



VI Congreso Iberoamericano de Acústica - FIA 2008  
Buenos Aires, 5, 6 y 7 de noviembre de 2008

FIA2008-A093

## TPA híbrido: Simulaciones y mediciones experimentales en laboratorio

Daniel E. Sánchez <sup>(a)</sup>,  
Samir N. Y. Gerges <sup>(b)</sup>,  
Jorge P. Arenas <sup>(c)</sup>.

(a) Instituto de Matemáticas, Facultad de Ciencias, Universidad Austral de Chile (UACH), Casilla 567 Valdivia, Chile. E-mail: [danielsanch@gmail.com](mailto:danielsanch@gmail.com)

(b) Laboratorio de Acústica y Vibraciones (LVA), Departamento de Ingeniería Mecánica (EMC), Universidad Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus Universitario - Trindade. CEP: 88040-900, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil. E-mail: [samir@emc.ufsc.br](mailto:samir@emc.ufsc.br)

(c) Instituto de Acústica, Universidad Austral de Chile (UACH), Campus Miraflores, Casilla 567, Valdivia, Chile. E-mail: [jparenas@uach.cl](mailto:jparenas@uach.cl)

### Abstract

Transfer Path Analysis (TPA) was used to quantify structure and air-borne transmission (vibro-acoustic TPA) in a study model, under artificial excitation, for laboratory measurements. In this study, a scaled car was built. Experimental measurements and simulations were made. A powerful concept that mixes classic TPA techniques with numeric computer simulations was developed and named "Hybrid TPA". Thus, classic methods for the indirect determination of operational forces is presented and compared for Structural TPA. Also, the Panel Contribution Analysis (PNC) is quantified for Air TPA. Finally, the results obtained with experimental measurements and Hybrid TPA were analyzed and compared.

### Resumen

Este trabajo presenta un estudio para cuantificar los caminos de transmisión vibro-acústicos (transmisión aérea y estructural del ruido y vibraciones), basado en la teoría y técnicas de TPA (*Transfer Path Analysis*). Específicamente, el método es aplicado a las medidas realizadas en laboratorio en un modelo a escala, sometido a excitación artificial. Este modelo, que representa un vehículo de pasajeros real, fue creado, medido y simulado virtualmente. Además, se introduce un potente concepto, definido como TPA Híbrido, el cual mezcla las técnicas clásicas de TPA con las simulaciones numéricas en computador. En el trabajo se presentan las comparaciones entre los métodos clásicos de obtención indirecta de fuerzas "operacionales" para TPA Estructural y la técnica de cuantificación de las contribuciones de paneles vibrantes para TPA Aéreo. Finalmente, se analiza y compara los resultados obtenidos en mediciones reales y las estimaciones utilizando TPA Híbrido.

## 1 Introducción

La técnica de análisis de los caminos de transmisión o TPA (llamado así por las siglas en inglés de “*Transfer Path Analysis*”) es usada para la investigación y solución de problemas de ruido y vibraciones (llamado TPA vibro-acústico). Su importancia y aplicación han sido notadas durante más de 15 años de desarrollo. En sus comienzos, esta técnica era realizada, casi completamente, bajo condiciones de medida experimental y/o medidas operacionales (llamadas así debido a que eran hechas en funcionamiento normal de la estructura o maquinaria a analizar). Ahora, introduciendo la ingeniería asistida por computadores, o CAE (“*Computer-Aided Engineering*”), los parámetros característicos de diferentes estructuras y maquinarias pueden ser establecidos por simulaciones numéricas. Así, simulación (por ejemplo, usando elementos finitos, o FEM), más medición experimental/operacional (hechas con técnicas de TPA clásicas), crean el llamado “TPA Híbrido” que establece soluciones más rápidas y optimizadas en la práctica.

