



**UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA ACÚSTICA**

Profesor Patrocinante:  
Dr. Jorge P. Arenas  
Instituto de Acústica  
Universidad Austral de Chile

**Revisión de los Algoritmos de Predicción del Aislamiento  
Acústico Proporcionado por Paredes Dobles: un Análisis  
Comparativo**

Tesis presentada como parte de los  
requisitos para optar al Grado Académico  
de Licenciado en Acústica y al Título  
Profesional de Ingeniero Acústico

**CLAUDIA SOFÍA LEHMANN FERNÁNDEZ**  
**VALDIVIA – CHILE**  
**Abril 2007**

*Para quienes siempre están ahí:  
MAMA y PAPA  
Hans y Paula  
Mis Abuelitas, mujeres emprendedoras  
Y mis grandes amigos.*

## RESUMEN

En este trabajo se analizaron siete algoritmos predictivos del aislamiento acústico suministrado por paredes dobles, realizando la comparación de éstos con medidas en laboratorios normalizados. La comparación se hizo en base al cálculo de estadísticos y al número de aislamiento acústico “STC”. El trabajo comprende, además, una revisión completa del fenómeno de transmisión de sonido y de la teoría de los algoritmos utilizados. Se presenta un resumen del estado del arte sobre la predicción del aislamiento acústico de paredes dobles.

Se comparan cuatro métodos derivados de la conocida Ley de Masa: 1) Ley de masa a incidencia normal, 2) la corrección de Jones a la Ley de Masa, 3) la corrección de Sharp a la misma y 4) un modelo intuitivo deducido de la Ley de Masa. Además, se compara una aproximación al Modelo SEA realizada por Brekke, una aproximación al Modelo PIM lograda por Fringuelino & Guglielmone y una aproximación práctica deducida por Iwashige & Ohta.

Se concluye que los menores errores registrados se obtienen por los métodos de Sharp e Iwashige & Ohta, observando que el primero considera más fenómenos involucrados, necesita más información, y en consecuencia logra una curva más precisa. Se concluye también que el modelo de Iwashige & Ohta, a pesar de requerir poca información previa y entregar una curva menos precisa, logra estimaciones muy exactas para el valor de STC.

## **ABSTRACT**

In this work, seven prediction algorithms for the sound isolation supplied by double walls have been analyzed and compared with standardized laboratory measurements. The comparison was made based on statistical results and the sound transmission class STC. The work also shows a complete review of the sound transmission phenomenon and the theoretical concepts in which the algorithms are based. In addition, a summary on the state-of-the-art of the predicted sound transmission by double walls is presented.

Four methods derived from the well-known Mass Law are compared: 1) Normal incidence Mass Law, 2) Jones' correction to Mass Law, 3) Sharp's correction, and 4) an intuitive model derived from the Mass Law. In addition, it has been compared an approximation to the SEA model by Brekke, an approximation to the PIM model by Fringuelino & Guglielmone, and a practical approximation derived by Iwashige & Ohta.

It is concluded that the best results are obtained by the methods presented by Sharp and Iwashige & Ohta, noticing that the first one consider more involved phenomena, needs more information and, consequently, achieves a more precise curve. It is also concluded that the Iwashige & Ohta model gives a very accurate prediction for the STC value, in spite of requiring a reduced amount of information and predicting a lesser precise curve.

# CONTENIDO

<b>Resumen</b>	.....	iii
<b>Abstract</b>	.....	iv
<b>Capítulo 1. INTRODUCCIÓN</b>	.....	1
1.1	<b>Introducción</b> .....	2
1.2	<b>Objetivos</b> .....	2
1.2.1	<b>Objetivo General</b> .....	2
1.2.2	<b>Objetivos Específicos</b> .....	2
<b>Capítulo 2 El Sonido</b>	.....	3
2.1	<b>Propagación del Sonido</b> .....	3
2.1.1	<b>Propagación de sonido en fluidos</b> .....	3
2.1.2	<b>Propagación del sonido en sólidos</b> .....	4
2.2	<b>Ondas en una placa</b> .....	4
2.2.1	<b>Ondas Longitudinales</b> .....	4
2.2.2	<b>Ondas Transversales</b> .....	5
2.2.3	<b>Ondas de superficie (Ondas de Rayleigh)</b> .....	5
2.2.4	<b>Ondas de Pliegue</b> .....	6
<b>3. Capítulo 3 Aislamiento Acústico</b>	.....	7
3.1	<b>Panel Infinito</b> .....	7
3.1.1	<b>Amortiguación del panel</b> .....	7
3.1.2	<b>Frecuencia crítica <math>f_c</math> y efecto de coincidencia</b> .....	8
3.1.3	<b>Panel Infinito No Amortiguado</b> .....	8
3.1.4	<b>Panel Infinito Amortiguado</b> .....	9
3.2	<b>Coefficiente de Transmisión Sonora</b> .....	10
3.2.1	<b>Coefficiente de Transmisión Sonora Oblicuo</b> .....	10
3.2.2	<b>Coefficiente de Transmisión Sonora de Incidencia Aleatoria</b> .....	10
3.2.3	<b>Efecto Incidencia de Campo</b> .....	11
3.3	<b>Pérdida de Transmisión</b> .....	11

3.4	Medición de la Pérdida de Transmisión .....	12
3.5	Número único de Aislamiento Acústico – STC .....	14
3.6	Materiales de Absorción Sonora .....	15
<b>4.</b>	<b>Capítulo 4 Pérdida de Transmisión de Paredes dobles .....</b>	<b>19</b>
4.1	Antecedentes de los Modelos Predictivos .....	19
4.2	Modelos Predictivos Analizados .....	21
4.2.1	Modelo Ley de Masa .....	21
4.2.1.1	Ley de Masa de una pared doble a incidencia Normal .....	23
4.2.1.2	Ley de Masa a Incidencia Aleatoria .....	26
4.2.1.3	Ley de Masa a Incidencia Normal intuitiva: .....	26
4.2.1.4	Método Aproximado de Robert Jones (1976).....	27
4.2.1.5	Corrección de Sharp a la Ley de Masa incidencia aleatoria ....	29
4.2.2	Método práctico de Iwashige & Ohta (1981) .....	31
4.2.3	Aproximación de Brekke al Método SEA (1981) .....	34
4.2.4	Método de Impedancia Progresiva de Fringuellino & Guglielmone (2000) .....	39
<b>5.</b>	<b>Capítulo 5 Implementación Computacional .....</b>	<b>45</b>
5.1	Variables utilizadas .....	46
5.1.1	Variables de entrada .....	46
5.1.2	Variables de salida .....	46
5.2	Características de lo Módulos .....	47
5.2.1	Módulo principal “datos” .....	47
5.2.2	Módulo “paredesDOB” .....	48
5.2.3	Módulos de cálculo del algoritmo pared doble respectivo .....	49
5.2.4	Módulos de cálculo de herramientas de análisis .....	49
<b>6.</b>	<b>Capítulo 6 Resultados .....</b>	<b>50</b>
6.1	Experimento 2 .....	51
6.2	Experimento 7 .....	52
6.3	Experimento 10 .....	53
6.4	Experimento 17 .....	54
6.5	Experimento 24 .....	55

<b>7. Capítulo 7 Análisis Estadístico de los Resultados</b> .....	57
<b>7.1 Estadísticos</b> .....	57
<b>7.2 Análisis por Método</b> .....	58
<b>7.2.1 Resultados por Ley de Masa</b> .....	58
<b>7.2.2 Resultados por los otros modelos</b> .....	60
<b>7.3 Análisis por Frecuencia</b> .....	62
<b>7.4 Análisis Estadístico General</b> .....	63
<b>8. Capítulo 8 Discusión de los Resultados</b> .....	64
<b>9. Capítulo 9 Conclusiones</b> .....	68
<b>10. Capítulo 10 Bibliografía</b> .....	69
<b>11. Capítulo 11 Agradecimientos</b> .....	72
<b>12. Capítulo 12 Apéndices</b> .....	73



# 1. INTRODUCCIÓN

Las teorías sobre la transmisión del sonido a través de particiones dobles han sido estudiadas por distintos autores a lo largo del tiempo. Los métodos físico-matemáticos utilizados para lograr los algoritmos que predicen el comportamiento de paredes dobles han sido muy variados, comenzando por la conocida Ley de Masa, el Método de Onda introducido por London, el método de Impedancia Progresivo, el Análisis Modal y el Análisis Estadístico de Energía (SEA), entre otros.

Al haberse desarrollado diferentes análisis para estudiar el mismo fenómeno, se han ido obteniendo variados algoritmos sobre diferentes aproximaciones y supuestos básicos. Cada algoritmo se plantea en base a diferentes parámetros y arroja diferentes resultados sobre el comportamiento de la estructura. La curva de Pérdida de Transmisión de la pared doble simulada por cada algoritmo es, por lo tanto, diferente y cabe preguntarse cuál algoritmo predecirá mejor el TL.

Existe un número único de Aislamiento Acústico para una estructura (STC), determinado a través de la comparación entre la pérdida de transmisión medida en bandas de 1/3 de octava entre las frecuencias de 125 Hz y 4000 Hz, y una curva patrón. Este número único (baremo) de Aislamiento Acústico o STC, en conjunto con otros estadísticos, son los parámetros que permitirán establecer una relación objetiva entre los diferentes métodos.

Además, se considerará el error cuadrático medio y el sesgo de las curvas predichas respecto a mediciones experimentales, de modo de poder cuantificar efectividad del algoritmo y determinar qué fenómenos está considerando el algoritmo. Estos fenómenos, tales como el de coincidencia o resonancia masa-aire-masa, entregan información fundamental en la funcionalidad de un elemento constructivo.

De esta manera, este trabajo de tesis permitirá realizar un estudio detallado de los diferentes métodos usados para aproximar el fenómeno físico de la transmisión sonora a través de una pared doble. Los resultados de esta tesis podrán ser útiles a quienes diseñen una pared doble y a quienes estén interesados en conocer el estado del arte, los detalles y la precisión de cada algoritmo de predicción.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo General:

- Realizar la comparación de las curvas de pérdida de transmisión predichas por diferentes algoritmos y casos reales, de modo de poder obtener conclusiones sobre la precisión de cada una, según los parámetros utilizados y la información que entregan, comparando con resultados experimentales.

### 1.2.2 Objetivos Específicos:

- Concluir cuál algoritmo es el que predice mejor el número único de aislamiento acústico de una pared doble o STC.
- Encontrar las diferencias en precisión de los algoritmos según el peso de los paneles, la influencia de material absorbente en la cavidad, etc.
- Estudiar la predicción de algunos fenómenos físicos, tales como resonancias o efectos de coincidencia, mediante el uso de los diferentes algoritmos.
- Escribir un programa computacional que calcule y dibuje las curvas de pérdida de transmisión según los diferentes métodos, permita calcular el valor de STC que aportaría cada predicción y luego la compare con el STC de los datos experimentales medidos en un laboratorio\*

\* Los datos experimentales fueron obtenidos de experimentos realizados en laboratorios normalizados (CSIC, Madrid, España) y de resultados reportados en la bibliografía.

## **2. El Sonido**

El sonido es un fenómeno vibratorio que, a partir de una perturbación inicial del medio elástico donde se produce, se propaga, bajo la forma de una variación de presión y desplazamiento en las partículas que conforman dicho medio. Puede ser representado por una secuencia de compresiones y rarefacciones del medio en el que se propaga, a partir de una fuente sonora. Como en cualquier proceso mecánico se produce un intercambio de energía debido al movimiento generado.

### **2.1 Propagación del Sonido**

El mecanismo de la propagación de sonido envuelve una interacción entre presiones generadas por reacciones elásticas a tensiones volumétricas, que actúan a medida del cambio de momentum de las partículas de fluido y la inercia del fluido que resiste este “atentado”. La propagación de sonido requiere que las tensiones volumétricas y las presiones asociadas varíen con la posición, de modo que las partículas de fluido sufran diferencias de presión entre ellas, produciendo aceleraciones de partículas. El sonido resulta de la conexión entre aceleraciones y tensiones volumétricas, ambas funciones del desplazamiento de partículas.

Las perturbaciones acústicas se propagan en la forma de ondas. Una onda en un medio material puede ser definida como un proceso a través del cual se transporta una perturbación del equilibrio por el medio, sin transporte neto de masa. Las ondas también transportan energía y momentum asociado a estas perturbaciones.

#### **2.1.1 Propagación de sonido en fluidos**

Las ondas sonoras en fluidos son ondas longitudinales, salvo las propagadas en el agua. Cuando llegan ondas sonoras de muchas direcciones simultáneamente, las partículas describen movimientos mucho más complicados. Esto no es porque las ondas sonoras interactúen afectando a otras, sino porque satisfacen el principio de superposición lineal.

Las ondas sonoras son de compresión. Pueden existir ondas de corte (las cuales tendrán mayor relevancia en líquidos que en gases), dependiendo de la viscosidad del medio. En gases ideales, las partículas de aire se desplazan hacia delante y hacia atrás en

dirección paralela a la dirección con la cual viaja la onda, por tanto son ondas longitudinales.

### 2.1.2 Propagación del sonido en sólidos

El sonido se puede transmitir de un volumen de fluido a otro a través de un medio sólido. Como los sólidos pueden almacenar energía de compresión y de corte, las ondas adoptan tres formas: Una forma casi longitudinal, en la cual el movimiento principal es en dirección de propagación de la onda; una onda transversal (de cizallamiento), en la cual el movimiento es perpendicular a la dirección de propagación de la onda; y ondas de pliegue o de flexión, que tienen forma desviada y envuelven una combinación de la distorsión longitudinal y transversal. Las ondas de pliegue son de importancia particular en el fenómeno acústico porque, de las tres, se acoplan más fácil a los fluidos contiguos para recibir y radiar energía.

El modelado y análisis de la propagación de sonido en estructuras sólidas es mucho más complicado que en fluidos, porque los distintos tipos de ondas se acoplan entre ellas en uniones estructurales. Se alcanzan luego mayores complicaciones porque la velocidad de las ondas de pliegue varía con la frecuencia, es decir el medio es dispersivo.

## 2.2 Ondas en una placa

Como ya se ha mencionado, el sonido es un fenómeno vibratorio y se propaga a través de ondas, que dependiendo del medio a través del cual se estén transmitiendo, pueden ser longitudinales, transversales, de superficie o de pliegue (Arenas, 1997):

### 2.2.1 Ondas Longitudinales

Para estas ondas, las moléculas se mueven de uno a otro lado, en la dirección de propagación de la onda.

En placas, tomando el caso de una onda plana que se propaga a lo largo del eje  $x$  (la deformación no depende el eje  $y$ ), la velocidad de propagación de una onda longitudinal es:

$$C_l = \sqrt{\frac{E}{\rho(1 - \sigma^2)}} \text{ (m/s)} \quad (2.2.1.1)$$

donde:

$E$  : módulo de Young [N/m<sup>2</sup>]

$\rho$  : densidad del sólido [kg/m<sup>3</sup>]

$\sigma$  : coeficiente de Poisson (adimensional)

### 2.2.2 Ondas Transversales

En estas ondas, la velocidad de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación de la onda. La propagación de la onda consiste en una deformación por cizallamiento, sin variación de volumen. La velocidad de propagación es:

$$C_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\sigma)}} \quad (m/s) \quad (2.2.2.1)$$

donde:

$E$  : módulo de Young [N/m<sup>2</sup>]

$\rho$  : densidad del sólido [kg/m<sup>3</sup>]

$\sigma$  : coeficiente de Poisson (adimensional)

### 2.2.3 Ondas de superficie (Ondas de Rayleigh)

Son ondas elásticas que se propagan cerca de la superficie de un cuerpo sin penetrar en él. Por lo tanto, son ondas que perturban el entorno de la placa expuesta a la onda, en el caso que ésta tenga un espesor grande en comparación a la longitud de las ondas longitudinales. De esta forma, acompañan e influyen a las ondas de pliegue (o de flexión).

Para un medio elástico isotrópico infinito, las velocidades de propagación longitudinal y transversal son, respectivamente:

$$C_l = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)}} \quad (m/s) \quad (2.2.3.1)$$

$$C_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\sigma)}} \quad (m/s) \quad (2.2.3.2)$$

donde:

$E$  : módulo de Young [N/m<sup>2</sup>]

$\rho$  : densidad del sólido [kg/m<sup>3</sup>]

$\sigma$  : coeficiente de Poisson (adimensional)

## 2.2.4 Ondas de Pliegue

Las ondas de pliegue (o de flexión), son aquellas que se propagan en una placa delgada cuando se la somete a fuerzas perpendiculares al plano de la placa. Este tipo de ondas son el resultado de la combinación de fuerzas expansivas (dilatación) y compresivas. Por lo tanto, tienen componentes de ondas longitudinales y transversales y hacen ondular la placa en forma de serpiente.

Las ondas de flexión asocian desplazamientos importantes en una dirección transversal a la de propagación, lo cual produce una perturbación no insignificante a las partículas de aire adyacentes a la placa.

La velocidad de propagación de las ondas de pliegue es:

$$C_p = \sqrt[4]{\frac{\omega^2 B}{\rho_s}}, \text{ (m/s)} \quad (2.2.4.1)$$

donde:

$\omega$  : frecuencia angular [rad/s]

$\rho_s$  : densidad superficial del sólido [kg/m<sup>2</sup>]

$B$  : rigidez al pliegue del sólido, rigidez a la flexión [Nm].

La rigidez al pliegue en placas sólidas comunes, se aproxima usualmente a:

$$B = \frac{E h^3}{12}, \text{ (Nm)} \quad (2.2.4.2)$$

donde:

$E$  : módulo de Young [N/m<sup>2</sup>]

$h$ : espesor de la placa [m].

Particularmente, cuando  $C_p = c$ , ocurre el efecto de coincidencia, donde:

$$\sqrt[4]{\frac{\omega^2 B}{\rho_s}} = c \text{ (m/s)}, \quad (2.2.4.3)$$

ecuación desde la cual se encuentra la frecuencia crítica, que es:

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_s}{B}}. \text{ (Hz)} \quad (2.2.4.4)$$

De este efecto y la frecuencia crítica se referirá mayormente en el capítulo 3.

### **3. Aislamiento Acústico**

Como ya se ha mencionado, el sonido requiere un medio elástico para propagarse. Por lo tanto, en la transmisión de sonido será de particular interés el estudio de las propiedades del medio a través del cual el sonido se transmite y las interacciones que se generarán cuando el sonido se transmita de un medio al otro. Por otra parte, en el estudio de la transmisión de sonido se asumen ciertos comportamientos según el medio de propagación.

#### **3.1 Panel Infinito**

Un panel se considera infinito si se cumplen las siguientes condiciones:

- i) la placa es delgada (la longitud de las ondas de pliegue es mucho mayor que el espesor del panel).
- ii) No hay ondas reflejadas desde los bordes.

##### **3.1.1 Amortiguamiento del panel**

Existen tres propiedades estructurales que determinan esencialmente las respuestas dinámicas y características de transmisión de las estructuras, éstas son:

- i) Masa (asociada a la energía cinética de la estructura).
- ii) Rigidez (asociada a la energía potencial almacenada en la estructura).
- iii) Amortiguamiento (conversión de energía mecánica a térmica al deformarse la estructura, esto es, la energía disipada).

A partir de estas tres propiedades, es posible construir un modelo equivalente de cualquier sistema mecánico lineal e invariante en el tiempo, que se conoce como el modelo de parámetros “concentrados”.

El amortiguamiento no puede ser deducido u obtenido de simples mediciones estáticas, debido a que involucra muchos fenómenos físicos, entre ellos: mecanismos de fricción, viscosidad, turbulencia, radiación acústica, etc. En los casos prácticos, sin embargo, predominan uno o dos mecanismos, pudiendo despreñar los efectos de los otros.

### 3.1.2 Frecuencia crítica y efecto de coincidencia

Como se introdujo en el capítulo anterior, la frecuencia crítica,  $f_c$ , de un panel es aquella frecuencia a la cual la velocidad de propagación de la onda de pliegue iguala a la velocidad del sonido en el aire. De la ecuación (2.2.4.4):

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_s}{B}} \cdot (\text{Hz}) \quad (3.1.2.1)$$

Mientras que a baja frecuencia el panel se mueve como un todo, en frecuencias más altas puede experimentar movimientos de ondulación, presentando zonas alternadas de alta y baja presión en la superficie del panel. Cuando la onda sonora incide oblicuamente sobre el panel, a partir de la *frecuencia crítica*, se puede producir una *coincidencia* entre la onda sonora en el aire proyectada sobre la superficie y la onda de pliegue. Esto lleva a la pared a entrar en resonancia, es decir, vibrar con gran amplitud, por lo que se convierte en un radiador sonoro muy eficiente hacia el otro lado del panel. Como consecuencia, la atenuación sonora que proporciona en lugar de seguir aumentando con la frecuencia, disminuye. Esto se conoce como el *efecto de coincidencia*.

### 3.1.3 Panel Infinito No Amortiguado

Consideremos una placa delgada infinita, sin amortiguamiento interno, excitada mecánicamente para inducir una onda de pliegue plana de amplitud constante y velocidad de propagación  $C_p$ .

La onda sonora es radiada al exterior en cierta dirección dada, por lo cual (Arenas, 1997)

$$\text{sen } \theta = \frac{\lambda}{\lambda_p} = \frac{c}{C_p} \quad (3.1.3.1)$$

donde  $c$  es la velocidad de propagación de la onda sonora en el aire.

La onda mecánica se propaga a lo largo de la placa con velocidad de pliegue  $C_p$ . Se pueden distinguir tres casos según el valor de la velocidad de propagación:

i) Caso  $C_p < c$ , es decir,  $f < f_c$ ,

$$c / C_p > 1,$$

$$\text{sen } \theta > 1.$$

No existe ángulo  $\theta$  al cual la onda sonora se proyecte desde el panel. Por lo tanto, al excitar un panel infinito mecánicamente bajo la frecuencia crítica éste, teóricamente, no producirá radiación de sonido.

ii) Caso  $C_p = c$ , es decir,  $f = f_c$ ,

$$c / C_p = 1,$$

$$\text{sen } \theta = 1,$$

$$\theta = 90^\circ.$$

Corresponde al caso crítico.

iii) Caso  $C_p > c$ , es decir,  $f > f_c$ ,

$$c / C_p < 1,$$

$$\text{sen } \theta < 1,$$

$$0^\circ < \theta < 90^\circ.$$

Caso en el que el panel es un radiador eficiente de sonido.

### 3.1.4 Panel Infinito Amortiguado

Para un sistema mecánico compuesto de masa, resorte y amortiguador, se define (Arenas, 1997):

i) El Factor de Pérdidas,  $\eta$ , como la razón entre la energía por ciclo disipada por radiación y la energía potencial máxima que el sistema puede almacenar en un ciclo de vibración.

$$\eta = \frac{D / 2\pi}{E_{pot,max}}. \quad (3.1.4.1)$$

El factor de pérdidas de un sistema de un grado de libertad estará dado entonces por:

$$\eta = \frac{\omega C}{k} \quad (3.1.4.2)$$

ii) El Factor de Radiación,  $\sigma_{rad}$ , como la razón entre la potencia acústica radiada por el panel,  $W_A$ , y la potencia acústica que un pistón infinito radiaría al vibrar con la misma velocidad (RMS) de la placa. De este modo:

$$\sigma_{rad} = \frac{W_A}{u_{rms}^2 \rho_0 c}. \quad (3.1.4.3)$$

## 3.2 Coeficiente de Transmisión Sonora

### 3.2.1 Coeficiente de Transmisión Sonora Oblicuo

Se define el Coeficiente de Transmisión,  $\tau$ , como la razón entre la energía acústica transmitida y la energía acústica incidente. El coeficiente de transmisión se puede obtener, para un determinado ángulo de incidencia, a partir de la relación energética (Gerges & Arenas, 2004):

$$\tau(\theta) = \frac{I_t}{I_i} = \left| \frac{p_t}{p_i} \right|^2 = \left| \frac{u_t}{u_i} \right|^2. \quad (3.2.1.1)$$

donde:

$I_i$ : Intensidad sonora incidente [*watts/m<sup>2</sup>*]

$I_t$ : Intensidad sonora transmitida [*watts/m<sup>2</sup>*]

$p_i$ : presión sonora incidente [*N/m<sup>2</sup>*]

$p_t$ : presión sonora transmitida [*N/m<sup>2</sup>*]

$u_i$ : velocidad de partículas incidente [*m/s*]

$u_t$ : velocidad de partículas transmitida [*m/s*].

### 3.2.2 Coeficiente de Transmisión Sonora de Incidencia Aleatoria

Para estudiar el campo sonoro de una sala, se supone que en ésta se presenta un campo sonoro difuso, es decir, un campo formado por un conjunto de ondas sonoras planas de la misma intensidad promedio y que viajan con igual probabilidad en todas direcciones.

De esta forma, la intensidad transmitida es:

$$I_{trans} = \int_{\Omega} \tau(\theta) \cdot I_{inc} \cdot \cos \theta \cdot d\Omega \quad (Watt/m^2) \quad (3.2.2.1)$$

donde la integración se realiza sobre un hemisferio de ángulo sólido  $\Omega$ , donde  $d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi$ .

Como la intensidad incidente,  $I_{inc}$ , es la misma para todas las ondas planas y  $\tau$  es independiente del ángulo polar  $\varphi$ , un coeficiente de transmisión promedio puede ser definido como:

$$\bar{\tau} = \frac{\int_0^{\theta_{lim}} \tau(\theta) \cos \theta \operatorname{sen} \theta d\theta}{\int_0^{\theta_{lim}} \cos \theta \operatorname{sen} \theta d\theta} \quad (3.2.2.2)$$

donde:

$\theta_{lim}$  : ángulo de incidencia límite del campo sonoro.

Para incidencia aleatoria,  $\theta_{lim} = \pi/2$ , es decir, el campo es perfectamente difuso.

### 3.2.3 Efecto de la Incidencia de Campo

La aproximación de incidencia aleatoria se basa en que el campo sonoro incidente es perfectamente difuso. El campo perfectamente difuso es idéntico a la distribución uniforme direccional de energía incidente, lo que significa que la energía incidente sobre la estructura es uniforme sobre todos los ángulos de incidencia. Es bien conocido que la predicción utilizando la distribución uniforme presenta fuertes diferencias con los resultados experimentales. Esto se debe a que la distribución uniforme no representa en forma real el campo sonoro incidente sobre la estructura.

El método de incidencia de campo se basa en truncar el ángulo de incidencia hasta cierto ángulo límite, determinado empíricamente. Beranek, en el Capítulo 13 de su libro “Noise Reduction” (Beranek, 1971), menciona que un ángulo límite de 78°, otorga una mejor correlación entre los datos experimentales y la teoría para paneles simples y lo nombra “método de incidencia de campo”: Valores típicos de ángulos límite varían entre los 70° y 85°. La explicación para justificar la corrección empírica, es que el campo de sonido de una cámara reverberante no es perfectamente difuso, de modo que no incide energía sonora sobre los paneles por sobre el ángulo de roce más cercano, es decir 78°.

### 3.3 Pérdida de Transmisión

Para conocer las propiedades de aislamiento sonoro de una partición, se debe obtener la diferencia entre el nivel de intensidad incidente y el nivel de intensidad transmitida. Esta diferencia se conoce como Pérdida de Transmisión Sonora Aérea,  $TL$ , y está relacionado con el Coeficiente de Transmisión,  $\tau(\theta)$ , de la siguiente forma (Gerges & Arenas, 2004):

$$TL = 10 \log \frac{1}{\bar{\tau}}, [dB]. \quad (dB) \quad (3.3.1)$$

$$TL_{field} = 10 \log \frac{1}{\bar{\tau}_{field}} \quad (dB) \quad (3.3.2)$$

### 3.4 Medida de la Pérdida de Transmisión

Para medir la pérdida de transmisión de una estructura, se instala el elemento a medir entre dos salas reverberantes que se denominan emisora y receptora, respectivamente (Norma ISO R 140, 1978).

Como el nivel de presión sonora no depende sólo de la potencia de la fuente utilizada, sino también de las características acústicas de la sala, si se utiliza sólo la diferencia entre los niveles en la sala emisora y receptora como medida del aislamiento acústico, se valora tanto las características de la estructura como las de las salas.

Ahora, como medida que describe el comportamiento acústico del sistema en cuestión, se utiliza el coeficiente de transmisión de energía,  $\tau$ , que representa la relación entre la energía transmitida a la sala receptora e incidente sobre la pared en la sala emisora (Barros, 2004):

$$\tau = \frac{E_R}{E_E} = \frac{P_R}{P_E} \quad (3.4.1)$$

Para este efecto, se evalúa la potencia en las salas emisora y receptora, representadas por  $P_E$  y  $P_R$ , respectivamente. Se asume campo difuso en ambas salas, y se toma en consideración que en la sala receptora (para estado estacionario), la potencia que ingresa a la sala debe igualar a la potencia absorbida por la misma.

Luego, el coeficiente de transmisión está dado por:

$$\tau = \frac{P_R}{P_E} = \frac{\frac{\tilde{p}_R^2 \cdot A_R}{4\rho c}}{\frac{\tilde{p}_E^2 \cdot S_P}{4\rho c}} = \frac{\tilde{p}_R^2 \cdot A_R}{\tilde{p}_E^2 \cdot S_P} \quad (3.4.2)$$

donde:

$\tilde{p}_E, \tilde{p}_R$  : presión sonora efectiva en la sala emisora y receptora, respectivamente.

$S_P$ : superficie de la pared divisoria.

$A_R$  : área de absorción sonora equivalente de la sala receptora (según Sabine).

A partir de esto se puede obtener el índice de aislamiento acústico (valor obtenido a partir de mediciones),  $TL_{med}$ , como:

$$TL_{med} = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{\tau}\right) = L_E - L_R - 10 \cdot \log\left(\frac{A_R}{S}\right) \quad (dB) \quad (3.4.3)$$

donde:

$L_R$ : Nivel de presión medio en la sala receptora.

$L_E$ : Nivel de presión medio en la sala emisora, es decir el nivel obtenido al promediar espacial y temporalmente las presiones al cuadrado.

Los niveles de presión pueden ser medidos y promediados directamente, pero queda aún la obtención experimental del área de absorción. Para obtener este valor, se puede medir el tiempo de reverberación de la sala receptora, el cual puede ser ingresado a la fórmula de Sabine, con el fin de obtener el área de absorción medido, como:

$$A_R = \frac{0.161 \cdot V_R}{T_{60R}} \quad (m^2 \text{ Sabine}) \quad (3.4.4)$$

donde:

$V_R$ : volumen de la sala receptora.

$T_{60R}$ : tiempo de reverberación de la sala receptora.

El tiempo de reverberación se define como el tiempo durante el cual la energía sonora en el recinto se reduce 60 dB o, dicho de otro modo, a una millonésima del valor inicial después de cesar la fuente de ruido. Al igual que el tiempo de reverberación, el índice de aislamiento acústico es altamente dependiente de la frecuencia, aumentando en general al aumentar la frecuencia. Como señal acústica en las mediciones se utiliza ruido de banda ancha y, normalmente, utilizando filtros de octavas o de tercios de octavas, obteniendo así una curva para  $TL_{med}$ .

### 3.5 Número único de Aislamiento Acústico - STC

La pérdida de transmisión ( $TL$ ) se representa gráficamente como una curva en función de la frecuencia. Por simplicidad, se ha buscado transformar esta cantidad de información en un número único (baremo), que cuantifique la pérdida de transmisión.

Debido a la dependencia de la frecuencia de los valores, la transformación de la curva de aislamiento acústico en un número único se obtiene mediante una comparación respecto a una curva de referencia normalizada, en bandas de tercios de octava. Existen para la obtención del número único dos normas vigentes: La Norma ISO 717 o DIN 52210, que obtiene el denominado número único de aislamiento acústico,  $R_w$ , también llamado índice de reducción sonora ponderado, y la Norma ASTM E413, que obtiene el número único de aislamiento acústico  $STC$ , o Sound Transmission Class. Los resultados entregados por las normas son similares, variando el rango de frecuencia con que se comparan las curvas.

El  $STC$ , número único de aislamiento utilizado para este trabajo de tesis, realiza la comparación entre la pérdida de transmisión medida en bandas de 1/3 de octava entre las frecuencias de 125 Hz y 4000 Hz, y una curva patrón (Ver fig. 3.7.1). El  $STC$  es el valor de la pérdida de transmisión ( $TL$ ), correspondiente a la banda de 500 Hz de la curva patrón más alta y que cumpla las siguientes condiciones:

- Exista una diferencia máxima de 8 dB de  $TL$  debajo de la curva patrón de  $STC$ .
- Las diferencias de los valores de  $TL$  en bandas de 1/3 de octava, debajo de la curva patrón de  $STC$ , sumen como máximo 32 dB.

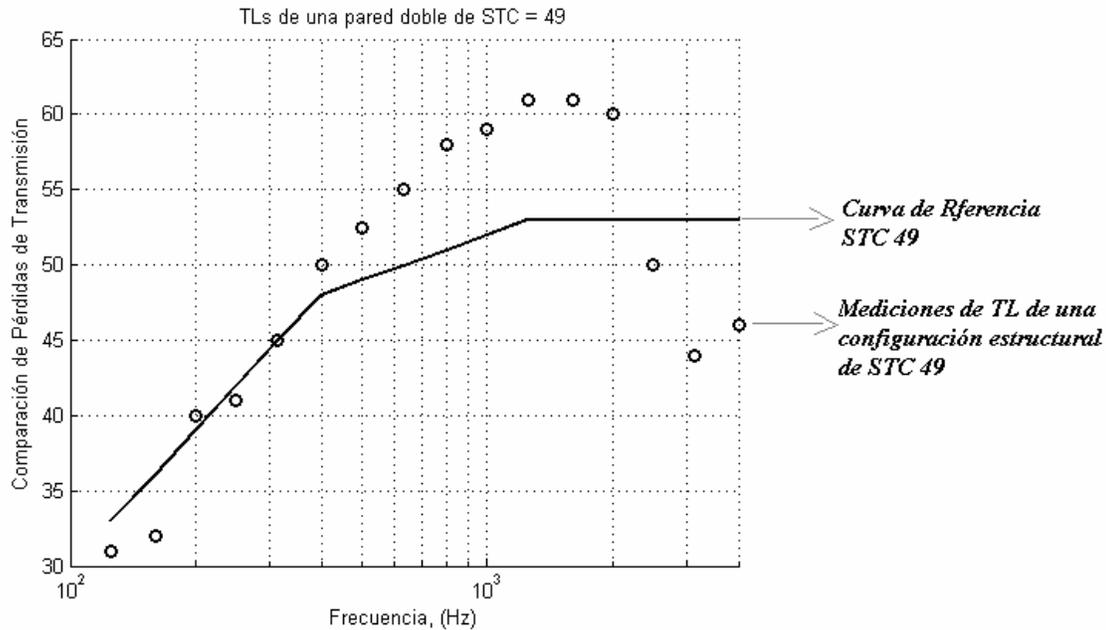


Fig. 3.5.1: Gráfica de comparación entre la pérdida de transmisión medida de una pared y la curva patrón de STC 49.

