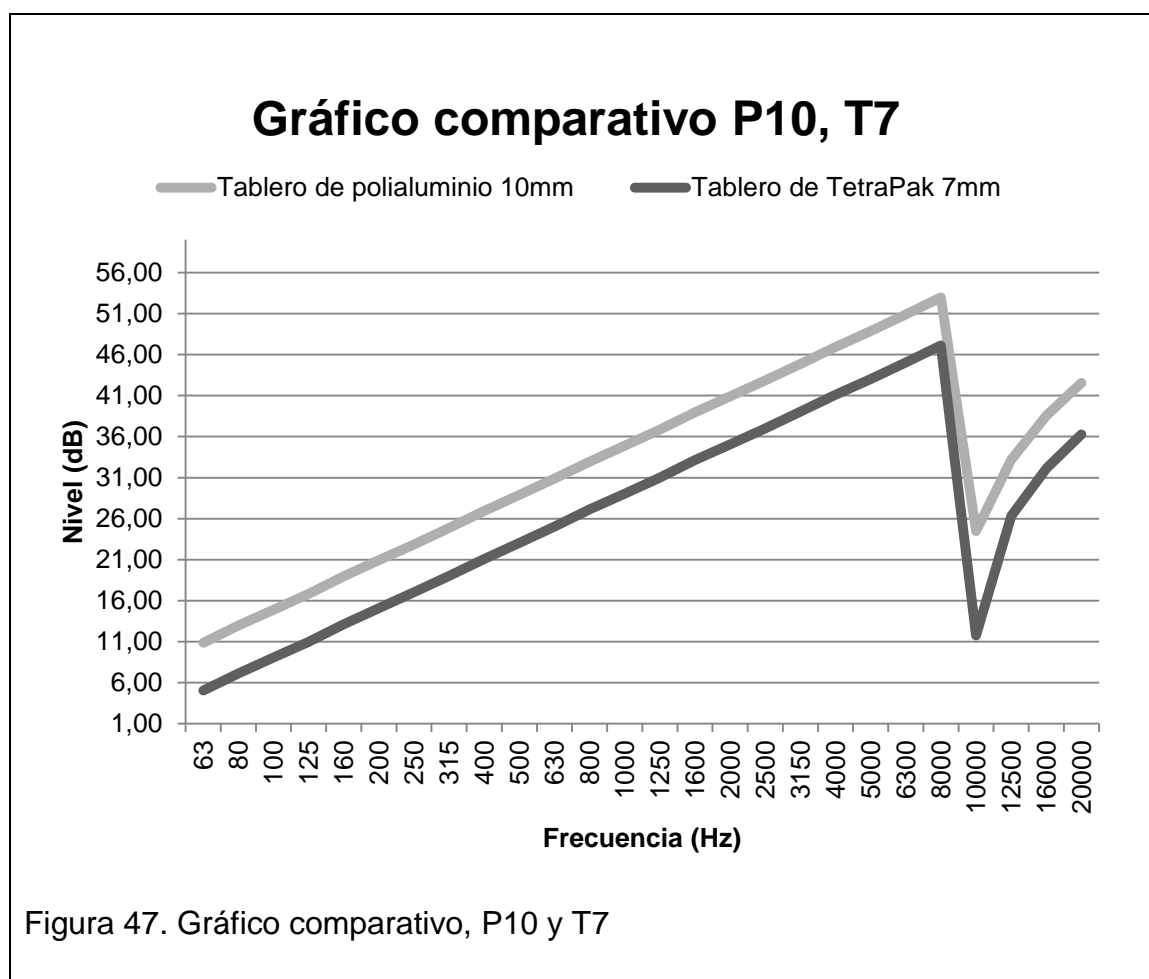
La comparación se la realizará acorde al tipo de panel, similitud, de los resultados y comparación de los tableros acorde su espesor. Los resultados, muestran ser similares entre todos. Posiblemente ocasionado por la composición de los mismos. Principalmente entre los tableros de polialuminio.

3.1.4.1. Gráfico comparativo P10, P6



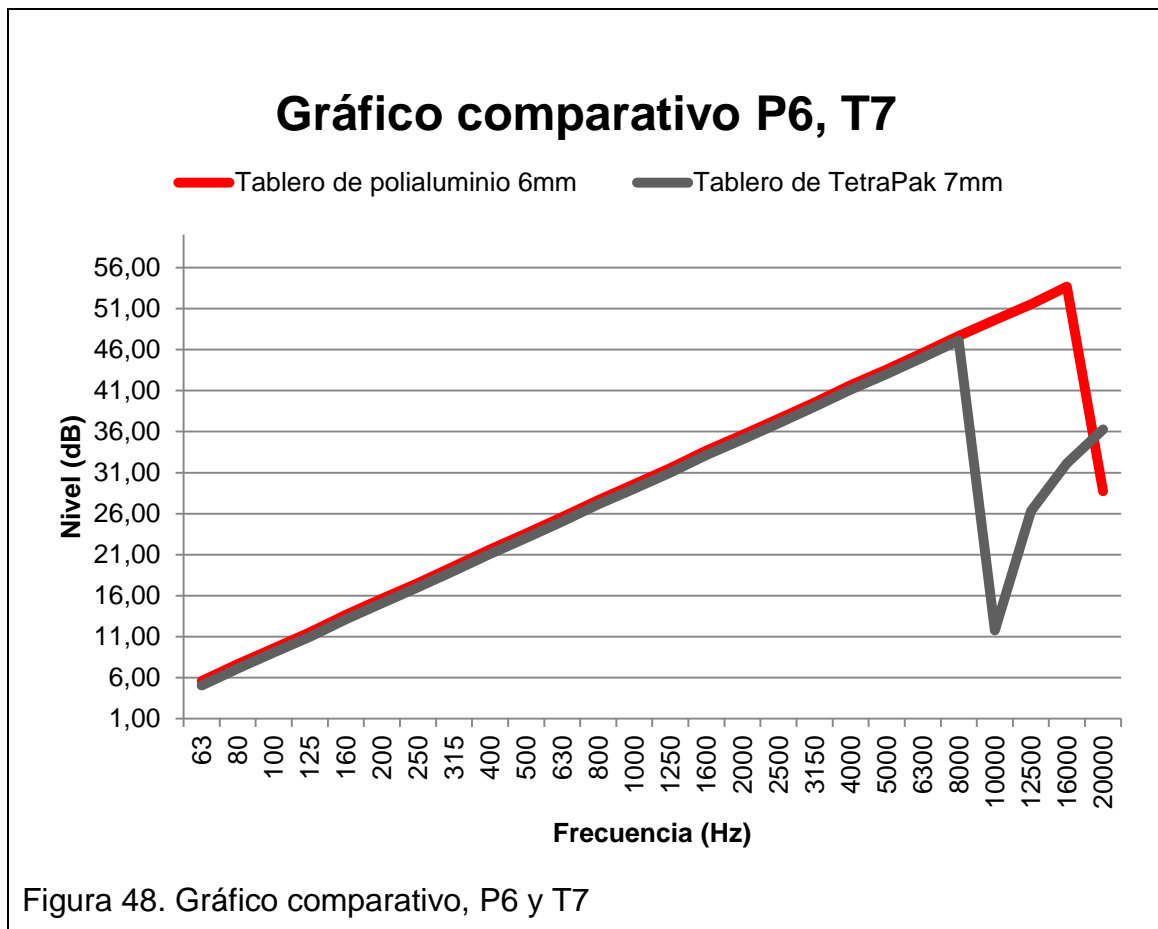
En el presente gráfico, el aislamiento es uniforme en todo el rango de frecuencias. La caída de nivel ocasionada por la frecuencia crítica, muestra un desplazamiento aproximado en 17000 Hz, del tablero de polialuminio de 6mm respecto a los 9500 Hz del tablero de 10mm de espesor. Ocasionado porque el coeficiente de elasticidad es menor aproximadamente con 1×10^8 (N/m²) y la masa superficial en casi en el doble de su valor. El aislamiento del tablero de 10mm de espesor es casi 5dB mayor desde 63Hz a 6300Hz, esto es ocasionado por poseer un espesor mayor generando que la masa superficial y la densidad volumétrica, dependientes de la masa existente en el material, sean mayores. Se puede apreciar que ambas, tienen una tendencia lineal, esto puede ser ocasionado por ser compuestos del mismo material.

3.1.4.2. Gráfico comparativo P10, T7



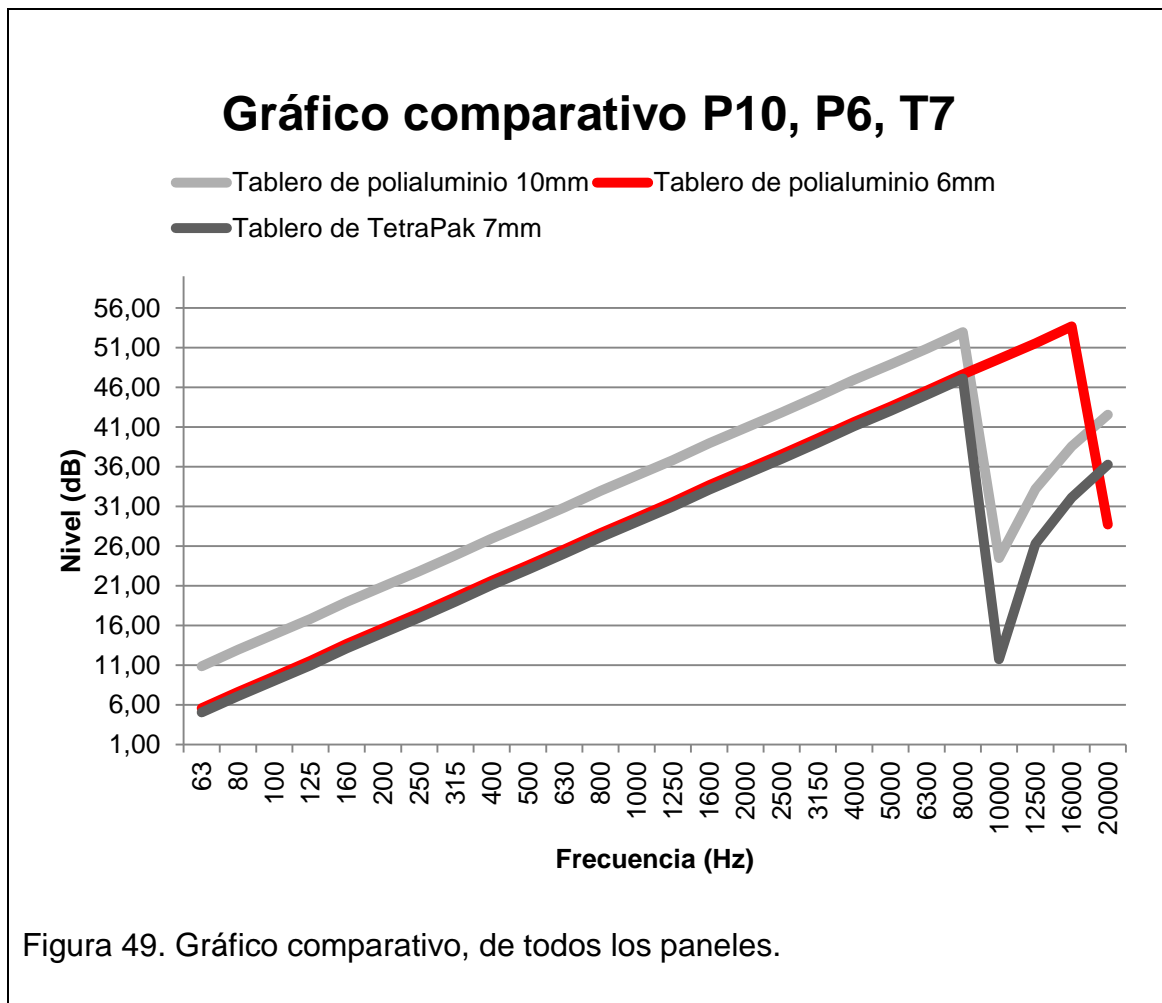
En el presente gráfico, podemos notar que la tendencia es lineal en ambos tableros. Además, su frecuencia crítica es aproximadamente similar por los 9500Hz y la caída de aislamiento es mayor en el tablero de TetraPak con 36dB respecto a los 29dB de diferencia en el tablero de polialuminio, esto puede deberse a la relación existente entre la densidad volumétrica y el coeficiente de elasticidad, ya que en el tablero de polialuminio de 10 mm de espesor la masa superficial es mayor con 152 Kg/m^3 , pero el coeficiente de elasticidad es aproximadamente el doble de menor en el tablero de TetraPak. Notoriamente el aislamiento del tablero de polialuminio de 10mm, es mayor de 63 Hz a 8000 Hz en 5dB, esto es ocasionado por poseer mayor masa, y a su vez una mayor masa superficial, casi en el doble de la del tablero de TetraPak.

3.1.4.3. Gráfico comparativo P6, T7



La tendencia en la curva de aislamiento es lineal para ambos tableros. A pesar de que su masa superficial, densidad volumétrica es similar, pero el coeficiente de elasticidad es menor en el tablero de polialuminio, generando que la frecuencia crítica sea mucho más arriba casi en 17000Hz. La diferencia de aislamiento, entre los dos es muy pequeña desde 63 Hz hasta 7000Hz aproximadamente por lo que se puede deducir que en ese rango su aislamiento es similar. Y que en momento de tener la necesidad de utilizar un material con este tipo de aislamiento, es mejor utilizar el tablero de polialuminio.

3.1.4.4. Gráfico comparativo P10, P6 y T7



Globalmente analizaremos dos secciones, primeramente la comparación de eficiencia entre materiales; el panel de polialuminio, posee una mejor respuesta de aislamiento acústico, que el panel del TetraPak, esto puede deberse porque el cartón existente en el tablero de TetraPak, genera que el panel sea quebradizo y su punto de ruptura sea menor, creando así un material menos flexible y elástico. En cambio los paneles de polialuminio, como su nombre lo indica, su composición de polietileno y aluminio, son mucho más elásticos, además que al momento de su compresión en la etapa de elaboración sus partículas poseen una cohesión mayor entre sí, debido a que el polietileno se funde y llena las cámaras de aire dentro del material.

Segundo, la peor curva de aislamiento la tiene el panel de TetraPak, por cómo hemos comentado su elasticidad es la menor de todas. El panel de polialuminio de 10 mm de espesor posee la mejor curva de aislamiento acústico, por dos parámetros principalmente, el primero es su espesor, siendo el mayor de entre los tres y el segundo es su coeficiente de elasticidad, siendo el menor de todos, a pesar de ser el que más masa y densidad volumétrica posee de entre los tres paneles analizados.

3.2. Absorción

En la presente sección, se presentará los datos y las curvas de los coeficientes de absorción obtenidos en la medición realizada en el tubo de impedancias.

Posteriormente los audios analizados en el programa del método de transferencia, serán graficados, para su visualización.

Las gráficas obtenidas de Matlab muestran los valores discretos de los coeficientes por frecuencia. Para adquirir los valores en bandas de octava se realizó una media ponderada y la desviación estándar, por existencia de variaciones de los datos entre el límite inferior y superior de cada banda de octava, dicho proceso se encuentra detallado en el programa para obtener los promedios, revisar el código en el Anexo 3.

Para cada tablero se realizó un total de 10 mediciones para tener una aproximación mucho más real de las curvas de absorción de cada material, los valores de cada algoritmo son promedios de las 10 mediciones realizadas con su desviación.

3.2.1. Curvas y valores de absorción de P6

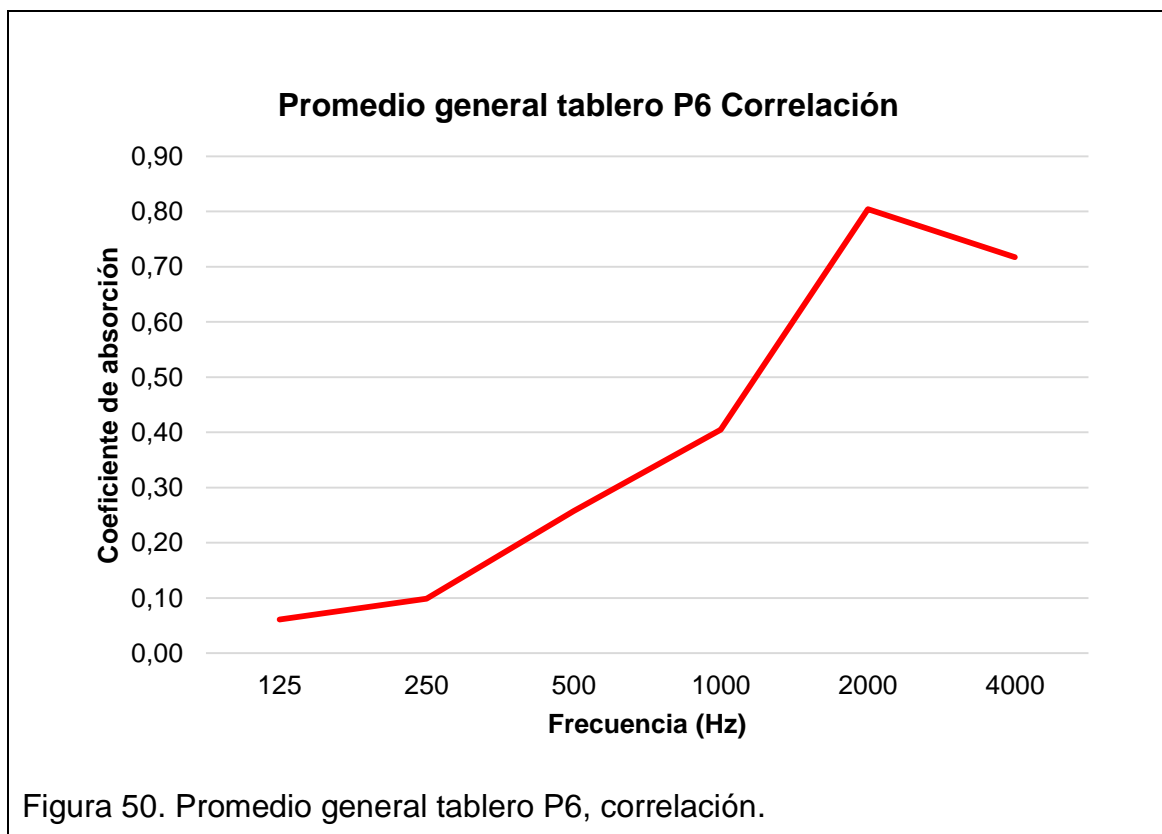
En la presente sección se mostrará la curva obtenida del método de función de transferencia con dos micrófonos, la gráfica promedio general y la gráfica con las desviaciones de cada algoritmo entre las mediciones del tablero de polialuminio de 6mm de espesor.

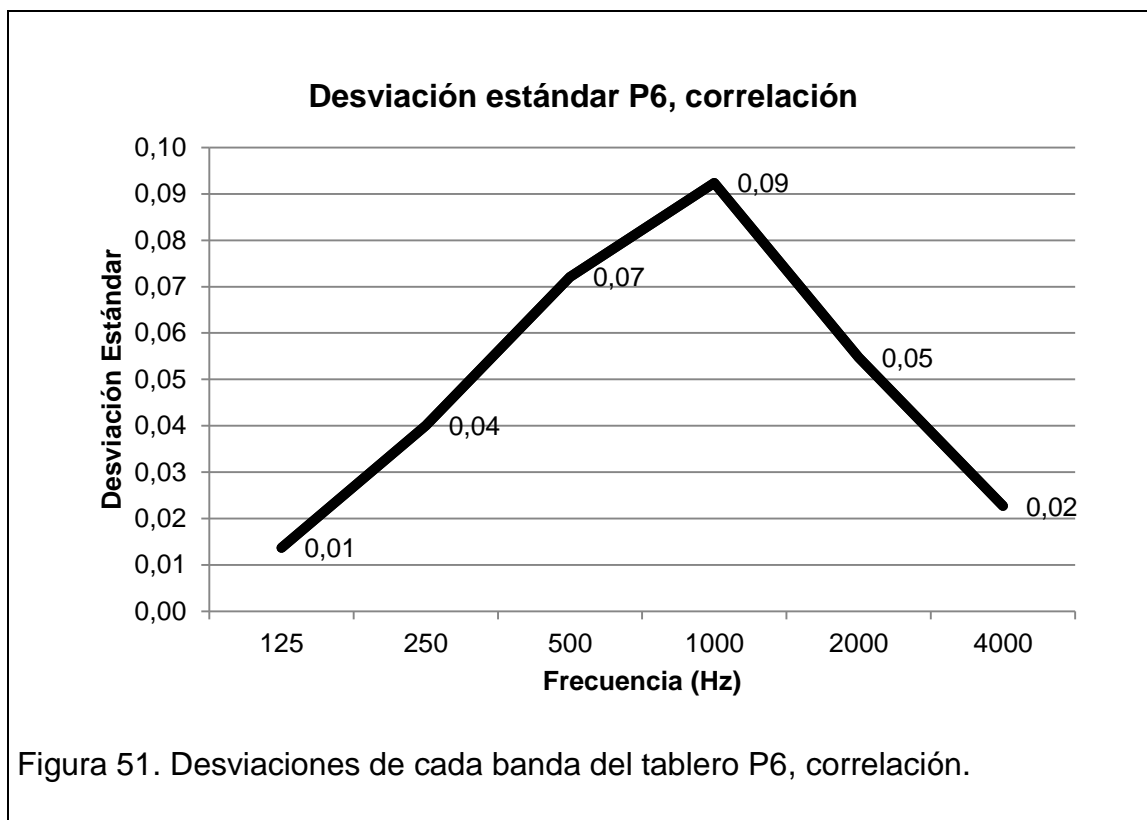
Se dividió la gráficas de las mediciones realizadas en pares e impares simplemente por cuestión de visualización. Todos los valores y las gráficas de las mediciones se encuentran en el anexo 2 y anexo 3.

Correlación P6

Tabla 34. Coeficientes de absorción P6 Correlación.

Frecuencia	125	250	500	1000	2000	4000
Coeficientes de absorción, correlación P6.	0.06	0.10	0.26	0.40	0.80	0.72

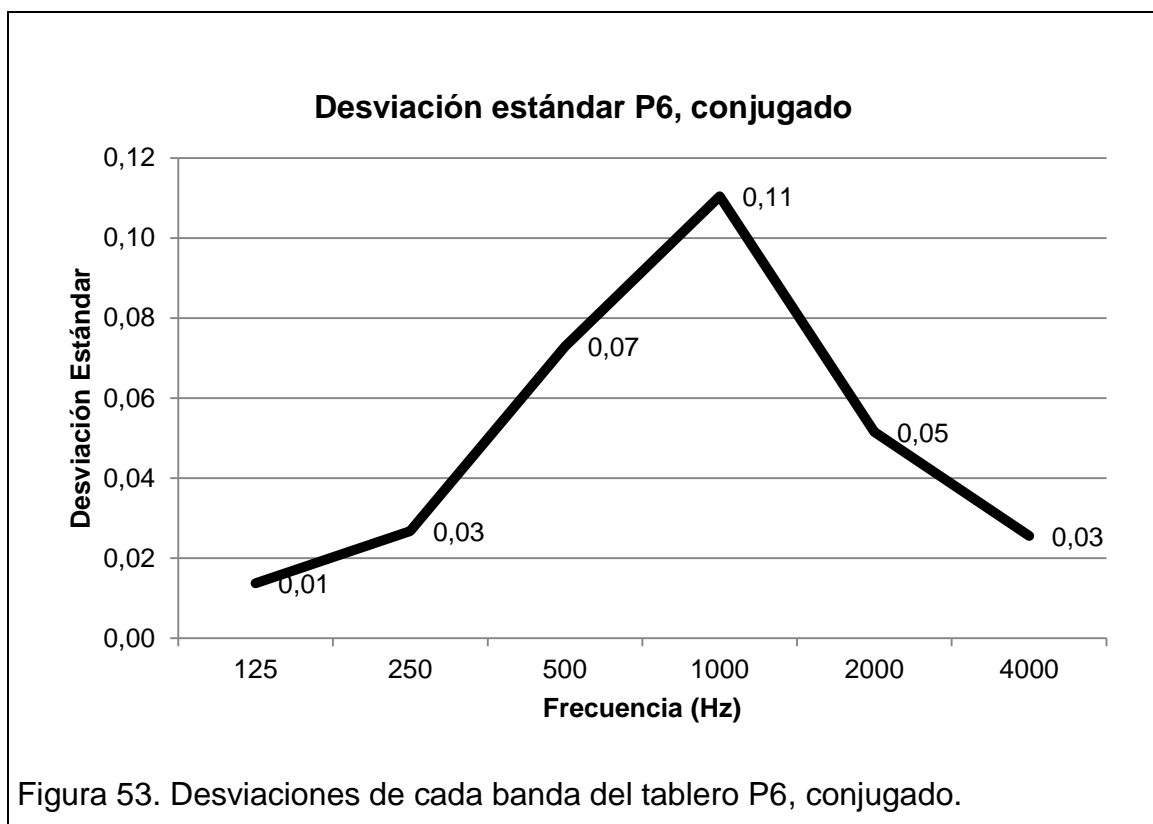
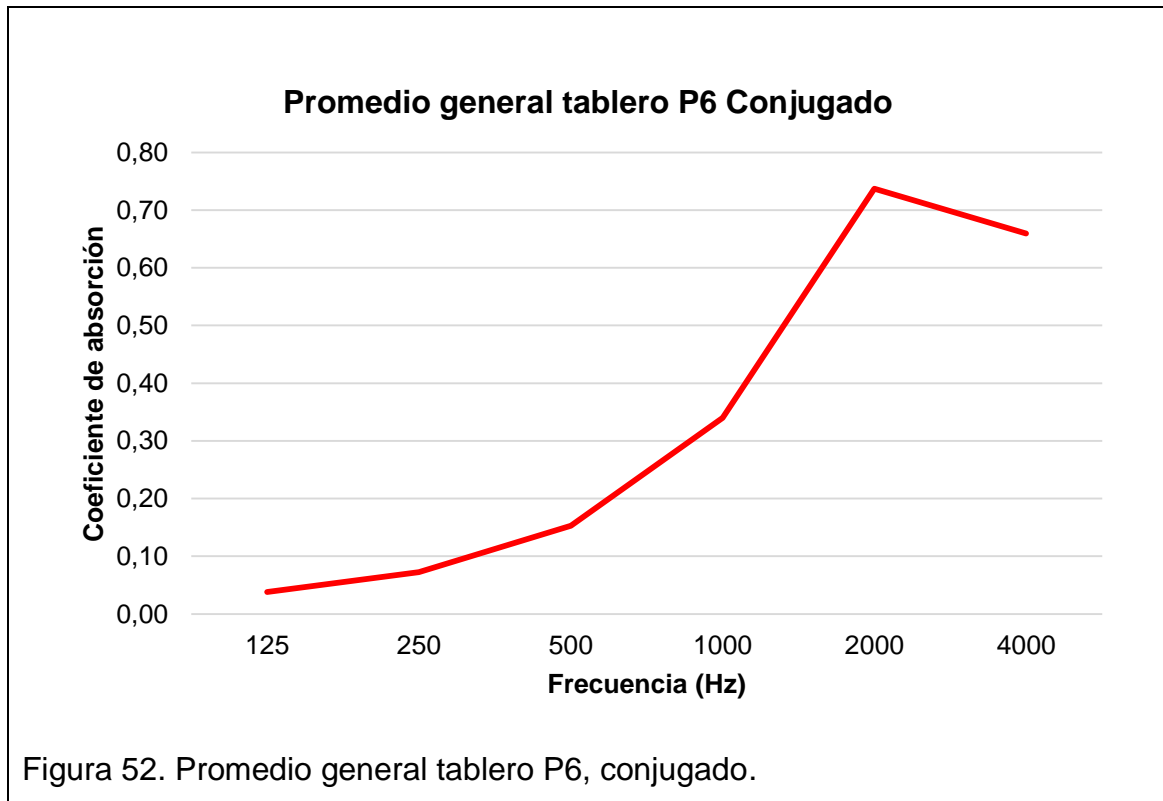




Conjugado P6

Tabla 35. Coeficientes de absorción P6 Conjugado.