## 2 Análisis de los caminos de transmisión (TPA)

### 2.1 TPA Estructural

El TPA Estructural determina la contribución de las energías transmitidas, netamente, por vibraciones mecánicas. Así, el objetivo principal por esta vía de transmisión es la determinación, de forma indirecta, de las fuerzas de excitación que son cuantificadas para obtener las magnitudes que actúan en condiciones operacionales. La ecuación general, en el dominio de la frecuencia, es:

$$\ddot{x}_i(\omega) = \sum_{j=1}^n (H_{ij}(\omega)) \cdot f_j(\omega), \quad (1)$$

donde  $\ddot{x}_i(\omega)$  es el espectro de aceleración del  $i$ -ésimo punto receptor (en la contribución total por  $n$  caminos de transmisión),  $f_j(\omega)$  es el espectro de fuerza “operacional” (determinada por métodos indirectos, en el  $j$ -ésimo punto de excitación), y  $H_{ij}(\omega)$  es la función de respuesta en frecuencia (FRF) del  $j$ -ésimo camino de transmisión (que describe el comportamiento de la estructura, entre los puntos de excitación y respuesta).

Los dos métodos alternativos para la determinación indirecta de las fuerzas “operacionales” (entre comillas por ser determinadas en condiciones experimentales de laboratorio), son el “Método de la Rigidez Compleja”, o CSM (de las siglas “*Complex Stiffness Method*”), y el “Método de la Inversión de la Matriz”, o MIM (de las siglas “*Matrix Inversion Method*”).

En CSM, las fuerzas “operacionales” ( $f_{j(\text{CSM})}$ ), son determinadas como:

$$f_{j(\text{CSM})} = K_j(\omega)_{\text{exp}} \cdot \left( x_{j(S)}(\omega) - x_{j(R)}(\omega) \right)_{\text{oper}}, \quad (2)$$

donde  $K_j(\omega)_{\text{exp}}$  es una FRF de Rigidez Dinámica Compleja, en el  $j$ -ésimo montaje de la conexión-camino (determinada experimentalmente),  $(x_{j(S)}(\omega) - x_{j(R)}(\omega))$  es la diferencia entre los espectros en frecuencia, de los desplazamientos operacionales, en el  $j$ -ésimo montaje, en el lado de la fuente (“S”) y en el lado del receptor (“R”), respectivamente.

En MIM, el vector de las fuerzas “operacionales” es determinado, como:

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ \dots \\ f_n \end{Bmatrix}_{(MIM)} = \begin{bmatrix} \ddot{x}_{11} & \ddot{x}_{12} & \dots & \ddot{x}_{1n} \\ f_1 & f_2 & \dots & f_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \ddot{x}_{m1} & \dots & \dots & \ddot{x}_{mn} \\ f_1 & \dots & \dots & f_n \end{bmatrix}_{\text{exp}}^+ \cdot \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \dots \\ \ddot{x}_m \end{Bmatrix}_{\text{oper}}, \quad (3)$$

donde  $\{f_1 \dots f_n\}^T$  es el vector (tamaño “ $n$ ”) de las fuerzas “operacionales”, (determinadas indirectamente) y  $\{\ddot{x}_1 \dots \ddot{x}_n\}^T$  es el vector (tamaño “ $m$ ”) de las aceleraciones operacionales. Cada uno de los términos interiores de la matriz anterior representa a una FRF de acelerancia, medida experimentalmente entre la aceleración en la  $i$ -ésima posición y una fuerza aplicada para excitación del  $j$ -ésimo camino de transmisión. Al no poder resolver directamente la inversa de esa matriz (no cuadrada), tal matriz (de tamaño “ $m \times n$ ”), es calculada como una matriz pseudo-inversa (Moore-Penrose) y simbolizada con el signo “+”.

## 2.2 TPA Aéreo

El TPA Aéreo determina la contribución de las energías transmitidas de forma aérea, las cuales son cuantificadas en términos acústicos como niveles de presión sonora. Así, el principal objetivo de TPA por esta vía de transmisión es la determinación indirecta de fuentes sonoras puntuales con velocidades de volumen  $Q$  (por ejemplo, en forma de espectros de frecuencia para cada punto de localización de cada una de estas fuentes). Estas fuentes son cuantificadas, de forma indirecta, para obtener las magnitudes que actúan en condiciones operacionales. La ecuación general de TPA Aéreo es:

$$p_i(\omega) = \sum_{j=1}^n (H_{ij}(\omega)) \cdot Q_j(\omega), \quad (4)$$

donde  $p_i(\omega)$  es el espectro en frecuencia de la presión sonora en el  $i$ -ésimo punto receptor (en la contribución total por  $n$  caminos de transmisión),  $Q_j(\omega)$  es el espectro en frecuencia de la velocidad de volumen “operacional” (determinada en forma indirecta) en el  $j$ -ésimo punto de localización de la fuente sonora emisora y  $H_{ij}(\omega)$  es FRF del  $j$ -ésimo camino de transmisión.

