

BASES PARA LA OBTENCIÓN DE LOS FACTORES DE PÉRDIDAS DE ACOPLLO (CLF) ENTRE SUBSISTEMAS DE INTERÉS EN ACÚSTICA DE LA EDIFICACIÓN

PACS: 43.40Jh

Ramis, J^{1.}; Alba, J.;^{2.}; Carbajo, J^{1.} ; Segovia Eulogio, E^{1.}; Frances, J^{1.}.

¹Dpto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal
Universidad de Alicante
Apdo. Correos, 99; 03080 Alicante
e-mail: jramis@ua.es

²Escuela Politécnica Superior de Gandía.
Universidad Politécnica de Valencia
Carretera Nazaret-Oliva S/N
Grao de Gandía 46730 (Valencia)
Teléfono (96) 284.93.14 - (96) 284.93.00
E-mail: jesalba@fis.upv.es,

ABSTRACT

The quantification of the proportion of energy that transmits in structural way is essential for the prediction of the acoustic isolation .The scheme suggested by the methodology SEA (Statistical Energy Analysis) it is present, of a more or less evident form, in all the methods of prediction. The velocity difference of vibration between the surfaces under study and the structural reverberation time they are two fundamental magnitudes. In this work, we carried out a small review of the basic concepts of SEA applicable to the stationary state and to the transitory process and we sense beforehand the methodology applied to determine the coupling loss factors corresponding to subsystems of interest in building acoustics as well as some experimental preliminary results obtained on a crosspiece of concrete.

Keywords: flanking transmission, acoustic isolation, Coupling Loss Factor,

RESUMEN

La cuantificación de la proporción de energía que se transmite via estructura es esencial para la predicción del aislamiento acústico. El esquema sugerido por la metodología SEA (Statistical Energy Analysis) está presente, de una forma más o menos evidente, en todos los métodos de predicción. La diferencia de velocidades de vibración entre las superficies a estudio y el tiempo de reverberación estructural son dos magnitudes fundamentales. En este trabajo, se realiza una pequeña revisión de los conceptos básicos de SEA aplicables al estado estacionario y al transitorio y se presenta el método de trabajo iniciado para determinar los coeficientes de acoplo entre subsistemas de interés en acústica de la edificación así como algunos resultados experimentales preliminares obtenidos sobre una cruceta de hormigón.

Palabras-clave: transmisiones laterales, aislamiento acústico, Factor de pérdidas de acoplo.

1 INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO

El presente trabajo se enmarca en un proyecto de investigación (citado en el apartado de agradecimientos) cuyo objetivo general es mejorar la predicción del aislamiento acústico en la edificación. La principal línea de trabajo es aplicar métodos numéricos (Elementos Finitos y Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo) a esta problemática. Como sabemos, la cuantificación de la proporción de energía que se transmite vía estructural es esencial en para la predicción del aislamiento acústico. El esquema sugerido por la metodología SEA (Statistical Energy Analysis) está presente, de una forma más o menos evidente, en todos los métodos de predicción. Actualmente se puede obtener mediante el uso de fórmulas empíricas reconocidas para ciertas soluciones constructivas y en un conjunto determinado de diseños rígidos o con elementos elásticos insertados. Esto se ha recogido en el DB-HR del CTE [1] que referencia las normas UNE-EN 12354 donde se pueden encontrar las diferentes formulaciones y sus limitaciones. En concreto en la UNE-EN 12354-1:2000 [2] se recogen una serie de expresiones empíricas para el cálculo de diferentes configuraciones constructivas, bien en T, bien en Cruz. Estas expresiones, como se indica en la normativa, presentan una serie de limitaciones. En este trabajo, se realiza una pequeña revisión de los conceptos básicos de SEA aplicables al estado estacionario y al transitorio, se presenta el método de trabajo seguido para determinar los coeficientes de acoplo (CLF) entre subsistemas de interés en acústica de la edificación así como algunos resultados experimentales preliminares obtenidos sobre una cruceta de hormigón.

