

# Un procedimiento basado en el uso de algoritmos genéticos y elementos de contorno para el diseño óptimo de la geometría de pantallas acústicas de pequeño espesor



R. Toledo, J. J. Aznárez, O. Maeso, D. Greiner

Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería.  
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria  
rayco.toledo102@alu.ulpgc.es

PACS: 43.28.Js, 43.50.Gf, 47.11.Hj

## Resumen

Los autores de este artículo trabajan desde hace algunos años en la formulación e implementación de procedimientos numéricos que permiten proponer geometrías de pantalla anti-ruido que sean acústicamente más eficientes. Así, desde unos requisitos previos que definen la tipología del problema, estos procedimientos utilizan 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. Dentro de este proceso se hace necesario evaluar acústicamente a cada individuo posible y para ello se hace uso del Método de los Elementos de Contorno, muy versátil y adaptado al estudio de problemas de propagación exterior. En este trabajo en particular se tratan pantallas constituidas por elementos de pequeño espesor. Para este caso existe una formulación del Método que permite su tratamiento matemático como si se trataran de sólidos sin espesor. Esta consideración evita los problemas geométricos asociados a la generación de los posibles candidatos en el proceso de búsqueda. Se presentan resultados de configuraciones complejas de pantallas delgadas que muestran la flexibilidad, robustez y polivalencia de la metodología propuesta.

## Resumo

Os autores deste artigo trabalham desde há alguns anos na formulação e implementação de procedimentos numéricos para o projecto de barreiras acústicas eficientes. Tendo em atenção alguns requisitos prévios de projecto, estes procedimentos utilizam modelos de pesquisa óptima, baseados em Algoritmos Evolutivos, para a seleção e ajuste dos parâmetros envolvidos no projecto de barreiras. A avaliação da eficiência acústica de cada uma das soluções possíveis de barreira é necessária em todo o processo. Para esse propósito, é utilizado o Método dos Elementos de Fronteira, o qual é adequado para problemas de propagação no exterior. Neste trabalho são estudadas, em particular, algumas barreiras, as quais, ao serem concebidas como configurações sem espessura, têm o seu tratamento numérico mais facilmente conseguido, requerendo no entanto formulações de elementos de fronteira diferentes da formulação corrente. A fim de evidenciar flexibilidade, robustez and polivalência da metodologia, apresentam-se resultados de barreiras finas, complexas.

## Abstract

The authors of this work have been working for years on both the formulation and the implementation of procedures for the search of more acoustically efficient sound barrier designs. On the basis of some previous design requirements, such procedures use optimum search models based on Evolutionary Algorithms for the selection and adjustment of the parameters involved in the optimum barrier designs. The assessment of the acoustic efficiency of each feasible individual is needed in the whole process and for that purpose the Boundary Element Method is used, well suitable for outdoor acoustic problems. In this work some thin sound barriers are studied. Idealized as null-thickness configurations the numerical treatment is more easily accomplished but it requires boundary element formulations different from the standard one. Results of complex thin sound barriers showing the flexibility, robustness and polyvalence of the methodology proposed will be presented.