De la misma forma que en el TPA Estructural, se tienen diversos métodos de obtención indirecta de las velocidades de volumen “operacionales”. Entre los más usados tenemos al “Método de Muestreo de Superficies”, o SSM (“*Sampling Surface Method*”), y al “Método de la Inversión de la Matriz”, o MIM (“*Matrix Inversion Method*”). Sin embargo, en este trabajo fueron realizadas mediciones sólo con el método SSM.

SSM es el método que estudia la contribución en la transmisión de ruido en TPA Aéreo, cuantificando las contribuciones de paneles vibrantes que son componentes de la estructura a analizar (como los paneles interiores de un automóvil, por ejemplo). Las siglas identificadoras del método vienen del inglés “*Point-to-Point Surface Sampling Method*” e indican que la medición es realizada a través del muestreo “punto a punto” en pequeñas superficies “*parches*”, las cuales subdividen los paneles. Así, la medición es realizada a través del muestreo de aceleraciones operacionales sobre los paneles, medidas en forma normal a tales “*parches*”, que subdividen un determinado panel. Con estas aceleraciones medidas y con las

dimensiones de esas pequeñas superficies “*parches*” es cuantificada una aceleración de volumen operacional, con la siguiente relación:

$$\dot{Q}_j = S_j \ddot{x}_{n_j}, \quad (5)$$

donde  $\dot{Q}_j$  es la aceleración de volumen operacional, del  $j$ -ésimo “*parche*” de área  $S_j$  y  $\ddot{x}_{n_j}$  es la aceleración normal a la superficie  $S_j$ , medida en el  $j$ -ésimo “*parche*”. Cabe mencionar que la  $j$ -ésima velocidad de volumen operacional es obtenida desde la relación lineal armónica, cuando las mediciones sean efectuadas en el dominio de la frecuencia, (siendo  $\omega = 2\pi f$ ), definida como  $Q_j = \dot{Q}_j / j\omega$ .

### 3 Metodología de las Mediciones

#### 3.1 Auto Modelo “Híbrido”

Fue establecida la construcción de un modelo de ensayo (un auto modelo), para ser utilizado en las mediciones experimentales de TPA Vibro-Acústico (TPA Estructural e TPA Aéreo, por separado). Así, el auto modelo “híbrido” presenta una geometría simple que sirve para mediciones experimentales reales y para ser simulado por computador. El auto modelo fue compuesto, en escala, por 3 placas de acero de 1 [mm] de espesor, y su masa total fue de 29,7 kg. La configuración del auto modelo permitió conformar dos cavidades interiores, llamadas de “cavidad del motor” y “cavidad de pasajeros”, que son presentadas en la Figura 1.



**Figura 1.** Visualización del auto modelo, cavidades interiores.

El modelo virtual para el auto modelo fue confeccionado con el software MSC PATRAN. Este software permite la creación de una determinada estructura basado en las técnicas del diseño asistido por computadores, o CAD (de las siglas “*Computer Aided Design*”). Con la geometría creada, es posible crear manualmente o automáticamente una “malla” para análisis según el método de elementos finitos (FEM), que fue el método escogido en este trabajo para obtención de las FRF’s entre los diferentes puntos de la estructura (en TPA Estructural y TPA Aéreo), de los  $n$  caminos de transmisión (término  $H_{ij}(\omega)$  de las ecuaciones (1) y (4)). Cabe notar que estas FRF’s también pueden ser obtenidas a través de mediciones experimentales, con metodologías y técnicas no-operacionales.

### 3.2 Desarrollo en TPA Estructural

El desarrollo experimental fue conformado para cuantificar dos puntos de respuesta de vibración (aceleración), dentro del auto modelo, desde una excitación artificial en la cavidad del motor (fuente), hasta la cavidad de pasajeros (receptor). Para ello, fue colocada una fuente de excitación (un “*shaker*”), en el interior de la cavidad del motor del auto modelo (ver Figura 2), conectada a dos “resortes”, uno con mayor rigidez (resorte rígido), que el otro (resorte blando), a través de una pequeña viga de metal para simular el funcionamiento “operacional” de un motor y representar las características de dos entradas de excitación (fuerzas  $f_1$  e  $f_2$ ), como inicios de dos caminos de transmisión posibles hasta los puntos receptores. El tipo de excitación utilizada (generada por el “*shaker*”) fue un ruido aleatorio de 0 a 1024 Hz.