Esta estimación de pérdida de transmisión, al ser un número único, no toma en consideración la frecuencia, como parámetro fundamental de la pérdida de transmisión de una estructura, por lo cual no es un valor de precisión y fidelidad. Aún así, otorga un valor aproximado del aislamiento que podrá proporcionar la estructura. Esta estimación puede llegar a ser muy errónea si la curva de atenuación tiene variaciones muy marcadas que difieren mucho de la curva de referencia y cuando las frecuencias de mayor importancia son muy inferiores a 500 Hz. Sin embargo, se considera un parámetro muy útil para realizar comparaciones entre una partición y otra.

### 3.6 Materiales de Absorción Sonora

Estos materiales aportan un mecanismo resistivo al aislamiento acústico que puede ser utilizado para el revestimiento interno de paredes o ductos. Transforman parte de la energía acústica en energía térmica a través de la viscosidad del aire, lo cual se traduce en una reducción del nivel de presión sonora (NPS).

Esto ocurre tanto con los materiales porosos (espuma), como en los fibrosos (lana de vidrio, lana mineral, algodón, etc.). Este tipo de absorbentes es efectivo para frecuencias

cuyo  $\lambda/4$  sea menor que el grosor del material, lo cual influirá directamente en el material y espesor escogidos para algún diseño.

Los materiales de alta absorción acústica son normalmente porosos. En los materiales porosos, la energía acústica incidente entra por los poros y se disipa por reflexiones múltiples y roce viscoso, transformándose en energía térmica.

En los materiales fibrosos la energía acústica incidente entra por los intersticios de las fibras, haciéndolas vibrar junto con el aire, disipándose así por transformación en energía térmica por roce entre las fibras excitadas.

Tanto para el material poroso, como para el fibroso, es esencial que el material admita el paso de un flujo de aire, que tendrá como consecuencia la propagación de ondas acústicas por el aire de los poros o intersticios del material fibroso o poroso, por lo cual los materiales acústicos deben tener celdas abiertas. La cantidad de energía que se disipa depende de la resistencia al flujo que ofrece el material, su densidad y porosidad, la distribución de sus canales o fibras internas debido a su disposición y en algunos casos de su elasticidad. Si el espesor del material es grande comparado con la longitud de onda del sonido que se propaga, se denomina material tipo lámina (*sheet*), y en bloque (*bulk*), si su espesor es pequeño en comparación a la longitud de onda.

En los materiales tipo lámina, los efectos viscosos y la densidad superficial controlan el comportamiento del material respecto a la onda sonora que se propaga en su interior. En los materiales tipo bloque, los efectos viscosos y térmicos, así como la densidad del material sólido, lo controlan.

Es importante notar que la cantidad de energía absorbida no tiene relación directa con la transmitida. Esto quiere decir que, si al interior de una sala colocamos una gran cantidad de material absorbente y el tiempo de reverberación disminuye, la intensidad del sonido que se radia fuera de ésta prácticamente no variará.

La característica de absorción acústica de un material está determinada por un coeficiente de absorción acústica,  $\alpha$ , definido por la razón entre la energía acústica absorbida con respecto a la energía acústica incidente.

El valor de  $\alpha$  es siempre positivo y varía entre cero y uno. Depende principalmente de la frecuencia, ángulo de incidencia del sonido, tipo de campo sonoro (difuso, ondas planas, etc...), densidad, espesor y estructura interna del material. Mientras que la magnitud

de la absorción, depende de la porosidad efectiva y el factor de estructura. Si todos los poros están interconectados entre sí, el material tendrá un coeficiente de absorción mayor.

Para la cuantificación de las características internas de los materiales se usan en general tres parámetros que son los más importantes. Estos parámetros se presentan a continuación (Delaney & Bazley, 1970; Crocker & Arenas, 2007):

i) *Resistividad al Flujo de Aire*

La resistividad específica al flujo es:

$$R_s = \frac{\Delta p}{u} \quad (\text{Rayls}) \quad (3.6.1)$$

donde:

$\Delta P$ : Diferencia de presión a través del espesor del material, medida a ambos lados del material por la cual se fuerza el paso del aire ( $N/m^2$ ).

$u$  : Velocidad normal del aire con respecto a la superficie de la muestra ( $m/s$ ).

La resistividad de flujo,  $R$ , se define como la resistividad específica de flujo por unidad de espesor del material ( $d$ ), por lo cual  $R$  está dado por:

$$R = \frac{R_s}{d} = \frac{\Delta p}{d \cdot u} \quad (\text{Rayls/m}) \quad (3.6.2)$$

donde  $d$  es el espesor de la muestra del material.

Para materiales de alta porosidad la relación entre el coeficiente de absorción acústica,  $\alpha_n$ , para onda incidente normal, y la resistividad al flujo, es dada por:

$$\alpha_n = \frac{4b}{(b+1)^2 + \psi^2} \quad (3.6.3)$$

donde:

$$b = 1 + 0.0571 \cdot \left( \frac{\rho f}{R} \right)^{-0.754} \quad \text{y} \quad \psi = -0.0870 \cdot \left( \frac{\rho f}{R} \right)^{-0.732}$$

con:

$\rho$  como la densidad del aire en  $kg/m^3$   
 $f$ , la frecuencia de la onda en  $Hz$

ii) *Porosidad (Y)*

La porosidad ( $Y$ ), es la razón entre el volumen de las cavidades de aire en el interior del material y su volumen total. Es decir, es la relación entre el volumen de vacíos de los poros de la muestra del material en relación al volumen total de la muestra. Esto es:

$$Y = \frac{V_a}{V_m} \quad (3.6.4)$$

donde:

$V_a$ : Volumen de vacíos de la muestra

$V_m$ : Volumen total de la muestra del material .

iii) *Factor de Estructura (S)*

La estructura interna de un material poroso se describe por el factor de estructura  $S$ . La variación de este parámetro puede producir un incremento de la densidad del aire en las cavidades del material. Este incremento es el resultado de los caminos que deben tomar las partículas de aire cuando oscilan en el interior del material. Por lo tanto,  $S$  describe la influencia de la geometría de la estructura interna del material sobre la densidad efectiva y compresibilidad del fluido. Normalmente no es posible estimar teóricamente su valor.

Algunas formas internas de la estructura de los materiales absorbentes pueden ser:

- a) Cavidades laterales
- b) Variación del área de la sección transversal
- c) Canales no axiales

Finalmente, un parámetro menos importante, pero que debe ser también tomado en consideración, es el coeficiente volumétrico de elasticidad del aire  $K$ , definido como:

$$K = -\frac{\Delta P}{\Delta V} V \quad (N/m^2) \quad (3.6.5)$$

donde :

$V$  : Volumen total de aire considerado [ $m^3$ ]

$\Delta P$  : variación de presión [ $N/m^2$ ]

$\Delta V$  : variación de volumen [ $m^3$ ].

Por lo tanto, se interpreta como la variación negativa de presión con respecto a la variación de volumen de un cierto volumen total. Se relaciona con la compresibilidad del fluido y por lo tanto aporta a la absorción que éste otorgará.

## **4. Pérdida de Transmisión de paredes Dobles**

### **4.1 Antecedentes de los Modelos Predictivos**

En 1948 Albert London se aleja de la tradicionalmente conocida Ley de Masa, introduciendo el Método de Onda Progresivo, que utiliza estadística de sonido reverberante para obtener una expresión de pérdida de transmisión para incidencia normal. El método se basa en otorgar soluciones progresivas a la ecuación de onda en las diferentes capas de la estructura multicapa. En 1950, el método fue extendido por el mismo autor para ser aplicado a incidencia oblicua y aleatoria.

En 1949 y también derivando de la ecuación de onda clásica, Beranek & Work introducen el método de impedancia progresiva (PIM). El método trabaja en base a los parámetros distribuidos de impedancia acústica de los diferentes elementos de la estructura multicapa para entregar una expresión de TL, que incluya terminaciones perfectamente absorbentes a incidencia normal. En 1965, White & Powell dan solución a este problema, extendiendo el PIM para el caso de incidencia oblicua y aleatoria. Finalmente, en 1978, Ookura & Saito trabajan sobre el PIM de incidencia oblicua, obteniendo una expresión para el asilamiento acústico provisto por cualquier configuración de estructura multicapa que incluya material absorbente y capas impermeables. Ya en 1999, Fringuelino & Guglielmone consideran una pared N-laminada, subdividiendo las capas en propagativas y no propagativas, según su espesor en comparación a la longitud de onda transmitida, para aplicar luego el método introducido por Beranek & Work y obtener resultados que tomen en cuenta la longitud de la onda y el espaciado de la  $n$ -ésima cavidad o pared.

En 1972, Donato utiliza estos métodos clásicos y simplifica las integrales involucradas, de modo que puedan ser evaluadas analíticamente. El autor tiende a compensar por primera vez en los métodos clásicos la extensión finita de la pared en bajas frecuencias, utilizando aproximaciones del número de onda. También, en la misma década, Ben Sharp, motivado por la razón que la predicción de aislamiento hasta ese momento otorgaba valores irreales, exceptuando los elementos más simples, desarrolla un trabajo cuyos resultados indican que es posible mejorar la predicción de estructuras mucho más complejas, introduciendo efectos aún no considerados, de los cuales el que más se destaca es la transmisión a través de las uniones estructurales entre los paneles.

En 1976, Robert Jones realiza una aproximación a la conocida Ley de Masa, para obtener una simplificación al modelo preestablecido y otorgar una expresión que sea más fácil de calcular en el momento del diseño de una pared doble, considerando las correcciones aplicadas por Sharp. En 1980, Gösele realiza una modificación a la Ley de Masa, al considerar que el panel se compone de una masa compleja, la cual reflejaría los elementos de rigidez del mismo. El mismo año, Iwashige & Ohta realizan una aproximación sobre el Método de Onda Progresivo, que otorga una estimación práctica del TL, aún ante el costo de la exactitud teórica, pero que facilite el cálculo de la pérdida de transmisión de una construcción considerando el efecto de la pérdida interna del medio. Consideran paneles livianos y no toman en cuenta el efecto producido en la frecuencia de coincidencia. De las aproximaciones realizadas por Jones e Iwashige & Ohta, nace el trabajo realizado por Pagliarini & Pompoli, los cuales logran expresar las condiciones necesarias para obtener cierto aislamiento acústico bajo la Norma ISO 140/78 y realizando una comparación de ambas aproximaciones.

En 1984, Trochidis & Kalaroutis tratan las paredes dobles como un sistema unificado, realizando una analogía con sistemas mecano-acústicos acoplados y aplicando la ecuación de onda a la transmisión de sonido mediante éstos. En 1996, Novikov investiga la pérdida de transmisión de paneles finitos montados sobre paredes finitas en baja frecuencia al comparar su eficiencia de radiación con respecto a la de las paredes infinitas. Como el TL de paredes infinitas puede calcularse a través de la Ley de Masa y en frecuencias bajas influye considerablemente la extensión de los paneles, el TL, en baja frecuencia y en paredes finitas, podrá calcularse a través de Ley de Masa más un factor de corrección obtenido de la relación de eficiencias de radiación. Finalmente, en 2003, António, Tadeu & Mateus utilizan un método analítico que toma en cuenta el acoplamiento entre los espacios de aire y sólido en una pared doble, sin restricción en el grosor de la capa, utilizando métodos tales como el de Kirchhoff o Mindlin.

En 1965, Lyon & Scharton dan un nuevo giro en el procedimiento del cálculo de la pérdida de transmisión, introduciendo un procedimiento que se basa en la transferencia de energía en sistemas interconectados. Es decir, toman el sistema compuesto por la pared doble como varios elementos acoplados y, así, aplicando conceptos estadísticos, introducen el análisis estadístico de energía (SEA). En 1969, Crocker & Price profundizan en estos conceptos, al calcular la respuesta estructural de ambos paneles expuestos a excitación

acústica determinada por la forma de los modos, calculando la respuesta de cada uno y superponiéndolos. Esta superposición lleva a la respuesta total del sistema, el cual al ser una pared doble estaría constituida por 5 osciladores acoplados, en los cuales se debe separar la transmisión resonante de la no resonante, pues en la no resonante se aplican conceptos de física convencionales, como es la Ley de Masa. Ya en la década del 80, Brekke trabaja sobre este último tema, asumiendo que las transmisiones resonantes y no resonantes están superpuestas, de modo que las vibraciones forzadas no resonantes en el panel son reflejadas en los bordes, produciéndose ondas estacionarias que son vibraciones resonantes. En 1984, Trochidis presenta aplicaciones del análisis estadístico de energía en acústica arquitectónica, para poder comprender la transmisión de sonido transmitido por las estructura sobre grandes distancias. En 1985, Iwashige, Ohta & Nakasako extienden el SEA aplicado por Price & Crocker a paneles dobles a estructuras multicapa de orden N, permitiendo paneles paralelos, no paralelos y capas de material absorbente intercaladas. Establecen patrones de flujo de potencia tanto resonante como no resonante. En 1996, Craik, Nightingale & Steel, en vista que mediciones en edificios reales habían mostrado que el TL aerotransmitido de una pared es menor cuando tiene aislante al fuego, utilizan el SEA para desarrollar un modelo que permita la transmisión estructural de vibración de un aislante al fuego continuo. El año 2000, Craik & Smith realizan en 2 publicaciones una aproximación alternativa al TL de una pared compuesta, integrando al estudio del sistema SEA completo una subdivisión: el sonido aerotransmitido y el sonido transmitido por la estructura. Luego, en el 2003, Craik realiza un estudio de la transmisión no resonante al utilizar análisis estadístico de energía. Muestra cómo un modelo simple puede ser usado para derivar directamente una expresión para el acoplamiento entre una cavidad y un recinto.

## **4.2 Modelos Predictivos Analizados**

### **4.2.1 Modelo Ley de Masa**

Ley de Masa de una pared simple: De la ecuación de ondas clásica, se obtiene que la pérdida de transmisión debida a una pared simple es:

$$\tau(\theta) = \left[ \left( 1 + \eta \left( \frac{\omega m \cdot \cos \theta}{2\rho_0 c} \right) \left( \frac{\omega^2 B \cdot \sin^4 \theta}{mc^4} \right) \right)^2 + \left( \left( \frac{\omega m \cdot \cos \theta}{2\rho_0 c} \right) \left( 1 - \frac{\omega^2 B \cdot \sin^4 \theta}{mc^4} \right) \right)^2 \right]^{-1} \quad (4.2.1.a)$$

donde:

$\eta$ : factor de pérdida

$\theta$ : ángulo de incidencia

$m$ : densidad de masa superficial del panel

$\rho_0$ : densidad del aire

$\omega$ : frecuencia angular

$B$ : rigidez al pliegue o a la flexión

$c$ : velocidad del sonido

Luego, para frecuencias mucho menores que la frecuencia crítica del panel, despreciando los términos correspondientes, se obtiene que:

$$\tau(\theta) = \left[ \left( 1 + \left( \frac{\omega m \cdot \cos \theta}{2\rho_0 c} \right) \right)^2 \right]^{-1}, \quad (4.2.1.b)$$

lo cual, con los efectos despreciables que la unidad tendrá en un nivel logarítmico, se aproxima el aislamiento de una pared simple a:

$$TL = 10 \cdot \log \left( \frac{\omega m \cdot \cos \theta}{2\rho_0 c} \right)^2 \quad (dB) \quad (4.2.1.c)$$

Luego, para incidencia aleatoria, la pérdida de transmisión es:

$$TL_{random} = TL_0 - 10 \cdot \log(0.23 \cdot TL_0) \quad (dB) \quad (4.2.1.d)$$

donde  $TL_0$  es la pérdida de transmisión oblicua para un ángulo de incidencia normal ( $\theta=0$ ).

Es decir, la pérdida de transmisión por ley de masa de una pared simple a incidencia aleatoria está dada por:

$$TL = 20 \cdot \log(f \cdot m) - 47.7 \quad (dB) \quad (4.2.1.e)$$

Esto implica que al doblar la masa, se duplica la pérdida de transmisión, al igual que al duplicar la frecuencia de la onda incidente. Esto se denomina Ley de Masa para una pared simple.

#### 4.2.1.1 Ley de Masa de una pared doble a incidencia Normal

Como el sistema pared doble consiste básicamente en dos paredes simples separadas por un material elástico o aire, el comportamiento de la transmisión sonora dependerá del comportamiento acústico de cada pared, el acoplamiento entre ellas y la absorción acústica del medio elástico en la cavidad.

La ley de masa para el sistema pared doble, divide el comportamiento acústico del panel doble en tres regiones, bajo la frecuencia de resonancia del sistema masa-aire-masa, entre la frecuencia de resonancia y la frecuencia de transición, y sobre la frecuencia de transición.

Frecuencia de resonancia : Para un sistema mecánico como el que refiere el sistema de pared doble, masa-aire-masa, o mejor dicho, masa-cavidad-masa, la resonancia mecánica se encontrará en:

$$f_o = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (\text{Hz})$$

donde:

$K$ : Rigidez de la cavidad.

$M$ : Masa del sistema equivalente, es decir:

$$M = \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \quad (\text{kg/m}^2)$$

Por lo tanto, la frecuencia de resonancia a incidencia aleatoria está dada por:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cos \theta} \sqrt{\frac{\rho_0 c^2 \cdot (m_1 + m_2)}{d \cdot m_1 \cdot m_2}} \quad (\text{Hz}) \quad (4.2.1.1.1)$$

Luego, la frecuencia de resonancia para incidencia normal será aquella en la cual  $\theta=0^\circ$ . En esta frecuencia, al incidir ondas en dirección normal, la reactancia de masa del panel iguala a la reactancia de rigidez del espacio de aire. Por lo tanto, es la primera frecuencia en la cual la atenuación del sistema es nula. Por sobre esta frecuencia existen ángulos de incidencia en los cuales ocurre el fenómeno de coincidencia (en los cuales la atenuación provista por el panel también es cero), lo cual resulta de una disminución de la predicción teórica del aislamiento para incidencia normal. Aún así, se ha comprobado en la práctica, que el algoritmo que usa la ley de masa a incidencia de campo discrepa bastante con el aislamiento real. Es por esta razón que en el presente trabajo se usará como una

aproximación a la ley de masa para incidencia normal, una extrapolación intuitiva a la incidencia normal, la aproximación realizada por Jones y la corrección de Sharp al modelo ley de masa a incidencia aleatoria.

Frecuencia de transición: La frecuencia de transición sólo depende del espesor de la cavidad y se obtiene al intersectar las rectas de la segunda y tercera región de la curva de ley de masa a incidencia normal. Esta es:

$$f_t = \frac{2 \cdot c}{\pi \cdot d} \text{ (Hz)} \quad (4.2.1.1.2)$$

donde:

$c$ : velocidad del sonido en el aire

$d$ : espesor de la cavidad.

La pérdida de transmisión a través del modelo Ley de Masa se refiere a dos paredes iguales (de masas  $m_1=m_2=m$ ), separadas por un espesor  $d$ , como se presenta en este capítulo. Como el análisis experimental llevado a cabo no sólo consistía de paneles iguales, se utilizó, en su defecto, una masa equivalente igual a la utilizada para encontrar la resonancia.

a) Bajo la frecuencia de resonancia:

En frecuencias bajo la frecuencia de resonancia, las longitudes de onda proporcionan un acoplamiento prácticamente rígido y, por lo tanto, las paredes se comportan como una sola, de masa igual a la suma de las masas individuales. Luego, utilizando la Ley de masa para un panel simple:

$$TL = 10 \cdot \log \left( \frac{2 \cdot m \cdot \pi f}{\rho_0 c} \right)^2 \text{ (dB)} \quad (4.2.1.1.3)$$

donde:

$m=m_1=m_2$ , donde  $m_1, m_2$  son las masas superficiales de los paneles 1 y 2, respectivamente. (para efectos prácticos, se utilizó  $m=[m_1 m_2 / (m_1 + m_2)]$ ).

b) Entre la frecuencia de resonancia y la frecuencia de transición:

En esta región existe un acoplamiento elástico entre las paredes y la cavidad, por lo cual las paredes acopladas influyen en el aislamiento acústico proporcionado por el sistema.

Esto es:

$$TL = 10 \log \left( \frac{2 \cdot m \cdot \pi f}{\rho_0 c} \right)^2 + 40 \log \left( \frac{f_0}{f} \right) \quad (dB) \quad (4.2.1.1.4)$$

c) Sobre la frecuencia de transición:

Las longitudes de onda comienzan a ser del orden del espesor de la cavidad, y por lo tanto las paredes se comportan como dos paredes simples desacopladas. Corresponde a la máxima atenuación posible que se obtiene de las paredes simples separadas por una gran distancia. Esta recta se encuentra bajo los peaks obtenidos a través de la ecuación (4.2.1), pues al asumir las resonancias en la cavidad como alternadas, las caídas corresponderán a las resonancias, mientras que los peaks corresponderán a las antiresonancias. Por lo tanto, en esta región la pérdida de transmisión es:

$$TL = 10 \log \left( \frac{2 \cdot m \pi f}{\rho c} \right)^2 + 6 \quad (dB) \quad (4.2.1.1.5)$$

De la curva final, se puede apreciar que se obtendrá una curva compuesta por tres líneas rectas, las cuales al doblar la frecuencia, aumentarán 6 dB/oct, 18 dB/oct y 12 dB/oct, respectivamente, como se muestra en la figura (4.2.1.1):

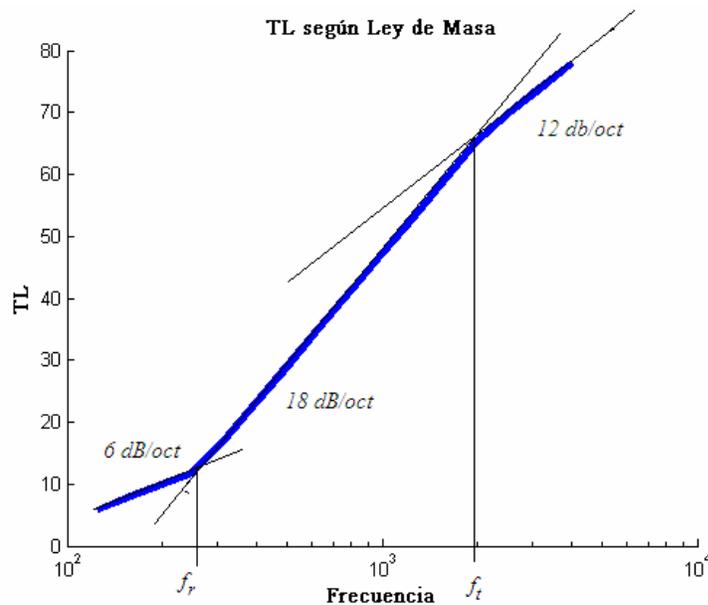


Fig. 4.2.1.1: Curva de pérdida de Transmisión según el Modelo Ley de Masa a incidencia normal.

#### 4.2.1.2 Ley de Masa a Incidencia Aleatoria

Bajo la frecuencia de resonancia, la ecuación de pérdida de transmisión de una pared doble a incidencia aleatoria es la ecuación de un panel simple a incidencia aleatoria de masa superficial igual a la suma de las masas superficiales de los paneles:

$$TL = 20 \cdot \log(m \cdot f) - 47.7 \quad (dB) \quad (4.2.1.2.1)$$

donde  $m = m_1 + m_2$ .

Entre la frecuencia de resonancia y la frecuencia de transición, se integra la ecuación (4.3.1.1.4) entre  $0^\circ$  y  $78^\circ$ , con lo cual:

$$TL_{field} = 10 \cdot \log \left[ \frac{1}{4} \cdot \left( \frac{\omega m}{2\rho c} \right)^4 \cdot \left( \frac{\omega d}{c} \right)^2 \right] - 28 \quad (dB) \quad (4.2.1.2.2)$$

Finalmente, sobre la frecuencia de transición:

$$TL_{field} = 10 \cdot \log \left( \frac{\omega m}{4\rho c} \right)^4 - 10 \quad (dB) \quad (4.2.1.2.3)$$

#### 4.2.1.3 Ley de Masa a Incidencia Normal intuitiva:

Como ya se mencionó, existen dos conceptos intuitivos sobre el comportamiento de un sistema de pared doble según la Ley de Masa, el primero, que en frecuencias bajas la longitud de onda es mucho mayor que la separación de las paredes, despreciándose la influencia de la cavidad en el sistema. De este modo, las ondas incidentes verán el sistema como una pared simple de masa total igual a la suma de las masas de las paredes. El segundo concepto se refiere a frecuencias muy altas, de modo que la longitud de la onda es mucho menor que la distancia entre los paneles, de modo que en el sistema influirán la pérdida de transmisión que aporta cada panel por separado, más un factor de corrección empírico de 6 dB.

De esta forma, las frecuencias de transformación son la frecuencia de resonancia del sistema masa-aire-masa para bajas frecuencias y la frecuencia de transición para las frecuencias altas. En el rango intermedio, se interpola una recta que una ambos puntos.

Así, la pérdida de transmisión es definida como:

$$\left( \begin{array}{l} TL = 10 \cdot \log \left( \frac{(m_1 + m_2) \cdot \pi f}{\rho_0 c} \right)^2 \quad (dB) \quad f \langle f_0 \\ TL = \log \left( \frac{f}{f_0} \right) \cdot \frac{(TL(f_t)) - TL(f_0)}{\log \left( \frac{f_t}{f_0} \right)} + TL(f_0) \quad (dB) \quad f_0 \langle f \langle f_t \\ TL = 10 \cdot \log \left( \frac{m_1 \cdot \pi f}{\rho_0 c} \right)^2 + 10 \cdot \log \left( \frac{m_2 \cdot \pi f}{\rho_0 c} \right)^2 + 6 \quad (dB) \quad f \rangle f_t \end{array} \right) \quad (4.2.1.3.1)$$

#### 4.2.1.4 Método aproximado de Jones (1976)

El método divide el problema en 3 áreas funcionales: transmisión de la partición, transmisión por flancos (camino distinto al directo a través de la partición), y los efectos del ambiente (absorción del recinto y geometría), para desarrollar éstos secuencialmente.

El propósito de este trabajo se ha limitado al estudio de la pared doble aislada de la estructura, con el fin de poder comparar diferentes algoritmos que cumplan con la generalidad de la estructura panel doble. Por esto, se analiza sólo la aproximación de London para el área funcional de la partición, dejando a un lado la transmisión por flancos y los efectos del ambiente.

Teoría del TL aproximado: Para obtener un aislamiento adecuado, se pueden utilizar estrategias de diseño. Las estrategias de diseño para paneles simples se pueden entender como el espesor completo de la partición, actuando como una estructura integral sobre la mayor parte del rango de frecuencias de excitación. El TL potencial en dB de un panel simple, según London, está limitado por la ley de Masa [ecuación (4.2.1.e)].

Cuando los paneles se vuelven más gruesos y rígidos, sus valores de TL tienden a alejarse más de la Ley de Masa teórica, por lo que el factor de rigidez se vuelve importante y el valor de TL puede caer bajo el valor entregado por la Ley de Masa. La masa del panel interactuando con su rigidez resultará siempre en una condición resonante en algunas frecuencias.

Para el diseño de paneles dobles, los dos paneles no actuarán integralmente sobre la mayoría del rango de frecuencia, porque estarán acoplados acústicamente entre sí por la cavidad de aire que los separa y algún mecanismo mecánico. Para proveer una cuantificación de las respuestas de TL de una pared doble, se han encontrado teorías que utilizan paneles infinitos, que desprecian uniones y asumen alrededor de 0.0508 m de

absorción en la cavidad, con el fin de disminuir las resonancias estacionarias en el vano. Bajo estas condiciones, la curva del TL de una pared doble puede ser dividida en tres regiones por la frecuencia de resonancia de la cavidad masa-aire-masa,  $f_0$ , y la frecuencia límite,  $f_l$ . (La expresión usual de  $f_0$  utiliza  $2\rho c$  en vez de  $3,6\rho c$  como fue derivada por Sharp bajo las aproximaciones ya mencionadas).

Luego para los paneles 1 y 2,

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\left( \frac{3,6\rho c^2}{d} \left[ \frac{m_1 + m_2}{2m_1 m_2} \right] \right)} \quad (\text{Hz}) \quad (4.2.1.4.1)$$

con:

$\rho$  : densidad por unidad de volumen de aire,.

$c$  : velocidad del sonido en el aire.

$d$  : profundidad de la cavidad.

$m_1, m_2$  : densidad superficial de masa de cada panel (1, 2).

La ecuación (4.2.1.4.1) es válida para construcciones de panel doble donde  $f_0$  está muy por sobre la primera resonancia del panel. En un diseño de panel doble, baja el valor de  $f_0$  al aumentar el espesor de la cavidad, para prevenir el rápido aumento de TL sobre  $f_0$ . La frecuencia límite  $f_l$ , está dada por:

$$f_l = \frac{c}{2\pi d} \quad (\text{Hz}) \quad (4.2.1.4.2)$$

Luego, asumiendo las condiciones ya expresadas:

$$\left( \begin{array}{ll} TL = 20\log\left(\left[m_1 + m_2\right]f\right) - 47.7 & f < f_0 \\ TL = TL_1 + TL_2 + 20\log(fd) - 39 & f_0 < f < f_l \\ TL = TL_1 + TL_2 + 6 & f > f_l \end{array} \right) \quad (\text{dB}) \quad (4.2.1.4.3)$$

donde:

$m_1, m_2$  : densidad superficial de masa de cada panel (1, 2)

$d$  : profundidad de la cavidad, (m)

$TL_1$  : TL panel 1

$TL_2$  : TL panel 2.

La teoría modificada por Sharp permite extender esta metodología para el caso especial de diseño de paredes dobles con uniones de tipo conexión puntual o lineal.

#### 4.2.1.5 Corrección de Sharp a la Ley de Masa a incidencia aleatoria (1973):

En el modelo corregido, la pérdida de transmisión del sistema pared doble ya no está determinada por 2 sino por 5 frecuencias: la resonancia menor del sistema, la frecuencia de coincidencia de cada uno de los paneles, la resonancia más baja del sistema acústico, una frecuencia de puente ( $f_2$ , calculada a partir de las 2 rectas intersectadas por ella) y la frecuencia límite, relacionada con el espaciamiento entre los paneles.

La resonancia estructural menor puede ser aproximada asumiendo que los dos paneles son masas débiles conectadas por complianzas, provistas por el aire en la cavidad. En la práctica, es necesario introducir el factor empírico 1.8 en la ecuación para obtener mejor concordancia con datos experimentales (Sharp, 1973). De esta forma, se obtiene la siguiente expresión para la resonancia menor de la cavidad,  $f_0$ , para paneles grandes comparados con el ancho de la cavidad:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{1.8\gamma P \cdot (m_1 + m_2)}{d \cdot m_1 \cdot m_2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (Hz) \quad (4.2.1.5.1)$$

donde:

$m_1, m_2$  son las densidades superficiales de los paneles 1 y 2, respectivamente ( $kg/m^2$ )

$d$ , la distancia entre los paneles ( $m$ )

$\gamma$ : relación de calores específicos del aire,  $\gamma = 1.41$

$P$ : presión aeroestática (estática del aire),  $P = 101.3 \cdot 10^3 Pa$ .

La frecuencia límite,  $f_l$ , está relacionada con el espesor de la cavidad, como:

$$f_l = \frac{c}{2 \cdot \pi \cdot d} \quad (Hz) \quad (4.2.1.5.2)$$

De este modo, con las frecuencias críticas  $f_c$  de cada panel (ver Capítulos 2 y 3), y las frecuencias anteriores, se determina el comportamiento de la pérdida de un sistema de paredes dobles.

Ahora, para construcciones de paredes dobles, con ambos paneles completamente aislados entre ellos mecánica y acústicamente, el TL esperado está dado por las siguientes ecuaciones:

$$TL = \begin{pmatrix} TL_{SM} & (dB) & f \langle f_0 \\ TL_{S1} + TL_{S2} + 20 \cdot \log(f \cdot d) - 29 & (dB) & f_0 \langle f \langle f_i \\ TL_{S1} + TL_{S2} + 6 & (dB) & f \rangle f_i \end{pmatrix} \quad (4.2.1.5.3)$$

con  $TL_s = 20 \log(mf) - 47.7$  (dB), y donde  $m = m_1$  o  $m_2$  y la masa de densidad superficial total  $M = m_1 + m_2$ .

Esta ecuación se formula asumiendo que las ondas estacionarias en la cavidad son despreciables, de modo que el acoplamiento aerotransmitido es bajo. Para asegurar tal condición, usualmente se llena la cavidad con material absorbente.

Al conectar los paneles a vigas de soporte, en forma de línea o de punto, se produce un puente mecánico para la transmisión estructural de sonido de un panel a otro. Sobre cierta frecuencia, llamada *frecuencia de puente*, estas condiciones de borde de la estructura limitan la pérdida de transmisión, que puede ser mucho menor a la expresada en la ecuación (4.2.1.4.4). Sobre la frecuencia de puente  $f_2$ , que está sobre la frecuencia de resonancia estructural  $f_0$ , y bajo la frecuencia límite  $f_1$ , el  $TL$  aumenta 6 dB/octava de frecuencia.

Como la naturaleza de la unión del panel a su viga estructural determina la eficiencia de la conducción del sonido transmitido vía estructural, desde el panel a la viga y viceversa, es necesario distinguir entre las dos uniones posibles, y en el sistema pared doble por lo tanto, las 4 respectivas combinaciones posibles. En general, un panel unido directamente a la viga estructural hace contacto sobre todo el largo de la viga. Esta unión se llama unión lineal y el espaciamiento entre vigas,  $b$ , se asume regular. Alternativamente, el soporte de un panel en pequeños espacios montados en las vigas se llama unión puntual; el espaciamiento  $e$ , entre los puntos de soporte se asume formando una malla regular. Las dimensiones  $b$  y  $e$  serán importantes al determinar el  $TL$ .