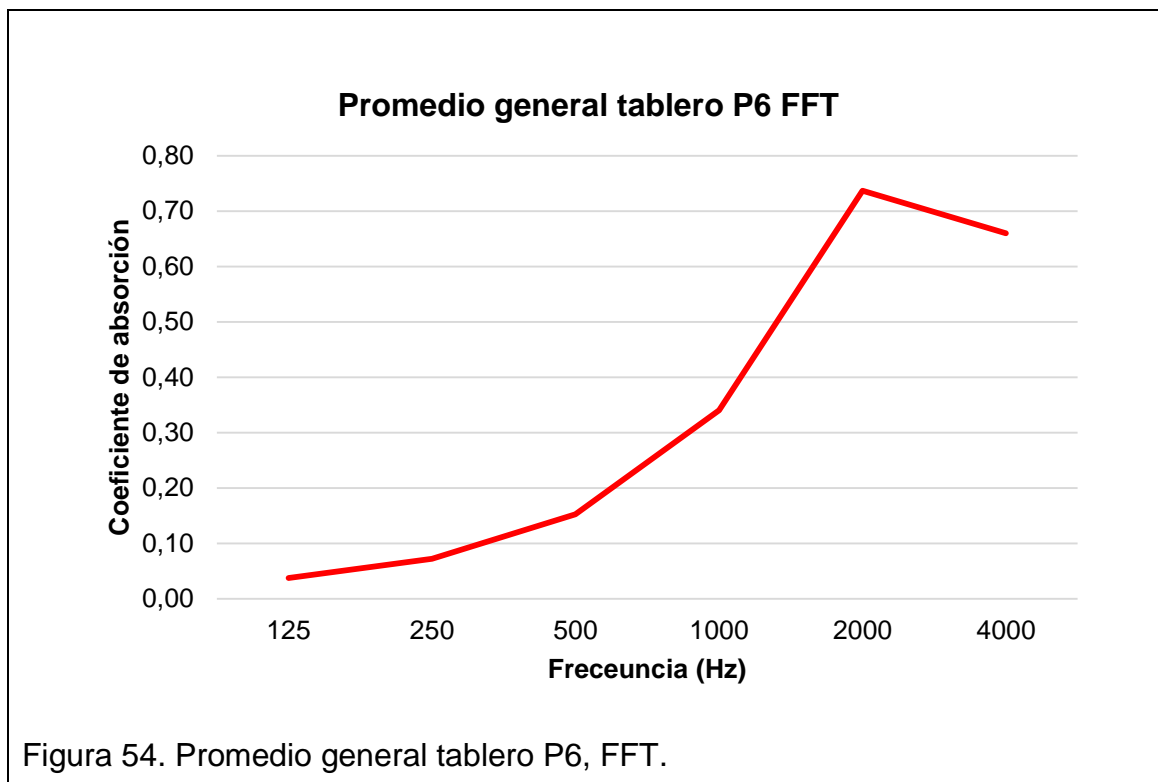
Frecuencia	125	250	500	1000	2000	4000
Coeficientes de absorción, conjugado P6.	0,04	0,07	0,15	0,34	0,74	0,66

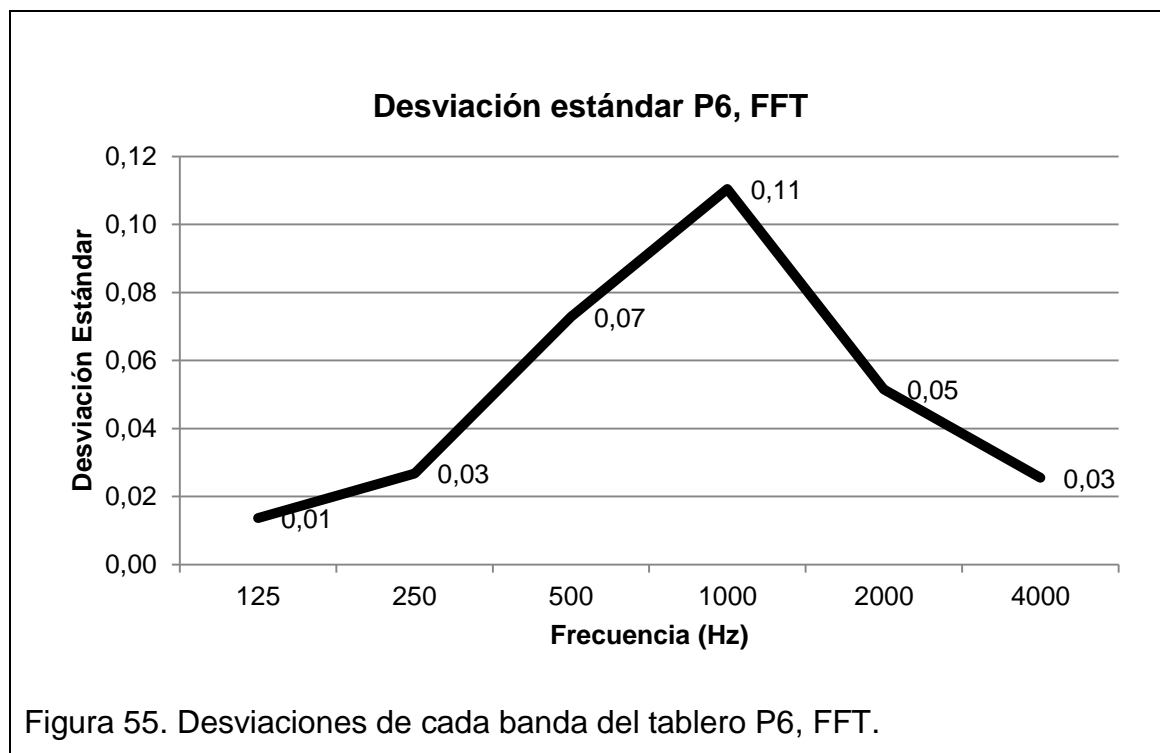


FFT P6

Tabla 36. Coeficientes de absorción P6 FFT.

Frecuencia	125	250	500	1000	2000	4000
Coeficientes de absorción, FFT P6.	0,04	0,07	0,15	0,34	0,74	0,66





3.2.2. Curvas y valores de absorción de P10

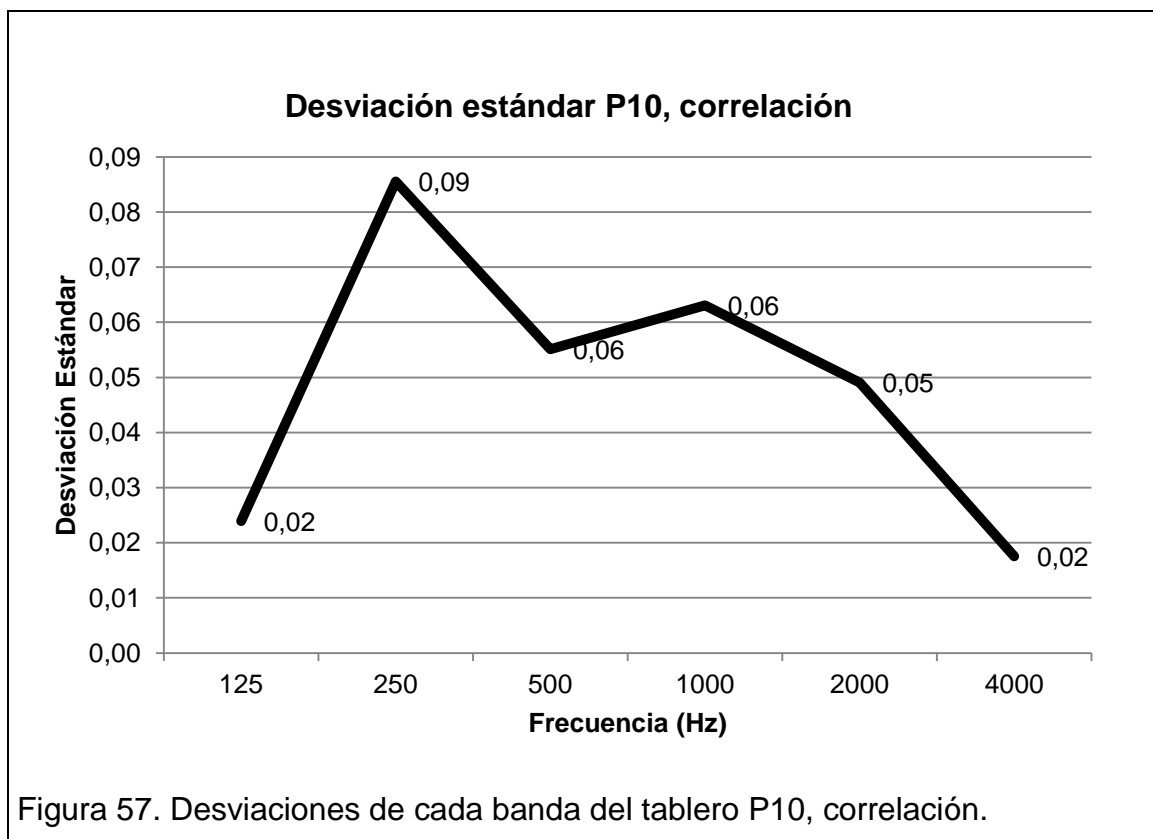
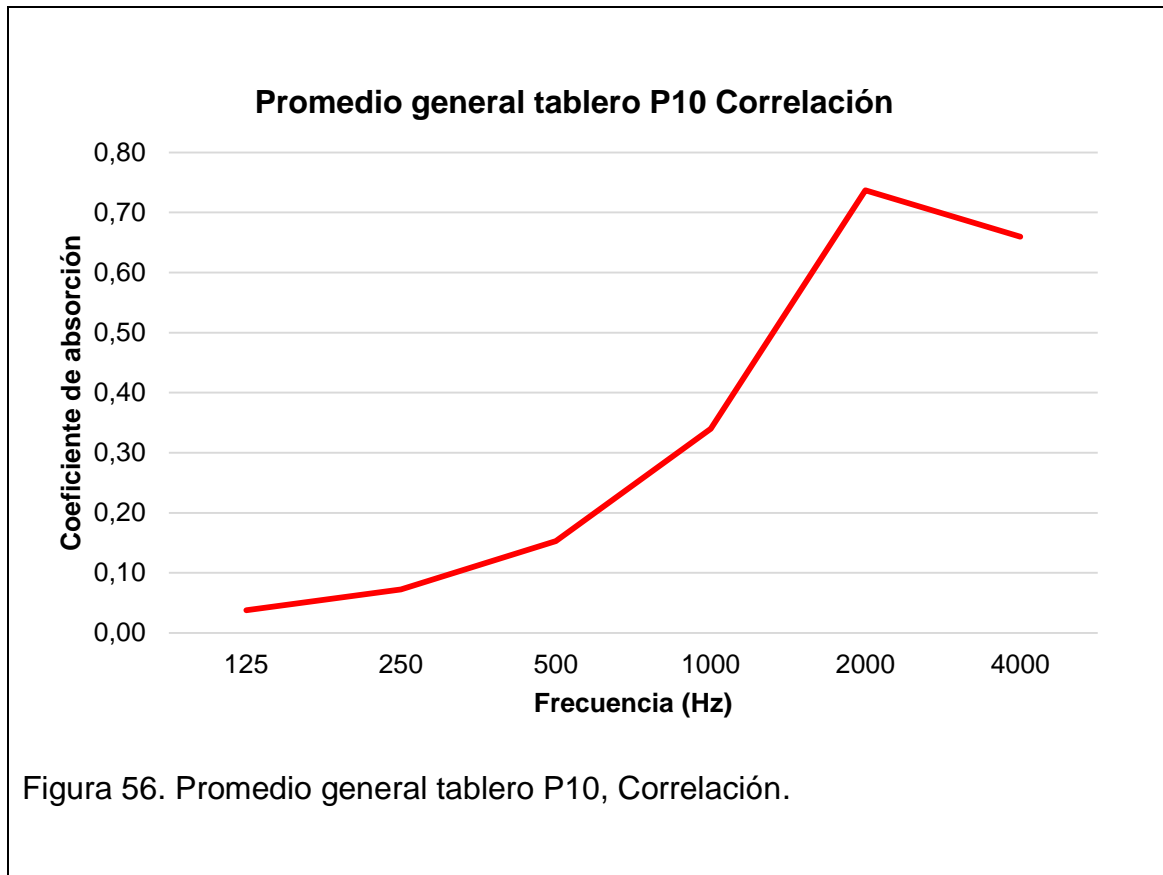
En la presente sección se mostrará la curva obtenida del método de función de transferencia con dos micrófonos, la gráfica promedio general y la gráfica con las desviaciones de cada algoritmo entre las mediciones del tablero de polialuminio de 10mm de espesor.

Se dividió la gráficas de las mediciones realizadas en pares e impares simplemente por cuestión de visualización. Todos los valores y las gráficas de las mediciones se encuentran en el anexo 2 y anexo 3.

Correlación P10

Tabla 37. Coeficientes de absorción P10 Correlación.

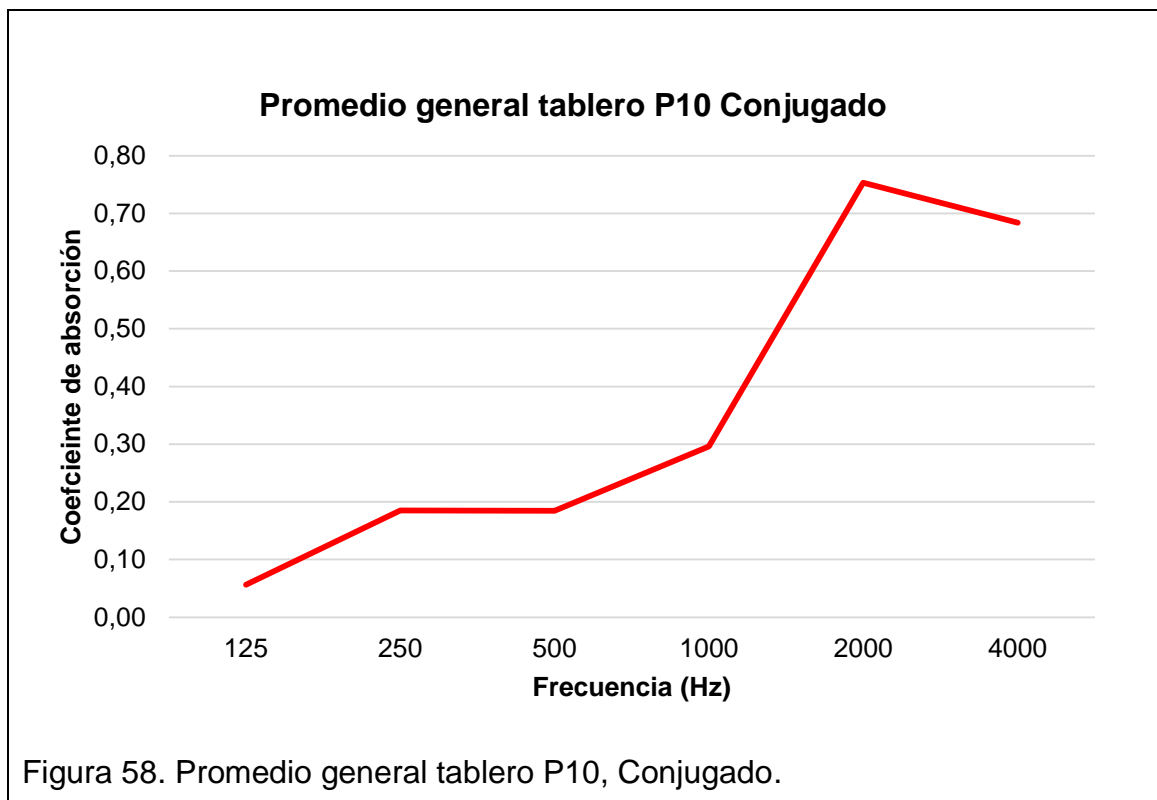
Frecuencia	125	250	500	1000	2000	4000
Coeficientes de absorción, correlación P10.	0,06	0,18	0,20	0,37	0,81	0,71

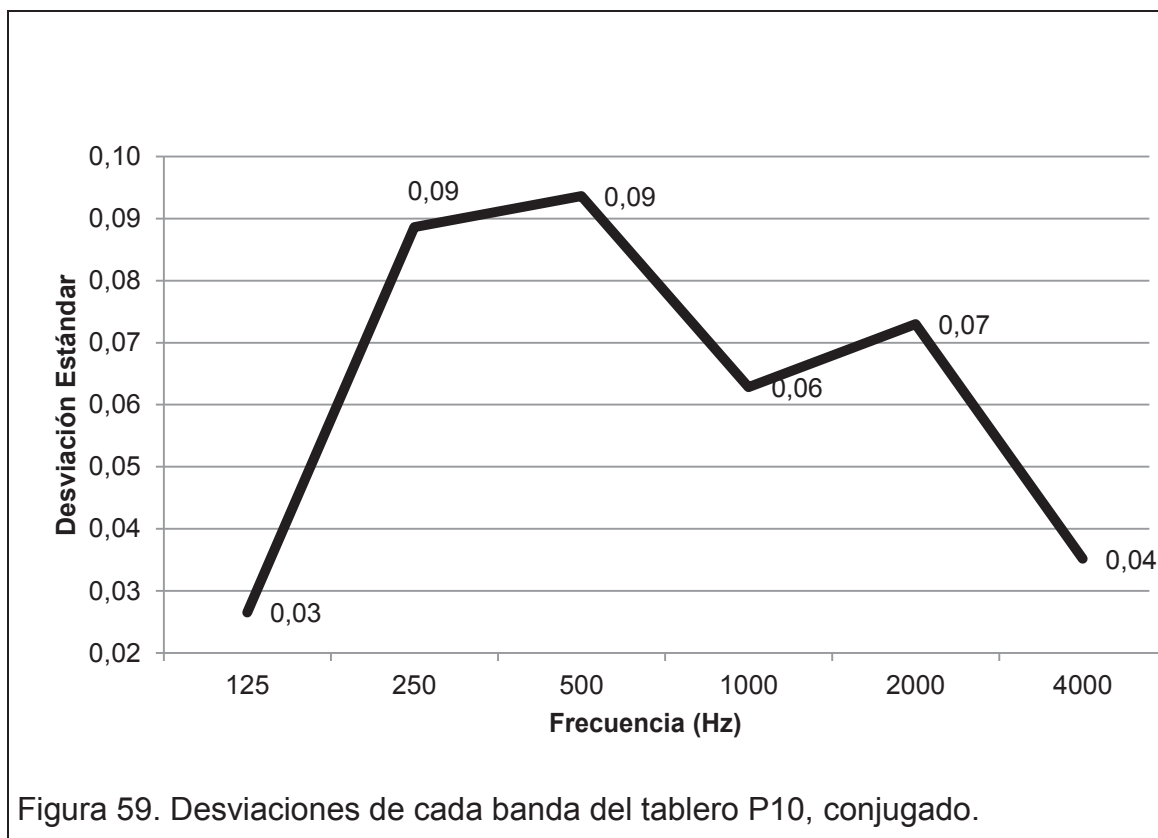


Conjugado P10

Tabla 38. Coeficientes de absorción P10, Conjugado.

Frecuencia	125	250	500	1000	2000	4000
Coeficientes de absorción, conjugado P10.	0,06	0,19	0,18	0,30	0,75	0,68

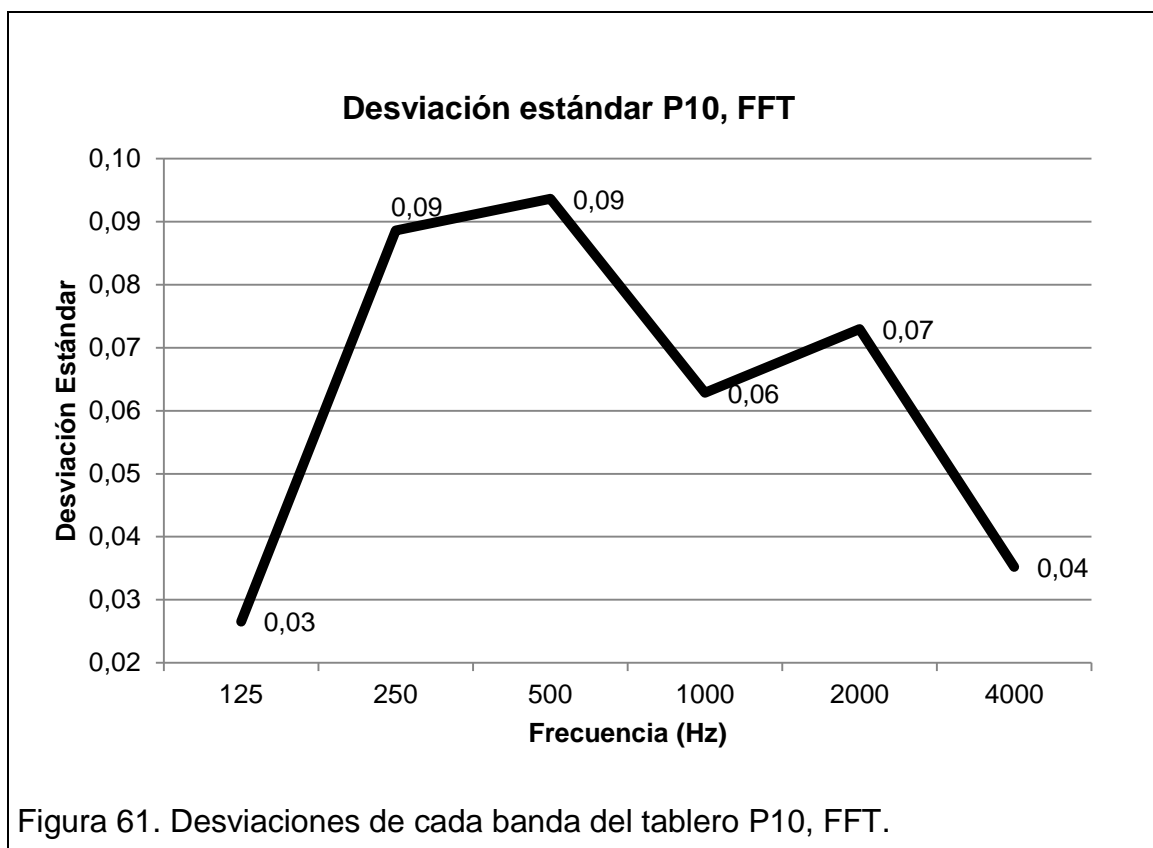
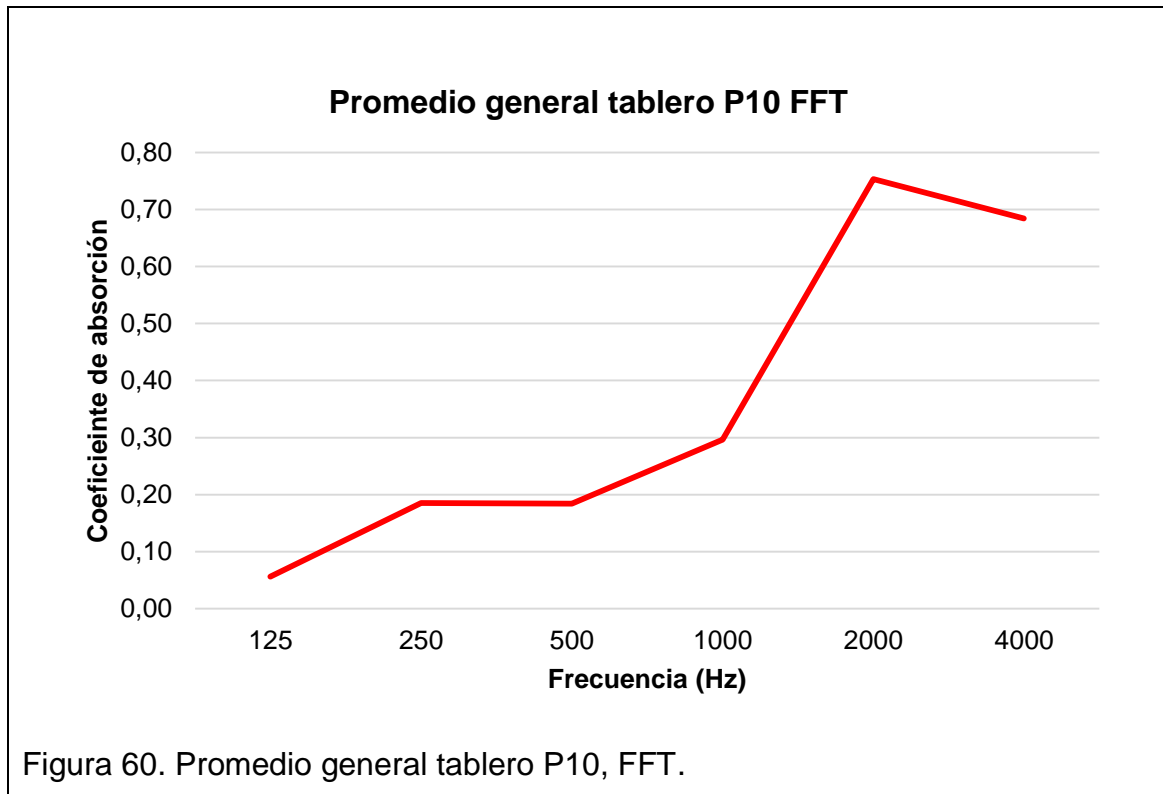




FFT P10

Tabla 39. Coeficientes de absorción P10 FFT.

