

PROCEDIMIENTO PARA LA OPTIMIZACIÓN DE FORMA DE DISPOSITIVOS DE CORONACIÓN PARA MEJORA DE LA EFICACIA DE PANTALLAS ACÚSTICAS

Rayco Toledo*, Juan J. Aznárez, Orlando Maeso y David Greiner

División de Mecánica de Medios Continuos y Estructuras
Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería (SIANI)
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC)
Edificio Central del Parque Científico Tecnológico del Campus Universitario de Tafira
35017, Las Palmas de Gran Canaria, España
e-mail: {rtoledo*, jaznarez, omaeso, dgreiner}@siani.es, web: <http://www.siani.es>

Palabras clave: Pantallas Acústicas, Elemento de Contorno, Formulación Dual, Algoritmos Genéticos, Optimización de la Eficacia Acústica

Resumen. *Se presenta en esta Ponencia un procedimiento diseñado con el propósito de maximizar la eficacia de apantallamiento de barreras acústicas. Desde unos requisitos previos que definen la tipología del problema, la metodología que se presenta utiliza modelos de búsqueda de óptimos basados en Algoritmos Evolutivos que permiten seleccionar y ajustar los parámetros del problema en el sentido de obtener diseños mejorados. Este proceso requiere evaluar acústicamente a cada individuo posible y para ello se hace uso del Método de los Elementos de Contorno (MEC), muy adaptado al estudio de problemas de propagación exterior. En este trabajo se realiza un estudio numérico de pantallas acústicas con configuraciones de borde que presentan pozos con distintas profundidades. Caracterizados por diseños complejos, estos dispositivos habitualmente combinan estructuras volumétricas con elementos muy delgados que sugieren una simplificación geométrica apropiada a efectos de facilitar el proceso de optimización. De este modo, la eficacia acústica de estos diseños puede ser convenientemente analizada a través de una formulación Dual del MEC que, frente a la formulación estándar, permitiría 1) evitar las frecuencias espurias asociadas a las estructuras volumétricas y 2) simplificar e idealizar las estructuras de espesor muy pequeño como elementos de espesor nulo. Los resultados que se presentan muestran la flexibilidad, robustez y polivalencia de la metodología presentada.*

1. INTRODUCCIÓN

La inclusión de pantallas acústicas es una estrategia muy utilizada para minimizar los efectos negativos que el ruido de tráfico genera en áreas residenciales. En los últimos años,

el Método de los Elementos de Contorno (MEC en adelante) ha sido utilizado ampliamente en el estudio de la difracción del sonido sobre el contorno de la barrera así como herramienta en procedimientos para la predicción del comportamiento y el desarrollo de diseños más eficientes. Así, en [1] puede consultarse una revisión actualizada de referencias en las que se aplica esta técnica para predecir la eficacia acústica en situaciones diversas y sobre distintos diseños de pantallas anti-ruido. Muchos de estos trabajos se centran en la aplicabilidad y posibilidades de la formulación estándar del MEC para este problema. En otros se aborda la incorporación de algunos cambios sobre geometrías clásicas (en forma de **Y**, de **T**, de **M**, de flecha, de múltiples bordes, etc ...) y el análisis de su influencia en la eficacia de esta medida. En este sentido, y para el desarrollo de geometrías de pantallas acústicas más eficientes, los procedimientos y métodos para la optimización de forma utilizados en otros ámbitos de la ingeniería se presentan como una herramienta de aplicación. Tal es el caso de los Algoritmos Evolutivos (AE) y, de entre ellos, los Algoritmos Genéticos (AG), los cuales ya se han aplicado conjuntamente con el MEC de manera exitosa en los últimos años en la optimización del diseño de pantallas en problemas de acústica exterior. Existen aportaciones notables en la bibliografía en este ámbito. Así, en un estudio de marcado carácter académico, Duhamel [2] propone la optimización de forma de una barrera partiendo de una estructura volumétrica prismática dividida en bloques de idéntico tamaño, cuya forma final optimizada está conformada por una estructura sin huecos internos en la que algunos de los bloques de la configuración inicial permanecen y otros desaparecen, de acuerdo con los patrones marcados por el proceso evolutivo. Otras aportaciones interesantes, sin embargo, poseen un enfoque más práctico. En este sentido, Baulac et al. [3] presentan un método original de optimización de pantallas bidimensionales de múltiples bordes basado en el ajuste de algunos parámetros geométricos y de los valores de impedancia de algunos contornos. Los mismos autores estudian el comportamiento de barreras tipo **T** caracterizadas por disponer en su parte superior distintas configuraciones de pozos tratados con superficies absorbentes [4]. También con un enfoque práctico, Grubeša et al. [5] amplían estas metodologías a problemas tridimensionales y realizan el estudio de una optimización tanto del comportamiento acústico como de la viabilidad económica de una pantalla acústica construida a partir de diferentes módulos de sección variable. Relativo a los autores de este trabajo, en Greiner et al. [6] se desarrolla un protocolo en la línea del que aquí se presenta y que permite llevar a cabo el proceso de optimización (mono- y multi-objetivo) en problemas 2D. Más reciente, este trabajo se amplía a la optimización de pantallas de pequeño espesor haciendo uso de la formulación Dual del MEC (Toledo et al. [7]).

El procedimiento propuesto en este trabajo emplea la formulación Dual del MEC en el dominio de la frecuencia combinado con un AG en la optimización de diseños complejos de pantallas con configuraciones de borde que combinan estructuras volumétricas con elementos muy delgados que sugieren una simplificación geométrica apropiada, mediante su consideración matemática como elementos de espesor nulo, a efectos de facilitar el proceso de optimización. En este sentido, debe verse la necesidad de la formulación Dual

como la única estrategia posible desde el MEC que permite 1) adoptar esta simplificación de la realidad, facilitando enormemente el tratamiento de configuraciones complejas sin que ello introduzca errores apreciables para los espesores de pantalla tratados [8], y 2) evitar las frecuencias espurias asociadas al dominio interior de la barrera.