Luego, las 4 combinaciones de uniones estructurales posibles en un sistema de pared doble son: línea-línea, línea-punto, punto-línea y punto-punto. De estas cuatro combinaciones posibles, para los efectos de este trabajo, sólo se considerará la unión línea-línea, debido a que los datos experimentales previos han mostrado que esta unión es más realista y que la mayoría de los paneles en cámaras de medición son montados de esta forma.

Por lo tanto, sobre la frecuencia de puente y bajo la mitad de la frecuencia crítica del panel de mayor frecuencia crítica, la pérdida de transmisión para casos de unión línea-línea es:

$$TL = 10 \cdot \log(m^2 \cdot f_{c2} \cdot b \cdot f^2) + 20 \cdot \log\left(1 + \frac{m_2 f_{c1}^{1/2}}{m_1 f_{c2}^{1/2}}\right) - 77 \quad (dB) \quad (4.2.1.5.4)$$

Luego, con las pérdidas de transmisión establecidas para  $f_{c1}/2$  y  $f_{c2}$ , se interpolan las rectas que siguen, bajo la condición que la última recta tenga un aumento de pérdida de transmisión de 15 dB/octava. De esta forma:

$$\left. \begin{aligned} TL &= 20 \cdot \log((m_1 + m_2) \cdot f) - 48 && (dB) && f \langle f_0 \\ \\ TL &= TL_1 + TL_2 + 20 \cdot \log(f \cdot d) && (dB) && f_0 \langle f \langle f_p \\ \\ TL &= 10 \cdot \log\left(m_1^2 \cdot f_{c3} \cdot b \cdot \left(f \cdot \frac{(1 + m_2 \cdot \sqrt{f_{c1}})^2}{(1 + m_1 \cdot \sqrt{f_{c2}})}\right)\right) - 77 && (dB) && f_p \langle f \langle 0.5 \cdot f_{c1} \\ \\ TL &= \log\left(\frac{f}{(0.5 \cdot f_{c1})}\right) \cdot \left(\frac{TL_C - TL_B}{\log\left(\frac{f_{c3}}{(0.5 \cdot f_{c1})}\right)}\right) + TL_B && (dB) && 0.5 \cdot f_{c1} \langle f_{c2} \\ \\ TL &= 50 \cdot \log\left(\frac{10^{\frac{TL_C}{50}}}{f_{c2}} \cdot f\right) && (dB) && f \rangle f_{c2} \end{aligned} \right\} \quad (4.2.1.5.6)$$

donde  $TL_B$  y  $TL_C$  están definidos en el Apéndice (4.2.1.5).

#### 4.2.2 Método Práctico de Iwashige & Ohta (1981)

Dada la necesidad de un método práctico para obtener el aislamiento acústico de particiones que aún bajo el costo de la precisión teórica no presente cálculos complejos, Iwashige & Ohta elaboraron un método práctico y simple para calcular el aislamiento acústico de paredes dobles mediante dos líneas rectas. El método se basa en las propiedades

fundamentales de una pared doble cualquiera, en los dos casos límite de un espaciamiento de aire  $d$  de valores cero e infinito, sin tomar en consideración la región de coincidencia.

Con el fin de encontrar un método de aplicación más práctico, se discute el caso de incidencia de transmisión aleatoria al despreciar el efecto de coincidencia. Se trabaja sólo el caso práctico de la pared doble más popular compuesta por paneles que tengan una densidad de masa superficial menor a  $10 \text{ kg/m}^2$ , sin material ni revestimiento absorbente en la cavidad, no considerando las conexiones vibratorias mecánicas y sin montaje resilente.

Para una pared doble general, la pérdida interna del medio de transmisión debe ser tomada en consideración no sólo cuando exista un gran efecto de pérdida, sino también cuando esta pérdida es pequeña. Este efecto puede derivar las siguientes consideraciones, fundamentales para el método práctico en consideración:

- a) En el caso límite de espaciar ampliamente las paredes, el valor de la pérdida de transmisión total de la pared doble tenderá a ser la suma de la pérdida de transmisión de cada panel simple.
- b) En el caso límite de dejar ambas paredes muy juntas, la pérdida de transmisión total tenderá a ser igual que la pérdida de transmisión de una pared simple con masa superficial total igual a la suma de ambas densidades de masa superficial.

En el campo de la acústica, la distancia acústica  $kd$  aporta mayor significado que la distancia geométrica  $d$ . Esto es, manteniendo  $d$  constante,  $kd$  aumenta con la frecuencia, y debe seguir la tendencia simple de aumentar el aislamiento acústico, como se describirá a continuación.

I. En el caso cuando  $\lambda \ll d$ : La pérdida de transmisión total de la pared doble está dada por la suma de las pérdidas de transmisión de cada panel simple. Siendo  $m_i$  ( $i=1,2$ ), la densidad de masa superficial de cada panel y  $\lambda$  la longitud de onda en el aire, se obtiene directamente:

$$TL_R = TL_{R1} + TL_{R2} \quad (dB) \quad (4.2.2.1)$$

donde:

$$TL_{Ri} = TL_{0i} - 10 \cdot \log(0.23 \cdot TL_{0i}) \quad (dB)$$

$TL_{Ri}$  es la pérdida de transmisión de incidencia aleatoria del panel simple y  $TL_{0i}$  es la pérdida de transmisión de un panel simple con incidencia normal.

II. En el caso cuando  $\lambda \gg d$  : La pérdida de transmisión total de la pared doble se vuelve el valor asintótico del valor de pérdida de transmisión de un panel simple de densidad de masa superficial equivalente a la suma de ambas densidades de masa superficial ( $m_1 + m_2$ ). Es decir,

$$TL_{R(m_1+m_2)} = TL_0 - 10 \cdot \log(0.23 \cdot TL_0) \quad (dB) \quad (4.2.2.2)$$

donde  $TL_{R(m_1+m_2)}$  es la pérdida de transmisión de una pared simple en incidencia aleatoria, y  $TL_0$  es la pérdida de transmisión a incidencia normal de una pared simple, con densidad de masa superficial igual a la suma de las densidades de masa superficial.

Siguiendo el significado físico mencionado, el valor estimado del presente método práctico acerca el valor de la ecuación (4.2.2.2) en la región de baja frecuencia ( $\lambda \gg d$ ), mientras que por otro lado, se aproxima al valor de la ecuación (4.2.2.1) en la región de alta frecuencia ( $\lambda \ll d$ ). Para ser más específicos, el procedimiento es el siguiente: La tendencia de la pérdida de transmisión de aumentar con la frecuencia es la propiedad fundamental en este método, por lo cual se debe prestar especial atención a las dos frecuencias de resonancia, en las cuales el valor de la pérdida de transmisión se aleja del valor presentado por la ecuación (4.2.2.1).

La pérdida de transmisión puede ser determinada al utilizar la línea recta entre el valor de la ecuación (4.2.2.2) en la frecuencia de separación  $f'_{rm}$ , cerca de la frecuencia de resonancia del sistema masa-cavidad-masa  $f_{rm}$ , en la región de baja frecuencia y el valor de la ecuación (4.2.2.1) en la frecuencia de separación  $f'_{rd}$ , cerca del punto de frecuencia de corte  $f_{rd}$ , en la zona de frecuencias altas. Es decir, los valores inusuales de la pérdida de transmisión cerca de las frecuencias de resonancia, que son causadas por las propiedades de aislamiento de sonido de los paneles y/o del espaciamiento de aire, son despreciados en la estimación práctica. El rango de frecuencia donde es aplicable la estimación práctica, es determinado como el rango entre  $f'_{rm}$  y  $f'_{rd}$ . Normalmente, esta región central es la más importante desde el punto de vista de los efectos del ruido.

De esta forma, el valor de pérdida de transmisión de la pared doble se encontrará en el área comprendida entre las dos líneas rectas, que intersecta con la línea de la ecuación

(4.2.2.2) en el punto de separación  $f'_{rm}$  e intersecta con la otra línea de la ecuación (4.2.2.1) en el punto de separación  $f'_{rd}(2)$ , respectivamente. La Fig. 4.2.2.1 muestra un ejemplo de la aplicación de este método.

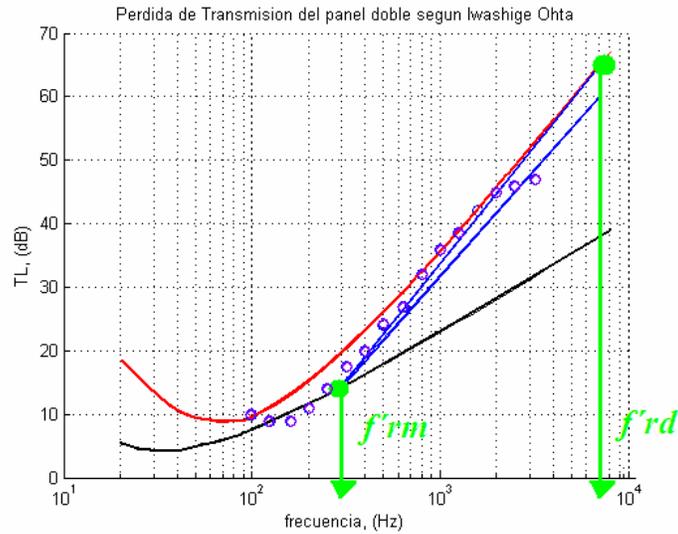


Fig. 4.2.2.1: Modelo de Pérdida de Transmisión según el método propuesto por Iwashige & Ohta.

### 4.2.3 Aproximación de Brekke al método SEA (1981)

El análisis estadístico de energía (SEA) es un método aleatorio, con regularidad estadística aleatoria, el cual se basa en la transferencia de energía en sistemas conectados.

Si una estructura es expuesta a excitación acústica, es necesario determinar la forma de todos los modos y calcular la respuesta de cada uno para calcular la respuesta de la estructura. La superposición de los modos y las respuestas modales otorgarán, entonces, la respuesta estructural total, concepto que describe el comportamiento modal del panel.

En este método, se divide la estructura en un conjunto de osciladores (subsistemas), que actúan acoplados, lo que genera un flujo de potencia, cuyos patrones se detallan mediante la siguiente figura:

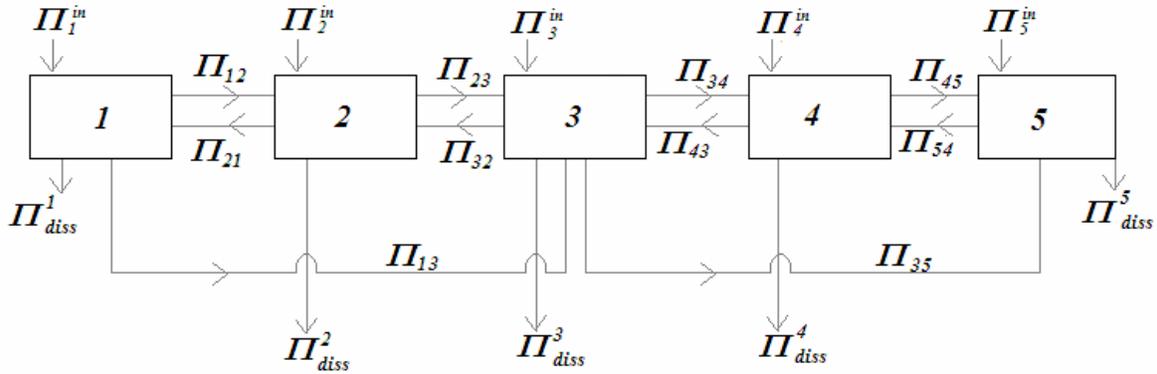


Fig. 4.2.3.1: Diagrama de patrones de Flujo de Potencia.

Estos patrones de flujo de potencia, a su vez, se subdividen en 2 grupos, los modos resonantes y no resonantes. Cuando una onda sonora incide sobre un panel, el panel es forzado a vibrar. Estas vibraciones forzadas son las vibraciones no resonantes, las cuales se reflejan en los bordes formando ondas estacionarias, que son las vibraciones llamadas resonantes. Por lo tanto, existen dos patrones:

- a) Patrones de flujo de potencia debidos a modos resonantes, que corresponden a sistemas de energía adyacentes (en la figura:  $\Pi_{12}$  ,  $\Pi_{23}$  ,  $\Pi_{34}$  , etc.)
- b) Patrones de flujo de potencia debidos a modos no resonantes, que corresponden a sistemas no adyacentes y funcionan como factor de corrección entre los sistemas de energía.

El análisis estadístico de energía (SEA), por lo tanto, asume para el cálculo de la pérdida de transmisión de paredes dobles:

1. Igual distribución de energía modal
2. Que no existe correlación entre ondas de 2 sistemas de energía diferentes.
3. Una condición detallada del balance para intercambio energético entre 2 sistemas.

El modelo teórico de Price & Crocker (1969) trabaja sobre la base de 2 paredes finitas, aseguradas en los bordes, separadas por una cavidad, extendiéndose a paneles dobles con material absorbente en la cavidad. Se considera transmisión resonante y no resonante, y se derivan expresiones para la densidad modal y el factor de pérdidas en baja frecuencia.

- a) *Para transmisión resonante:* Las paredes dobles se simulan como un sistema de

5 osciladores acoplados (sistemas 1-5):

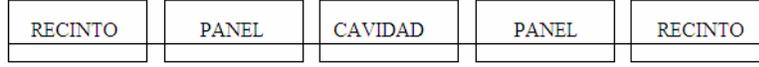


Fig. 4.2.3.2: Sistema de cinco osciladores acoplados.

b) *Para transmisión no resonante:* Se postula que los modos no resonantes son los responsables para la “Transmisión de Sonido de acuerdo a la Ley de Masa”. Esto explica la ineficiencia del amortiguamiento en baja frecuencia, donde los modos resonantes son radiadores ineficientes y es por esto que la transmisión se debe mayormente a modos no resonantes. En la transmisión no resonante, la energía se muestra como un flujo de potencia directo del sistema 1 al sistema 3 y luego del sistema 3 al sistema 5.

Para mayor información se puede consultar el Apéndice (4.3.3.1). A continuación se presentan los resultados de la aproximación de Brekke al método SEA de Price & Crocker:

a) **Transmisión Resonante:** Si se asume que los flujos de potencia entre los sistemas 1 y 3, y los sistemas 3 y 5 es cero, se puede demostrar que la relación de energía entre el recinto transmisor y el receptor es:

$$\frac{E_1}{E_5} = \frac{\eta_{2t}\eta_{3t}\eta_{4t}\eta_{5t}}{\eta_{12}\eta_{23}\eta_{34}\eta_{45}} - \frac{\eta_{2t}\eta_{43}\eta_{5t}}{\eta_{12}\eta_{23}\eta_{45}} - \frac{\eta_{32}\eta_{4t}\eta_{5t}}{\eta_{12}\eta_{34}\eta_{45}} - \frac{\eta_{2t}\eta_{54}\eta_{3t}}{\eta_{12}\eta_{23}\eta_{34}} - \frac{\eta_{32}\eta_{54}}{\eta_{12}\eta_{34}} \quad (4.2.3.1)$$

Luego, ignorando los últimos cuatro términos de la ecuación (4.3.3.1), (y despreciándolos en comparación al primero), se obtiene:

$$TLr = 10 \cdot \log \left( \frac{\eta_{2t}\eta_{3t}\eta_{4t}n_3 [m_2m_4]^2 f^5}{\sigma_{21}\sigma_{23}\sigma_{43}\sigma_{45}f_{C2}f_{C4}S} \right) - 35 \text{ (dB)}, \quad (4.2.3.2)$$

donde:

$$\eta_{5t} = \frac{2 \cdot 16}{fT_5} \quad \eta_{ij} = \frac{\rho c \cdot \sigma_{ij}}{\omega m_i} \quad \eta_{ij} = \frac{\rho c \cdot \sigma_{ji}}{\omega m_j} \cdot \frac{n_j}{n_i}$$

$$n_{1,2} = \frac{4\pi V_{1,2}f^2}{c^3} \quad n_{2,4} = \frac{1.8\sqrt{3}Sf_{C2,C4}}{c^2} \quad \sigma_{ij} = \frac{\eta_{ij}\omega m_i}{\rho c}. \quad (4.2.3.3)$$

b) **Transmisión No Resonante:** Siguiendo un proceso análogo, se encuentra que:

$$\frac{E_1}{E_5} = \frac{\eta_{3r}\eta_{5r} - \eta_{35}\eta_{53}}{\eta_{13}\eta_{35} - \eta_{13}\eta_{35}} \quad (4.2.3.4)$$

El segundo término, también será despreciable respecto al primero, con lo cual se obtiene que:

$$TLnr = TLnr_2 + TLnr_4 + 10 \cdot \log \left( \frac{\eta_{3r}n_3}{f \cdot S} \right) + 54 \text{ (dB)} \quad , \quad (4.2.3.5)$$

donde  $TLnr_2$  y  $TLnr_4$  son las pérdidas de transmisión no resonantes de cada panel, respectivamente. Estos valores son calculados por ley de Masa a incidencia aleatoria, de forma similar a lo desarrollado por Price & Crocker en 1969.

c) **Transmisión Total:** La transmisión total se calcula de las ecuaciones (4.2.3.2) y (4.2.3.5), cuando se establecen tanto la densidad modal, como el factor de pérdida de la cavidad. Sobre y bajo la frecuencia de corte de la cavidad, el campo sonoro en dicha cavidad es diferente. Por lo tanto, las fórmulas para la pérdida de transmisión son diferentes en ambos casos.

Frecuencias bajo la frecuencia de corte.  $f < c/2d$ :

El campo sonoro en la cavidad es bidimensional. Por lo tanto, para una cavidad de área  $l_1 \times l_2$ , la densidad modal y el factor de pérdidas son, respectivamente:

$$n_3 = \frac{2\pi l_1 l_2 f}{c^2} \text{ (modos)} \quad (4.2.3.6)$$

$$\eta_3 = \frac{c(l_1 + l_2)\alpha_0}{4\pi l_1 l_2 f} \quad , \quad (4.2.3.7)$$

donde  $\alpha_0$  representa el coeficiente de absorción a incidencia normal contenido en los bordes. Cuando no hay absorción en los bordes, se debe utilizar un coeficiente de absorción equivalente que represente las pérdidas dentro de la cavidad.

Al incluir rigidez de acoplamiento mediante este método, la resonancia de la pared doble no se incluye en el cálculo. Esta resonancia masa-aire-masa, fue calculada exitosamente por London:

$$f_0 = \frac{\sqrt{(\rho c^2)}}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{(m_2 + m_4)}{m_2 m_4 d}} \text{ (Hz)} \quad (4.2.3.8)$$

Para frecuencias mayores a  $f_0$ , se puede utilizar la aproximación SEA para obtener expresiones simples de TL.

Ahora, la rigidez del aire es proporcional a  $1/d$ . De acuerdo a esto, la pérdida de transmisión debiera ser proporcional a  $d^2$ .

De esta forma, la respuesta total en la cavidad es considerada como una superposición de la respuesta dependiente de la rigidez en la dirección normal a los paneles y la respuesta modal en la dirección paralela a los paneles. Por lo tanto, la transmisión total ya obtenida, debe ser corregida por un término  $20 \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right)$ , donde  $d_0$  es una profundidad de cavidad de referencia, que fue determinada empíricamente (0.07 m).

Finalmente, las fórmulas se vuelven:

$$TLnr = TL_{rand2} + TL_{rand4} + 10 \cdot \log\left(\frac{d^2 \alpha_0 (l_1 + l_2)}{f(l_1 l_2)}\right) + 48 \quad (dB) \quad (4.2.3.9)$$

$$TLr = 10 \cdot \log\left(\frac{[m_2 m_4 d]^2 f^5 \alpha_0 (l_1 + l_2) \eta_{2t} \eta_{4t}}{\sigma_{21} \sigma_{23} \sigma_{43} \sigma_{45} l_1 l_2 f_{C2} f_{C4}}\right) - 40 \quad (dB). \quad (4.2.3.10)$$

La transmisión total puede ser obtenida finalmente por un término de corrección aplicado a la menor contribución de pérdida de transmisión.  $\Delta TL$  debe ser sustraído del menor entre  $TLr$  y  $TLnr$ , porque la potencia transmitida entre los paneles se ha sumado dos veces. Este factor de corrección puede ser obtenido del siguiente diagrama:

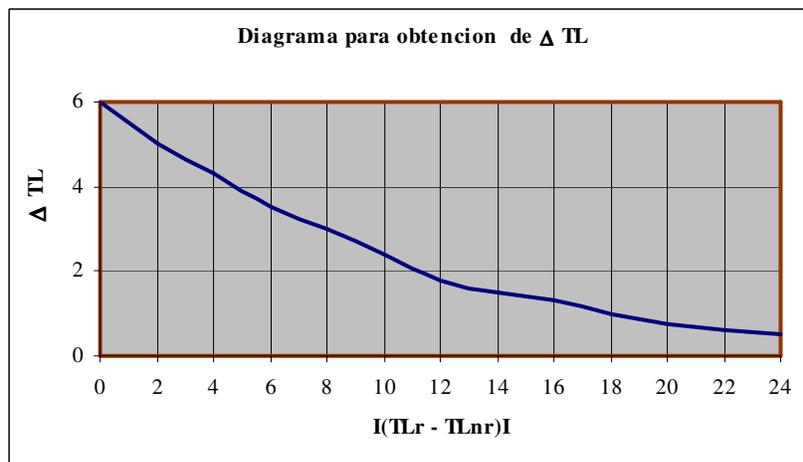


Fig. 4.2.3.3: Diagrama para obtención de  $\Delta TL$ .

Frecuencias sobre la frecuencia de corte,  $f \geq c/2d$ :

En esta región, el campo sonoro se asume aleatorio. Para frecuencias cercanas a la frecuencia de corte, esta es una gran simplificación, pero la predicción es mejor al aumentar la frecuencia. Por lo tanto, asumiendo campo aleatorio en la cavidad, y utilizando métodos convencionales, la pérdida de transmisión es:

$$TL = TL_2 + TL_4 + 10 \cdot \log \left( \frac{2\alpha d(l_1 + l_2)}{S \cdot l_1 l_2} \right) \text{ (dB)} \quad (4.2.3.11)$$

donde  $\alpha$  es el coeficiente de absorción aleatorio en los bordes de la cavidad.

#### **4.2.4 Método de Impedancia progresivo de Fringuellino & Guglielmo (2000)**

La fundación teórica del método de impedancia progresivo (PIM) está relacionada al método de onda de London (1950) y fue introducido por Beranek & Work (1949), para incidencia normal. Luego, Mangiarotti (1963) realizó la optimización de la distribución de masa y espaciado de aire en estructuras de elementos múltiples a prueba de sonido. Una extensión del método a incidencia aleatoria fue después propuesto por Mullholland, Price & Parbrook (1968). Finalmente, Guy (1989) realiza una formulación compacta al problema.

En este, método se asumen básicamente 2 conceptos:

1. Se realiza un análisis bidimensional de los paneles infinitos.
2. No se consideran pérdidas en la cavidad.

En el sistema multicapa, las capas están divididas en 2 categorías principales:

1. Capas No propagativas (NPL): Grosor mucho menor en comparación a la longitud de onda.
2. Capas Propagativas (PL): El grosor no es tan pequeño en comparación a la longitud de onda.

Se considera una pared n-laminada, tomando  $(2+n)$  capas, desde la zona de incidencia hasta la receptora. Para las capas propagativas rige la ecuación de onda bidimensional en función de la presión acústica en un fluido ideal:

$$\frac{1}{C_n} \cdot \frac{\partial^2 p_n}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p_n}{\partial y^2} \quad (4.2.4.1a)$$

Esto otorga al problema una solución en forma de dos ondas planas, una progresiva y una regresiva:

$$p_n = \Phi_n^{(+)} \cdot e^{[i(\omega t + b_{.m}.x + b_{.n}.y)]} + \Phi_n^{(-)} \cdot e^{[i(\omega t - b_{.m}.x + b_{.n}.y)]} \quad (N/m^2) \quad (4.2.4.1b)$$

donde:

$\Phi$ : amplitud de las ondas

$b_x, b_y$ : constantes de propagación de la  $n$ -ésima capa.

Una onda incidente y una reflejada se propagan en la zona que transmite, mientras que sólo la progresiva se presenta en la zona que recibe. Si se conocen las constantes de propagación de la  $n$ -ésima capa, a partir de la solución de la correspondiente ecuación de onda, se obtienen dos cantidades complejas desconocidas para cada capa propagativa: las amplitudes de onda progresiva y regresiva.

Al denotar  $m$  y  $r$  al número total de capas propagativas y no propagativas, respectivamente ( $n = m+r$ ), se obtendrán  $(m+2)$  zonas propagativas y por lo tanto  $(2m+3)$  cantidades desconocidas. El sistema de ecuaciones usado para resolver el problema se construye en base a las siguientes condiciones de borde:

1. Continuidad de los componentes normales de las velocidades de partícula de la superficie de propagación de la capa propagativa  $(m+1)$ .

$$u_n = u_{n-1} \quad (4.2.4.2a)$$

2. Validez de la ecuación de movimiento para la capa no propagativa  $r$ :

$$p_{tot} = Z_{Sn} \cdot u_n \quad (4.2.4.2b)$$

Esto resulta un sistema de  $(n+1)$  ecuaciones con  $(2m+3)$  cantidades desconocidas, de modo que  $(m-r+2)$  grados de libertad permanecen indefinidos. Es decir, al aumentar el número de capas, la aproximación analítica se va volviendo más compleja.

El método de impedancia progresiva, PIM, para paneles infinitos representa una alternativa a la teoría analítica. Básicamente, el método consiste en evaluar expresiones para las impedancias acústicas encontradas por la onda acústica durante su propagación a través de las paredes y las relaciones de presión en la superficie de cada capa. Se requieren

las expresiones de impedancia característica y constantes de propagación de cada capa.

Para capas propagativas, la solución de la ecuación de onda estacionaria plana de presión acústica es:

$$p_n = A_n \cdot \cosh(b_n x_n + \psi_n) \quad (N/m^2), \quad (4.2.4.3)$$

Con:

$A_n$  : la amplitud compleja de la onda en la  $n$ -ésima capa.

$x_n$  : la distancia a la  $n$ -ésima capa (superficie térmica). A esta superficie la onda se encuentra con el orden de impedancia progresiva  $(n-1)$ .

$b_n$  : la constante de propagación compleja de la  $n$ -ésima capa.

$Z_{Sn}$  : la impedancia característica de la capa (que no depende de la coacción particular de la capa en la pared).

$\psi_n$  : la fase compleja de propagación de la  $n$ -ésima capa:

$$\psi_n = \coth^{-1} \left( \frac{Z_{n-1}}{Z_{Sn}} \right) \quad (4.2.4.4)$$

Luego, la impedancia progresiva podrá ser escrita como:

$$Z_n = Z_{Sn} \cdot \coth(b_n d_n + \psi_n) \quad (Rayl's), \quad (4.2.4.5)$$

donde  $d_n$  representa el grosor de la  $n$ -ésima capa.

Al final, se obtiene fácilmente la relación de presión acústica en las superficies límite de la  $n$ -ésima capa, que es:

$$\frac{p_n}{p_{n-1}} = \frac{\cosh(b_n d_n + \psi_n)}{\cosh(\psi_n)}. \quad (4.2.4.6)$$

Para capas no propagativas se asume una velocidad de partículas y una presión acústica de transferencia que impone en las superficies de las capas continuidad de la componente normal de velocidad de partículas y la validez de la ecuación de movimiento, descrita por la impedancia acústica específica de la capa no propagativa. La impedancia progresiva será entonces la adición simple de la impedancia característica de la capa y la impedancia progresiva que precede en orden  $(n-1)$ :

$$Z_n = Z_{Sn} + Z_{Sn-1} \quad (Rayl's). \quad (4.2.4.7)$$

Por la continuidad de la componente normal de la velocidad de partículas, la relación de presión en las superficies límites del panel, coincide con la relación de las

respectivas impedancias progresivas:

$$\frac{P_{in}}{P_N} = \frac{Z_{N+1}}{Z_N}, \quad (4.2.4.8)$$

donde la  $Z_S$ , de orden  $(N+1)$ , corresponde a la impedancia característica del aire en la zona que transmite, de modo que la impedancia progresiva de orden  $(n+1)$ , con factor correctivo de un medio, corresponde a:

$$Z_{N+1} = \frac{1}{2} \cdot (Z_{S(N+1)} + Z_N) \quad (Rayl's). \quad (4.2.4.9)$$

La relación final entre la presión acústica incidente y la transmitida, está dada por el producto de todas las relaciones de presión computadas anteriormente en cada capa de la pared, esto es:

$$\frac{P_{in}}{P_t} = \frac{P_{in}}{P_N} \frac{P_N}{P_{N-1}} \dots \frac{P_1}{P_t}. \quad (4.2.4.10)$$

Conceptualmente, el método descrito es aceptable para aplicaciones de incidencia normal y aleatoria, mientras que la única distinción entre ambas está dada por la diferencia para las expresiones de las impedancias características de cada capa. El coeficiente de transmisión en función del ángulo de incidencia se obtendrá mediante el inverso al cuadrado de las relaciones de presiones incidente y transmitido, mientras que el coeficiente de transmisión global se obtendrá realizando una integración balanceada, donde el límite de integración superior es un ángulo máximo, debido a una evidencia experimental llamada “efecto incidencia de campo”.

Finalmente, la pérdida de transmisión se obtendrá al aplicar la función logaritmo a el coeficiente de transmisión y multiplicar por 10.

#### Impedancias Características de Capas únicas:

La mayor dificultad asociada con este método radica en la capacidad de desarrollar expresiones apropiadas para las impedancias características de cada capa. Mientras que para las capas no propagativas las dificultades son pequeñas, para las capas propagativas no es así, debido a que existe una gran variedad de materiales utilizados en la construcción acústica, tales como porosos, no porosos, etc. Pero lo que sí facilita el cálculo, es asumir la

Ley de Snell para los ángulos de propagación en cada superficie de propagación, por lo cual:

$$\frac{\sin \theta_n}{\sin \theta_{n+1}} = \frac{c_n}{c_{n+1}} . \quad (4.2.4.11)$$

Capas no propagativas (NPL): En el caso de incidencia aleatoria, se debe corregir las expresiones respectivas para las impedancias en el caso de incidencia normal. Esta corrección se lleva a cabo mediante un término cosenoidal del ángulo de propagación, el cual debe ser insertado sólo en el denominador de las capas propagativas.

a) Paneles infinitos controlados por masa: impedancia puramente reactiva, es decir:

$$Z_s = j\omega M \quad (\text{Rayl's}) \quad (4.2.4.12)$$

b) Paneles infinitos monoresonadores: Toma en cuenta los efectos disipativos por el coeficiente de amortiguación ( $D$ ) y los efectos elásticos por el coeficiente de rigidez ( $K$ ):

$$Z_s = D + j(\omega M - K/\omega) \quad (\text{Rayl's}) \quad (4.2.4.13)$$

con  $\omega_p = K/M$ .

c) Paneles con efecto de coincidencia: El efecto de coincidencia para paneles infinitos depende del ángulo de incidencia de la onda, mientras que para paneles finitos es independiente de este factor. Por lo tanto, la teoría utilizada para este efecto depende rigurosamente de la frecuencia y del ángulo de incidencia de la onda que llega:

$$Z_{Sn} = D_c(\omega, \theta_{n+1}) + j \left( \omega M - \frac{K_c(\omega, \theta_{n+1})}{\omega} \right) . \quad (4.2.4.14)$$

En esta expresión el término disipativo es  $D_c$  y el término elástico,  $K_c$ , que son funciones tanto de la frecuencia como del ángulo de incidencia. Se debe notar que la integración debe ser obtenida por algún método numérico, lo cual requiere de un tiempo de cómputo mayor. La aproximación más conveniente es anticipar para los paneles infinitos las ecuaciones válidas para los paneles finitos, las cuales son independientes del ángulo de incidencia (porque en este caso el efecto de coincidencia ocurre en la frecuencia crítica, calculada en un ángulo de incidencia igual a  $0^\circ$ ), donde:

$$\omega_c = \frac{c_0^2}{d_n \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\sigma^2)}}}. \quad (4.2.4.15)$$

Por lo tanto, esta ecuación queda expresada en términos del grosor del enésimo panel, la velocidad del sonido en el aire, el módulo de Young, el coeficiente de Poisson y la densidad, respectivamente.

La impedancia dada en ecuación (4.3.4.14), puede omitir la dependencia angular y puede ser usada para paneles finitos. Por lo tanto, se puede determinar lo siguiente:

$$D_c(\omega) = \frac{D\omega^3}{\omega_p \omega_c^2} \quad (4.2.4.16a)$$

$$K_c(\omega) = \frac{K\omega^4}{\omega_p^2 \omega_c^2}. \quad (4.2.4.16b)$$

Para capas propagativas: Como se mencionó, es complejo determinar las constantes de impedancia y propagación, por la variedad inmensa de materiales existentes. Por eso, en algunas situaciones, es mejor expresar la impedancia característica de las capas propagativas por un valor experimental de su parte disipativa y reactiva, es decir:

$$Z_{Sn} = R_{Sn} + jX_{Sn}. \quad (4.2.4.17)$$

Para el caso de incidencia aleatoria, debe aparecer en el denominador de la expresión a incidencia normal, un factor de corrección cosenoidal, al igual que lo realizado anteriormente.