## 1 Introducción

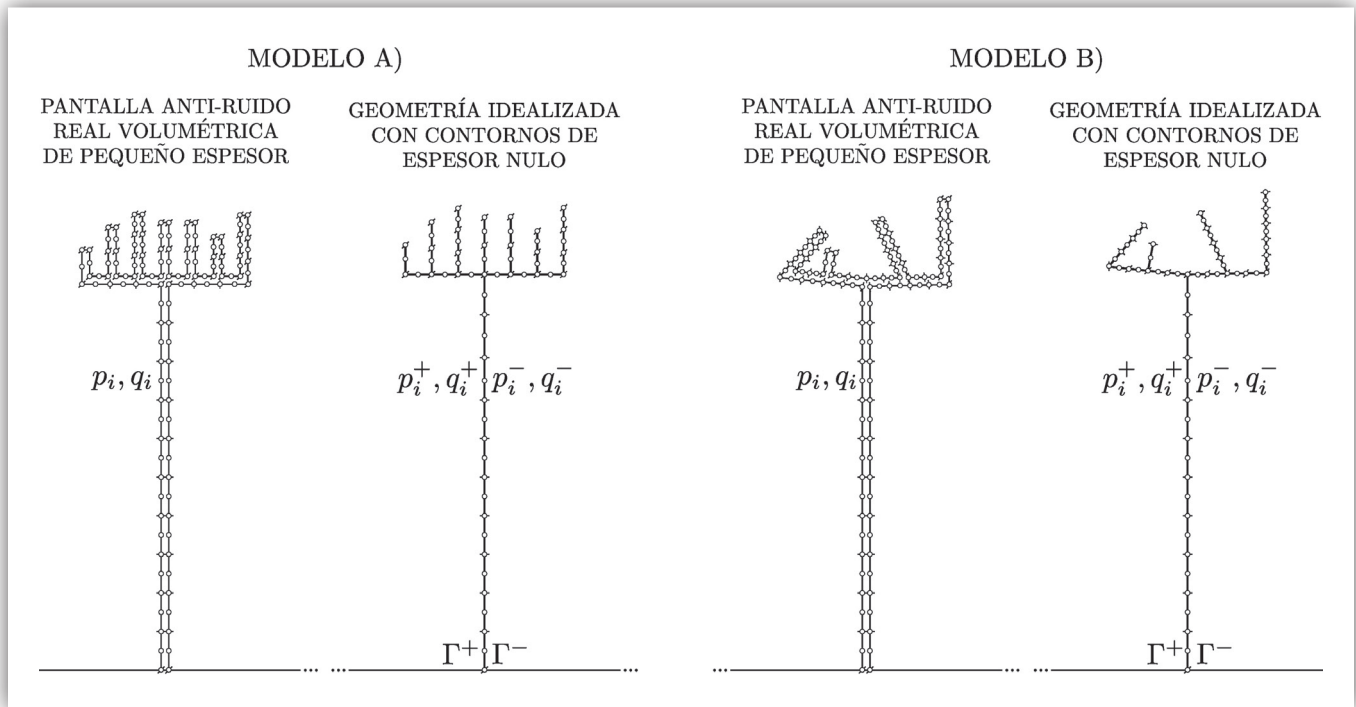
La inclusión de pantallas acústicas es una estrategia muy utilizada para minimizar los efectos negativos que el ruido de tráfico genera en áreas residenciales. En los últimos años, el Método de los Elementos de Contorno (MEC en adelante) ha sido utilizado ampliamente en el estudio de la difracción del 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 sigue la línea de Toledo et al. [7] y emplea la formulación Dual del MEC en el dominio de la frecuencia combinado con un AG en la optimización de dos diseños complejos de pantallas delgadas, simplificando e idealizando de manera matemática su geometría como perfiles de espesor nulo. En este sentido, debe verse la necesidad de la formulación Dual como la única estrategia posible desde el MEC que permite 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].

La necesidad de la formulación Dual del MEC se entiende a partir de la Figura 1 (donde también se muestran las geometrías que trataremos en este trabajo). En ella puede observarse que los contornos a ambos lados de los elementos sin espesor (con valores diferentes de presión acústica y flujo) están representados por la misma discretización. La aplicación de la formulación clásica del Método, basada en la ecuación integral estándar aplicada a cada nodo a ambos lados de la pantalla, conduce a un sistema de ecuaciones singular que no permite obtener la solución del problema. Sin embargo, la utilización conjunta de esta ecuación integral estándar y su derivada en el nodo de colocación (ecuación integral hipersingular) en una formulación denominada Dual (ver e.g. [9]), proporciona un sistema de ecuaciones compatible que permite obtener los valores de presión a cada lado de la barrera. De este modo, esta formulación permite idealizar elementos de espesor muy pequeño como líneas sin espesor con la consecuente simplificación del algoritmo que permite generar las geometrías aleatorias durante el proceso de optimización. Este algoritmo, si tuviera que definir en detalle el carácter volumétrico real de los elementos, sería más complicado y, muy posiblemente, menos general.

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 delgada de sección invariable y longitud igualmente infinita que yace sobre un semiespacio de admitancia uniforme. 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.



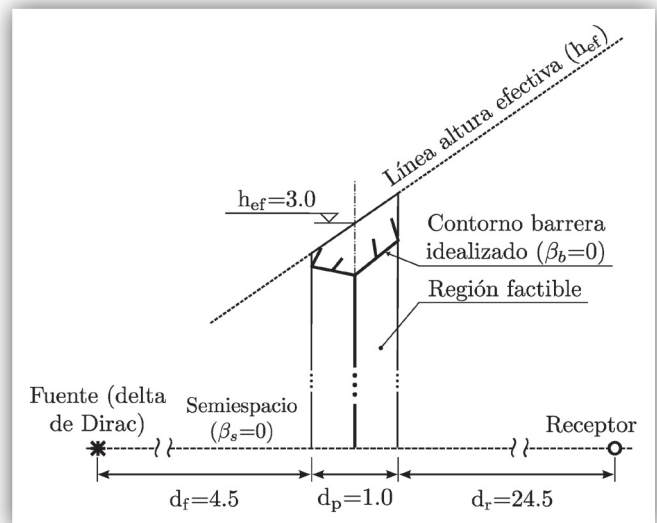
**Figura 1.** Conveniencia de la representación de estructuras volumétricas reales como geometrías idealizadas con espesor nulo en las pantallas estudiadas en este trabajo.