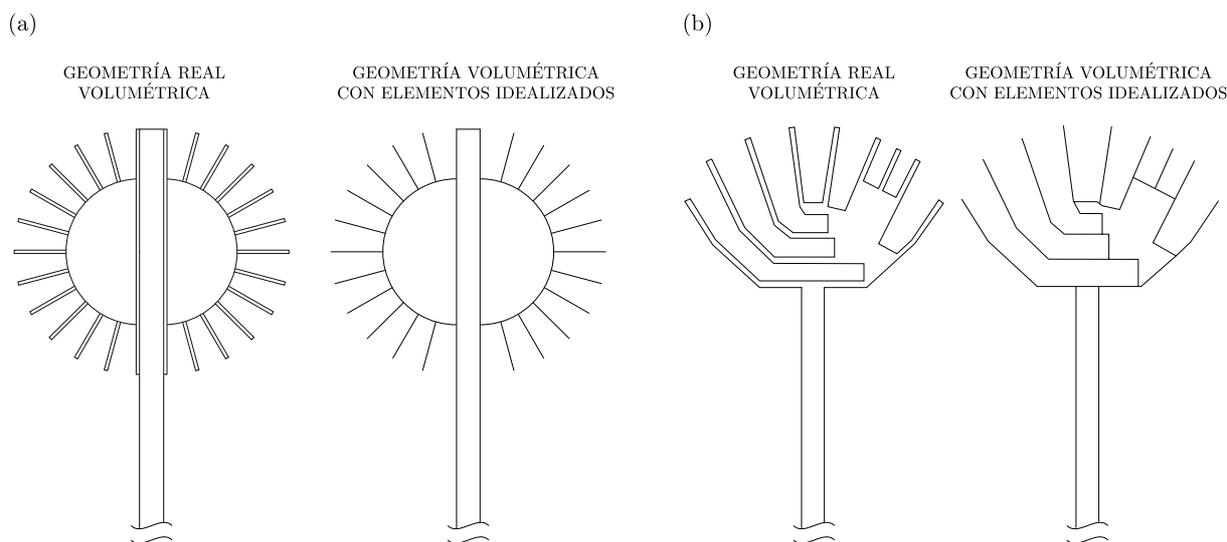


Figura 1: Ejemplos de diseños que sugieren realizar algún tipo de simplificación geométrica. (a) Dispositivo radial de borde propuesto por Okubo and Fujiwara [9]. (b) Dispositivo de borde con pozos de distintas trayectorias y profundidades [10].

El estudio presentado aborda el fenómeno como un problema de propagación bidimensional y en el dominio de la frecuencia, esto es, el ruido es causado por una fuente mono-frecuencia e infinita que discurre paralelamente a una pantalla que presenta una estructura volumétrica combinada con elementos de sección muy delgada y longitud igualmente infinita que yace sobre un semiespacio de admitancia uniforme (ver Figura 2). A partir de la respuesta en frecuencia y un espectro de ruido que caracterice la fuente, puede expresarse la función de optimización de forma sencilla.

El Lector podrá comprobar que la metodología aquí propuesta permite obtener soluciones acústicas interesantes evitando la complejidad asociada a la generación geométrica de pantallas volumétricas.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO PROPUESTO

La Figura 2 muestra la configuración general objeto de estudio. Como ya se ha adelantado, se trata de un problema de propagación 2D asociado a una fuente de sonido monofrecuencia e infinita (matemáticamente representada por la función delta de Dirac) situada paralelamente a una barrera acústica que combina estructuras volumétricas con elementos muy delgados y que se encuentra sobre un plano (suelo) de admitancia uniforme. En este trabajo tanto el suelo como la barrera presentan una superficie perfectamente

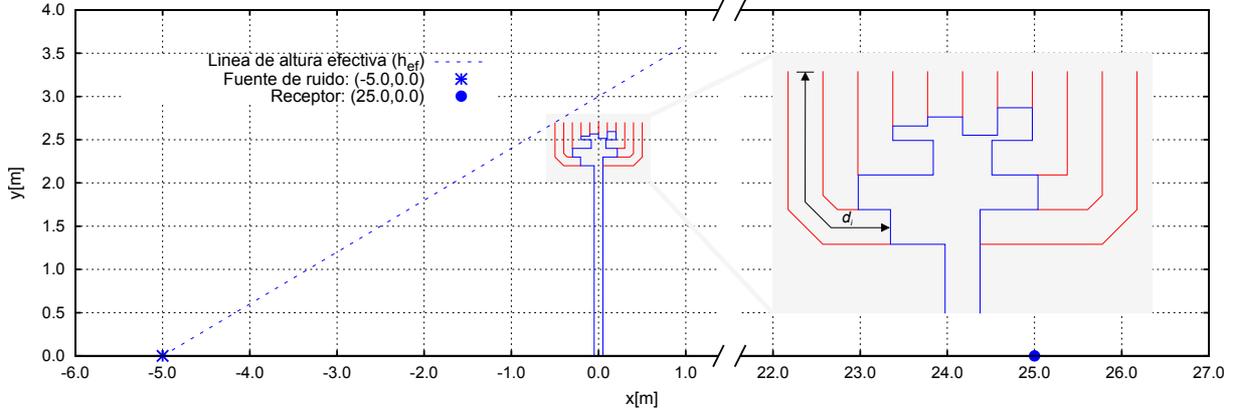


Figura 2: Configuración bidimensional empleada en el proceso de optimización de forma de las pantallas acústicas en este trabajo. Ejemplo de perfil genérico del dispositivo de borde propuesto, compuesto por pozos de distintos trayectos y profundidades (d_i). Para facilitar la visualización de la geometría, los elementos de espesor no despreciable se representan en azul mientras que los elementos muy delgados se idealizan como elementos sin espesor y se representan en rojo.

reflejante ($\beta_s = \beta_b = 0$). El ancho de la barrera viene determinada por las dimensiones del dispositivo estudiado (ver Figura 3) y es igual a 1.0 m. Asimismo, la altura máxima efectiva que se permite alcanzar es $h_{ef} = 3.0$ m en el eje medio de la pantalla. La función objetivo (FO) se evalúa en un único receptor situado en el lado de sombra. Tanto la fuente de ruido como el receptor se sitúan sobre el suelo separados 5.0 m y 25.0 m del eje central de la región factible, respectivamente.

Se presenta en este trabajo un modelo de pantalla acústica basado en una configuración volumétrica que incluye elementos de sección muy delgada en la zona de coronación. Se trata de un diseño definido por un conjunto de pozos de distintas profundidades y trayectorias, separados por elementos muy delgados situados sobre el pie de una barrera de 0.1 m de espesor. El resto de dimensiones pueden consultarse en la Figura 3, así como los límites del modelo relativos a las máximas y mínimas profundidades asociadas a cada pozo del diseño. Con el propósito tanto de evitar la problemática relativa a los aspectos numéricos de los núcleos de integración de las matrices de la formulación, así como de facilitar la definición geométrica de los modelos se considera, a efectos matemáticos, la idealización de los elementos muy delgados como elementos de sección nula (elementos unifilares).