## 5. Implementación Computacional

Para realizar la comparación de los diferentes algoritmos presentados en el Capítulo 4, se programó cada algoritmo usando el programa Matlab v7.0. El programa obtenido consiste de un programa modular de 14 módulos, que se indican en la siguiente figura:

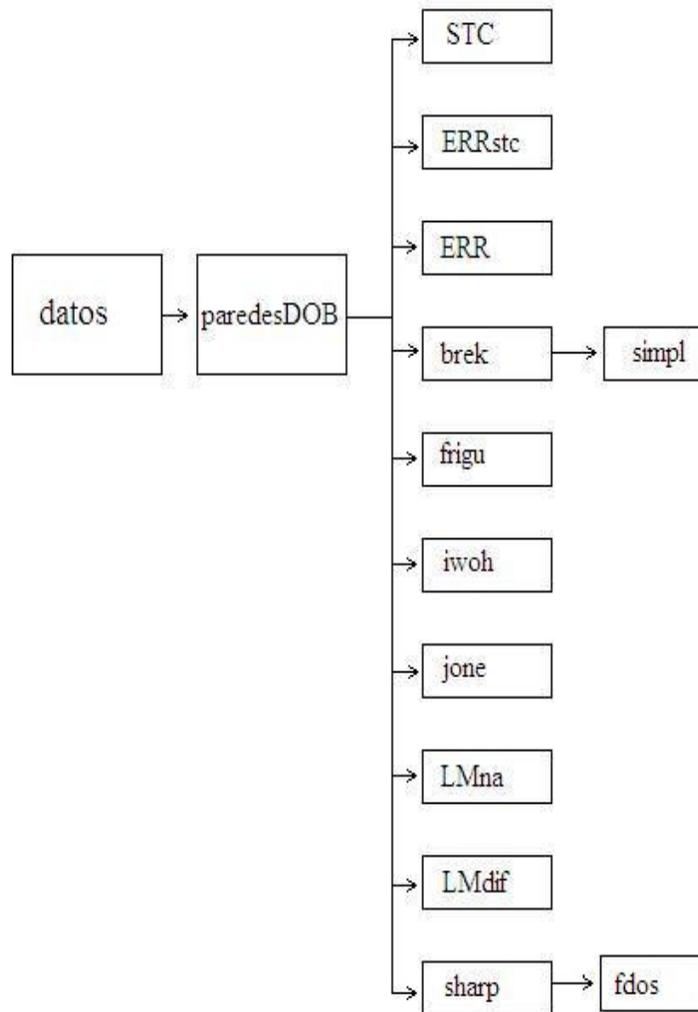


Fig. 5.1: Diagrama de los módulos del programa implementado en Matlab v7.0.

## 5.1 Variables utilizadas

### 5.1.1 Variables de entrada:

*Características de la medición:*

- Las dimensiones superficiales de los paneles medidos, siendo  $L_1$  la dimensión mayor del panel y  $L_3$  la otra dimensión superficial ( $m$ ).
- Pérdida de transmisión medida en laboratorio del sistema pared doble: matriz de  $1 \times 16$  (bandas de tercio de octava de 125 a 4000  $Hz$ ), llamada  $TL_{med}$ , ( $dB$ ).

*Características de las paredes:*

- Densidad volumétrica de masa de los paneles 1 y 2,  $M_1$  y  $M_2$ , en ( $kg/m^2$ ).
- Espesor de cada panel,  $h_2$  y  $h_4$ , en ( $m$ ).
- Módulo de Young, o módulo de elasticidad del material de cada panel,  $E_2$  y  $E_4$ .
- Coeficiente de Poisson del material de cada panel,  $poa_2$  y  $poa_4$ .
- Factor de pérdida de cada panel,  $et_2$  y  $et_4$ .

*Características de la Cavity:*

- Distancia de separación de los paneles o espesor de la cavidad,  $d$  en ( $m$ ).
- Coeficiente de absorción media en la cavidad,  $alfa_o$ .
- Coeficientes de absorción en la cavidad en banda de frecuencia: matriz de  $1 \times 16$  (bandas de tercio de octava de 125 a 4000  $Hz$ ), llamada  $alfa_{cav}$ .

*Variables de aproximación:*

- Número de onda resonante para el Método de Iwashige & Ohta (ver Capítulo 4),  $n$ . (Se observa un buen resultado para  $n=3$ ).

### 5.1.2 Variables de Salida:

*Tabla de Datos ingresados: “DaToS”.*

Tabla de  $5 \times 17$  que muestra el valor de los datos ingresados a la entrada del programa.

*Pérdidas de Transmisión estimadas por cada método: “TLs”.*

Matriz de  $10 \times 17$ , que especifica el valor de las pérdidas de Transmisión (TL) estimada por cada modelo implementado (8 modelos) en bandas de tercio de octava (de 125 a 4000  $Hz$ ), más el valor de “ $TL_{med}$ ” en dicha frecuencia.

*Error obtenido en cada TL estimado: “E<sub>f</sub>\_TL”.*

Matriz de 9x16, que especifica en la primera fila las frecuencias en bandas de tercio de octava y en las siguientes filas los errores de TL obtenido para cada método versus el medido en laboratorio.

*Tabla de Resultados Generales: “ModSTC”.*

Tabla de Resultados de 5x10, en la cual se especifican el STC obtenido por cada método (“StC”), más el obtenido de las mediciones, el error del STC obtenido por el método versus las mediciones (“Est”), el error cuadrático medio del TL de cada método (“EcM”) y la desviación total obtenida por cada método (“desvia”).

*Gráfica de TL v/s frecuencia:*

Gráfico que muestra las pérdidas de transmisión estimadas por cada método, las pérdidas de transmisión medidas en laboratorio y la curva de STC de referencia para el STC obtenido a través de los datos experimentales.

## 5.2 Características de los Módulos

### 5.2.1 Módulo Principal “datos”

Este módulo realiza la acción de pedir los datos de entrada de todos los programas, llamando luego a la función “paredesDOB” y obteniendo de ésta las variables de salida del programa completo.

*Variables de entrada:* Los datos de entrada que pide este módulo se basa en las características del sistema pared doble, es decir:

$L_1, L_3$	$TL_{med}$	$M_1, M_2$	$h_2, h_4$	$E_2, E_4$	$poa_2, poa_4$	$et_2, et_4$	$d$	$alfao$	$alfa_{cav}$	$n$
------------	------------	------------	------------	------------	----------------	--------------	-----	---------	--------------	-----

*Variables de salida:* Las variables de salida que entrega este programa, son las variables de salida que entrega el módulo “paredesDOB”, los ya mencionados: **DaToS**, **TLs**, **E<sub>f</sub>\_TL** y **ModSTC**.

### 5.2.2 Módulo “paredesDOB”

Se encarga de realizar todos los cálculos y realizar la gráfica final. Primero, llama a cada módulo de cálculo de algoritmo predictivo, calculando, a través del módulo “*STC*”, el número único de aislamiento acústico correspondiente a la estimación. Almacena el TL y el STC estimado por cada módulo de algoritmo pared doble. Luego, mediante el módulo “*ERR*” calcula el error en bandas de frecuencia, el error cuadrático medio y la desviación de la curva de pérdida de transmisión calculada con respecto a los datos experimentales insertados. Realizado esto, realiza el cálculo del STC de la pérdida de transmisión experimental y después el error del STC de cada modelo, con el módulo “*ERRstc*”. Ordena las matrices respectivas y, finalmente, arroja la gráfica de todas las curvas de estimación teórica de pérdida de transmisión, las pérdidas de transmisión medidas en laboratorio y la curva de referencia del STC calculado para los datos experimentales. La siguiente Tabla indica las variables de entrada necesarias para cada método.

Tabla 5.2.3.1: Variables de entrada de los diferentes módulos de cálculo de algoritmo TL pared doble.

	<i>brek</i>	<i>frigu</i>	<i>iwoh</i>	<i>jone</i>	<i>TLMna</i>	<i>TLMdif</i>	<i>sharp</i>
<i>L<sub>1</sub>, L<sub>3</sub></i>	Si						Si
<i>TLmed</i>							
<i>M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub></i>	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
<i>h<sub>2</sub>, h<sub>4</sub></i>	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
<i>E<sub>2</sub>, E<sub>4</sub></i>	Si						Si
<i>poa<sub>2</sub>, poa<sub>4</sub></i>	Si						Si
<i>et<sub>2</sub>, et<sub>4</sub></i>	Si						Si
<i>d</i>	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
<i>alfao</i>	Si						Si
<i>alfa_cav</i>	Si						
<i>n</i>			Si				
<i>f</i>	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si

### 5.2.3 Módulos de cálculo del algoritmo pared doble respectivo:

**“brek”, (“simpl”), “frigu”, “iwoh”, “jone”, “TLMna”, “TLMdif”, “sharp”**

Estos módulos calculan el algoritmo de pérdida de transmisión propuesto por cada método. Las variables de entrada para cada modelo se indicaron en la Tabla 5.2.3.1, mientras que las variables de salida son sólo las respectivas pérdidas de transmisión en bandas de frecuencia.

Cabe destacar, que el módulo **“iwoh”** arroja 2 curvas de pérdida de transmisión: una superior **“TLP”** y una inferior **“TLO”**, que en las sucesivas curvas se denotan como **“iwoh up”** e **“iwoh do”**, respectivamente. Además, que tanto el módulo **“simpl”** como el módulo **“fdos”** son sub-módulos del módulo **“brek”** y el módulo **“sharp”**, respectivamente. El módulo **“simpl”** realiza cálculos de coeficientes para **“brek”**, mientras que el módulo **“fdos”** calcula la frecuencia de intersección **“f2”** del módulo **“sharp”**.

### 5.2.4 Módulos de cálculo de herramientas de análisis:

**“STC”, “ERR”, “ERRstc”**

Cada uno de estos módulos trabaja con datos arrojados desde los diferentes módulos de cálculo del algoritmo pared doble. A través la pérdida de transmisión en bandas de frecuencia otorgada por estos módulos, **“STC”** aporta el número de aislamiento acústico para la estimación del respectivo método. El módulo **“ERR”** calcula el error de TL en frecuencias, el error cuadrático medio y la desviación en la estimación de pérdida de Transmisión. **“ERRstc”** calcula el error del STC provisto por cada método en comparación con el obtenido a través de los datos experimentales.

Con fin explicativo, en la Tabla 5.2.4.1 se presentan las variables de entrada y salida de los respectivos programas.

Tabla 5.2.4.1: Variables de entrada y de salida para los módulos de cálculo de herramientas de análisis.

Módulo	In 1	In 2	In 3	Out 1	Out 2	Out 3	Out 4
<b>STC</b>	$TL_{módulo}$	-	-	$StC$	$b$	$c$	$Ref$
<b>ERR</b>	$f$	$TL_{módulo}$	$TL_{med}$	$EcM$	$Ef_{TL}$	$desvia$	-
<b>ERRstc</b>	$STC_{modulo}$	-	-	$Est$	-	-	-

## 6. Resultados

Se realizó un estudio sobre 31 muestras experimentales, 30 de las cuales cumplen con los requisitos para ser calificadas como “paredes dobles” y la última, que se realizó sólo a modo de prueba porque carecía de cavidad. Los datos analizados de las 16 primeras se encontraron en la bibliografía consultada, mientras que las 15 restantes son mediciones realizadas en el Laboratorio normalizado del CSIC en Madrid, España. De esto da cuenta la Tabla 6.2.1.

Tabla 6.2.1: *Configuraciones de paredes dobles analizadas.*

	<i>Referencia</i>	<i>Mat. Panel 1</i>	<i>Mat. en Cavidad</i>	<i>Mat. Panel 2</i>	<i>Masa sup. P1</i>	<i>Masa sup. P2</i>	<i>d cav</i>	<i>STC Medido</i>
1	(Iwashige & Ohta, 1981) ( a )	aluminio	aire	aluminio	1.08	1.08	0.076	20
2*	(Iwashige & Ohta, 1981) ( b )	aluminio	aire	aluminio	2.43	2.43	0.07	25
3	(Iwashige & Ohta, 1981) ( c )	aluminio	aire	aluminio	2.43	2.43	0.142	26
4	(Iwashige & Ohta, 1981) ( d )	plasterboard	aire	plasterboard	6.496	6.496	0.045	31
5	(Iwashige & Ohta, 1981) ( e )	plasterboard	aire	plasterboard	6.496	6.496	0.1	37
6	(Iwashige & Ohta, 1981) ( f )	plywood	aire	plywood	3	3	0.1	31
7*	(Iwashige & Ohta, 1981) ( g )	plasterboard	aire	plywood	6.496	1.5	0.045	26
8	(Iwashige & Ohta, 1981) ( h )	plasterboard	aire	plywood	6.496	1.5	0.1	31
9	(Uris, Llopis & Llinares, 1999) (1)	carton yeso	lan. Mineral	carton yeso	8.996	8.996	0.05	44
10*	(Uris, Llopis & Llinares, 1999) (2)	carton yeso	lan. Min. + aire	carton yeso	8.996	8.996	0.2	53
11	(Iwashige, Ohta & Nakasako, 1986)	aluminio	aire	aluminio	3.24	3.24	0.1	29
12	(Price & Crocker, 1970)	aluminio	fibra de vidrio	aluminio	8.64	8.64	0.071	41
13	(Brekke, 1981)	chipboard	lan. Mineral	chipboard	9.3	9.3	0.2	49
14	(Jones, 1976)	carton yeso	fibra de vidrio	carton yeso	8.788	8.788	0.635	55
15	(Bravo et al., 2002) (1)	carton yeso	aire	carton yeso	8.8	8.8	0.0034	31
16 <sup>E</sup>	(Bravo et al., 2002) (2)	carton yeso	sin cavidad	carton yeso	8.8	8.8	1.00E-07	31
17*	Medición de laboratorio CSIC, España	madera aglom.	lan. Mineral	madera aglom.	10.4	10.4	0.055	41
18	Medición de laboratorio CSIC, España	yeso laminado	fibra de vidrio	yeso lamin.	20.12	20.12	0.07	56
19	Medición de laboratorio CSIC, España	carton yeso	aire	carton yeso	10.38	10.38	0.048	37
20	Medición de laboratorio CSIC, España	carton yeso	aire	carton yeso	10.38	10.38	0.07	39
21	Medición de laboratorio CSIC, España	carton yeso	aire	carton yeso	10.38	10.38	0.09	42
22	Medición de laboratorio CSIC, España	carton yeso	aire	carton yeso	17.3	17.3	0.048	44
23	Medición de laboratorio CSIC, España	carton yeso	aire	carton yeso	17.3	17.3	0.07	48
24*	Medición de laboratorio CSIC, España	carton yeso	aire	carton yeso	17.3	17.3	0.09	50
25	Medición de laboratorio CSIC, España	yeso lamin.	lan. Mineral	yeso lamin.	9.68	9.68	0.05	46
26	Medición de laboratorio CSIC, España	yeso lamin.	fibra de vidrio	yeso lamin.	11.61	11.61	0.046	45
27	Medición de laboratorio CSIC, España	yeso lamin.	fibra de vidrio	yeso lamin.	20.12	20.12	0.046	57
28	Medición de laboratorio CSIC, España	yeso lamin.	fibra de vidrio	yeso lamin.	20.12	20.12	0.07	55
29	Medición de laboratorio CSIC, España	yeso lamin.	lan. Mineral	yeso lamin.	10	10	0.048	50
30	Medición de laboratorio CSIC, España	yeso lamin.	lan. Mineral	yeso lamin.	10	20.12	0.048	51
31	Medición de laboratorio CSIC, España	madera	aire	madera	12.35	12.35	0.06	40

<sup>E</sup> Es la excepción, pues es la que carece de cavidad (Resultados se muestran en Apéndice 6.2).

\* Son los experimentos presentados a continuación.

El experimento consistió en tomar las curvas de pérdida de transmisión de la bibliografía, y con los correspondientes valores ejecutar el programa “datos”, programado en Matlab v7.0. Este programa se encuentra detallado en el capítulo anterior.

El programa, además de arrojar en una gráfica la pérdida de transmisión por cada uno de los métodos estudiados (como se puede apreciar en al Fig. 6.2.1), entrega cierta estadística del comportamiento de cada uno de los modelos.

Como ejemplo, se mostrarán a continuación los resultados de sólo algunos de los experimentos ya mencionados, en los cuales se presentan sus variables de entrada y salida, gráficas y estadísticas correspondientes (sobre las cuales se detallará más en el siguiente capítulo). Todos los resultados se anexan en el Apéndice de esta tesis.

### 6.1 Experimento 2 (Iwashige & Ohta, 1981b):

El sistema de pared doble consiste de 2 paneles de aluminio separados por 0.076 m de aire. Cada panel tiene un espesor de 0.0009 m.

Los datos entregados al sistema son:

Tabla 6.1.1: *Datos de entrada experimento 2.*

'n'	'L1'	'L3'	'd'	'M2'	'h2'	'E2'	'poa2'	
3	2.40	1.20	0.07	2700.00	0.00	7.1E+10	0.30	
'et2'	'M4'	'h4'	'E4'	'poa4'	'et4'	'alfa0'		
0.01	2700	0.00	7.1E+10	0.30	0.01	0.10		
'frec'	<b>125</b>	<b>160</b>	<b>200</b>	<b>250</b>	<b>315</b>	<b>400</b>	<b>500</b>	<b>630</b>
'Alfa_cav(f)'	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
'TLmed'	10.00	9.00	10.00	13.50	15.00	18.50	22.00	26.00
'frec'	<b>800</b>	<b>1000</b>	<b>1250</b>	<b>1600</b>	<b>2000</b>	<b>2500</b>	<b>3150</b>	<b>4000</b>
'Alfa_cav(f)'	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
'TLmed'	28	33	36	38	40	40.5	45.	47.5

De esta forma, el programa además de entregar una tabla de error por método para cada banda de frecuencia y una tabla de cada una de las pérdidas de transmisión entregadas, entrega una tabla de estadísticas generales y una gráfica, que se muestran a continuación:

Tabla 6.1.2: *Resultados y estadísticas experimento 2.*

'Modelo'	'Brekke'	'FriGu'	'Iwoh-up'	'Iwoh-do'	'Jones'	'LMn'	'LMdif'	'Sharp'	'Medición'
'STC'	22	18	26	25	28	29	37	27	25
'E_STC'	12.00	28.00	4.00	0.00	12.00	16.00	48.00	8.00	0
'EcM'	1.52	5.08	2.18	1.16	5.87	8.50	8.50	1.82	0
'desvia'	-6.09	20.33	8.73	4.62	23.50	33.99	33.99	7.30	0

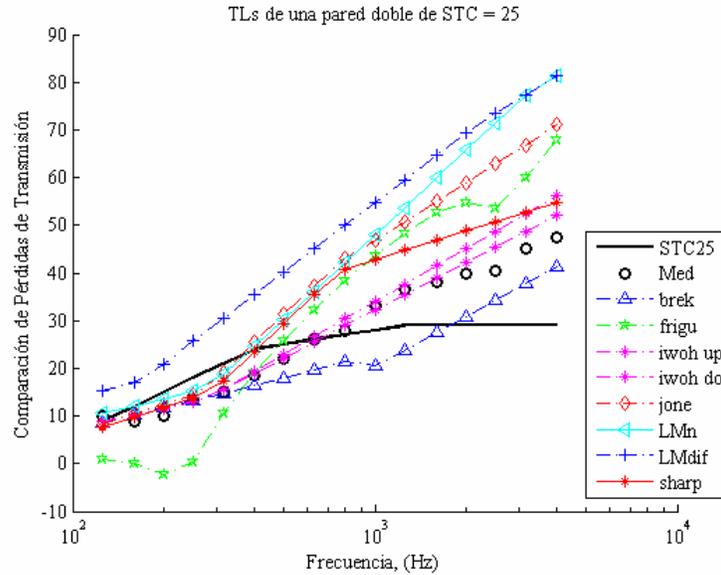


Fig. 6.1.1 : Curvas estimadas de TL, datos medidos y Ref. STC para experimento 2.

## 6.2 Experimento 7 (Iwashige & Ohta, 1981b):

Esta vez, el sistema se compone de un panel de plasterboard de espesor 0.007m y uno de plywood o madera aglomerada, de 0.003 m. La cavidad entre ellos es 0.045 m.

Los datos entregados son:

Tabla 6.2.1: Datos ingresados al experimento 7.

'n'	'L1'	'L3'	'd'	'M2'	'h2'	'E2'	'poa2'	
3	2.4	1.2	0.045	928	0.007	3.00E+09	0.33	
'et2'	'M4'	'h4'	'E4'	'poa4'	'et4'	'alfa0'		
0.1	500	0.003	4.60E+09	0.33	0.1	0.3		
'frec'	<b>125</b>	<b>160</b>	<b>200</b>	<b>250</b>	<b>315</b>	<b>400</b>	<b>500</b>	<b>630</b>
'Alfa_cav(f)'	0.2	0.2	0.2	0.25	0.25	0.25	0.1	0.1
'TLmed'	14	13	14	13	16	19	21	25.5
'frec'	<b>800</b>	<b>1000</b>	<b>1250</b>	<b>1600</b>	<b>2000</b>	<b>2500</b>	<b>3150</b>	<b>4000</b>
'Alfa_cav(f)'	0.1	0.1	0.1	0.1	0.5	0.5	0.6	0.6
'TLmed'	30	32.5	35.5	42	44	48	51.5	50

La información obtenida fue:

Tabla 6.2.2: Resultados y estadísticas experimento 7.

'Modelo'	'Brekke'	'FriGu'	'Iwoh-up'	'Iwoh-do'	'Jones'	'LMn'	'LMdif'	'Sharp'	'Medición'
'STC'	26	13	28	28	32	28	38	30	26
'E_STC'	0.00	50.00	7.69	7.69	23.08	7.69	46.15	15.39	0
'EcM'	2.36	1.82	2.35	1.21	6.34	7.46	8.96	1.08	0
'desvia'	9.43	7.26	9.40	4.85	25.35	29.84	35.83	4.32	0

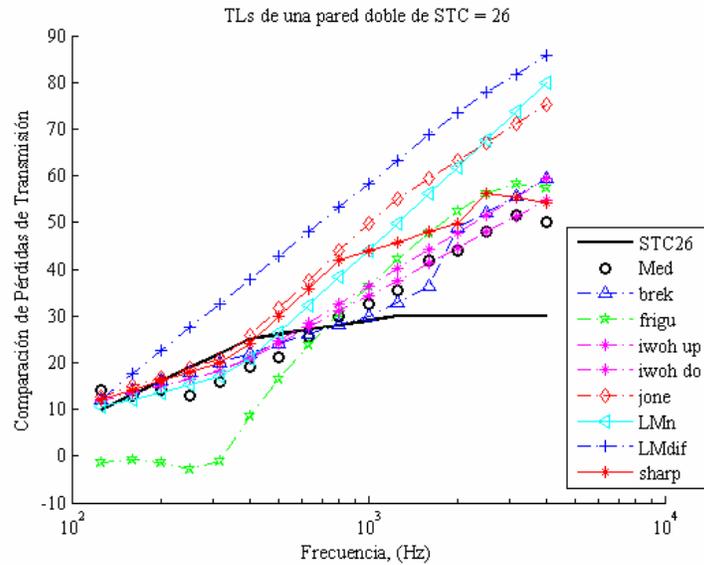


Fig. 6.2.1: Curvas estimadas de TL, datos medidos y Ref. STC para experimento 7.

### 6.3 Experimento 10 (Uris, Llopis & Llinares, 1999):

El sistema de paredes dobles consiste de dos paredes de yeso cartón, con lana mineral a ambos lados de la cavidad y aire en medio. El espesor de cada panel es de 0.013 y la distancia entre paneles es de 0.2 m.

Datos de entrada:

Tabla 6.3.1: Datos ingresados al experimento 10.

'n'	'L1'	'L3'	'd'	'M2'	'h2'	'E2'	'poa2'	
3	3.80	3.00	0.20	692	0.01	3 E+07	0.20	
'et2'	'M4'	'h4'	'E4'	'poa4'	'et4'	'alfa0'		
0.01	692	0.01	3 E+07	0.20	0.01	0.78		
'frec'	<b>125</b>	<b>160</b>	<b>200</b>	<b>250</b>	<b>315</b>	<b>400</b>	<b>500</b>	<b>630</b>
'Alfa_cav(f)'	0.20	0.20	0.20	0.25	0.25	0.25	0.10	0.10
'TLmed'	14	13	14	13	16	19	21	25
'frec'	<b>800</b>	<b>1000</b>	<b>1250</b>	<b>1600</b>	<b>2000</b>	<b>2500</b>	<b>3150</b>	<b>4000</b>
'Alfa_cav(f)'	0.35	0.35	0.35	0.70	0.70	0.70	0.90	0.90
'TLmed'	28	34	37.5	43	44	50	56	60

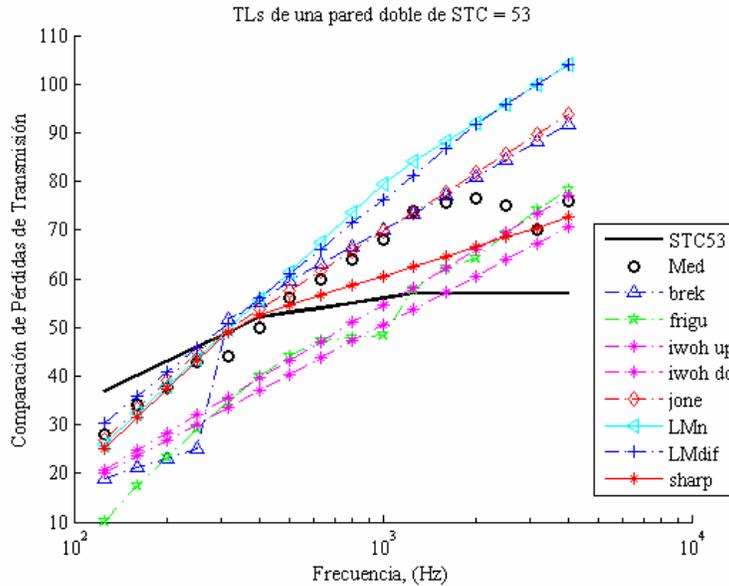


Fig. 6.3.1: Curvas estimadas de TL, datos medidos y Ref. STC para experimento 10.

Luego, las respectivas salidas:

Tabla 6.3.2: Resultados y estadísticas experimento 10.

'Modelo'	'Brekke'	'FriGu'	'Iwoh-up'	'Iwoh-do'	'Jones'	'LMn'	'LMdif'	'Sharp'	'Medición'
'STC'	39	39	43	42	55	54	57	53	53
'E_STC'	26.42	26.42	18.87	20.76	3.77	1.89	7.55	0	0
'EcM'	3.91	0.53	0.30	1.32	4.43	7.01	7.01	0.86	0
'desvia'	15.63	2.14	1.21	-5.28	17.74	28.06	28.06	-3.42	0

#### 6.4 Experimento 17 (Medición de Laboratorio en CSIC, España):

El sistema consiste de 2 paneles de madera aglomerada con lana mineral en la cavidad. El espesor de los paneles es de 0.016 m, y la distancia entre ellos es de 0.055 m.

Los datos de entrada son:

Tabla 6.4.1: Datos ingresados al experimento 17.

'n'	'L1'	'L3'	'd'	'M2'	'h2'	'E2'	'poa2'	
3	4.5	3	0.055	650	0.016	4.60E+09	0.3	
'et2'	'M4'	'h4'	'E4'	'poa4'	'et4'	'alfa0'		
0.1	650	0.016	4.60E+09	0.3	0.1	0.78		
'frec'	<b>125</b>	<b>160</b>	<b>200</b>	<b>250</b>	<b>315</b>	<b>400</b>	<b>500</b>	<b>630</b>
'Alfa_cav(f)'	0.35	0.35	0.35	0.7	0.7	0.7	0.9	0.9
'TLmed'	21.93	30.54	33.33	34.18	38.22	40.94	42.28	41.75
'frec'	<b>800</b>	<b>1000</b>	<b>1250</b>	<b>1600</b>	<b>2000</b>	<b>2500</b>	<b>3150</b>	<b>4000</b>
'Alfa_cav(f)'	0.9	0.9	0.9	0.9	0.95	0.95	0.95	0.9
'TLmed'	40.77	40.93	41.15	39.47	39.71	42.14	44.23	47.39

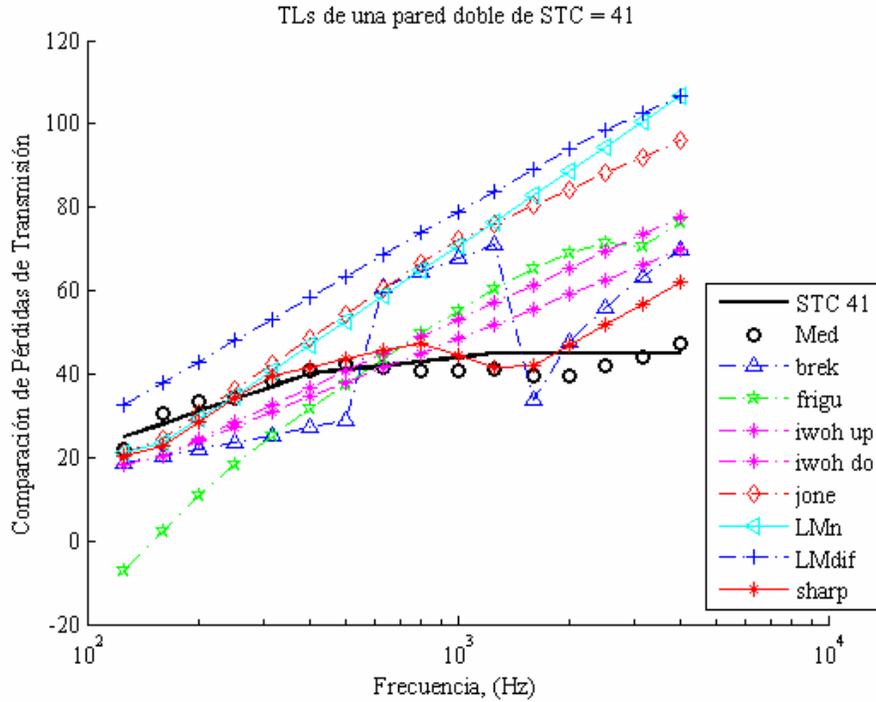


Fig. 6.4.1: Curvas estimadas de TL, datos medidos y Ref. STC para experimento 17.

Las respectivas salidas son:

Tabla 6.4.2: Resultados y estadísticas experimento 17.

'Modelo'	'Brekke'	'FriGu'	'Iwoh-up'	'Iwoh-do'	'Jones'	'LMn'	'LMdif'	'Sharp'	'Medición'
'STC'	34	25	40	39	47	46	59	43	41
'E_STC'	17.07	39.02	2.44	4.88	14.63	12.20	43.90	4.88	0
'EcM'	5.60	7.23	7.59	5.59	12.22	14.80	14.80	3.67	0
'desvia'	22.41	28.91	30.34	22.35	48.87	59.18	59.18	14.68	0

### 6.5 Experimento 24 (Medición de Laboratorio en CSIC, España):

El sistema consiste de 2 paneles de cartón yeso con aire en la cavidad. El espesor de los paneles es de 0.025 m, y la distancia entre ellos es de 0.09 m.

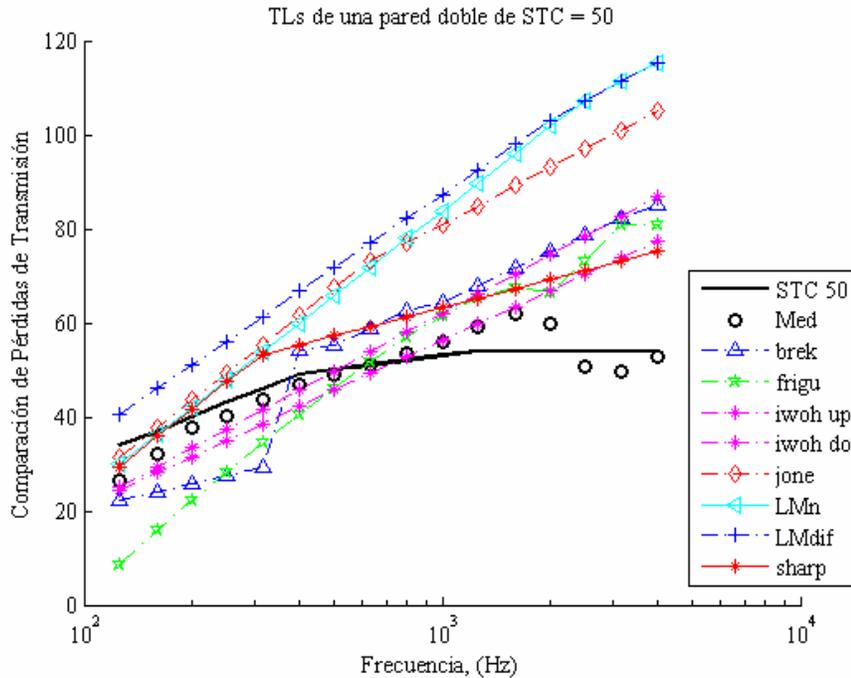


Fig. 6.5.1: Curvas estimadas de TL, datos medidos y Ref. STC para experimento 24.

Los datos de entrada son:

Tabla 6.5.1: Datos ingresados al experimento 24.

'n'	'L1'	'L3'	'd'	'M2'	'h2'	'E2'	'poa2'	
3	4.50	3.00	0.09	692	0.03	30000000.00	0.30	
'et2'	'M4'	'h4'	'E4'	'poa4'	'et4'	'alfa0'		
0.10	692	0.03	30000000.00	0.30	0.10	0.08		
'frec'	<b>125</b>	<b>160</b>	<b>200</b>	<b>250</b>	<b>315</b>	<b>400</b>	<b>500</b>	<b>630</b>
'Alfa_cav(f)'	0.14	0.14	0.14	0.10	0.10	0.10	0.06	0.06
'TLmed'	26.39	32.22	37.89	40.23	43.61	46.97	48.96	50.89
'frec'	<b>800</b>	<b>1000</b>	<b>1250</b>	<b>1600</b>	<b>2000</b>	<b>2500</b>	<b>3150</b>	<b>4000</b>
'Alfa_cav(f)'	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03
'TLmed'	53.36	55.99	59.20	61.92	59.97	50.54	49.50	52.93

Luego, el programa arroja los siguientes datos de salida:

Tabla 6.5.2: Resultados y estadísticas experimento 24.

'Modelo'	'Brekke'	'FriGu'	'Iwoh-up'	'Iwoh-do'	'Jones'	'LMn'	'LMdif'	'Sharp'	'Medición'
'STC'	42	38	49	46	59	58	67	57	50
'E_STC'	16.00	24.00	2.00	8.00	18.00	16.00	34.00	14.00	0
'EcM'	8.01	6.99	8.45	6.14	13.04	15.61	15.61	5.59	0
'desvia'	32.03	27.98	33.82	24.56	52.17	62.46	62.46	22.37	0

## 7. Análisis Estadístico de los Resultados

### 7.1 Estadísticos

El protocolo de evaluación para los diferentes algoritmos amerita una evaluación cualitativa de los resultados, que será llevada a cabo mediante algunos estadísticos simples, tales como el error cuadrático medio, el error medio cuadrático normalizado, el sesgo y la media aritmética, estadísticos que permiten medir la precisión de cada estimación.