Frecuencia	125	250	500	1000	2000	4000
Coeficientes de absorción, FFT P10.	0,06	0,19	0,18	0,30	0,75	0,68



3.2.3. Curvas y valores de absorción de T7

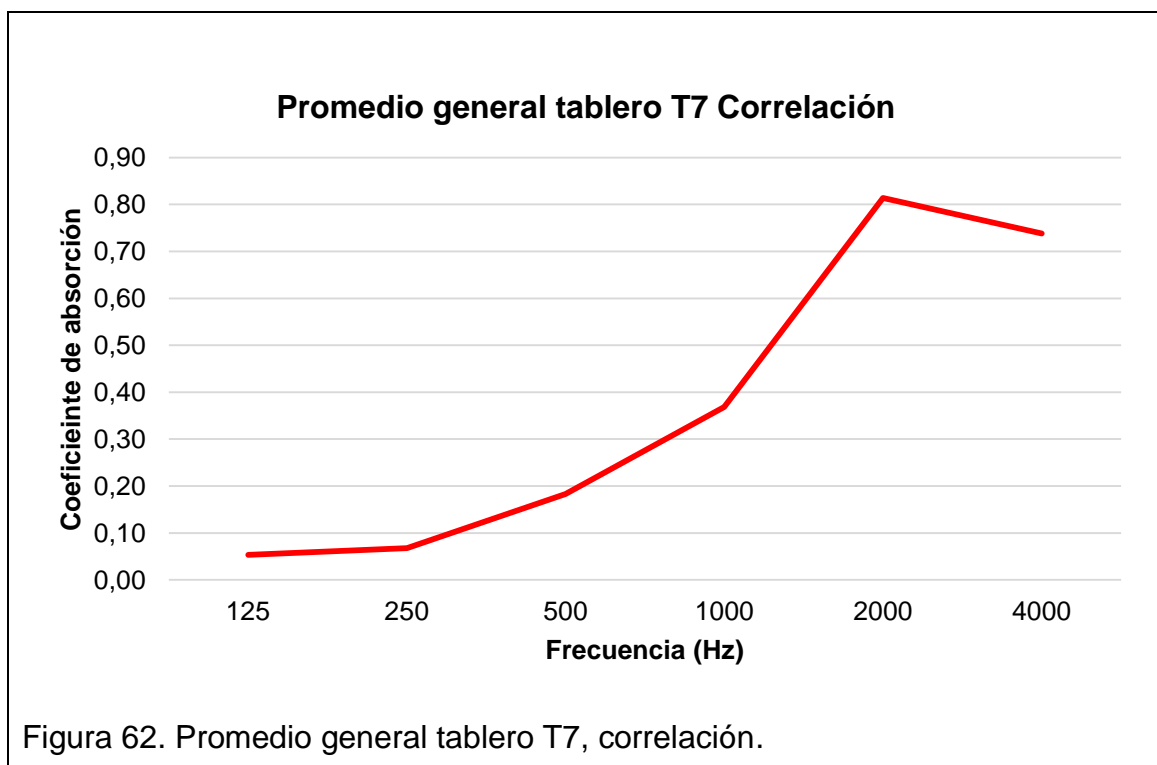
En la presente sección se mostrará la curva obtenida del método de función de transferencia con dos micrófonos, la gráfica promedio general y la gráfica con las desviaciones de cada algoritmo entre las mediciones del tablero de tetrapak de 7mm de espesor.

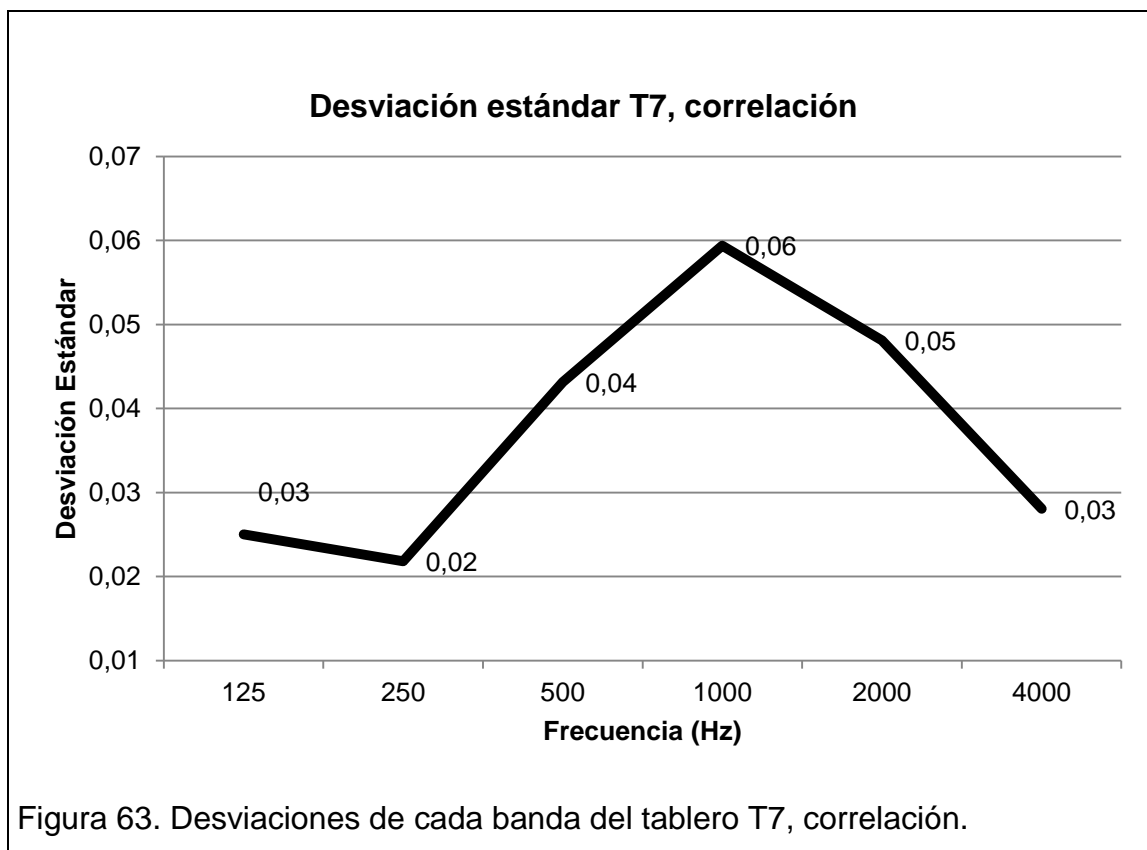
Se dividió la gráficas de las mediciones realizadas en pares e impares simplemente por cuestión de visualización. Todos los valores y las gráficas de las mediciones se encuentran en el anexo 2 y anexo 3

Correlación T7

Tabla 40. Coeficientes de absorción T7 Correlación.

Frecuencia	125	250	500	1000	2000	4000
Coeficientes de absorción, correlación T7.	0,05	0,07	0,18	0,37	0,81	0,74

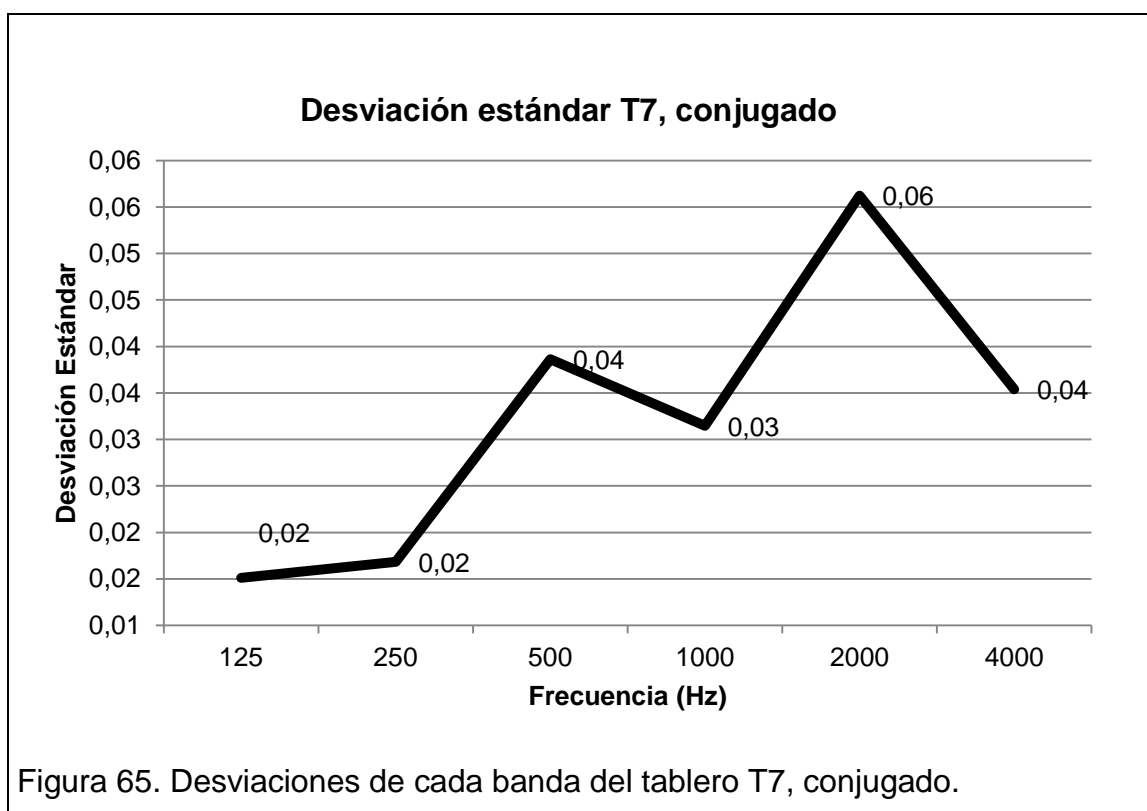
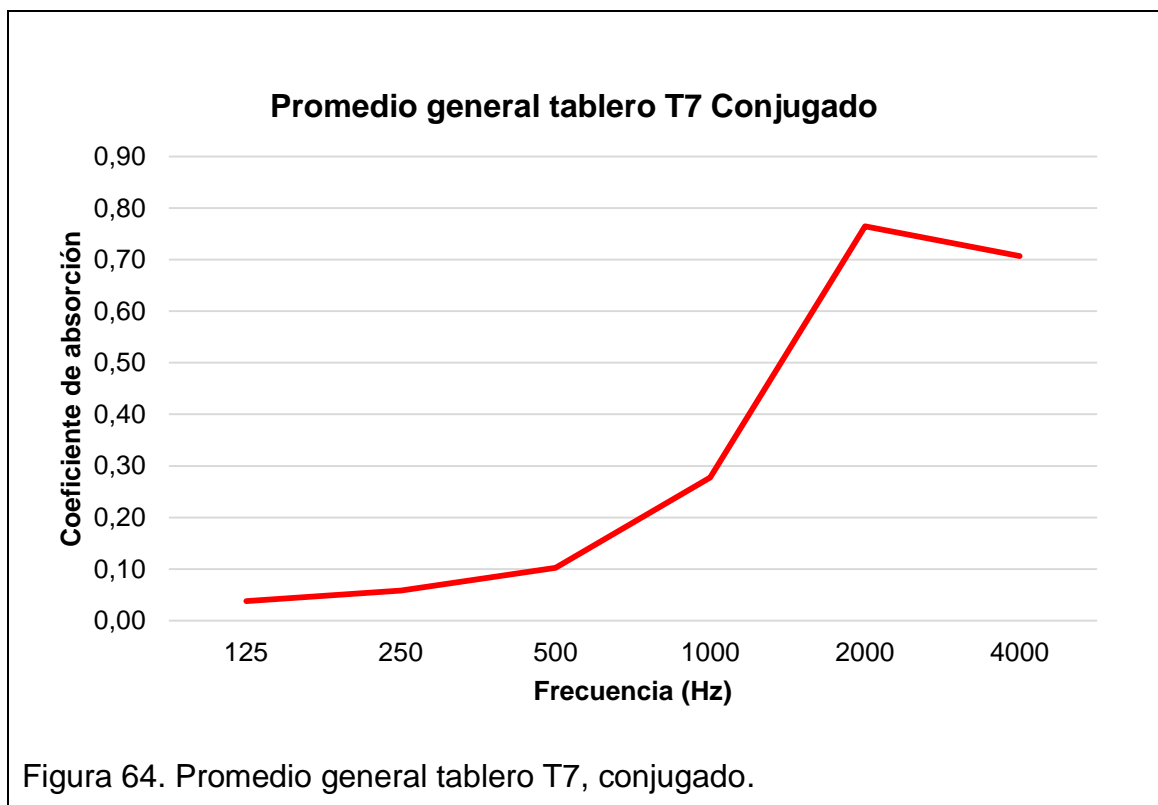




Conjugado T7

Tabla 41. Coeficientes de absorción tablero T7 conjugado.

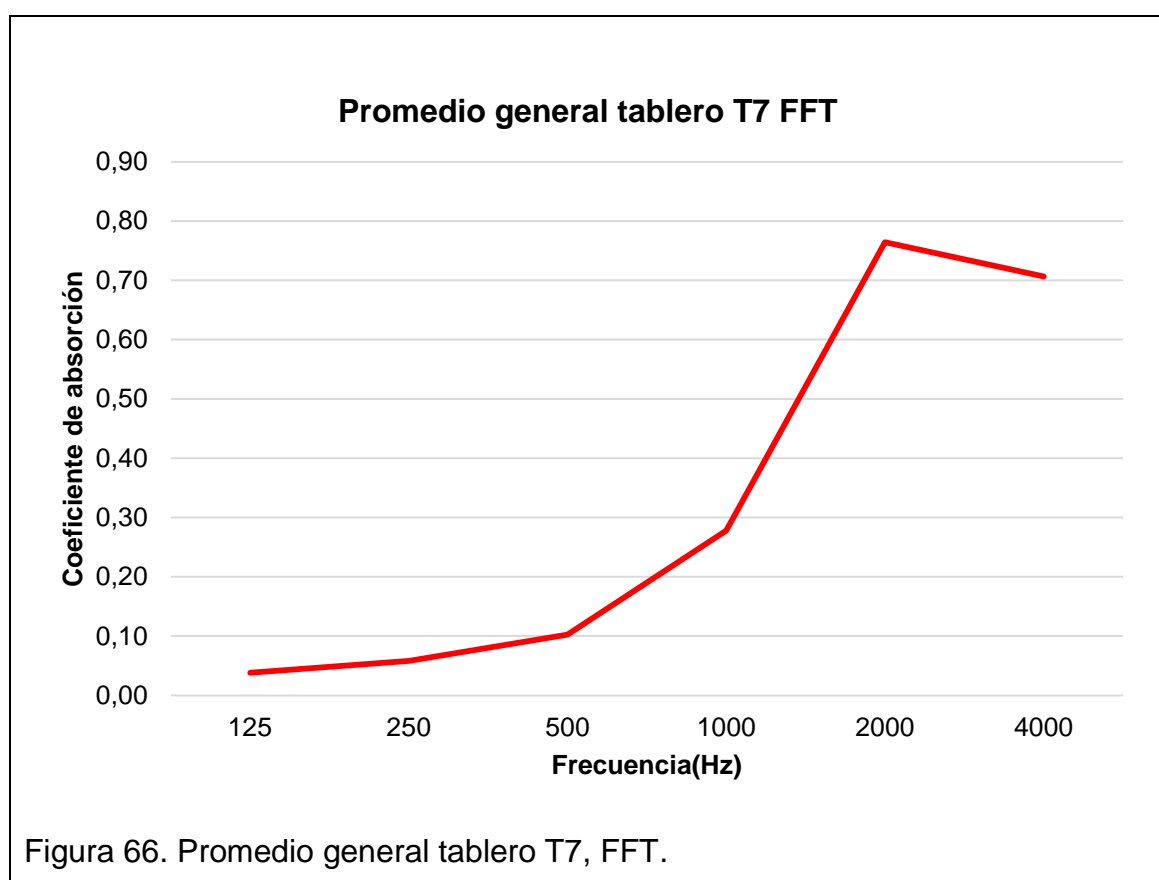
Frecuencia	125	250	500	1000	2000	4000
Coeficientes de absorción, conjugado T7.	0,04	0,06	0,10	0,28	0,76	0,71

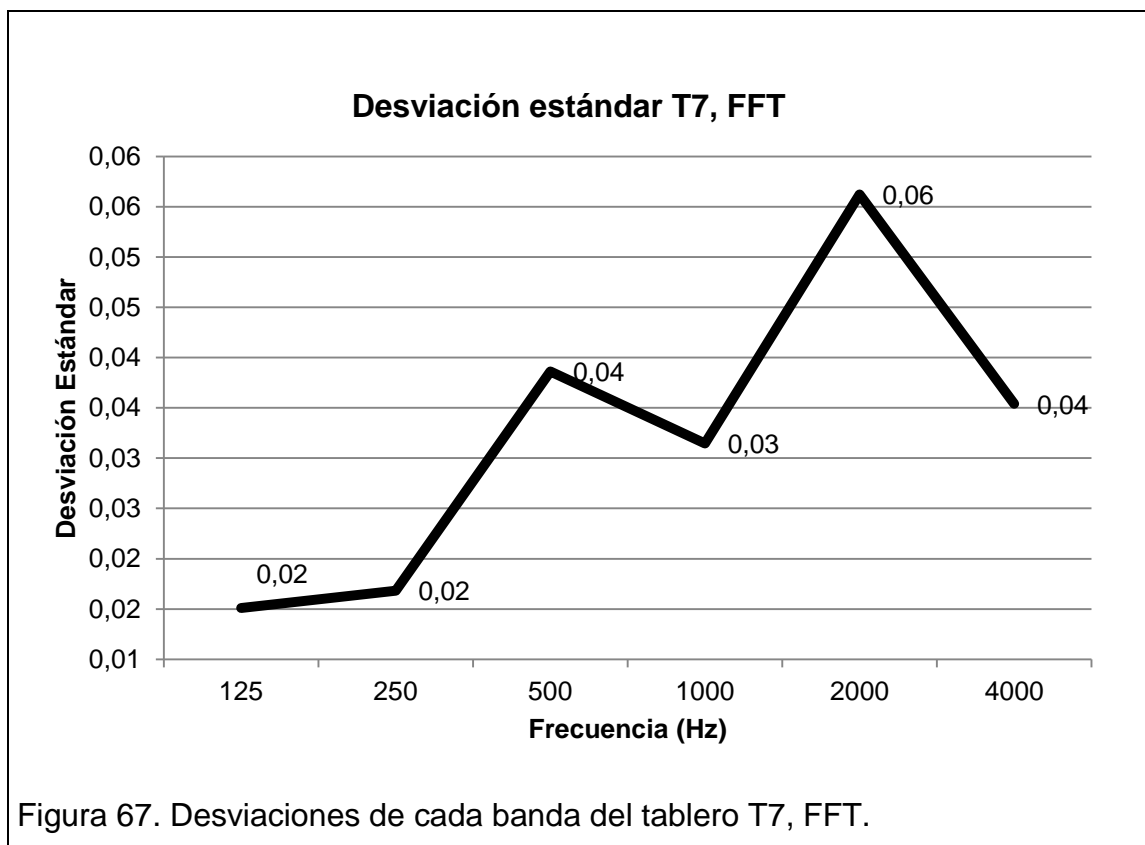


FFT T7

Tabla 42. Coeficientes de absorción T7 FFT.

Frecuencia	125	250	500	1000	2000	4000
Coeficientes de absorción, FFT T7.	0,04	0,06	0,10	0,28	0,76	0,71





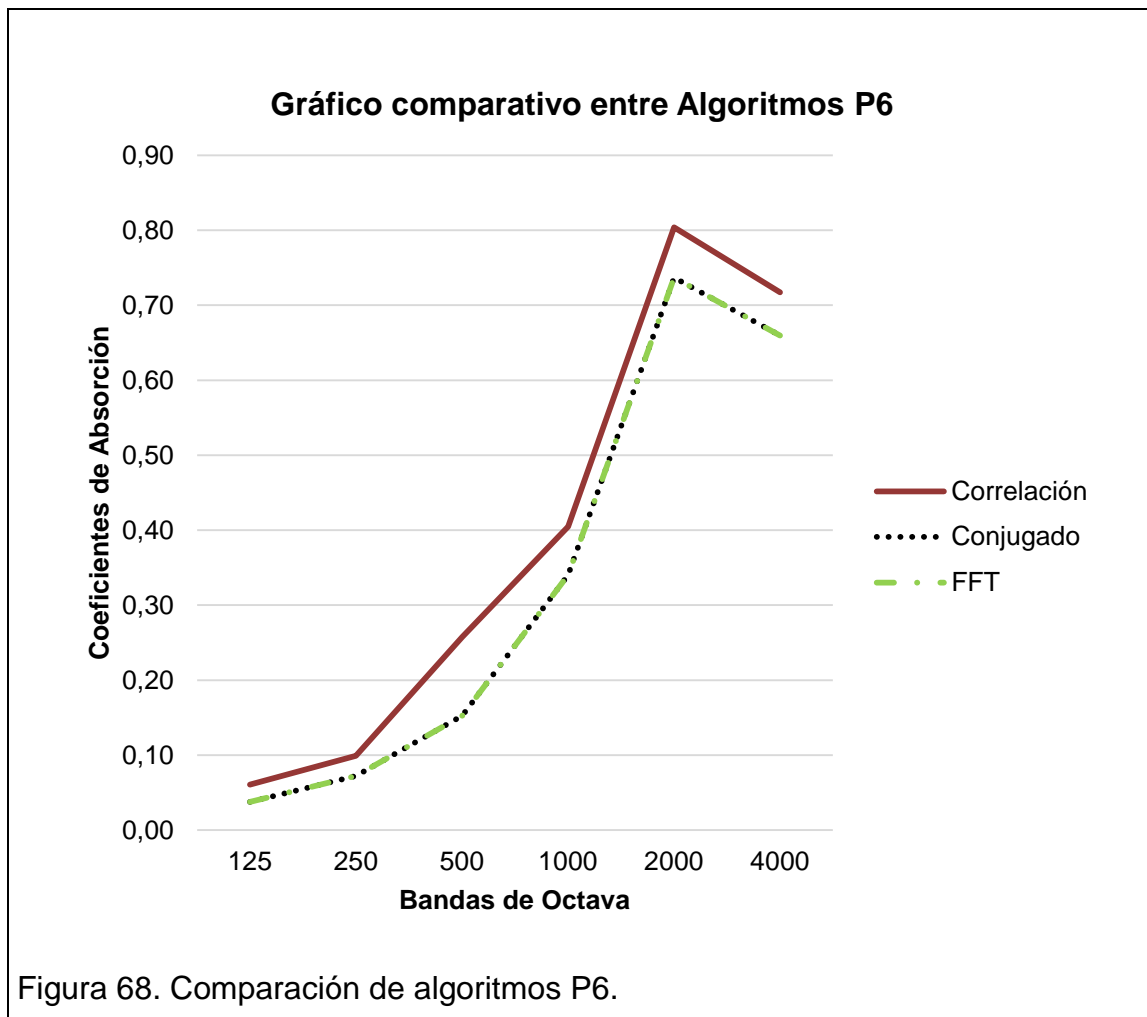
3.2.4. Consideraciones de resultados

Las gráficas de absorción por frecuencia muestran en los tres tableros un comportamiento similar, siendo crecientes hasta el punto de mayor absorción en 2KHz y luego decaer a partir de 4KHz. La absorción es mucho más eficiente en medias altas frecuencias que en bajas frecuencias, ocasionado por la falta de porosidad, espesor y densidad de los tableros.

