







# Procedimiento numérico para la optimización de la eficacia de pantallas acústicas

Trabajo Fin de Máster del Máster en  
Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería  
Instituto Universitario SIANI

Autor: Rayco F. Toledo Quintana      Tutor: Juan J. Aznárez González      Tutor: David J. Greiner Sánchez

Las Palmas de Gran Canaria, Diciembre 2010



# Índice general

Índice de figuras	VII
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación del trabajo . . . . .	1
1.2. Objetivos del trabajo . . . . .	3
1.3. Estado del arte . . . . .	3
1.4. Breve descripción del problema . . . . .	4
1.5. Descripción de los contenidos . . . . .	4
<b>2. El Método de los Elementos de Contorno (MEC)</b>	<b>7</b>
2.1. Cálculo de la presión sonora utilizando el MEC . . . . .	7
2.2. Solución fundamental . . . . .	9
2.3. Programa Principal . . . . .	13
2.3.1. Preprocesador del código . . . . .	14
2.3.1.1. Influencia de la frecuencia en la discretización . .	14
2.3.1.2. Variables de entrada . . . . .	15
2.3.1.3. Variables de salida . . . . .	15
<b>3. Algoritmo genético</b>	<b>17</b>
3.1. Código de Algoritmo Genético empleado . . . . .	17
3.1.1. Motivación de empleo . . . . .	17
3.1.2. Versión . . . . .	17
3.1.3. Breve descripción de la librería GALib . . . . .	17
3.2. Descripción del Algoritmo Genético (AG) . . . . .	19
3.2.1. Tipo de AG empleado . . . . .	19
3.2.2. Definición de los parámetros empleados . . . . .	20
3.2.2.1. Tipo de representación . . . . .	20
3.2.2.2. Criterio de parada . . . . .	20
3.2.2.3. Operador de cruce ( <i>crossover</i> ) . . . . .	20
3.2.2.4. Operador de mutación . . . . .	23
3.2.2.5. Operador de reproducción . . . . .	23

<b>4. Presentación del problema</b>	<b>25</b>
4.1. Descripción general del proceso . . . . .	25
4.2. Hipótesis de partida . . . . .	27
4.3. Descripción de los problemas . . . . .	27
4.3.1. Configuraciones de pantalla en <i>Y</i> tipo estudiadas . . . . .	28
4.3.2. Variables de diseño de las configuraciones . . . . .	29
4.3.3. Dominios considerados y transformación . . . . .	31
4.4. Medida de la eficacia acústica . . . . .	33
4.5. Definición de la función objetivo (FOB) . . . . .	33
4.5.1. Definición de la FOB para el problema con un solo receptor	34
4.5.2. Definición de la FOB para el problema con varios receptores	34
4.6. Procedimiento del proceso de ajuste . . . . .	35
4.7. Normativa empleada . . . . .	37
<b>5. Resultados y conclusiones</b>	<b>39</b>
5.1. Problema con un solo receptor . . . . .	39
5.1.1. Configuración <i>Y base fija</i> . . . . .	39
5.1.1.1. Pantalla simple de 3,5 metros . . . . .	39
5.1.1.2. Pantalla simple de 4,0 metros . . . . .	41
5.1.1.3. Pantalla simple de 4,5 metros . . . . .	43
5.1.1.4. Espectros del coeficiente de pérdida por inserción	45
5.1.1.5. Evolución del AG . . . . .	47
5.1.1.6. Conclusiones . . . . .	50
5.1.2. Configuración <i>Y base móvil vertical</i> . . . . .	52
5.1.2.1. Pantalla simple de 3,5 metros . . . . .	52
5.1.2.2. Pantalla simple de 4,0 metros . . . . .	54
5.1.2.3. Pantalla simple de 4,5 metros . . . . .	56
5.1.2.4. Espectros del coeficiente de pérdida por inserción	58
5.1.2.5. Evolución del AG . . . . .	60
5.1.2.6. Conclusiones . . . . .	63
5.1.3. Configuración <i>Y base móvil</i> . . . . .	65
5.1.3.1. Pantalla simple de 3,5 metros . . . . .	65
5.1.3.2. Pantalla simple de 4,0 metros . . . . .	67
5.1.3.3. Pantalla simple de 4,5 metros . . . . .	69
5.1.3.4. Espectros del coeficiente de pérdida por inserción	71
5.1.3.5. Evolución del AG . . . . .	73
5.1.3.6. Conclusiones . . . . .	76
5.2. Problema con varios receptores . . . . .	77
5.2.1. Configuración <i>Y base fija</i> . . . . .	77
5.2.1.1. Pantalla simple de 3,5 metros . . . . .	77
5.2.1.2. Pantalla simple de 4,0 metros . . . . .	79

---

5.2.1.3.	Pantalla simple de 4,5 metros . . . . .	81
5.2.1.4.	Espectros del coeficiente de pérdida por inserción	83
5.2.1.5.	Evolución del AG . . . . .	85
5.2.1.6.	Conclusiones . . . . .	89
5.2.2.	Configuración <i>Y base móvil vertical</i> . . . . .	90
5.2.2.1.	Pantalla simple de 3,5 metros . . . . .	90
5.2.2.2.	Pantalla simple de 4,0 metros . . . . .	92
5.2.2.3.	Pantalla simple de 4,5 metros . . . . .	94
5.2.2.4.	Espectros del coeficiente de pérdida por inserción	96
5.2.2.5.	Evolución del AG . . . . .	98
5.2.2.6.	Conclusiones . . . . .	101
5.2.3.	Configuración <i>Y base móvil</i> . . . . .	102
5.2.3.1.	Pantalla simple de 3,5 metros . . . . .	102
5.2.3.2.	Pantalla simple de 4,0 metros . . . . .	104
5.2.3.3.	Pantalla simple de 4,5 metros . . . . .	106
5.2.3.4.	Espectros del coeficiente de pérdida por inserción	108
5.2.3.5.	Evolución del AG . . . . .	110
5.2.3.6.	Conclusiones . . . . .	113
<b>6.</b>	<b>Desarrollos Futuros</b>	<b>115</b>
6.1.	A corto plazo . . . . .	115
6.2.	A largo plazo . . . . .	119
	<b>Bibliografía</b>	<b>121</b>



# Índice de figuras

2.1.	Problema bidimensional. Barrera de tres brazos estándar. . . . .	7
2.2.	Funciones de interpolación del elemento cuadrático. . . . .	8
2.3.	Ecuación Integral y Solución Fundamental. . . . .	11
2.4.	Diagrama de flujo del programa. . . . .	13
2.5.	Ejemplo de discretización en el preprocesador. . . . .	14
3.1.	Diagrama de flujo de un algoritmo genético. . . . .	18
3.2.	Representación binaria frente a código Gray. . . . .	22
3.3.	Cruce en un punto. . . . .	22
3.4.	Mutación de 10 bits en un cromosoma. . . . .	23
4.1.	Diagrama de flujo del programa. . . . .	26
4.2.	Problema bidimensional. Un receptor. . . . .	28
4.3.	Problema bidimensional. Varios receptores. . . . .	28
4.4.	<i>Y base fija</i> : variables de diseño. . . . .	29
4.5.	<i>Y base móvil vertical</i> : variables de diseño. . . . .	30
4.6.	<i>Y base móvil</i> : variables de diseño. . . . .	30
4.7.	Sistemas de coordenadas bidimensionales. . . . .	31
4.8.	Ajuste de la curva para el problema con un solo receptor. . . . .	36
4.9.	Ajuste de la curva para el problema con varios receptores. . . . .	36
5.1.	<i>Y base fija</i> : configuraciones para pantalla de 3,5 m. . . . .	40
5.2.	<i>Y base fija</i> : valores de la FOB para pantalla de 3,5 m. . . . .	40
5.3.	<i>Y base fija</i> : configuraciones para pantalla de 4,0 m. . . . .	41
5.4.	<i>Y base fija</i> : valores de la FOB para pantalla de 4,0 m. . . . .	42
5.5.	<i>Y base fija</i> : configuraciones para pantalla de 4,5 m. . . . .	43
5.6.	<i>Y base fija</i> : valores de la FOB para pantalla de 4,5 m. . . . .	44
5.7.	<i>Y base fija</i> : IL frecuencial frente a pantalla de 3,5 m. . . . .	45
5.8.	<i>Y base fija</i> : IL frecuencial frente a pantalla de 4,0 m. . . . .	46
5.9.	<i>Y base fija</i> : IL frecuencial frente a pantalla de 4,5 m. . . . .	46
5.10.	<i>Y base fija</i> : Evolución del AG para $h = 3,5m$ . . . . .	47
5.11.	<i>Y base fija</i> : Evolución del AG para $h = 3,5m$ . Ampliación. . . . .	47

5.12. <i>Y base fija</i> : Evolución del AG para $h = 4,0m$ . . . . .	48
5.13. <i>Y base fija</i> : Evolución del AG para $h = 4,0m$ . Ampliación. . . . .	48
5.14. <i>Y base fija</i> : Evolución del AG para $h = 4,5m$ . . . . .	49
5.15. <i>Y base fija</i> : Evolución del AG para $h = 4,5m$ . Ampliación. . . . .	49
5.16. <i>Y base móvil vertical</i> : configuraciones para pantalla de 3,5 m. . . . .	52
5.17. <i>Y base móvil vertical</i> : valores de la FOB para pantalla de 3,5 m. . . . .	53
5.18. <i>Y base móvil vertical</i> : configuraciones para pantalla de 4,0 m. . . . .	54
5.19. <i>Y base móvil vertical</i> : valores de la FOB para pantalla de 4,0 m. . . . .	55
5.20. <i>Y base móvil vertical</i> : configuraciones para pantalla de 4,5 m. . . . .	56
5.21. <i>Y base móvil vertical</i> : valores de la FOB para pantalla de 4,5 m. . . . .	57
5.22. <i>Y base móvil vertical</i> : IL frecuencial frente a pantalla de 3,5 m . . . . .	58
5.23. <i>Y base móvil vertical</i> : IL frecuencial frente a pantalla de 4,0 m . . . . .	59
5.24. <i>Y base móvil vertical</i> : IL frecuencial frente a pantalla de 4,5 m . . . . .	59
5.25. <i>Y base móvil vertical</i> : Evolución del AG para $h = 3,5m$ . . . . .	60
5.26. <i>Y base móvil vertical</i> : Evolución del AG para $h = 3,5m$ . Ampliación. . . . .	60
5.27. <i>Y base móvil vertical</i> : Evolución del AG para $h = 4,0m$ . . . . .	61
5.28. <i>Y base móvil vertical</i> : Evolución del AG para $h = 4,0m$ . Ampliación. . . . .	61
5.29. <i>Y base móvil vertical</i> : Evolución del AG para $h = 4,5m$ . . . . .	62
5.30. <i>Y base móvil vertical</i> : Evolución del AG para $h = 4,5m$ . Ampliación. . . . .	62
5.31. <i>Y base móvil vertical</i> : espectro de $Id1$ e $Id4$ . . . . .	64
5.32. <i>Y base móvil</i> : configuraciones para pantalla de 3,5 m. . . . .	65
5.33. <i>Y base móvil</i> : valores de la FOB para pantalla de 3,5 m . . . . .	66
5.34. <i>Y base móvil</i> : configuraciones para pantalla de 4,0 m. . . . .	67
5.35. <i>Y base móvil</i> : valores de la FOB para pantalla de 4,0 m. . . . .	68
5.36. <i>Y base móvil</i> : configuraciones para pantalla de 4,5 m. . . . .	69
5.37. <i>Y base móvil</i> : valores de la FOB para pantalla de 4,5 m. . . . .	70
5.38. <i>Y base móvil</i> : IL frecuencial frente a pantalla de 3,5 m. . . . .	71
5.39. <i>Y base móvil</i> : IL frecuencial frente a pantalla de 4,0 m. . . . .	72
5.40. <i>Y base móvil</i> : IL frecuencial frente a pantalla de 4,5 m. . . . .	72
5.41. <i>Y base móvil</i> : Evolución del AG para $h = 3,5m$ . . . . .	73
5.42. <i>Y base móvil</i> : Evolución del AG para $h = 3,5m$ . Ampliación. . . . .	73
5.43. <i>Y base móvil</i> : Evolución del AG para $h = 4,0m$ . . . . .	74
5.44. <i>Y base móvil</i> : Evolución del AG para $h = 4,0m$ . Ampliación. . . . .	74
5.45. <i>Y base móvil</i> : Evolución del AG para $h = 4,5m$ . . . . .	75
5.46. <i>Y base móvil</i> : Evolución del AG para $h = 4,5m$ . Ampliación. . . . .	75
5.47. <i>Y base fija</i> : configuraciones para pantalla de 3,5 m. . . . .	77
5.48. <i>Y base fija</i> : valores de la FOB para pantalla de 3,5 m. . . . .	78
5.49. <i>Y base fija</i> : configuraciones para pantalla de 4,0 m. . . . .	79
5.50. <i>Y base fija</i> : valores de la FOB para pantalla de 4,0 m. . . . .	80
5.51. <i>Y base fija</i> : configuraciones para pantalla de 4,5 m. . . . .	81
5.52. <i>Y base fija</i> : valores de la FOB para pantalla de 4,5 m. . . . .	82

5.53. <i>Y base fija</i> : IL espectral frente a pantalla de 3,5 m. . . . .	83
5.54. <i>Y base fija</i> : IL espectral frente a pantalla de 4,0 m. . . . .	84
5.55. <i>Y base fija</i> : IL frecuencial frente a pantalla de 4,5 m. . . . .	84
5.56. <i>Y base fija</i> : Evolución del AG para $h = 3,5m$ . . . . .	85
5.57. <i>Y base fija</i> : Evolución del AG para $h = 3,5m$ . Ampliación. . . . .	85
5.58. <i>Y base fija</i> : Evolución del AG para $h = 4,0m$ . . . . .	86
5.59. <i>Y base fija</i> : Evolución del AG para $h = 4,0m$ . Ampliación. . . . .	86
5.60. <i>Y base fija</i> : Evolución del AG para $h = 4,5m$ . . . . .	87
5.61. <i>Y base fija</i> : Evolución del AG para $h = 4,5m$ . Ampliación. . . . .	88
5.62. <i>Y base móvil vertical</i> : configuraciones para pantalla de 3,5 m. . . . .	90
5.63. <i>Y base móvil vertical</i> : valores de la FOB para pantalla de 3,5 m. . . . .	91
5.64. <i>Y base móvil vertical</i> : configuraciones para pantalla de 4,0 m. . . . .	92
5.65. <i>Y base móvil vertical</i> : valores de la FOB para pantalla de 4,0 m. . . . .	93
5.66. <i>Y base móvil vertical</i> : configuraciones para pantalla de 4,5 m. . . . .	94
5.67. <i>Y base móvil vertical</i> : valores de la FOB para pantalla de 4,5 m. . . . .	95
5.68. <i>Y base móvil vertical</i> : IL espectral frente a pantalla de 3,5 m. . . . .	96
5.69. <i>Y base móvil vertical</i> : IL espectral frente a pantalla de 4,0 m. . . . .	97
5.70. <i>Y base móvil vertical</i> : IL espectral frente a pantalla de 4,5 m. . . . .	97
5.71. <i>Y base móvil vertical</i> : Evolución del AG para $h = 3,5m$ . . . . .	98
5.72. <i>Y base móvil vertical</i> : Evolución del AG para $h = 3,5m$ . Ampliación. . . . .	98
5.73. <i>Y base móvil vertical</i> : Evolución del AG para $h = 4,0m$ . . . . .	99
5.74. <i>Y base móvil vertical</i> : Evolución del AG para $h = 4,0m$ . Ampliación. . . . .	99
5.75. <i>Y base móvil vertical</i> : Evolución del AG para $h = 4,5m$ . . . . .	100
5.76. <i>Y base móvil vertical</i> : Evolución del AG para $h = 4,5m$ . Ampliación. . . . .	100
5.77. <i>Y base móvil</i> : configuraciones para pantalla de 3,5 m. . . . .	102
5.78. <i>Y base móvil</i> : valores de la FOB para pantalla de 3,5 m. . . . .	103
5.79. <i>Y base móvil</i> : configuraciones para pantalla de 4,0 m. . . . .	104
5.80. <i>Y base móvil</i> : valores de la FOB para pantalla de 4,0 m. . . . .	105
5.81. <i>Y base móvil</i> : configuraciones para pantalla de 4,5 m. . . . .	106
5.82. <i>Y base móvil</i> : valores de la FOB para pantalla de 4,5 m. . . . .	107
5.83. <i>Y base móvil</i> : IL frecuencial frente a pantalla de 3,5 m. . . . .	108
5.84. <i>Y base móvil</i> : IL frecuencial frente a pantalla de 4,0 m. . . . .	109
5.85. <i>Y base móvil</i> : IL frecuencial frente a pantalla de 4,5 m. . . . .	109
5.86. <i>Y base móvil vertical</i> : Evolución del AG para $h = 3,5m$ . . . . .	110
5.87. <i>Y base móvil vertical</i> : Evolución del AG para $h = 3,5m$ . Ampliación. . . . .	110
5.88. <i>Y base móvil vertical</i> : Evolución del AG para $h = 4,0m$ . . . . .	111
5.89. <i>Y base móvil vertical</i> : Evolución del AG para $h = 4,0m$ . Ampliación. . . . .	111
5.90. <i>Y base móvil vertical</i> : Evolución del AG para $h = 4,5m$ . . . . .	112
5.91. <i>Y base móvil vertical</i> : Evolución del AG para $h = 4,5m$ . Ampliación. . . . .	112
6.1. Propuesta de estudio. Variante tipo 1 de pantalla en Y. . . . .	116

6.2. Propuesta de estudio. Variante tipo 2 de pantalla en Y. . . . .	116
6.3. Propuesta de estudio. Variante tipo 3 de pantalla en Y. . . . .	117
6.4. Propuesta de estudio. Variante tipo 4 de pantalla en Y. . . . .	117
6.5. Propuesta de estudio. Pantallas simples dispuestas en serie. . . . .	118
6.6. Propuesta de estudio. Adaptación del borde superior de la pantalla.	118
6.7. Propuesta de estudio. Protocolo para diseños genéricos. . . . .	119

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación del trabajo

Este Trabajo Fin de Máster (TFM) se plantea como una línea de continuidad de una línea de investigación ya en curso en el Instituto de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería (SIANI) de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC), sobre diseño óptimo de pantallas acústicas mediante algoritmos evolutivos, de la que se destacan las siguientes publicaciones existentes:

- [1] D. Greiner, J.J. Aznárez, O. Maeso, G. Winter, Shape Design of Noise Barriers using Evolutionary Optimization and Boundary Elements, *The Fifth International Conference on Engineering Computational Technology, Civil-Comp-Press, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, September 2006.*
- [2] J.J. Aznárez, D. Greiner, O. Maeso, G. Winter, A methodology for optimum design of Y-Shape noise barriers, *International Congress on Acoustics 2007, International Commission for Acoustics y Sociedad Española de Acústica, Madrid, 2-7 September 2007.*
- [3] D. Greiner, J.J. Aznárez, O. Maeso, G. Winter, Improving the design of M-Shape noise barriers using the Boundary Element Method and Evolutionary Algorithms, *The Ninth International Conference on the Application of Artificial Intelligence to Civil, Structural and Environmental Engineering, Civil-Comp-Press, St. Julians (Malta), September 2007.*
- [4] O. Maeso, D. Greiner, J.J. Aznárez, G. Winter, Design of noise barriers with Boundary Elements and Genetic Algorithms, *Advances in Boundary Element Techniques IX, Sevilla, España. (Keynote Lecture), pp. 101-106, July 2008.*

- [5] D. Greiner, B. Galván, J. J. Aznárez, O. Maeso, G. Winter, Robust design of noise attenuation barriers with Evolutionary Multiobjective Algorithms and the Boundary Element Method, *Lecture Notes in Computer Science Series (LNCS) n° 5467, Evolutionary Multi- Criterion Optimization*, Eds: M. Ehrgott et al., Springer, 2009, pp. 261-274.
- [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*, 2010, Elsevier, Vol. 41 (2), pp. 368-378.