Como ya se ha comentado, la optimización de forma se lleva a cabo mediante el acoplamiento de un AG y la formulación Dual del MEC. Para el AG en este trabajo se utiliza el software libre GALib [11], una colección de componentes de algoritmos genéticos (AG) escritos en lenguaje C++. A través de la maximización de la eficacia de apantallamiento en el receptor, el proceso se centra en la búsqueda de diseños cuyas profundidades de pozos se seleccionan dentro de un rango discreto de valores, tanto para configuraciones simétricas como no simétricas del modelo presentado en este trabajo. El cromosoma de

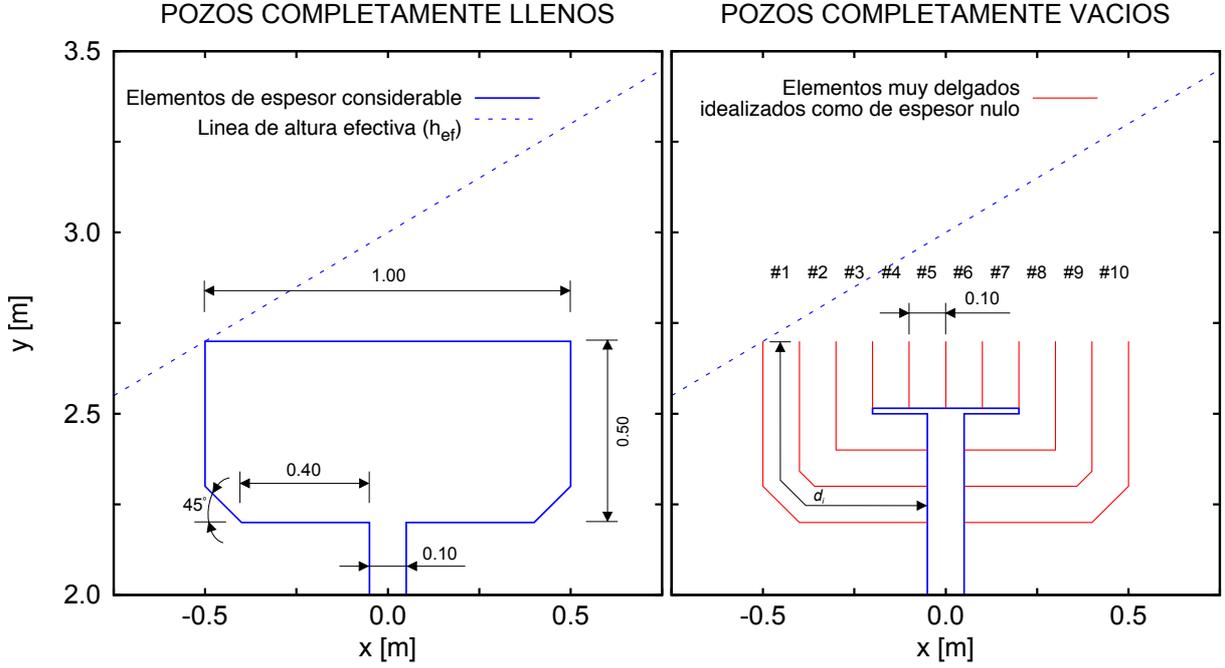


Figura 3: Diseño del dispositivo de borde propuesto en este trabajo. Izquierda, configuración que presenta únicamente elementos de espesor no despreciable por disponer todos sus pozos completamente llenos ($d_i = 0,00$ m). Derecha, configuración que combina una estructura volumétrica con elementos muy delgados que dividen pozos que presentan la máxima profundidad posible ($d_1 = d_{10} = 0,808$ m; $d_2 = d_9 = 0,643$ m; $d_3 = d_8 = 0,350$ m; $d_4 = d_5 = d_6 = d_7 = 0,185$ m). Dimensiones expresadas en metros.

cada individuo queda pues definido a partir de las profundidades de cada pozo, codificadas mediante variables binarias de distinta precisión. Las longitudes de los pozos #1, #2 y #3, así como sus correspondientes simétricos, han sido codificadas con variables de 5 bits de precisión (32 valores discretos y equidistantes en los rangos 0-0.808 m, 0-0.643 m y 0-0.350 m respectivamente), mientras que las de los pozos #4 y #5 y sus simétricos se codifican con variables de 3 bits (8 valores discretos y equidistantes en el rango 0-0.185 m). De este modo, la longitud del cromosoma para configuraciones simétricas es de $n_{ch} = 21$. En configuraciones no simétricas la longitud del cromosoma es, lógicamente, el doble.

A partir de la respuesta en frecuencia en el receptor estudiado y el espectro de ruido utilizado para la fuente, la eficacia acústica de la pantalla puede representarse como sigue:

$$\overline{\text{IL}} = -10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\sum_{i=1}^{\text{NF}} 10^{(A_i - \text{IL}_i)/10}}{\sum_{i=1}^{\text{NF}} 10^{A_i/10}} \right) \text{ [dBA]} \quad (1)$$

siendo NF el número de frecuencias centrales de banda del espectro considerado, A_i el nivel

de ruido ponderado del espectro e IL_i el coeficiente de pérdida por inserción de la barrera para cada una de estas frecuencias, definido, como es conocido:

$$IL = -20 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_B}{P_{HS}} \right) [\text{dB}] \quad (2)$$

donde P_B y P_{HS} son las presiones acústicas en el receptor con y sin pantalla, respectivamente.