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 delgada que se encuentra sobre un plano (suelo) de admitancia uniforme. En este trabajo, tanto el suelo como la barrera presentan una superficie perfectamente reflejante ( $\beta_s = \beta_b = 0$ ). Se define el área de la región factible donde opera la pantalla acústica como una sección trapezoidal, cuyas dimensiones vienen determinadas por el ancho de la barrera, que es constante y  $d_p = 1.0$  m, y la altura máxima efectiva que se permite alcanzar, que es  $h_{ef} = 3.0$  m en la mediana del trapecio rectángulo. 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 a una distancia  $d_f = 4.5$  m y  $d_r = 24.5$  m de la región factible, respectivamente.

A partir de la respuesta en frecuencia en el receptor estudiado y el espectro de ruido utilizado para la fuente,



**Figura 2.** Configuración general del problema en estudio. Distancias y dimensiones expresadas en metros.

la eficacia acústica de la pantalla puede representarse como sigue:

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

siendo  $NF$  el número de frecuencias centrales de tercio de octava estudiadas del espectro considerado, aquí  $NF = 18$ ,  $A_i$  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.

El espectro empleado en este trabajo se corresponde con el espectro normalizado de ruido de automóviles, ponderado A, definido por la UNE-EN 1793-3:1998, caracterizado para frecuencias centrales de tercio de octava en el rango de 100 a 5000 Hz [10].

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. Una descripción de la formulación empleada en este trabajo para la evaluación del comportamiento acústico de pantallas delgadas puede consultarse en [7, 8, 11]. Si se desea un mayor nivel de detalle en relación con los aspectos numéricos de dicha formulación, pueden consultarse los trabajos de Sáez et al. [12] y Bordón et al [13]. Para el AG en este trabajo se utiliza el software libre GAlib [14], una colección de componentes de algoritmos genéticos (AG) escritos en lenguaje C++.

Con el propósito de facilitar la comprensión de la metodología, la Figura 3 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 de cada modelo. Las geometrías se definen en un dominio de referencia por medio de dichas variables, particulares para cada barrera y que conforman el cromosoma del individuo propuesto por el AG, caracterizando de este modo su diseño topológico. La definición geométrica de la pantalla a estudiar es posible tras una transformación geométrica sencilla que permite establecer la imagen de cada punto de diseño del espacio de referencia en el espacio real Cartesiano. 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 térmi-

nos 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 ( $\bar{IL}$ ) (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 un punto, 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 10 000 generaciones, condición de parada impuesta que permite obtener la convergencia acústica y geométrica de los individuos de la población final. Con cada modelo se llevan a cabo 5 ejecuciones independientes de este proceso.

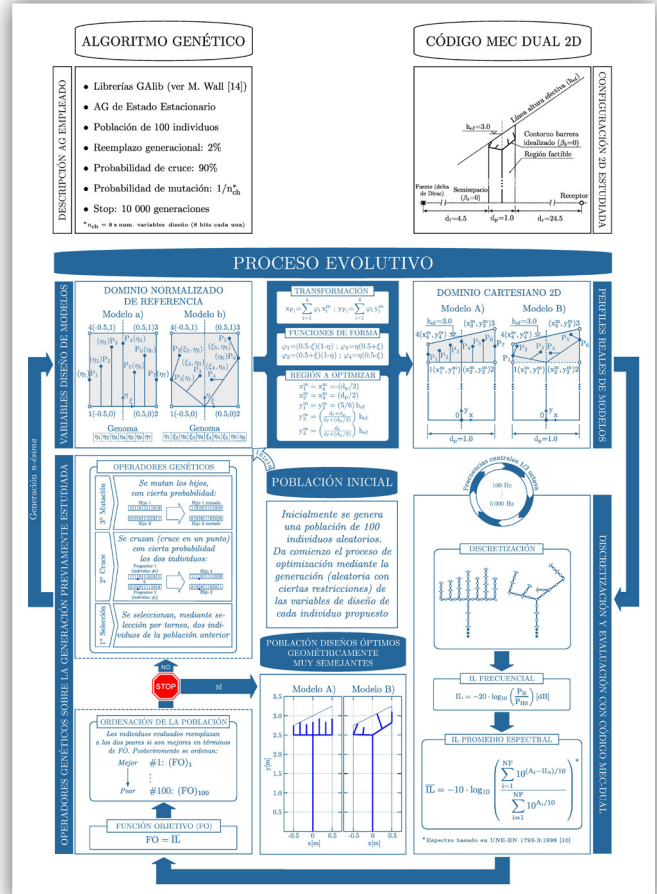


Figura 3. Características del algoritmo genético empleado, descripción del problema estudiado y diagrama de flujo de la optimización.