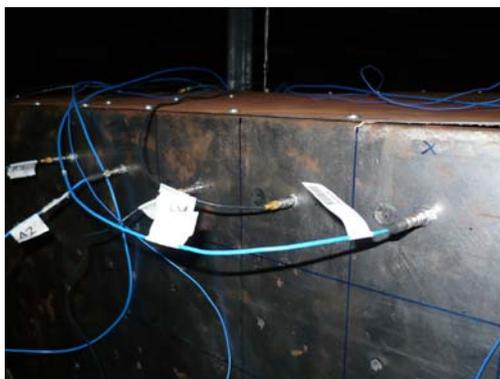
**Figura 2.** Configuración de la excitación creada dentro de la cavidad del motor del auto modelo, para CSM y MIM, en TPA Estructural.

En CSM los desplazamientos operacionales fueron determinados analíticamente en el software MATLAB, desde los datos de las aceleraciones operacionales medidas en los puntos conectores de los “resortes” con la fuente y con el receptor, respectivamente, suponiendo un sistema lineal e invariante en el tiempo. La relación lineal utilizada, con  $\omega=2\pi f$  (con  $f$  frecuencia en Hz), fue  $x(\omega)_{oper} = -\ddot{x}(\omega)_{oper} / \omega^2$ . Ahora, las FRF’s de rigidez dinámica compleja, fueron determinadas en un ensayo dinámico especial. En este ensayo los “resortes” fueron excitados en su extremo superior a través de un “*shaker*” (midiendo la fuerza de entrada con una cabeza de impedancia) y fijados en su extremo inferior a una gran masa rígida (para establecer un desplazamiento inferior nulo). La relación de transferencia entre la excitación y la respuesta de aceleración (acelerómetro), para el lado superior interno del resorte, fueron determinadas en el software LMS TEST.LAB. Este software permitía determinar directamente la FRF de rigidez dinámica compleja ( $F/X$ ), pero fue introducido un término de corrección ( $m_{eq}\omega^2$ ), para cuantificar la masa entre las magnitudes. Finalmente, las FRF’s eran obtenidas desde  $K_i(\omega) = [F/X]_i + m_{eq}\omega^2$ .

En MIM fue aplicado el principio de superposición para la determinación de las fuerzas operacionales. Considerando más puntos de medición se asume una mayor certeza en la cuantificación del vector de fuerzas (similar al tener un mayor número de puntos en una regresión lineal). Así, y siendo no cuadrada la matriz de acelerancias, la pseudo-inversa fue calculada a través de dos métodos algebraicos en el software MATLAB. Uno es “*Singular Value Decomposition*”, o SVD, que determina la pseudo-inversa de una matriz a través de técnicas de descomposición ( $[A]=[U][S][V]^T \rightarrow [A]_{SVD}^+ = [V][S]^{-1}[U]^T$ ). El otro es “*Least Squares Estimation*”, o LSE, y calcula la pseudo-inversa de una matriz a través de la inserción de la misma matriz transpuesta (símbolo “*T*”) de la original ( $[A]_{LSE}^+ = [A]^T [A]^{-1} [A]^T$ ).

### 3.3 Desarrollo en TPA Aéreo

En el desarrollo experimental de TPA Aéreo, fue realizado el análisis de la contribución vibro-acústica de los paneles internos del auto modelo, para un punto en la cavidad de pasajeros (receptor), a partir de una excitación experimental en el compartimiento del motor (fuente). La fuente de excitación simulaba el funcionamiento operacional para representar las características de una entrada de excitación (fuerza  $f_1$ ), como fuente vibro-acústica del ruido interior en la cavidad de pasajeros para el punto receptor (micrófono). Todas las mediciones fueron definidas como “experimentales” y el tipo de excitación del “shaker” utilizada fue un ruido aleatorio de 0 a 400 Hz. Así, fueron realizadas un total de 255 mediciones de las aceleraciones normales a las superficies “parches”, requeridas para SSM, de área menor a  $0,01 \text{ m}^2$ , como se ilustra en la Figura 3.