Para garantizar la conservación de la intensidad acústica, el espectro normalizado de ruido de automóviles, ponderado A, definido por la UNE-EN 1793-3:1997 [12] (el mismo empleado por el Código Técnico de la Edificación de España (CTE) [13]) y caracterizado para frecuencias centrales de 1/3 de octava se expande a 1/15 de octava en el rango de 100 a 5 000 Hz. De este modo, la fuerte variabilidad en el comportamiento acústico que los dispositivos como el presentado en este trabajo presentan con la frecuencia queda más fielmente representada. La expresión de la FO que se pretende maximizar puede expresarse como sigue:

$$FO = \overline{IL} \quad (3)$$

Con el propósito de facilitar la comprensión de la metodología, la Figura 4 muestra en un diagrama de flujo el proceso evolutivo que tiene lugar en la búsqueda de los mejores diseños acústicos. Dicho proceso hace uso de un AG de *estado estacionario* que posibilita el reemplazo de los peores individuos (en términos de su función objetivo) en cada generación, comprendida por un total de 100 individuos obtenidos, inicialmente, mediante la propuesta aleatoria de las variables de diseño del modelo que se presenta, representadas en este caso por valores discretos de profundidades de pozos. Las geometrías a estudiar se definen a partir de dichas variables, que conforman el cromosoma del individuo propuesto por el AG, y que caracterizan de este modo su diseño topológico. Ya en este punto se analiza la eficacia acústica de cada uno de estos individuos a partir de los resultados obtenidos de la utilización del código MEC Dual mencionado. Para ello es necesaria la discretización de la geometría con un número de elementos creciente con la frecuencia. En este trabajo se hace uso de elementos parabólicos (elementos de 3 nodos) cuya longitud máxima, para obtener una adecuada convergencia en los resultados, debe ser inferior a la mitad de la longitud de onda correspondiente a la frecuencia analizada. La población inicial se ordena entonces en términos de la eficacia de apantallamiento de los individuos, representada por el valor de la función objetivo (FO) caracterizada, a su vez, por el IL promedio espectral (\overline{IL}) (ver Ecuación 1). A cada individuo se le confiere entonces mayor probabilidad de ser seleccionado en base a su comportamiento acústico (FO). Así, haciendo uso del operador de *selección por torneo*, se escogen dos individuos (*progenitores* en terminología propia de algoritmos genéticos) que se cruzarán con un 90 % de probabilidad mediante el operador de *cruce en dos puntos*, dando lugar a dos individuos distintos (*hijos*) cuyo genoma puede ser mutado, igualmente, atendiendo a criterios probabilísticos. Estos dos nuevos individuos son evaluados y reemplazarán a los dos peores de la población

precedente si mejoran su comportamiento acústico dando lugar, de este modo, a sucesivas poblaciones con individuos más eficientes en los términos que se estudian. Este proceso iterativo continúa hasta alcanzar las 500 generaciones, condición de parada impuesta ante la necesidad de encontrar una solución de compromiso entre los recursos computacionales y una aceptable convergencia acústica y geométrica de los individuos de la población final. Con cada modelo se llevan a cabo 5 ejecuciones independientes de este proceso evolutivo.

3. MODELIZACIÓN Y DISCRETIZACIÓN

En esta sección se introduce la formulación Dual del MEC que permite el tratamiento numérico de pantallas que combinan estructuras volumétricas con elementos muy delgados que pueden ser considerados, de manera ideal, como elementos de espesor nulo. La especial naturaleza de las barreras que aquí se estudian requiere de la inclusión de una formulación complementaria (hipersingular) que, combinada con la formulación convencional del Método, de lugar a un sistema de ecuaciones compatible.

3.1. Formulación Dual del MEC

Tal y como se ha comentado con anterioridad, la formulación Dual del MEC permite por 1) adoptar esta simplificación de la realidad, facilitando enormemente el tratamiento de configuraciones complejas sin que ello introduzca errores apreciables para los espesores de pantalla tratados [8], y 2) evitar las frecuencias espurias asociadas al dominio interior de la barrera. Se presenta a continuación la formulación del Método que permite abordar las situaciones anteriores.

3.1.1. MEC Dual para evitar las frecuencias espurias

La aplicación de la formulación estándar del MEC en análisis de barreras que presentan contornos con espesores no despreciables puede conducir a una interpretación incorrecta de los resultados, al asociar valores picos de IL a determinadas frecuencias con un comportamiento acústico propio de la pantalla estudiada. Estos efectos de naturaleza puramente matemática representan las frecuencias propias (frecuencias naturales) del problema de acústica interior (los autovalores de las matrices de la formulación clásica del Método), pudiendo falsear de este modo el valor obtenido para la función objetivo que calcula la calidad del apantallamiento. La experiencia previa adquirida revela que el problema se agrava a medida que evoluciona el proceso de búsqueda, en tanto que el AG seleccionará individuos con valores picos de IL que, para tales frecuencias naturales, presenten mayor relevancia en la función objetivo. Con el propósito de solucionar esta problemática, Burton y Miller [14] proponen una formulación Dual del Método basada en el uso combinado de la Ecuación Integral en el Contorno Singular (EICS) y de la Ecuación Integral en el Contorno Hipersingular (EICH), relacionadas mediante un valor complejo dependiente de la frecuencia. La expresión para un punto del contorno i para ser calculado mediante el MEC puede expresarse como sigue:

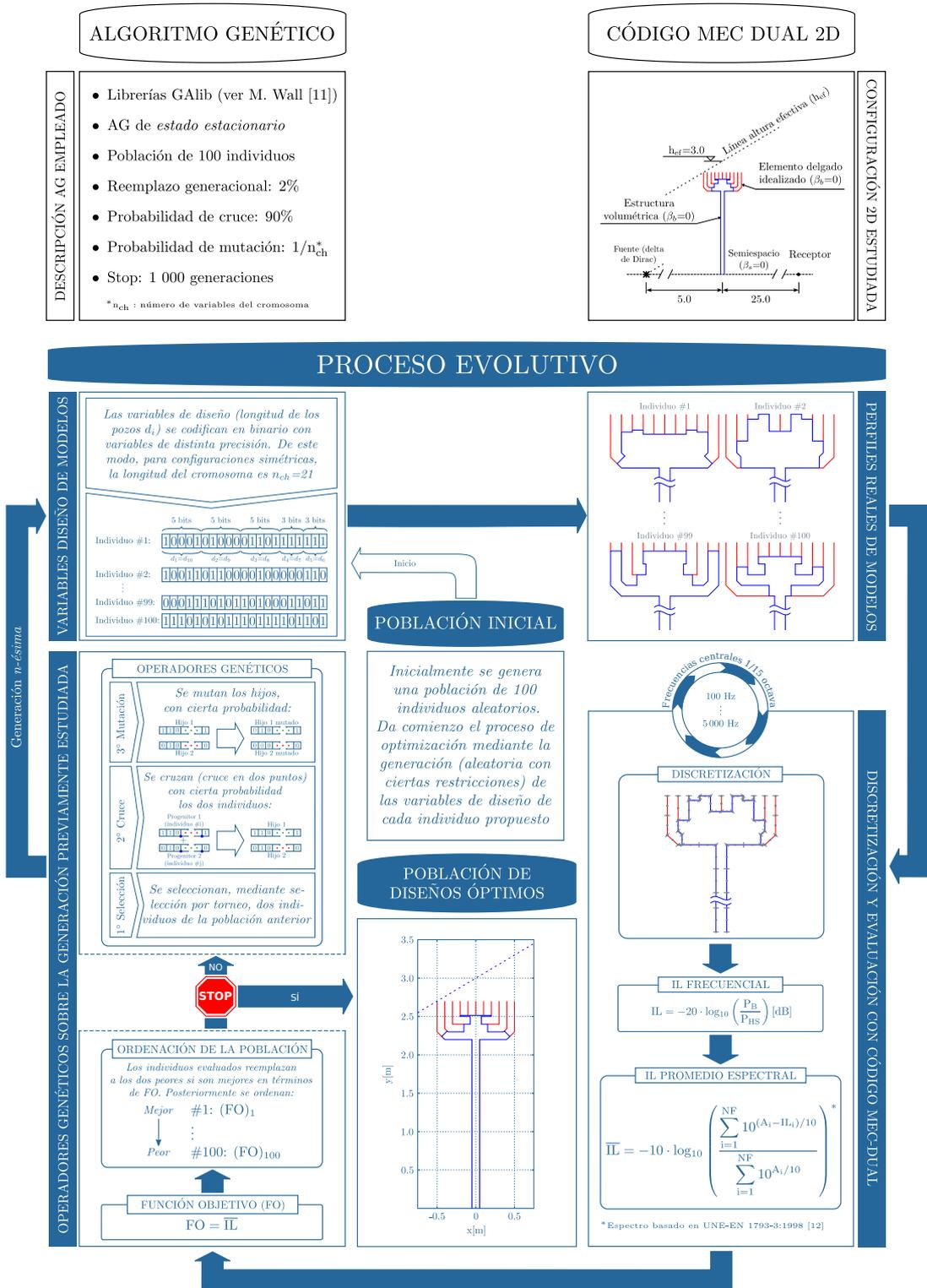


Figura 4: Características del algoritmo genético empleado, descripción del problema estudiado y diagrama de flujo de la optimización.

$$c_i (p_i + \alpha q_i) + \sum_{j=1}^N (h_j + \alpha m_j) p_k^j = \sum_{j=1}^N (g_j + \alpha l_j) q_j + \left(G_0 + \alpha \frac{\partial G_0}{\partial n_i} \right) \quad (4)$$

Siendo p el campo de presiones acústica en la superficie de la barrera, q el flujo (la derivada de la presión respecto de la normal en el contorno) y G_0 , $\frac{\partial G_0}{\partial n_i}$ la solución fundamental para el semi-espacio y su derivada para la fuente externa de ruido, respectivamente. Finalmente, h , g son los núcleos de integración de la formulación clásica del MEC, y l , m los propios de la formulación hipersingular, los cuales dependen únicamente de la variables del problema a lo largo del contorno discretizado de la barrera con N nodos. El valor más ampliamente utilizado en la bibliografía para relacionar ambas ecuaciones integrales del Método se corresponde con $\alpha = i/k$ [15], con i siendo la unidad imaginaria y k el número de onda. Para contornos suaves, el término libre es $c_i = 0,5$. En el caso de la EICS es necesaria la colocación no nodal en los extremos libres de los contornos. De igual manera, la formulación hipersingular exige que la colocación del punto j sea en el interior del elemento. Así, se asume el valor de 0.5 para el término libre en todos los casos.

La capacidad de absorción de la barrera habitualmente queda determinada mediante la condición de contorno tipo Robin, de manera que el valor de la presión y su derivada en cada nodo quedan relacionados de la siguiente manera:

$$q_j = -i k \beta_\Gamma p_j \quad (5)$$

De esta manera, (4) puede ser expresada matricialmente como sigue:

$$\left(\frac{1}{2} (1 + \beta) \mathbf{I} + \mathbf{H} + (i/k) \mathbf{M} + (i k \mathbf{G} - \mathbf{L}) \beta \right) \cdot \mathbf{P} = \mathbf{G}_0 - (i/k) \frac{\partial \mathbf{G}_0}{\partial n_i} \quad (6)$$

siendo \mathbf{I} la matriz identidad.

3.1.2. MEC Dual aplicado a elementos muy delgados

El tratamiento de configuraciones que presentan elementos muy delgados mediante la formulación clásica del Método puede dar lugar a problemas numéricos relativos a los núcleos de integración de las matrices, afectando, de igual modo, a la eficacia acústica de la pantalla. La idealización matemática de estos elementos como elementos unifilares (elementos de espesor nulo) no sólo resuelve esta problemática sino que al mismo tiempo facilita la generación geométrica del perfil a estudiar. Con este fin, la EICS y la EICH se aplican por separado en todo el contorno de la barrera.

La Figura 5(a) representa una idealización de un elemento muy delgado de carácter genérico sobre el que se aplica la formulación Dual del MEC. Tras el proceso de discretización, se obtienen los valores de la presión y el flujo, con respecto a la normal del contorno, a ambos lados de los nodos de la discretización (p^+ , q^+ , p^- , q^- en adelante). La Figura 5(b) representa la estrategia empleada para aislar la singularidad del Método

en este tipo de dominios. Así, la expresión de la formulación del MEC para este tipo de contornos puede ser expresada:

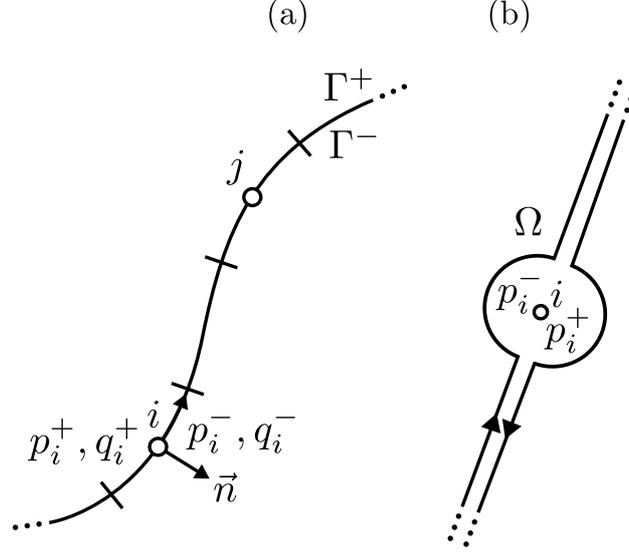


Figura 5: (a) Idealización de una sección genérica de un elemento muy delgado de una pantalla tratado como un elemento sin espesor. (b) Estrategia empleada para evitar la singularidad entorno al punto de colocación en la formulación Dual del MEC (ver e.g. [16]).