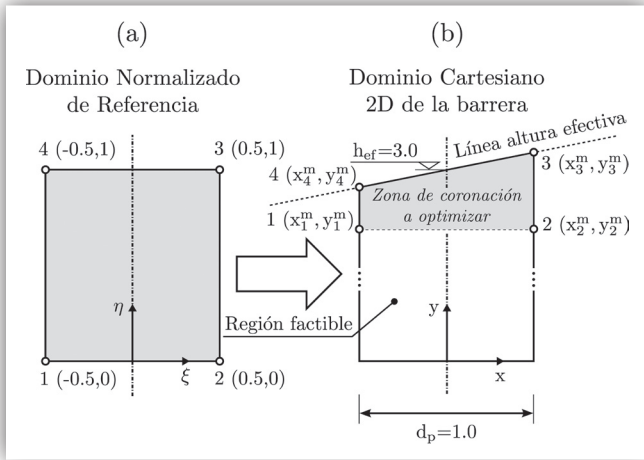


Figura 4. Sistemas bidimensionales. Dimensiones expresadas en metros.

Dentro del proceso evolutivo anterior, el procedimiento que permite definir la geometría del problema de manera simple y sistemática se presenta en la Figura 4, centrado exclusivamente en la optimización de los dispositivos situados en la zona de coronación de los modelos propuestos. Los puntos de diseño que conforman el cromosoma de cada modelo se definen con mayor facilidad en un dominio de referencia normalizado de geometría cuadrada, previo paso a la obtención del perfil de la pantalla en el espacio real. En resumen, el dominio de referencia alberga el conjunto de variables de diseño del modelo objeto de estudio, denotado por  $(\xi, \eta)$ , y representa el área rectangular del espacio de búsqueda para el AG (ver Figura 4(a)). Cada punto  $(\xi, \eta)$  en el dominio de referencia tiene su imagen  $(x, y)$  en el dominio Cartesiano, que es el espacio real donde opera la pantalla.

La transformación de la Figura 4 puede formularse como sigue:

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} = \varphi_1 \begin{pmatrix} x_1^m \\ y_1^m \end{pmatrix} + \varphi_2 \begin{pmatrix} x_2^m \\ y_2^m \end{pmatrix} + \varphi_3 \begin{pmatrix} x_3^m \\ y_3^m \end{pmatrix} + \varphi_4 \begin{pmatrix} x_4^m \\ y_4^m \end{pmatrix} \quad (3)$$

siendo:

$$\varphi_1 = \left(\frac{1}{2} - \xi\right) \left(\frac{1}{2} - \eta\right); \quad \varphi_2 = \left(\frac{1}{2} + \xi\right) \left(\frac{1}{2} - \eta\right) \quad (4)$$

$$\varphi_3 = \left(\frac{1}{2} + \xi\right); \quad \varphi_4 = \left(\frac{1}{2} - \xi\right) \quad (5)$$

donde se demuestra fácilmente que:

$$x_1^m = x_4^m = -\frac{d_p}{2}; \quad x_2^m = x_3^m = \frac{d_p}{2} \quad (6)$$

$$y_1^m = y_2^m = \frac{5}{6} h_{ef} \quad (7)$$

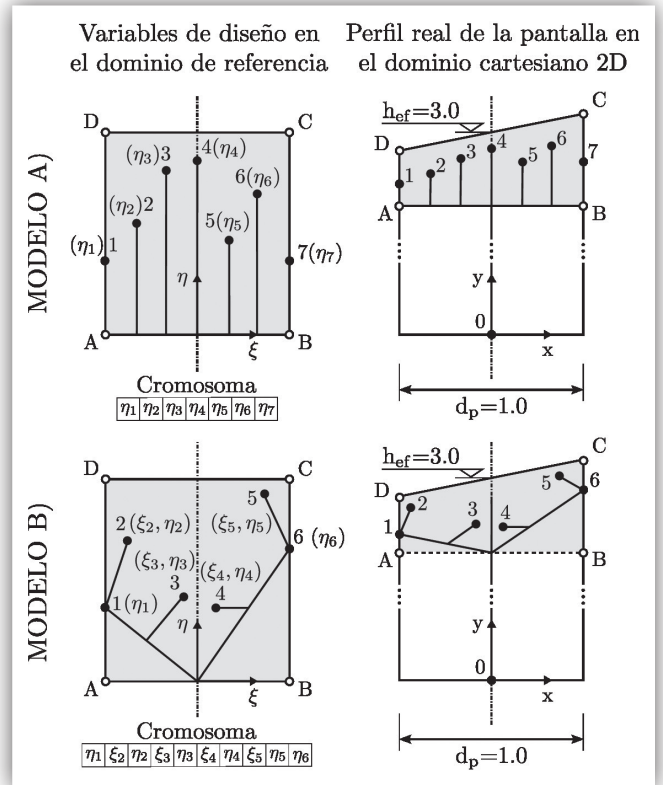


Figura 5. Variables de diseño y perfiles de los modelos que se estudian. Dimensiones en metros.