A partir de la necesidad de minorar las consecuencias negativas inherentes al tráfico rodado, se plantean una serie de estrategias orientadas a este fin. Si bien lo ideal es tratar de minimizar el ruido en origen, lo cierto es que en muchas ocasiones esto resulta prácticamente imposible, recurriendo al procedimiento más habitual para la minoración del impacto acústico: la implantación de barreras acústicas entre la fuente y el receptor. La inclusión de estos elementos interfiere en el recorrido normal de propagación creando una zona de sombra del lado opuesto al emisor donde los niveles sonoros serán inferiores respecto de la situación en que no exista barrera.

Sería interesante valernos de un método que permita obtener la solución al problema estudiado, su análisis y posibilite anticipar las carencias de las estrategias de reducción del ruido adoptadas para realizar las modificaciones oportunas en los diseños de las mismas, que redunde en la mejora de la eficiencia y en el ahorro económico. Debido a que la medida experimental directa es costosa e incapaz de predecir situaciones futuras y a que no existen soluciones reales que satisfagan todos los problemas, es habitual recurrir a métodos numéricos para la obtención de una solución aproximada. Considerando las características inherentes a esta tipología de problemas, el Método de los Elementos de Contorno (MEC) se muestra como una herramienta eficaz para la obtención de las soluciones, debido a las múltiples ventajas que ofrece frente a otros métodos numéricos:

- No es preciso discretizar todo el dominio, por lo que es ideal para problemas de campo abierto con dominio infinito (como los problemas que se analizan).
- Sólo es preciso discretizar la superficie de los elementos implicados, con lo que se consigue un importante ahorro de grados de libertad (gdl) del problema analizado.
- Considerando el semiespacio reflejante se evita la discretización del mismo, ahorrando aún más en gdl.
- Es un método susceptible de ser implementado computacionalmente.

En este trabajo se analiza la eficacia de estas medidas y se estudian comparativamente diferentes diseños haciendo uso acoplado de Algoritmos Genéticos (AG) y de un modelo numérico basado en la formulación dinámica del MEC.

## 1.2. Objetivos del trabajo

El objetivo de este trabajo es ampliar y dar continuidad a algunos de los resultados ya obtenidos en la línea de investigación anterior. Para ello se pretende encontrar una metodología válida que permita optimizar el diseño de barreras acústicas en el entorno de carreteras, haciendo uso acoplado de Algoritmos Genéticos (AG) y de la formulación dinámica del Método de los Elementos de Contorno (MEC) (ver [1]), susceptibles ambos de ser implementados en un código de ordenador. A la luz de los resultados obtenidos podrá determinarse cuantitativa y cualitativamente la bondad de determinados diseños en cuanto a la reducción del impacto acústico se refiere.

## 1.3. Estado del arte

La inclusión de barreras es una solución acertada para disminuir los niveles de ruido de tráfico en el entorno de carreteras. Numerosas investigaciones se han llevado a cabo en las dos últimas décadas centradas en la difracción del sonido sobre el contorno de la barrera, más concretamente en la predicción del comportamiento y el desarrollo de diseños más eficientes. Se han empleado con éxito diversos métodos numéricos en estudios teóricos y aplicados en acústica, y su importancia ha aumentado en los últimos años [2], [3]. De entre los diferentes métodos teóricos propuestos cabe destacar el Método de los Elementos de Contorno (MEC), investigado por diversos autores (ver por ejemplo [4], [5], [6] y [7]) para evaluar configuraciones complejas de pantallas. Las principales ventajas del MEC sobre otros métodos son su flexibilidad (puede representar con precisión formas arbitrarias y propiedades acústicas de la superficie) y precisión (puede obtener una solución correcta de las ecuaciones de gobierno del problema acústico para cualquier tipo de precisión requerida, proporcionando elementos cuyo tamaño supongan una fracción suficientemente pequeña de la longitud de onda).

Los Algoritmos Evolutivos han sido ampliamente usados en la Optimización de Diseños de Formas en diferentes campos de la ingeniería, entre los que cabe citar: aeronáutica (por ejemplo, empleando métodos de aproximación de curvas como las splines de Bezier en el diseño de perfiles de ala) [8], [9], [10] y [11], o sólidos mecánicos [12] (por ejemplo, empleando el Método de los Elementos Finitos [13] o el Método de los Elementos de Contorno [14], [15]). Hasta lo que sabemos, existen limitaciones en la aplicación de Algoritmos Genéticos (AG) para el diseño de

formas en acústica exterior en la literatura consultada. Algunos de estos estudios han considerado un control activo para actuar en la optimización [16], [17] en lugar de la modificación de la forma [18], [19]. Lo que es más, el uso combinado de problemas de optimización empleando Algoritmos Genéticos con un modelo del Método de los Elementos de Contorno ha sido aplicado en los últimos años a problemas de diseño en la ingeniería [13], [14], [19], [20], así como en diversos estudios realizados en el seno del instituto donde se desarrolla el presente TFM (ver [21], [22], [23], [24], [25] y [26]).

## 1.4. Breve descripción del problema

El trabajo presentado propone la aplicación de una metodología basada en el uso combinado de Algoritmos Genéticos con el MEC para la búsqueda del diseño óptimo de perfiles complejos de pantallas acústicas. El modelo asume una fuente de sonido lineal, recta e infinita paralela a una pantalla acústica infinita de sección uniforme y superficie perfectamente reflejante a lo largo de toda su longitud (ver Figura 2.1). El estudio se lleva a cabo en el dominio de la frecuencia. Se fija una altura máxima efectiva de la barrera. La función objetivo está relacionada con el *coeficiente de pérdida por inserción* ( $IL$ , relación del nivel de presión acústica en el receptor con y sin barrera respectivamente), de manera que se trata de minimizar la diferencia entre la curva de  $IL$  de la solución de diseño y una curva de  $IL$  de referencia dada (dotada de una alta capacidad de atenuación del sonido).

## 1.5. Descripción de los contenidos

Tras estas breves notas introductorias, el capítulo 2 desarrolla la formulación del Método de Elementos de Contorno como herramienta numérica para el estudio del problema de acústica en dos dimensiones.

El capítulo 3 está dedicado al código de algoritmo genético empleado en este trabajo. Se detalla porqué se ha decidido emplear la librería *GAlib*, la versión del código empleada así como una breve descripción del tipo de algoritmo genético implementado y una breve definición de sus parámetros y valores utilizados.

El capítulo 4 trata de abordar con mayor profundidad lo que se recoge en el apartado 1.4 de este capítulo. Con objeto de facilitar la comprensión del estudio se muestra inicialmente un diagrama de flujo de todo el proceso de optimización. Posteriormente se recogen las hipótesis que se asumen para realizar el estudio. Luego se describen los problemas y configuraciones de pantalla a estudiar, se definen las funciones objetivos de cada problema, los métodos empleados para la medida de la eficiencia acústica de los diseños propuestos y se muestra gráficamente cómo es el proceso de ajuste implícito en la función objetivo. Finalmente

el capítulo acaba haciendo referencia a la normativa empleada en este trabajo.

El capítulo 5 se centra en los resultados obtenidos y en las posibles conclusiones derivadas de su análisis. Su estructura trata de facilitar la comprensión de los resultados aportados por el AG, de manera que el lector pueda sacar sus propias conclusiones a partir de la interpretación del material gráfico que se incluye. Con este fin, se ha optado por establecer la siguiente secuencia para cada configuración y caso estudiado: inicialmente se muestran los perfiles de barrera tipo encontrados por el AG; seguidamente se muestran los valores de la función objetivo asociados a dichos perfiles así como del resto de individuos del caso estudiado, identificando cada individuo con el patrón o tipo de perfil al que pertenece; posteriormente se muestran las curvas de *IL* de aquellos individuos que resulten más interesantes desde el punto de vista acústico, así como la evolución del AG de dichos individuos; finalmente se recogen las conclusiones que se derivan de cada caso.

El capítulo 6 incluye los desarrollos futuros derivados de este estudio.

Se cierra este trabajo con un último apartado dedicado a las referencias bibliográficas de interés.



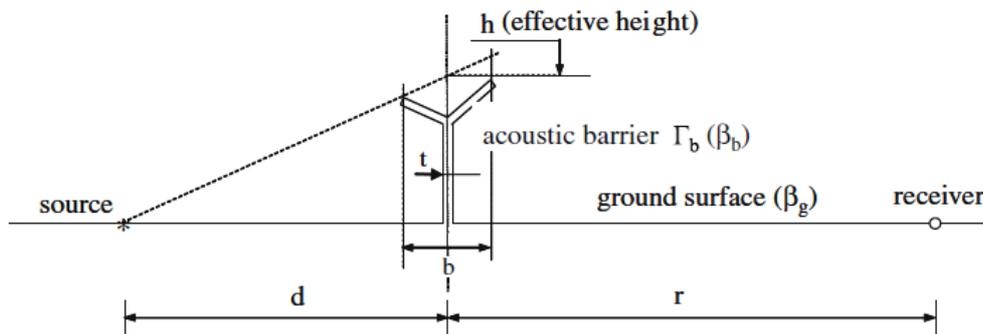
## Capítulo 2

# El Método de los Elementos de Contorno (MEC)

### 2.1. Cálculo de la presión sonora utilizando el MEC

La Figura 2.1 muestra una configuración bidimensional para problemas escalares de propagación de ondas en el dominio de la frecuencia. La ecuación integral para el punto del contorno  $i$ , para ser resuelta numéricamente mediante el MEC, puede escribirse como:

$$c_i p_i = p_o^* - \int_{\Gamma_b} \left( \frac{\partial p^*}{\partial n} + ik\beta_b p^* \right) p d\Gamma \quad (2.1)$$



**Figura 2.1:** Problema bidimensional. Geometría estándar de barrera de tres brazos.

donde  $p$  es el campo de presión acústica en la superficie de la pantalla ( $\Gamma_b$ ) de admitancia genérica  $\beta_b$  y  $p^*$  es la solución fundamental del semiespacio (campo de presión acústica debido a una fuente colocada en el punto  $i$  sobre un plano con admitancia  $\beta_g$  (superficie del terreno)). Esta solución fundamental sólo requiere la discretización del contorno de la pantalla ( $\Gamma_b$ ).

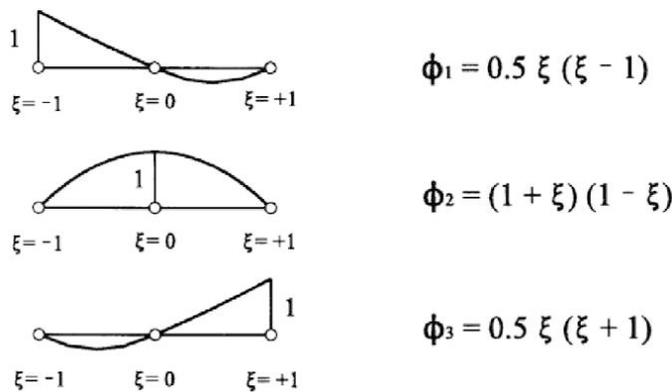
Para superficies perfectamente reflectantes (pantalla  $\beta_b$  o suelo  $\beta_g$ ),  $\beta = 0$ . Para superficies parcialmente absorbentes la admitancia compleja  $\beta$  se obtiene usando el modelo de Delany y Bazley conociendo el espesor del recubrimiento y su resistividad al flujo de aire.

$c_i$  es el termino libre local en un punto de colocación  $i$ :  $c_i = \theta/2\pi$ , donde  $\theta$  es el ángulo comprendido por las tangentes al contorno en este punto, medido en radianes.  $c_i = 0,5$  para contornos suaves.  $p_o^*$  es la solución fundamental del semiespacio en la fuente del problema debido a la colocación en el punto  $i$ , y  $k = \omega/c$  es el número de onda ( $c$ : velocidad de la onda sonora,  $\omega$ : frecuencia angular) e  $i$  la unidad imaginaria.

La resolución numérica de la Ec. (2.1) es posible tras un proceso de discretización. De este proceso se obtiene un sistema de ecuaciones que conduce a la obtención de valores de la presión acústica sobre el contorno de la pantalla. El código de MEC, presentado en este trabajo, utiliza elementos cuadráticos con tres puntos nodales. La presión acústica a lo largo de este elemento de contorno puede escribirse en términos de sus tres valores nodales del siguiente modo:

$$p^j = \phi_1 p_1^j + \phi_2 p_2^j + \phi_3 p_3^j \quad (2.2)$$

donde las funciones de interpolación, en coordenadas homogéneas  $\xi$ , se muestran en la Figura 2.2.



**Figura 2.2:** Funciones de interpolación del elemento cuadrático empleado en el contorno.

La representación integral (2.1), tras la discretización del contorno de la pantalla en  $NE$  elementos cuadráticos, puede escribirse como:

$$c_i p_i = p_o^* - \sum_{j=1}^{NE} \sum_{k=1}^3 (h_k^{ij} + ik\beta_j g_k^{ij}) p_k^j \quad (2.3)$$

donde

$$h_k^{ij} = \int_{\Gamma_j} \frac{\partial p^*}{\partial n} \phi_k d\Gamma_j \quad (2.4)$$

y

$$g_k^{ij} = \int_{\Gamma_j} p^* \phi_k d\Gamma_j \quad (2.5)$$

son las integrales a lo largo del elemento genérico  $j$ . Estas integrales se pueden calcular empleando la cuadratura standard de Gauss (ver [1]). De este modo se obtiene un sistema de ecuaciones en forma matricial tras la aplicación conveniente de las ecuaciones discretas a cada uno de los nodos del contorno, tal y como se muestra en la Ec. (2.6):

$$(\mathbf{H} + ik\beta\mathbf{G}) \mathbf{P} = \mathbf{P}_0^* \quad (2.6)$$

donde  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{G}$  son matrices cuadradas ( $N \times N$ ) y  $\mathbf{P}$ ,  $\mathbf{P}_0^*$  son vectores ( $N \times 1$ ), siendo  $N$  el número de nodos. El MEC ha sido ampliamente empleado en la resolución de diversos problemas relacionados con propagación de ondas elásticas (ver, por ejemplo, [27] - [28]). El código MEC empleado en este trabajo ha sido desarrollado por los profesores Juan José Aznárez González y Orlando Francisco Maeso Fortuny, y sus resultados han sido comparados con éxito con los resultados obtenidos por otros autores en la literatura [5], [6] y [7]. En [29] se puede consultar con mayor nivel de detalle lo comentado anteriormente.

## 2.2. Solución fundamental

Se parte de la ecuación de reciprocidad (Ec. (2.7)). Esta ecuación representa el punto de partida para la aplicación del MEC. A diferencia del Método de Elementos Finitos (MEF), no se impone el cumplimiento de las condiciones de contorno a la solución buscada. En este caso, la condición impuesta a la solución (o función de ponderación luego del proceso de integración por partes) es relativa

al cumplimiento de la ecuación de gobierno del problema de tal forma que sólo es desconocido su comportamiento en el contorno.

$$\int_{\Gamma} p \frac{\partial p^*}{\partial n} d\Gamma + \int_{\Omega} \frac{1}{c^2} b^* p d\Omega = \int_{\Gamma} \frac{\partial p}{\partial n} p^* d\Gamma + \int_{\Omega} \frac{1}{c^2} b p^* d\Omega \quad (2.7)$$

$$\nabla^2 p^* + k^2 p^* = -\frac{1}{c^2} b^* \quad (2.8)$$

Esta relación de reciprocidad puede convertirse en una igualdad integral que afecta sólo a los contornos del dominio en estudio. De este modo, habrá que elegir una función de ponderación  $p^*$  adecuada que verifique la ecuación de gobierno del problema (ver Ec. (2.8)) y que denominaremos solución fundamental. Para ello es necesario considerar que no existen fuentes internas de presión en el problema real a resolver. Así, la Ec. (2.7) queda como sigue:

$$\int_{\Gamma} p \frac{\partial p^*}{\partial n} d\Gamma + \int_{\Omega} \frac{1}{c^2} b p^* d\Omega = \int_{\Gamma} \frac{\partial p}{\partial n} p^* d\Gamma \quad (2.9)$$

En este punto consideraremos la función de peso  $p^*$  como el campo de presiones provocado por una función delta de Dirac aplicada en una región virtual de iguales propiedades que la analizada en el problema real en la que no se tienen en cuenta las condiciones de contorno de ésta (Figura 2.3). Por tanto, según Ec. (2.8)  $p^*$  sólo habrá de verificar la ecuación de gobierno del problema:

$$\nabla^2 p^* + k^2 p^* + \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_i) = 0 \quad (2.10)$$

Esta función delta de Dirac es singular en  $\mathbf{x} = \mathbf{x}_i$  y vale cero en el resto de puntos del dominio. Su integral de volumen extendida a todo el dominio es igual a la unidad. Desde un punto de vista matemático, esta función delta de Dirac puede interpretarse como el límite de una función impulso rectangular cuando la dimensión de su base tiende a cero. Físicamente representa una fuente puntual armónica que pulsa a la misma frecuencia que el problema real, aplicada en un punto de coordenadas  $\mathbf{x}_i$  que, por ahora, consideraremos interior al dominio real en estudio (Figura 2.3). Así, y teniendo en cuenta estas propiedades de la función delta de Dirac, la integral de volumen correspondiente a (2.9) puede escribirse como sigue:

$$\int_{\Omega} \frac{1}{c^2} b p^* d\Omega = \int_{\Omega} \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_i) p d\Omega = p_i \quad (2.11)$$

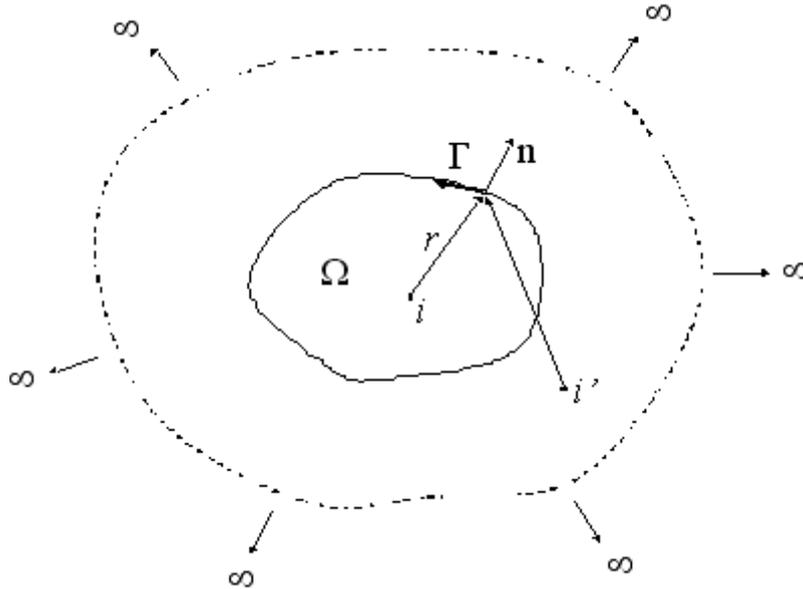
Con lo que su relación de reciprocidad es ahora:

$$p_i + \int_{\Gamma} p \frac{\partial p^*}{\partial n} d\Gamma = \int_{\Gamma} \frac{\partial p}{\partial n} p^* d\Gamma \quad (2.12)$$

Esta expresión ya es muy cercana a la identidad integral necesaria para el tratamiento numérico del problema en variables del contorno. Ahora (2.12) permite obtener, a través de la solución fundamental, el valor de la presión acústica en cualquier punto interno del dominio conocido su valor y el de su derivada en el contorno del mismo.