$$c_i (p_i^+ + p_i^-) + \sum_{j=1}^N (H_j^+ p_j^+ + H_j^- p_j^-) = \sum_{j=1}^N (G_j^+ q_j^+ + G_j^- q_j^-) + G_0(k, r) \quad (7)$$

siendo N el número total de nodos de la discretización en el contorno. Asumiendo que $n^+ = -n^-$, se demuestra fácilmente que:

$$H_j^+ = -H_j^- \quad ; \quad G_j^+ = G_j^- \quad (8)$$

Considerando la condición de contorno tipo Robin, se puede expresar matricialmente:

$$\left(\frac{1}{2} \mathbf{I}^* + \mathbf{H} + i k \beta \mathbf{G} \right) \cdot \mathbf{P} = \mathbf{G}_0 \quad (9)$$

siendo \mathbf{I}^* una matriz que contiene la contribución del término libre a ambos lados de los nodos de la discretización.

De acuerdo a la Figura (5), la expresión de la formulación hipersingular para este tipo de geometrías puede expresarse como:

$$c_i \left(\frac{\partial p_i^+}{\partial n_i^+} + \frac{\partial p_i^-}{\partial n_i^+} \right) + \sum_{j=1}^N (M_j^+ p_j^+ + M_j^- p_j^-) = \sum_{j=1}^N (L_j^+ q_j^+ + L_j^- q_j^-) \quad (10)$$

donde:

$$\frac{\partial p_i^-}{\partial n_i^+} = -q_i \quad ; \quad M_j^+ = -M_j^- \quad ; \quad L_j^+ = L_j^- \quad (11)$$

Finalmente, considerando la condición de contorno tipo Robin se obtiene la siguiente expresión matricial:

$$\left[i k \beta \left(\frac{1}{2} \mathbf{I}^* + \mathbf{L} \right) + \mathbf{M} \right] \cdot \mathbf{P} = \frac{\partial \mathbf{G}_0}{\partial n_i} \quad (12)$$

Si se desea un mayor nivel de detalle en relación con los aspectos numéricos de dicha formulación, puede consultarse [17–19].

3.1.3. MEC Dual en configuraciones volumétricas con elementos muy delgados

De acuerdo a los anteriores subapartados y llamando:

$$\mathbf{A}_1 = \frac{1}{2} (1 + \beta) \mathbf{I} + \mathbf{H} + (i/k) \mathbf{M} + (i k \mathbf{G} - \mathbf{L}) \beta \quad (13)$$

$$\mathbf{A}_2 = \frac{1}{2} \mathbf{I}^* + \mathbf{H} + i k \beta \mathbf{G} \quad ; \quad \mathbf{A}_3 = i k \beta \left(\frac{1}{2} \mathbf{I}^* + \mathbf{L} \right) + \mathbf{M} \quad (14)$$

$$\mathbf{B}_1 = \mathbf{G}_0 - (i/k) \frac{\partial \mathbf{G}_0}{\partial n_i} \quad ; \quad \mathbf{B}_2 = \mathbf{G}_0 \quad ; \quad \mathbf{B}_3 = \frac{\partial \mathbf{G}_0}{\partial n_i} \quad (15)$$

la expresión matricial final del MEC Dual para barreras que combinan estructuras volumétricas con elementos muy delgados se puede expresar como sigue:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_2 \\ \mathbf{A}_3 \end{bmatrix} \cdot \left\{ \mathbf{P} \right\} = \left\{ \begin{matrix} \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{B}_2 \\ \mathbf{B}_3 \end{matrix} \right\} \quad (16)$$

En (16), la matriz \mathbf{A}_1 tiene de dimensión $N_{Thick} \times N_{Total}$. \mathbf{A}_2 y \mathbf{A}_3 son de dimensión $N_{Thin} \times N_{Total}$, siendo N_{Thick} y N_{Thin} el número total de nodos de la discretización relativos a los contornos pertenecientes a estructuras volumétricas y a elementos muy delgados, respectivamente, y N_{Total} el total de nodos de la discretización completa de todo el contorno. Por lo tanto, \mathbf{P} se trata de un vector de dimensión N_{Total} que almacena los valores de presión de cada variable del problema, \mathbf{B}_1 es un vector de dimensión N_{Thick} y $\mathbf{B}_2, \mathbf{B}_3$ son de dimensión N_{Thin} .

Una vez obtenidas las variables del problema, se puede hallar fácilmente el valor de la presión en cualquier punto del dominio mediante la aplicación de la expresión para puntos internos:

$$p_i = G_0(k, r) - \sum_{j=1}^{N_{Total}} (h_j + i k \beta g_j) p_j \quad (17)$$

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados incluidos en este apartado muestran los diseños del mejor perfil optimizado del modelo propuesto, así como un estudio en frecuencias de los valores de IL comparados con los propios de la pantalla simple de $h_{ef} = 3.0$ m y con los diseños del modelo presentado correspondiente a la configuración con pozos totalmente llenos y totalmente vacíos (ver Figura 6), para el mismo esquema fuente-receptor. En la parte izquierda de la Figura 7 se muestran las geometrías óptimas de la configuración simétrica y de la no simétrica. En la parte derecha se representa la evolución del IL frecuencial para el espectro considerado de las geometrías anteriormente mencionadas.

La Tabla 1 muestra los valores de las longitudes de pozos de los diseños óptimos para cada configuración y ejecución del proceso de optimización. La fila $\Delta \overline{IL}_{Simple}$ representa la ganancia de eficacia acústica de estos diseños respecto de la pantalla recta de $h_{ef} = 3.0$ m con el mismo esquema fuente-receptor. Las geometrías de los diseños que aquí se recogen pueden consultarse en la Figura 7.

Tabla 1: Variables de diseño d_i (en centímetros) de los perfiles óptimos (ver Figura 7) y ganancia de eficacia acústica (en [dBA]) para cada ejecución y configuración.