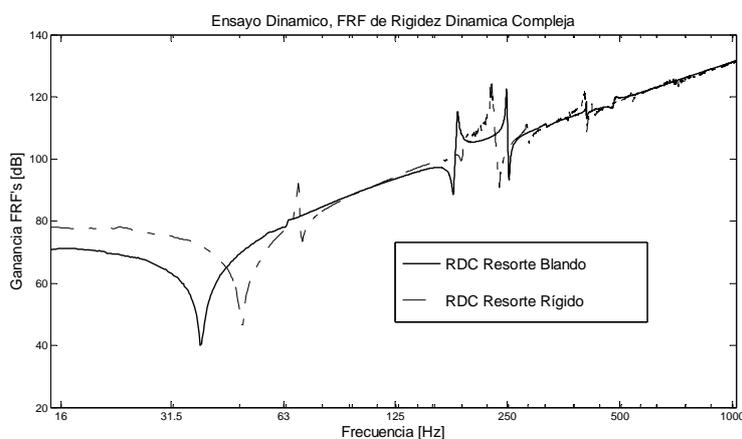


**Figura 3.** Medición experimental de las aceleraciones operacionales normales a las superficies “parches”, en SSM, para TPA Aéreo.

## 4 Resultados y Análisis

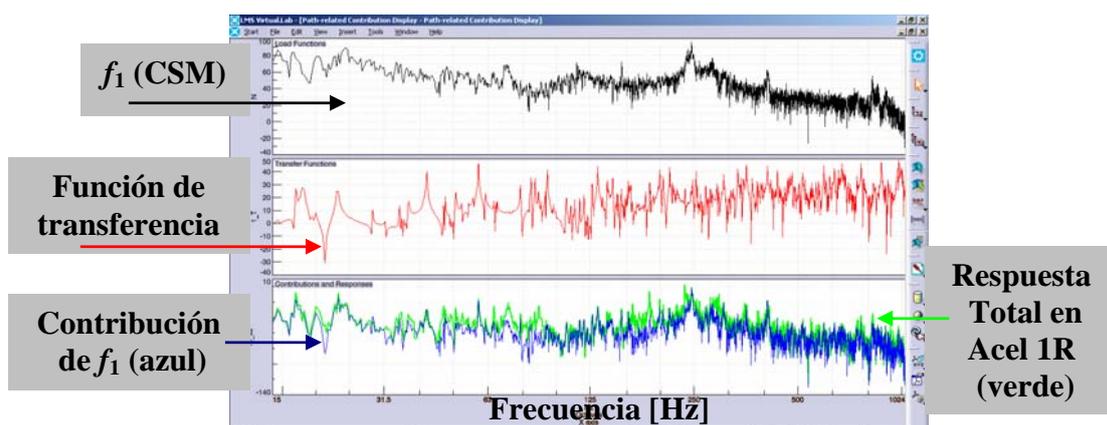
### 4.1 TPA Híbrido Estructural

En CSM las dos curvas, para  $K_1(\omega)_{\text{exp}}$  y  $K_2(\omega)_{\text{exp}}$ , representando el “resorte blando” y el “resorte rígido”, respectivamente, fueron obtenidas desde el ensayo dinámico (descrito en la sección anterior) y visualizadas en la Figura 4.



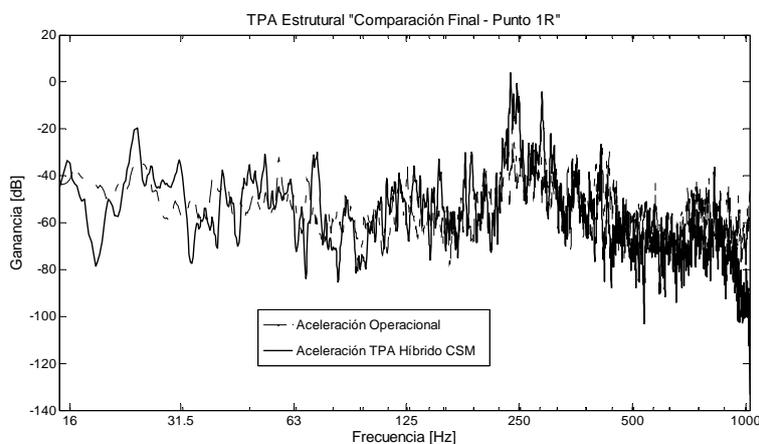
**Figura 4.** FRF's de rigidez dinámica compleja, ambos “resortes”.