La solución fundamental que corresponde a la solución de (2.10) en problemas armónicos escalares bi y tridimensionales, se escribe a continuación:

$$\begin{aligned} p^*(k, r) &= \frac{1}{2\Pi} K_0(ikr) && \text{problemas2D} \\ p^*(k, r) &= \frac{1}{4\Pi r} e^{-ikr} && \text{problemas3D} \end{aligned} \quad (2.13)$$



**Figura 2.3:** Ecuación Integral y Solución Fundamental.

donde,  $k$  representa el número de onda,  $i$  es la unidad imaginaria y  $r$  la distancia entre el punto  $i$  de aplicación de la fuente puntual (punto de colocación) y el punto donde se desea calcular el valor de la variable  $p^*$  (punto de observación) (Figura 2.3). Para el problema bidimensional  $K_0$  es la función modificada de Bessel de segunda especie y orden cero cuyo argumento es  $ikr$ .

Es sencillo demostrar que las expresiones de la solución fundamental dadas por (2.13) verifican la ecuación homogénea de gobierno (2.10) para  $r \neq 0$ . Esta demostración en el entorno de la singularidad ( $r = 0$ ), es algo más compleja

conceptualmente. En este caso, y teniendo en cuenta la definición de la función impulso, lo único que puede hacerse es comprobar que estas expresiones verifican en el límite la integral de dominio de (2.10) en un círculo de radio  $\varepsilon \rightarrow 0$  que encierra la singularidad (ver [1]).

Por otra parte, las derivadas según la normal al contorno de la solución fundamental serán:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p^*}{\partial n} &= \frac{ik}{2\Pi} K_1(ikr) \frac{\partial r}{\partial n} && \text{problemas2D} \\ \frac{\partial p^*}{\partial n} &= -\frac{1}{4\Pi} \left( \frac{1}{r^2} + \frac{ik}{r} \right) e^{-ikr} \frac{\partial r}{\partial n} && \text{problemas3D} \end{aligned} \quad (2.14)$$

donde  $K_1$  es también una función modificada de Bessel de segunda especie y orden uno. El resto de variables son ya conocidas. Por otra parte, y si hasta aquí se comprenden las características de esta formulación, podemos plantear la posibilidad de situar la fuente de presión en un punto de espacio virtual exterior al dominio en estudio ( $i'$  en Figura 2.3). En este caso se anula la integral de volumen correspondiente de (2.9) y la relación de reciprocidad adopta la forma:

$$\int_{\Gamma} p \frac{\partial p^*}{\partial n} d\Gamma = \int_{\Gamma} \frac{\partial p}{\partial n} p^* d\Gamma \quad (2.15)$$

Sin embargo, y a pesar de ser rigurosamente cierta, esta versión de la relación de reciprocidad tiene un uso más limitado. Ampliando el planteamiento inicial de este apartado, el problema que pretendemos resolver numéricamente presenta una fuente de presión interna (delta de Dirac) en un punto  $x_0$ . Por tanto, en la relación de reciprocidad (2.7), teniendo en cuenta lo visto, la integral de volumen correspondiente podrá escribirse de la siguiente forma:

$$\int_{\Omega} \frac{1}{c^2} b p^* d\Omega = \int_{\Omega} \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) p^* d\Omega = p_0^* \quad (2.16)$$

donde  $p_0^*$  es el valor de la solución fundamental en el punto  $x_0$  donde se sitúa la fuente puntual en el problema real. Con todo ello, la relación de reciprocidad adopta la forma:

$$p_i + \int_{\Gamma} p \frac{\partial p^*}{\partial n} d\Gamma = p_0^* \int_{\Gamma} \frac{\partial p}{\partial n} p^* d\Gamma \quad (2.17)$$

y que será la expresión que se emplea como punto de partida en la formulación del MEC.

## 2.3. Programa Principal

El Programa Principal, bajo el nombre de POSAMEC (Propagación de Ondas Sonoras Armónicas con el Método de los Elementos de Contorno), está implementado en lenguaje de programación Fortran y permite modelar la propagación de ondas acústicas bidimensionales en el dominio de la frecuencia. En él se definen las dimensiones máximas del modelo y se localizan los canales de entrada de datos y salida de resultados. Desde el mismo, en primer lugar, se invoca a la rutina de entrada de datos y posteriormente, para cada frecuencia, al resto de rutinas que completan la ejecución del código. En el diagrama de flujo que se muestra en la Figura 2.4 se indican las rutinas invocadas desde el Programa Principal y se aclara, de forma telegráfica, el cometido llevado a cabo por cada una.

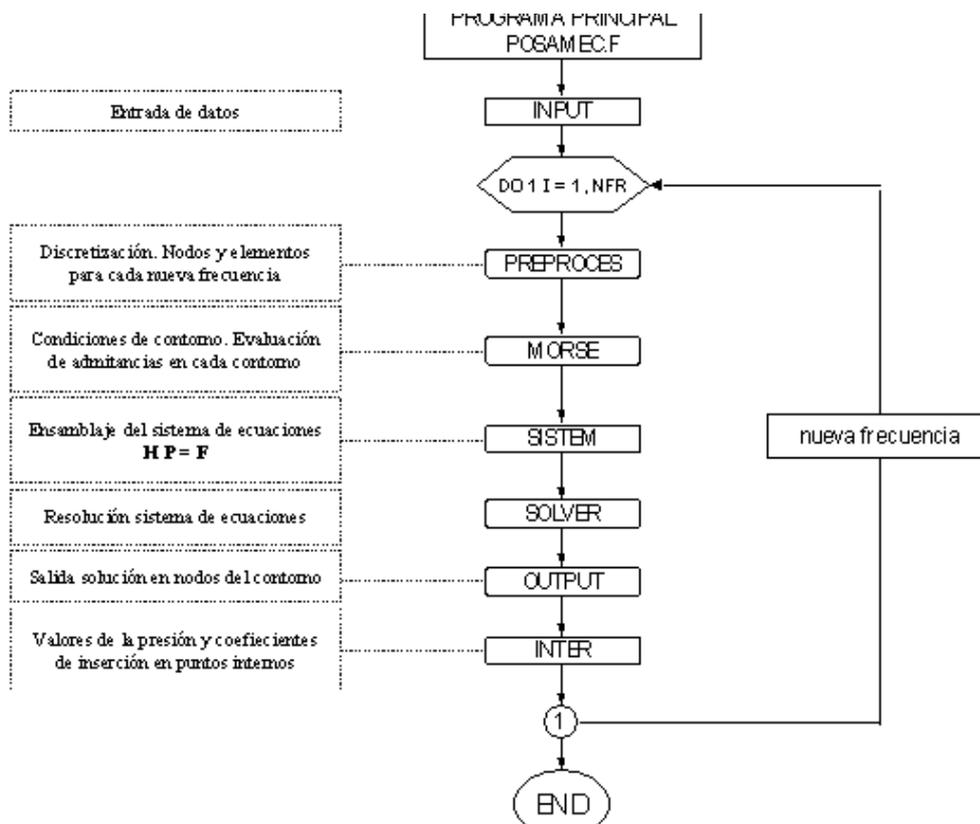
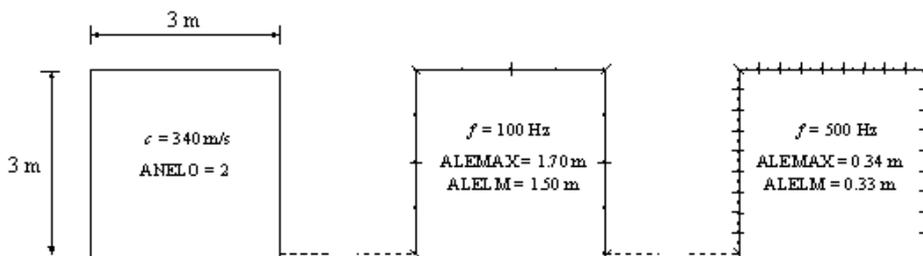


Figura 2.4: Diagrama de flujo del programa.

### 2.3.1. Preprocesador del código

#### 2.3.1.1. Influencia de la frecuencia en la discretización

La precisión en problemas dinámicos es muy dependiente de la relación entre la longitud de onda  $\lambda$  ( $\lambda = \frac{c}{f}$ ;  $c$ : velocidad de propagación,  $f$ : frecuencia en Hz) y el tamaño de los elementos de la discretización. El valor de este parámetro (ANELO) es gestionado por el usuario en el fichero de entrada, si bien aclaramos que para el tipo de aproximación utilizada (elementos parabólicos) el valor de ANELO no debe ser nunca inferior a 2. Por tanto, la discretización es redefinida por el preprocesador para cada valor de la frecuencia. El número de elementos y nodos cambian y, como es lógico, las coordenadas de estos últimos también. La discretización se adapta a una distribución de presiones más oscilante conforme aumenta la frecuencia. El lector puede entender que es lo más económico desde el punto de vista computacional. Veamos esto con un ejemplo sencillo: un obstáculo cuadrado de  $3m$  de lado. En la Figura 2.5 aparecen las discretizaciones para dos frecuencias (100 Hz y 400 Hz) escogidas de la relación de frecuencias centrales de octava. En ambas ANELO = 2 y consideraremos  $c = 340m/s$ . Para la primera, el tamaño máximo permitido para elemento (ALELMAX) será  $1,70m$ . El tamaño final de los elementos (ALELM) dependerá de la longitud del contorno (en cada contorno todos los elementos tienen igual longitud). En este caso, la discretización de la pantalla tiene 6 elementos de  $1,50m$  de longitud y 11 nodos. En el segundo supuesto, mayor valor de la frecuencia implica una discretización más refinada. Así, el tamaño máximo teórico del elemento será  $0,34m$  y la discretización tendrá 19 elementos de  $0,33m$  y 39 nodos. Con todo, y si bien deben entenderse estas cuestiones relacionadas con la discretización, se trata de aspectos que el programa gestiona de forma autónoma.



**Figura 2.5:** Discretizaciones de un obstáculo con elementos parabólicos ( $f = 100$  y  $500\text{ Hz}$ ).

**2.3.1.2. Variables de entrada**

Las variables principales a la entrada del preprocesador son la frecuencia, la velocidad de propagación de onda y la razón entre la longitud de onda y el tamaño máximo del elemento.

**2.3.1.3. Variables de salida**

Las variables principales a la salida serán el número de nodos y los vectores de coordenadas  $x$  e  $y$  de los mismos.



# Capítulo 3

## Algoritmo genético

### 3.1. Código de Algoritmo Genético empleado

#### 3.1.1. Motivación de empleo

Si bien el software empleado en las investigaciones citadas en [21], [22], [23], [24], [25] y [26] tanto en la simulación y modelización numérica como en la optimización, ha sido desarrollado en su totalidad dentro de las actividades de investigación del SIANI, en este TFM se ha optado por emplear el paquete de librerías de Algoritmo Genético *GAlib*, desarrollado por Mathew Wall en el Massachusetts Institute of Technology (MIT). La principal motivación del empleo de *GAlib* en este trabajo es la posibilidad de modificar fácilmente los parámetros que configuran el algoritmo genético empleado.

#### 3.1.2. Versión

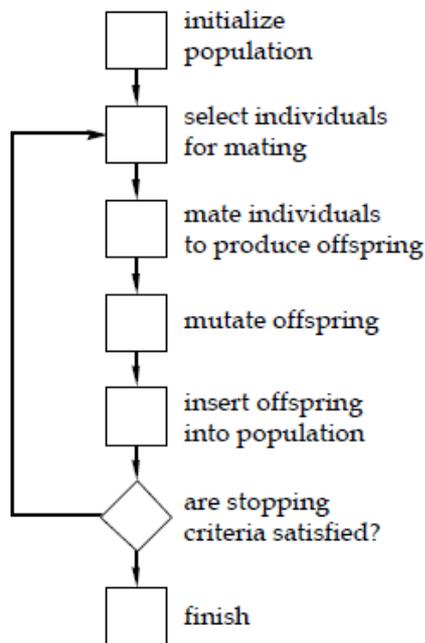
La versión empleada para el desarrollo de este trabajo es la 2.4.7 (*galib247*), descargada el día 23 de agosto de 2010 desde la siguiente dirección web:

<http://lancet.mit.edu/ga/dist/>

#### 3.1.3. Breve descripción de la librería GAlib

GAlib es una librería de funciones en C++ que proporciona un conjunto de objetos para el desarrollo de Algoritmos Genéticos que permite resolver problemas de optimización mediante la construcción de un algoritmo genético, usando estructuras de datos y operadores estándar o específicos de selección, cruce y mutación, escalado y criterios de finalización. Se trata de un software que si bien no es de dominio público está disponible a coste nulo para propósitos sin ánimo de lucro.

El objeto algoritmo genético de estas librerías determina qué individuos deberían sobrevivir, cuáles deberían reproducirse, y cuáles deberían morir siguiendo las pautas mostradas en la Figura 3.1.



**Figura 3.1:** Diagrama de flujo de un algoritmo genético.

La librería contiene cuatro tipos de algoritmos genéticos. El primero es el estándar *Algoritmo Genético Simple*, descrito por Goldberg en su libro. Este algoritmo usa poblaciones no solapadas, con opción de establecer elitismo. En cada generación el algoritmo genera una población de individuos completamente nuevos. El segundo es el *Steady-State Genetic Algorithm* o *Algoritmo Genético de Estado Estacionario*, el cual implementa el solape entre poblaciones. En esta variante, se puede especificar qué cantidad de individuos o porcentaje de población será reemplazada en cada generación. La tercera variante es el *Algoritmo Genético Incremental*, en el cual cada generación se compone únicamente de uno o dos hijos. Estos algoritmos permiten personalizar métodos de reemplazo para definir de qué manera la nueva generación debería ser integrada en la población original. Así, por ejemplo, un hijo nuevo generado podría reemplazar a sus padres, reemplazar a un número aleatorio de individuos de la población o reemplazar a un individuo parecido a él. El cuarto tipo es el algoritmo genético *Deme*. Este algoritmo evoluciona múltiples poblaciones en paralelo usando un algoritmo de estado estacionario. Cada generación el algoritmo migra algunos individuos de

una población a una de las otras poblaciones.

Esta librería proporciona diferentes componentes necesarios para crear nuestra propia variación de algoritmo genético, en función de nuestras necesidades. De este modo, es posible obtener datos estadísticos, emplear distintas estrategias de reemplazo, así como la posibilidad de seleccionar y variar los operadores genéticos (reproducción, cruce y mutación) del algoritmo seleccionado. Además, incluye funciones para especificar el criterio de parada del AG, con lo que se puede especificar un número máximo de generaciones, una condición de no parada a menos que se consiga la convergencia (mediante la especificación de un valor para el que el mejor individuo de cada generación debería converger) o bien establecer un criterio propio de parada.

## 3.2. Descripción del Algoritmo Genético (AG)

A continuación se realiza una descripción del AG empleado así como de los parámetros que lo configuran.

### 3.2.1. Tipo de AG empleado

El tipo de AG empleado en este trabajo es el *Steady-State Algorithm* o *Algoritmo de Estado Estacionario*, cuya principal característica es que emplea el solape (*overlapping*) entre poblaciones consecutivas. Supone una interesante propuesta para mantener el equilibrio entre los mecanismos de *exploración* y de *explotación* del AG.

Similar a los algoritmos descritos por DeJong, crea una población de individuos mediante la clonación del genoma que se establece inicialmente. En cada generación el algoritmo crea una población temporal de individuos, añade éstos a la población previa y posteriormente elimina los peores individuos para restablecer el tamaño original de la población.

Especificando el parámetro que define el solape entre generaciones, se establece el porcentaje de población a ser reemplazada en cada generación. Los nuevos individuos generados en la población temporal se añaden a la población original y posteriormente se eliminan los peores individuos, de manera que estos nuevos individuos pueden o no integrarse en la población original en función de si resultan ser mejores o peores individuos que los que tratan de reemplazar.

En este trabajo el AG implementado emplea un reemplazo generacional del 50 % entre poblaciones.

## 3.2.2. Definición de los parámetros empleados

### 3.2.2.1. Tipo de representación

Los AG requieren que el conjunto se codifique en un cromosoma. Cada cromosoma tiene varios genes, que corresponden a sendos parámetros del problema. Para poder trabajar con estos genes en el ordenador, es necesario codificarlos en una cadena, es decir, una ristra de símbolos (números o letras) que generalmente va a estar compuesta de ceros y unos.

La elección de la codificación de las variables no es trivial, especialmente si estamos tratando un problema de optimización. Por ejemplo, una codificación directa de los números enteros puede dar problemas a la hora de que el algoritmo converja, ya que números consecutivos, como por ejemplo el 15 y el 16, al pasarlos a binario son muy diferentes (10000, 01111) con lo que una solución con el valor 15 en un campo, difícilmente llegará a evolucionar a una solución con el valor 16 (ya que debería cambiar simultáneamente todos los bits). A este problema se le conoce como *Picos de Hamming*.