Ejecución	Simétrico					No simétrico				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
d_1	46.95	41.73	44.34	44.34	57.38	33.91	75.64	78.25	52.17	36.52
d_2	55.99	51.85	53.92	53.92	43.55	47.70	55.99	64.29	43.55	49.77
d_3	30.48	33.87	32.74	32.74	32.74	30.48	31.61	22.58	28.23	35.00
d_4	18.50	18.50	18.50	18.50	18.50	18.50	10.57	18.50	0.00	18.50
d_5	15.86	18.50	18.50	18.50	18.50	15.86	18.50	18.50	15.86	13.21
d_6	15.86	18.50	18.50	18.50	18.50	18.50	18.50	18.50	18.50	15.86
d_7	18.50	18.50	18.50	18.50	18.50	10.57	13.21	18.50	15.86	18.50
d_8	30.48	33.87	32.74	32.74	32.74	33.87	22.58	29.36	30.48	29.36
d_9	55.99	51.85	53.92	53.92	43.55	60.14	60.14	51.85	64.29	62.22
d_{10}	46.95	41.73	44.34	44.34	57.38	41.73	44.34	41.73	67.82	80.86
$\Delta \overline{IL}_{Simple}$	+4.76	+4.82	+4.82	+4.82	+4.81	+4.95	+5.02	+5.09	+4.91	+5.03

A la luz de los resultados obtenidos se realiza el siguiente análisis en relación al comportamiento acústico del modelo presentado en este trabajo:

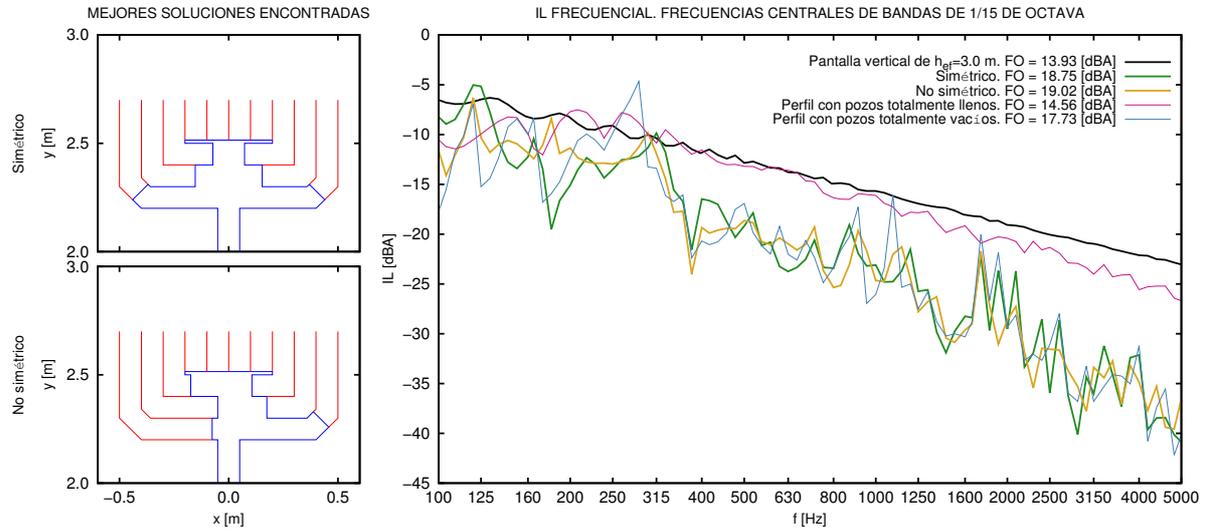


Figura 6: Resultados para los mejores individuos tras el proceso de optimización para cada configuración. Izquierda, diseños de las mejores soluciones encontradas. Derecha, evolución del IL frecuencial en el espectro considerado de los diseños mencionados, los diseños con configuración de pozos completamente llenos y completamente vacíos (ver Figura 3), así como para la pantalla recta de $h_{ef} = 3.0$ m.

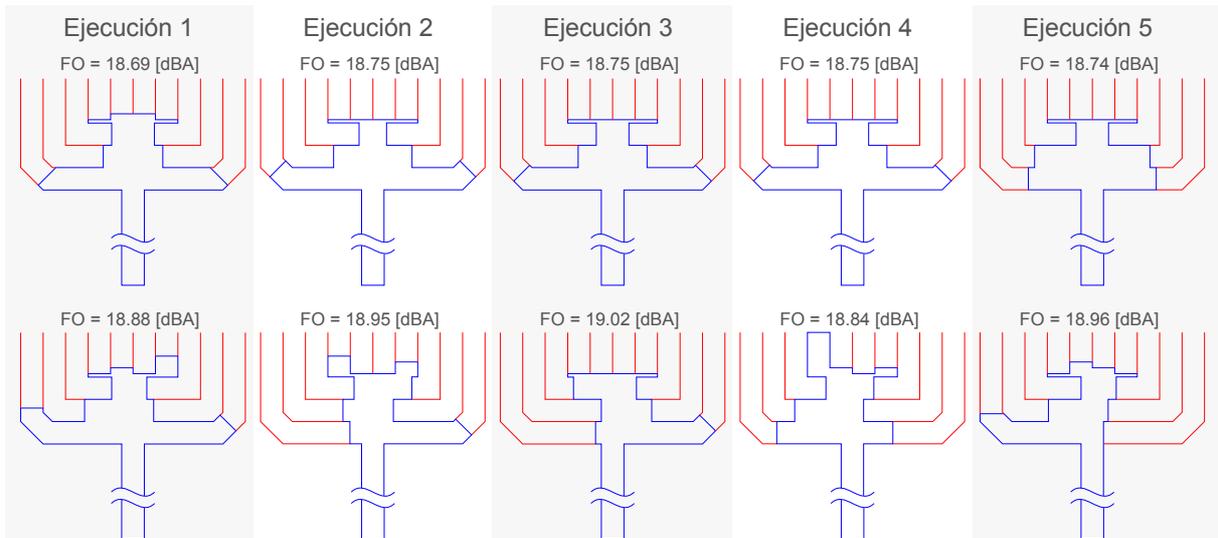


Figura 7: Diseños óptimos de cada ejecución para la configuración simétrica y no simétrica.

- La eficacia de apantallamiento del modelo estudiado supera con claridad el comportamiento acústico presentado por la pantalla recta de referencia de $h_{ef} = 3.0$ m, para el mismo esquema fuente-receptor. La localización lejana del receptor y el buen comportamiento incluso a bajas frecuencias del diseño propuesto hace que este hecho adquiera aún más relevancia.