Por precisión se entiende el grado de correspondencia entre pares individuales de valores pronosticados y valores observados, entendiéndose por estos últimos los valores de pérdida de transmisión medidos en laboratorio.

#### 7.1.1 Error Cuadrático Medio:

Para el cálculo de precisión global se utiliza el error cuadrático medio, que entrega la medida de las diferencias en promedio entre los valores pronosticados y observados. Está definido por (Pielke, 1984):

$$EcM = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(\phi_i - \phi_{iobs})^2}{N}} \quad (7.1.1.1)$$

donde:

$\phi_i$ ,  $\phi_{iobs}$  son los valores pronosticados y observados, respectivamente.

$N$  es el número de valores analizados.

#### 7.1.2 Error absoluto medio Normalizado:

El error absoluto medio normalizado entrega información del peso del error respecto al valor de la variable, de esta forma (Stauffer y Reaman, 1990):

$$EaN = \sum_{i=1}^N \frac{|\phi_i - \phi_{iobs}|}{N \cdot \phi_{iobs}} \quad (7.1.2.1)$$

#### 7.1.3 Sesgo (Bias):

El sesgo proporciona información sobre la tendencia del modelo a sobreestimar o subestimar una variable, cuantificando el error sistemático del modelo. Esto es, entrega información local del modelo. Matemáticamente, está dado por (Pielke, 1984):

$$BIAS = \sum_{i=1}^N \frac{(\phi_i - \phi_{iobs})}{N} \quad (7.1.3.1)$$

#### 7.1.4 Media Aritmética:

La media aritmética o promedio, calcula el valor característico de un conjunto de elementos, de la forma (Pielke, 1984):

$$PROM = \sum_{i=1}^N \frac{\phi_i}{N} \quad (7.1.4.1)$$

Al promediar todos estos índices estadísticos y clasificar las muestras se pudieron realizar bastantes análisis para poder encontrar, a través de parámetros más objetivos que el STC, cuál es el mejor estimador de la curva de pérdida de transmisión.

## 7.2 Análisis por Método

En este apartado, se analizará cada método en función de su precisión de estimación de acuerdo a algunos parámetros. Éstos son:

- a) La presencia de material absorbente en la cavidad
- b) Si la masa superficial de ambos paneles es igual.
- c) Error estimado de acuerdo a la masa del panel (Mayor o menor que  $10 \text{ kg/m}^2$ ).
- d) Error estimado de acuerdo a la distancia entre paneles (Mayor o menor a  $0.1 \text{ m}$ ).

### 7.2.1 Resultados por Ley de Masa:

#### 7.2.1.1 Ley de Masa incidencia Normal:

De la información establecida en la Tabla (7.2.1.1) que se presenta a continuación, se puede encontrar que este método presenta una precaria información local sobre la pérdida de transmisión medida, pues presenta elevadas desviaciones positivas con respecto a la muestra de laboratorio, de lo cual se deduce una sobreestimación elevada. En la estimación del STC, presenta menos rango de error en las series con material absorbente, y en las cuales las densidades de masas de los paneles son diferentes. Destaca, en esta información, que se obtienen mejores resultados para paneles de densidad diferente que en

todos los otros casos, aún cuando esta Ley es para paredes dobles cuya masa superficial es igual.

Tabla 7.2.1.1: *Error absoluto medio de las estimaciones Ley de Masa al STC obtenido, error cuadrático medio y sesgo de las estimaciones Ley de Masa a la pérdida de Transmisión obtenida.*

	<i>Sin abs</i>				<i>Con abs</i>			
	<i>LMn</i>	<i>LMdif</i>	<i>Jones</i>	<i>Sharp</i>	<i>LMn</i>	<i>LMdif</i>	<i>Jones</i>	<i>Sharp</i>
'E_STC'	16.06	46.50	17.52	12.59	6.02	24.97	5.64	5.47
'EcM'	12.03	12.59	9.81	3.81	13.79	13.93	11.35	4.12
'desvia'	48.11	50.35	39.25	13.04	55.15	55.72	45.41	15.94
	<i>Igual Ms</i>				<i>Dif. Ms</i>			
'E_STC'	12.46	37.59	12.53	9.61	4.95	33.37	10.92	8.59
'EcM'	13.13	13.44	10.74	4.11	9.71	10.74	8.14	2.46
'desvia'	52.53	53.75	42.96	14.80	38.85	42.97	32.55	9.83
	<i>Ms &lt; 10 kg/m2</i>				<i>Ms &gt;10 kg/m2</i>			
'E_STC'	10.94	35.43	10.77	9.09	12.72	39.43	14.46	10.05
'EcM'	10.71	11.28	8.50	2.41	15.51	15.64	13.06	5.95
'desvia'	42.86	45.12	34.01	7.03	62.02	62.56	52.26	23.81
	<i>Cav. d &lt;0.1</i>				<i>Cav. d &gt;0.1</i>			
'E_STC'	11.75	41.52	13.02	9.53	11.61	25.19	10.56	9.43
'EcM'	13.75	14.22	11.50	4.58	10.15	10.28	7.68	2.21
'desvia'	55.00	56.87	45.98	17.72	40.59	41.13	30.74	4.90

### 7.2.1.2 Ley de Masa intuitiva a incidencia normal

Dentro del alto grado de error que presenta este método, en general y para todos los diferentes casos, minimiza notablemente el error en la estimación del STC para los casos de cavidades más profundas y casos de material absorbente en la cavidad. Para este método, de gran desviación y alto error cuadrático medio, se obtiene una sobreestimación de la pérdida de transmisión, la cual es bastante alta.

### 7.2.1.3 Método aproximado de Jones

Obtiene mayor desviación y error cuadrático medio para sistemas de paredes con material absorbente que sin presencia de éste, aún cuando se basa en que existe un mínimo material absorbente en la cavidad para todos los casos, pero sí logra una mejor estimación del STC. El sesgo positivo y muy alto, característico de la Ley de masa, indica también una sobreestimación de la curva de TL, pero obtiene mejores resultados que la original.

### 7.2.1.4 Corrección de Sharp al Modelo Ley de masa a incidencia aleatoria

Sharp realiza una corrección tal al modelo Ley de Masa a incidencia aleatoria, que logra errores máximos promediados del orden del 13%. Presenta un error absoluto normalizado de predicción de STC relativamente constante en todos los parámetros establecidos, exceptuando el caso de presencia de material absorbente en la cavidad, donde minimiza el error de predicción de STC en un 7%. Como parámetro global, el error cuadrático medio se manifiesta muy bajo, otorgándole una calificación de precisión muy buena, dentro de los modelos estudiados. El sesgo o la desviación también son muy bajos, indicando como parámetro local, que es un muy buen estimador que da cuenta de los fenómenos involucrados en la pérdida de transmisión de las paredes dobles. Sólo las desviaciones favorecen a paneles cuya densidad superficial es menor a  $10 \text{ kg/m}^2$  y a cavidades amplias, lo cual podría significar alguna pequeña falta de precisión en las frecuencias especiales o de cambios muy bruscos en las curvas de estimación, pero de todas formas manifestando valores de muy bajo orden.

### 7.2.2 Resultados por los otros modelos

Tabla 7.2.2.1: Error absoluto medio de las estimaciones Ley de Masa al STC obtenido, error cuadrático medio y sesgo de las estimaciones Ley de Masa a la pérdida de Transmisión obtenida.

	<i>Sin abs</i>				<i>Con abs</i>			
	'Iwoh-up'	'Iwoh-do'	'Brekke'	'FrinGug'	'Iwoh-up'	'Iwoh-do'	'Brekke'	'FrinGug'
'E_STC'	4.63	5.15	10.61	34.13	13.20	15.65	22.51	31.32
'EcM'	3.35	2.18	3.00	4.65	5.61	4.50	6.15	5.84
'desvia'	13.42	8.69	2.80	18.58	22.43	15.88	19.16	23.34
	<i>Igual Ms</i>				<i>Dif. Ms</i>			
'E_STC'	7.80	8.89	15.83	30.73	5.46	7.07	6.45	49.19
'EcM'	4.32	3.16	4.21	5.44	2.73	1.63	2.96	2.49
'desvia'	17.27	11.79	7.70	21.74	10.92	6.51	11.85	9.97
	<i>Ms &lt;10 kg/m2</i>				<i>Ms &gt;10 kg/m2</i>			
'E_STC'	3.21	2.21	13.47	23.32	10.27	12.14	16.57	33.84
'EcM'	2.59	1.69	2.27	5.26	5.35	4.05	5.11	5.62
'desvia'	10.38	6.70	-0.27	21.04	21.41	14.89	15.07	22.47
	<i>Cav. d &lt;0.1</i>				<i>Cav. d &gt;0.1</i>			
'E_STC'	7.33	7.44	12.22	37.77	7.63	9.71	16.64	29.18
'EcM'	4.56	3.17	3.48	5.56	3.71	2.76	4.54	4.59
'desvia'	18.25	12.65	2.45	22.26	14.82	9.73	13.33	18.34

### **7.2.2.1 Modelo de Iwashige & Ohta**

Como el modelo aproximado de Iwashige & Ohta no presenta sólo una curva, sino un área de validez, las estadísticas (como se puede ver en la Tabla (7.2.2.1)), se obtuvieron para cada una de las curvas que encierran esta área. Aún así, ambas curvas se destacan por mostrar un bajo error absoluto normalizado de STC y bajo error cuadrático medio, lo cual implica un buen comportamiento global de este estimador. Como ambas curvas son rectas en la región de validez (no toma en cuenta el efecto de coincidencia ni las resonancias más que las frecuencias que determinan la región de validez), obtiene eso sí una desviación relativamente alta (que se manifiesta mayormente en la recta superior). Aún así, por el sesgo presentado por la curva inferior, indica ser un buen estimador local. Destaca la concordancia entre ambas curvas (la superior e inferior, Iwoh-up e Iwoh-do), en obtener mejores resultados de STC, para sistemas de paredes dobles sin material absorbente, de densidades superficiales iguales y mayores a  $10 \text{ kg/m}^2$ , y cavidades de menores dimensiones. En el estudio de los errores cuadráticos medios y sesgos obtenido por este método en los diferentes casos, se corrobora el hecho que este método establece mejores resultados aproximados para casos de paredes dobles sin material absorbente en la cavidad, pero estableciendo menores errores cuadráticos medios y sesgos para casos de diferentes densidades superficiales de masa y menores a  $10 \text{ kg/m}^2$ , y cavidades más amplias.

### **7.2.2.2 Aproximación de Brekke utilizando SEA**

El método es un mal estimador de STC, pero no presenta ni sesgos ni errores cuadráticos medios altos. Se observa de forma interesante que, teniendo bruscos cambios en las diferentes curvas de TL (toma en consideración coincidencia y resonancias), presente un sesgo disminuido. Esto indica lo buen indicador local que puede llegar a ser. Se destaca por su concordancia en muestras que no presentan material absorbente en la cavidad, materiales diferentes y densidades superficiales de masa menores a  $10 \text{ kg/m}^2$ .

### **7.2.2.3 Modelo PIM de Fringuelino & Guglielmo**

Es un modelo interesante, porque puede subestimar la pérdida de transmisión en frecuencias bajas y sobreestimar en alta frecuencia. Es por esta razón que, aún siendo un mal estimador para el STC de un sistema pared doble, obtiene errores cuadráticos medios dentro de un rango aceptable. Como se puede apreciar en las curvas presentadas en el

capítulo anterior, no realiza una aproximación precisa del fenómeno, pero obtiene errores cuadrático medios bajos y sesgos relativamente altos, porque subestima la pérdida de transmisión para frecuencias bajas y sobreestima el TL para altas frecuencias. Es por esta razón que también obtiene errores de STC tan elevados, pues como la mayor curva de referencia de STC debe estar sobre un máximo de 8 dB sobre la pérdida de transmisión aproximada, este método tiende a subestimar, en un rango no menor, el STC del modelo estudiado.

### 7.3 Análisis por Frecuencia

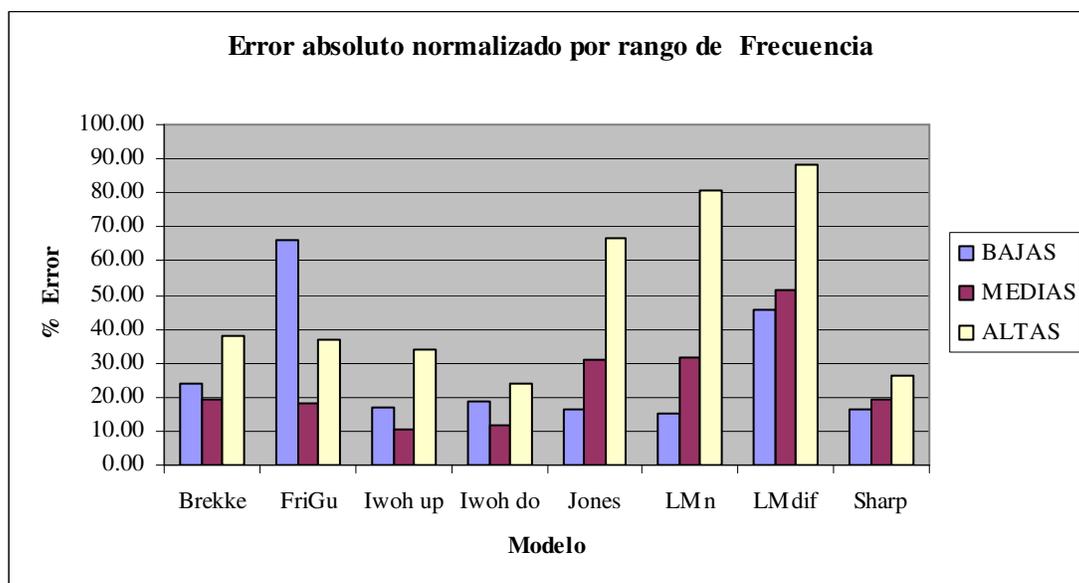


Figura 7.3.1: Errores absolutos normalizados de los métodos versus rango de frecuencia.

De todos los errores de pérdida de transmisión en bandas de tercios de octavas arrojados por el programa, se optó por sacar el promedio de estos errores en base a una subdivisión de frecuencias bajas (125 – 315 Hz), medias (400 – 1250 Hz) y altas (1600 – 4000 Hz), que se presentan en la Fig. 7.3.1.

Como se puede apreciar en la figura, los modelos que presentan errores aproximadamente constantes son el modelo de Sharp, Iwashige & Ohta y Brekke, dando cuenta nuevamente de ser los mejores estimadores analizados. De los restantes modelos establecidos por ley de masa, todos alcanzan un severo error en frecuencias altas (entre un 70-90% de error), subestimando la pérdida de transmisión considerablemente. Luego, el que mantengan el menor error en frecuencias bajas, da cuenta que ya en frecuencias bajas

comienzan a sobreestimar la pérdida de transmisión, desviación que aumenta considerablemente al incrementar la frecuencia.

Como ya se mencionó, el modelo de Fringuelino & Guglielmo subestima la curva de pérdida de transmisión en frecuencias bajas y la sobreestima en frecuencias altas, lo cual en la gráfica se aclara bastante, manifestando un error absoluto normalizado sobre el 60% en frecuencias bajas, sobre un 30% en frecuencias altas y un error menor del orden del 18% en frecuencias medias.

En general, en baja y alta frecuencia no hay modelo que presente un error mínimo, pues todos se encuentran por sobre el 16% de error para frecuencias bajas y 23% en frecuencias altas. Los mejores estimadores en baja frecuencia son la Ley de masa normal, Sharp, Jones y la curva superior de Iwashige & Ohta (up), que se sitúan cerca del 16% de error, mientras que en alta frecuencia Sharp y la recta menor de Iwashige & Ohta logran errores menores al 30%. Como en el rango de frecuencias medias los que obtienen un menor error son ambas curvas de Iwashige & Ohta, se puede considerar que este método es el que obtiene un menor error sobre el rango de frecuencia, cuando se toma en consideración que para bajas frecuencias se debe considerar la curva superior y en altas la curva inferior.

#### 7.4 Análisis Estadístico General

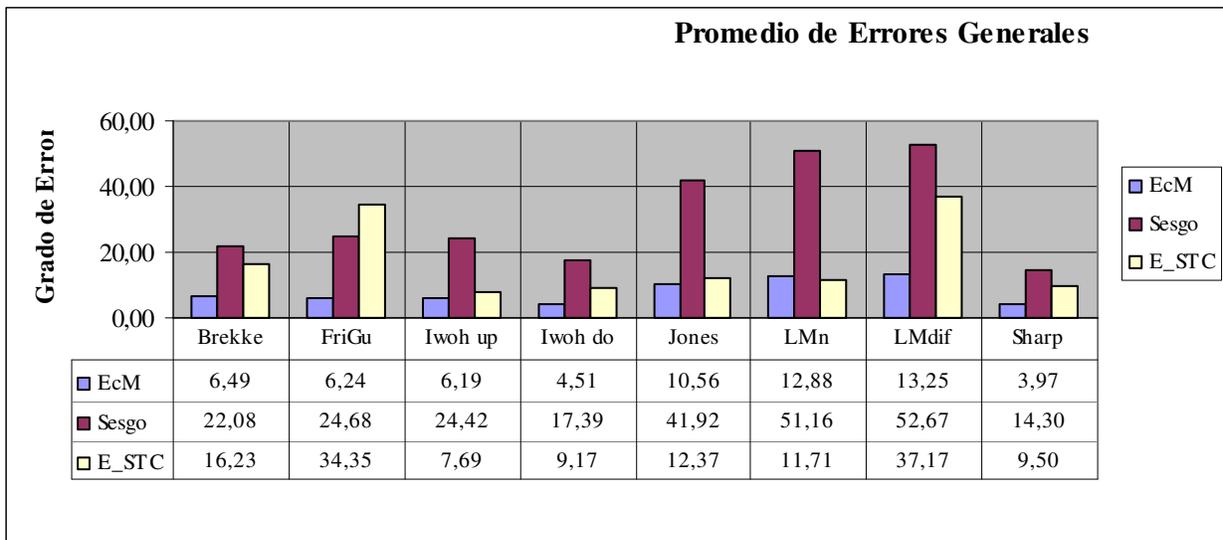


Fig. 7.4.1: Estadísticas promedio Generales en cuanto se refiere al error cuadrático medio, el sesgo y el error absoluto promediado de STC de cada modelo en los 30 experimentos considerados.

De la Fig. 7.4.1, se puede deducir a simple vista que el mejor estimador general es el modelo de Sharp, el cual logra el menor error cuadrático medio y el menor sesgo, dando cuenta de ser, cual ya se ha mencionado, el mejor estimador global y local. Si bien es cierto que no obtiene el menor error de STC, obtiene el segundo lugar después del método de Iwashige & Ohta, pero logrando un error menor al 10% y por lo tanto, válido. Luego de Sharp, se debería considerar a Iwashige & Ohta, que se manifiesta como el mejor método para estimar STC, logrando segundo lugar en cuanto al error cuadrático medio y sesgo. Sobre el promedio se encuentra también al modelo de Brekke, que logra un error cuadrático medio y sesgo del orden de los de Iwashige & Ohta, pero presentándose como un estimador de STC precario.

Para estimar el STC, tanto la Ley de masa a incidencia normal como el método de Jones se unen a la clasificación de buenos estimadores, estableciendo errores no lejanos al 10%, mientras que el método de Fringuelino & Guglielmone y el modelo Ley de masa intuitivo se descartan, por presentar errores superiores al 30%.

Como estimadores de pérdida de transmisión a modo global y local, se presentan aceptables también los modelos de Brekke y Fringuelino & Guglielmone, cuyos resultados finales no se alejan demasiado de los resultados obtenidos por Sharp e Iwashige & Ohta, pero sí dejando fuera de consideración a los modelos de ley de masa (exceptuando el modelo de Sharp), que sobreestiman la pérdida de transmisión de una pared doble en todos los casos, incluso del rango de una desviación positiva de 40-50 dB promedio.

## **8. Discusión de los Resultados**

El análisis estadístico recién presentado es una herramienta fundamental para poder llevar a cabo esta discusión; no la única herramienta. El motivo principal de la inclusión de este capítulo se debe a la necesidad de valorar los aspectos cuantitativos y cualitativos de cada algoritmo y su desempeño.

En la evaluación de proyectos de ingeniería es necesario considerar la relación costo-beneficio. En este caso, se debe tomar en consideración la información necesaria para desarrollar cada algoritmo, su variabilidad con respecto a diferentes condiciones, los efectos del fenómeno de transmisión de sonido que da a conocer, la información genérica que mediante ese algoritmo se pueda obtener y los errores involucrados.

Otro concepto interesante que llevará esta discusión, se refiere a la eficiencia, eficacia y efectividad de los modelos estudiados. En ingeniería, la eficiencia es la capacidad para lograr un fin empleando los mejores medios posibles. La eficacia es la capacidad de lograr el efecto que se desea o se espera, sin que priven para ello los recursos o los medios empleados. La efectividad, finalmente, es la cuantificación del logro de la meta.

El desarrollo de las ciencias, a través de la investigación, ha logrado una rigurosidad y acuciosidad en los modelos matemáticos cuya complejidad requiere la utilización de muchos recursos y alta tecnología para llevarlos a cabo.

Hoy en día, para realizar un diseño constructivo competente, se requiere de eficiencia, por lo tanto menores recursos pero igualmente eficaces. Es por esta razón, que en este trabajo se ha recurrido a métodos aproximados, que se puedan calcular en una forma rápida y con un mínimo de complejidad teórica, y por lo tanto con menos recursos.

Desde el punto de vista del análisis estadístico realizado en el capítulo anterior, los mejores estimadores de STC serían los métodos de Iwashige & Ohta y Sharp. Tanto los modelos de Brekke, Fringuellino & Guglielmone y la Ley de masa intuitiva se descartan al momento de estimar un STC de una partición doble. Esto tiene una directa relación con la estimación en baja frecuencia de cada modelo, como se aprecia en la Fig. 7.4.1.

Desde el punto de vista de los parámetros cualitativos del sistema pared doble versus precisión de algoritmo, se recomienda a Sharp en caso de presencia de absorbente en la cavidad o densidades superficiales de masa mayor a  $10 \text{ kg/m}^2$  y a Iwashige & Ohta en caso de ausencia de material absorbente y densidades superficiales de masa menores a  $10 \text{ kg/m}^2$ . Esto se debe, fundamentalmente, a que el modelo de Iwashige & Ohta demanda como requisitos la ausencia de material absorbente y densidades superficiales de masa menores a  $10 \text{ kg/m}^2$ , lo cual explica este resultado, pero aún en los casos de no cumplir estos requisitos, el método de Iwashige & Ohta es uno de los mejores estimadores. Finalmente, tanto para el caso de paneles iguales o diferentes como para casos de cavidades de espesores mayores o menores que  $0.1 \text{ m}$ , no existe mayor variabilidad en los resultados.

De la ley de masa intuitiva, se puede concluir que sobreestima el STC y la pérdida de transmisión con errores que no pasan desapercibidos. De hecho, obtiene el mayor error cuadrático medio, el mayor sesgo y el mayor error de STC, lo cual se vislumbra también en el análisis por frecuencia, donde obtiene también los mayores errores. El método fue un intento mal logrado de corregir la Ley de Masa a incidencia normal.

De los estadísticos obtenidos para el método de Fringuelino & Guglielmo, además de ser un mal estimador de STC, obtiene un alto error cuadrático medio, que en conjunto con un sesgo no muy pronunciado anuncia ser un modelo que subestima en baja frecuencia y sobreestima en alta frecuencia. El método de impedancia progresiva, al estudiar la transmisión de sonido sólo en base a los cambios de impedancia que sufre el medio, no considera el acoplamiento de los paneles ni las resonancias superiores en la cavidad. Esto, sumado a que en el nivel aproximado estudiado, la impedancia en la cavidad no ha sido bien definida en función de las propiedades del material absorbente, porosidad, etc. cuyos algoritmos requieren de un estudio más complejo.

Brekke, aún obteniendo un alto error para el STC, no obtiene un sesgo ni error cuadrático medio alto. El modelo de Brekke, al ser una aproximación del modelo SEA de Price & Crocker, desprecia muchos términos. Además, requiere muchos datos de entrada que no están disponibles para cada experimento, de modo que tanto los términos despreciados como los datos extraídos de la bibliografía han de resultar como curvas con quiebres. Las curvas de pérdida de transmisión obtenidas a partir de este método, dan cuenta de la mayoría de los fenómenos involucrados en la transmisión de sonido de paredes dobles, pero se notan subestimaciones para los fenómenos de resonancia y coincidencia, alejándose demasiado de la curva real y dejando quiebres abruptos en las curvas. El otro parámetro de importancia se establece en el modelo de Price & Crocker, al asumir igual densidad de energía modal. Este modelo es más complejo y requiere de un aún mayor número de variables de entrada, pero se muestra interesante la posibilidad de obtener un estudio detallado del modelo de Price & Crocker, pues es el único método de los estudiados que considera las resonancias, frecuencias críticas, transmisión resonante y no resonante, por lo tanto es el modelo que más da cuenta de los fenómenos involucrados en la transmisión de sonido.

Tanto los modelos de Ley de masa a incidencia normal como el método de Jones obtienen un alto sesgo y error en alta frecuencia. Esto se debe a la sobreestimación progresiva que llevan a cabo estos métodos. No son malos estimadores de STC, pues tampoco estiman mal la pérdida de transmisión en baja frecuencia, pero no dan cuenta de los fenómenos involucrados y son malos estimadores a modo local y global. Estos modelos no consideran pérdidas en la cavidad y se basan en despreciar resonancias. El método de Jones realiza también unas correcciones para uniones estructurales y transmisión lateral que

en este trabajo no fueron consideradas, de modo que aún siendo mediciones en laboratorio podría haber existido una variación si éstos se hubieran considerado.

De los métodos restantes es de los cuales se requiere una mayor discusión, pues son los métodos que aportan menor discrepancia con las mediciones. Ambos métodos son aproximaciones no demasiado acuciosas, pero que obtienen muy buenos resultados.

El primero, el método de Iwashige & Ohta, es una aproximación con muchos conceptos intuitivos que determina un área de validez de la pérdida de transmisión a través de dos líneas rectas, cada una de las cuales obtiene buenos resultados. Es de esperarse entonces que obtenga un sesgo mayor, pues en un principio no se define como un buen estimador local, sino global. Así es como no da cuenta de ningún fenómeno más que la resonancia del sistema masa-aire-masa y sobreestima la pérdida de transmisión en alta frecuencia. De esta forma, una adecuada lectura de estos resultados debería implicar considerar la recta superior para frecuencias bajas y la inferior para frecuencias altas y estimación de STC.

El modelo restante se refiere a la corrección de Sharp al modelo Ley de masa. Este modelo se aprecia como el más preciso entre todos los estudiados, aún siendo llevado a cabo por interpolación de curvas y rectas. Toma en cuenta la resonancia del sistema masa-aire-masa, frecuencias críticas y la frecuencia de corte. Manifiesta una estimación relativamente buena en la estimación de STC (siendo sólo superado por Iwashige & Ohta), además del sesgo y error cuadrático medio mínimo en los resultados finales. Su fiabilidad en los diferentes casos estudiados se mantiene aún en el análisis de frecuencia, donde obtiene un error bastante plano.

De esta forma, se han obtenido dos algoritmos que sobresalen: Iwashige & Ohta y Sharp, de los cuales Sharp obtiene mejores resultados cuantitativos y cualitativos. La pregunta ahora, correspondería a evaluar la eficiencia, ya que ambos son eficaces:

El modelo de Sharp necesita de muchas más variables de entrada que el método de Iwashige & Ohta, que solicita las variables mínimas para realizar la segunda mejor estimación de pérdida de transmisión. De esta forma, dependiendo de la necesidad de precisión del diseño constructivo y de las variables conocidas, se deberá considerar la efectividad de uno u otro algoritmo.

Dentro del análisis general, como ya se ha mencionado, llama la atención que el mejor estimador de STC no es el mejor estimador de la curva de pérdida de transmisión, sino el mejor estimador de la curva de pérdida de transmisión en baja frecuencia.

Aún habiendo obtenido buenos resultados, se debe mencionar que un estudio detallado de métodos más complejos será necesario para obtener mejores resultados. El método de elementos finitos o el análisis modal son herramientas de cálculo cuya precisión y complejidad son mucho mayores, pero que requieren de mayor información sobre el diseño constructivo a realizar.

## 9. Conclusiones

- Se logró el objetivo general, mediante la programación de siete algoritmos predictivos del comportamiento acústico de paredes dobles y del cálculo de su STC y la comparación con resultados de mediciones experimentales obtenidas de la bibliografía y de Laboratorios Normalizados.
- De los métodos estudiados se concluye que los métodos que logran mayor precisión son el de Sharp, en estimación de curvas de pérdida de transmisión en paredes dobles y el de Iwashige & Ohta en estimación de STC.
- La corrección efectuada por Sharp se vislumbra como el algoritmo más completo, pues logra los resultados a través de sucesivas aproximaciones, pero involucrando fenómenos que ocurren en la transmisión de sonido a través de paredes dobles, cuales son el efecto del material absorbente, y las frecuencias críticas de paneles o fenómeno de coincidencia.
- Se recomienda a Sharp en caso de presencia de absorbente en la cavidad o densidades superficiales de masa mayores a  $10 \text{ kg/m}^2$  y a Iwashige & Ohta en caso de ausencia de material absorbente y densidades superficiales de masa menores a  $10 \text{ kg/m}^2$ .
- Se obtienen mejores resultados de estimación de STC por el algoritmo de Iwashige & Ohta, mientras que la curva de pérdida de transmisión es medianamente mejorada por Sharp. La diferencia entre ambos, es que el modelo de Iwashige & Ohta, aún con precaria información, realiza una estimación bastante acertada.
- Todos estos algoritmos, al ser aproximados y poco acuciosos en sus cálculos, deben ser utilizados para paneles livianos.

## 10. Bibliografía

- Arau, H. (1999). El abc de la Acústica Arquitectónica. Editorial CEAC S.A. Ediciones, Barcelona.
- Arenas, J.P. (1997). Control de Ruido en Edificios. Apuntes del Curso, Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias de la Ingeniería.
- ASTM E90-90 (1990). Recommended Practice for laboratory measurement of airborne sound Transmission loss of building partitions, American Soc. For Testing Materials, 1916 Race Street, Philadelphia, Pennsylvania, 19103.
- Barros, J.L. (2004). Apuntes del curso: Control de Ruido en Edificios, Instituto de Acústica, Universidad Austral de Chile.
- Beranek, L.L. (1971). Noise and vibration control, McGraw Hill , New York.
- Bies, D.A. & Hansen, C.H. (1988). Engineering Noise Control, Unwin Hyman, London.
- Bravo, J.M, Sinisterra, J., Uris, A., Llinares, J. & Estelles, H. (2002). Applied Acoustics, vol. 63, pp. 1051-1059.
- Brekke, A. (1981). Calculation methods for the Transmission Loss of Single, Double and Triple Partitions, Applied Acoustics, vol. 14 , pp. 225-240.
- Chaparro, J.P. (2003). Diseño de 5 Módulos interactivos para enseñar principios básicos de Acústica, Tesis, Universidad Austral de Chile, Instituto de Acústica.
- Cremer, L. (1942), Theorie der Schalldämmung dünner Wände bei schrägem Einfall. Akustische Zeitschrift 3(7), pp. 81-104.
- Crocker, M.J. & Arenas, J.P. (2007). Use of Absorbing Materials, en Handbook of Noise and Vibration Control, John Wiley and Sons, New York.
- Crocker, M.C & Price, J. (1969). Sound Transmission using Statistical Energy Analysis, Jour. Sound & Vib., vol. 9 (3), pp. 469-486.
- Delaney, M.E. & Bazley, E.N. (1970). Acoustical properties of fibrous absorbent materials, Applied Acoustics, Vol. 3, pp. 105-116.
- Donato, R.J. (1972). Sound Transmission through a Double Leaf Wall. Journal of Acoustical Society of America, vol. 57, pp. 33-57.
- Escuder, E.M., (2005). Estudio del comportamiento acústico de estructuras multicapa mediante NAH. Tesis Doctoral, Universidad Politecnica de Valencia, Departamento de Física Aplicada.
- Fahy, F.J. (2003). Foundations of Engineering Acoustics, Academic Press, Second Printing.

- Fringuellino, M. & Guglielmono, C. (2000). Progressive Impedance Method for the classical Analysis of Acoustic Transmission Loss in multilayered Walls. *Applied Acoustics*, vol. 59, pp. 275-285.
- Gerges, S.N.Y. & Arenas, J.P. (2004). *Fundamentos y Control del Ruido y Vibraciones*, NR Editora, Florianópolis.
- Iwashige, H. & Ohta, M. (1981). A practical Method of Estimating Sound Transmission Loss of Double Walls – A proposal and Its Application to the Popular Case of Light Panels and Air Gap, *Acustica*, vol. 48, pp. 97-101.
- Jones, R.E. (1976). How To Accurately Predict the Sound of Partitions, *Sound & Vibration*, vol. 10, pp. 14-25.
- London, A. (1950). Transmission of Reverberant Sound through Double Walls. *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 20, pp. 270-57.
- Lyon, R.H. (1967), Typed lecture notes from Bolt, Beranek & Newman program for advanced study, “Aerospace Noise and Vibration”, Los Angeles, 1967, Chap. IX.
- Maidanik, G. (1962), Response of Ribbed Panels to Reverberant Acoustic Fields, *Journ. Acoustical Society of America* 34, pp. 809-826.
- Ohta, M., Iwashige, H. & Nakasako, N. (1986) A New Evaluation Method on Sound Transmission Loss of General N-fold Wall by Use of a Modified Statistical Energy Analysis Method. *Acustica*, vol. 61, pp. 105-115.
- Pagliarini, G. & Pompoli, R. (1983). Airborne Sound Insulation Index of Double Walls: Application of two simplified Methods for estimating Transmission Loss. *Acustica*, vol. 52, pp. 296-299.
- Price, A.J. & Crocker, M.J. (1970). Sound Transmission through Double Panels Using Statistical Energy Analysis. *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 47. pp. 683-693.
- Sewell, E. C. (1970). Two-Dimensional Solution For Transmission Loss of Reverberant Sound Through a Double Partition. *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 12. pp. 33-57.
- Sharp, B.H. (1973). A study of techniques to increase the sound insulation of building elements, Wyle Laboratory Report No. WR 73-5 (1973).
- Sharp, B.H. (1978). Prediction Methods for the sound Transmission of Building Elements, *Noise Control Engineering*, Sept/ Oct.
- Smith, P.W. & Lyon, R.H. (1965), *Sound & Structural Vibration*, NASA CR-160, March.