Para disminuir el efecto de los *Picos de Hamming* se pueden utilizar otras codificaciones. Por ejemplo codificando según los *Códigos de Gray* se asegura que enteros consecutivos solo se diferencien en un bit.

Por todo ello son los *Códigos de Gray* el tipo de representación empleada para codificar las variables de diseño de las distintas configuraciones analizadas en este trabajo. Cada variable se codifica con 8 bits, de manera que para las configuraciones *Y base fija* e *Y base móvil vertical* el cromosoma tendrá una longitud de 32 bits (genes), mientras que para la configuración *Y base móvil* el cromosoma tendrá una longitud de 40 bits (ver Figuras 4.4, 4.5 y 4.6 respectivamente).

### 3.2.2.2. Criterio de parada

Los AG no tienen un criterio de parada concreto y definido, por lo que debemos indicarle cuándo parar. A menudo se usa un número máximo de generaciones como criterio, aunque se pueden emplear otros criterios como la bondad de la mejor solución, la convergencia de la población o cualquier otro criterio específico.

Se ha empleado 400 generaciones como criterio de parada del AG en la mayoría de los casos analizados en este trabajo.

### 3.2.2.3. Operador de cruce (*crossover*)

Consiste en el intercambio de material genético entre dos cromosomas. El *crossover* es el principal operador genético, hasta el punto que se puede decir que no es un AG si no tiene *crossover*, y sin embargo puede serlo perfectamente sin mutación, según descubrió Holland. El *teorema de los esquemas* confía en él para

hallar la mejor solución a un problema.

El AG implementado en este trabajo emplea el *operador de cruce en 1 punto (1-Point Crossover)*, en el que los dos cromosomas padres se cortan por un punto específico seleccionado al azar, y el material genético situado entre ellos se intercambia dando lugar a dos hijos, tal y como muestra la Figura 3.3.

Los individuos se cruzarán o no en base a una probabilidad de cruce ( $P_{C_{ross}}$ ). El tipo de AG empleado requiere de una alta  $P_{C_{ross}}$  para garantizar una convergencia adecuada del mismo. En este caso se emplea una  $P_{C_{ross}} = 0,7$  para todos los casos estudiados, pues estudios previos determinaron que para esta probabilidad la convergencia es mejor para este tipo de problemas.

Valor Binario	Valor Desplazado	Valor Código Gray
A	B	A (XOR) B
0000	0000	0000
0001	0000	0001
0010	0001	0011
0011	0001	0010
0100	0010	0110
0101	0010	0111
0110	0011	0101
0111	0011	0100
1000	0100	1100
1001	0100	1101
1010	0101	1111
1011	0101	1110
1100	0110	1010
1101	0110	1011
1110	0111	1001
1111	0111	1000

Figura 3.2: Representación binaria frente a código Gray.

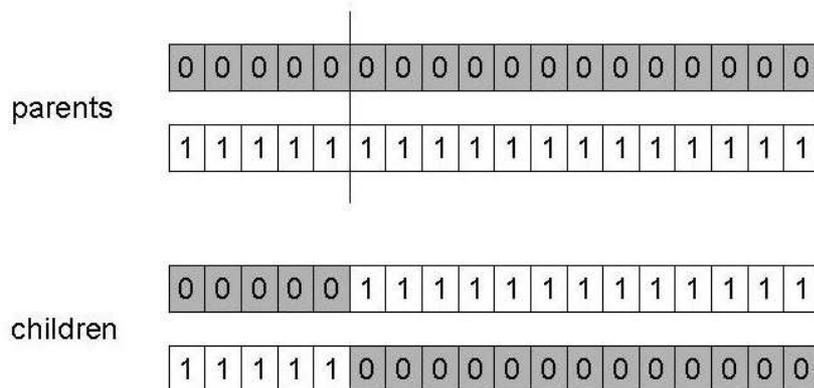


Figura 3.3: Cruce en un punto.

### 3.2.2.4. Operador de mutación

En la evolución, una mutación es un suceso bastante poco común (sucede aproximadamente una de cada mil replicaciones). En la mayoría de los casos las mutaciones son letales, pero en promedio contribuyen a la diversidad genética de la especie. En un AG tendrán el mismo papel y la misma frecuencia (es decir, muy baja).

Una vez establecida la frecuencia de mutación se examina cada bit del cromosoma en el momento de crear el nuevo individuo a partir de sus padres (normalmente se hace de forma simultánea al *crossover*). Si un número generado aleatoriamente está por debajo de esa probabilidad ( $P_{Mut}$ ) se cambiará el bit (es decir, de 0 a 1 ó de 1 a 0), tal y como muestra la Figura 3.4; si no, se dejará como está. Dependiendo del número de individuos que haya y del número de bits por individuo, puede resultar que las mutaciones sean extremadamente raras en una sola generación. No conviene abusar de la mutación; es cierto que es un mecanismo generador de diversidad y, por tanto, supone una solución cuando el algoritmo genético está estancado, pero también es cierto que probabilidades elevadas de mutación acercan el comportamiento del algoritmo genético a una búsqueda aleatoria. Siempre es más conveniente usar otros mecanismos de generación de diversidad, como aumentar el tamaño de la población, o garantizar la aleatoriedad de la población inicial.

En este trabajo se estudia cada caso para distintas probabilidades de mutación. Exactamente se estudian ocho probabilidades, que van desde  $P_{Mut} = 0,03$  a  $P_{Mut} = 0,10$ , en intervalos de 0,01.

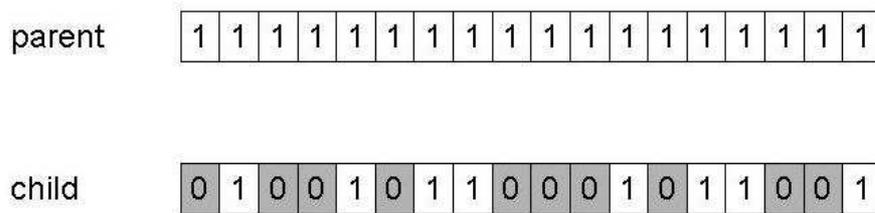


Figura 3.4: Mutación de 10 bits en un cromosoma.

### 3.2.2.5. Operador de reproducción

Incluye un algoritmo de selección, que asigna una probabilidad de selección a cada cromosoma, y un algoritmo de muestreo, que produce copias de los cromosomas de la generación  $N_0$  a la generación  $N$ .

Con este operador se seleccionan  $n$  individuos de la población inicial  $P_0$  de  $m$  individuos. Dado el tipo de algoritmo empleado, se emplea el método de *selección directa*, en el que de entre los  $m$  individuos de la población inicial, se escogen los  $n$  individuos con mayor aptitud para mantenerse en la generación siguiente.

En este trabajo se emplea una  $P_{Sel} = 0,5$ , de manera que cada generación mantiene, al menos, la mitad de los mejores individuos de la generación anterior; la otra mitad estará compuesta por los mejores individuos de la población intermedia, por el resto de la población original o bien por una mezcla de ambos, en función de si resultan ser mejores o peores individuos que los que tratan de reemplazar.

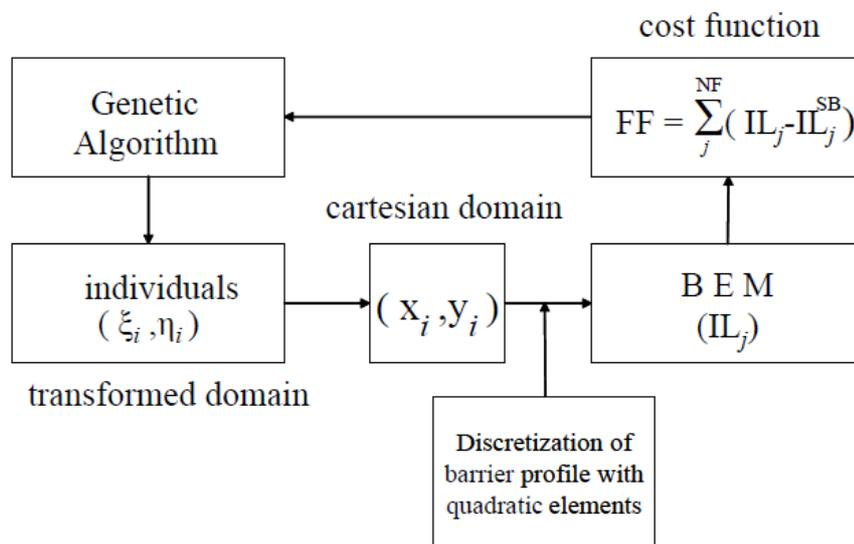
# Capítulo 4

## Presentación del problema

### 4.1. Descripción general del proceso

La optimización de los diseños de pantalla se lleva a cabo haciendo uso de un software de Algoritmo Genético (AG) acoplado a un programa que implementa el Método de los Elementos de Contorno (MEC) para problemas de acústica exterior. El programa de AG genera una población de soluciones candidatas que operan dentro de un dominio transformado que posteriormente son evaluadas por el programa de MEC dentro de un dominio Cartesiano, para posteriormente evaluar la función objetivo (FOB). Este ciclo continúa desarrollándose hasta la condición de parada impuesta (número de máximo de generaciones en este trabajo), realizando operaciones de selección, cruce y mutación en base a los valores de la función objetivo, según parámetros establecidos en el AG.

La Figura 4.1 está basada en [22], y muestra de forma esquemática el proceso integrado de ambos programas.



**Figura 4.1:** Proceso de optimización mediante el acoplamiento de programa de AG y de MEC.

## 4.2. Hipótesis de partida

Si se considera el caso de tráfico rodado, se supone un estado de tráfico denso y continuo, y una calzada recta, la situación de propagación acústica es idéntica en cualquier plano perpendicular a la vía. El problema entonces puede ser estudiado mediante un modelo bidimensional (2D) (Figura 2.1). Este tipo de consideración resulta una aproximación muy acertada en muchos casos del problema real tridimensional (3D), si se asumen las siguientes hipótesis y simplificaciones:

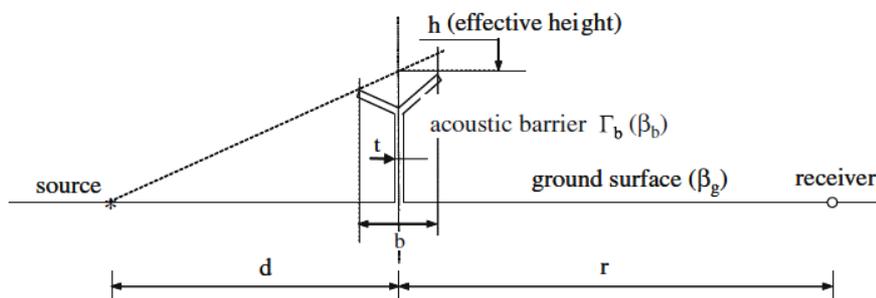
- El emisor es una fuente lineal, recta e infinita.
- El receptor o receptores son lineales, rectos e infinitos.
- La pantalla es longitudinalmente recta e infinita.

El análisis requiere, por tanto, la caracterización de las tres componentes implicadas en el mismo: la fuente, el medio de propagación y el entorno. Para definir la fuente es necesario conocer tanto su rango en frecuencias como la potencia sonora asociada a cada una de ellas. Para el caso de ruido de tráfico existen algunos espectros normalizados. La vía de transmisión de propagación es el aire, que se modela como medio elástico compresible, y para el que se admiten las hipótesis clásicas de homogeneidad e isotropía con viscosidad despreciable y comportamiento lineal. El entorno se caracteriza por su geometría, así como por la posible capacidad absorbente de energía acústica de los diferentes obstáculos, que a su vez depende de las características de los materiales y del tratamiento de su superficie.

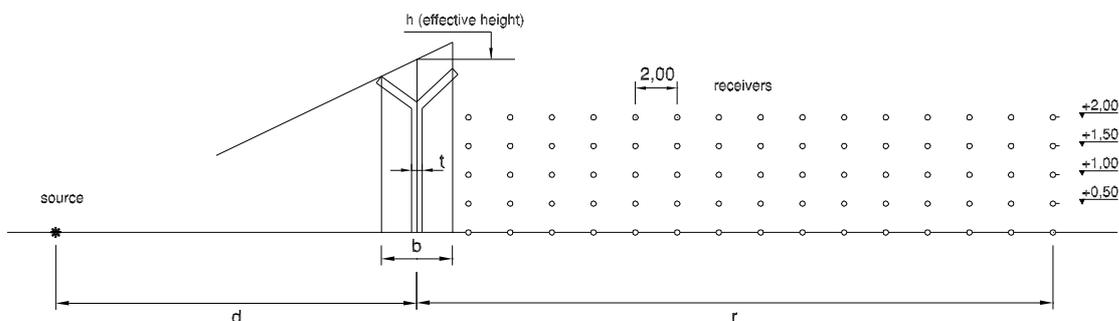
## 4.3. Descripción de los problemas

Los problemas estudiados en este trabajo (ver Figuras 4.2 (basada en [22]) y 4.3) desarrollan un modelo bidimensional, basado en una fuente de sonido monofrecuencia, coherente e infinita, situada paralelamente a una barrera sonora o pantalla de sección transversal uniforme. Dicha barrera está situada en un plano llano (el suelo) de admitancia uniforme y presenta una superficie perfectamente reflejante, por lo que es incapaz de absorber energía acústica

La altura efectiva ( $h$ ) de una pantalla es comúnmente aceptada como el factor más importante que afecta a su eficiencia acústica. Como tal, en este trabajo se ha establecido  $h = 3m$  como altura máxima efectiva para los distintos diseños de barrera en  $Y$ . Éstos se han configurado con tres brazos, diferente pendiente y espesor  $t = 0,1m$ . La proyección de la pantalla sobre el suelo es constante en todos los casos ( $b = 1m$ ). En esta configuración general están incluidas las pantallas  $T$ -,  $Y$ - y de perfil de flecha. Estas formas de pantalla han sido elegidas de manera intencionada, ya que su baja dependencia paramétrica permite una implementación sencilla del proceso de optimización del diseño sin perder generalidad.



**Figura 4.2:** Problema bidimensional objeto de estudio. Geometría estándar de barrera de tres brazos. Un receptor.



**Figura 4.3:** Problema bidimensional objeto de estudio. Geometría estándar de barrera de tres brazos. Varios receptores.

### 4.3.1. Configuraciones de pantalla en Y tipo estudiadas

Cada problema será estudiado conforme a distintas configuraciones de pantalla en Y propuestas. Se proponen en este trabajo tres configuraciones típicas de perfil en Y con las que se pretende obtener una eficacia acústica similar a la obtenida por las pantallas simples de 3,5, 4,0 y 4,5 metros de altura efectiva. Dichas configuraciones reciben los nombres de *Y base fija*, *Y base móvil vertical* e *Y base móvil*, y sus tipologías se muestran en las Figuras 4.4, 4.5 y 4.6.

La configuración *Y base fija* ha sido estudiada previamente en [22], mientras que el estudio de las configuraciones *Y base móvil vertical* e *Y base móvil* se introducen como novedad en este trabajo.

### 4.3.2. Variables de diseño de las configuraciones

Las características de la barrera en  $Y$  permite que el perfil a modelar se base únicamente en una serie de puntos. Estos puntos son las variables de diseño del problema y configuran el cromosoma del AG para cada caso analizado.

Para las configuraciones  $Y$  base fija e  $Y$  base móvil vertical (ver Figuras 4.4 y 4.5) únicamente son necesarias cuatro variables para definir el problema:  $\eta_1$ ,  $\xi_2$ ,  $\eta_2$  y  $\eta_3$ . La coordenada  $\xi$  del centro de la base para el caso  $Y$  base móvil vertical coincide con la coordenada  $\xi_2$ .

Para la configuración  $Y$  base móvil (ver Figura 4.6) es necesaria una variable adicional que codifique el movimiento libre de la base de la pantalla:  $\xi_p$ .

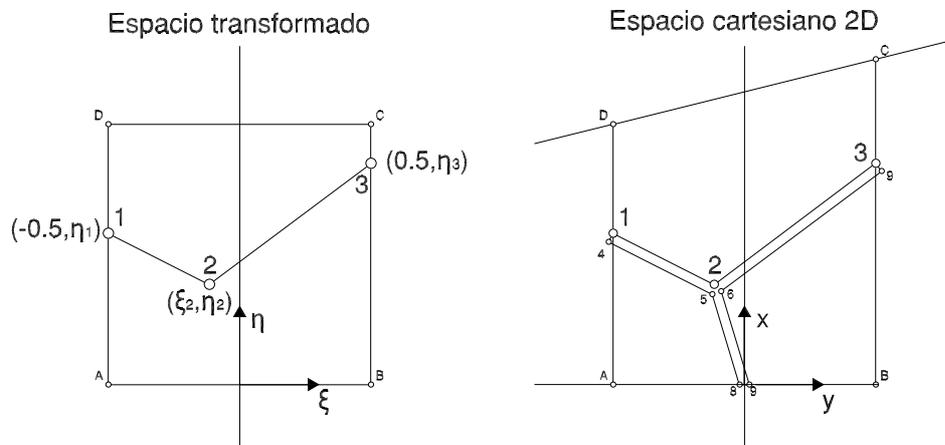


Figura 4.4: Variables de diseño de la configuración  $Y$  base fija.

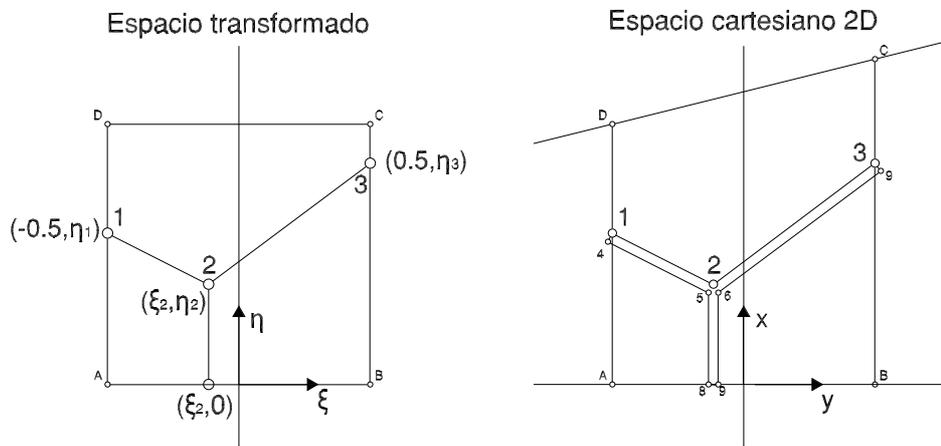


Figura 4.5: Variables de diseño de la configuración Y base móvil vertical.