En la primera etapa de análisis de los resultados, son comparadas las fuerzas “operacionales” determinadas indirectamente con los métodos CSM e MIM. En la condición operacional, las fuerzas de entrada, ( $f_1$  y  $f_2$ ), fueron medidas directamente con cabezas de impedancia (canal de fuerza), en las posiciones de entrada de excitación sobre la estructura, justamente entre la superficie del “resorte” y la superficie del auto modelo. Esto fue posible, sólo y bajo condiciones de laboratorio, siendo muy difícil en estructuras reales, ya que puede modificar mucho el sistema. Así, se comprobó que las magnitudes de las fuerzas calculadas con CSM y MIM fueron muy similares con las fuerzas medidas directamente.



**Figura 5.** Visualización de la contribución específica de una fuerza, en la contribución total, software LMS VIRTUAL.LAB.

En la segunda etapa de análisis es presentado el concepto de TPA Híbrido, donde son mezcladas las mediciones experimentales/operacionales con simulaciones numéricas por computador. La herramienta computacional utilizada fue el software LMS VIRTUAL.LAB. La Figura 5 representa el último paso de cuantificación de los caminos de transmisión, en la función gráfica “*Path Related Contribution Display*”, la cual permite observar todas las grandes etapas del concepto de TPA. Así, se presenta, de arriba hacia abajo, la fuerza (o carga), la función de transferencia y, en la última gráfica, la contribución por esa fuerza específica y la contribución total (por todas las fuerzas), en el punto de respuesta especificado.

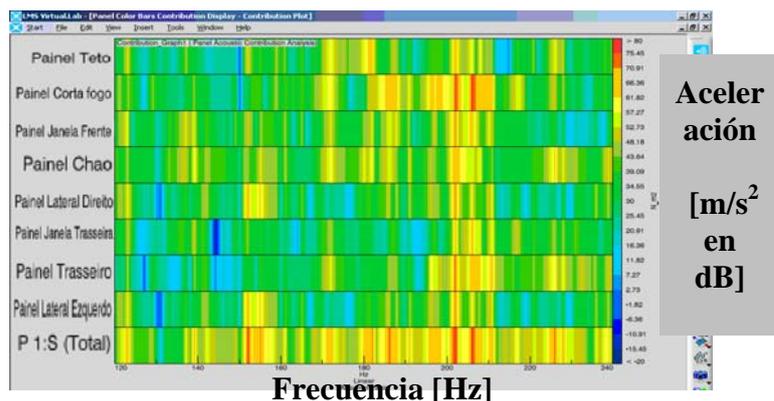


**Figura 6.** Comparación final de resultados, de aceleración en el punto 1R de respuesta para CSM, entre TPA Híbrido y los medidos directamente.

Finalmente, en la Figura 6, es visualizada la última etapa de análisis que tiene que ver con la comparación de los resultados entre los determinados en TPA Híbrido con los determinados directamente en los puntos de respuestas finales de aceleración, medidas con acelerómetros, en condición operacional, en el auto modelo real.

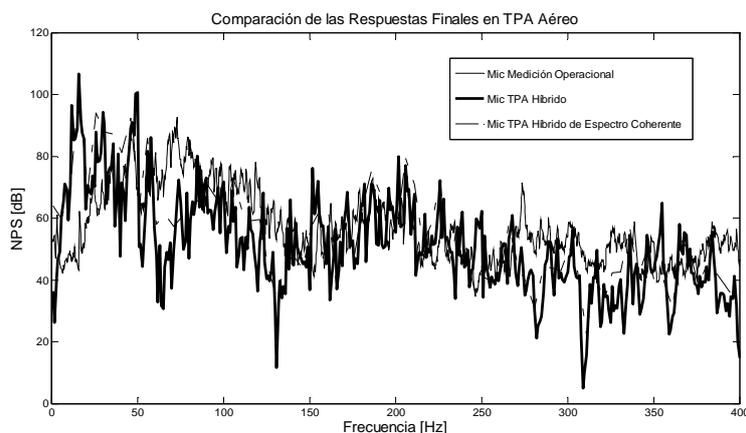
#### 4.2 TPA Híbrido Aéreo

En primer lugar fueron analizadas las contribuciones vibro-acústicas por paneles. Sin embargo, se tuvo una gran diferencia en el desarrollo, realizado en el software LMS VIRTUAL.LAB, para TPA Híbrido Aéreo.