2 CONCEPTOS

Un análisis pormenorizado de grandes estructuras o recintos se vuelve inaccesible y en muchos casos innecesario debido a las numerosas fuentes de incertidumbre que presentan los problemas habituales en acústica de la edificación. No es, por tanto, sorprendente que el método SEA (Statistical Energy Analysis) que trabaja con promediados energéticos, se haya desarrollado y sus conclusiones sean de gran interés práctico.

El método SEA se desarrolló en los años 60 al aplicar estudios sobre sistemas acoplados a problemas acústicos. Como origen del método suelen citarse los trabajos de Lyon sobre osciladores lineales acoplados [3,4], Smith [5] y Maidanik [6]. Otras referencias de gran interés son [7,8]. A continuación se presenta un resumen de las principales resultados aplicables al problema que nos ocupa extraído básicamente de [9,10].

2.1 Relaciones básicas en SEA

Los parámetros básicos que caracterizan a un subsistema i son su energía E_i y su densidad modal, n_i . Se supone que la energía está uniformemente distribuida de forma que cada modo contiene la energía E_i/n_i . Dados dos resonadores, 1 y 2, caracterizados cada uno de ellos por su frecuencia de resonancia f_i , su masa m , su resistencia de pérdidas, su rigidez s_i y conectados por s , se puede demostrar que el flujo de potencia medio entre ambos viene dado por:

$$\bar{W}_{12} = \beta \left(\frac{m_1 \bar{v}_1^2}{2} - \frac{m_2 \bar{v}_2^2}{2} \right) \quad (1)$$

$$\delta_i = \frac{r_i}{2m_i};$$

$$\beta = \frac{2}{m_1 m_2} \frac{s^2 (\delta_1 + \delta_2)}{(\omega_1^2 - \omega_2^2)^2 + (\delta_1 + \delta_2)(\delta_1 \omega_2^2 + \delta_2 \omega_1^2)}$$

Es decir, el flujo de potencia promedio es proporcional a la diferencia de energías cinéticas medias. El factor de proporcionalidad depende de la rigidez del acoplo, de la diferencia entre las frecuencias de resonancia y del amortiguamiento.

Considerando dos sistemas i y j , el flujo de potencia entre ambos dependerá de densidad de energía modales de cada subsistema:

$$W_{eff} = \omega \eta_j n_i \left(\frac{E_i}{n_i} - \frac{E_j}{n_j} \right) = W_{ij} - W_{ji}; \quad (2)$$

Cambiando los índices en esta relación se llega a:

$$\eta_{ij} n_i = \eta_{ji} n_j \quad (3)$$

El factor de pérdidas η_{ij} se le llama Factor de pérdidas de acoplo (*Coupling Loss Factor=CLF*).

Se define el factor de pérdidas total (*Total Loss Factor=TLF*):

$$n_i = \eta_{ii} + \sum_{j(j \neq i)} \eta_{ij} \quad (4)$$

Conviene recordar que una hipótesis generalmente asumida en la teoría de los osciladores acoplados en la llamada "acoplo débil", en el que los factores de acoplo, η_{ij} , son mucho menores que el factor de pérdidas total.

2.2 Respuesta de una estructura sometida a una excitación

La velocidad de una estructura finita sometida a una fuerza puede expresarse como:

$$v(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Phi_n(x) F_n}{(\bar{\omega}_n^2 - \omega^2)}; \quad (6)$$

$$\bar{\omega}_n^2 = \omega_n^2 (1 - j\eta)$$

Donde η es el factor de pérdidas, F_n el parámetro de excitación modal y Φ_n las funciones modales. Se puede demostrar que, despreciando términos de segundo orden, la energía cinética media se puede obtener:

$$\bar{E}_K \approx \frac{\pi |F_n^2| \Delta N}{4\eta \omega^2 \Delta \omega} \quad (7)$$