$$y_3^m = \left(\frac{d_f + d_p}{d_f + (d_p/2)}\right) h_{ef} \quad (8)$$

$$y_4^m = \left(\frac{d_f}{d_f + (d_p/2)}\right) h_{ef} \quad (9)$$

Como se ha adelantado en el apartado anterior, se estudian en este trabajo dos modelos de pantallas acústicas (Figura 5). El punto correspondiente a la base de la barrera (0) es fijo. La geometría de coronación de ambos diseños descansa sobre el pie de la barrera, una barra vertical fija de 2.5 m de altura a partir de este punto. Tanto el ancho ( $d_p$ ) como la altura efectiva ( $h_{ef}$ ) son idénticos en ambos casos. El modelo A) presenta una configuración con siete bastones verticales que nacen sobre una bandeja horizontal. La distancia entre bastones permanece constante ( $d_p/6$ ) mientras que la longitud de los mismos varía a lo largo del proceso de optimización. El modelo B) representa una evolución de la ampliamente estudiada pantalla en forma de  $\mathbf{Y}$ , al incorporar dos brazos adicionales a cada brazo de dicha configuración. Los brazos centrales se sitúan en el punto medio de los principales de la barrera, mientras que los laterales nacen de los extremos de dichos brazos. Las variables de diseño que definen la inclinación de los brazos principales tienen su movilidad limitada a desplazamientos verticales ( $\eta_1, y$

$\eta_e$ ) a lo largo de los límites laterales de la región factible. La validez topológica de este modelo está restringida a la condición de que no existan puntos de corte entre los contornos de la barrera y a que los contornos de los puntos 2 al 5 se encuentren en la zona de la región factible comprendida por los brazos principales y la línea que delimita la máxima altura efectiva.

### 3 Resultados

Los resultados incluidos en este apartado muestran los diseños del mejor perfil optimizado para cada 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 para la misma configuración fuente-receptor (Figura 6). Por las características de los dispositivos analizados, estos espectros de IL pueden mostrar una gran variabilidad que está asociada a frecuencias naturales reales del problema. Este hecho, dependiendo del ancho de banda utilizado en la definición del espectro en la fuente, puede falsear el valor obtenido para la función objetivo que calcula la calidad del apantallamiento. En definitiva, escoger valores picos de IL como referentes de las bandas a las que representan puede dar lugar a una interpretación incorrecta de los resultados asociados al comportamiento acústico de la pantalla. En la realidad estas frecuencias naturales son picos muy localizados que no pueden representar la energía acústica asociada a toda la banda en cuestión. La experiencia previa adquirida revela que el problema se agrava a medida que evo-

luciona el proceso de búsqueda ya que el AG seleccionará individuos con estas características (la mayor parte de las veces con una función objetivo mayor). Se hace necesario, por tanto, un protocolo de actuación que en estos casos considere con mayor precisión la relevancia que los cambios bruscos de IL poseen en el conjunto de la banda que representan. Con este propósito, se desarrolla en este trabajo un protocolo que afina el cálculo de la función objetivo en estos casos. Así, en función de las diferencias observadas en el espectro de IL en la evaluación de determinados individuos (frecuencias centrales de 1/3 de octava), se refina el espectro de origen a frecuencias de 1/15 de octava y se calcula la respuesta del sistema a estas frecuencias. Esto hace que el módulo de cálculo de cada generación sea algo más lento. Sin embargo, se trata de un proceso selectivo que sólo se aplicará en el entorno de los picos observados.

En la Figura 7 se muestra la evolución de la eficacia de apantallamiento de los modelos estudiados a lo largo de las generaciones. La curva azul representa la eficacia del mejor individuo encontrado, en términos de la función objetivo (FO), en las 5 ejecuciones llevadas a cabo para cada ejemplo. La curva roja muestra el valor promedio de FO considerando los 5 mejores individuos (tomando al mejor de cada ejecución) en cada generación. Tal y como se observa en esta figura, la evolución se representa en un rango ajustado tanto en el eje de abscisas como de ordenadas. Esto permite una observación más cómoda de los resultados sin perder informa-