La desviación estándar en las medidas de los tableros P6 y T7 muestran que en las bandas entre 500 Hz y 2KHz, es mucho mayor, siendo esto ocasionado por la captación distinta de cada micrófono en estas bandas al momento de la calibración del sistema y del altavoz del tubo de Kundt. A pesar de esto, la desviación es pequeña. En cambio en el tablero P10 la desviación se torna mayor en la banda de 500Hz, ocasionado por la densidad y espesor del material, pero la desviación es tan alta debido a la tercera medición, la cual si se la suprime la desviación disminuye de 0.09 a 0.04.

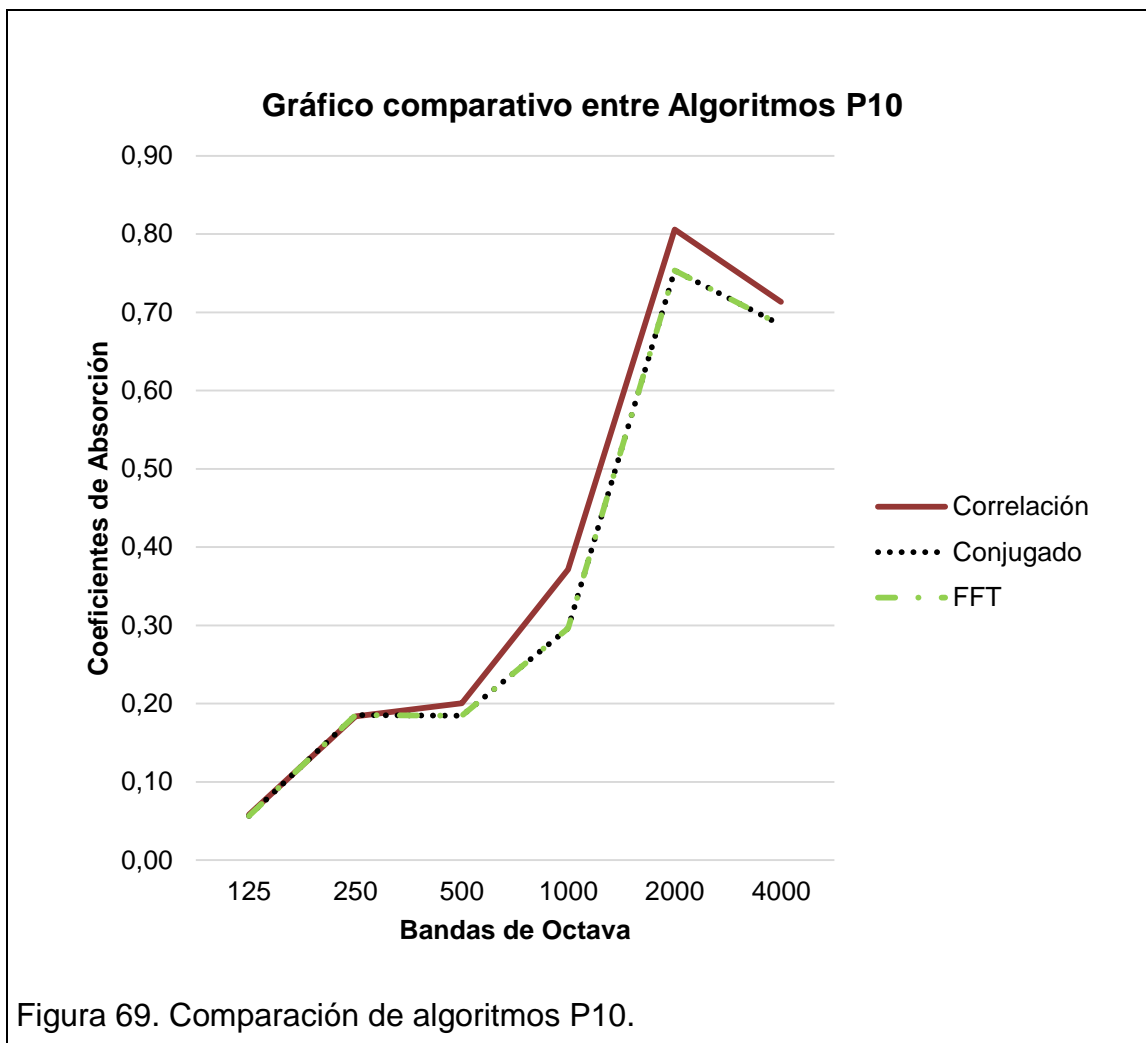
3.2.5. Gráficos de Comparación entre Algoritmos

Tablero P6



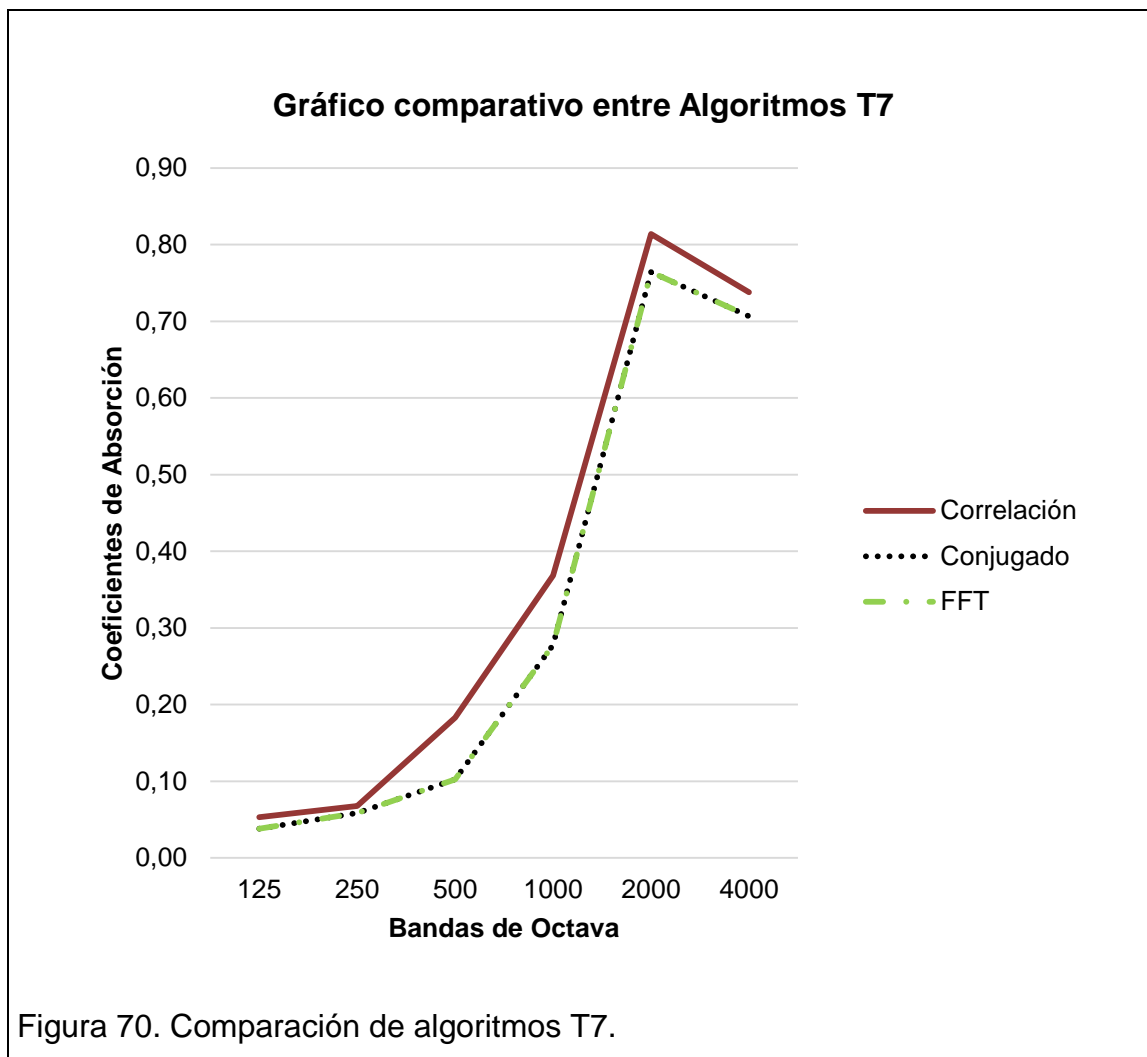
Los tres algoritmos muestran la misma tendencia de absorción, mostrando que el tablero posee mayor absorción en altas frecuencias y es bastante bajo en bajas frecuencias, su espesor. Tanto el algoritmo conjugado como el algoritmo FFT, muestran valores iguales, siendo estos distintos al algoritmo de correlación por lo que podemos deducir que existe un grado de error. El sector de mayor diferencia es en 500 Hz y 1KHz.

Tablero P10



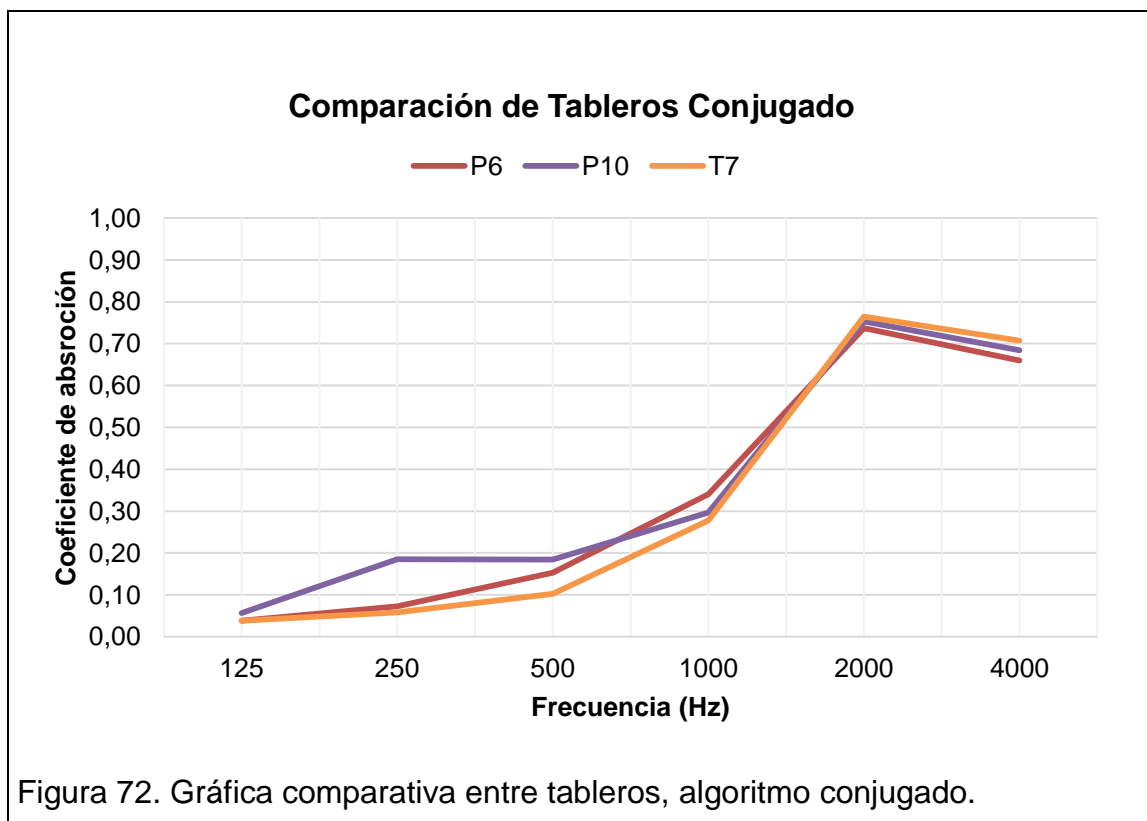
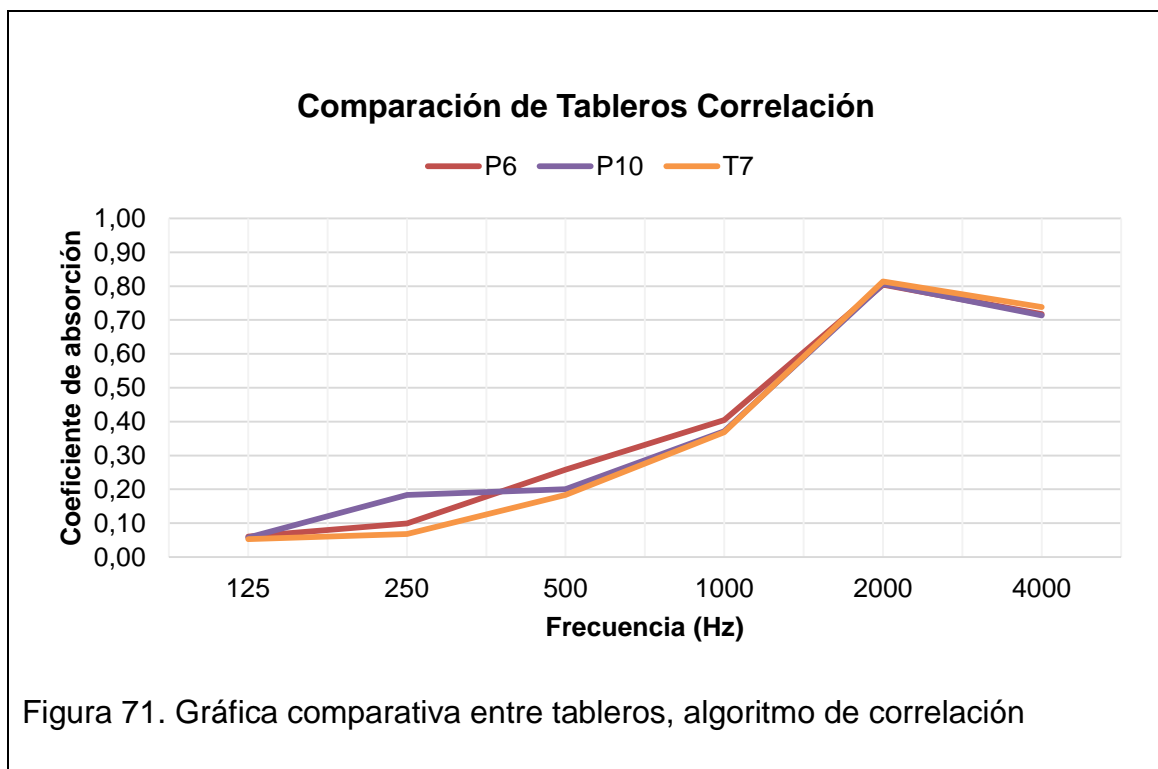
La diferencia es mucho menor entre los tres algoritmos, así mismo los algoritmos FFT y conjugado poseen valores iguales, pero estos difieren muy poco de algoritmo de correlación. La tendencia sigue siendo la misma comparada con el tablero de polialuminio de 6mm, de una mayor absorción en altas frecuencias, pero con la diferencia principal que la absorción en 250 Hz aumentó. Esto puede deberse principalmente al espesor de material. La absorción del tablero es eficiente desde los 1000Hz en adelante.

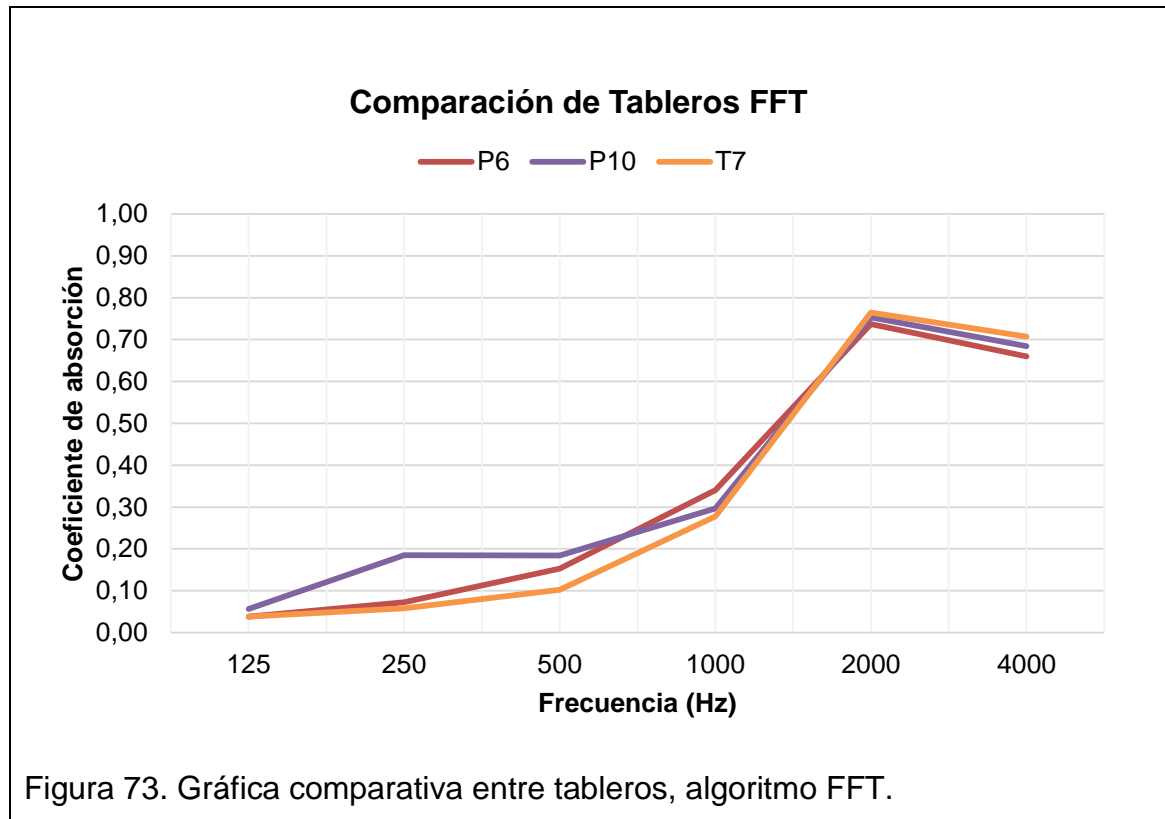
Tablero T7



El grado de diferencia entre los tres algoritmos es similar a la del tablero de polialuminio de 6mm, así mismo todos siguen una misma tendencia de poseer mayor absorción en altas frecuencias que en bajas frecuencias. El sector de mayor diferencia es entre los 500 Hz y 1KHz, así como con el tablero de 6mm, se puede deducir que los tableros de espesor similar a 6mm poseen esta diferencia en los coeficientes ocasionado posiblemente por resonancias del material en el tubo o reflexiones generadas por el material debido a su composición.

3.2.6. Comparación de Tableros por algoritmos.





4. APLICACIONES

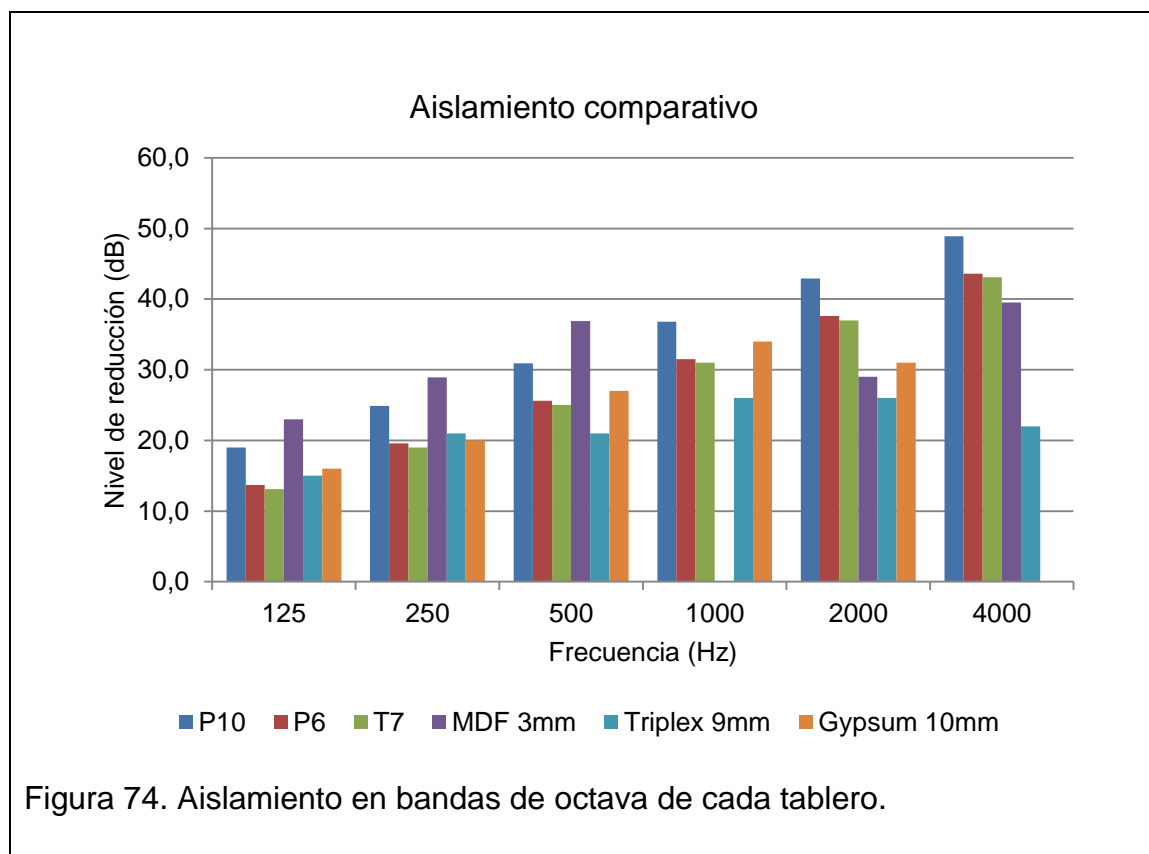
Acorde a los datos y los resultados obtenidos, podemos determinar posibles aplicaciones para los paneles. Expondremos las posibles aplicaciones tanto para el acondicionamiento acústico y el aislamiento acústico.

Aislamiento

La comparación realizada es ente los factores de R, o de reducción sonora en base a la frecuencia, en el rango de 125 Hz a 4KHz.

Tabla 43. Aislamiento entre materiales.

Frecuencia	125	250	500	1000	2000	4000
P10	19,0	24,9	30,9	36,8	42,9	48,9
P6	13,7	19,6	25,6	31,5	37,6	43,6
T7	13,1	19,0	25,0	31,0	37,0	43,1
MDF 3mm	23,0	28,9	36,9	0,0	29,0	39,5
Triplex 9mm	15,0	21,0	21,0	26,0	26,0	22,0
Gypsum 10mm	16,0	20,0	27,0	34,0	31,0	0,0

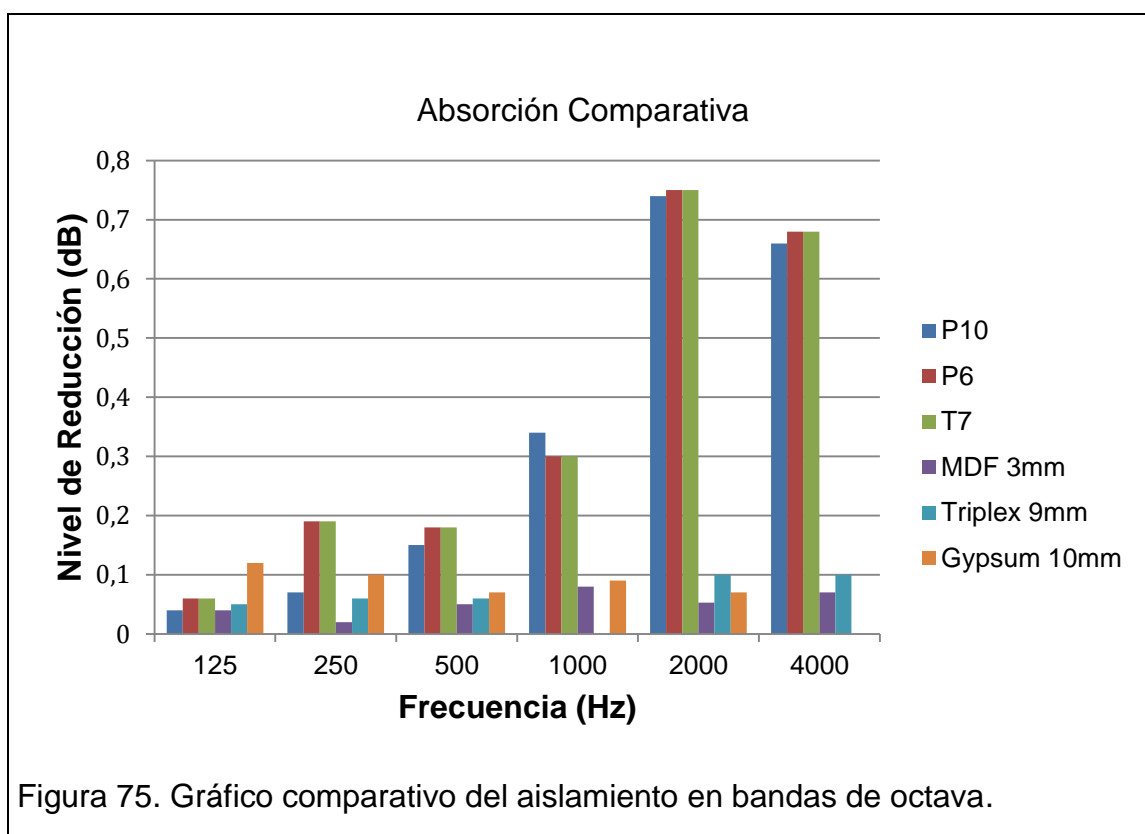


Acondicionamiento

La comparación realizada es entre los coeficientes de absorción, en base a la frecuencia, en el rango de 125 Hz a 4KHz.