Un caso concreto de interés es aquel en el que la fuerza fuente se puede expresar en la forma:

$$F(x) = -j\omega F_0 \delta(x - x_0) \quad (8)$$

En estas condiciones

$$F_n = -j\omega \int F_0 \delta(x - x_0) \Phi_n(x) dx = -j\omega F_0 \Phi_n(x_0) \quad (9)$$

$$F_n^2 = \omega^2 F_0^2 \Phi_n^2(x_0)$$

A partir de este resultado, se puede llegar a la ecuación:

$$|F_n^2| = \dots = \omega^2 |F_0^2| / M \quad (10)$$

siendo M es la M total del sistema.

Y de los resultados anteriores

$$\bar{E}_K \approx \frac{\pi F_0^2}{4\eta\omega M} \frac{\Delta N}{\Delta\omega} \quad (11)$$

Por tanto, la velocidad cuadrática media

$$|\bar{v}^2| \approx \frac{\pi F_0^2}{2\eta\omega M^2} \frac{\Delta N}{\Delta\omega} \quad (12)$$

Y para una excitación de banda ancha:

$$|\bar{v}^2| = \frac{1}{\Delta\omega} \int |\bar{v}^2| d\omega = \frac{\pi F_0^2}{2\eta\omega_0 M^2} \frac{1}{\Delta\omega} \quad (13)$$

Es decir, un sistema con ΔN modos en la banda $\Delta\omega$, tiene la misma respuesta promedio que ΔN sistemas masa resorte con la misma resonancia.

2.3 Formulación SEA para el caso del estado estacionario

En SEA, desde el punto de vista acústico, se manejan flujos de potencia entre campos reverberantes, sea entre recintos y paredes o entre paredes y juntas. En este trabajo nos referimos en todo momento a transmisión vía estructural. La idea básica es describir la transmisión sonora en una construcción (sistema) en estado estacionario mediante el flujo de potencia entre subsistemas. Un subsistema es cualquier parte del sistema que oscila relativamente de forma independiente, y está caracterizado por una alta densidad modal en el rango de frecuencias de interés. En el estado estacionario, la energía total del subsistema i , E_i , es constante:

$$\frac{d}{dt} E_i = 0 \Rightarrow E_i = cte \quad (14)$$

Para este subsistema, la ecuación del balance de potencias puede escribirse en la forma:

$$W_{TOTALIN} = W_{TOTALOUT} \quad (15)$$

$$W_{SOURCE} + \sum_{j(j \neq i)} W_{ji} = W_{i,i} + \sum_{j(j \neq i)} W_{ij}$$

Las ecuaciones de SEA se simplifican notablemente cuando el acoplo entre elementos (subsistemas) es grande, esto es, cuando el factor de pérdidas del material es mucho más pequeño que los factores de acoplo. En efecto, el balance energético en el caso de dos elementos acoplados

$$\omega(\eta_1 + \eta_{12})M_1|v_1^2| - \omega\eta_{21}M_2|v_2^2| = 2W_{i1} \quad (16)$$

$$-\omega\eta_{21}M_1|v_1^2| + \omega(\eta_2 + \eta_{21})M_2|v_2^2| = 2W_{i2}$$

Donde W_{i2} es el flujo de potencia que llega a la frontera del subsistema 2. De aquí, podemos encontrar:

$$\frac{|v_1^2|}{|v_2^2|} = \frac{M_2}{M_1} \frac{\eta_2 + \eta_{21} + \eta_{21}(W_{i2}/W_{i1})}{\eta_{12} + (\eta_1 + \eta_{12})(W_{i2}/W_{i1})} \quad (17)$$

Para *acoplo fuerte*, esto es, η_2 mucho menor que η_{21} y η_1 mucho menor que η_{12} :

$$\frac{|v_1^2|}{|v_2^2|} \approx \frac{M_2 \eta_{21}}{M_1 \eta_{12}} = \frac{M_2 \Delta N_1}{M_1 \Delta N_2} \quad (18)$$

$$\frac{M_1 |v_1^2|}{M_2 |v_2^2|} = \frac{E_{C,1}}{E_{C,2}} \approx \frac{\Delta N_1}{\Delta N_2}$$

Las anteriores ecuaciones proporcionan las bases para la determinación experimental de los factores de acoplo.