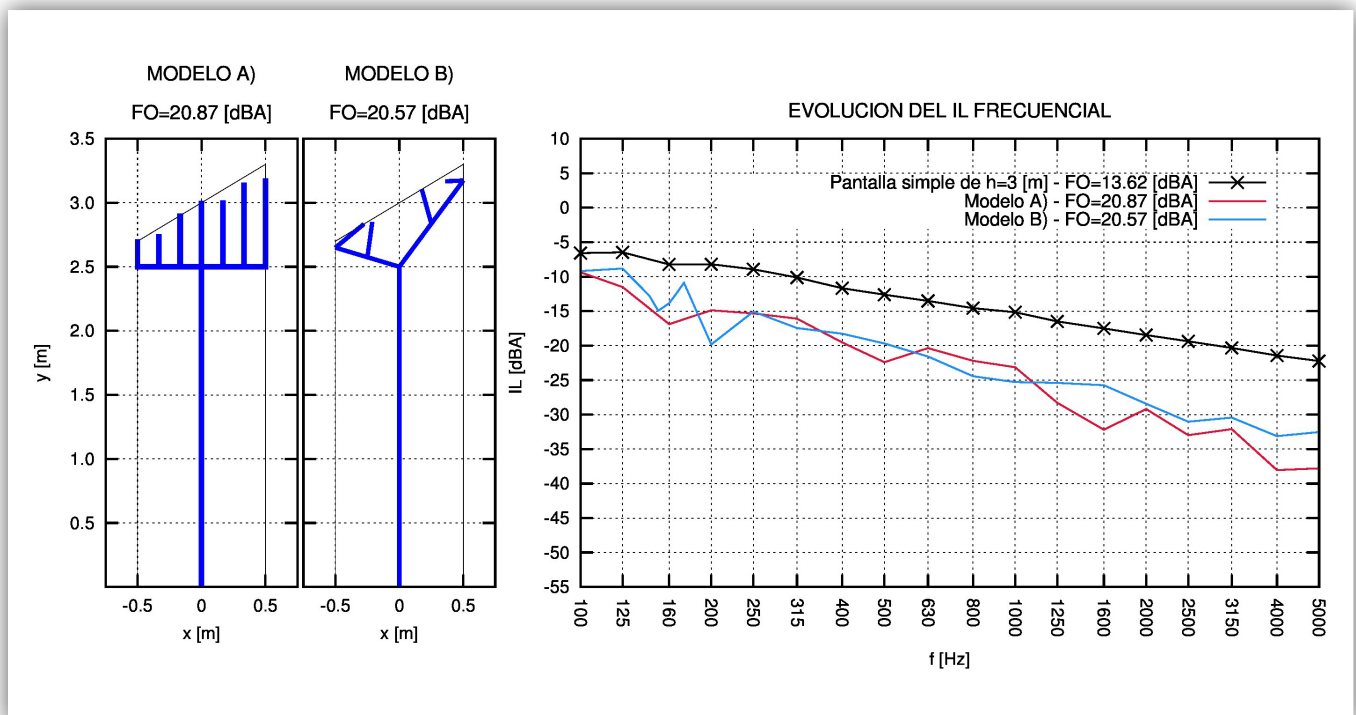


Figura 6. Diseños optimizados y evolución del IL frecuencial. Fuente de ruido en (-5.0, 0.0) y receptor en (25.0, 0.0).