**Figura 7.** Visualización de la contribución de los 8 paneles, y contribución total en el punto de respuesta, TPA Híbrido Aéreo.

Así, fue necesario la utilización del cuerpo virtual estructural (membrana que representa las placas del auto modelo) y el cuerpo virtual aéreo (representante del espacio aéreo interior de las cavidades interiores del auto modelo), para relacionar las propiedades y características de las partes estructural y acústica en un sistema único. El análisis y solución (Figura 7) de tal sistema, está basado en las condiciones de contorno establecidas, en los modos acústicos determinados (FEM) de los grupos o paneles creados (o identificados) y de la definición del punto de respuesta (posicionado en las mismas coordenadas del micrófono).



**Figura 8.** Comparación final de resultados de TPA Híbrido Aéreo, medido operativamente y con TPA Híbrido de Espectro Coherente.

La comparación de los resultados de TPA Híbrido con las mediciones operacionales realizadas es presentada en la Figura 8. Además, en dicha comparación, fue introducida la respuesta llamada “TPA Híbrido de Espectro Coherente”, que es formada por la suma energética de todas las contribuciones parciales por cada elemento componente “*parche*” (superficies virtuales de cada uno de los 8 paneles definidos para TPA Híbrido), cuando son relacionadas directamente con las mediciones operacionales, a través de las funciones de coherencia (entre la señal excitación y la señal de respuesta). La relación matemática utilizada fue  $G_{\text{Med}_{\text{oper}}} = \sum G_{\text{VL}_{S_i}} \cdot \gamma_{S_i}^2$ , donde  $G_{\text{Med}_{\text{oper}}}$  es el auto-espectro de la respuesta (presión sonora del micrófono medida en condiciones operacionales),  $G_{\text{VL}_{S_i}}$  es el auto-espectro de respuesta parcial (cuantificado para TPA Híbrido en software LMS VIRTUAL.LAB en el  $i$ -ésimo “*parche*” de superficie virtual  $S_i$ ) y  $\gamma_{S_i}^2$  la función de coherencia (cuadrada), que relaciona la excitación (aceleración operacional), del  $i$ -ésimo “*parche*” (superficie real  $S_i$ ), con la respuesta (presión sonora del micrófono medida en condiciones operacionales).

## 5 Conclusiones

Fueron cuantificados y analizados los caminos de transmisión vibro-acústicos con éxito, en un modelo de estudio, para mediciones realizadas en condiciones controladas de laboratorio. Se utilizó un auto modelo a escala, siendo adecuado para mediciones y para simulación numérica por computadores. Fue descrita y desarrollada la innovadora técnica de TPA Híbrido, con resultados satisfactorios, en el auto modelo virtual, trabajando con el software LMS VIRTUAL.LAB, donde los análisis integraron mediciones experimentales y simulación numérica (FEM) para TPA Estructural y TPA Aéreo, por separado. Cabe mencionar que para todas las mediciones realizadas fue establecido un rango “no confiable de medición” en bajas frecuencias (de 0 a 15 Hz). Esto fue debido, entre otras razones, por el límite en frecuencia utilizable de los instrumentos y por la cadena hardware-software utilizado. También, fue verificada una resonancia entre 200 hasta 300 Hz, propia de la frecuencia natural del montaje de excitación utilizado en todas las mediciones (sistema “*shaker*”, “*stinger*” y cabeza de impedancia). Esta resonancia cambia de valores en este rango de frecuencias, debido a la intensidad de la excitación y/o a la masa a excitar.