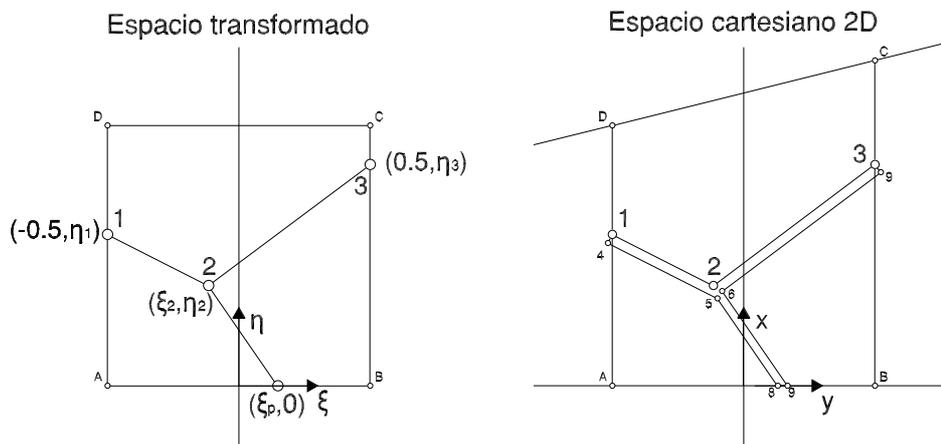


Figura 4.6: Variables de diseño de la configuración Y base móvil.

### 4.3.3. Dominios considerados y transformación

Es interesante trabajar en un dominio transformado de manera que, por un lado se dote al problema de una cierta flexibilidad en lo que a aceptación de distintos parámetros de entrada se refiere (como la altura efectiva de la pantalla o la proyección horizontal de la barrera), y por otro se simplifique la optimización de los diseños mediante el acotamiento del espacio de búsqueda del AG. La transformación del espacio Cartesiano al espacio Transformado se muestra en la Figura 4.7, donde se puede ver que se pasa de un espacio de búsqueda cuadrado (espacio Transformado) a un espacio de búsqueda trapezoidal marcado por la línea que une la altura efectiva de la pantalla con la fuente (espacio Cartesiano). De aquí se deduce fácilmente que:

$$\begin{aligned}
 x_1^m &= -\frac{b}{2} & ; & & y_1^m &= 0 \\
 x_2^m &= \frac{b}{2} & ; & & y_2^m &= 0 \\
 x_3^m &= \frac{b}{2} & ; & & y_3^m &= h \left( 1 + \frac{1}{2} \frac{b}{d} \right) \\
 x_4^m &= -\frac{b}{2} & ; & & y_4^m &= h \left( 1 - \frac{1}{2} \frac{b}{d} \right)
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

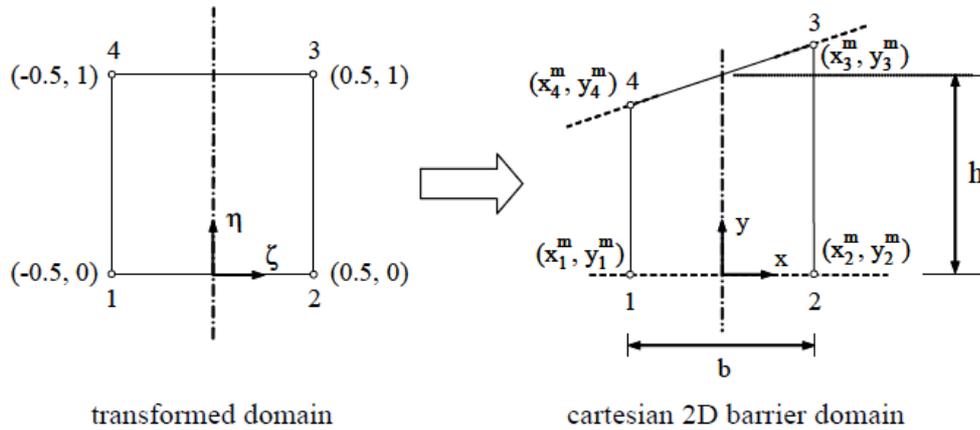


Figura 4.7: Sistemas de coordenadas bidimensionales.

Para cada punto  $(\xi_i, \eta_i)$  en el dominio transformado le corresponde uno análogo  $(x_i, y_i)$  en el dominio Cartesiano. La forma más conveniente de establecer la relación entre ambos se muestra en la Ec. (4.2):

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} x_i \\ y_i \end{Bmatrix} &= \psi_1(\xi_i, \eta_i) \begin{Bmatrix} x_1^m \\ y_1^m \end{Bmatrix} + \psi_2(\xi_i, \eta_i) \begin{Bmatrix} x_2^m \\ y_2^m \end{Bmatrix} \\ &+ \psi_3(\xi_i, \eta_i) \begin{Bmatrix} x_3^m \\ y_3^m \end{Bmatrix} + \psi_4(\xi_i, \eta_i) \begin{Bmatrix} x_4^m \\ y_4^m \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (4.2)$$

donde:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= \left(\frac{1}{2} - \xi\right) (1 - \eta) \\ \psi_2 &= \left(\frac{1}{2} + \xi\right) (1 - \eta) \\ \psi_3 &= \eta \left(\frac{1}{2} + \xi\right) \\ \psi_4 &= \eta \left(\frac{1}{2} - \xi\right) \end{aligned} \quad (4.3)$$

son las funciones de forma en términos de coordenadas en el dominio transformado:

$$-0,5 \leq \psi \leq 0,5 \quad ; \quad -1 \leq \eta \leq 1 \quad (4.4)$$

El AG optimiza la eficacia acústica de la configuración de barrera analizada en cada caso, variando su perfil mediante el establecimiento de las variables de diseño en el dominio transformado (ver lado izquierdo de las Figuras 4.4, 4.5 y 4.6). Las coordenadas de las variables  $\xi_1$  y  $\xi_3$  se establecen *a priori* ( $-0,5$  y  $0,5$ , respectivamente).

Las coordenadas  $(x, y)$  de los puntos 1, 2, 3 y  $p$  (para la configuración *Y base móvil*) se obtienen a partir de la Ec. (4.2). Las coordenadas Cartesianas de los puntos restantes de la barrera (4–9) representados en las Figuras 4.4, 4.5 y 4.6 se calculan a partir de simples operaciones geométricas considerando que el espesor de cada brazo es perpendicular a su longitud. A partir de la geometría generada y considerando una fuente emisora de ruido situada a la distancia  $d$  del eje de la pantalla, el código que implementa el MEC calcula los valores de presión acústica para cada frecuencia en la posición de un receptor situado a la distancia  $r$  del eje de la pantalla. Estos valores son requeridos para la posterior evaluación de la función objetivo encargada de obtener la mejor solución en base a los criterios establecidos por el procedimiento de diseño óptimo.

## 4.4. Medida de la eficacia acústica

La interposición de la barrera dificulta la propagación acústica desde la fuente hacia el receptor, pues ocasiona que parte de la onda incidente sea reflejada por el nuevo obstáculo. Sólo una fracción de la onda acústica es capaz de difractarse sobre la pantalla (la transmisión a través de la pantalla es en la práctica despreciable). El resultado obvio es que en la localización del receptor, el nivel de ruido que se registra al interponer la barrera es inferior al que se registraría en la situación sin barrera. La medida en decibelios de la reducción obtenida por interponer la barrera es una buena forma de evaluar la eficacia de dicha estrategia. Se conoce como *coeficiente de pérdida por inserción de la pantalla* o *IL* (*Insertion Loss* en terminología inglesa) a la diferencia de nivel de presión sonora antes y después de introducir la medida correctora. El IL es un parámetro muy utilizado en la evaluación de medidas de control de ruido, y forma parte de la función objetivo con el que se pretende optimizar los problemas estudiados. Su definición matemática es la siguiente:

$$IL = -20 \log \left( \frac{P_S}{P_B} \right) \text{ (dBA)} \quad (4.5)$$

donde  $P_B$  y  $P_S$  son las presiones acústicas en el receptor para una posición dada con y sin la presencia de la barrera respectivamente. Este parámetro juega un papel fundamental en la definición de la función objetivo de los problemas tratados (ver apartado 4.5).

## 4.5. Definición de la función objetivo (FOB)

El objetivo planteado para la optimización de la eficacia acústica es la minimización de la función objetivo (FOB) para cada uno de los perfiles de pantalla propuesto por el AG. Su expresión está tomada de [21] y se define de la siguiente forma:

$$\sum_{k=i}^N (IL_i - IL_i^R)^2 \quad (4.6)$$

expresión que recoge las diferencias al cuadrado de los valores de IL de referencia para cada caso ( $IL_i^R$ ) y los valores de IL de la solución candidata.  $N$  es un valor que depende del problema analizado.

### 4.5.1. Definición de la FOB para el problema con un solo receptor

Como criterio de diseño del perfil de barrera en  $Y$  para la configuración mostrada en la Figura 4.2, es suficiente un criterio de medida de eficacia acústica de la barrera que tenga en cuenta el valor de IL para cada frecuencia central de octava analizada del individuo en cuestión, por lo que se emplea la Ec. (4.5) como parámetro de control del ruido. Empleando el mismo criterio se obtiene la curva de IL frecuencial para los casos de pantalla simple de  $h = 3,5, 4,0$  y  $4,5$  m, que se convierten así en las curvas de referencia.

Optimizar el diseño de la barrera considerando varias frecuencias resulta ser más apropiado que si se empleara como parámetro de diseño la propagación real del sonido, pues evita la optimización de problemas asociados con una sola frecuencia lo cual podría dar lugar a la obtención de valores irreales de IL debido a la proximidad de ciertas frecuencias a las frecuencias propias asociadas a la evaluación del MEC.

Así, la función objetivo para este tipo de problema hace uso de la Ec. (4.7), que establece el coeficiente de pérdida por inserción para cada frecuencia (IL frecuencial). En este caso el valor de  $N$  de la expresión (4.6) equivale al número de frecuencias analizadas, que se corresponden con las 16 primeras frecuencias centrales de las bandas de 1/3 de octava establecidas por el espectro normalizado de ruido de tráfico propuesto por el Código Técnico de la Edificación (CTE): 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600 y 2000 Hz.

$$FOB = \sum_{k=1}^{N_{Freq}} (IL_i - IL_i^R)^2 \quad (4.7)$$

### 4.5.2. Definición de la FOB para el problema con varios receptores

Como criterio de diseño del perfil de barrera en  $Y$  para la configuración mostrada en la Figura 4.3, se opta por establecer como criterio de medida de eficacia acústica el valor medio del IL promedio de aquellos receptores situados a igual distancia del eje de la barrera. Es decir, con los valores de IL frecuenciales proporcionados por el código que implementa el MEC (ver Ec. (4.5)) se calcula el valor de IL promedio para cada receptor, a partir de la Ec. (4.8), con los que finalmente se obtiene el valor medio de cada grupo de receptores situados a igual distancia del eje de la barrera. Empleando el mismo criterio se obtiene la curva de IL promedio para los casos de pantalla simple de  $h = 3,5, 4,0$  y  $4,5$  m, que se convierten de este modo en las curvas de referencia.

Así, la función objetivo para este tipo de problema hace uso de una expresión que trata de independizar los valores de IL respecto de la frecuencia. Con ese fin se emplea el espectro de ruido de tráfico normalizado por la norma ISO 717.2 (que corresponde esencialmente al ruido de rodadura de vehículos ligeros en autopistas, ajustado a un nivel global de 0 dB para las 18 frecuencias centrales de las bandas de 1/3 de octava comprendidas entre 100 Hz y 5000 Hz [30] (100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000 y 5000 Hz), promediándose los correspondientes valores de IL para las frecuencias mencionadas a través de la siguiente expresión:

$$IL_{w,tr} = -10 \log \sum_{i=1}^{18} 10^{(A_{tr,i} - IL_i)/10} (dBA) \quad (4.8)$$

siendo  $A_{tr,i}$  los correspondientes valores del ruido de tráfico ponderado en dBA para las frecuencias  $i=100 \div 5000$  Hz.

Por tanto, la definición de la FOB quedaría de la siguiente forma:

$$FOB = \sum_{k=1}^{NGRec} (IL_{w,tr} - IL_{w,tr}^R)^2 \quad (4.9)$$

En este caso el valor de  $N$  de la expresión (4.6) equivale al número de grupo de receptores situados a la misma distancia horizontal de la barrera.

## 4.6. Procedimiento del proceso de ajuste

Partiendo de las soluciones candidatas aportadas por el AG se evalúa la bondad de las mismas en base a expresiones vistas en el apartado 4.5, que tratan de ajustar la eficacia de las configuraciones propuestas a una de referencia dada. Como método de ajuste se recurre a la minimización de la FOB para cada uno de los perfiles de pantalla propuesto por el AG, atendiendo a las expresiones (4.7) y (4.9) según sea el problema estudiado.

Las Figuras 4.8 y 4.9 muestran de un modo gráfico el proceso de ajuste de las curvas para ambos casos.

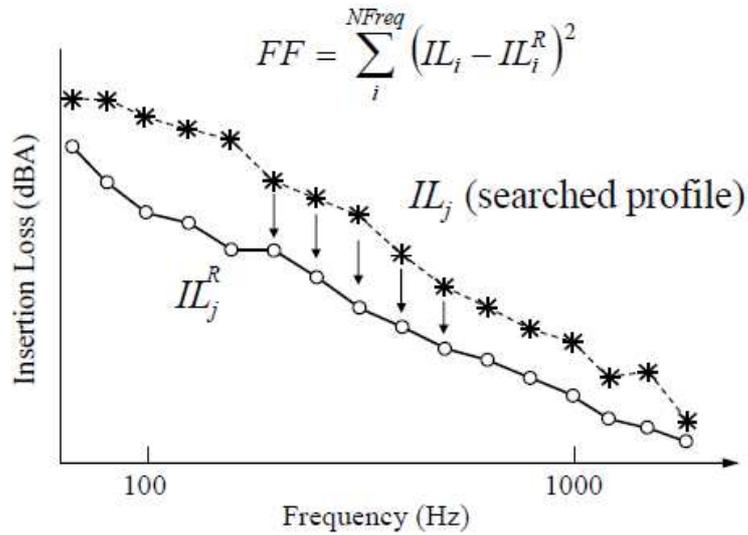


Figura 4.8: Proceso de ajuste de la curva para el problema con un solo receptor.

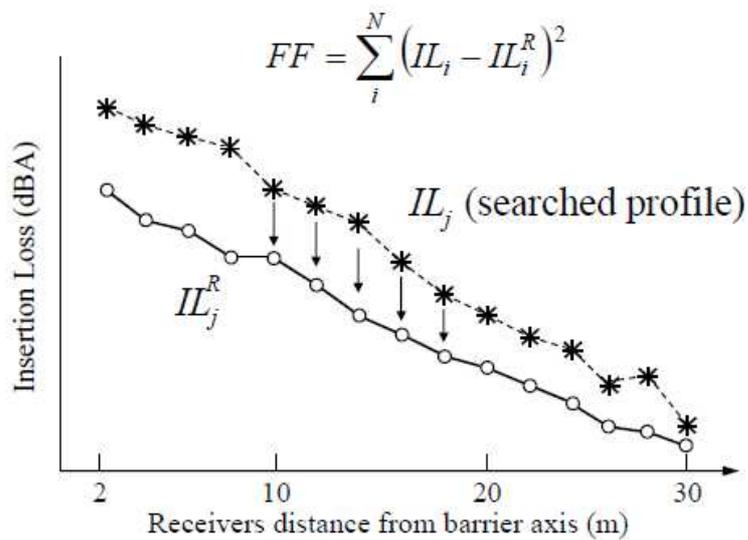


Figura 4.9: Proceso de ajuste de la curva para el problema con varios receptores.

## **4.7. Normativa empleada**

El empleo de normativa específica relacionada con este trabajo se centra principalmente en el establecimiento de las bandas de frecuencias a analizar así como las expresiones empleadas para la determinación del coeficiente de pérdida por inserción para cada problema analizado.

La normativa consultada en esta materia ha sido el Código Técnico de la Edificación (CTE) para determinar el espectro normalizado de ruido de tráfico rodado y normas de la International Standard Organization (ISO) para establecer las expresiones de IL.



# Capítulo 5

## Resultados y conclusiones

### 5.1. Problema con un solo receptor

#### 5.1.1. Configuración *Y base fija*

##### 5.1.1.1. Pantalla simple de 3,5 metros

En la Figura 5.1 se muestran las distintas configuraciones encontradas por el algoritmo para este problema.<sup>1</sup>

La Figura 5.2 recoge los valores de las distintas ejecuciones realizadas, identificándose los correspondientes a los individuos mostrados en la Figura 5.1.

---

<sup>1</sup>Con objeto de facilitar el estudio, se muestran los mejores individuos de cada perfil tipo.

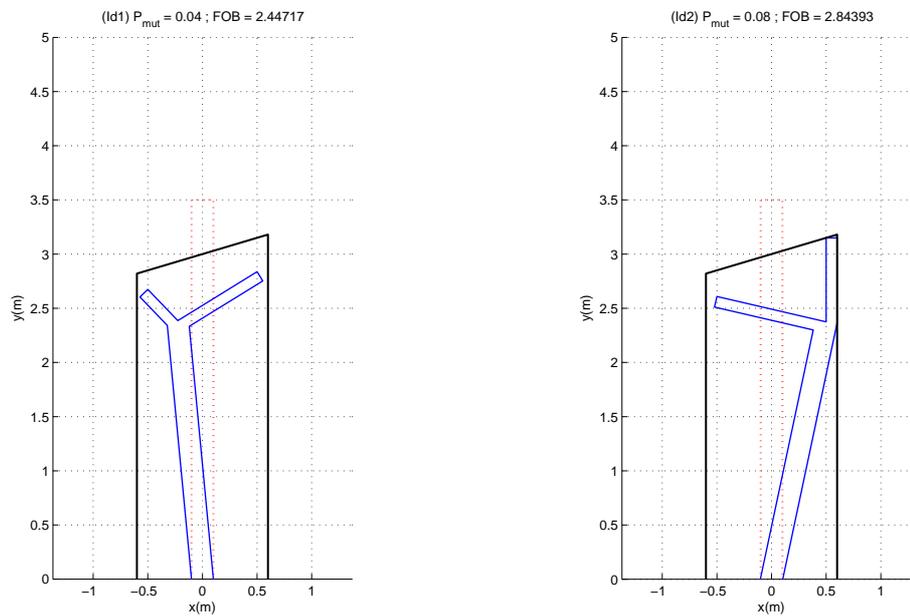


Figura 5.1: Y base fija: configuraciones en Y encontradas con eficacia similar a la pantalla simple de 3,5 m.