Tabla 44. Coeficientes de absorción entre materiales.

Frecuencia	125	250	500	1000	2000	4000
P10	0,04	0,07	0,15	0,34	0,74	0,66
P6	0,06	0,19	0,18	0,30	0,75	0,68
T7	0,06	0,19	0,18	0,30	0,75	0,68
MDF 3mm	0.04	0.02	0.05	0.08	0.053	0.07
Triplex 9mm	0,05	0,06	0,06	0,10	0,10	0,10
Gypsum 10mm	0,12	0,10	0,07	0,09	0,07	0,00



4.1. Aplicaciones en acondicionamiento.

Acorde a los datos obtenidos de absorción y de acuerdo con las características físicas de los tableros como su coeficiente de elasticidad, además de ser de fácil instalación y construcción, el uso, más eficiente sería en el tratamiento de bajas frecuencias con el uso como membrana acústica y resonador diafragmático de baja frecuencia. Además para el tratamiento en altas frecuencias

Acorde a la ecuación 21:

$$f_0 = \frac{600}{\sqrt{md}}$$

(Ecuación 21)

Donde:

m Masa superficial (kg/m^2)

d Distancia entre el panel y el muro (cm)

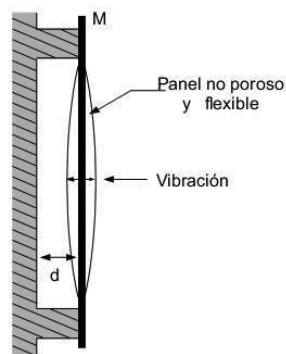


Figura 76. Resonador diafragmático o de membrana.

Tomado:

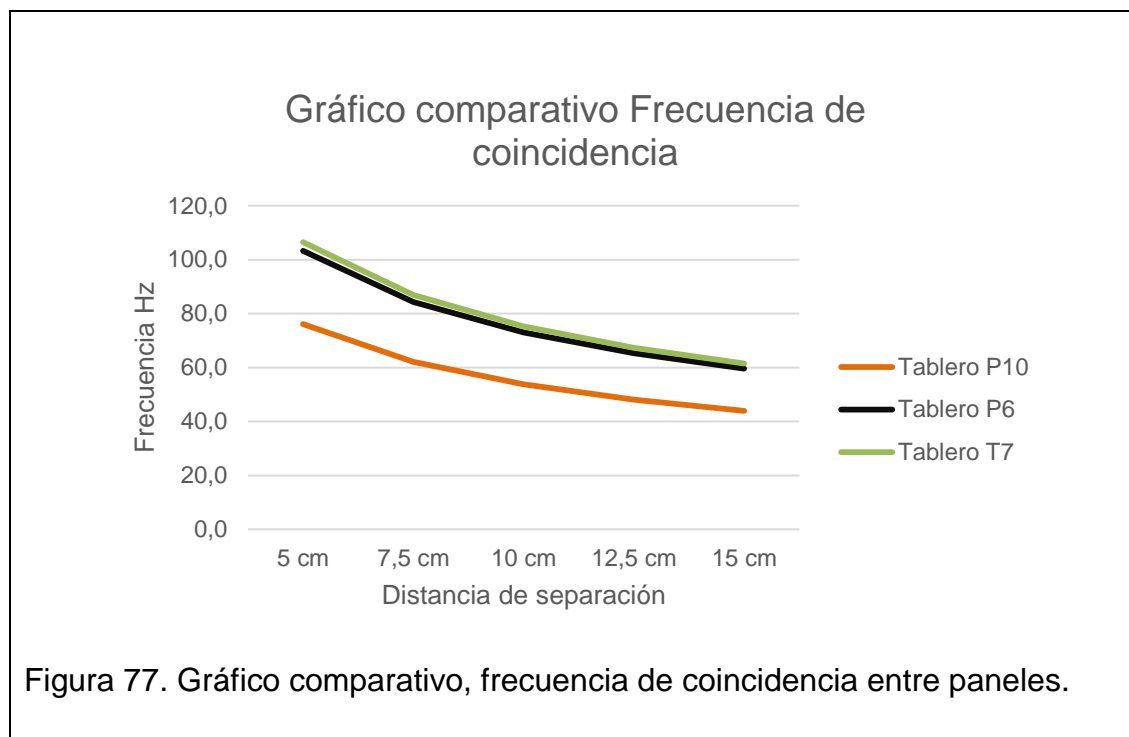
http://tanis.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_08_09/io6/public_html/Paginas/reso.html

La frecuencia de resonancia f_0 , dependerá del diseño. Tomando en cuenta las variables de la distancia entre el panel y el muro. Y la masa superficial de cada panel, generando que esta aumente o disminuya, dependiendo de la necesidad y el diseño de tratamiento que se necesite. A continuación en la presenta tabla

se muestra la variación de f_0 acorde a la distancia de instalación más comúnmente utilizados.

Tabla 45. Frecuencias de coincidencia acorde a la distancia de separación

Distancia	5 cm	7,5 cm	10 cm	12,5 cm	15 cm
f_0 Tablero de polialuminio de 10 mm de espesor.	76,1	62,1	53,8	48,1	43,9
f_0 Tablero de polialuminio de 6 mm de espesor.	103,2	84,3	73,0	65,3	59,6
f_0 Tablero de TetraPak de 7 mm de espesor	106,5	86,9	75,3	67,3	61,5



4.2. Aplicaciones en Aislamiento.

El aislamiento constante entre el rango de 125 Hz a 4KHz y su frecuencia crítica elevada por sobre este rango, se han optado distintas aplicaciones, principalmente en atacar el ruido aéreo.

Particiones simples y compuestas

Acorde al aislamiento de los tableros de TetraPak y polialuminio, se puede optar una opción útil como elemento principal en juntas de paredes simples o compuestas con materiales absorbentes como la fibra de vidrio o la lana mineral. Para el aislamiento y reducción del ruido aéreo generado por una fuente externa al recinto.

Así mismo, una sub aplicación en el diseño de particiones compuestas, se podría dar uso en el diseño y construcciones de puertas acústicas, así de reductor de ruido aéreo.



Figura 78. Partición compuesta, con lana de vidrio en su interior.

Recuperado de : www.construnario.com, 2014

5. ANÁLISIS ECONÓMICO

5.1. Análisis económico de los tableros

Los siguientes datos han sido tomados de la empresa nacional PRO ACÚSTICA, acorde al costo actual de la mano de obra en dólares americanos. Los costos de los materiales, instalación y recursos para el montaje, se presentan incluidos en la siguiente tabla una comparativa entre los costos de instalación por metro cuadrado de los distintos tableros:

Tabla 46. Comparación de precios

Tablero	Dimensiones	Precio Nominal (Dólares americanos)
P6	1,10 x 2,30	19,04
P10	1,10 x 2,30	24,64
T7	1,10 x 2,30	17,82
Triplex 5mm	1,22x 2,40	15,64
Triplex 6mm	1,22x 2,40	21,82
Triplex 9mm	1,22x 2,40	27,25
Gypsum 12mm	1,22x 2,40	11,75

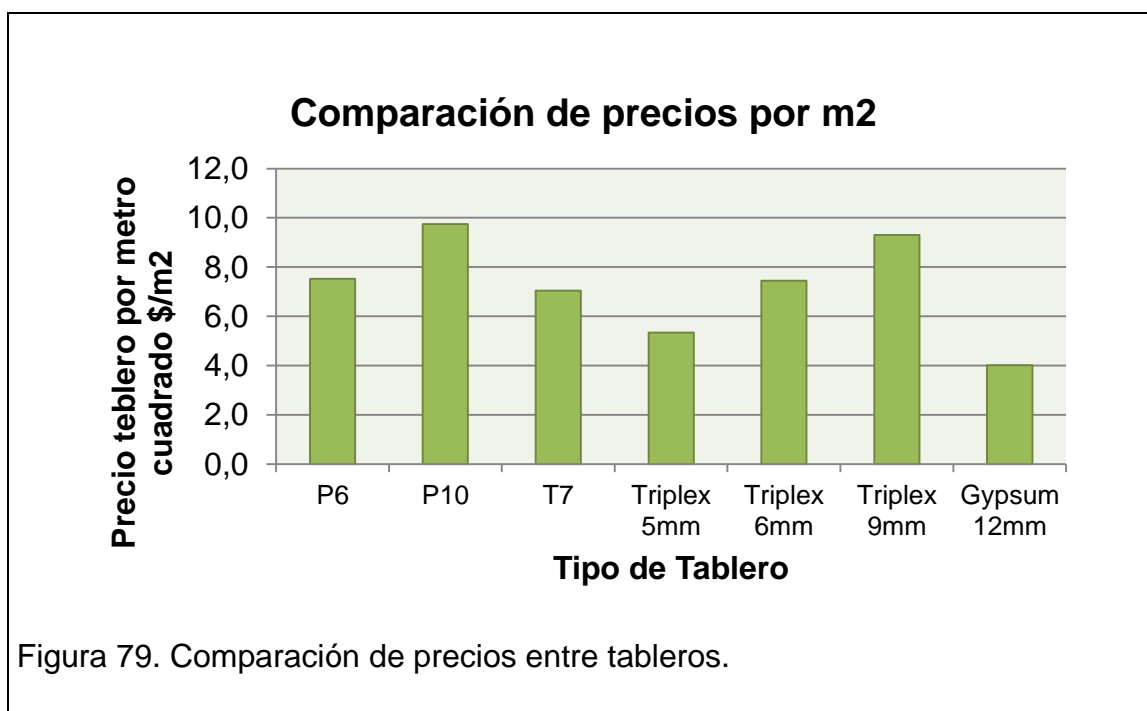
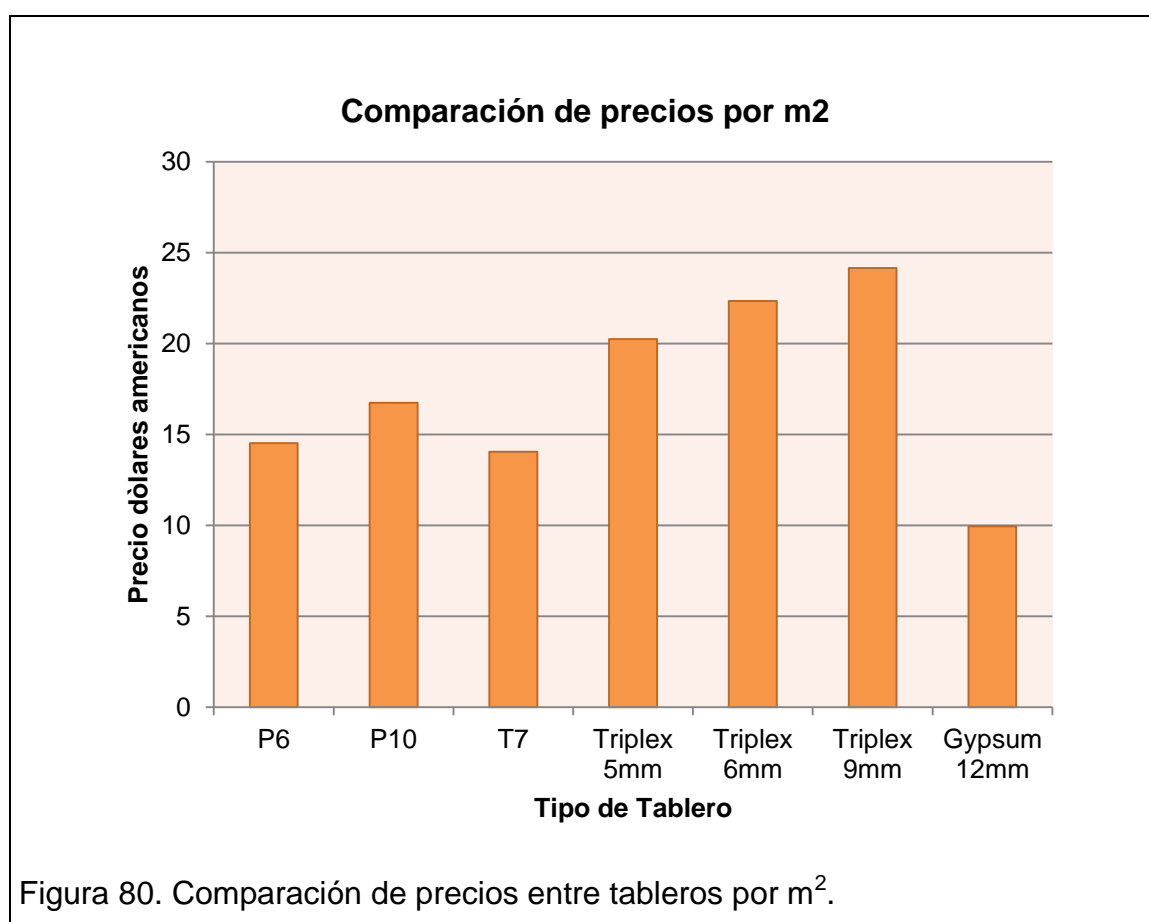


Tabla 47. Comparación de precios por metro cuadrado.

Tablero	Precio Tablero por m ² (\$)	Precio Mano obra con instalación por m ² (\$)	Precio Total de instalación por m ² (\$)
P6	7,53	7	14,53
P10	9,74	7	16,74
T7	7,04	7	14,04
Triplex 5mm	5,25	15	20,25
Triplex 6mm	7,33	15	22,33
Triplex 9mm	9,15	15	24,15
Gypsum 12mm	3,95	6	9,95



5.2. Costo de la realización de la investigación.

5.2.1. Costo Nominal

Tabla 48. Descripción del costo nominal de la investigación.

Etapa de recopilación de material

Detalle	Valor Unitario	Cantidad	Subtotal
Tablero Polialuminio 10mm	\$ 16,00	1 Tablero	\$ 24,04
Tablero Polialuminio 6mm	\$ 11,00	1 Tablero	\$ 19,04
Tablero de TetraPak 7mm	\$ 9,00	1 Tablero	\$ 17,92
Cortes de probetas para medición de elasticidad	\$ 1,35	9 Probetas	\$ 12,15
Cortes de probetas para medición de densidad	\$ 1,35	18 Probetas	\$ 24,30
			\$ 97,45

Etapa de medición

Detalle	Valor Unitario	Cantidad	Subtotal
Medición Densidad Contracción, laboratorio PUCE	\$ 5,00	9 Mediciones	\$ 45,00
Medición Tracción Paralela, laboratorio PUCE	\$ 25,00	9 Mediciones	\$ 225,00
Alquiler Ecuilizador Klark Teknik DN370	\$ 30,00	2 Días	\$ 60,00
Alquiler Interface Roland duo Capture	\$ 30,00	2 Días	\$ 60,00
Generador de Ruido Rosa AudioTest	\$ 4,99	1 Licencia	\$ 4,99
Horas de sala insonorizada	\$ 25,00	10 Horas	\$ 250,00
Alquiler 2 micrófonos MM1	\$ 60,00	2 Días	\$ 120,00
Alquiler Tubo de Kundt	\$ 100,00	2 Días	\$ 200,00
			\$ 964,99

Etapa de desarrollo

Detalle	Valor Unitario	Cantidad	Subtotal
Electricidad	\$ 0,09	300 Horas	\$ 27,00
Internet	\$ 24,00	11 Meses	\$ 264,00
Libros	\$ 15,00	11 Libros	\$ 165,00
			\$ 456,00
Total			\$ 1.518,44

5.2.2. Costo Real

Debido a la posibilidad de la utilización de los materiales y el espacio en la UDLA (Universidad de las Américas) se logró reducir gastos para el desarrollo de este proyecto de titulación.

Tabla 49. Descripción del costo real de la investigación.

Etapa de recopilación de material

	Valor Unitario	Cantidad	Subtotal
Tablero Polialuminio 10mm	\$ 16,00	1 Tablero	\$ 24,04
Tablero Polialuminio 6mm	\$ 11,00	1 Tablero	\$ 19,04
Tablero de TetraPak 7mm	\$ 9,00	1 Tablero	\$ 17,92
Cortes de probetas para medición de elasticidad	\$ 1,35	9 Probetas	\$ 12,15
Cortes de probetas para medición de densidad	\$ 1,35	18 Probetas	\$ 24,30
			\$ 97,45

Etapa de medición

Detalle	Valor Unitario	Cantidad	Subtotal
Medición Densidad Contracción, laboratorio PUCE	\$ 5,00	9 Mediciones	\$ 45,00
Medición Tracción Paralela, laboratorio PUCE	\$ 25,00	9 Mediciones	\$ 225,00
Alquiler Ecuilizador Klark Teknik DN370	\$ 30,00	2 Días	\$ 60,00
Alquiler Interface Roland duo Capture	\$ 30,00	2 Días	\$ 60,00
Generador de Ruido Rosa AudioTest	\$ 4,99	1 Licencia	\$ 4,99
Horas de sala insonorizada	\$ 0,00	10 Horas	\$ 0,00
Alquiler 2 micrófonos MM1	\$ 0,00	2 Días	\$ 0,00
Alquiler Tubo de Kundt	\$ 0,00	2 Días	\$ 0,00
			\$ 394,99

Etapa de desarrollo

Detalle	Valor Unitario	Cantidad	Subtotal
Electricidad	\$ 0,09	300 Horas	\$ 27,00
Internet	\$ 24,00	11 Meses	\$ 264,00
Libros	\$ 0,00	11 Libros	\$ 0,00
			\$ 291,00
		Total	\$ 783,44

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Mediante los procesos de medición del coeficiente de absorción en el Tubo de Kundt, los algoritmos determinados en la sección 3.2, la normativa UNE-EN ISO 10354-2 y el cálculo de los factores de transmisión acorde al procedimiento de cálculo detallado en la sección 3.1 según a la normativa UNE-EN 12354-1, se logró definir las tablas y gráficas, como se observa en la sección 3, “resultados y análisis”, para absorción y transmisión, de los tableros de Polialuminio y TetraPak.
- La utilización del tubo de Kundt, con el procedimiento de la función de transferencia, para la obtención de los coeficientes de absorción, mostró ventajas logísticas y de precisión por; la existencia de 3 tipos de algoritmos para la obtención de los coeficientes, por el poco uso de material, poca influencia del recinto en donde se realice la medición y la disponibilidad de herramientas de precisión para la etapa de calibración.
- Dentro del cálculo de la función de transferencia de los audios grabados por el software TuboSoft, se puede concluir que entre el algoritmo de correlación y los algoritmos conjugado y FFT, existe un grado de error notable de entre 0,02 a 0,1 de error en el eje del coeficiente de absorción, dependiendo de la banda de frecuencia y el tablero analizado en las mediciones realizadas, más no entre los algoritmos conjugado y FFT, ya que a pesar de ser métodos de función de transferencia distinto muestran valores similares, concluyendo que la curva de absorción definitiva puede ser tomada de cualquiera de estos algoritmos.
- Al aplicar el método de ley de masas al objeto de estudio se logró estimar un valor referencial para cada tablero índice de reducción total de 33 dB para el tablero P10, 28 dB para P6 y 27 dB. para T7, en base a las curvas de aislamiento, detalladas en la sección 3.1.
- El uso de la ley de masas para la determinación del factor R, o nivel de reducción sonora, muestra un método rápido y de bajo costo, para la obtención de la frecuencia crítica y la curva de aislamiento. Pero este

método es dependiente de las mediciones realizadas de los valores del módulo de elasticidad, densidad volumétrica, masa superficial y dimensión de espesor, por lo que si uno de estos muestran valores inconsistentes y con desviaciones elevadas entre cada medición, el factor R, no será real.

- La tendencia en las curvas de absorción en los tres tableros P6, P10 y T7, muestran un incremento desde los 1KHz hasta los 4KHz. Y una baja eficiencia de absorción entre 125 Hz a 500Hz. Este comportamiento viene determinado por sus características físicas, teniendo en cuenta su densidad y espesor.
- Al contrastar las propiedades acústicas de los tableros P6, P10 y T7, podemos definir su posible uso en el área del acondicionamiento y aislamiento acústico, de acuerdo a los datos obtenidos concluimos que, los tableros de Tectan, son una alternativa a las planchas de madera triplex, debido a:
 - A pesar que los tableros de Tectan son de un material reciclado, su costo nominal es elevado, pero al ser de fácil instalación, posibilidad de reutilización el material sobrante y desperdicios para la fabricación de más tableros, la mano de obra disminuye siendo más económico en el precio de instalación por metro cuadrado.
 - Poseen un aislamiento mucho más uniforme en el rango eficaz de 125 Hz a 4KHz, sin una caída de aislamiento ocasionado por la frecuencia crítica en el rango de los 9KHz, muy por sobre el rango de estudio en los tableros P6, P10 y T7.
 - Por ser un panel de tipo fibra-base y poseer en su interior aluminio y polietileno, su elasticidad es mayor, posee la capacidad de ser un dispositivo para el tratamiento de bajas frecuencias como resonador diafragmático o de membrana, de entre 70 a 100 Hz dependiendo del tablero y la distancia de separación de la pared.

- El desconocimiento de las características técnicas asociadas a los tableros y la existencia de una sola empresa de manufacturación y fabricación de paneles de Tectan hace que sus costos sean mucho más elevados que las planchas de gypsum o cartón yeso como material para el diseño de particiones simples y compuestas, las cuales poseen una gran oferta y demanda en el mercado ecuatoriano y la gran cantidad de industrias que lo fabrican. Aumentando el reciclaje y empresas que fabriquen tableros de Tectan, se logrará reducir su costo y disminuir en cierta medida el impacto ambiental, mediante la reutilización de desechos.

Recomendaciones

- La cantidad de mediciones realizadas por la posible incertidumbre existente entre mediciones deberá ser al menos tres para cada caso, para que la predicción posterior sea mucho más exacta y la desviación estándar entre valores sea mucho más real.
- Determinar las posibles causas de una desviación elevada en la etapa de la obtención de los datos, ocasionado por resonancias generadas por la muestra mal colocada, filtraciones y cancelación de información entre la captación de los micrófonos, para el poder saber si es necesario realizar una medición nuevamente. Para evitar el medir nuevamente, considerar tomar el tiempo necesario al colocar las probetas en el porta muestras del tubo de Kundt, de manera muy precisa, debido a que puede existir posteriormente variaciones en los datos.
- En la etapa de calibración del altavoz con el uso del software de predicción, tener presente, llegar a una respuesta de frecuencia promedio entre los dos micrófonos, para evitar interacción posibles cortes o incrementos de nivel en frecuencias determinadas.
- En el caso en el que los coeficientes de absorción varíen mucho entre algoritmos en todo el rango, observar la desviación existente entre las mediciones realizadas. Si la variación de coeficientes es

elevada en un bandas de octava puntuales, pueden ser por dos razones; la primera es, la superposición entre la curva de captación de los micrófonos, al momento de la calibración y la segunda, por la interacción de las funciones de transferencia, al momento de la aplicación del algoritmo.

- Para determinar la posibilidad del uso los tableros en viviendas, es recomendable realizar el estudio acerca de la seguridad de su utilización en hogares como su grado inflamabilidad y salubridad de los tableros según su uso y maltrato por agentes externos como el clima, cambios de temperatura, el paso del tiempo, montaje, instalación y manipulación. Por si el material desprende residuos que puedan ser nocivos para la salud.
- Determinar una posible aplicación en el área de acústica urbanística, para su uso como barreras acústicas, de los tableros de polialuminio de mayor espesor, que cumplan con las características:
 - Posean una densidad superficial mayor a 20Kg/m^2 .
 - El tablero no posee agujeros o aperturas.
 - La dimensión horizontal es mayor a la dimensión vertical

Detallados en la normativa ISO 9613-2 bajo el nombre de *Attenuation of sound during propagation outdoors* parte 2: *General method of calculation*. Y como material principal en la construcción de aristas superiores de tipo: T, cilíndrica, bolet, asimétrica, desfasador, molinet y de multidifracción, en barreras acústicas, para la difracción sonora.

REFERENCIAS

- Alton Everest, F. Pohlmann Ken, C. (2009). *Master Handbook of Acoustics*. United States of America: The McGraw-Hill Companies.
- Bepots, Blog. (2013). Reciclado de envases de TetraPak. Recuperado el 19 De Enero del 2015 de <http://blog.bepots.com/reciclado-de-envases-tetra-pak/>
- Cámara Industrial de cerámica roja (CICR). (2005). *Aislamiento aéreo de sonidos con mampostería cerámica, Ficha técnica N.5*.
- Carrión, A. (1998). *Diseño acústico para espacios arquitectónicos*. Barcelona, España: Ediciones de la Universidad Politécnica de Catalunya.
- Cueva, D. García C. (2014). *Desarrollo de una metodología de medición para la determinación de coeficientes de absorción y STL de materiales para la construcción en Ecuador, por medio del tubo de impedancia y mediciones in situ*. Ecuador: Universidad de las Américas.
- Ekos Negocios. (2014). Aumenta el reciclaje de los envases de TetraPak. Recuperado el 13 de Julio del 2015 de <http://www.ekosnegocios.com/Negocios/verArticuloContenido.aspx?idArt=291>
- Llinares, J., Llopis, A y Sancho, J. (2011). *Acústica arquitectónica y urbanística*. España: Editorial Universitat Politècnica de Valencia.
- Long, M. (2006). *Architectural Acoustics*. Burlington, MA, United States of America: Elsevier Academic Press.
- Miyara, F. (2004). *Acústica y sistemas de sonido*. Bogotá, Colombia: Fundación Decibel.
- Recuero, M. (2000). *Ingeniería Acústica*. España: Editorial Parafino, ITP (International Thomson Publishing Company).
- Soler, S. (2011-2012). *Teoría del aislamiento 1: Definición y paredes simples*. España: La Salle, Universitat Ramon Llull.
- TetraPak. (s.f). TetraPak what is made of. Recuperado el 19 De Enero del 2015 de <http://campaign.tetrapak.com/lifeofapackage/what-its-made-of/>

- TetraPak. (s.f). Las seis capas del TetraPak. Recuperado el 19 De Enero del 2015 de <http://www.tetrapak.com/co/las6capasdeproducción>
- TetraPak. (s.f). Envases del TetraPak. Recuperado el 19 De Enero del 2015 de <http://www.tetrapak.com/mx/products-and-services>
- UNE. (2000). UNE EN 12354-1:2000. *Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos*. Parte 1: Aislamiento acústico del ruido aéreo entre recintos.
- UNE. (2000). UNE EN 10534-2:1998. *Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia*. Parte 2: Método de la función de transferencia.
- UNE. (2004). UNE EN 354. *Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante*.
- Vanlanduit, S. (s.f). *Acoustic Lesson 3*. Vrije Universiteit Brussels.