2.4 Formulación SEA para el estado transitorio (proceso reverberante)

En contraste con el estado estacionario, la energía de cada subsistema, E_i , no es constante,

$$\frac{d}{dt} E_i \neq 0 \Rightarrow E_i \neq cte \quad (19)$$

Consideremos el subsistema i . Cuando se interrumpe el suministro energético, la energía va disminuyendo. La ecuación que describe este proceso es:

$$\frac{d}{dt} E_i(t) = \sum_{j(j \neq i)} \omega \eta_{ji} E_j - \omega \eta_i E_i = -W_{Loss,i}(t) \quad (20)$$

Si se desprecian los flujos energéticos desde otros subsistemas, entonces el término que contiene los factores de pérdidas de acoplo en la ecuación (21) desaparece y la solución para $E_i(t)$ es de tipo exponencial, esto es:

$$W_{Loss,i}(t) = -\frac{d}{dt} E_i(t) = \omega \eta_i E_i(t) \Rightarrow E_i(t) = E_{0i}(t) e^{-\omega \eta_i t} \quad (21)$$

En este caso, las curvas de caída, serían exponenciales. Sin embargo, en la mayoría de las ocasiones el flujo energético proveniente de otros subsistemas cercanos no puede despreciarse. Por ejemplo, en el caso de dos elementos acoplados, por similitud con el caso de salas acopladas, es de esperar que nos encontremos con ecuaciones para la velocidad media cuadrática en cada uno de los elementos, del tipo:

$$v_1^2(t) = v_{11}^2 e^{-\omega \eta_1 t} + v_{12}^2 e^{-\omega \eta_2 t} \quad (22)$$

$$v_2^2(t) = v_{21}^2 e^{-\omega \eta_1 t} + v_{22}^2 e^{-\omega \eta_2 t}$$

Para afrontar el problema, un planteamiento es definir un nuevo factor de pérdidas de forma que:

$$W_{Loss,i}(t) = -\frac{d}{dt} E_i(t) = \omega \eta_{Loss,i}(t) E_i(t) \quad (23)$$

En este caso el balance energético puede escribirse en la forma:

$$-\omega \eta_{Loss,i}(t) E_i(t) = \sum_{j(j \neq i)} \omega \eta_{ji} E_j(t) \quad (24)$$

Y la solución:

$$\eta_{Loss,i}(t) = \eta_i - \sum_{j(j \neq i)} \omega \eta_{ji} \frac{E_j(t)}{E_i(t)} \quad (25)$$

Este factor de pérdidas es el único que puede ser determinado experimentalmente.

En la siguiente sección se describe un setup experimental con el que es posible cuantificar este factor de pérdidas y, en pasos sucesivos será posible acercarnos al valor de los CLF.

3 DESARROLLO

Con el objeto de ajustar un modelo que nos permita determinar los coeficientes de acoplo en diferentes situaciones, se han realizado medidas en una maqueta sobre una losa de hormigón, cuya disposición se muestra en la figura 1. El forjado (suelo) es 10 cm de espesor y 240 kg/m^2 y las paredes de 5 cm de espesor y 120 kg/m^2 . En una primera instancia se han realizado medidas excitando la superficie 1. El plan de trabajo es realizar un análisis completo e ir cambiando los suelos introduciendo suelos flotantes para ir caracterizando las diferencias.