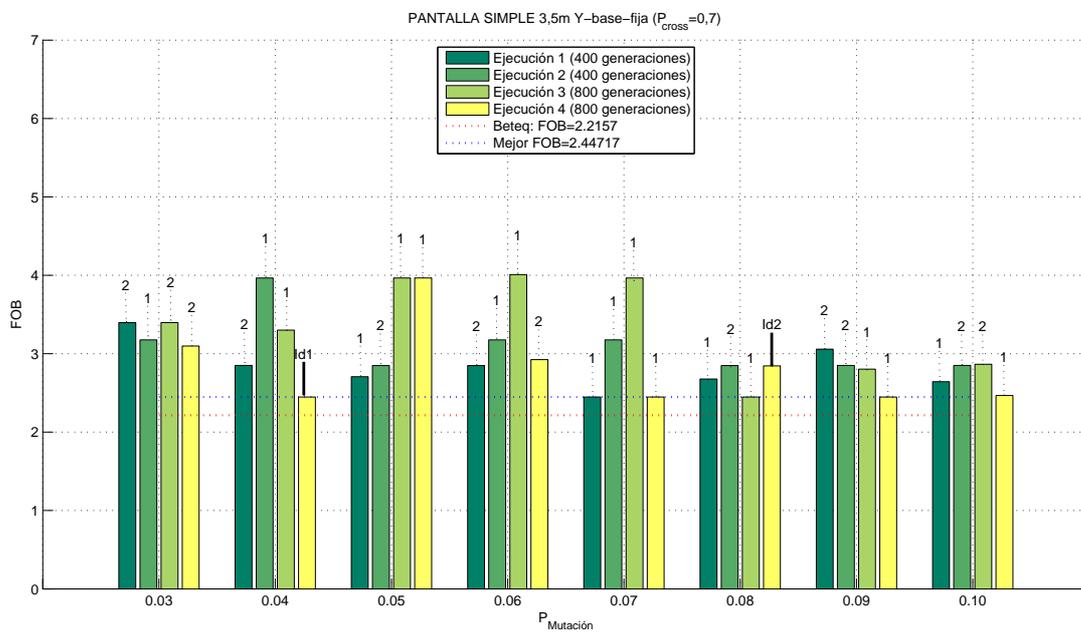
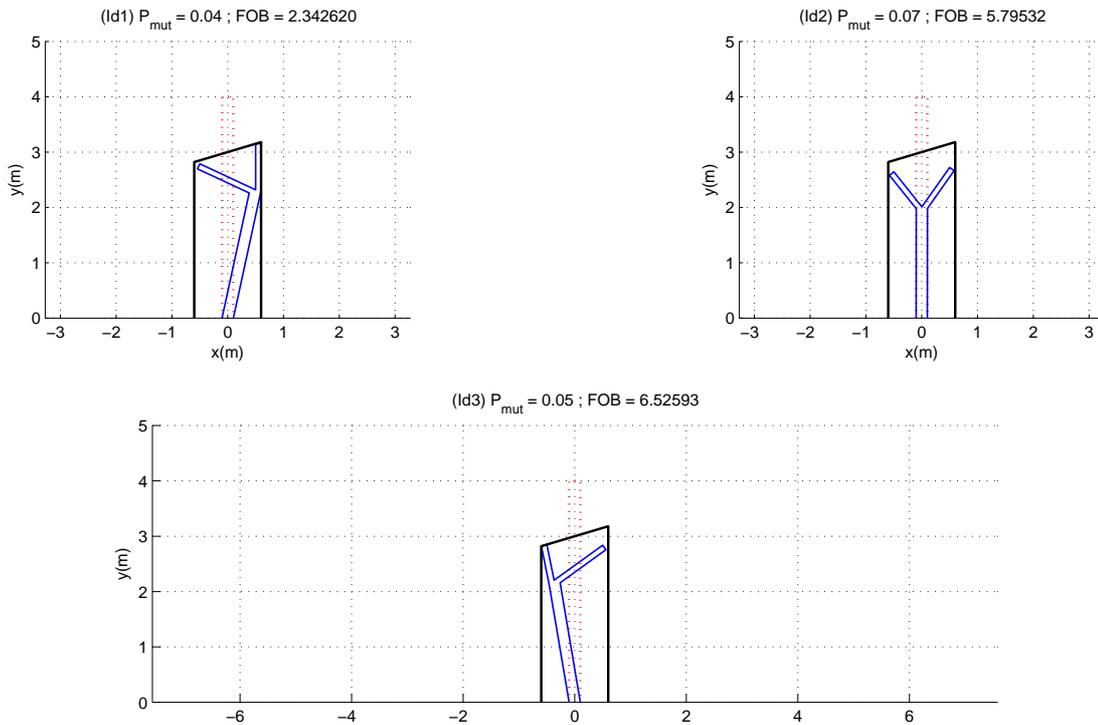


Figura 5.2: Y base fija: valores de la FOB para las distintas probabilidades de mutación y ejecuciones realizadas.

5.1.1.2. Pantalla simple de 4,0 metros

En la Figura 5.3 se muestran las distintas configuraciones encontradas por el algoritmo para este problema.



**Figura 5.3:** Y base fija: configuraciones en Y encontradas con eficacia similar a la pantalla simple de 4,0 m.

La Figura 5.4 recoge los valores de las distintas ejecuciones realizadas, identificándose los correspondientes a los individuos mostrados en la Figura 5.3.

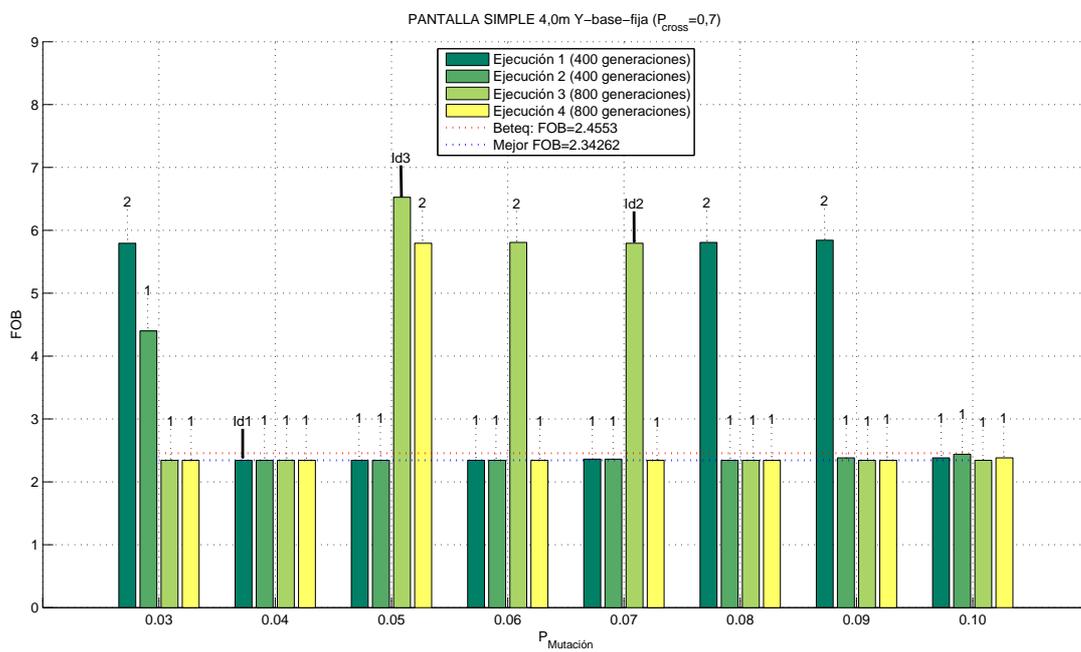
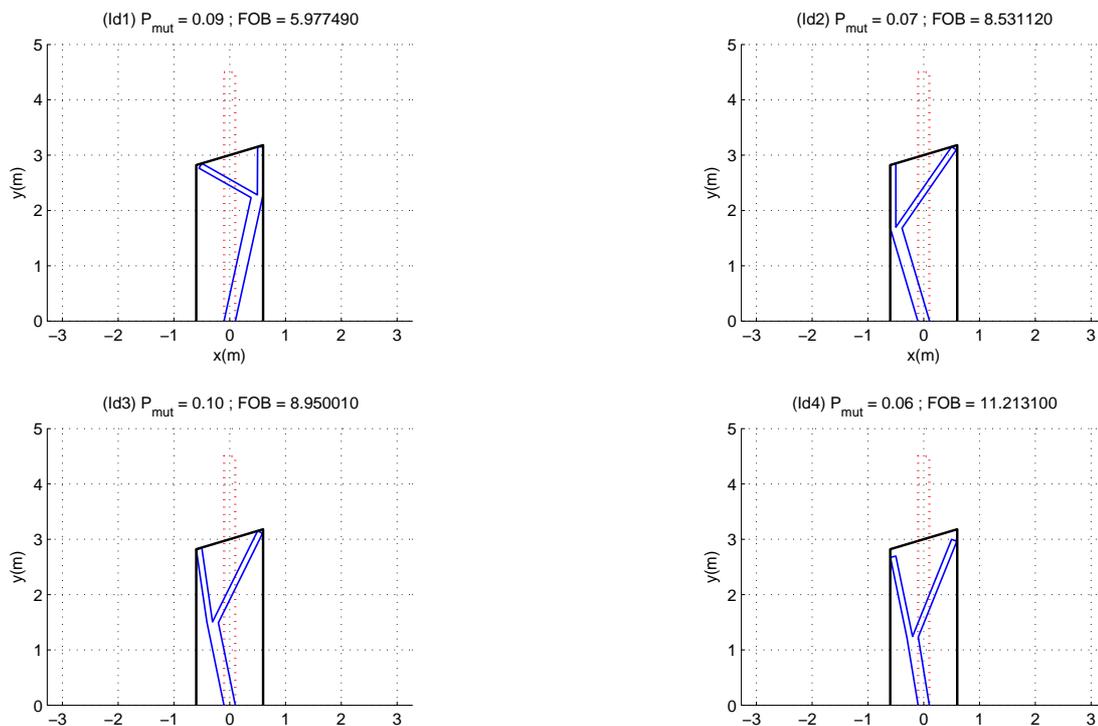


Figura 5.4: Y base fija: valores de la FOB para las distintas probabilidades de mutación y ejecuciones realizadas.

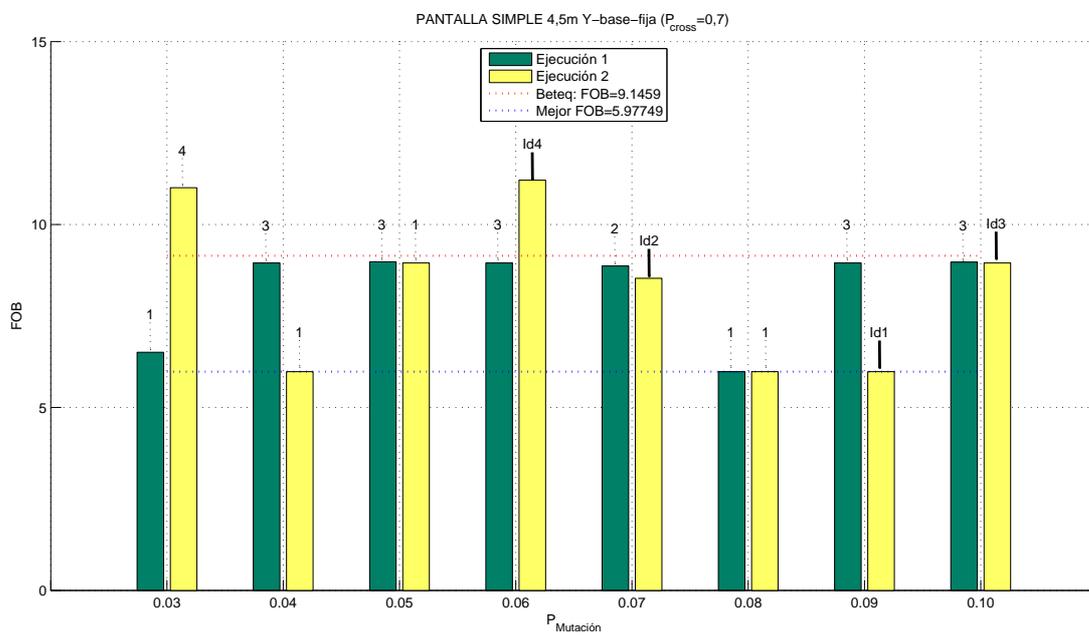
### 5.1.1.3. Pantalla simple de 4,5 metros

En la Figura 5.5 se muestran las distintas configuraciones encontradas por el algoritmo para este problema.



**Figura 5.5:** *Y* base fija: configuraciones en *Y* encontradas con eficacia similar a la pantalla simple de 4,5 m.

La Figura 5.6 recoge los valores de las distintas ejecuciones realizadas, identificándose los correspondientes a los individuos mostrados en la Figura 5.5.



**Figura 5.6:** Y base fija: valores de la FOB para las distintas probabilidades de mutación y ejecuciones realizadas.

### 5.1.1.4. Espectros del coeficiente de pérdida por inserción

Las Figuras 5.7, 5.8 y 5.9 muestran los espectros de IL de las mejores soluciones encontradas por el AG para la configuración *Y base fija* frente a las curvas de referencia a las que pretenden ajustarse.

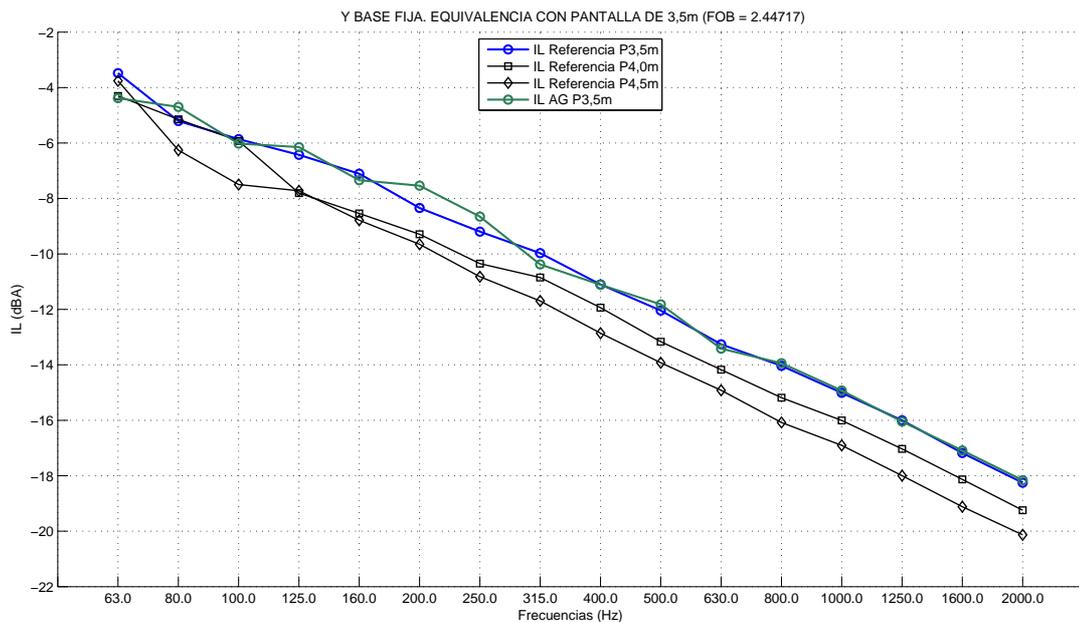


Figura 5.7: Espectro de IL frecuencial para configuración de pantalla *Y base fija* de eficacia similar a pantalla simple de 3,5 m.

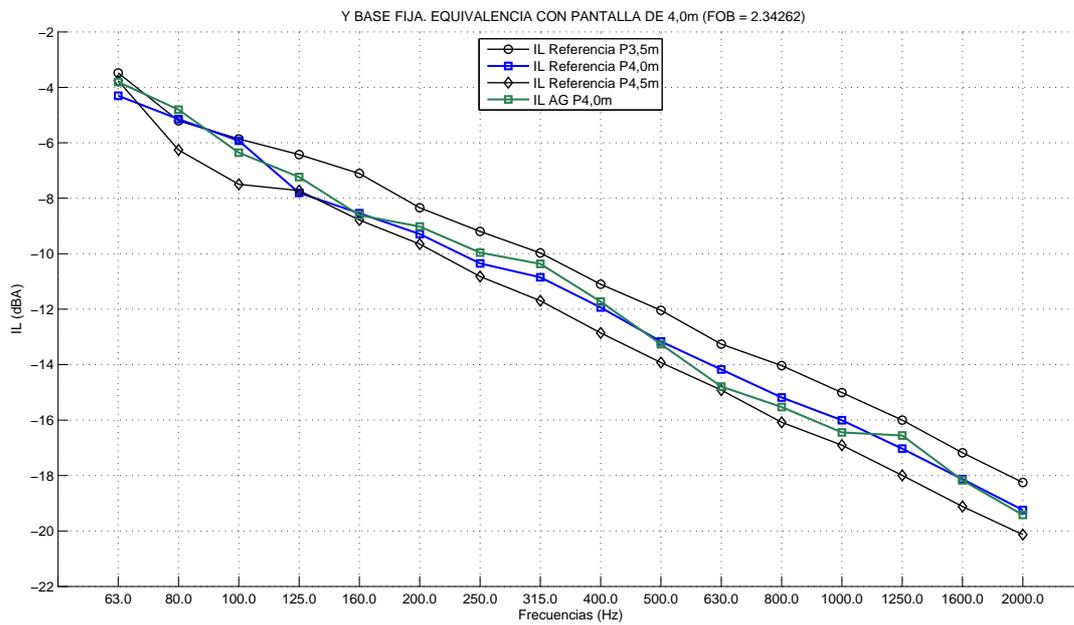


Figura 5.8: Espectro de IL frecuencial para configuración de pantalla Y base fija de eficacia similar a pantalla simple de 4,0 m.

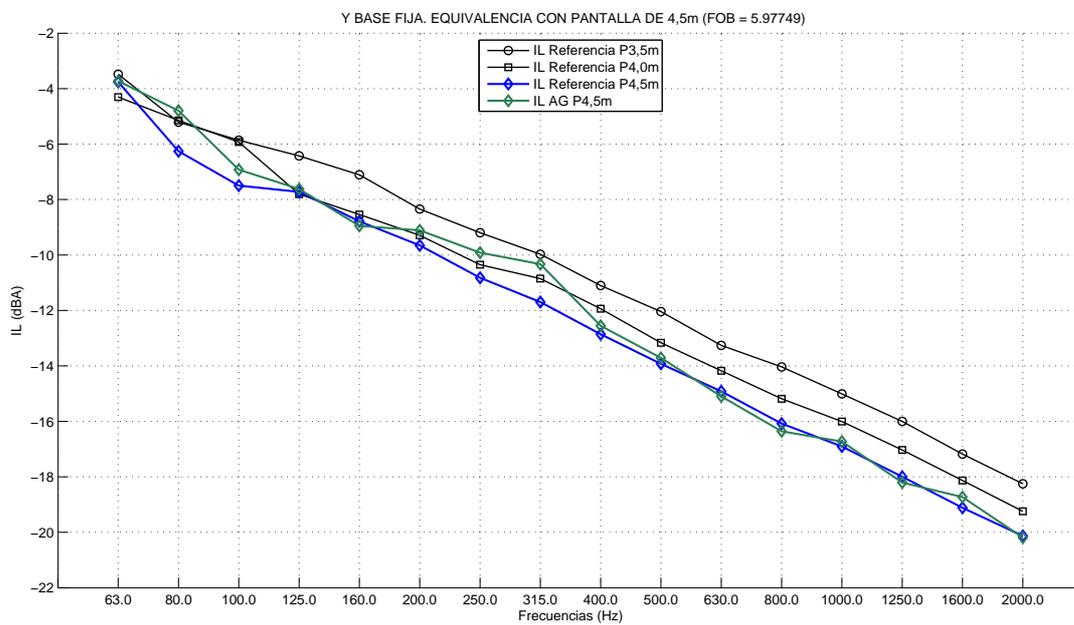


Figura 5.9: Espectro de IL frecuencial para configuración de pantalla Y base fija de eficacia similar a pantalla simple de 4,5 m.