En específico para TPA Estructural, fueron desarrollados y comparados los métodos CSM y MIM con éxito en el auto modelo, bajo condiciones de excitación artificial (simulando condiciones operacionales), para la determinación indirecta de las fuerzas de excitación, siendo comprobada una gran similitud de ambos con las magnitudes en las mediciones operacionales directas. También, fueron comparados los resultados finales de la respuesta de aceleración en la evaluación de los caminos de transmisión por TPA Híbrido Estructural y por medición directa experimental, siendo comprobada una correcta correlación y similitud en sus curvas de respuesta. Además, fueron descritas algunas variables que influyen en las mediciones experimentales, como el factor de corrección de masa equivalente para CSM y el uso del principio de superposición, para una mejor determinación de la matriz de acelerancias y el cálculo de la pseudo-inversa en MIM, obteniendo éxito en sus aplicaciones.

Por otro lado, en específico para TPA Aéreo, fue desarrollado el método SSM bajo condiciones de excitación artificial (simulando condiciones operacionales), para la cuantificación de las contribuciones de los paneles internos en el ruido interior de la cavidad de pasajeros del auto modelo. Así, las mediciones de SSM fueron integradas (en “TPA Híbrido de Espectro Coherente”) y comparadas con los resultados finales de respuesta de presión sonora en la evaluación de las contribuciones por paneles en el auto modelo, de TPA Híbrido y de medición directa experimental, siendo comprobada una regular correlación en

sus curvas de respuesta. Las contribuciones de los paneles al ruido interior de cavidades fueron establecidas con éxito para TPA Aéreo dentro de TPA Híbrido. Cabe destacar, de los gráficos presentados, que en el rango de frecuencias entre 135 y 270 Hz, se observó una correcta correlación. Así, en este rango, la mayor contribución por paneles fue la relacionada al “Panel Corta Fuego” en frecuencias próximas a 200 Hz. Además, se identificó la influencia del primer modo acústico de la cavidad acústica, que está próximo a los 208 Hz, que coincide con los altos valores de presión sonora encontrados en este rango de frecuencias.

## 6 Agradecimientos

Agradecimientos son dados a la empresa SMARTtech Vibroacústica LTDA y al “Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico” (CNPq), Brasil, que financiaron y estimularon esta investigación. También, al Laboratorio de Acústica y Vibraciones (LVA) del Departamento de Ingeniería Mecánica (EMC) de la Universidad Federal de Santa Catarina (UFSC) por los espacios físicos, softwares e instrumentación utilizada.

## 7 Referencias

LMS International. “*Transfer Path Analysis: The quantification and qualification of vibro-acoustic transfer paths*”. Notas de Aplicación. Web: <http://www.lmsintl.com/>

Padilha, P. (2006). “*Comparação de Técnicas de Análise de Caminhos de Transferência Vibroacústicos*”. Disertación de Magíster, UNICAMP, Brasil.

Van der Auweraer, H; Mas, P; Dom, S; Vecchio, A; Janssens, K; Van de Ponsele, P. (2007). “*Transfer Path Analysis in The Critical Path of Vehicle Refinement: The Role of Fast, Hybrid and Operational Path Analysis*”. SAE Technical Paper Series, 2007-01-2359.

Hendricx, W; Choi, Y. B; Ha, S. W; Lee, H. K. (1997). “*Experimental Body Panel Contribution Analysis for Road Induced Interior Noise of a Passenger Car*”. SAE Technical Paper Series, 971913.

Koners, G. (2003). “*Panel Noise Contribution Analysis: An Experimental Method for Determining the Noise Contributions of Panels to an Interior Noise*”. SAE Technical Paper Series, 2003-01-1410.

Kurmaniak, C. V; Van Karsen, C; Kelley, W. R. (1999). “*Application of Indirect Force Estimation Techniques to the Automotive Transfer Case*”. SAE Technical Paper Series, 1999-01-1764.

Plunt, J. “*Strategy for Transfer Path Analysis (TPA) Applied to Vibro-Acoustic System at Medium and High Frequencies*”. Proc. ISMA 23, Bélgica.

Gerges, Samir. (2005). “*Ruídos e Vibrações Veiculares*”. NR Editora, Florianópolis, Brasil.

Genuit, K; Poggenburg, J. (1999). “*The Design of Vehicle Interior Noise Using Binaural Transfer Path Analysis*”. SAE Technical Paper Series, 1999-01-1808.