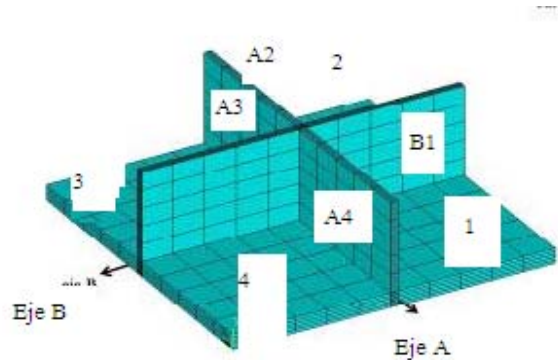


Figura 1. Cruceta (sistema) con numeración de cada una de las superficies (subsistemas).

3.1 Diferencias de velocidades entre elementos

Para excitar el subsistema 1 (suelo), se ha utilizado una caladora tal como se puede observar en la figura 2. Se ha medido, utilizando acelerómetros, en cada una de las demás superficies, la distribución de aceleraciones y velocidades. En la tabla 1 se muestran las velocidades cuadráticas promedio correspondientes a cada una de las superficies cuando la máquina de calar se aplica en la superficie 1. A modo de ilustración, en la figura 3, se presenta la distribución relativa de aceleraciones para la frecuencia de 1 kHz.

F (Hz)	Suelo 1	A1	B1	4	A4
125	2,2751e-009	7,3564e-010	4,9171e-011	2,0362e-009	2,4865e-009
160	9,2251e-009	1,9512e-010	2,7188e-010	2,0616e-009	1,0397e-010
200	3,3171e-009	1,6744e-010	5,1746e-011	1,6218e-010	3,6554e-010
250	8,1406e-010	3,9432e-010	1,438e-011	5,8289e-010	1,6292e-010
315	5,6615e-010	1,1416e-010	1,3976e-009	5,4439e-010	3,9692e-011
400	1,7026e-009	7,0599e-009	2,6149e-010	3,8778e-010	5,168e-010
500	4,5604e-010	1,6253e-009	2,0267e-011	2,1955e-010	3,3098e-010
630	2,2656e-010	1,1347e-010	1,4343e-010	8,9856e-011	3,9723e-011
800	3,158e-010	7,5166e-011	3,1314e-010	2,1655e-010	1,8973e-010
1000	1,534e-010	1,3066e-010	3,9003e-011	5,7032e-011	9,2985e-011
1250	1,9082e-010	1,3142e-010	9,9905e-011	1,4346e-010	1,1996e-010

Tabla 1 Velocidad cuadrática media de cada superficie (m/s^2) para los tercios de octava correspondientes



Figura 2. Dispositivo experimental para la medida de las diferencias de velocidades

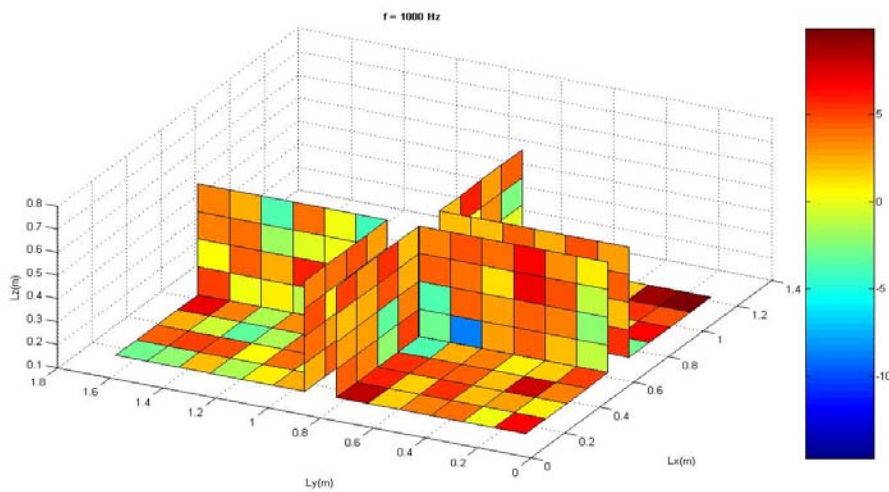


Figura 3 Distribución relativa de aceleraciones (m/s^2) al excitar en un punto de la superficie 1.