ANEXOS

Anexo1. Código para la obtención de los coeficientes de absorción en bandas de octava

```
%Delimitación de los límites inferior y superior
```

```
li125=125/sqrt(2);  
ls125=125*sqrt(2);  
li250=250/sqrt(2);  
ls250=250*sqrt(2);  
li500=500/sqrt(2);  
ls500=500*sqrt(2);  
li1k=1000/sqrt(2);  
ls1k=1000*sqrt(2);  
li2k=2000/sqrt(2);  
ls2k=2000*sqrt(2);  
li4k=4000/sqrt(2);  
ls4k=4000*sqrt(2);
```

```
%contadores para valores positivos
```

```
cont1=0;  
cont2=0;  
cont3=0;  
cont4=0;  
cont5=0;  
cont6=0;
```

```
%contadores para valores negativos negativos
```

```
cont1n=0;  
cont2n=0;  
cont3n=0;  
cont4n=0;  
cont5n=0;  
cont6n=0;
```

```
%Determinación de límites de los coeficientes
```

```
for a=1:size(f,2)  
    if alpha(a) >= 1;  
        alpha(a) = 1;
```

```

end
  if alpha(a) <= 0;
    alpha(a) = 0;
  end
end

%Discretización de valores
for a=1:size(f,2)
  if(abs(f(a))>1i125 && abs(f(a))<1s125)      %125Hz
    if f(a)<0
      cont1n=cont1n+1;
      nsum125(cont1n)=alpha(a);
    end
    if f(a)>0
      cont1=cont1+1;
      sum125(cont1)=alpha(a);
    end
  end
end

  if(abs(f(a))>1i250 && abs(f(a))<1s250)      %250Hz
    if f(a)<0
      cont1n=cont1n+1;
      nsum250(cont1n)=alpha(a);
    end
    if f(a)>0
      cont1=cont1+1;
      sum250(cont1)=alpha(a);
    end
  end
end

  if(abs(f(a))>1i500 && abs(f(a))<1s500)      %500Hz
    if f(a)<0
      cont1n=cont1n+1;
      nsum500(cont1n)=alpha(a);
    end
    if f(a)>0
      cont1=cont1+1;
      sum500(cont1)=alpha(a);
    end
  end
end

```



```

end

if(abs(f(a))>1i1k && abs(f(a))<1s1k)           %1000Hz
    if f(a)<0
        cont1n=cont1n+1;
        nsum1k(cont1n)=alpha(a);
    end
    if f(a)>0
        cont1=cont1+1;
        sum1k(cont1)=alpha(a);
    end
end

if(abs(f(a))>1i2k && abs(f(a))<1s2k)           %2000Hz
    if f(a)<0
        cont1n=cont1n+1;
        nsum2k(cont1n)=alpha(a);
    end
    if f(a)>0
        cont1=cont1+1;
        sum2k(cont1)=alpha(a);
    end
end

if(abs(f(a))>1i4k && abs(f(a))<1s4k)           %4000Hz
    if f(a)<0
        cont6n=cont6n+1;
        nsum4k(cont6n)=alpha(a);
    end
    if f(a)>0
        cont6=cont6+1;
        sum4k(cont6)=alpha(a);
    end
end

end

```

```
%Valores de las bandas de octava obtenidos del promedio + desviación  
estándar
```

```
Valor125 = mean(sum125)+ std(sum125)
```

```
Valor250 = mean(sum250)+ std(sum250)
```

```
Valor500 = mean(sum500)+ std(sum500)
```

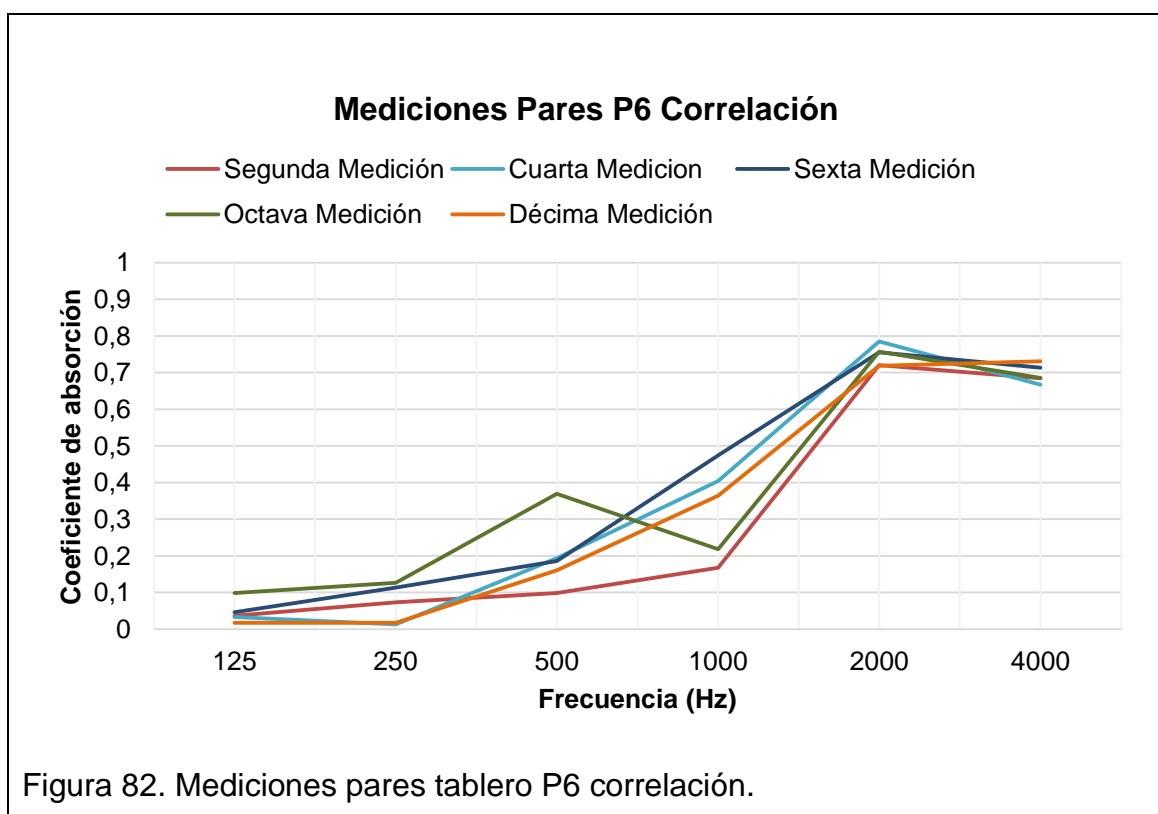
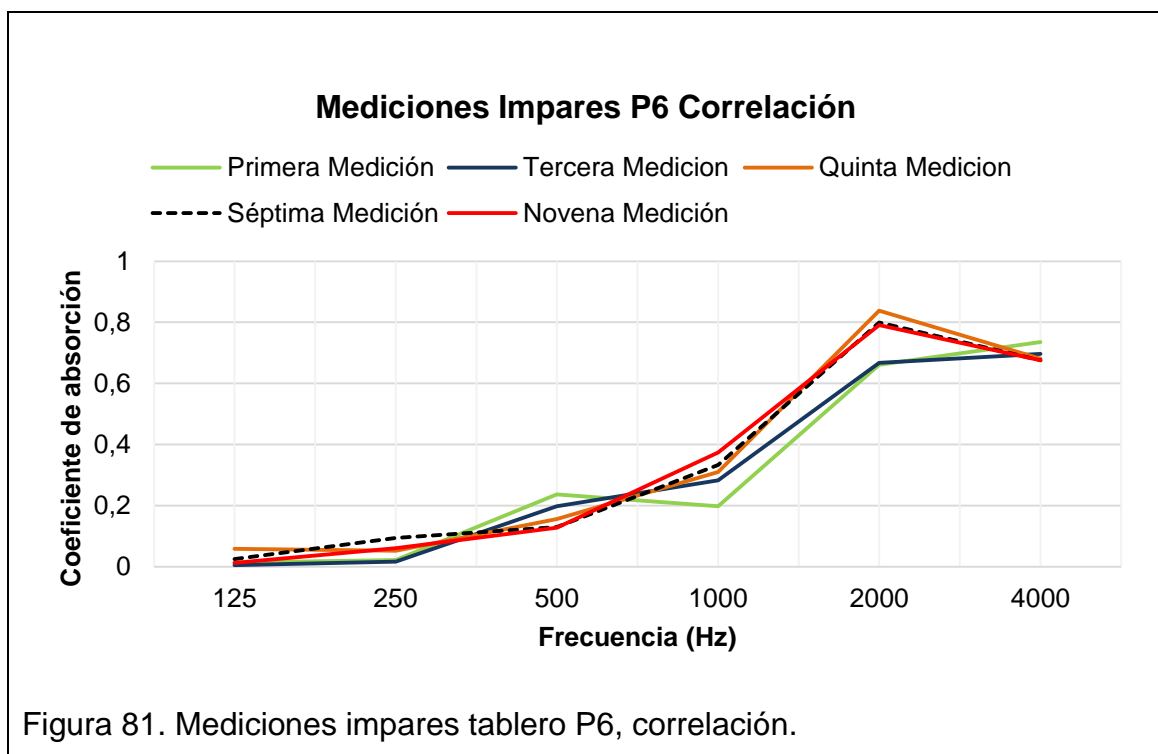
```
Valor1k = mean(sum1k)+ std(sum1k)
```

```
Valor2k = mean(sum2k)+ std(sum2k)
```

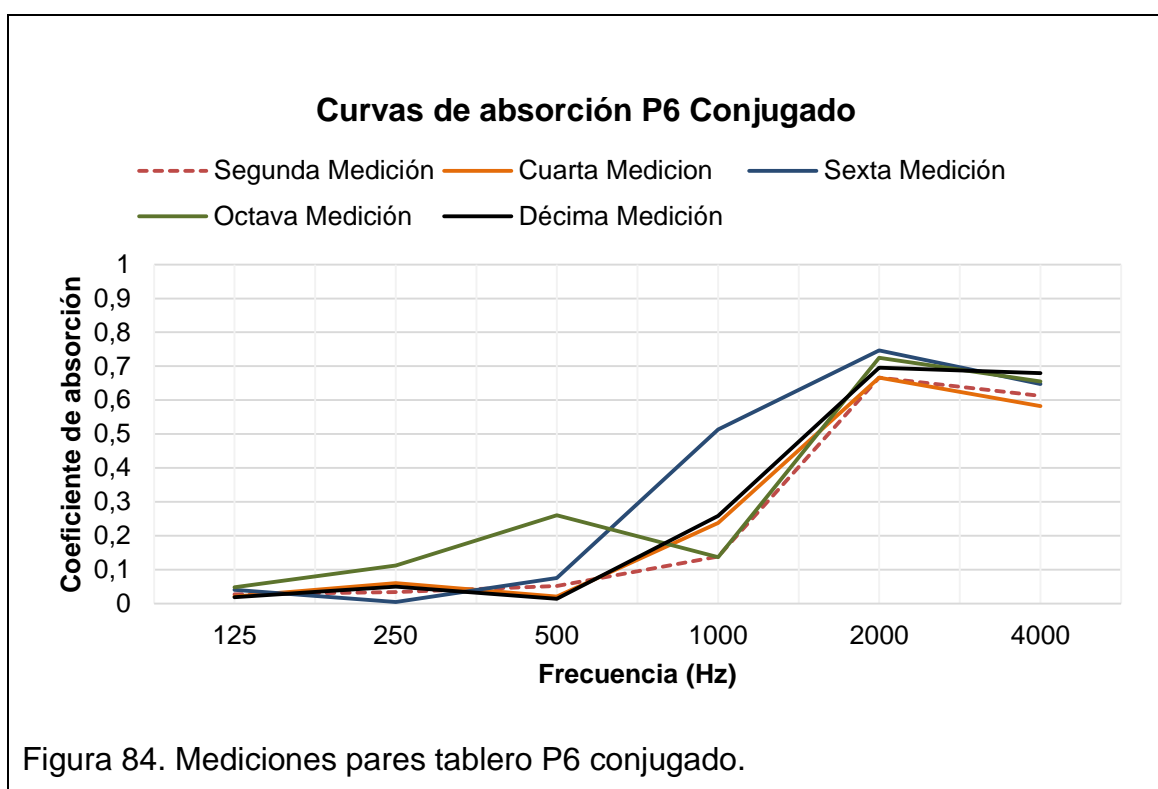
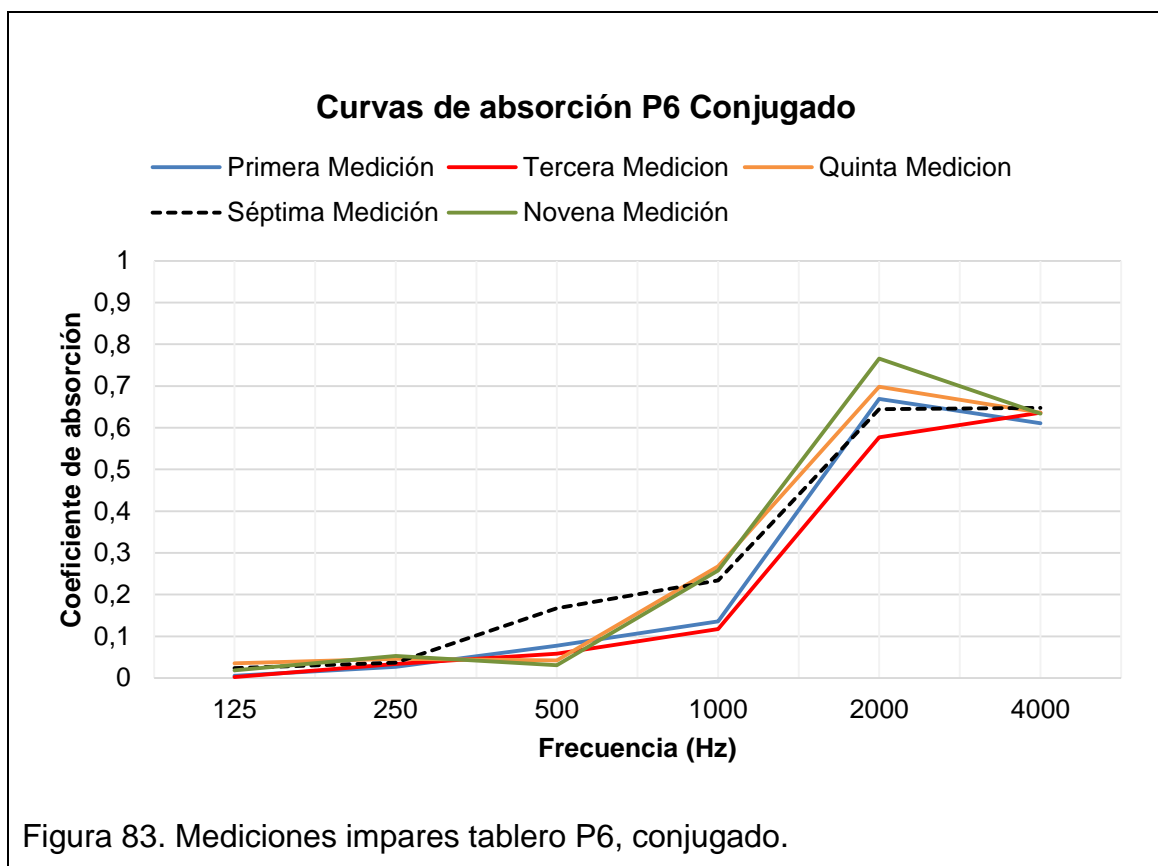
```
Valor4k = mean(sum4k)+ std(sum4k)
```

Anexo 2. Gráficas, de mediciones realizadas, según el algoritmo, para cada tablero.

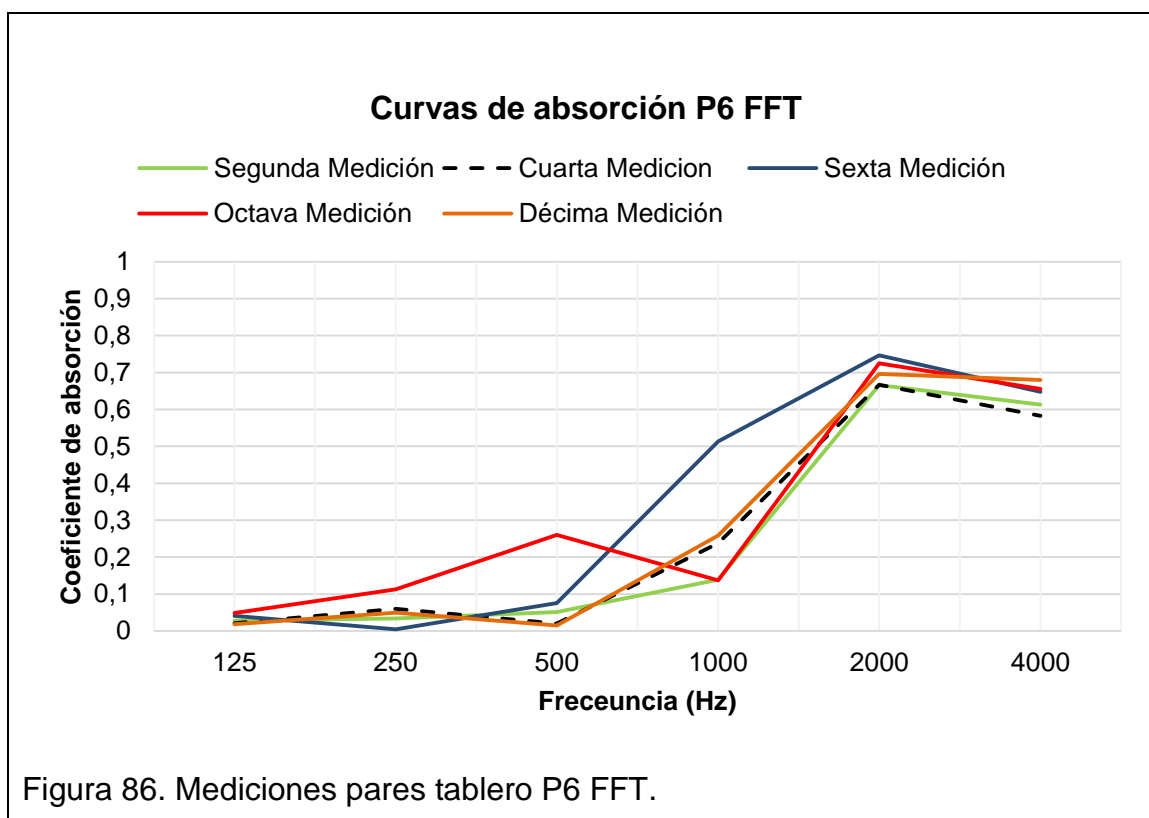
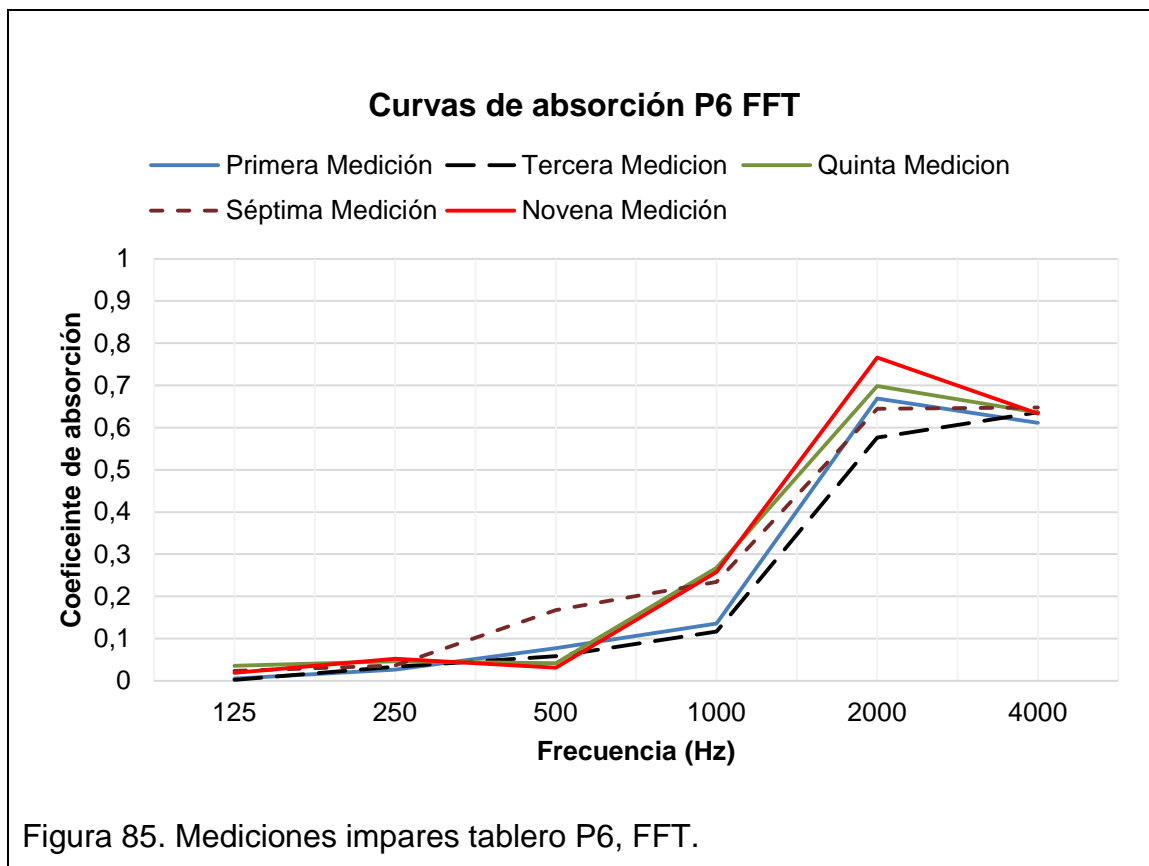
Correlación P6