### 5.1.1.5. Evolución del AG

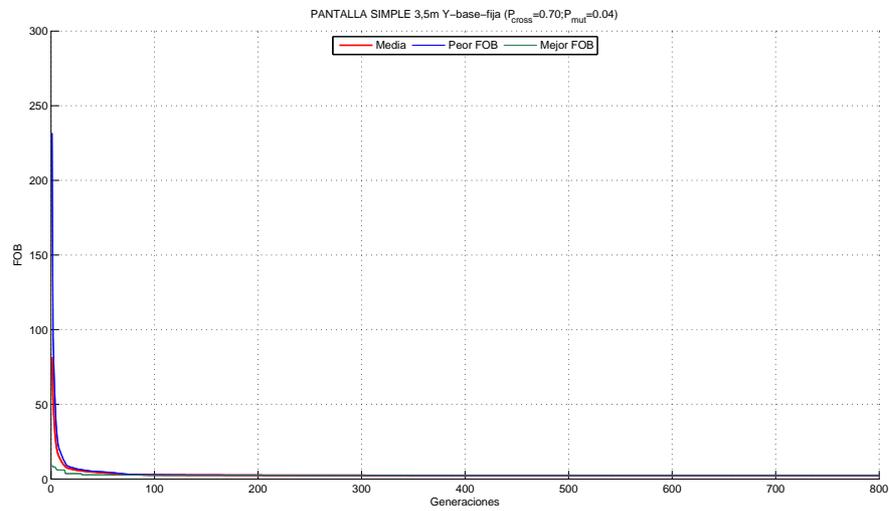


Figura 5.10: Evolución del AG para el mejor individuo de la configuración de pantalla Y base fija de eficacia similar a pantalla simple de 3,5 m.

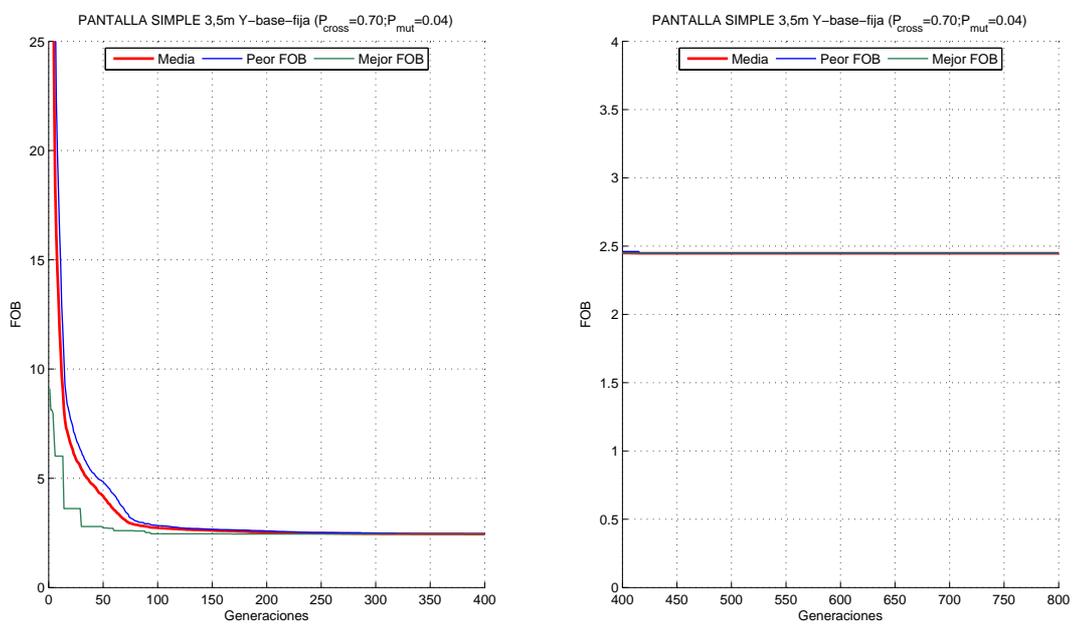


Figura 5.11: Evolución del AG. Ampliación del eje de ordenadas.

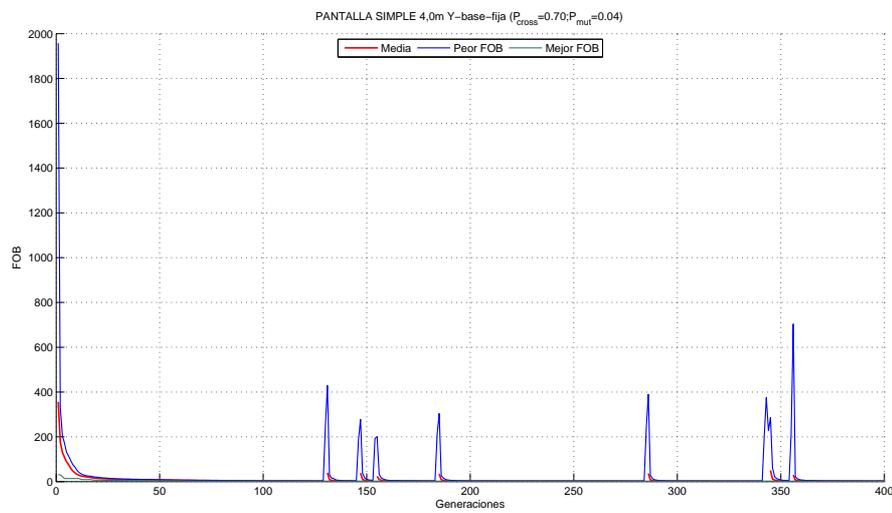


Figura 5.12: Evolución del AG para el mejor individuo de la configuración de pantalla Y base fija de eficacia similar a pantalla simple de 4,0 m.

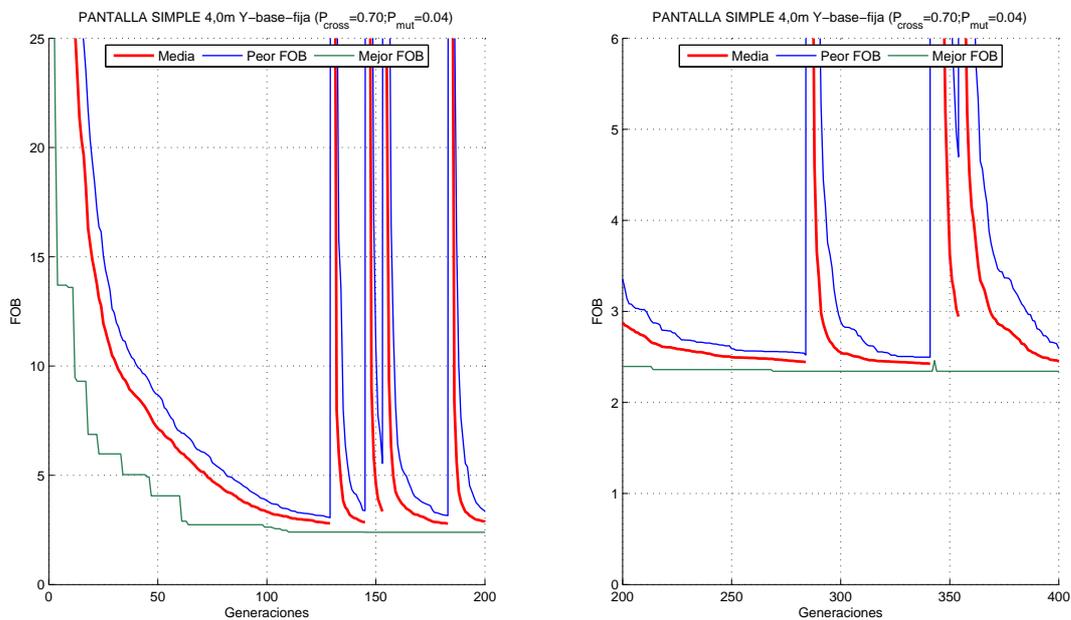


Figura 5.13: Evolución del AG. Ampliación del eje de ordenadas.

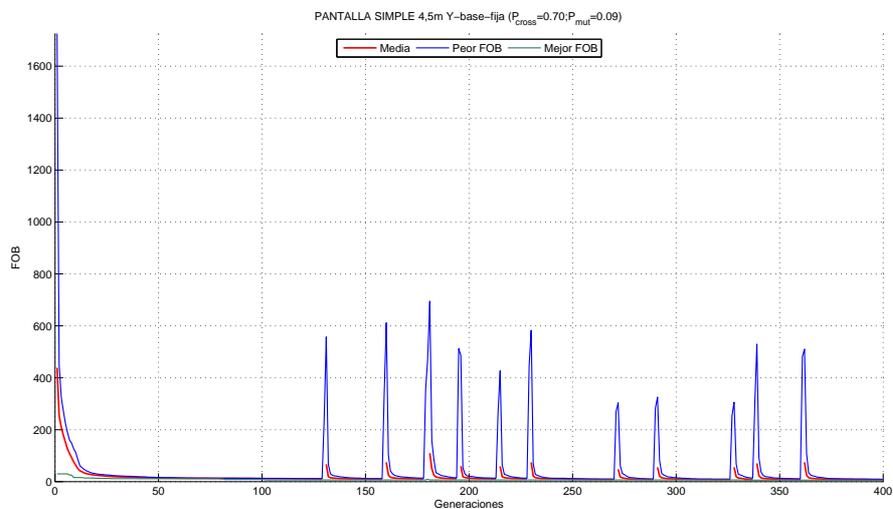


Figura 5.14: Evolución del AG para el mejor individuo de la configuración de pantalla Y base fija de eficacia similar a pantalla simple de 4,5 m.

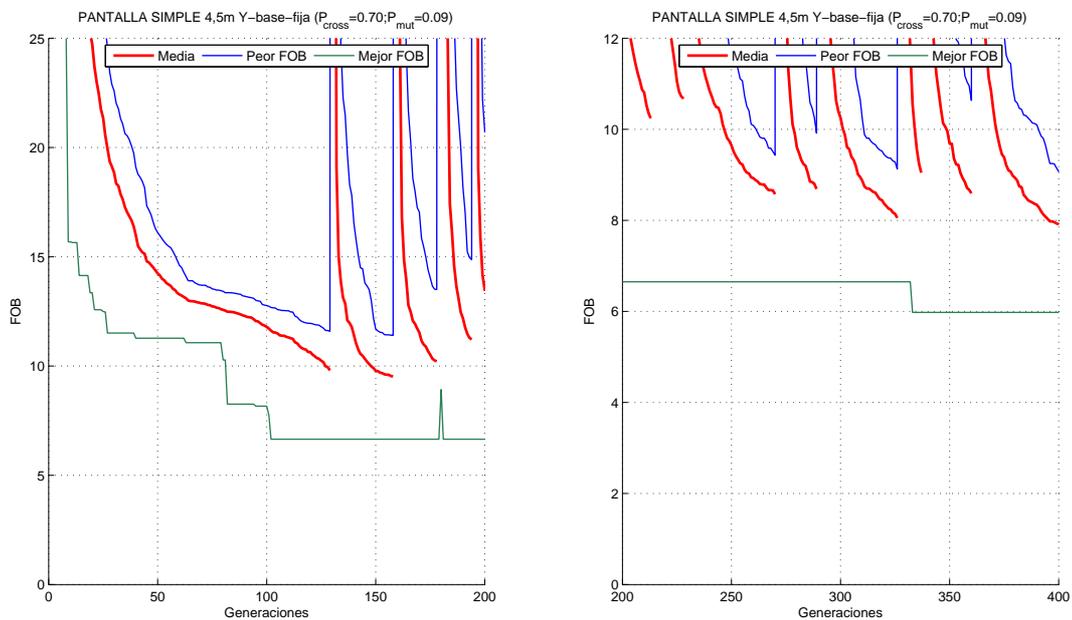


Figura 5.15: Evolución del AG. Ampliación del eje de ordenadas.

### 5.1.1.6. Conclusiones

Relativo a la pantalla de  $h = 3,5m$ , doblando el número de ejecuciones se obtiene un mayor número de veces el mejor individuo (ver Figura 5.2). A pesar de eso, sin embargo, no se logra mejorar la mejor solución encontrada en los casos ejecutados con 400 generaciones. Asimismo se puede destacar la propuesta de distintas soluciones para la misma eficacia acústica, es decir, perfiles distintos con funciones objetivo similares, tal y como se muestra en la Figura 5.1.

Para la pantalla de  $h = 4,0m$  las soluciones propuestas por el AG son mayoritariamente del tipo 1 (Figura 5.4), por lo que existe una tendencia a encontrar individuos cuya tipología resulta ser más eficaz y, además, a encontrar un gran número de veces al mejor individuo (mejor FOB).

Respecto de la pantalla de  $h = 4,5m$ , destacar que las tipologías representadas (ver Figura 5.5) tienden a homogeneizarse; esto se debe a que a mayor exigencia requerida (en este caso mayor altura efectiva) más probabilidad de encontrar los límites del problema, por lo que se reducen las configuraciones de pantalla que dan solución a las exigencias impuestas. Destacar además que para las configuraciones *Id2*, *Id3* e *Id4* se va perdiendo eficacia a medida que el brazo izquierdo se va inclinando.

Del análisis de los resultados existe un dato que llama la atención: el valor de la FOB no sigue una tendencia lógica a la hora de ajustarse a las curvas de referencia correspondiente. Es decir, para la configuración de pantalla en *Y* estudiada el AG es incapaz de encontrar un individuo cuya FOB que trata de ajustarse a la curva de referencia de pantalla simple de  $h = 3,5m$  sea mejor que para la del caso  $h = 4,0m$ ; sin embargo, la lógica sí se cumple para  $h = 4,5m$ , con una FOB claramente peor que para el caso precedente. Ello ocurre a pesar de haber doblado el número de generaciones (800 iteraciones) en el caso de la pantalla de  $3,5m$ , que a lo sumo iguala el mejor valor obtenido para 400 generaciones. Una posible explicación puede ser que el AG ha encontrado individuos muy próximos al mínimo, por lo que aún aumentando el número de generaciones la curva de convergencia se mantiene inalterable.

Para los casos de pantalla de  $3,5m$  sí resultó efectivo doblar el número de generaciones para las probabilidades de mutación analizadas, ya que se alcanzó el mínimo valor de la FOB en 5 de los casos, mientras que hizo lo propio sólo una vez para 400 generaciones. Esta tendencia no se muestra en la pantalla de  $4,0m$ , donde el número de casos que encuentran al mejor de los individuos se reparte más equitativamente entre ambos análisis.

Relativa al análisis del operador de mutación parece que el AG con  $P_{Mut} = 0,08$  muestra un buen comportamiento pues encuentra al menos en una de las ejecuciones para cada caso la mejor FOB.

Relativo a los distintas tipologías de perfil se puede observar que a medida que

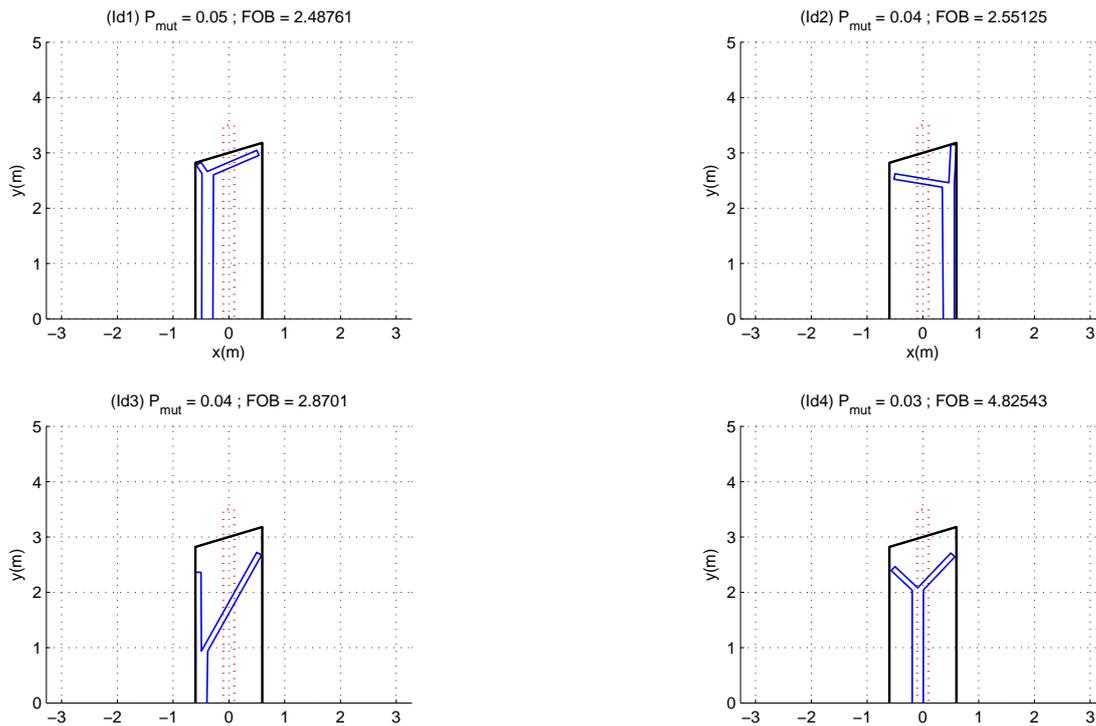
aumenta la altura efectiva de la pantalla mayor número de tipologías aparecen. Esto es lógico pues a mayor  $h$  mayor dificultad para casar la curva de referencia, tal y como muestran las Figuras 5.7, 5.8 y 5.9. De este modo, los resultados de las ejecuciones serán más dispersos conforme aumenta este valor y, por tanto, más tipos distintos de perfiles aparecen.