- De los resultados de ambas configuraciones se concluye que los perfiles óptimos simétricos y no simétricos presentan un comportamiento acústico similar (una ganancia de 0.3 dBA de media a favor de las configuraciones no simétricas), para el número de generaciones considerado.
- A pesar de la fuerte variabilidad en el comportamiento acústico que los dispositivos como el presentado en este trabajo presentan con la frecuencia, los diseños óptimos presentan curvas de IL más suaves que su correspondiente diseño con pozos completamente vacíos, aunque con una mejor eficacia de apantallamiento.

5. CONCLUSIONES

Se ha presentado en este trabajo un protocolo para la optimización del diseño de un modelo de pantalla acústica con configuración de borde que combina una estructura volumétrica con elementos muy delgados que sugieren una simplificación geométrica, mediante su consideración matemática como elementos de espesor nulo, a efectos de facilitar el proceso. El procedimiento hace uso de un AG en el proceso de búsqueda y un código MEC Dual como herramienta para el cálculo de la respuesta acústica de las geometrías propuestas a lo largo de este proceso. La metodología aquí presentada se basa en la maximización de la eficacia acústica del modelo anterior a través de la búsqueda de diseños cuyas profundidades de pozos se seleccionan dentro de un rango discreto de valores, tanto para configuraciones simétricas como no simétricas. Los resultados muestran que a pesar del comportamiento fuertemente dependiente con la frecuencia de los dispositivos con estructuras tipo pozos en la zona de difracción de las barreras, los diseños óptimos presentan curvas de IL más suaves que su correspondiente diseño con pozos completamente vacíos, aunque con una mejor eficacia de apantallamiento.

El código que implementa la formulación Dual del Método de los Elementos de Contorno que se ha presentado permite el tratamiento simple de geometrías complejas de pantallas que combinan estructuras volumétricas con elementos muy delgados que pueden ser considerados, de manera ideal, como elementos de espesor nulo. Esto supone una ventaja considerable respecto del tratamiento de geometrías reales volumétricas, donde el proceso encargado de determinar la validez topológica de los individuos propuestos por un algoritmo evolutivo resulta complejo y exige, frecuentemente, considerar diversas situaciones particulares.

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado con la financiación de la Subdirección General de Proyectos de Investigación del Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) y del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) a través del proyecto de investigación BIA2010-21399-C02-01. Rayco Toledo es beneficiario de una beca del Subprograma de Ayudas para la Formación de Personal Investigador en Formación (FPI-MICINN), a través de la ayuda

con referencia BES-2011-046946, otorgada por el Ministerio de Ciencia e Innovación. Los autores de este trabajo agradecen el apoyo recibido.

REFERENCIAS

- [1] O. Maeso, J. J. Aznárez, Estrategias para la reducción del impacto acústico en el entorno de carreteras. Una aplicación del Método de los Elementos de Contorno, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 2005, ISBN: 84-689-0340-X. doi:846890340X. URL <http://hdl.handle.net/10553/1500>
- [2] D. Duhamel, Shape optimization of noise barriers using genetic algorithms, *Journal of Sound and Vibration* 297 (1-2) (2006) 432–443.
- [3] M. Baulac, J. Defrance, P. Jean, Optimization of multiple edge barriers with genetic algorithms coupled with a Nelder-Mead local search, *Journal of Sound and Vibration* 300 (1-2) (2007) 71–87.
- [4] M. Baulac, J. Defrance, P. Jean, Optimization with genetic algorithm of the acoustic performance of T-shaped noise barriers with a reactive top surface, *Applied Acoustics* 69 (4) (2008) 332–342.
- [5] S. Grubeša, K. Jambrošić, H. Domitrović, Noise barriers with varying cross-section optimized by genetic algorithms, *Applied Acoustics* 73 (11) (2012) 1129–1137.
- [6] D. Greiner, J. J. Aznárez, O. Maeso, G. Winter, Single- and multi-objective shape design of Y-noise barriers using Evolutionary computation and Boundary Elements, *Advances in Engineering Software* 41 (2) (2010) 368–378.
- [7] R. Toledo, J. J. Aznárez, O. Maeso, D. Greiner, Optimization of thin noise barrier designs using Evolutionary Algorithms and a Dual BEM Formulation, *Journal of Sound and Vibration* 334 (2015) 219–238.
- [8] L. de Lacerda, L. Wrobel, W. Mansur, A dual boundary element formulation for sound propagation around barriers over an impedance plane, *Journal of Sound and Vibration* 202(2) (1997) 235–247.
- [9] T. Okubo, K. Fujiwara, Efficiency of a noise barrier on the ground with an acoustical soft cylindrical edge, *Journal of Sound and Vibration* 216 (5) (1998) 771–790.
- [10] T. Okubo, K. Fujiwara, Efficiency of a noise barrier with an acoustically soft cylindrical edge for practical use, *Journal of the Acoustical Society of America* 105 (6) (1999) 3326–3335.
- [11] M. Wall, GALib: A C++ Library of Genetic Algorithm Components (<http://lancet.mit.edu/ga/>), Mechanical Engineering Department, Massachusetts Institute of Technology, 1996.

- [12] UNE-EN 1793, Road traffic noise reduction devices. Test method for determining the acoustic performance. Part 3: Normalized traffic noise spectrum (1997).
- [13] Código Técnico de la Edificación, Documento Básico HR. Protección frente al ruido. Ministerio de Fomento de España (2009).
- [14] A. Burton, G. Miller, The application of integral equation methods to the numerical solution of some exterior boundary-value problems, *Proceedings of the Royal Society of London* 323 (1971) 201–210.
- [15] S. Li, Q. Huang, An improved form of the hypersingular boundary integral equation for exterior acoustic problems, *Engineering Analysis with Boundary Elements* 34 (2010) 189–195.
- [16] J. F. Luo, Y. J. Liu, J. Berger, Analysis of two-dimensional thin structures (from micro- to nano-scales) using the boundary element method, *Computational Mechanics* 22 (5) (1998) 404–412.
- [17] A. Portela, M. H. Aliabadi, D. P. Rooke, The dual boundary element method: Effective implementation for crack problems, *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 33 (6) (1992) 1269–1287.
- [18] A. Sáez, R. Gallego, J. Domínguez, Hypersingular quarter-point boundary elements for crack problems, *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 38 (1995) 1681–1701.
- [19] J. D. R. Bordón, J. J. Aznárez, O. Maeso, A 2D BEM-FEM approach for time harmonic fluid-structure interaction analysis of thin elastic bodies, *Engineering Analysis with Boundary Elements* 43 (2014) 19–29.