Uris, A., Llopis, A. & Llinares, J. (1999). Effect of the rockwool bulk density on the airborne sound insulation of lightweight double walls, *Applied Acoustics*, vol. 58, pp. 327-331.

***En internet:***

<http://www.isover.net/asesoria/manuales/edificacion.htm> 10/Nov/2006

<http://www.volcan.cl/productos/index.html> 30/Enero/2007

[http://www.volcan.cl/documentos\\_tecnicos/fichas/aislanglass/ficha\\_general.pdf](http://www.volcan.cl/documentos_tecnicos/fichas/aislanglass/ficha_general.pdf)  
30/Enero/2007

<http://www.fi.uba.ar/materias/6731/Tablas/Tabla6.pdf> 30/Enero/2007

[http://www.hispalyt.es/noticias.asp?id\\_cat=209](http://www.hispalyt.es/noticias.asp?id_cat=209) 30/Enero/2007

<http://es.wikipedia.org/wiki/Resonancia> 01/Dic/2006

[http://www.labc.usb.ve/EC4514/AUDIO/ACUSTICA\\_ARQUITECTONICA](http://www.labc.usb.ve/EC4514/AUDIO/ACUSTICA_ARQUITECTONICA)  
16/Enero/2007

<http://ciks.cbt.nist.gov/~garboz/hydrate04/node4.htm> 30/Enero/2007

<http://newton.javeriana.edu.co/articulos/cifra/Desvia> 31/Enero/2007

<http://www.stockssite.com/pf/st/seriesdetiempo1.html> 31/Enero/2007

[www.tdx.cesca.es/TESIS\\_UPC/AVAILABLE/TDX-0317105-174201//11Ojc11de12.pdf](http://www.tdx.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-0317105-174201//11Ojc11de12.pdf)  
21/Feb/2007

[http://bochica.udea.edu.co/~bcalderon/3\\_propiedadesestimadores.html](http://bochica.udea.edu.co/~bcalderon/3_propiedadesestimadores.html) 31/Enero/2007

<http://www.monografias.com/trabajos11/veref/veref.shtml> 20/Feb/2007

## 11. Agradecimientos

*El día que este trabajo sea impreso sé que alguien será muy feliz. Quiero agradecer a mi Papá por incentivar la pasión por las matemáticas y la física, por exigirme los tiempos que no logré respetar y por criticarme la búsqueda de la perfección onírica. Agradecerle también, junto con mi hermano, a buscar la calidad en los equipos de audio, el haberme enseñado sobre música, e incentivar a cultivarla como hobby.*

*Agradezco a la Kuky y a la Yaya, por las enseñanzas en relaciones públicas y humanas, por apoyarme aún sin entender y confiar tanto en mí, por la independencia que me legaste, Kuky, y por despertarme para exámenes, Yayi.*

*Pauli, gracias por tu preocupación y por todos los años de disciplina. No sería quien soy si no fuera por ti.*

*A toda mi familia, gracias por la unión en los momentos difíciles y el apoyo incondicional, sin los cuales no podría estar titulándome.*

*En especial, quiero dar las gracias a Manuel C., por las largas conversaciones sobre la vida, las tesis y por encaminarme cuando necesito un guía. Por animarme cuando voy cayendo.*

*Agadezco a mis amigos por hacer más grato el paso por la Universidad y nunca haber encontrado una competitividad excesiva, sino compañerismo. En especial a Cristóbal por estar siempre ahí, a la Rose por haberme acompañado en momentos difíciles y haber emprendido juntas el camino al ser profesional, a Carolina por ayudarme a pensar como ingeniero y finalmente a Cristina por preservar mi locura.*

*A Gabriel, por motivarme a trabajar hasta tarde, distraerme y apoyarme, cuando fuera necesario.*

*Agradecimientos en especial a Antonio Moreno, del CSIC de Madrid España, por su preocupación y gran labor en esta tesis al conseguirme Mediciones. A Jesús Alba Fernández de la Universidad Politécnica de Valencia y Marecla Riquelme, alumna de la Universidad de Chile, por aportar información y ayuda a distancia.*

*Finalmente, quiero agradecer al Instituto de Acústica y a la Escuela, en especial a Jorge Sommerhoff y Jorge Arenas, por ayudarnos a pensar en grande y lograr emprendimiento. A Víctor Cumián, por ser tan servicial, ameno y contagiar sonrisas.*

## 12. Apéndice

### 12.1 Apéndice 4.2.1.4: Correcciones al método ley de masa del método de Jones considerando transmisión estructural.

#### a) Transmisión por uniones estructurales:

Sobre  $f_B$  el TL es controlado por conexiones. Ya que sobre esta frecuencia, la respuesta es paralela a la Ley de Masa, una forma conveniente de expresar el TL es en términos de una corrección  $\Delta TL_W$ , es decir el aumento de TL sobre la Ley de Masa basado en la masa superficial total de los paneles.

Para conexiones puntuales (para un solo panel):

$$\Delta TL_{Wp} = 20 \log(e f_c) - 61 \quad (dB) \quad , \text{ si } m_1 = m_2 \quad (A 4.2.1.4.1)$$

Para conexiones lineales:

$$\Delta TL_{Wl} = 10 \log(b f_c) - 29 \quad (dB) \quad m_1 = m_2 \quad (A 4.2.1.4.2)$$

$e$  : espaciamiento conexiones punto,  $ft$

$e^2$ : área asociada a cada unión punto,  $ft^2$

$b$ : separación lineal de cada conexión línea,  $ft$

$f_c$ : frecuencia crítica del panel soportado por conexión punto, o, en el caso de la conexión línea, la frecuencia más alta de las dos.

Se debe reconocer, de todas formas, que ecuaciones (A 4.2.1.4.1) y (A 4.2.1.4.2) no consideran efectos de coincidencia en ninguno de los dos paneles, por lo tanto, el agregarle la cantidad de  $\Delta TL_W$  al modelo, de forma de obtener la pérdida de transmisión total, ésta será válida sólo hasta  $0,5f_c$  del panel soportado.

#### b) Filtraciones de la partición y puentes:

Las filtraciones de aerotransmisión y los puentes de origen estructural reducen el desempeño del panel doble, aunque se puede utilizar algún tipo de sellado para evitar esto.

Una expresión aproximada para el  $TL$  promediado de una pared con aberturas de varias áreas totales, se puede obtener como:

$$TL_{av} = 10 \log \left( \frac{S}{\tau_1 S_1 + \tau_2 S_2} \right) \quad (\text{A 4.2.1.4.3})$$

con:

$S$ : área total de la partición que consiste de  $S_1$  y  $S_2$ .

$$\tau_{1,2} = 10^{-\left( \frac{TL_{1,2}}{10} \right)} \quad (\text{A 4.2.1.4.4})$$

donde  $TL_1$  y  $TL_2$  corresponden a  $S_1$  y  $S_2$ , respectivamente;  $\tau=1$  para una fisura.

Existe una condición límite para el  $TL$  promediado de una pared dada, la cual depende de la relación del área de la fisura del área de la partición.

La relación es aproximada, pues toda la geometría, como se relaciona con la longitud de onda del sonido, también será éste un factor. Por lo tanto, la longitud y absorción de la abertura también proporcionarán información importante.

Además de las fisuras, la transmisión por puentes de sonido tampoco ha estado incluida en el diseño de una partición y pueden afectar adversamente el desempeño de una pared doble. Una primera aproximación para esto puede darse a través de las ecuaciones (A 4.3.1.4.1) y (A 4.3.1.4.2) para conexiones lineales y puntuales. Por otra parte, el acoplamiento del perímetro en los bordes sobre la primera y última placa dará un resultado que podrá ser conservativo, porque las placas están adjuntas a otras partes de la estructura.

**c) Transmisión por flancos:**

$TL_{flank}$  y  $TL_{part}$  pueden ser considerados como 2 fuentes de sonido energético en el recinto receptor que otorga el campo de  $TL$  o  $TL_{field}$ , como la suma logarítmica de los niveles de presión sonora debido a ambas fuentes.

Si se conoce  $TL_{flank} - TL_{part}$ , entonces:

$$TL_{flank} - TL_{field} = 10 \log \left( 1 + 10^{\frac{(TL_{flank} - TL_{part})}{10}} \right) \quad (\text{A 4.2.1.4.5})$$

$$TL_{field} - TL_{flank} = 10 \log \left( 1 + 10^{\frac{-(TL_{flank} - TL_{part})}{10}} \right) \quad (\text{A 4.2.1.4.6})$$

Por supuesto, cualquier transmisión por un flanco extenso puede ser seria y es un problema separado.

**d) Efectos del Medio:**

Existen también factores del medio basados en la geometría del recinto y absorción que influyen la respuesta del  $TL$ . Pero esto es un problema que amerita un estudio específico del sistema que se quiere estudiar.

**12.2 Apéndice 4.2.1.5 Coordenadas de importancia en el Modelo Ley de Masa corregido de Sharp**

Como ya se definió en el capítulo 4.2.1.5, existen para lograr este método cuatro frecuencias de transición:  $f_0$ ,  $f_p$ ,  $f_{C1}$  y  $0.5f_{C2}$ . Cada una de estas frecuencias debe formar el correspondiente par ordenado  $(f_i, TL_i)$ .

Para estos efectos, los pares ordenados que quedan por evaluar son aquellos que se encuentran en el punto B y C, es decir falta conocer el  $TL$  correspondiente a  $0.5f_{C1}$  y  $f_{C2}$ , es decir,  $TL_B$  y  $TL_C$ , respectivamente.

De (Sharp, 1973), se tiene que:

$$TL_{B1} = TL_A + 20 \cdot \log \left( \frac{f_{C1}}{f_0} \right) - 6 \quad (dB) \quad (\text{A 4.2.1.5.1})$$

donde:

$$TL_A = 20 \cdot \log \left( (m_1 + m_2) f_0 \right) - 48 \quad (dB);$$

$$TL_{B2} = 10 \cdot \log \left( \left( m_1^2 \cdot b \cdot f_{C2}^3 \right) \cdot \left( 1 + \frac{m_2 \sqrt{f_{C1}}}{m_1 \sqrt{f_{C2}}} \right)^2 \right) - 77 \quad (dB) \quad (\text{A 4.2.1.5.2})$$

De esta forma,  $TL_B$  corresponderá al mayor valor entre  $TL_{B1}$  y  $TL_{B2}$ .

Para encontrar el valor de  $TL_C$ , en cambio, es necesario diferenciar si las paredes son iguales o diferentes, de modo que:

Si los paneles son iguales,  $f_{C1} = f_{C2}$ , entonces:

$$TL_C = TL_B + 6 + 10 \cdot \log(\eta_2) + 5 \cdot \log(\eta_1) \quad (dB) \quad (A\ 4.2.1.5.3)$$

Mientras que para paneles diferentes,

$$TL_C = TL_B + 6 + 10 \cdot \log(\eta_2) \quad (dB) \quad (A\ 4.2.1.5.4)$$

donde  $\eta_{1,2}$  se refieren al factor de pérdidas del panel 1 y 2, respectivamente.

### 12.3 Apéndice 4.2.3.1 Método SEA utilizado por Price & Crocker (1970) para el aislamiento acústico de paredes dobles.

#### a) Para transmisión resonante:

Si un grupo de osciladores es acoplado linealmente, el flujo de potencia de un sistema a otro será directamente proporcional a la diferencia de energías modales del sistema, es decir:

$$\prod_{ab} = \phi_{ab} (\langle E_a \rangle - \langle E_b \rangle), \quad (A\ 4.2.3.1.1)$$

donde la constante de proporcionalidad  $\phi_{ab}$  es el factor de acoplamiento, que se determina al definir el elemento de acoplamiento.

Utilizando luego expresiones de Lyon & Scharon (1965): Si la excitación externa es uniforme sobre la banda de frecuencia de interés y las respuestas estructurales son dominadas por las de modos resonantes, entonces la potencia disipada y transmitida se puede expresar en términos apropiados de disipación y factores de pérdidas por acoplamiento:

$$\Pi_j^{diss} = \omega \eta_j E_j \quad (A\ 4.2.3.1.2)$$

$$\Pi_{j,j+1} = \omega \eta_{j,j+1} n_j \left[ \frac{E_j}{n_j} - \frac{E_{j+1}}{n_{j+1}} \right], \quad (A\ 4.2.3.1.3)$$

donde:

$n_j$  = densidad modal del  $j^\circ$  elemento.

$\omega$  = frecuencia radial de vibración.

Como  $\Pi_{j+1,j} = -\Pi_{j,j+1}$ , de la ecuación (A 4.2.3.1.3), se obtiene que:

$$n_j \eta_{j,j+1} = n_{j+1} \eta_{j+1,j} \quad (\text{A 4.2.3.1.4})$$

Luego, se considera un apartado de transmisión en el cual un par de recintos reverberantes aislados estructuralmente son conectados acústicamente por un par de paneles paralelos. Las ecuaciones de balance de potencia serán:

$$\Pi_1 in = \Pi_1 diss + \Pi_{12} + \Pi_{13} \quad (\text{A 4.2.3.1.5})$$

$$\Pi_2 in = \Pi_2 diss - \Pi_{12} + \Pi_{23} \quad (\text{A 4.2.3.1.6})$$

$$\Pi_3 in = \Pi_3 diss - \Pi_{13} - \Pi_{23} + \Pi_{34} + \Pi_{35} \quad (\text{A 4.2.3.1.7})$$

$$\Pi_4 in = \Pi_4 diss - \Pi_{34} + \Pi_{45} \quad (\text{A 4.2.3.1.8})$$

$$\Pi_5 in = \Pi_5 diss - \Pi_{35} - \Pi_{45} \quad (\text{A 4.2.3.1.9})$$

Finalmente, como para evaluar la pérdida de transmisión de un sistema se emite sonido sólo desde el recinto emisor (sistema 1), no habrá potencia de entrada desde los sistemas 2, 3, 4 y 5, es decir :

$$\Pi_2 in = \Pi_3 in = \Pi_4 in = \Pi_5 in = 0.$$

Luego, utilizando la ecuación (A 4.2.3.1.1) y siguiendo Lyon & Scharton (1965) (ecuaciones (A 4.2.3.1.3) y (A 4.2.3.1.4)), se obtiene la relación de la energía entre el sistema 1 (recinto emisor) y el sistema 5 (recinto receptor):

$$\frac{E_1}{E_5} = \frac{\left\{ \left( \eta_{5t} + \frac{\eta_{54}\eta_{35}}{\eta_{34}} \right) \left[ \frac{\eta_{4t}}{\eta_{34}} \left( \eta_{3t} - \frac{\eta_{23}\eta_{32}}{\eta_{2t}} \right) - \eta_{43} \right] - \left( \eta_{45} + \frac{\eta_{4t}\eta_{35}}{\eta_{34}} \right) \left[ \frac{\eta_{54}}{\eta_{34}} \left( \eta_{3t} - \frac{\eta_{32}\eta_{23}}{\eta_{2t}} \right) + \eta_{53} \right] \right\}}{\left[ \left( \eta_{45} + \frac{\eta_{4t}\eta_{35}}{\eta_{34}} \right) \left( \eta_{13} + \frac{\eta_{12}\eta_{23}}{\eta_{2t}} \right) \right]} \quad (\text{A 4.2.3.1.10})$$

donde:

$$\eta_{2t} = \eta_2 + \eta_{21} + \eta_{23} \quad (\text{A 4.2.3.1.11})$$

$$\eta_{3t} = \eta_3 + \eta_{31} + \eta_{32} + \eta_{34} + \eta_{35} \quad (\text{A 4.2.3.1.12})$$

$$\eta_{4t} = \eta_4 + \eta_{43} + \eta_{45} \quad (\text{A 4.2.3.1.13})$$

$$\eta_{5t} = \eta_5 + \eta_{53} + \eta_{54} \quad (\text{A 4.2.3.1.14})$$

La pérdida de transmisión ( $TL$ ) de la pared doble y la ecuación (A 4.2.3.1.10) están relacionadas de la siguiente forma:

$$TL = NR + 10 \log \left( \frac{AcT_5}{24V_5 \ln(10)} \right) \quad (dB) \quad (\text{A 4.2.3.1.15})$$

donde:

$$NR = 10 \log \left( \frac{E_1}{E_5} \right) - 10 \log \left( \frac{V_1}{V_5} \right) \quad (dB). \quad (\text{A 4.2.3.1.16})$$

**b) Para transmisión no resonante:**

Considerando las ecuaciones de flujo de potencia para los sistemas 3 y 5 (ecuaciones (A 4.3.3.1.7) y (A 4.3.3.1.9)) y despreciando la transmisión resonante se tiene:

$$\prod_3 in = \prod_3 diss - \prod_3 13 + \prod_3 35 = 0 \quad (\text{A 4.2.3.1.17})$$

$$\prod_5 in = \prod_5 diss - \prod_5 35 = 0 \quad (\text{A 4.2.3.1.18})$$

De la misma forma, utilizando la ecuación (A 4.2.3.1.1) y de Lyon & Scharton (1965) (ecuaciones (A 4.2.3.1.2) y (A 4.2.3.1.3)), se tiene que la pérdida de transmisión para modos no resonantes es:

$$\frac{E_1}{E_5} = \frac{1}{\eta_{13}} \cdot \left( \frac{\eta_{5t}^* \eta_{3t}^*}{\eta_{35}} - \eta_{53} \right) \quad (\text{A 4.2.3.1.19})$$

donde:

$$\eta_{5t}^* = \eta_5 + \eta_{53} \quad (\text{A 4.2.3.1.20a})$$

$$\eta_{3t}^* = \eta_3 + \eta_{31} + \eta_{35} \quad (\text{A 4.2.3.1.20b})$$

#### 12.4 Apéndice 4.2.3.2 *Evaluación de Parámetros del Modelo de Price & Crocker (1969)*

En el proceso de evaluación de parámetros del trabajo de Price & Crocker, se divide el cálculo de densidad modal de un panel en alta y baja frecuencia, pues en baja frecuencia se debe asumir la condición de bordes sujetos del panel, mientras en alta frecuencia la influencia de esta condición no es de mayor importancia. Los factores de pérdida de radiación se obtendrán a partir de las resistencias de radiación e interna y las densidades modales. Dependiendo de si la banda de frecuencia a tratar está sobre o bajo la frecuencia crítica o de coincidencia, se asumirá que el panel radiará en un semiespacio (sólo modos “superficiales”) o un cuarto de espacio (se desprecian los modos “de esquina”), respectivamente (Maidanik, 1962; Smith & Lyon, 1965; Lyon, 1967). Para la resistencia de radiación de una placa se utilizan expresiones de radiación en un semiespacio para casos sobre, bajo o en la misma frecuencia crítica, descritas por Maidanik (1962), mientras que los factores de pérdida resonantes se obtienen a través de las expresiones de TL de la ley de Masa y su evaluación.

La densidad modal de un panel simplemente soportado (en alta frecuencia) es:

$$n_p(\omega) = \frac{\sqrt{3}A}{2\pi hc_L} \text{ modos/(rad / seg}^{-1}\text{)} \quad (\text{A 4.2.3.2.1})$$

Como el modelo analítico supone que los bordes del panel están sujetos, la ecuación (A 4.2.3.2.1) es válida ante cualquier condición de borde en alta frecuencia. Para baja frecuencia, las condiciones de borde cambian la densidad modal.

La densidad modal de un recinto es:

$$n_R(\omega) = \frac{V\omega^2}{2\pi^2 c^3} \text{ modos/(rad / seg}^{-1}\text{)} \quad (\text{A 4.2.3.2.2})$$

Los factores de pérdidas por acoplamiento son obtenidos a partir de la resistencia de radiación apropiada y de la siguiente ecuación:

$$\eta_{ij}n_i = \eta_{ji}n_j \quad (\text{A 4.2.3.2.3})$$

Por otro lado, los factores de pérdidas por acoplamiento de los paneles con los recintos adyacentes, están dados por:

$$\eta_{21} = R_2^{rad} / \omega M_2 \quad (\text{A 4.2.3.2.4})$$

$$\eta_{45} = R_4^{rad} / \omega M_4.$$

Los factores de pérdidas por acoplamiento de la cavidad son diferentes cuando la frecuencia está sobre o bajo la frecuencia crítica (dependiendo si el panel radia sobre un semi o cuarto de espacio, respectivamente): Existen 3 clasificaciones de modos, siendo éstos: modos "de esquina", "de borde" y "superficiales".

Los modos resonantes bajo  $f_c$  (acústicamente lentos, es decir,  $c_m \langle c \Rightarrow k_m \rangle k_a$ ) se subdividen en modos "de esquina" (sobre los límites del panel) y modos "de borde". Los modos "de borde" son radiadores mucho más eficientes que los modos "de esquina", cuya radiación finalmente se desprecia. Por lo tanto, bajo  $f_c$ , se asume que toda la radiación debida a modos resonantes es por modos "de borde" y, por lo tanto, radian en un cuarto de espacio.

Así, los factores de acoplamiento de los paneles en la cavidad son:

$$\eta_{23} = 2R_2^{rad} / \omega M_2 \quad \omega \langle \omega_c \quad (\text{A 4.2.3.2.5})$$

$$\eta_{43} = 2R_4^{rad} / \omega M_4 \quad \omega \langle \omega_c$$

Los modos resonantes sobre  $f_c$  son acústicamente rápidos, ( $c_m \langle c_a \Rightarrow k_m \langle k_a$ ). Estos modos, radiadores muy eficientes, son llamados modos "de superficie", porque no hay cancelación de velocidad de volumen y radían desde toda su área de superficie. Por esto, se asume que sobre  $f_c$  el panel radia en aproximadamente todo el espacio. Los factores de pérdida por acoplamiento son:

$$\eta_{23} = R_2^{rad} / \omega M_2 \quad \omega \rangle \omega_c \quad (\text{A 4.2.3.2.6})$$

$$\eta_{43} = R_4^{rad} / \omega M_4 \quad \omega \rangle \omega_c$$

La resistencia de radiación de una placa simplemente soportada (Maidanik, 1962),

es:

$$R_{\frac{1}{2}space}^{rad} = A\rho c \left[ \left( \lambda_c \lambda_a / A \right) 2 \left( f / f_c \right) g_1 + \left( P \lambda_c / A \right) g_2 \right] \quad f \langle f_c$$

$$R_{\frac{1}{2}space}^{rad} = A\rho c \left[ \left( l_1 / \lambda_c \right)^{1/2} + \left( l_3 / \lambda_c \right)^{1/2} \right] \quad f = f_c \quad (\text{A 4.2.3.2.7})$$

$$R_{\frac{1}{2}space}^{rad} = A\rho c \left[ 1 - f_c / f \right]^{-1/2} \quad f \rangle f_c$$

donde:

$$g_1 = \frac{\left( 4 / \pi^4 \right) (1 - 2\alpha^2)}{\alpha (1 - \alpha^2)^{1/2}}$$

$$g_2 = (2\pi)^{-2} \frac{\left\{ (1 - \alpha^2) \ln \left[ \frac{(1 + \alpha)}{(1 - \alpha)} \right] + 2\alpha \right\}}{(1 - \alpha^2)^{3/2}}$$

$$\alpha = \left( \frac{f}{f_c} \right)^{1/2}$$

Los factores de pérdida de acoplamiento, no resonantes, recinto-cavidad pueden ser obtenidos a través de los valores de la ley de masa:

$$10 \log \eta_{13} = -TL_2 + 10 \log \left( \frac{A_2 c}{4V_1 \omega} \right) \quad (\text{A 4.2.3.2.8})$$

$$10 \log \eta_{53} = -TL_4 + 10 \log \left( \frac{A_4 c}{4V_5 \omega} \right) \quad (\text{A 4.2.3.2.9})$$

Se debe tener presente que bajo  $f_c$ , si  $k_m^2 \langle 2k_a^2$ ,  $k_m^2 \langle 2k_a^2$ , los modos resonantes son todos los modos “de borde” y no hay modos “de esquina” presentes. Esta condición es:

$$k_m^2 \langle 2k_a^2 \Rightarrow \left( \frac{\omega}{c_m} \right)^2 \langle \left( \frac{\omega}{c} \right)^2$$

$$c_m^2 \rangle \frac{1}{2} c^2$$

$$\omega \kappa c_L \rangle \frac{1}{2} c^2$$

Pero  $f_c$  ocurre cuando  $c_m = c$ , por lo tanto si  $\omega_c \rangle \omega \rangle \frac{1}{2} \omega_c$ , entonces todos los modos son modos “de borde”.

En baja frecuencia, en cambio, sólo existen modos “de esquina”. Las condiciones, por lo tanto, para modos “de esquina” son:

$$k_a \langle \frac{\pi}{l_1}, k_a \langle \frac{\pi}{l_3} \Rightarrow \frac{\omega}{c} \langle \frac{\pi}{l_1}, \frac{\omega}{c} \langle \frac{\pi}{l_3} \Rightarrow f \langle \frac{c}{2l_1}, f \langle \frac{c}{2l_3}.$$

También se debe notar que  $\eta_{31}$  y  $\eta_{35}$  están dadas por:

$$\eta_{31} = \eta_{13} \cdot \frac{n_1}{n_3}$$

(A 4.2.3.2.10)

$$\eta_{35} = \eta_{53} \cdot \frac{n_5}{n_3}$$

*Densidad Modal de la cavidad y factor de pérdidas.*

Como el ancho de la cavidad,  $l_2$ , es muy pequeño en comparación a las otras dimensiones, es absolutamente incorrecto utilizar la ecuación de densidad modal de recinto, ecuación (A 4.2.3.2.2) para baja frecuencia. Para hacer una buena aproximación, se puede utilizar en baja frecuencia la siguiente ecuación:

$$n_3(\omega) = \frac{A\omega}{2\pi c^2} \quad f \langle \frac{c}{2 \cdot l_2}$$

(A 4.2.3.2.11)

$$n_3(\omega) = \frac{V_3 \omega^2}{2\pi^2 c^3} \quad f \rangle \frac{c}{(2 \cdot l_2)}$$

Para el factor de pérdida en la cavidad, se puede utilizar la siguiente aproximación:

$$\eta_3 = \frac{S \cdot c \cdot \alpha_0}{4V_3 \omega} \omega \omega_d \quad (\text{A 4.2.3.2.12})$$

$$\eta_3 = \frac{S \cdot c \cdot \alpha_0}{6V_3 \omega} \omega \omega_d$$

con  $\omega_d$  : primer modo de frecuencia cruzada.

### 12.5 Apéndice 4.2.2.1 *Cálculo de las frecuencias cercanas a la resonancia para el Método de Iwashige & Ohta (1981)*

Existen muchas formas de encontrar las frecuencias cercanas a las resonancias con las cuales se trabaja, pero se presenta el siguiente método para encontrarlas:

a) En la frecuencia de resonancia  $f_{rm}$ , la onda incidente es perfectamente transmitida. Cada panel actúa como masa pura y la reactancia de la masa del panel es exactamente igual a la reactancia de rigidez del espaciamiento de aire. Es por esto, que la frecuencia  $f_{rm}$  se expresa en función del ángulo de incidencia  $\theta$ , donde  $\rho$  es la densidad del aire y  $c$  es la velocidad del sonido en el aire, como se muestra a continuación:

$$f_{rm} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(m_1 + m_2) \rho c^2}{m_1 m_2 d \cos \theta}} \quad (\text{Hz}) \quad (\text{A 4.2.2.1.1})$$

Cuando se escoge a  $\sqrt{2} \cdot f_{rm}$  como  $f'_{rm}$  utilizando  $\theta=0^\circ$ , la pérdida de transmisión teórica de incidencia normal de la pared doble coincide con el valor de la pérdida de transmisión de una pared simple, con masa superficial total igual a la suma de las masas de ambos paneles. Esta relación entre  $f'_{rm}$  y  $f_{rm}$  se mantiene para la pérdida de transmisión práctica de incidencia aleatoria, en el rango de una pérdida de transmisión pequeña. Bajo

este punto de vista, parece entonces razonable seleccionar a  $f'_{rm}$  como el punto de separación límite inferior de la línea de pérdida de transmisión.

b) En el punto de separación límite superior en la zona de alta frecuencia, es también razonable seleccionar el punto de separación  $f'_{rd(n)}$  cerca de la frecuencia de resonancia  $f_{rd(n)}$ , donde la onda incidente se transmite completamente en la forma de una onda estacionaria en el espaciamiento de aire. El valor aproximado de  $f'_{rd(n)}$ , puede ser escrito como:

$$f'_{rd(n)} \hat{=} \left(\frac{n}{2}\right) \cdot \left(\frac{c}{d}\right) \cong f'_{rd(n)} \cong f_{rd(n)} \cdot \left(1 + \frac{1}{2\pi n}\right) \quad (\text{Hz}) \quad (\text{A 4.2.2.1.2})$$

con  $n=1,2,\dots$

Como la  $n$ -ésima longitud de onda resonante  $\lambda_{rd(n)}$  puede ser escrita como  $\lambda_{rd(n)}=2d/n$ , la condición  $\lambda \ll d$  no se satisface en el caso de frecuencias altas cuando  $n=1$ , por lo cual si se utiliza un  $n$  superior, la condición puede ser cumplida con cierta tolerancia, pues se satisface completamente si  $n=\infty$ .