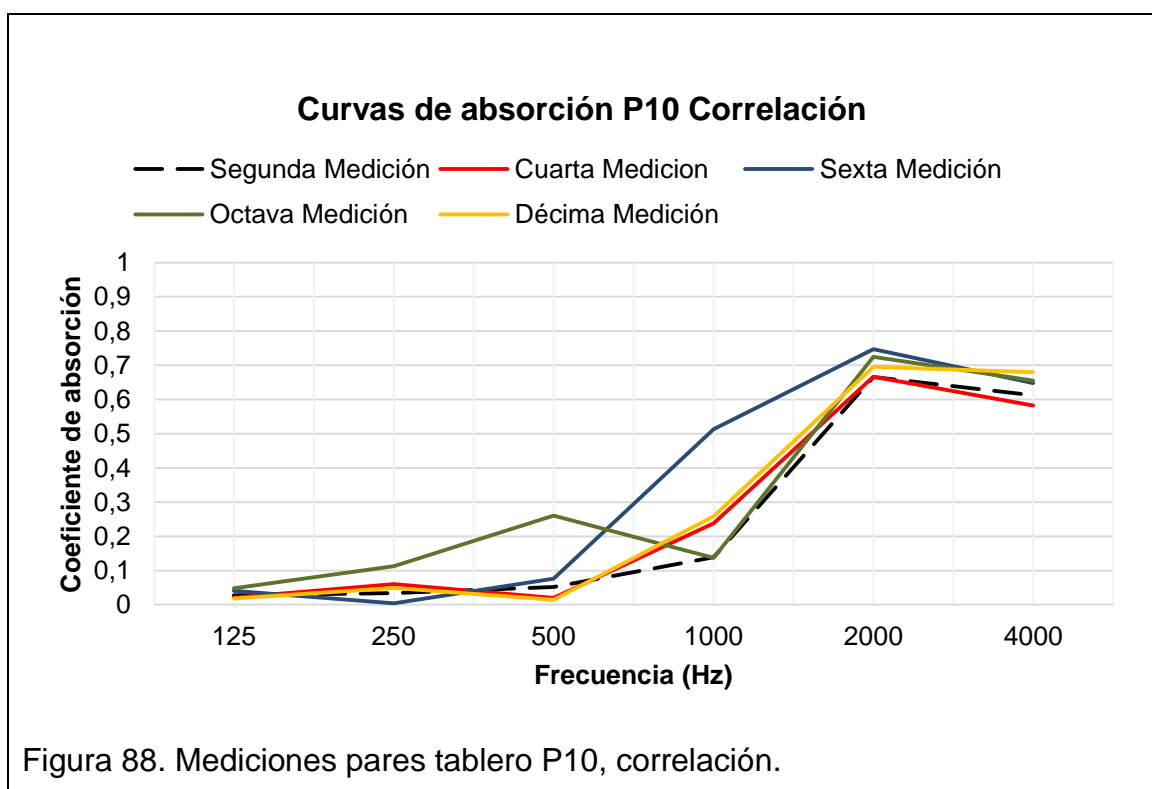
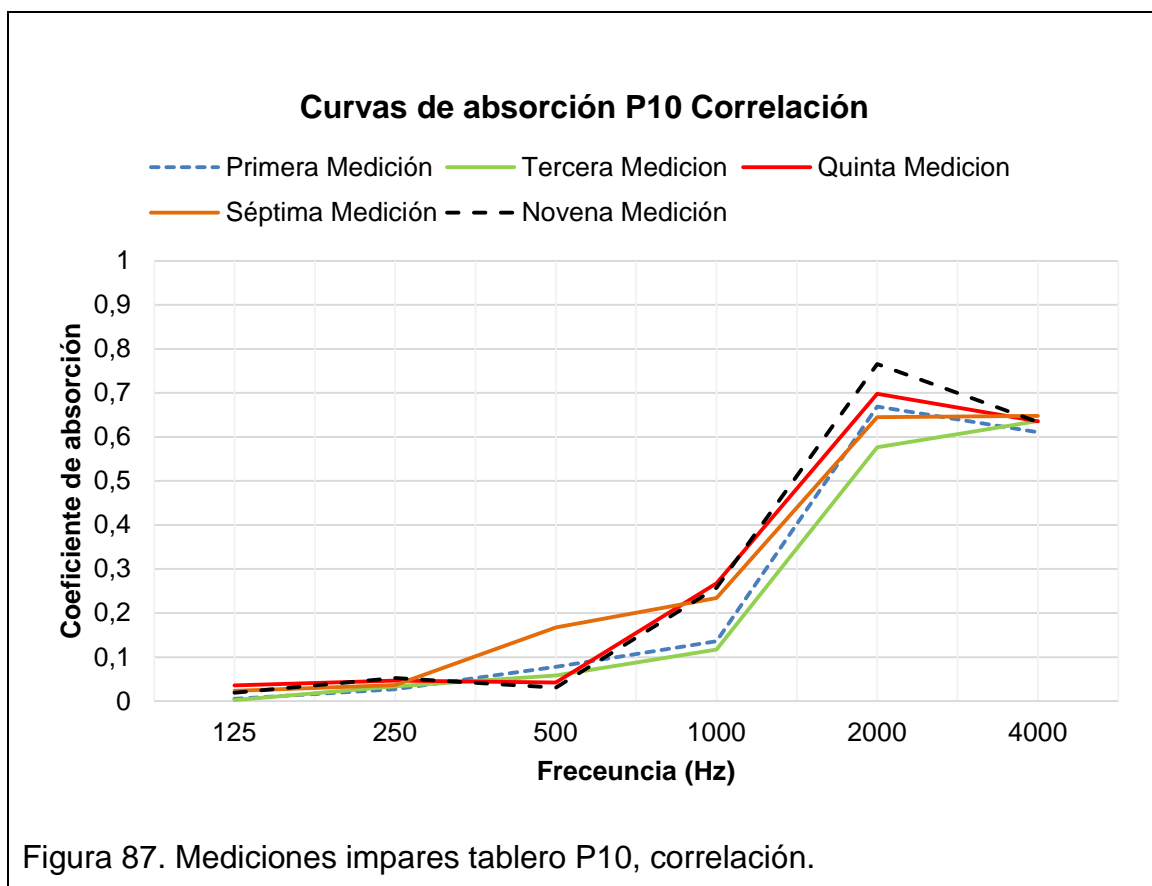
Conjugado P6



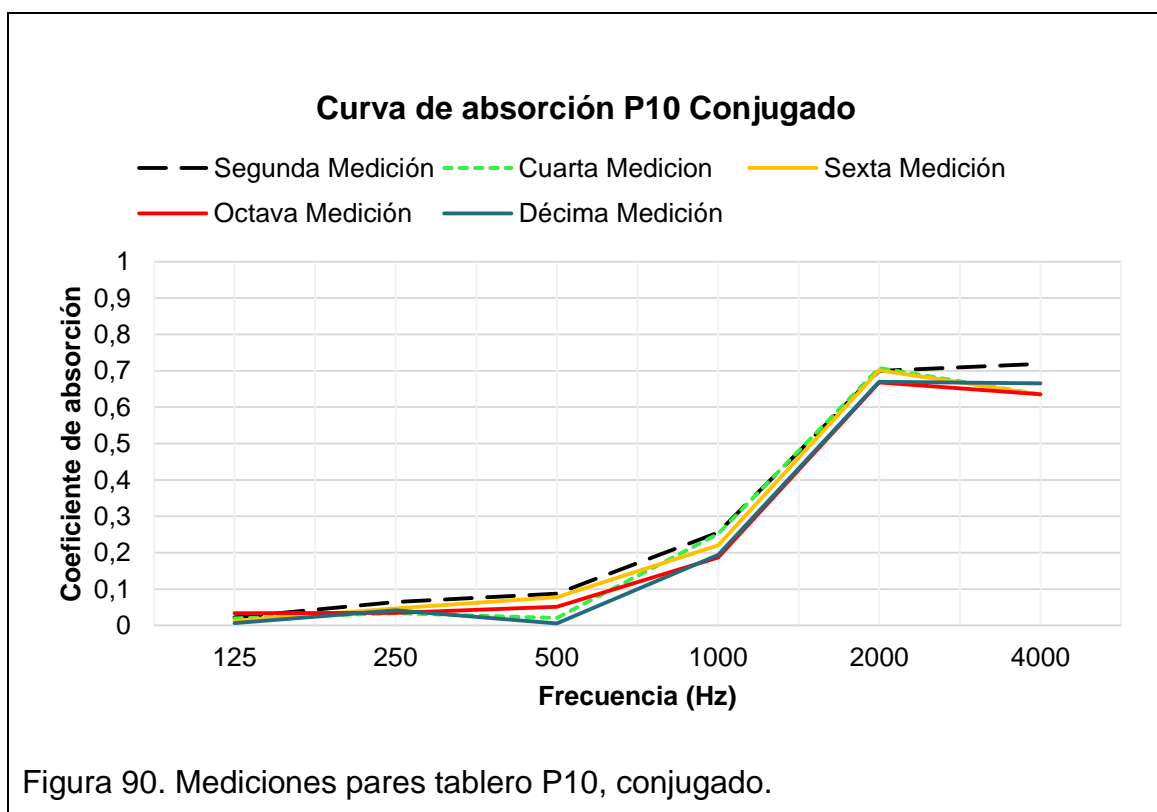
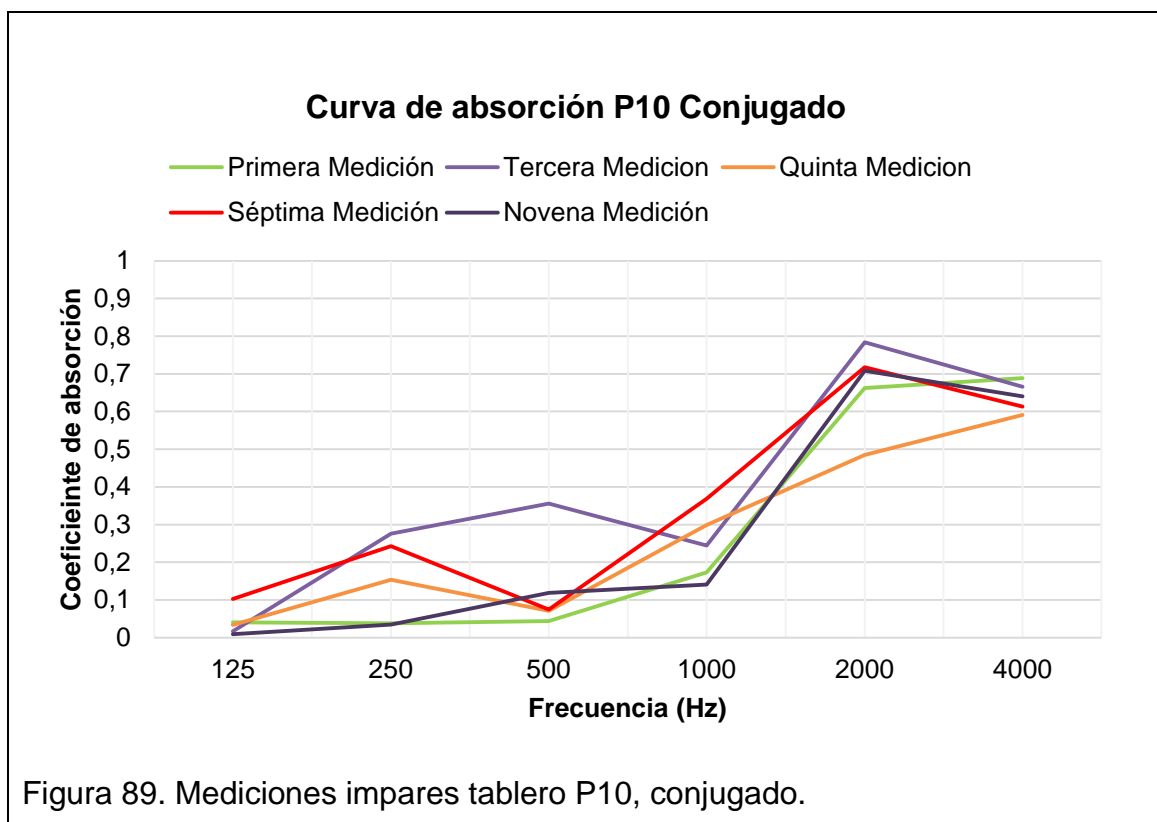
FFT P6



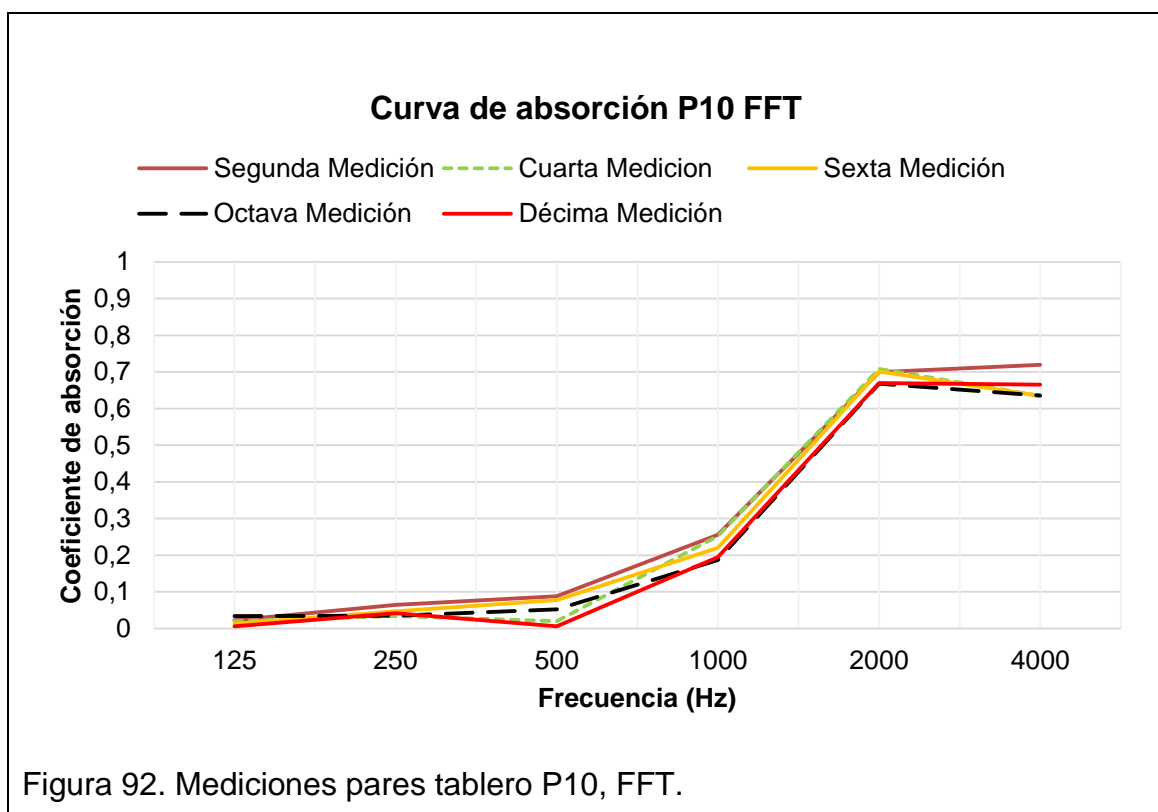
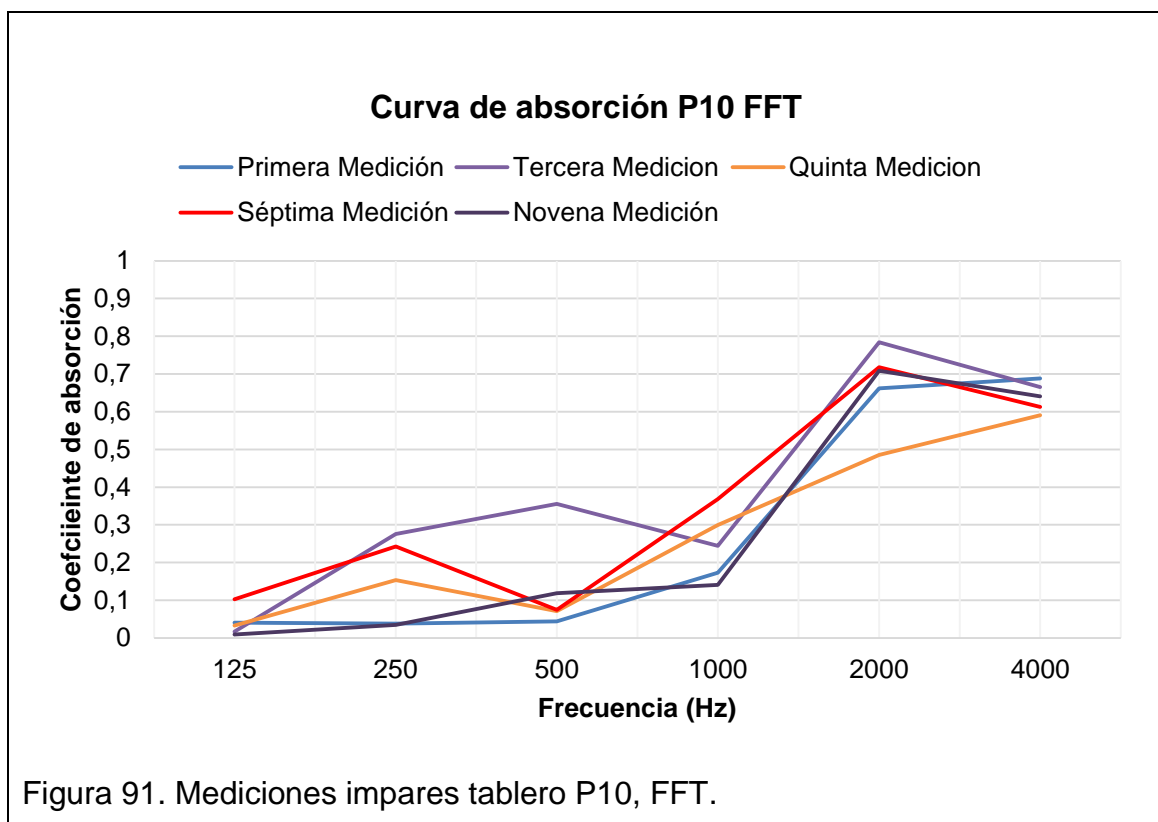
Correlación P10



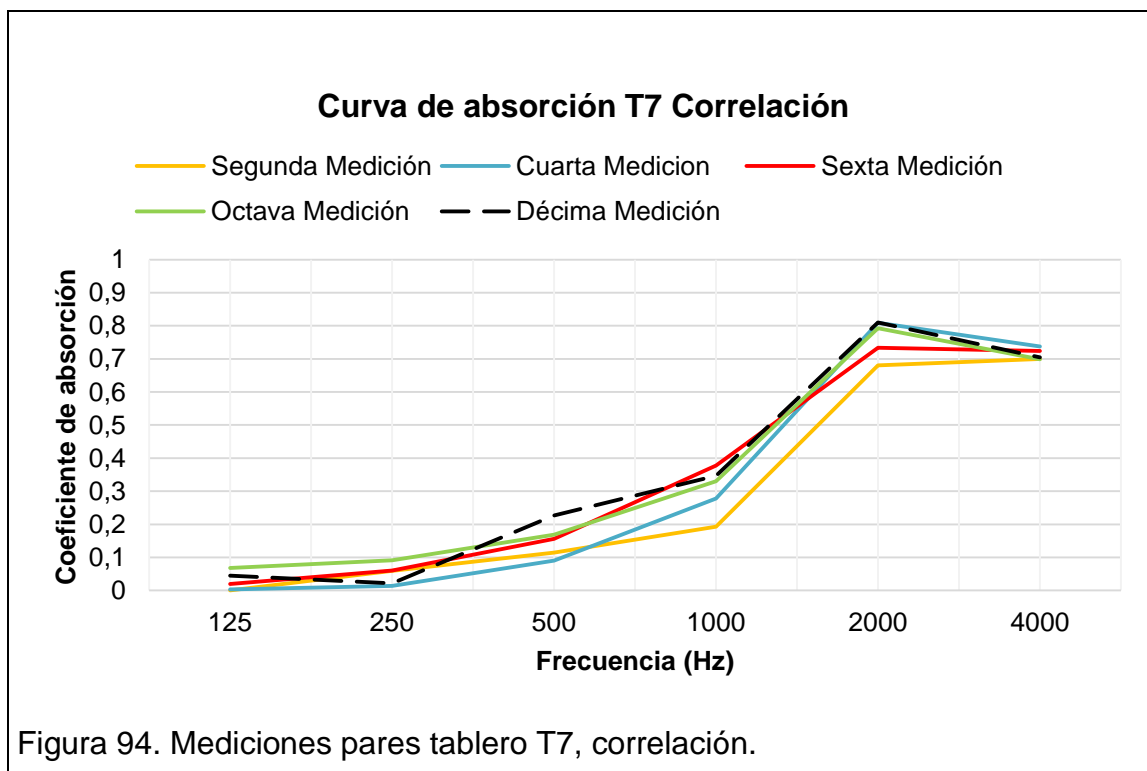
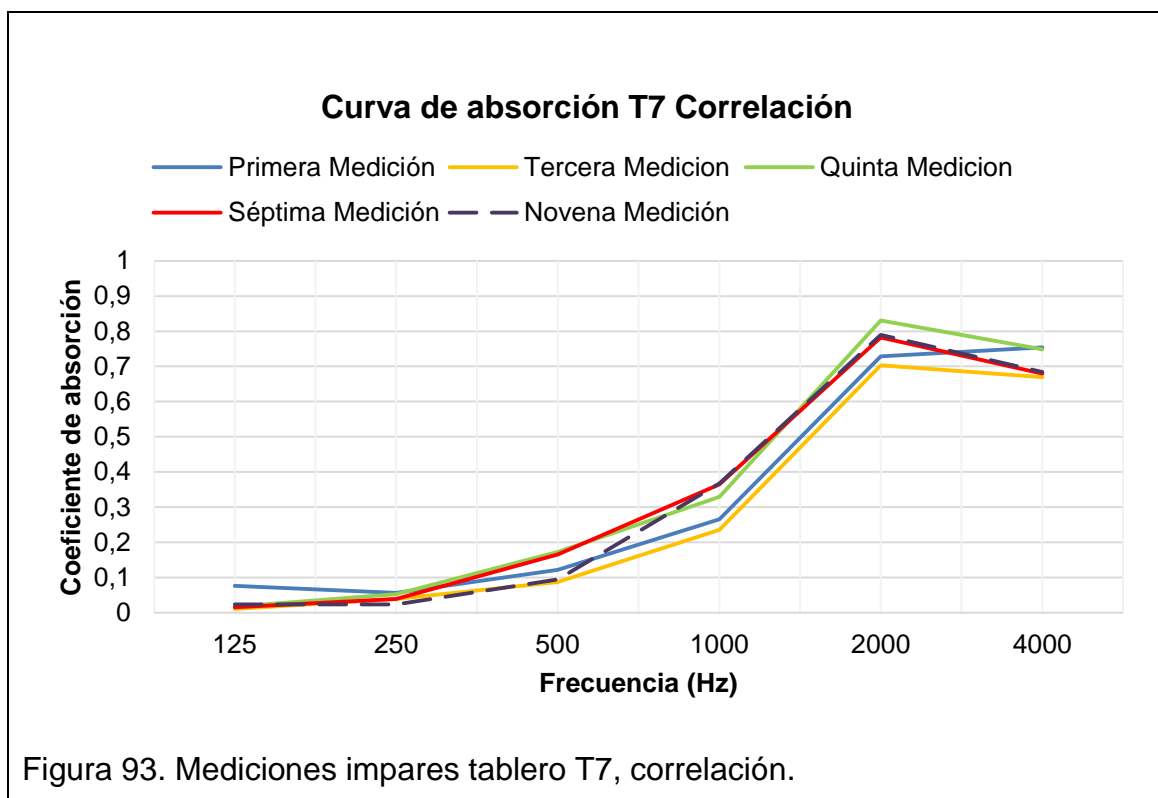
Conjugado P10



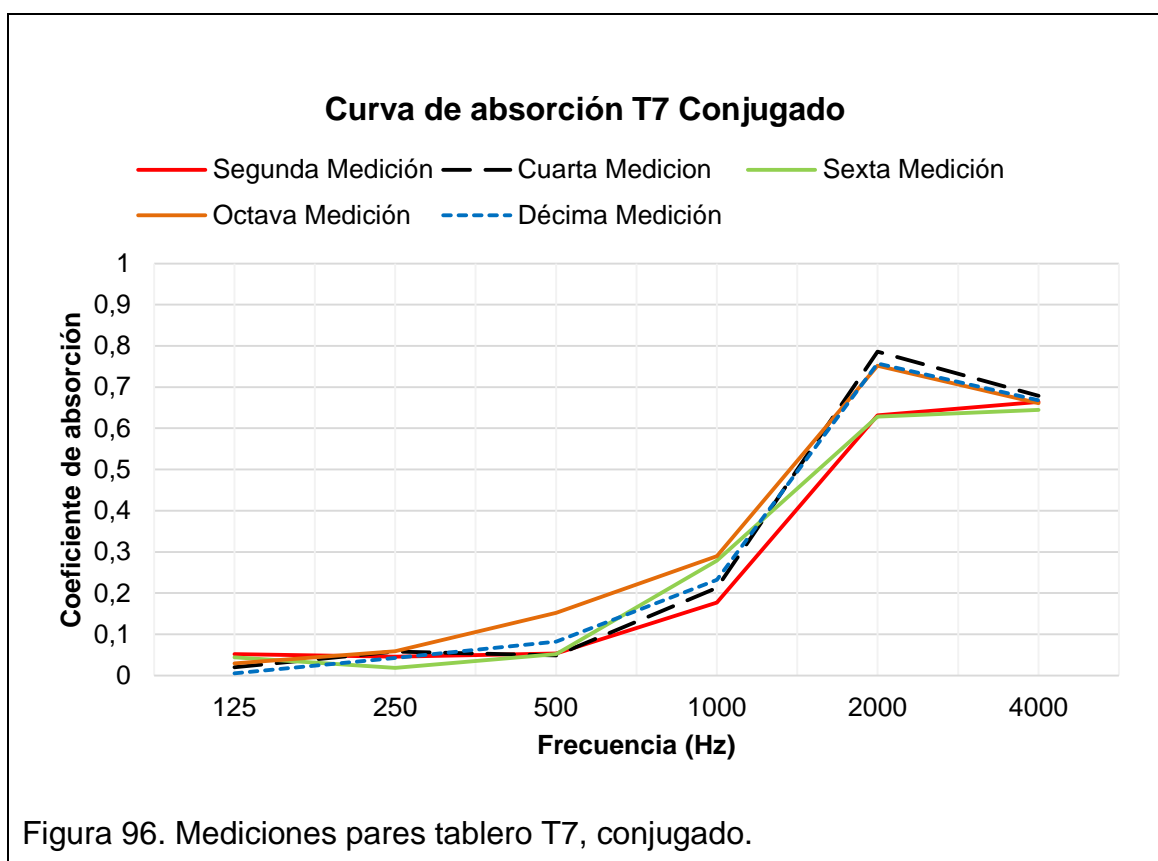
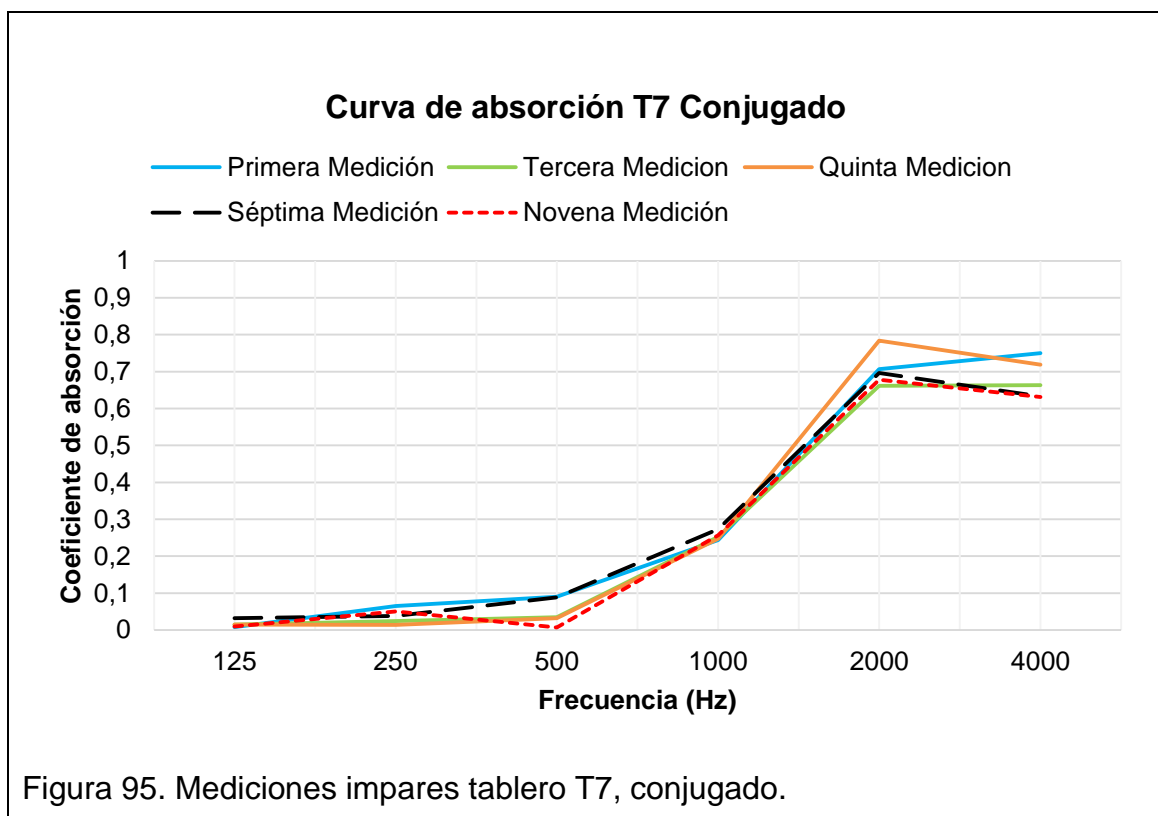
FFT P10