3.2 Medidas del tiempo de reverberación estructural en los diferentes subsistemas

Se han realizado medidas de tiempo de reverberación estructural aplicando un martillo de impactos en la superficie 1 y midiendo en las diferentes superficies (subsistemas) mediante acelerómetros. Al igual que en la sección anterior la cuadrícula tomada ha sido de 12 cm de largo.

A modo de ilustración, en la figura 4a) se muestran las curvas de caída promediadas para todos los puntos medidos comparando la superficie 1 y las B1 y B4 (suelo y paredes adyacentes). En la figura 4 b) se presentan las curvas de caída para las superficies 1, la 2 y la 4 (todas suelos)

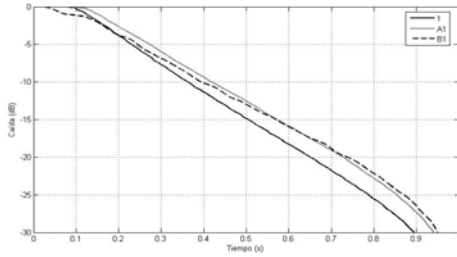


Figura 4a)

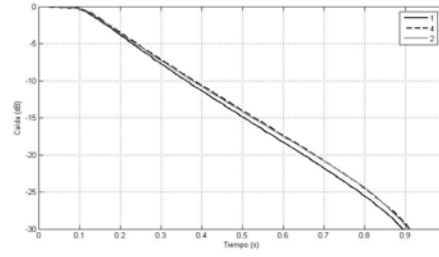


Figura 4b)

Figura 4. Curvas de caída integradas en distintas superficies. a) 1, B1 y A1 b) 1,2 y 4.

4 CONCLUSIONES

Se ha presentado un setup experimental con el que se viene trabajando en distintas líneas. El primero es el ajuste de un modelo numérico en elementos finitos y en diferencias finitas en el dominio del tiempo para cuantificar la transmisión por flancos. El segundo, que constituye el eje de este trabajo del que sólo se presentan resultados preliminares, consiste en la cuantificación de los factores de acoplo (CLF= Coupling Loss Factor) para distintas superficies y tipos de unión. Esta segunda línea de trabajo se apoya en la metodología SEA.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia (BIA2007-68098-C02-01 y BIA2007-68098-C02-02).

REFERENCIAS

- [1] DB-HR. Protección frente al ruido. Código Técnico de la Edificación. Real Decreto 1371/2007.
- [2] UNE EN 12354-1: 2000. Acústica de la edificación. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos. Parte 1: Aislamiento acústico a ruido aéreo entre recintos.
- [3] Lyon,R; Maidanik,G;Power Flow between linealy cououpled oscilator. Journal of Acoustical Society of America 34 (5),1962,pp.623-639.
- [4] Lyon,R; Eichler,E; Random vibration of connected structures. Journal of Acoustical Society of America 36 (5),1964,pp.1344-1354.
- [5] Smith, P.W.jr. Response and radiation of structural modes excited by sound. Journal of Acoustical Society of America 34 (5),1962,pp.640-647
- [6] Maidanik,G; Response of ribbed panels to reverberant acoustic fields.Journal of Acoustical Society of America 34,1962,pp.809-826.
- [7] Lyon,R; De jong,R; Theory and application of statistical energy analysis. Bututterworth-Heineman. Boston. Second Edition.1985.
- [8] Fahy,F.;7. Statistical energy analysis: An critical overview, Phil. Trans. R. Soc. Lond.A346.1994.pp. 431-447.
- [9] Christoph Kling. Investigations into damping in Building Acoustics by use of Dowscale Models.ISBN 978-8325-1985-8. <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.
- [10] Crightton, D.G.;Modern Methods in Analytical Acoustics. Lecture Notes.ISBN 3-540-19737-0 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York. Chapter 8.