## 12.6 Apéndice 5.2 Programas utilizados

### Apéndice 5.2.1 Módulo datos

#### datos.m

```
n=input('ingrese el número de modos, n=');
L1=input('ingrese la dimension mayor de la superficie de los paneles, L1=');
L3=input('ingrese la siguiente dimension de la superficie de los paneles, L3=');
d=input('ingrese el espesor de la cavidad, d=');
M1=input('ingrese la densidad volumetrica del panel 1, M1=');
M2=input('ingrese la densidad volumetrica del panel 2, M2=');
h2=input('ingrese el espesor del panel 1, h2=');
h4=input('ingrese el espesor del panel 2, h4=');
E2=input('ingrese el modulo de young del panel 1, E2=');
E4=input('ingrese el modulo de young del panel 2, E4=');
et2=input('ingrese el factor de pérdida del panel 1, et2=');
et4=input('ingrese el factor de pérdida del panel 2, et4=');
poa2=input('ingrese el coeficiente de poisson del panel 1, poa2=');
poa4=input('ingrese el coeficiente de poisson del panel 2, poa4=');
alfa0=input('ingrese el coeficiente de absorción medio de la cavidad, alfa0=');
alfa_cav=input('ingrese el coeficiente de absorción (vector de 1 x 16),
alfa_cav=');
TLmed=input('ingrese los valores medidos de TL (vector de 1 x 16), TLmed=');

f=[125,160,200,250,315,400,500,630,800,1000,1250,1600,2000,2500,3150,4000];

[TLs,Ef_TL,ModSTC,DaToS]=paredesDOB(L1,L3,d,alfa0,M1,h2,E2,poa2,et2,M2,h4,E4,poa4,et4,f,alfa_cav,n,TLmed)
```

```
TLs
Ef_TL
ModSTC
DaToS
```

## Apéndice 5.2.2 Módulo paredesDOB

### paredesDOB.m

```
function
[TLs,Ef_TL,ModSTC,DaToS]=paredesDOB(L1,L3,d,alfao,M1,h2,E2,poa2,et2,M2,h4,...
E4,poa4,et4,f,alfa_cav,n,TLmed)

% Para realizar una tabla de los datos ingresados:
DaToS={'n','L1','L3','d','M2','h2','E2','poa2','et2','M4','h4','E4',...
'poa4','et4','alfa0','-','-';n,L1,L3,d,M1,h2,E2,poa2,et2,M2,h4,E4,...
poa4,et4,alfao','-','-';'frec',f(1),f(2),f(3),f(4),f(5),f(6),f(7),...
f(8),f(9),f(10),f(11),f(12),f(13),f(14),f(15),f(16);'Alfa_cav(f)',...
alfa_cav(1),alfa_cav(2),alfa_cav(3),alfa_cav(4),alfa_cav(5),...
alfa_cav(6),alfa_cav(7),alfa_cav(8),alfa_cav(9),alfa_cav(10),...
alfa_cav(11),alfa_cav(12),alfa_cav(13),alfa_cav(14),alfa_cav(15),...
alfa_cav(16);'TLmed',TLmed(1),TLmed(2),TLmed(3),TLmed(4),...
TLmed(5),TLmed(6),TLmed(7),TLmed(8),TLmed(9),TLmed(10),...
TLmed(11),TLmed(12),TLmed(13),TLmed(14),TLmed(15),TLmed(16)};

%Calcula los STC's de cada uno de los métodos utilizados y luego
%los errores cuadrático-medio de cada uno:

TL=brek(L1,L3,d,alfao,M1,h2,E2,poa2,et2,M2,h4,E4,poa4,et4,f,alfa_cav);
TLB=TL;
[Stc,b,c,Ref]=STC(TL)
STCB=Stc;
[ECM,Ef_TL,desvia]=ERR(f,TL,TLmed)
desviaB=desvia;
ECM_B=ECM;
Ef_TLB=Ef_TL;

TL=frigu(M1,M2,h2,h4,d,f);
TLF=TL;
[Stc,b,c,Ref]=STC(TL);
STCF=Stc;
[ECM,Ef_TL,desvia]=ERR(f,TL,TLmed)
desviaF=desvia;
ECM_F=ECM;
Ef_TLF=Ef_TL;

[TLu,TLd]=iwoh(M1,M2,h2,h4,d,n,f);
TLI=TLu;
TLO=TLd;
TL=TLu;
```

```

[Stc,b,c,Ref]=STC(TL)
STCI=Stc;
[ECM,Ef_TL,desvia]=ERR(f,TL,TLmed)
desviaI=desvia;
ECM_I=ECM;
Ef_TLI=Ef_TL;
TL=TLd;
[Stc,b,c,Ref]=STC(TL)
STCO=Stc;
[ECM,Ef_TL,desvia]=ERR(f,TL,TLmed)
desviaO=desvia;
ECM_O=ECM;
Ef_TLO=Ef_TL;

TL=jone(M1,M2,h2,h4,d,f);
TLJ=TL;
[Stc,b,c,Ref]=STC(TL);
STCJ=Stc;
[ECM,Ef_TL,desvia]=ERR(f,TL,TLmed)
desviaJ=desvia;
ECM_J=ECM;
Ef_TLJ=Ef_TL;

TL=LMna(M1,M2,h2,h4,d,f);
TLMN=TL;
[Stc,b,c,Ref]=STC(TL);
STCMN=Stc;
[ECM,Ef_TL,desvia]=ERR(f,TL,TLmed)
desviaMN=desvia;
ECM_MN=ECM;
Ef_TLMN=Ef_TL;

TL=LMDif(M1,M2,h2,h4,d,f);
TLMD=TL;
[Stc,b,c,Ref]=STC(TL);
STCLD=Stc;
[ECM,Ef_TL,desvia]=ERR(f,TL,TLmed)
desviaMD=desvia;
ECM_MD=ECM;
Ef_TLMD=Ef_TL;

TL=sharp(L1,L3,M1,M2,h2,h4,d,et2,et4,E2,E4,poa2,poa4,f,a1fao);
TLSH=TL;
[Stc,b,c,Ref]=STC(TL);
STCSH=Stc;
[ECM,Ef_TL,desvia]=ERR(f,TL,TLmed)
desviaSH=desvia;
ECM_SH=ECM;
Ef_TLSH=Ef_TL;

```

```

TL=TLmed;
[Stc,b,c,Ref]=STC(TL)
StC=Stc;
Ref;

TLs={'Modelo',f(1),f(2),f(3),f(4),f(5),f(6),f(7),f(8),f(9),f(10),...
f(11),f(12),f(13),f(14),f(15),f(16);'Brekke',TLB(1),TLB(2),TLB(3),...
TLB(4),TLB(5),TLB(6),TLB(7),TLB(8),TLB(9),TLB(10),TLB(11),TLB(12),...
TLB(13),TLB(14),TLB(15),TLB(16);'Fringug',TLF(1),TLF(2),TLF(3),...
TLF(4),TLF(5),TLF(6),TLF(7),TLF(8),TLF(9),TLF(10),TLF(11),TLF(12),...
TLF(13),TLF(14),TLF(15),TLF(16);'IO-up',TLI(1),TLI(2),TLI(3),...
TLI(4),TLI(5),TLI(6),TLI(7),TLI(8),TLI(9),TLI(10),TLI(11),TLI(12),...
TLI(13),TLI(14),TLI(15),TLI(16);'IO-do',TLO(1),TLO(2),TLO(3),...
TLO(4),TLO(5),TLO(6),TLO(7),TLO(8),TLO(9),TLO(10),TLO(11),...
TLO(12),TLO(13),TLO(14),TLO(15),TLO(16);'Jones',TLJ(1),TLJ(2),...
TLJ(3),TLJ(4),TLJ(5),TLJ(6),TLJ(7),TLJ(8),TLJ(9),TLJ(10),...
TLJ(11),TLJ(12),TLJ(13),TLJ(14),TLJ(15),TLJ(16);'Masa Nor',...
TLMN(1),TLMN(2),TLMN(3),TLMN(4),TLMN(5),TLMN(6),TLMN(7),...
TLMN(8),TLMN(9),TLMN(10),TLMN(11),TLMN(12),TLMN(13),TLMN(14),...
TLMN(15),TLMN(16);'Masa dif',TLMD(1),TLMD(2),TLMD(3),TLMD(4),...
TLMD(5),TLMD(6),TLMD(7),TLMD(8),TLMD(9),TLMD(10),TLMD(11),...
TLMD(12),TLMD(13),TLMD(14),TLMD(15),TLMD(16);'Sharp',TLSH(1),...
TLSH(2),TLSH(3),TLSH(4),TLSH(5),TLSH(6),TLSH(7),TLSH(8),TLSH(9),...
TLSH(10),TLSH(11),TLSH(12),TLSH(13),TLSH(14),TLSH(15),TLSH(16);...
'Medido',TLmed(1),TLmed(2),TLmed(3),TLmed(4),TLmed(5),TLmed(6),...
TLmed(7),TLmed(8),TLmed(9),TLmed(10),TLmed(11),TLmed(12),...
TLmed(13),TLmed(14),TLmed(15),TLmed(16)};

%Tabla de error por frecuencia
%(se debe escribir el titulo de cada fila)

Ef_TL=[f;Ef_TLB;Ef_TLF;Ef_TLI;Ef_TLO;Ef_TLJ;Ef_TLMN;Ef_TLMD;Ef_TLSH];

ECMs=[ECM_B,ECM_F,ECM_I,ECM_O,ECM_J,ECM_MN,ECM_MD,ECM_SH,0];
STCs=[STCB,STCF,STCI,STCO,STCJ,STCMN,STCLD,STCSH,StC];

%Para calcular el error del STC
[Est]=ERRstc(STCs,StC);

%Tabla de Modelo versus STC, ECms, Est
ModSTC={'Modelo','Brekke','Fringug','IO-up','IO-do','Jones',...
'Masa nor','Masa dif','Sharp','Medición';...
'STC',STCB,STCF,STCI,STCO,STCJ,STCMN,STCLD,STCSH,StC;...
'E_STC',Est(1),Est(2),Est(3),Est(4),Est(5),Est(6),Est(7),Est(8),...
Est(9);'Ecm',ECM_B,ECM_F,ECM_I,ECM_O,ECM_J,ECM_MN,ECM_MD,ECM_SH,0;...
'desvia',desviaB,desviaF,desviaI,desviaO,desviaJ,...
desviaMN,desviaMD,desviaSH,0};

```

%entrega las gráficas correspondientes:

```
hold on
semilogx(f,Ref,'k-');
semilogx(f,TLmed,'ko');
semilogx(f,TLB,'b^-');
semilogx(f,TLF,'gp-');
semilogx(f,TLI,'m*-');
semilogx(f,TLO,'m*-');
semilogx(f,TLJ,'rd-');
semilogx(f,TLMN,'c<-');
semilogx(f,TLMD,'b+-');
semilogx(f,TLSH,'r*-');
title(['TLS de una pared doble de STC = ',StC])
xlabel('Frecuencia, (Hz)')
ylabel('Comparación de Pérdidas de Transmisión')
%grid
hold off
```

## Apéndice 5.2.3 Módulos de los diferentes Algoritmos

### Apéndice 5.2.3.1 Módulo brek

#### brek.m

```
function TL=brek(L1,L3,d,alfa0,M1,h2,E2,poa2,et2,M2,h4,E4,poa4,et4,f,alfa_cav)
m2=M1;
m4=M2;

Ap=L1*L3;
ro=1.185;
c=340;
p=2*(L1+L3);

%%panel 2
B2=(E2*h2^3)/12;
c12=sqrt(E2/(m2*(1-poa2^2)));
fc2=((c^2)/(1.8*h2*c12));
loc2=c/fc2;
wc2=2*pi*fc2;

%%panel 4
B4=(E4*h4^3)/12;
c14=sqrt(E4/(m4*(1-poa4^2)));
fc4=((c^2)/(1.8*h4*c14));
loc4=c/fc4;
wc4=2*pi*fc4;

fo=(1/2*pi)*sqrt((ro*c^2)*(m2*h2+m4*h4)/(m2*m4*h2*h4*d));
fl=c/(2*d)

for i=1:16
ff=f(i);
alfa0=alfa_cav(i);

[TL2i,TL4i,R2radi,TLi,fc] =
simpl(m2,m4,fc2,fc4,fo,fl,d,L1,L3,et2,et4,alfa0,alfa0,Ap,h2,h4,ro,c,...
loc2,loc4,wc2,wc4,p,ff)
```

```

ff;
TL2(i)=TL2i;
TL4(i)=TL4i;
R2rad(i)=R2radi;
TL(i)=TLi;
fc;
end;
TL2;
TL4;
R2rad;
TL;

```

## simpl.m

```

function [TL2i,TL4i,R2radi,TLi,fc] =
simpl(m2,m4,fc2,fc4,fo,fl,d,L1,L3,et2,et4,alfa0,alfao,Ap,h2,h4,ro,c,...
loc2,loc4,wc2,wc4,p,ff)

w=2*pi*ff;
lo=c/ff;
fc=fc2

TL2a=20*log10(m2*h2*ff)-42;
TL2i=TL2a-10*log10(0.23*TL2a);
TL4a=20*log10(m4*h4*ff)-42;
TL4i=TL4a-10*log10(0.23*TL4a);

%panel 2
alfa2=(ff/fc2)^(1/2);
g1=(4/(pi^4))*((1-(2*alfa2^2))/(alfa2*(1-alfa2^2)^(1/2)));
g2=(1/(4*pi^2))*((1-alfa2^2)*log((1+alfa2)/(1-alfa2))+2*alfa2)*...
(1/(1-alfa2^2)^(3/2));

if ff < fc2
    if ff/fc2 < 0.5
        R2radi=ro*c*(loc2*lo*2*(alfa2^2)*g1+p*loc2*g2);
    else
        R2radi=ro*c*p*loc2*g2;
    end
elseif ff > fc2
    R2radi=Ap*ro*c*1/sqrt(1-alfa2^2)
elseif ff==fc2
    R2radi=Ap*ro*c*(sqrt(L1/loc2)+sqrt(L3/loc2));
end

%panel 4
alfa4=(ff/fc4)^(1/2);
g1=(4/(pi^4))*((1-(2*alfa4^2))/(alfa4*(1-alfa4^2)^(1/2)));
g2=(1/(4*pi^2))*((1-alfa4^2)*log((1+alfa4)/(1-alfa4))+2*alfa4)*...
(1/(1-alfa4^2)^(3/2));

if ff < fc4
    if ff/fc4 < 0.5
        R4radi=ro*c*(loc4*lo*2*(alfa4^2)*g1+p*loc4*g2);
    else
        R4radi=ro*c*p*loc4*g2;
    end
elseif ff > fc4
    R4radi=Ap*ro*c*1/sqrt(1-alfa4^2)
elseif ff==fc2
    R4radi=Ap*ro*c*(sqrt(L1/loc2)+sqrt(L3/loc2));
end

%Factores de pérdida por acople de paneles a la cavidad
if w<=wc2
    et23=2*R2radi/(w*m2*Ap*h2);
elseif w>wc2
    et23=1*R2radi/(w*m2*Ap*h2);
end
et23;

```

```

if w<=wc4
    et43=2*R4radi/(w*m4*Ap*h4);
else
    et43=R4radi/(w*m4*Ap*h4);
end
et43;

%Factores de pérdida por acople de paneles a las habitaciones
et21=R2radi/(w*m2*Ap*h2);
et45=R4radi/(w*m4*Ap*h4);

sig21i=et21*w*m2*h2/(ro*c);
sig23i=et23*w*m2*h2/(ro*c);
sig43i=et43*w*m4*h4/(ro*c);
sig45i=et45*w*m4*h4/(ro*c);

%Para calcular TL
    if ff<=fc
        if ff<fo/2 %& ff<f1
            TLR=20*log10((m2*h2+m4*h4)*ff)-42;
            TLi=TLR-10*log10(0.23*TLR)
        else
            TLi=TL2i+TL4i+10*log10(alfa0*d*(L1+L3)*(L1*L3))+3;
        end
    else
        TLi=10*log10((m2*m4*h2*h4)^2*(ff^5)*alfa0*(L1+L3)*et2*et4/(fc2*fc4*Ap*...
c*sig21i*sig23i*sig43i*sig45i))-35
    end

```

### Apéndice 5.2.3.2 Módulo frigu

#### frigu.m

```

function TL=frigu(M1,M2,h2,h4,d,f)

syms th real

ro=1.18;
co=340;
m1=M1*h2;
m2=M2*h4;

for a=1:16
ff=f(a)
w=2*pi*ff
k=(w/co)

TLth = @(th) (abs((((ro.*co.*cos(th)+(i.*w.*m2.*cos(th)+ro.*co.*...
coth(i.*k.*d.*cos(th)+(acoth((i.*w.*m1+(ro.*co./cos(th)).*...
cos(th))./(ro.*co))))).*cos(th).*cosh(i.*k.*d.*cos(th)+...
(acoth((i.*w.*m1+(ro.*co./cos(th)).*cos(th))./(ro.*co))))).*...
(i.*w.*cos(th)+ro.*co))./(2*ro.*co.*cos(th)).*...
coth(i.*k.*d.*cos(th)+(acoth((i.*w.*m1+(ro.*co./cos(th)).*cos(th))./ ...
(ro.*co))))).*cosh(acoth((i.*w.*m1+(ro.*co./cos(th)).*cos(th))./(ro.*co)))).* ...
ro.*co)).^2).*cos(th).*sin(th);

DIV=@(th) sin(th).*cos(th);

A=quad(TLth,0,1.361);
B=quad(DIV,0,1.361);
TL(a)=10*log10(A/B)

end

```

### Apéndice 5.2.3.3 Módulo iwoh

#### iwoh.m

```
function [TLu,TLd]=iwoh(M1,M2,h2,h4,d,n,f)

%Calcula el TL aproximado de Iwashige Ohta
%Metodo aplicable para paneles cuya densidad de masa es menor que 10kg/m^2
%Sin material absorbente en la cavidad, ni puentes vibratorios ni montajes
%resilientes, no considera coincidencia

m1=M1*h2;
m2=M2*h4;

%fma esta cercana a la resonancia de los paneles, donde comienza el rango
%de validez de esta propuesta
fma=(sqrt(2)/(2*pi))*sqrt(((m1+m2)*1.18*(340)^2)/(d*m1*m2))
TLfma=10*log10(1+((m1+m2)*pi*fma/(1.18*340))^2)-
10*log10(0.23*10*log10(1+((m1+m2)*pi*fma/(1.18*340))^2))

%fda esta cercana a la frecuencia critica del n° modo del panel, donde n
%deberia ser un numero mayor que 1 para que lambda sea mucho mayor que
%d, ojala n sea infinito
fda=340*n/(2*d)
TLfda1=10*log10(1+(m1*pi*fda/(1.18*340))^2)-
10*log10(0.23*10*log10(1+(m1*pi*fda/(1.18*340))^2));
TLfda2=10*log10(1+(m2*pi*fda/(1.18*340))^2)-
10*log10(0.23*10*log10(1+(m2*pi*fda/(1.18*340))^2));
TLfda=TLfda1+TLfda2

%TLfdd se utiliza para calcular la distancia entre TLa y TLb en fma, de
%modo de establecer el punto para generar la linea recta paralela a TLb y
%asi generar el rango de validez
TLfdd1=10*log10(1+(m1*pi*fma/(1.18*340))^2)-
10*log10(0.23*10*log10(1+(m1*pi*fma/(1.18*340))^2));
TLfdd2=10*log10(1+(m2*pi*fma/(1.18*340))^2)-
10*log10(0.23*10*log10(1+(m2*pi*fma/(1.18*340))^2));
TLfdd=TLfdd1+TLfdd2
dist=TLfdd-TLfma
TLline2=TLfda-dist
TLo=10*log10(1+((m1+m2)*pi*f/(1.18*340)).^2);
TLa=TLo-10*log10(0.23*TLo)
TLo1=10*log10(1+(m1*pi*f/(1.18*340)).^2);
TLa1=TLo1-10*log10(0.23*TLo1)
TLo2=10*log10(1+(m2*pi*f/(1.18*340)).^2);
TLa2=TLo2-10*log10(0.23*TLo2)
TLb=TLa1+TLa2
x1=[fma fda];
y1=[TLfma TLfda];
x2=[fma fda];
y2=[TLfma TLline2];

for i=1:16
    if f(i)<=fma
        TLu(i)=TLa(i)
        TLd(i)=TLa(i)
    else
        TLu(i)=log(f(i)/fma)*((TLfda-TLfma)/log(fda/fma))+TLfma
        TLd(i)=log(f(i)/fma)*((TLline2-TLfma)/log(fda/fma))+TLfma
    end
end
TLu
TLd
```

### Apéndice 5.2.3.4 Módulo jone

#### jone.m

```
function TL=jone(M1,M2,h2,h4,d,f)
m1=M1*h2;
m2=M2*h4;

%TL1 y TL2, son los TL de paneles 1 y 2, respectivamente.
for a=1:16
TL1(a)=20*log10(m1*f(a))+20*log10(2*pi/(3.61*1.18*340));
TL2(a)=20*log10(m2*f(a))+20*log10(2*pi/(3.61*1.18*340));
end

%fo es la frecuencia de resonancia del sistema
%fl es la frecuencia de corte
fo=(1/(2*pi))*((3.61*1.18*340*340/(2*d))*((m1+m2)/(m1*m2)))^(1/2)
fl=(340/(2*pi*d))

for a=1:16
if f(a)<fo
TL(a)=20*log10(f(a)*(m1+m2))+20*log10(2*pi/(3.61*1.18*340));
elseif f(a)>fo & f(a)<fl
TL(a)=TL1(a)+TL2(a)+20*log10(f(a)*d)+20*log10(4*pi/340);
else
TL(a)=TL1(a)+TL2(a)+6;
end
end
```

### Apéndice 5.2.3.5 Módulo LMna

#### LMna.m

```
function TL=LMna(M1,M2,h2,h4,d,f)

%Calcula el TL de la Ley de Masa incidencia normal, pero utiliza sólo
%paneles iguales.

m1=M1*h2;
m2=M2*h4;

m=(m1*m2)/(m1+m2);

c=340;
r=1.18;
w=2*pi*f;

fo=(1/(2*pi))*sqrt(2*r*(c^2)/(d*m))
fd=2*c/(pi*d)

for i=1:16
ff=f(i)
if ff<=fo
TLa(i)=20*log10(1+(2*m*pi*ff/(r*c)));
elseif ff>fo & ff<fd
TLa(i)=20*log10(1+(2*m*pi*ff/(r*c)))+ 40*log10(ff/fo);
else %if f(i)>fd
TLa(i)=40*log10(1+(2*m*pi*ff/(r*c)))+6;
end
TLa
end
TL=TLa
```

### Apéndice 5.2.3.6 Módulo LMdif

#### LMdif.m

```
function TL=LMdif(M1,M2,h2,h4,d,f)

%Calcula La Ley de masa incidencia normal para paneles de diferente masa
%superficial.

m1=M1*h2;
m2=M2*h4;

d=0.1;
c=340;
r=1.18;
w=2*pi*f;

%fo es la frecuencia de resonancia, mientras fd es la frecuencia límite
%dada por el espesor de la cavidad.
fo=(1/(2*pi))*sqrt(2*r*(c^2)/(d*m1))
fd=2*c/(pi*d)
TLfo=20*log10(1+((m1+m2)/m1*m2)*pi*fo/(r*c))
TLfd=20*log10(1+(m1*pi*fd/(r*c)))+20*log10(1+(m2*pi*fd/(r*c)))+6

for i=1:16
    ff=f(i)
    if ff<=fo
        TLa(i)=20*log10(1+(m1+m2)*pi*ff/(r*c));
    elseif ff>fo & ff<fd
        TLa(i)=log10(ff/fo)*((TLfd-TLfo)/log10(fd/fo))+TLfo;
    else %if f(i)>fd
        TLa(i)=20*log10(1+(m1*pi*ff/(r*c)))+20*log10(1+(m2*pi*ff/(r*c)))+6;
    end
    TLa
end
TL=TLa
```

### Apéndice 5.2.3.7 Módulo sharp

#### sharp.m

```
function TL=sharp(L1,L3,M1,M2,h2,h4,d,et2,et4,E2,E4,poa2,poa4,f,alfao)

%Para unión tipo línea-línea, bb representa la dimensión menor de la superficie
%del panel

bb=L3;

m2=M1*h2;
m4=M2*h4;
ro=1.18;
c=340;
rce=1.41;
Po=101.3*10^3

%para calcular luego frecuencias críticas de los paneles
B2=(E2*h2^3)/12;
c12=sqrt(E2/(M1*(1-poa2^2)));
B4=(E4*h4^3)/12;
c14=sqrt(E4/(M2*(1-poa4^2)));

%frecuencias importantes (abcisas)?
fo=(1/(2*pi))*sqrt((1.8*rce*Po)*(m2+m4)/(m2*m4*d))
fc2=((c^2)/(1.8*h2*c12))
fc4=((c^2)/(1.8*h4*c14))
if fc2<=fc4
    fc1=fc2;
    fc3=fc4;
    m1=m2;
    m3=m4;
else
```

```

        fc1=fc4
        fc3=fc2;
        m1=m4;
        m3=m2;
    end
    fl=c/(2*pi*d);
    [f2,TLf2]= fdos(m1,m3,d,bb,fc1,fc3,fo,L1,c);
    f2

%coordenadas importantes

    TLA=20*log10((m1+m3)*fo)-48;
    TLB1=TLA+20*log10(fc1/fo)-6;
    TLB2=10*log10((m1^2)*bb*(fc3^3)*(1+(m3*fc1^(1/2)/(m1*fc3^(1/2))))^2)-77;
    TLf2
    if TLB1>TLB2
        TLB=TLB1
    else
        TLB=TLB2
    end
    if abs(fc1-fc3)<0.5
        TLC=TLB+6+10*log10(et4)+5*log10(et2);
    else
        TLC=TLB+6+10*log10(et4);
    end

    for i=1:16
        ff=f(i)
        TL1=20*log10(m1*ff)-48;
        TL2=20*log10(m3*ff)-48;
        if ff<=fo
            TLM(i)=20*log10((m2+m4)*ff)-48;
        elseif ff>fo & ff<=f2
            TLM(i)=TL1+TL2+20*log10(ff*d)-29;
        elseif ff>f2 & ff<=0.5*fc1
            %el +4dB es porque sólo está amortiguado en los bordes, por lo cual
            %el area asociada con cada soporte es menor a la mitad a la asumida
            %en la teoria
            TLM(i)=10*log10((m1^2)*fc3*bb*(ff*(1+(m3*fc1^(1/2)/...
            (m1*fc3^(1/2))))^2)-77+4;
        elseif ff>(0.5*fc1) & ff<fc3
            TLM(i)=log10(ff/(0.5*fc1))*((TLC-TLB)/log10(fc3/...
            (0.5*fc1)))+TLB;
        else
            TLM(i)=50*log10((1/fc3)*10^(TLC/50)*ff);
        end
    end
    TLM
end

TL=TLM

```

## fdos.m

```

function [f2,TLf2]= fdos(m1,m3,d,bb,fc1,fc3,fo,L1,c)

syms f real

TLz=@(f) 20*log10(m1*f)-48+20*log10(m3*f)-48+20*log10(f*d)-29;
TLv=@(f) 10*log10((m1^2)*fc3*bb*(f*(1+(m3*fc1^(1/2)/...
(m1*fc3^(1/2))))^2)-77+4;
val=@(f) 20*log10(m1*f)-48+20*log10(m3*f)-48+20*log10(f*d)-29-...
(10*log10((m1^2)*fc3*bb*(f*(1+(m3*fc1^(1/2)/(m1*fc3^(1/2))))^2)-77+4);
f2=fzero(val,[fo,0.5*fc1])
TLf2=10*log10((m1^2)*fc3*bb*(f2*(1+(m3*fc1^(1/2)/(m1*fc3^(1/2))))^2)-77+4

```

## Apéndice 5.2.4 Módulos de Herramientas de análisis

### Apéndice 5.2.4.1 Módulo STC

#### STC.m

```
function [Stc,b,c,Ref]=STC(TL)
%funcion que entrega el sound transmission class STC de un vector TL en
%tercios de octava desde 125 - 4000 Hz . Ademas entrega el vector de
%diferencias bajo la curva y la suma de diferencias en todos los tercios de
%octava, para corroborar los resultados.

Ref=[55 58 61 64 67 70 71 72 73 74 75 75 75 75 75];
for k=1:75
    for i=1:16
        if TL(i)<Ref(i)
            b(i)=Ref(i)-TL(i);
        else
            b(i)=0;
        end
    end
end
c=b(1)+b(2)+b(3)+b(4)+b(5)+b(6)+b(7)+b(8)+b(9)+b(10)+b(11)+b(12)+b(13)+...
b(14)+b(15)+b(16);

if c>0 & c<32 & all(b)<8
    Stc=Ref(7)
    Ref
    TL
    break
else
    Stc=0;
    Ref=Ref-1;
end
end
```

### Apéndice 5.2.4.2 Módulo ERR

#### ERR.m

```
function [ECM,Ef_TL,desvia]=ERR(f,TL,TLmed)
%Para TL, calcula el porcentaje de error y el error cuadrático medio.

for i=1:16
    Ef_TL(i)=100*abs(TL(i)-TLmed(i))/TLmed(i);
    er(i)=(TL(i)-TLmed(i))^2;
    ECM=sqrt(sum(er(i))/16);
    desvia=sum(TL(i)-TLmed(i));
end
Ef_TL
ECM
desvia
```

### Apéndice 5.2.4.3 Módulo ERRstc

#### ERRstc.m

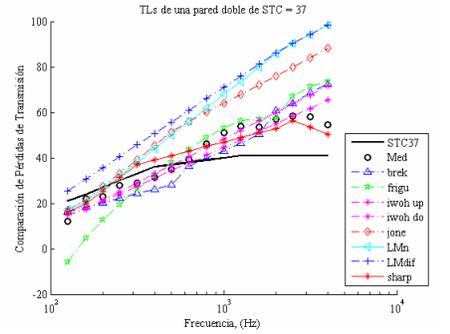
```
function [Est]=ERRstc(STCs,StC)
%Para TL, calcula el porcentaje de error del STC.

for i=1:9
    Est(i)=100*abs(STCs(i)-StC)/StC;
end
Est
```

## 12.7 Apéndice 6.1 Resultados de todos los Experimentos.

	<table border="1"> <thead> <tr> <th>'Mod'</th> <th>'brek'</th> <th>frigu</th> <th>iwoh up</th> <th>iwoh do</th> <th>jone</th> <th>LMn</th> <th>LMdif'</th> <th>sharp</th> <th>Med</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>'STC'</td> <td>16.00</td> <td>17.00</td> <td>19.00</td> <td>19.00</td> <td>19.00</td> <td>22.00</td> <td>28.00</td> <td>18.00</td> <td>20.00</td> </tr> <tr> <td>'E_STC'</td> <td>20.00</td> <td>15.00</td> <td>5.00</td> <td>5.00</td> <td>5.00</td> <td>10.00</td> <td>40.00</td> <td>10.00</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>'EcM'</td> <td>3.15</td> <td>4.61</td> <td>0.61</td> <td>0.02</td> <td>3.73</td> <td>6.42</td> <td>6.42</td> <td>2.31</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>'desvia'</td> <td>-12.59</td> <td>18.42</td> <td>2.43</td> <td>-0.10</td> <td>14.91</td> <td>25.68</td> <td>25.68</td> <td>9.23</td> <td>0.00</td> </tr> </tbody> </table>										'Mod'	'brek'	frigu	iwoh up	iwoh do	jone	LMn	LMdif'	sharp	Med	'STC'	16.00	17.00	19.00	19.00	19.00	22.00	28.00	18.00	20.00	'E_STC'	20.00	15.00	5.00	5.00	5.00	10.00	40.00	10.00	0.00	'EcM'	3.15	4.61	0.61	0.02	3.73	6.42	6.42	2.31	0.00	'desvia'	-12.59	18.42	2.43	-0.10	14.91	25.68	25.68	9.23	0.00										
'Mod'	'brek'	frigu	iwoh up	iwoh do	jone	LMn	LMdif'	sharp	Med																																																													
'STC'	16.00	17.00	19.00	19.00	19.00	22.00	28.00	18.00	20.00																																																													
'E_STC'	20.00	15.00	5.00	5.00	5.00	10.00	40.00	10.00	0.00																																																													
'EcM'	3.15	4.61	0.61	0.02	3.73	6.42	6.42	2.31	0.00																																																													
'desvia'	-12.59	18.42	2.43	-0.10	14.91	25.68	25.68	9.23	0.00																																																													
<i>STC, error STC, error cuadrático medio y sesgo Experimento 1</i>										<i>Curvas Experimento 1</i>																																																												
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>'Mod'</th> <th>'brek'</th> <th>frigu</th> <th>iwoh up</th> <th>iwoh do</th> <th>jone</th> <th>LMn</th> <th>LMdif'</th> <th>sharp</th> <th>Med</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>'STC'</td> <td>22.00</td> <td>18.00</td> <td>26.00</td> <td>25.00</td> <td>28.00</td> <td>29.00</td> <td>37.00</td> <td>27.00</td> <td>25.00</td> </tr> <tr> <td>'E_STC'</td> <td>12.00</td> <td>28.00</td> <td>4.00</td> <td>0.00</td> <td>12.00</td> <td>16.00</td> <td>48.00</td> <td>8.00</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>'EcM'</td> <td>1.52</td> <td>5.08</td> <td>2.18</td> <td>1.16</td> <td>5.87</td> <td>8.50</td> <td>8.50</td> <td>1.82</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>'desvia'</td> <td>-6.09</td> <td>20.33</td> <td>8.73</td> <td>4.62</td> <td>23.50</td> <td>33.99</td> <td>33.99</td> <td>7.30</td> <td>0.00</td> </tr> </tbody> </table>										'Mod'	'brek'	frigu	iwoh up	iwoh do	jone	LMn	LMdif'	sharp	Med	'STC'	22.00	18.00	26.00	25.00	28.00	29.00	37.00	27.00	25.00	'E_STC'	12.00	28.00	4.00	0.00	12.00	16.00	48.00	8.00	0.00	'EcM'	1.52	5.08	2.18	1.16	5.87	8.50	8.50	1.82	0.00	'desvia'	-6.09	20.33	8.73	4.62	23.50	33.99	33.99	7.30	0.00										
'Mod'	'brek'	frigu	iwoh up	iwoh do	jone	LMn	LMdif'	sharp	Med																																																													
'STC'	22.00	18.00	26.00	25.00	28.00	29.00	37.00	27.00	25.00																																																													
'E_STC'	12.00	28.00	4.00	0.00	12.00	16.00	48.00	8.00	0.00																																																													
'EcM'	1.52	5.08	2.18	1.16	5.87	8.50	8.50	1.82	0.00																																																													
'desvia'	-6.09	20.33	8.73	4.62	23.50	33.99	33.99	7.30	0.00																																																													
<i>STC, error STC, error cuadrático medio y sesgo Experimento 2</i>										<i>Curvas Experimento 2</i>																																																												
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>'Mod'</th> <th>'brek'</th> <th>frigu</th> <th>iwoh up</th> <th>iwoh do</th> <th>jone</th> <th>LMn</th> <th>LMdif'</th> <th>sharp</th> <th>Med</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>'STC'</td> <td>23.00</td> <td>21.00</td> <td>27.00</td> <td>27.00</td> <td>31.00</td> <td>32.00</td> <td>37.00</td> <td>30.00</td> <td>26.00</td> </tr> <tr> <td>'E_STC'</td> <td>11.54</td> <td>19.23</td> <td>3.85</td> <td>3.85</td> <td>19.23</td> <td>23.08</td> <td>42.31</td> <td>15.39</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>'EcM'</td> <td>1.11</td> <td>6.25</td> <td>4.12</td> <td>3.22</td> <td>7.75</td> <td>10.37</td> <td>10.37</td> <td>3.70</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>'desvia'</td> <td>4.42</td> <td>25.02</td> <td>16.48</td> <td>12.90</td> <td>31.00</td> <td>41.49</td> <td>41.49</td> <td>14.80</td> <td>0.00</td> </tr> </tbody> </table>										'Mod'	'brek'	frigu	iwoh up	iwoh do	jone	LMn	LMdif'	sharp	Med	'STC'	23.00	21.00	27.00	27.00	31.00	32.00	37.00	30.00	26.00	'E_STC'	11.54	19.23	3.85	3.85	19.23	23.08	42.31	15.39	0.00	'EcM'	1.11	6.25	4.12	3.22	7.75	10.37	10.37	3.70	0.00	'desvia'	4.42	25.02	16.48	12.90	31.00	41.49	41.49	14.80	0.00										
'Mod'	'brek'	frigu	iwoh up	iwoh do	jone	LMn	LMdif'	sharp	Med																																																													
'STC'	23.00	21.00	27.00	27.00	31.00	32.00	37.00	30.00	26.00																																																													
'E_STC'	11.54	19.23	3.85	3.85	19.23	23.08	42.31	15.39	0.00																																																													
'EcM'	1.11	6.25	4.12	3.22	7.75	10.37	10.37	3.70	0.00																																																													
'desvia'	4.42	25.02	16.48	12.90	31.00	41.49	41.49	14.80	0.00																																																													
<i>STC, error STC, error cuadrático medio y sesgo Experimento 3</i>										<i>Curvas Experimento 3</i>																																																												
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>'Mod'</th> <th>'brek'</th> <th>frigu</th> <th>iwoh up</th> <th>iwoh do</th> <th>jone</th> <th>LMn</th> <th>LMdif'</th> <th>sharp</th> <th>Med</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>'STC'</td> <td>31.00</td> <td>20.00</td> <td>34.00</td> <td>34.00</td> <td>39.00</td> <td>38.00</td> <td>52.00</td> <td>38.00</td> <td>31.00</td> </tr> <tr> <td>'E_STC'</td> <td>0.00</td> <td>35.48</td> <td>9.68</td> <td>9.68</td> <td>25.81</td> <td>22.58</td> <td>67.74</td> <td>22.58</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>'EcM'</td> <td>3.69</td> <td>3.48</td> <td>3.52</td> <td>1.83</td> <td>8.02</td> <td>10.20</td> <td>10.61</td> <td>1.51</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>'desvia'</td> <td>14.76</td> <td>13.90</td> <td>14.08</td> <td>7.31</td> <td>32.08</td> <td>40.80</td> <td>42.43</td> <td>-6.04</td> <td>0.00</td> </tr> </tbody> </table>										'Mod'	'brek'	frigu	iwoh up	iwoh do	jone	LMn	LMdif'	sharp	Med	'STC'	31.00	20.00	34.00	34.00	39.00	38.00	52.00	38.00	31.00	'E_STC'	0.00	35.48	9.68	9.68	25.81	22.58	67.74	22.58	0.00	'EcM'	3.69	3.48	3.52	1.83	8.02	10.20	10.61	1.51	0.00	'desvia'	14.76	13.90	14.08	7.31	32.08	40.80	42.43	-6.04	0.00										
'Mod'	'brek'	frigu	iwoh up	iwoh do	jone	LMn	LMdif'	sharp	Med																																																													
'STC'	31.00	20.00	34.00	34.00	39.00	38.00	52.00	38.00	31.00																																																													
'E_STC'	0.00	35.48	9.68	9.68	25.81	22.58	67.74	22.58	0.00																																																													
'EcM'	3.69	3.48	3.52	1.83	8.02	10.20	10.61	1.51	0.00																																																													
'desvia'	14.76	13.90	14.08	7.31	32.08	40.80	42.43	-6.04	0.00																																																													
<i>STC, error STC, error cuadrático medio y sesgo Experimento 4</i>										<i>Curvas Experimento 4</i>																																																												