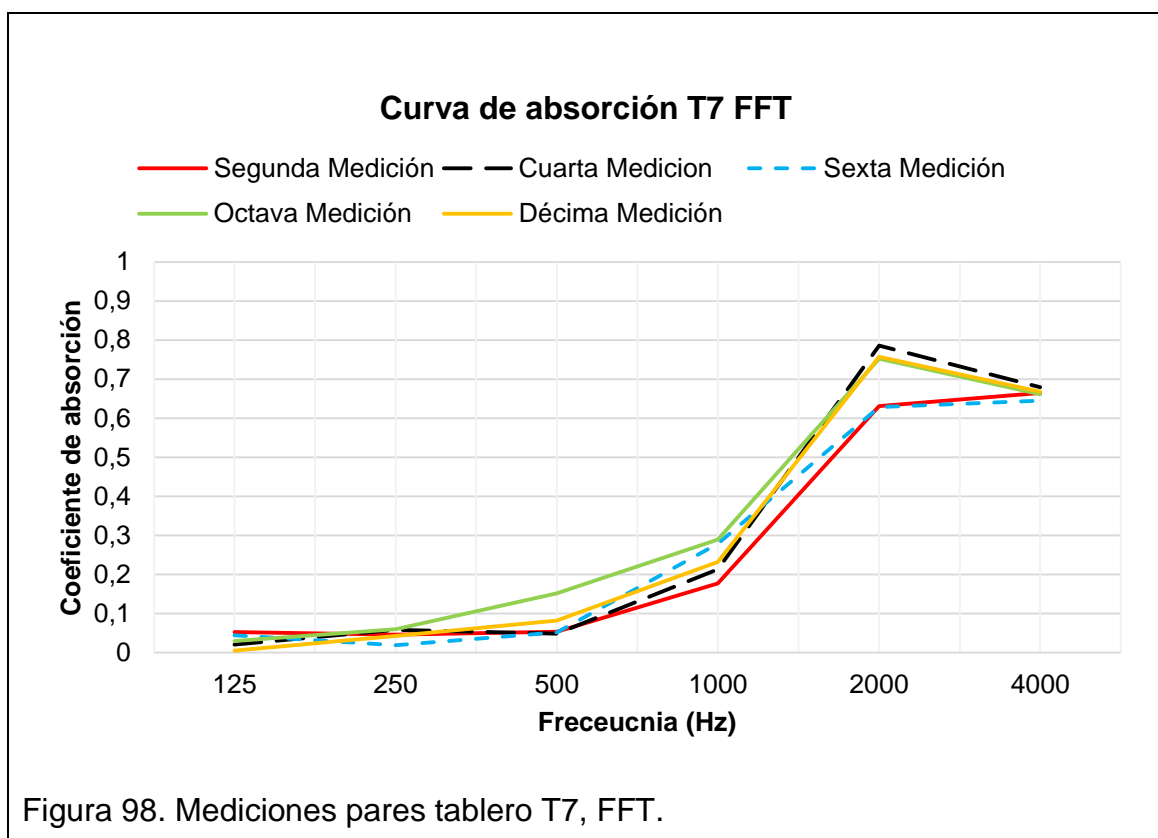
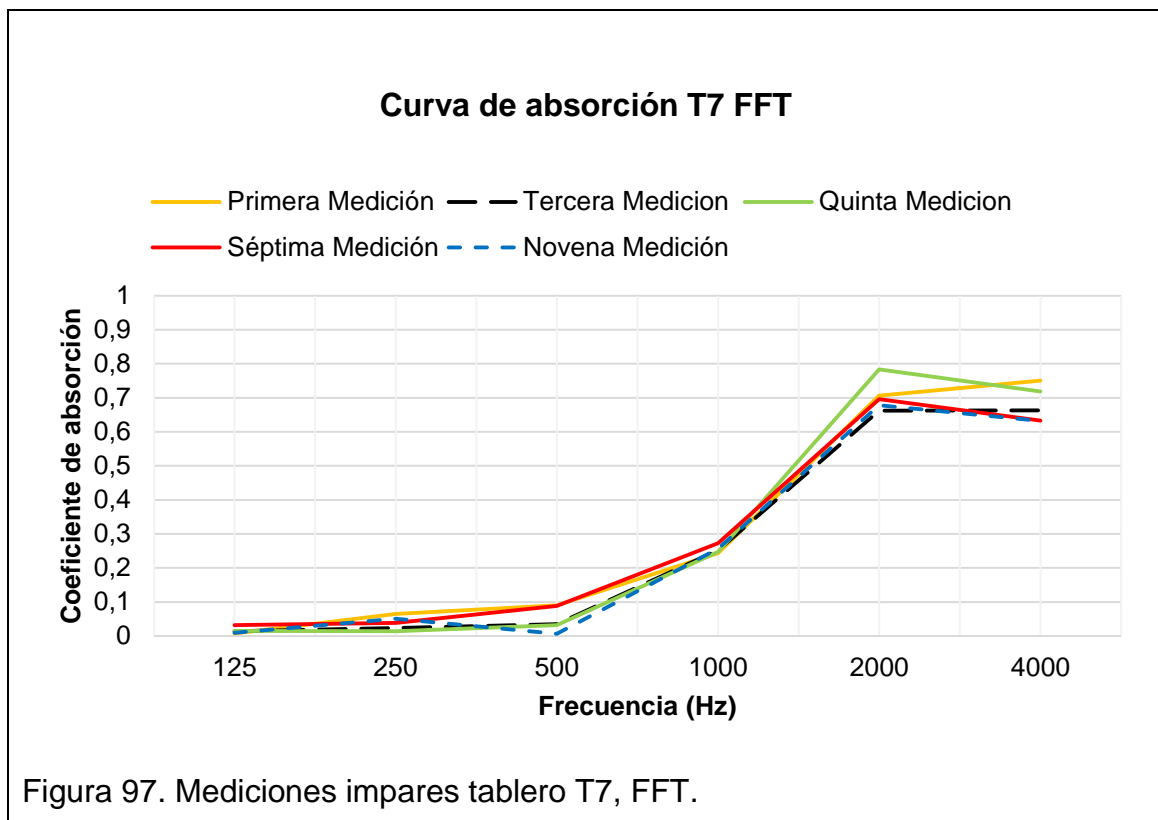
Correlación T7



Conjugado T7



FFT T7



Anexo3. Tablas de valores de las mediciones realizadas para cada algoritmo en cada tablero

- **Correlación P6**

Tabla 50. Coeficientes de absorción P6 mediciones Correlación.

Frecuencia	125	250	500	1000	2000	4000
Coeficiente de Absorción Primera medición	0.0137	0.0221	0.237	0.1974	0.6609	0.7357
Coeficiente de Absorción segunda medición	0.036	0.0727	0.0985	0.1676	0.7201	0.6847
Coeficiente de Absorción Tercera medición	0.005	0.0171	0.1979	0.2823	0.667	0.6966
Coeficiente de Absorción Cuarta medición	0.0327	0.0125	0.1935	0.404	0.7851	0.6672
Coeficiente de Absorción Quinta medición	0.058	0.0525	0.1561	0.3103	0.8382	0.6815
Coeficiente de Absorción sexta medición	0.0458	0.1136	0.1858	0.4738	0.7548	0.7128
Coeficiente de Absorción séptima medición	0.0245	0.0944	0.13	0.3326	0.7998	0.6756
Coeficiente de Absorción octava medición	0.0987	0.1264	0.3687	0.2176	0.757	0.6856
Coeficiente de Absorción novena medición	0.0121	0.0608	0.1272	0.3738	0.7914	0.676
Coeficiente de Absorción Décima medición	0.0176	0.0173	0.1603	0.3637	0.7186	0.7311
Promedio	0.06	0.10	0.26	0.40	0.80	0.72

- **Conjugado P6.**

Tabla 51. Coeficientes de absorción P6 mediciones Conjugado.

Frecuencia	125	250	500	1000	2000	4000
Coeficiente de Absorción Primera medición	0.0053	0.0266	0.0776	0.1357	0.6688	0.611
Coeficiente de Absorción segunda medición	0.0276	0.0342	0.0514	0.1389	0.6659	0.6126
Coeficiente de Absorción Tercera medición	0.0024	0.0335	0.0585	0.1171	0.5767	0.6361
Coeficiente de Absorción Cuarta medición	0.0208	0.06	0.0202	0.2376	0.6665	0.5825
Coeficiente de Absorción Quinta medición	0.0354	0.0463	0.042	0.2678	0.6983	0.6357
Coeficiente de Absorción sexta medición	0.0405	0.0041	0.0757	0.5132	0.7468	0.6478
Coeficiente de Absorción séptima medición	0.0236	0.0366	0.1674	0.2342	0.6448	0.6478
Coeficiente de Absorción octava medición	0.0482	0.1123	0.2601	0.1367	0.725	0.6553
Coeficiente de Absorción novena medición	0.0187	0.0526	0.0309	0.2576	0.7658	0.6337
Coeficiente de Absorción Décima medición	0.0185	0.0494	0.0144	0.2586	0.6958	0.6793
Promedio	0.04	0.07	0.15	0.34	0.74	0.66

- **FFT P6.**

Tabla 52. Coeficientes de absorción P6 mediciones FFT.

Frecuencia	125	250	500	1000	2000	4000
Coeficiente de Absorción Primera medición	0.0053	0.0266	0.0776	0.1357	0.6688	0.611
Coeficiente de Absorción segunda medición	0.0276	0.0342	0.0514	0.1389	0.6659	0.6126
Coeficiente de Absorción Tercera medición	0.0024	0.0335	0.0585	0.1171	0.5767	0.6361
Coeficiente de Absorción Cuarta medición	0.0208	0.06	0.0202	0.2376	0.6665	0.5825
Coeficiente de Absorción Quinta medición	0.0354	0.0463	0.042	0.2678	0.6983	0.6357
Coeficiente de Absorción sexta medición	0.0405	0.0041	0.0757	0.5132	0.7468	0.6478
Coeficiente de Absorción séptima medición	0.0236	0.0366	0.1674	0.2342	0.6448	0.6478
Coeficiente de Absorción octava medición	0.0482	0.1123	0.2601	0.1367	0.725	0.6553
Coeficiente de Absorción novena medición	0.0187	0.0526	0.0309	0.2576	0.7658	0.6337
Coeficiente de Absorción Décima medición	0.0185	0.0494	0.0144	0.2586	0.6958	0.6793
Promedio	0.04	0.07	0.15	0.34	0.74	0.66

- **Correlación P10.**

Tabla 53. Coeficientes de absorción P10 mediciones Correlación.

Frecuencia	125	250	500	1000	2000	4000
Coeficiente de Absorción Primera medición	0.0145	0.006	0.0861	0.1607	0.6693	0.7067
Coeficiente de Absorción segunda medición	0.0587	0.1359	0.1051	0.2884	0.671	0.7112
Coeficiente de Absorción Tercera medición	0.0091	0.0681	0.1053	0.2911	0.8237	0.7021
Coeficiente de Absorción Cuarta medición	0.0472	0.0141	0.1187	0.3443	0.7697	0.6699
Coeficiente de Absorción Quinta medición	0.0131	0.1551	0.2162	0.3685	0.7399	0.6707
Coeficiente de Absorción sexta medición	0.062	0.0673	0.1235	0.3117	0.7454	0.6759
Coeficiente de Absorción séptima medición	0.0742	0.3154	0.2671	0.4127	0.8018	0.6911
Coeficiente de Absorción octava medición	0.038	0.0521	0.1819	0.2942	0.7874	0.7011
Coeficiente de Absorción novena medición	0.0177	0.1102	0.1393	0.2813	0.7755	0.7051
Coeficiente de Absorción Décima medición	0.0052	0.0578	0.1101	0.331	0.7833	0.7249
Promedio	0.06	0.18	0.20	0.37	0.81	0.71

- **Conjugado P10.**

Tabla 54. Coeficientes de absorción P10 mediciones Conjugado.

Frecuencia	125	250	500	1000	2000	4000
Coeficiente de Absorción Primera medición	0.0409	0.0382	0.0438	0.1733	0.662	0.6886
Coeficiente de Absorción segunda medición	0.0222	0.0641	0.0875	0.2552	0.6993	0.7192
Coeficiente de Absorción Tercera medición	0.017	0.2762	0.3555	0.2448	0.784	0.6655
Coeficiente de Absorción Cuarta medición	0.0196	0.0339	0.0202	0.2523	0.7078	0.6347
Coeficiente de Absorción Quinta medición	0.0334	0.1537	0.0714	0.2992	0.485	0.5909
Coeficiente de Absorción sexta medición	0.0126	0.0469	0.0777	0.22	0.7012	0.6344
Coeficiente de Absorción séptima medición	0.1025	0.2426	0.0747	0.3681	0.7178	0.6129
Coeficiente de Absorción octava medición	0.0341	0.0345	0.0517	0.1869	0.6679	0.6355
Coeficiente de Absorción novena medición	0.0092	0.0344	0.1189	0.1409	0.7084	0.6403
Coeficiente de Absorción Décima medición	0.006	0.0413	0.0056	0.1942	0.6696	0.6655
Promedio	0.06	0.19	0.18	0.30	0.75	0.68

- **FFT 10**

Tabla 55. Coeficientes de absorción P10 mediciones FFT.

Frecuencia	125	250	500	1000	2000	4000
Coeficiente de Absorción Primera medición	0.0409	0.0382	0.0438	0.1733	0.662	0.6886
Coeficiente de Absorción segunda medición	0.0222	0.0641	0.0875	0.2552	0.6993	0.7192
Coeficiente de Absorción Tercera medición	0.017	0.2762	0.3555	0.2448	0.784	0.6655
Coeficiente de Absorción Cuarta medición	0.0196	0.0339	0.0202	0.2523	0.7078	0.6347
Coeficiente de Absorción Quinta medición	0.0334	0.1537	0.0714	0.2992	0.485	0.5909
Coeficiente de Absorción sexta medición	0.0126	0.0469	0.0777	0.22	0.7012	0.6344
Coeficiente de Absorción séptima medición	0.1025	0.2426	0.0747	0.3681	0.7178	0.6129
Coeficiente de Absorción octava medición	0.0341	0.0345	0.0517	0.1869	0.6679	0.6355
Coeficiente de Absorción novena medición	0.0092	0.0344	0.1189	0.1409	0.7084	0.6403
Coeficiente de Absorción Décima medición	0.006	0.0413	0.0056	0.1942	0.6696	0.6655
Promedio	0.06	0.19	0.18	0.30	0.75	0.68

- **Correlación T7**

Tabla 56. Coeficientes de absorción T7 mediciones Correlación.

Frecuencia	125	250	500	1000	2000	4000
Coeficiente de Absorción Primera medición	0.0769	0.0567	0.1225	0.2657	0.7282	0.7541
Coeficiente de Absorción segunda medición	0	0.0596	0.1149	0.1929	0.6808	0.7001
Coeficiente de Absorción Tercera medición	0.0113	0.0394	0.0872	0.2358	0.7029	0.6693
Coeficiente de Absorción Cuarta medición	0.0036	0.014	0.0903	0.2782	0.8088	0.7374
Coeficiente de Absorción Quinta medición	0.0178	0.0528	0.1727	0.3296	0.8305	0.7483
Coeficiente de Absorción sexta medición	0.0196	0.0602	0.1561	0.3775	0.7337	0.7241
Coeficiente de Absorción séptima medición	0.0161	0.0397	0.1661	0.3653	0.782	0.6798
Coeficiente de Absorción octava medición	0.0682	0.0913	0.1691	0.3302	0.7925	0.6986
Coeficiente de Absorción novena medición	0.0239	0.0242	0.0945	0.368	0.7896	0.6838
Coeficiente de Absorción Décima medición	0.0445	0.0219	0.2266	0.3465	0.8099	0.7042
Promedio	0.05	0.07	0.18	0.37	0.81	0.74

- **Conjugado T7**

Tabla 57. Coeficientes de absorción T7 mediciones Conjugado.

Frecuencia	125	250	500	1000	2000	4000
Coeficiente de Absorción Primera medición	0.0079	0.0647	0.0902	0.2437	0.7064	0.7503
Coeficiente de Absorción segunda medición	0.0518	0.0455	0.0534	0.177	0.6312	0.6641
Coeficiente de Absorción Tercera medición	0.0143	0.0239	0.035	0.2523	0.6618	0.6634
Coeficiente de Absorción Cuarta medición	0.0201	0.0579	0.0484	0.2125	0.786	0.6792
Coeficiente de Absorción Quinta medición	0.0146	0.0138	0.0322	0.2469	0.7835	0.7186
Coeficiente de Absorción sexta medición	0.0439	0.0186	0.0515	0.2786	0.6281	0.6444
Coeficiente de Absorción séptima medición	0.0323	0.0383	0.0882	0.2728	0.6959	0.6331
Coeficiente de Absorción octava medición	0.0295	0.0592	0.1517	0.2894	0.7522	0.661
Coeficiente de Absorción novena medición	0.0096	0.0507	0.0068	0.2568	0.678	0.6316
Coeficiente de Absorción Décima medición	0.0049	0.0426	0.082	0.232	0.757	0.6678
Promedio	0.04	0.06	0.10	0.28	0.76	0.71

- **FFT T7**

Tabla 58. Coeficientes de absorción T7 mediciones FFT.

Frecuencia	125	250	500	1000	2000	4000
Coeficiente de Absorción Primera medición	0.0079	0.0647	0.0902	0.2437	0.7064	0.7503
Coeficiente de Absorción segunda medición	0.0518	0.0455	0.0534	0.177	0.6312	0.6641
Coeficiente de Absorción Tercera medición	0.0143	0.0239	0.035	0.2523	0.6618	0.6634
Coeficiente de Absorción Cuarta medición	0.0201	0.0579	0.0484	0.2125	0.786	0.6792
Coeficiente de Absorción Quinta medición	0.0146	0.0138	0.0322	0.2469	0.7835	0.7186
Coeficiente de Absorción sexta medición	0.0439	0.0186	0.0515	0.2786	0.6281	0.6444
Coeficiente de Absorción séptima medición	0.0323	0.0383	0.0882	0.2728	0.6959	0.6331
Coeficiente de Absorción octava medición	0.0295	0.0592	0.1517	0.2894	0.7522	0.661
Coeficiente de Absorción novena medición	0.0096	0.0507	0.0068	0.2568	0.678	0.6316
Coeficiente de Absorción Décima medición	0.0049	0.0426	0.082	0.232	0.757	0.6678
Promedio	0.04	0.06	0.10	0.28	0.76	0.71

Anexo 3. Hojas de datos del estudio de laboratorio.

- Hoja de datos, coeficiente de elasticidad



Pontificia Universidad Católica del Ecuador
LABORATORIO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Veintimilla y Av. 12 de Octubre
Telf.: 593 299 1529 • Fax: 593 299 1624
Cel.: 09870 49430
Quito-Ecuador
LMC-PUCE@puce.edu.ec
www.puce.edu.ec

ÁREA DE RESISTENCIA DE MATERIALES
INFORME DE ENSAYO
ENSAYO DE TENSIÓN PARALELA EN PANELES DE TETRAPACK

PROYECTO: Tesis - Análisis del Tetrapack reciclado posterior al Proceso de Compresión Térmica como Material de Aislamiento Acústico
SOLICITA: Omar Chávez

LOCALIZACION: Quito
FISCALIZACIÓN:

MUESTRA: Tomada por el cliente
CONTRATISTA:

NORMA DE REFERENCIA: ASTM AD1037-12
FECHA DE RECEPCIÓN: 2014/10/02
FECHA DE EMISIÓN: 2014/10/08

PROCEDIMIENTO: LMC-MPT-5.4-ARM-4
RECEPCIÓN N°: 26169
HOJA: 1 de 2

Probeta N°	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
Descripción	Tablero de polialuminio de 10 mm			Tablero de polialuminio de 6 mm			Tablero de Tetrapack de 7 mm		
Fecha de ensayo	2014/10/07	2014/10/07	2014/10/07	2014/10/07	2014/10/07	2014/10/07	2014/10/07	2014/10/07	2014/10/07
Ancho (mm)	38,06	38,26	37,97	38,15	38,41	38,22	38,47	38,52	38,73
Espesor (mm)	9,98	9,80	9,97	6,82	6,36	6,75	7,29	7,13	7,33
Area (mm ²)	379,84	374,95	378,56	260,18	244,29	257,99	280,45	274,65	283,89
Módulo de elasticidad (MPa)	363,7	369,6	385,3	492,2	464,7	464,7	784,3	825,5	862,7
Carga máxima (N)	3770	3972	3810,00	1540,00	1559,00	1509,00	2220,00	1967,00	1933,00
Esfuerzo máximo de tensión (MPa)	9,9	10,6	10,1	5,9	6,4	5,8	7,9	7,2	6,8

OBSERVACIONES:

NOTA: Este informe de ensayo no debe ser reproducido parcialmente.

Ing. María Inés Calvo
Responsable de Área

Ing. Guillermo Realpe M.Sc.
Director LMC.

Solidarios en la construcción, excelencia en la calidad...



- Hoja de datos, densidad volumétrica



Pontificia Universidad Católica del Ecuador
LABORATORIO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Veintimilla y Av. 12 de Octubre
Telf.: 593 299 1529 • Fax: 593 299 1624
Cel.: 09870 49430
Quito-Ecuador
LMC-PUCE@puce.edu.ec
www.puce.edu.ec

ÁREA DE RESISTENCIA DE MATERIALES
INFORME DE ENSAYO
ENSAYO DE DENSIDAD EN PANELES DE TETRAPACK

PROYECTO: Tesis - Análisis del Tetrapack reciclado posterior al Proceso de Compresión Térmica como Material de Aislamiento Acústico **SOLICITA:** Omar Chávez

LOCALIZACION: Quito **FISCALIZACIÓN:**

MUESTRA: Tomada por el cliente **CONTRATISTA:**

NORMA DE REFERENCIA: NTE INEN 897:2013 **FECHA DE RECEPCIÓN:** 2014/10/02

PROCEDIMIENTO: LMC-MPT-5.4-ARM-4 **FECHA DE EMISIÓN:** 2014/10/08


RECEPCION N°: 26169

HOJA: 2 de 2

Probeta N°	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
Descripción	Tablero de polialuminio de 10 mm			Tablero de polialuminio de 6 mm			Tablero de Tetrapack de 7 mm		
Fecha de ensayo	2014/10/07	2014/10/07	2014/10/07	2014/10/08	2014/10/08	2014/10/08	2014/10/09	2014/10/09	2014/10/09
Ancho (mm)	100,37	100,44	100,26	100,71	100,59	100,10	100,54	100,59	100,52
Largo (mm)	100,62	100,41	100,43	100,15	100,16	100,67	100,13	100,53	100,22
Espesor (mm)	10,61	11,11	11,52	5,08	5,32	5,80	6,87	6,74	6,72
Masa (gr)	115,87	112,55	109,84	60,74	55,64	59,06	64,38	57,54	59,03
Superficie (mm ²)	200,98	200,84	200,69	200,86	200,75	200,77	200,66	201,12	200,74
Volumen (mm ³)	107116,92	112009,99	115940,05	51234,86	53622,02	58393,69	69179,04	68128,32	67698,05
Densidad superficial (Kg/m ²)	576,53	560,40	547,33	302,41	277,17	294,17	320,84	286,10	294,06
Densidad volumétrica (Kg/m ³)	1081,7	1004,8	947,4	1185,5	1037,6	1011,4	930,6	844,6	872,0

OBSERVACIONES:

NOTA: Este informe de ensayo no debe ser reproducido parcialmente.


Ing. María Inés Calvo
Responsable de Área


Ing. Guillermo Realpe M.Sc.
Director LMC.

Solidarios en la construcción, excelencia en la calidad...