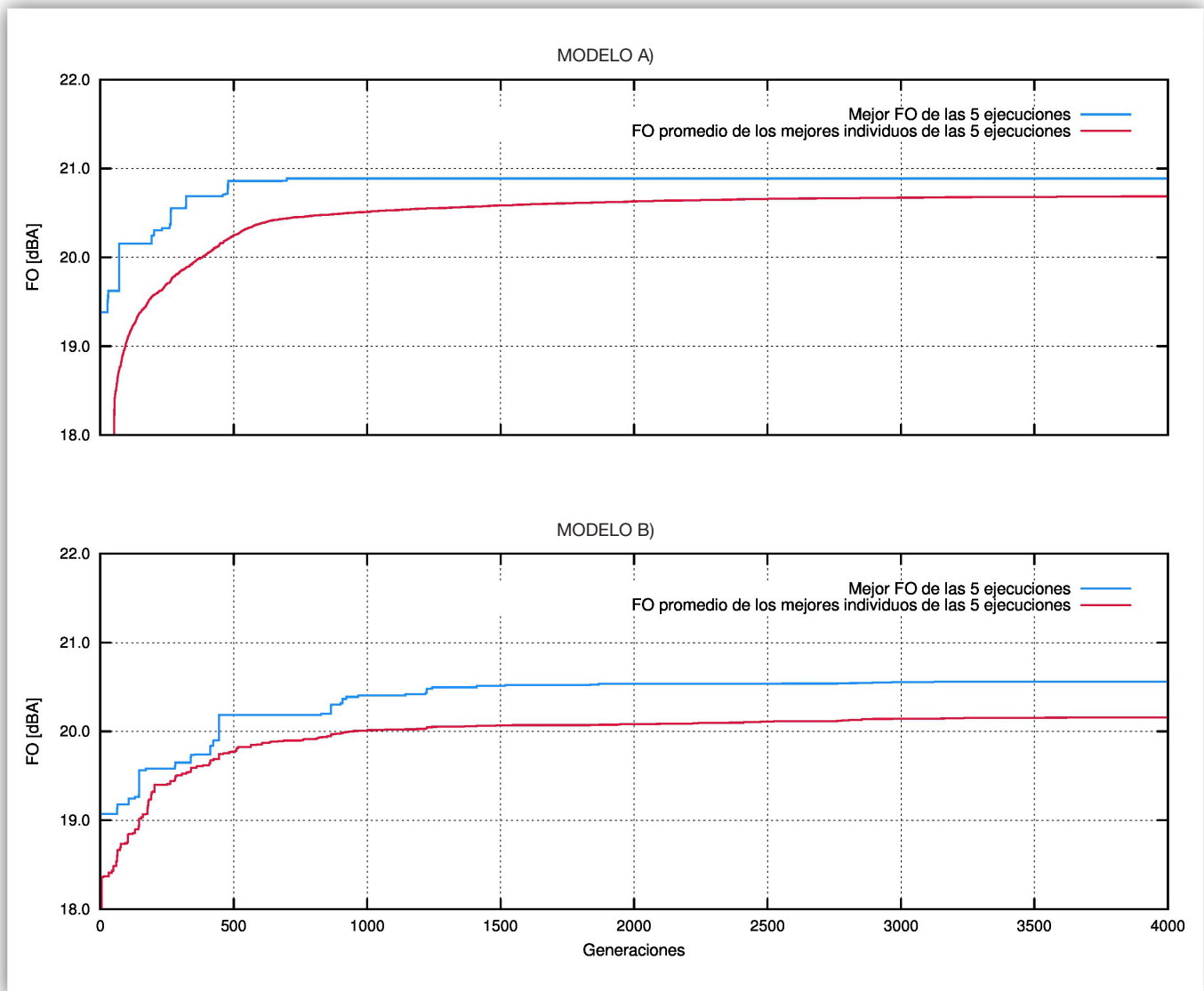


Figura 7. Proceso Evolutivo de ambos modelos.

ción relevante, pues las curvas de evolución en ambos modelos permanecen invariables tras aproximadamente 4000 generaciones.

Por último, con el propósito de facilitar la interpretación de las estrategias de apantallamiento más exitosas, la Figura 8 representa en diversos mapas de color los valores de IL promedio espectral tanto para la región objeto de estudio como para la zona de coronación de los diseños optimizados.

## Conclusiones

Se ha presentado en este trabajo un protocolo para la optimización del perfil de pantallas acústicas delgadas que utiliza 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. Frente a la formulación estándar, la utilización de esta formulación del MEC para pantallas de pequeño espesor permite modelar la misma a través del unifilar que define el perfil sin necesidad de considerar su espesor. Esto permite un proceso más sencillo tanto a la hora de definir geometrías diversas en el proceso de búsqueda como para realizar la discretización necesaria en su evaluación. Este procedimiento ha sido estudiado en la optimización de la zona de coronación de dos modelos específicos de barreras, si bien su rango de aplicabilidad es amplio y permite considerar diversas y complejas soluciones topológicas [6,15].