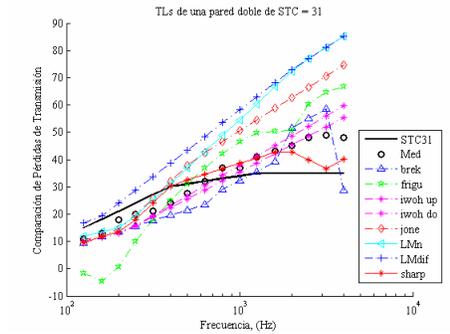
'Mod	'brek	frigu	iwoh up	iwoh do	jone	LMn	LMdif	sharp	Med
'STC'	32.00	27.00	37.00	36.00	44.00	43.00	52.00	41.00	37.00
'E_STC'	13.51	27.03	0.00	2.70	18.92	16.22	40.54	10.81	0.00
'EcM'	4.46	4.74	4.27	2.70	8.40	10.98	10.98	1.07	0.00
'desvia'	17.86	18.94	17.08	10.79	33.58	43.93	43.93	-4.27	0.00



STC, error STC, error cuadrático medio y sesgo Experimento 5

Curvas Experimento 5

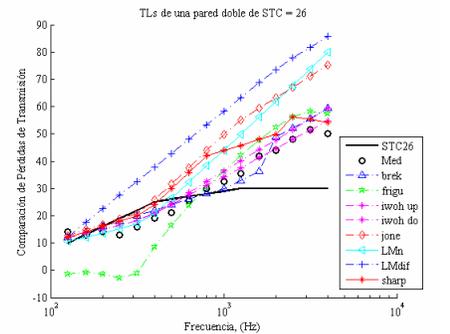
'Mod	'brek	frigu	iwoh up	iwoh do	jone	LMn	LMdif	sharp	Med
'STC'	25.00	20.00	29.00	28.00	32.00	33.00	40.00	31.00	31.00
'E_STC'	19.36	35.48	6.45	9.68	3.23	6.45	29.03	0.00	0.00
'EcM'	4.84	4.68	2.92	1.84	6.66	9.28	9.28	2.00	0.00
'desvia'	-19.37	18.71	11.69	7.37	26.66	37.10	37.10	-7.99	0.00



STC, error STC, error cuadrático medio y sesgo Experimento 6

Curvas Experimento 6

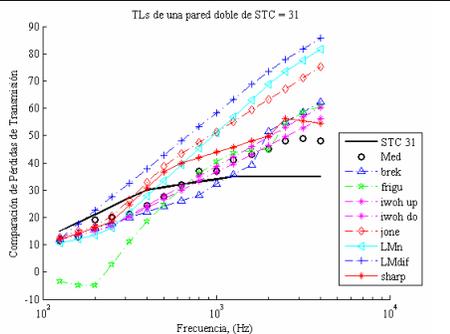
'Mod	'brek	frigu	iwoh up	iwoh do	jone	LMn	LMdif	sharp	Med
'STC'	26.00	13.00	28.00	28.00	32.00	28.00	38.00	30.00	26.00
'E_STC'	0.00	50.00	7.69	7.69	23.08	7.69	46.15	15.39	0.00
'EcM'	2.36	1.82	2.35	1.21	6.34	7.46	8.96	1.08	0.00
'desvia'	9.43	7.26	9.40	4.85	25.35	29.84	35.83	4.32	0.00



STC, error STC, error cuadrático medio y sesgo Experimento 7

Curvas Experimento 7

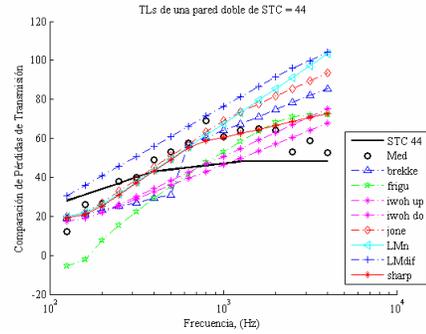
'Mod	'brek	frigu	iwoh up	iwoh do	jone	LMn	LMdif	sharp	Med
'STC'	27.00	16.00	30.00	29.00	34.00	30.00	38.00	33.00	31.00
'E_STC'	12.90	48.39	3.23	6.45	9.68	3.23	22.58	6.45	0.00
'EcM'	3.57	3.17	3.11	2.04	6.84	8.38	9.46	1.62	0.00
'desvia'	14.27	12.68	12.44	8.17	27.35	33.54	37.83	6.49	0.00



STC, error STC, error cuadrático medio y sesgo Experimento 8

Curvas Experimento 8

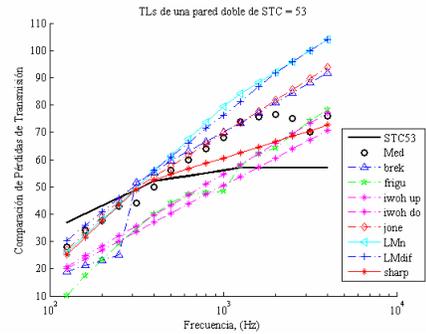
'Mod	'brek	frigu	iwoh up	iwoh do	jone	LMn	LMdif	sharp	Med
'STC'	34.00	23.00	38.00	37.00	44.00	43.00	57.00	43.00	44.00
'E_STC'	22.73	47.73	13.64	15.91	0.00	2.27	29.55	2.27	0.00
'EcM'	8.28	4.98	5.69	3.79	10.31	12.72	12.89	5.02	0.00
'desvia'	33.11	19.91	22.78	15.16	41.24	50.86	51.56	20.08	0.00



STC, error STC, error cuadrático medio y sesgo Experimento 9

Curvas Experimento 9

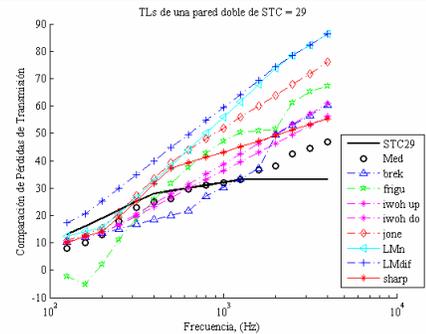
'Mod	'brek	frigu	iwoh up	iwoh do	jone	LMn	LMdif	sharp	Med
'STC'	39.00	39.00	43.00	42.00	55.00	54.00	57.00	53.00	53.00
'E_STC'	26.42	26.42	18.87	20.76	3.77	1.89	7.55	0.00	0.00
'EcM'	3.91	0.53	0.30	1.32	4.43	7.01	7.01	0.86	0.00
'desvia'	15.63	2.14	1.21	-5.28	17.74	28.06	28.06	-3.42	0.00



STC, error STC, error cuadrático medio y sesgo Experimento 10

Curvas Experimento 10

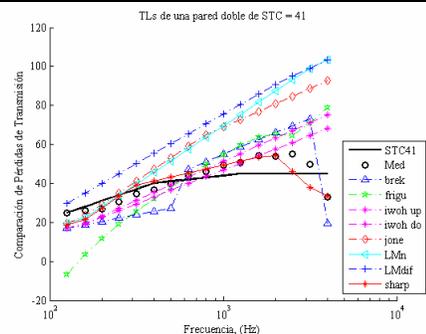
'Mod	'brek	frigu	iwoh up	iwoh do	jone	LMn	LMdif	sharp	Med
'STC'	26.00	20.00	29.00	29.00	33.00	34.00	41.00	32.00	29.00
'E_STC'	10.35	31.03	0.00	0.00	13.79	17.24	41.38	10.35	0.00
'EcM'	3.30	5.10	3.47	2.34	7.25	9.86	9.86	2.06	0.00
'desvia'	13.19	20.38	13.86	9.36	29.00	39.43	39.43	8.25	0.00



STC, error STC, error cuadrático medio y sesgo Experimento 11

Curvas Experimento 11

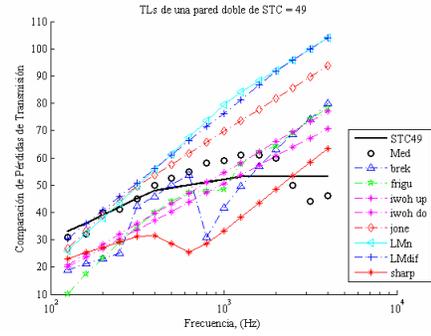
'Mod	'brek	frigu	iwoh up	iwoh do	jone	LMn	LMdif	sharp	Med
'STC'	31.00	26.00	39.00	38.00	46.00	45.00	56.00	40.00	41.00
'E_STC'	24.39	36.59	4.88	7.32	12.20	9.76	36.59	2.44	0.00
'EcM'	3.40	11.45	10.59	8.76	14.98	17.56	17.56	0.15	0.00
'desvia'	-13.60	45.80	42.35	35.03	59.93	70.25	70.25	0.61	0.00



STC, error STC, error cuadrático medio y sesgo Experimento 12

Curvas Experimento 12

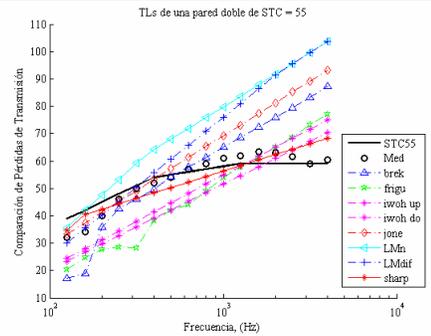
'Mod'	'brek'	frigu	iwoh up	iwoh do	jone	LMn	LMdif'	sharp	Med
'STC'	37.00	39.00	43.00	42.00	55.00	54.00	57.00	34.00	49.00
'E_STC'	24.49	20.41	12.25	14.29	12.25	10.20	16.33	30.61	0.00
'EcM'	8.50	8.04	7.80	6.18	11.94	14.52	14.52	4.37	0.00
'desvia'	33.98	32.14	31.22	24.72	47.75	58.07	58.07	17.48	0.00



STC, error STC, error cuadrático medio y sesgo Experimento 13

Curvas Experimento 13

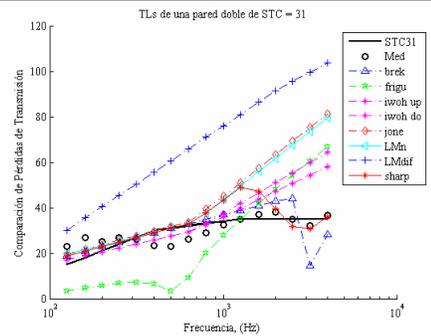
'Mod'	'brek'	frigu	iwoh up	iwoh do	jone	LMn	LMdif'	sharp	Med
'STC'	47.00	41.00	46.00	44.00	57.00	63.00	56.00	54.00	55.00
'E_STC'	14.55	25.46	16.36	20.00	3.64	14.55	1.82	1.82	0.00
'EcM'	6.67	4.18	3.65	2.45	8.21	10.79	10.79	1.97	0.00
'desvia'	26.70	16.73	14.61	9.78	32.83	43.15	43.15	7.88	0.00



STC, error STC, error cuadrático medio y sesgo Experimento 14

Curvas Experimento 14

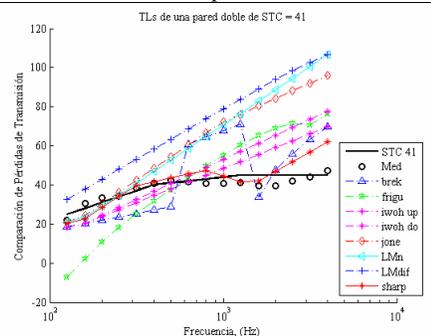
'Mod'	'brek'	frigu	iwoh up	iwoh do	jone	LMn	LMdif'	sharp	Med
'STC'	29.00	15.00	33.00	33.00	36.00	36.00	56.00	34.00	31.00
'E_STC'	6.45	51.61	6.45	6.45	16.13	16.13	80.65	9.68	0.00
'EcM'	1.97	7.55	6.99	5.41	11.22	10.78	16.79	0.10	0.00
'desvia'	-7.87	30.20	27.97	21.65	44.88	43.13	67.18	-0.41	0.00



STC, error STC, error cuadrático medio y sesgo Experimento 15

Curvas Experimento 15

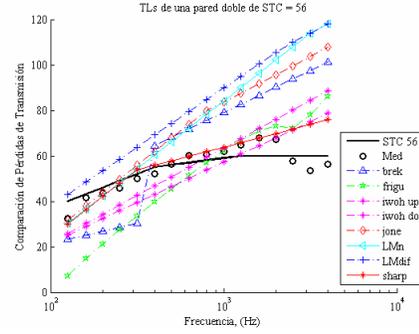
'Mod'	'brek'	frigu	iwoh up	iwoh do	jone	LMn	LMdif'	sharp	Med
'STC'	34.00	25.00	40.00	39.00	47.00	46.00	59.00	43.00	41.00
'E_STC'	17.07	39.02	2.44	4.88	14.63	12.20	43.90	4.88	0.00
'EcM'	5.60	7.23	7.59	5.59	12.22	14.80	14.80	3.67	0.00
'desvia'	22.41	28.91	30.34	22.35	48.87	59.18	59.18	14.68	0.00



STC, error STC, error cuadrático medio y sesgo Experimento 17

Curvas Experimento 17

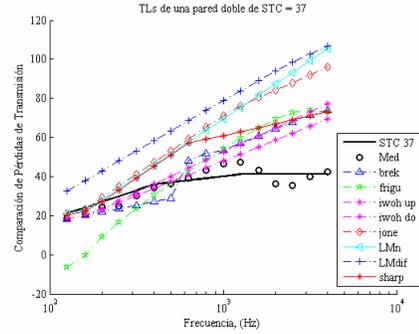
'Mod	'brek	frigu	iwoh up	iwoh do	jone	LMn	LMdif	sharp	Med
'STC'	43.00	37.00	50.00	47.00	60.00	58.00	69.00	58.00	56.00
'E_STC'	23.21	33.93	10.71	16.07	7.14	3.57	23.21	3.57	0.00
'EcM'	11.17	7.46	8.05	5.58	12.84	15.41	15.41	4.86	0.00
'desvia'	44.69	29.82	32.19	22.33	51.35	61.64	61.64	19.44	0.00



STC, error STC, error cuadrático medio y sesgo Experimento 18

Curvas Experimento 18

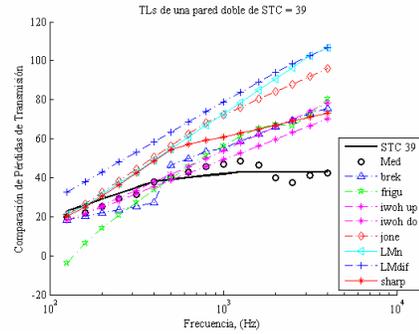
'Mod	'brek	frigu	iwoh up	iwoh do	jone	LMn	LMdif	sharp	Med
'STC'	35.00	24.00	40.00	39.00	46.00	45.00	59.00	44.00	37.00
'E_STC'	5.41	35.14	8.11	5.41	24.32	21.62	59.46	18.92	0.00
'EcM'	7.95	7.73	8.76	6.76	13.48	15.80	16.06	7.70	0.00
'desvia'	31.79	30.93	35.06	27.02	53.92	63.19	64.24	30.78	0.00



STC, error STC, error cuadrático medio y sesgo Experimento 19

Curvas Experimento 19

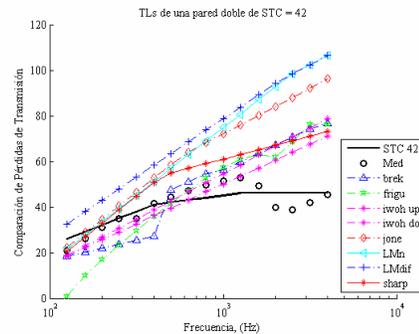
'Mod	'brek	frigu	iwoh up	iwoh do	jone	LMn	LMdif	sharp	Med
'STC'	36.00	28.00	41.00	40.00	48.00	47.00	59.00	47.00	39.00
'E_STC'	7.69	28.21	5.13	2.56	23.08	20.51	51.28	20.51	0.00
'EcM'	8.31	9.49	8.95	6.98	13.44	16.02	16.02	7.65	0.00
'desvia'	33.26	37.97	35.78	27.91	53.75	64.07	64.07	30.61	0.00



STC, error STC, error cuadrático medio y sesgo Experimento 20

Curvas Experimento 20

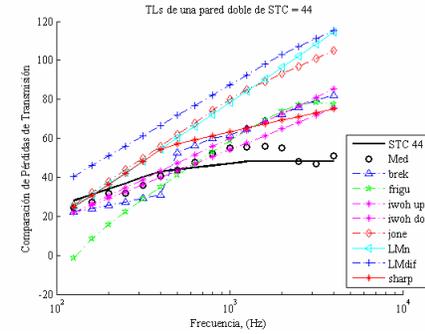
'Mod	'brek	frigu	iwoh up	iwoh do	jone	LMn	LMdif	sharp	Med
'STC'	36.00	32.00	42.00	41.00	50.00	49.00	59.00	49.00	42.00
'E_STC'	14.29	23.81	0.00	2.38	19.05	16.67	40.48	16.67	0.00
'EcM'	7.84	7.75	8.32	6.39	12.69	15.27	15.27	6.91	0.00
'desvia'	31.36	31.01	33.27	25.56	50.76	61.08	61.08	27.62	0.00



STC, error STC, error cuadrático medio y sesgo Experimento 21

Curvas Experimento 21

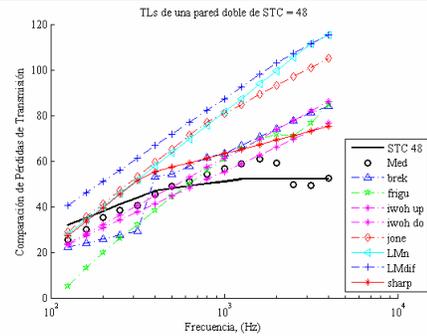
'Mod	'brek	frigu	iwoh up	iwoh do	jone	LMn	LMdif	sharp	Med
'STC'	40.00	30.00	46.00	44.00	54.00	53.00	67.00	52.00	44.00
'E_STC'	9.09	31.82	4.55	0.00	22.73	20.46	52.27	18.18	0.00
'EcM'	7.79	6.65	8.53	6.16	13.51	15.82	16.08	6.06	0.00
'desvia'	31.16	26.60	34.14	24.62	54.03	63.28	64.32	24.23	0.00



STC, error STC, error cuadrático medio y sesgo Experimento 22

Curvas Experimento 22

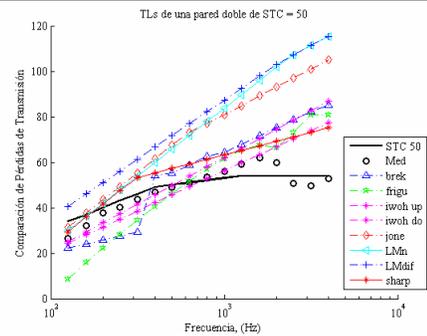
'Mod	'brek	frigu	iwoh up	iwoh do	jone	LMn	LMdif	sharp	Med
'STC'	42.00	35.00	48.00	45.00	57.00	56.00	67.00	55.00	48.00
'E_STC'	12.50	27.08	0.00	6.25	18.75	16.67	39.58	14.58	0.00
'EcM'	7.83	8.08	8.41	6.07	13.14	15.71	15.71	5.69	0.00
'desvia'	31.33	32.34	33.65	24.26	52.56	62.85	62.85	22.76	0.00



STC, error STC, error cuadrático medio y sesgo Experimento 23

Curvas Experimento 23

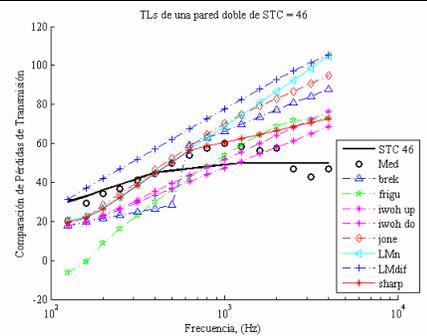
'Mod	'brek	frigu	iwoh up	iwoh do	jone	LMn	LMdif	sharp	Med
'STC'	42.00	38.00	49.00	46.00	59.00	58.00	67.00	57.00	50.00
'E_STC'	16.00	24.00	2.00	8.00	18.00	16.00	34.00	14.00	0.00
'EcM'	8.01	6.99	8.45	6.14	13.04	15.61	15.61	5.59	0.00
'desvia'	32.03	27.98	33.82	24.56	52.17	62.46	62.46	22.37	0.00



STC, error STC, error cuadrático medio y sesgo Experimento 24

Curvas Experimento 24

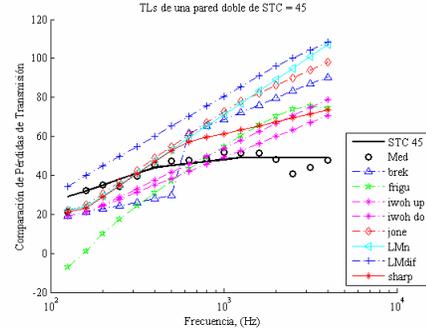
'Mod	'brek	frigu	iwoh up	iwoh do	jone	LMn	LMdif	sharp	Med
'STC'	34.00	24.00	39.00	38.00	45.00	44.00	58.00	44.00	46.00
'E_STC'	26.09	47.83	15.22	17.39	2.17	4.35	26.09	4.35	0.00
'EcM'	10.26	6.54	7.38	5.42	12.03	14.44	14.61	6.44	0.00
'desvia'	41.04	26.16	29.51	21.69	48.12	57.74	58.44	25.75	0.00



STC, error STC, error cuadrático medio y sesgo Experimento 25

Curvas Experimento 25

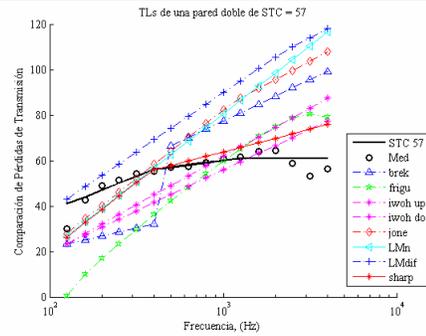
'Mod	'brek	frigu	iwoh up	iwoh do	jone	LMn	LMdif	sharp	Med
'STC'	36.00	24.00	41.00	40.00	47.00	46.00	61.00	46.00	45.00
'E_STC'	20.00	46.67	8.89	11.11	4.44	2.22	35.56	2.22	0.00
'EcM'	10.71	6.73	7.84	5.75	12.64	14.87	15.22	6.45	0.00
'desvia'	42.86	26.92	31.36	22.99	50.57	59.46	60.88	25.82	0.00



STC, error STC, error cuadrático medio y sesgo Experimento 26

Curvas Experimento 26

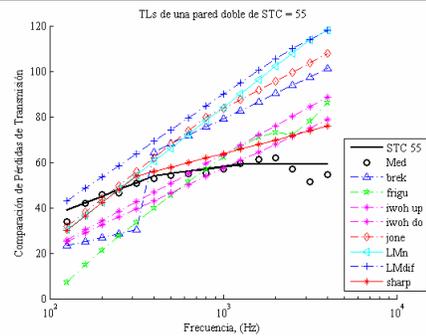
'Mod	'brek	frigu	iwoh up	iwoh do	jone	LMn	LMdif	sharp	Med
'STC'	41.00	32.00	48.00	46.00	56.00	55.00	69.00	54.00	57.00
'E_STC'	28.07	43.86	15.79	19.30	1.75	3.51	21.05	5.26	0.00
'EcM'	10.76	5.77	7.80	5.31	12.88	15.10	15.45	4.90	0.00
'desvia'	43.03	23.08	31.21	21.24	51.51	60.40	61.80	19.60	0.00



STC, error STC, error cuadrático medio y sesgo Experimento 27

Curvas Experimento 27

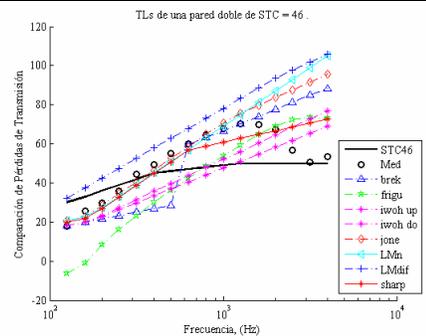
'Mod	'brek	frigu	iwoh up	iwoh do	jone	LMn	LMdif	sharp	Med
'STC'	43.00	37.00	50.00	47.00	60.00	58.00	69.00	58.00	55.00
'E_STC'	21.82	32.73	9.09	14.55	9.09	5.45	25.46	5.45	0.00
'EcM'	11.64	7.92	8.51	6.05	13.30	15.87	15.87	5.32	0.00
'desvia'	46.54	31.67	34.04	24.18	53.20	63.49	63.49	21.29	0.00



STC, error STC, error cuadrático medio y sesgo Experimento 28

Curvas Experimento 28

'Mod	'brek	frigu	iwoh up	iwoh do	jone	LMn	LMdif	sharp	Med
'STC'	35.00	23.00	39.00	38.00	45.00	44.00	58.00	44.00	46.00
'E_STC'	23.91	50.00	15.22	17.39	2.17	4.35	26.09	4.35	0.00
'EcM'	8.74	4.89	5.87	3.88	10.57	12.88	13.14	4.84	0.00
'desvia'	34.95	19.54	23.46	15.52	42.26	51.53	52.58	19.38	0.00



STC, error STC, error cuadrático medio y sesgo Experimento 29

Curvas Experimento 29

		<table border="1"> <thead> <tr> <th>'Mod'</th> <th>'brek'</th> <th>frigu</th> <th>iwoh up</th> <th>iwoh do</th> <th>jone</th> <th>LMn</th> <th>LMdif'</th> <th>sharp</th> <th>Med</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>'STC'</td> <td>38.00</td> <td>30.00</td> <td>44.00</td> <td>42.00</td> <td>51.00</td> <td>49.00</td> <td>67.00</td> <td>49.00</td> <td>51.00</td> </tr> <tr> <td>'E_STC'</td> <td>25.49</td> <td>41.18</td> <td>13.73</td> <td>17.65</td> <td>0.00</td> <td>3.92</td> <td>31.37</td> <td>3.92</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>'EcM'</td> <td>9.28</td> <td>5.56</td> <td>6.37</td> <td>4.17</td> <td>11.24</td> <td>13.30</td> <td>13.81</td> <td>4.67</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>'desvia'</td> <td>37.14</td> <td>22.22</td> <td>25.47</td> <td>16.68</td> <td>44.94</td> <td>53.18</td> <td>55.24</td> <td>18.67</td> <td>0.00</td> </tr> </tbody> </table>									'Mod'	'brek'	frigu	iwoh up	iwoh do	jone	LMn	LMdif'	sharp	Med	'STC'	38.00	30.00	44.00	42.00	51.00	49.00	67.00	49.00	51.00	'E_STC'	25.49	41.18	13.73	17.65	0.00	3.92	31.37	3.92	0.00	'EcM'	9.28	5.56	6.37	4.17	11.24	13.30	13.81	4.67	0.00	'desvia'	37.14	22.22	25.47	16.68	44.94	53.18	55.24	18.67	0.00		
'Mod'	'brek'	frigu	iwoh up	iwoh do	jone	LMn	LMdif'	sharp	Med																																																					
'STC'	38.00	30.00	44.00	42.00	51.00	49.00	67.00	49.00	51.00																																																					
'E_STC'	25.49	41.18	13.73	17.65	0.00	3.92	31.37	3.92	0.00																																																					
'EcM'	9.28	5.56	6.37	4.17	11.24	13.30	13.81	4.67	0.00																																																					
'desvia'	37.14	22.22	25.47	16.68	44.94	53.18	55.24	18.67	0.00																																																					
<i>STC, error STC, error cuadrático medio y sesgo Experimento 30</i>		<i>Curvas Experimento 30</i>																																																												
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>'Mod'</th> <th>'brek'</th> <th>frigu</th> <th>iwoh up</th> <th>iwoh do</th> <th>jone</th> <th>LMn</th> <th>LMdif'</th> <th>sharp</th> <th>Med</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>'STC'</td> <td>33.00</td> <td>29.00</td> <td>43.00</td> <td>41.00</td> <td>50.00</td> <td>49.00</td> <td>62.00</td> <td>41.00</td> <td>40.00</td> </tr> <tr> <td>'E_STC'</td> <td>17.50</td> <td>27.50</td> <td>7.50</td> <td>2.50</td> <td>25.00</td> <td>22.50</td> <td>55.00</td> <td>2.50</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>'EcM'</td> <td>8.77</td> <td>10.64</td> <td>10.76</td> <td>8.65</td> <td>15.43</td> <td>18.00</td> <td>18.00</td> <td>7.92</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>'desvia'</td> <td>35.09</td> <td>42.57</td> <td>43.05</td> <td>34.59</td> <td>61.70</td> <td>72.01</td> <td>72.01</td> <td>31.68</td> <td>0.00</td> </tr> </tbody> </table>									'Mod'	'brek'	frigu	iwoh up	iwoh do	jone	LMn	LMdif'	sharp	Med	'STC'	33.00	29.00	43.00	41.00	50.00	49.00	62.00	41.00	40.00	'E_STC'	17.50	27.50	7.50	2.50	25.00	22.50	55.00	2.50	0.00	'EcM'	8.77	10.64	10.76	8.65	15.43	18.00	18.00	7.92	0.00	'desvia'	35.09	42.57	43.05	34.59	61.70	72.01	72.01	31.68	0.00		
'Mod'	'brek'	frigu	iwoh up	iwoh do	jone	LMn	LMdif'	sharp	Med																																																					
'STC'	33.00	29.00	43.00	41.00	50.00	49.00	62.00	41.00	40.00																																																					
'E_STC'	17.50	27.50	7.50	2.50	25.00	22.50	55.00	2.50	0.00																																																					
'EcM'	8.77	10.64	10.76	8.65	15.43	18.00	18.00	7.92	0.00																																																					
'desvia'	35.09	42.57	43.05	34.59	61.70	72.01	72.01	31.68	0.00																																																					
<i>STC, error STC, error cuadrático medio y sesgo Experimento 31</i>		<i>Curvas Experimento 31</i>																																																												

### Apéndice 6.2 Resultado Experimento 16, La Excepción.

Datos de entrada:

'n'	'L1'	'L3'	'd'	'M2'	'h2'	'E2'	'poa2'		
3	2.4	1.2	1.00E-07	692	0.0125	3.00E-07	0.3		
'et2'	'M4'	'h4'	'E4'	'poa4'	'et4'	'alfa0'	'.'	'.'	'.'
0.1	692	0.0125	3.00E+07	0.3	0.1	0.1	'.'	'.'	'.'
'frec'	<b>125</b>	<b>160</b>	<b>200</b>	<b>250</b>	<b>315</b>	<b>400</b>	<b>500</b>	<b>630</b>	
'Alfa_cav(f)'	0.14	0.14	0.14	0.1	0.1	0.1	0.06	0.06	
'TLmed'	23	27	25	27	28	28	29	30	
'frec'	<b>800</b>	<b>1000</b>	<b>1250</b>	<b>1600</b>	<b>2000</b>	<b>2500</b>	<b>3150</b>	<b>4000</b>	
'Alfa_cav'	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03
'TLmed'	30	31	33	34.5	35	32.5	31	34	

Datos de Salida:

		<table border="1"> <thead> <tr> <th>'Mod'</th> <th>'brek'</th> <th>frigu</th> <th>iwoh up</th> <th>iwoh do</th> <th>jone</th> <th>LMn</th> <th>LMdif'</th> <th>sharp</th> <th>Med</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>'STC'</td> <td>32.00</td> <td>19.00</td> <td>32.00</td> <td>32.00</td> <td>36.00</td> <td>35.00</td> <td>56.00</td> <td>0.00</td> <td>31.00</td> </tr> <tr> <td>'E_STC'</td> <td>3.23</td> <td>38.71</td> <td>3.23</td> <td>3.23</td> <td>16.13</td> <td>12.90</td> <td>80.65</td> <td>100.00</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>'EcM'</td> <td>2.45</td> <td>0.44</td> <td>2.42</td> <td>2.42</td> <td>3.89</td> <td>3.67</td> <td>17.35</td> <td>8.50</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>'desvia'</td> <td>9.80</td> <td>-1.77</td> <td>9.68</td> <td>9.68</td> <td>15.55</td> <td>14.69</td> <td>69.38</td> <td>-34.00</td> <td>0.00</td> </tr> </tbody> </table>									'Mod'	'brek'	frigu	iwoh up	iwoh do	jone	LMn	LMdif'	sharp	Med	'STC'	32.00	19.00	32.00	32.00	36.00	35.00	56.00	0.00	31.00	'E_STC'	3.23	38.71	3.23	3.23	16.13	12.90	80.65	100.00	0.00	'EcM'	2.45	0.44	2.42	2.42	3.89	3.67	17.35	8.50	0.00	'desvia'	9.80	-1.77	9.68	9.68	15.55	14.69	69.38	-34.00	0.00		
'Mod'	'brek'	frigu	iwoh up	iwoh do	jone	LMn	LMdif'	sharp	Med																																																					
'STC'	32.00	19.00	32.00	32.00	36.00	35.00	56.00	0.00	31.00																																																					
'E_STC'	3.23	38.71	3.23	3.23	16.13	12.90	80.65	100.00	0.00																																																					
'EcM'	2.45	0.44	2.42	2.42	3.89	3.67	17.35	8.50	0.00																																																					
'desvia'	9.80	-1.77	9.68	9.68	15.55	14.69	69.38	-34.00	0.00																																																					
<i>STC, error STC, error cuadrático medio y sesgo Experimento 16</i>		<i>Curvas Experimento 16</i>																																																												