## 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

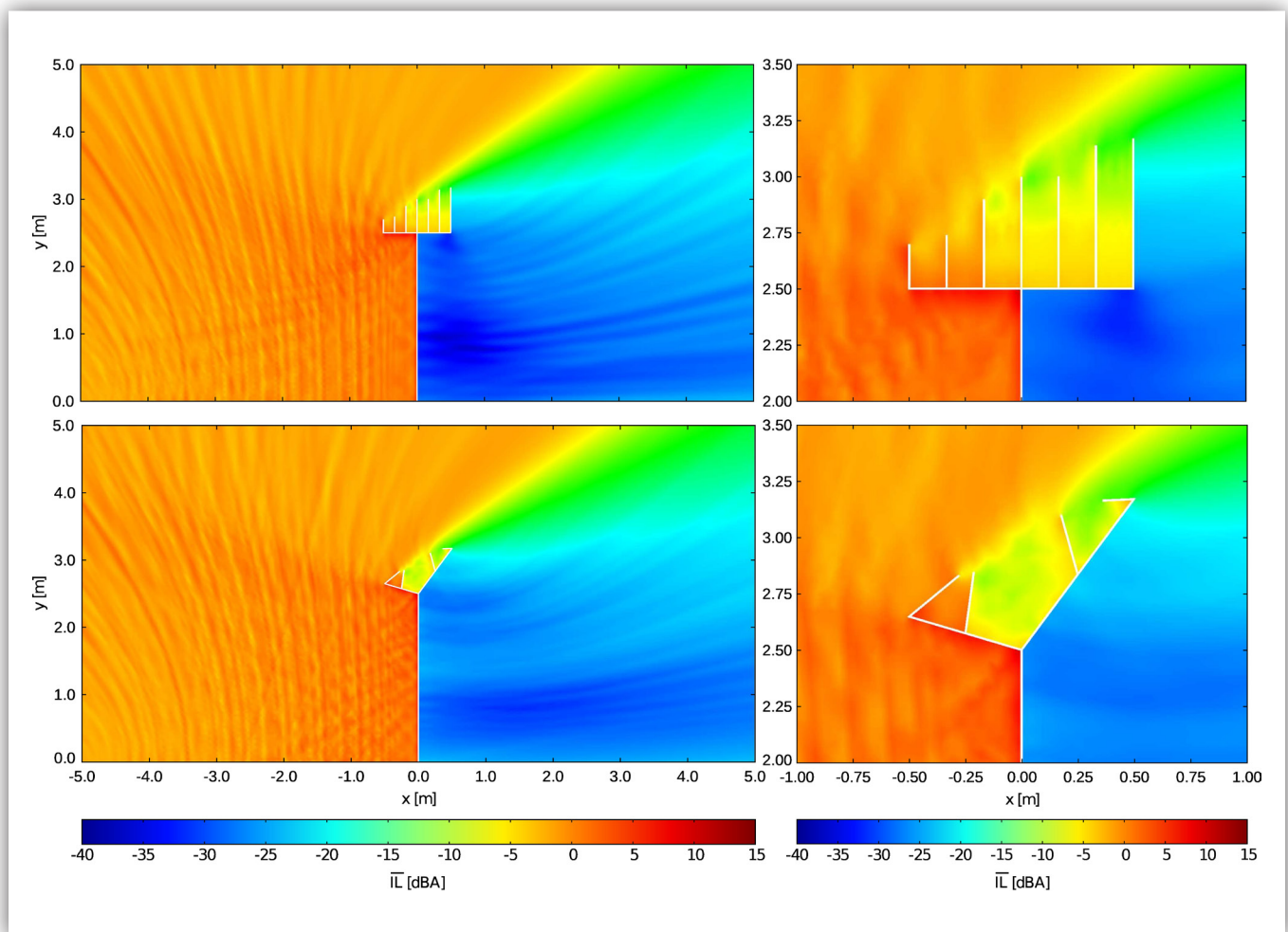


Figura 8. Mapas de color de IL promedio espectral. Fuente de ruido en (-5.0, 0.0).

Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) a través del proyecto de investigación BIA2010-21399-C02-01. R. 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 y 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. ISBN: 84-689-0340-X, <http://hdl.handle.net/10553/1500>, doi:846890340X, 2005.
- [2] D. Duhamel. Shape optimization of noise barriers using genetic algorithms. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. **297**, 432-443, 2006.
- [3] M. Baulac, J. Defrance y P. Jean. Optimization of multiple edge barriers with genetic algorithms coupled with a Nelder-Mead local search. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. **300**, 71-87, 2007.
- [4] M. Baulac, J. Defrance y P. Jean. Optimisation with genetic algorithm of the acoustic performance of T-shaped noise barriers with a reactive top surface. *Applied Acoustics*, Vol. **69**, 332-342, 2006.
- [5] S. Grubeša, K. Jambrošić y H. Domitrović. Noise barriers with varying cross-section optimized by genetic algorithms. *Applied Acoustics*, Vol. **73**, 1129-1137, 2012.
- [6] D. Greiner, J. J. Aznárez, O. Maeso y G. Winter. Single- and multi-objective shape design of Y-noise barriers using Evolutionary computation and Boundary Elements. *Advances in Engineering Software*, Vol. **41**, 368-378, 2010.
- [7] R. Toledo, J. J. Aznárez, O. Maeso y D. Greiner. Optimization of thin noise barrier designs using Evolutionary Algorithms and a Dual BEM Formulation.



- Journal of Sound and Vibration*, Vol. **334**, 219-238, 2015.
- [8] L. de Lacerda, L. Wrobel and W. Mansur. A dual boundary element formulation for sound propagation around barriers over an impedance plane. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. **202**(2), 235-247, 1997.
- [9] A. Portela, M. H. Aliabadi y D. P. Rooke. The dual boundary element method: effective implementation for crack problems. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. **33**, 1269-1287, 1992.
- [10] UNE-EN 1793 - Road traffic noise reduction devices. Test method for determining the acoustic performance- Part 3: Normalized traffic noise spectrum, 1998.
- [11] A. Tadeu, J. António, L. Godinho y P. A. Mendes. Simulation of sound absorption in 2D thin elements using a coupled BEM/TBEM formulation in the presence of fixed and moving 3D source. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. **331**, 2386-2403, 2012.
- [12] A. Sáez, R. Gallego y J. Domínguez. Hypersingular quarter-point boundary elements for crack problems. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. **38**, 1681-1701, 1995.
- [13] J. D. R. Bordón, J. J. Aznárez y O. Maeso. A 2D BEM-FEM approach for time harmonic fluid-structure interaction analysis of thin elastic bodies. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol. **43**, 19-29, 2014.
- [14] M. Wall (Ed.). GALib: A C++ Library of Genetic Algorithm Components (<http://lancet.it.edu/ga/>). Mechanical Engineering Department, Massachusetts Institute of Technology, 1996.
- [15] R. Toledo, J. J. Aznárez, O. Maeso y D. Greiner. A comparative study on design optimisation of polygonal and Bézier curve-shaped thin noise barriers using dual BEM formulation. In: D. Greiner, B. Galván, J. Periaux, N. Gauger, K. Giannakoglou, G. Winter, *Advances in Evolutionary and Deterministic Methods for Design, Optimization and Control in Engineering and Sciences*, Springer, *Computational Methods in Applied Sciences*, Vol. **36**, 335-349, 2015.