En todos los casos se observa una mayor presencia de tipologías de pantalla del tipo 1 (tipología similar al perfil de la pantalla con mejor FOB), lo que demuestra que existe una tendencia general hacia la convergencia del perfil óptimo.

## 5.1.2. Configuración *Y* base móvil vertical

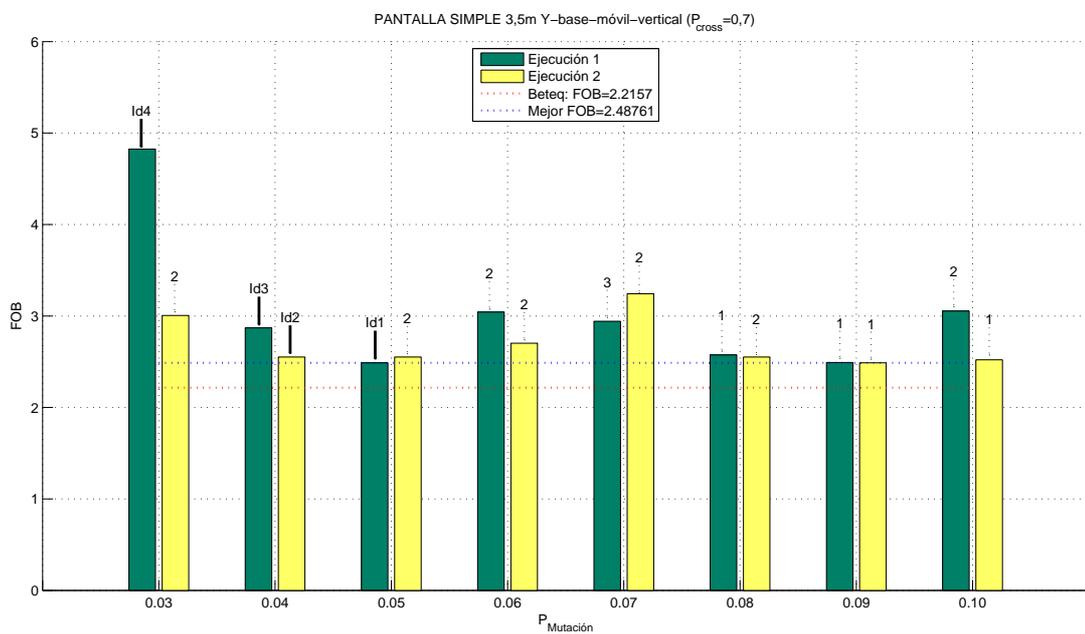
### 5.1.2.1. Pantalla simple de 3,5 metros

En la Figura 5.16 se muestran las distintas configuraciones encontradas por el algoritmo para este problema.



**Figura 5.16:** *Y* base móvil vertical: configuraciones en *Y* encontradas con eficacia similar a la pantalla simple de 3,5 m.

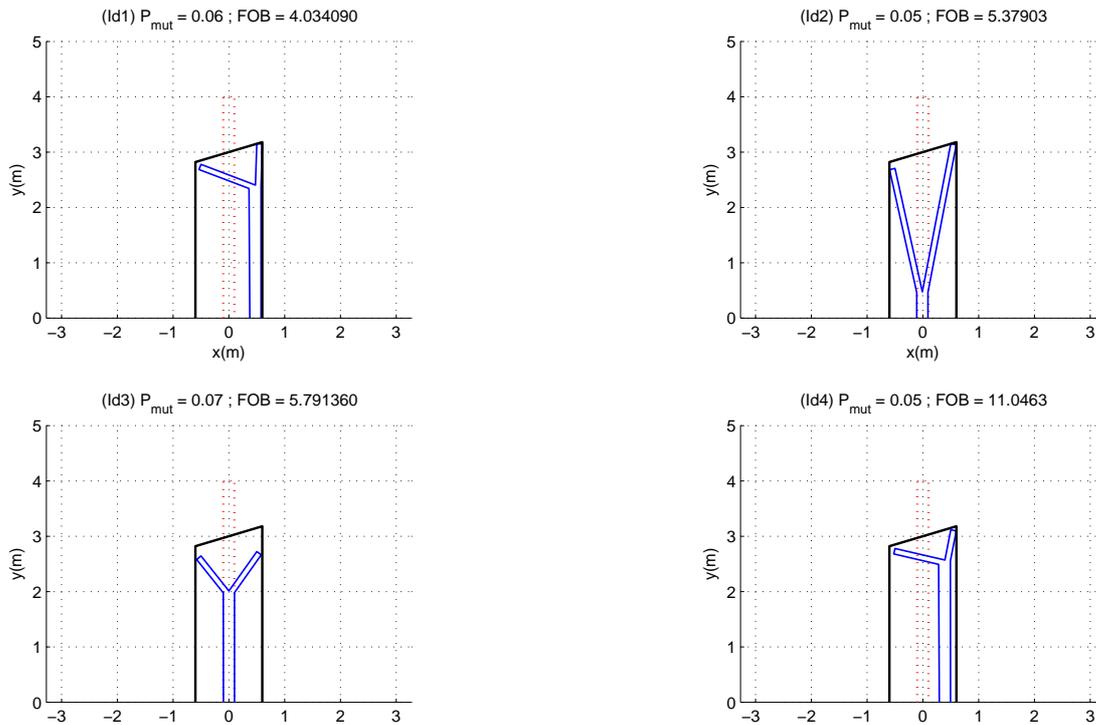
La Figura 5.17 recoge los valores de las distintas ejecuciones realizadas, identificándose los correspondientes a los individuos mostrados en la Figura 5.16.



**Figura 5.17:** Y base móvil vertical: valores de la FOB para las distintas probabilidades de mutación y ejecuciones realizadas.

### 5.1.2.2. Pantalla simple de 4,0 metros

En la Figura 5.18 se muestran las distintas configuraciones encontradas por el algoritmo para este problema.



**Figura 5.18:** *Y* base móvil vertical: configuraciones en *Y* encontradas con eficacia similar a la pantalla simple de 4,0 m.

La Figura 5.19 recoge los valores de las distintas ejecuciones realizadas, identificándose los correspondientes a los individuos mostrados en la Figura 5.18.

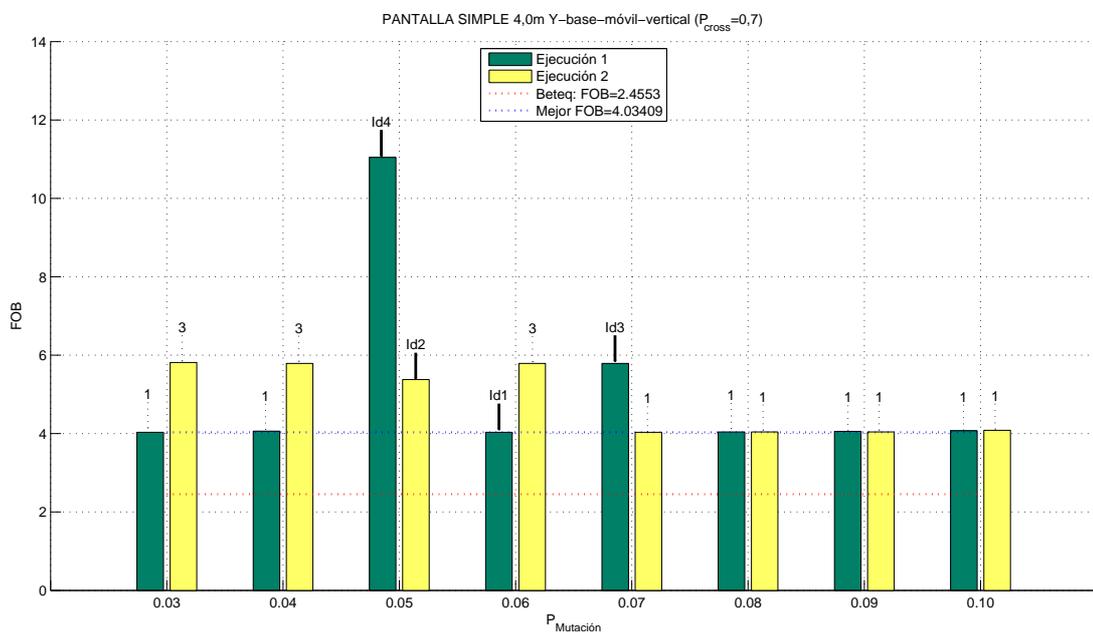
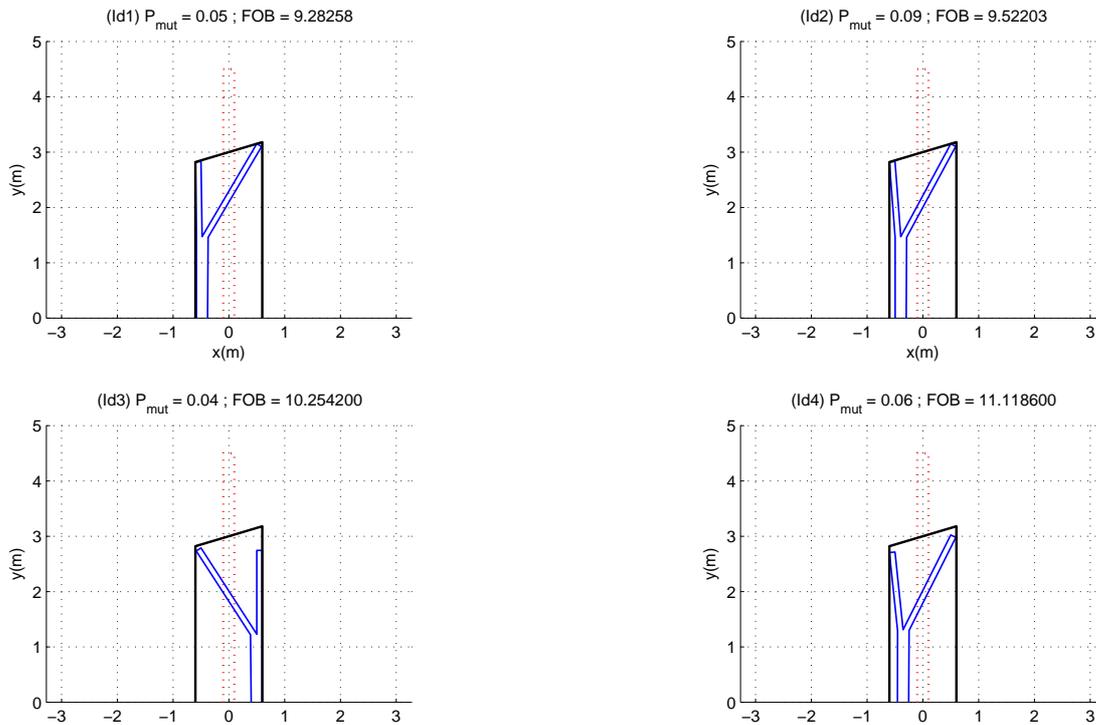


Figura 5.19: Y base móvil vertical: valores de la función objetivo para las distintas probabilidades de mutación y ejecuciones realizadas.

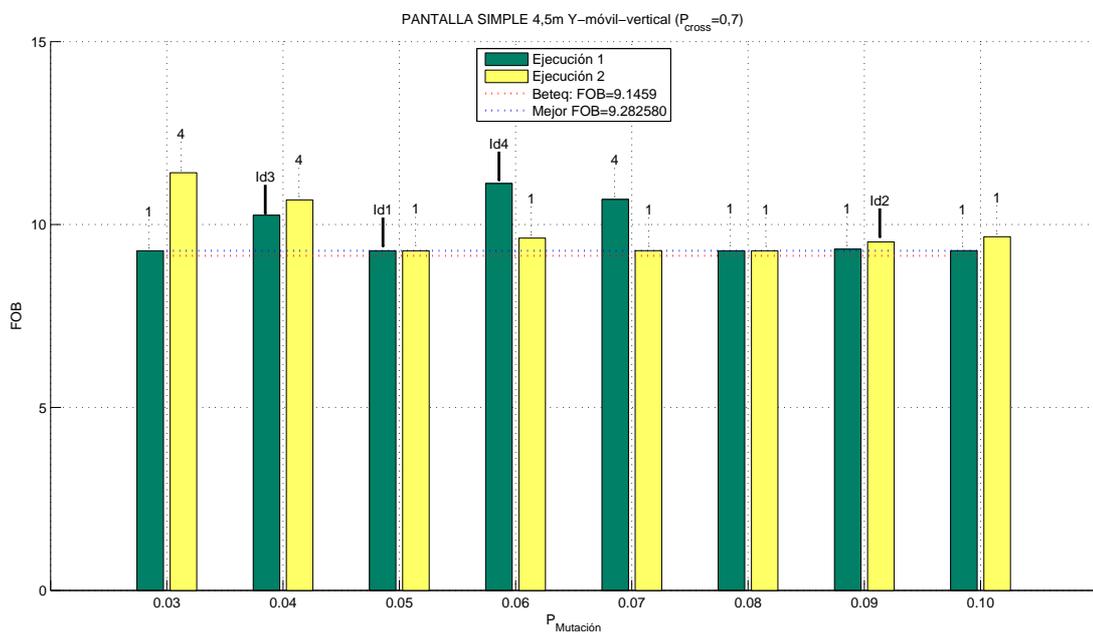
### 5.1.2.3. Pantalla simple de 4,5 metros

En la Figura 5.20 se muestran las distintas configuraciones encontradas por el algoritmo para este problema.



**Figura 5.20:** *Y* base móvil vertical: configuraciones en *Y* encontradas con eficacia similar a la pantalla simple de 4,5 m.

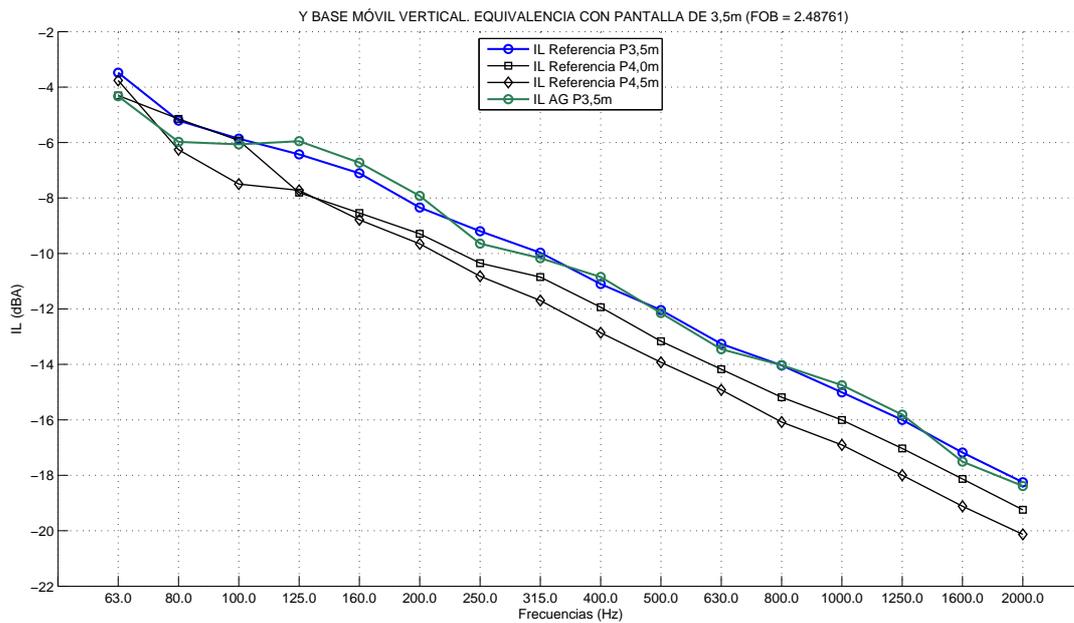
La Figura 5.21 recoge los valores de las distintas ejecuciones realizadas, identificándose los correspondientes a los individuos mostrados en la Figura 5.20.



**Figura 5.21:** Y base móvil vertical: valores de la FOB para las distintas probabilidades de mutación y ejecuciones realizadas

#### 5.1.2.4. Espectros del coeficiente de pérdida por inserción

Las Figuras 5.22, 5.23 y 5.24 muestran los espectros de IL de las mejores soluciones encontradas por el AG para la configuración *Y base móvil vertical* frente a las curvas de referencia a las que pretenden ajustarse. Se puede observar como a medida que la altura efectiva ( $h$ ) de la pantalla simple disminuye es más fácil acercarse a dichas curvas de referencia.



**Figura 5.22:** Espectro de IL frecuencial para configuración de pantalla *Y base móvil vertical* de eficacia similar a pantalla simple de 3,5 m

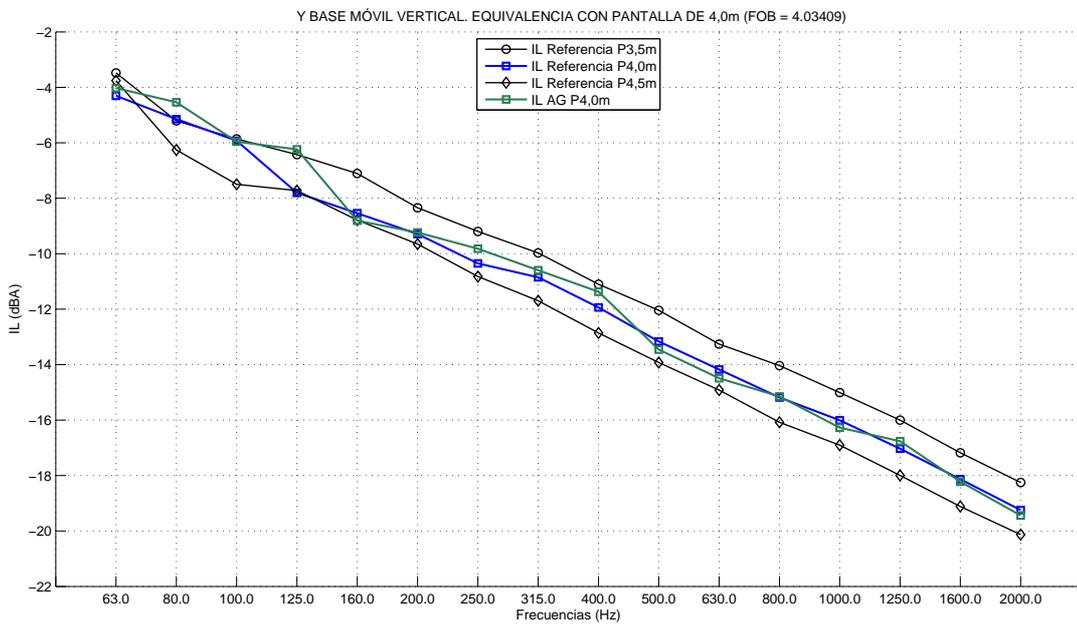


Figura 5.23: Espectro de IL frecuencial para configuración de pantalla Y base móvil vertical de eficacia similar a pantalla simple de 4,0 m

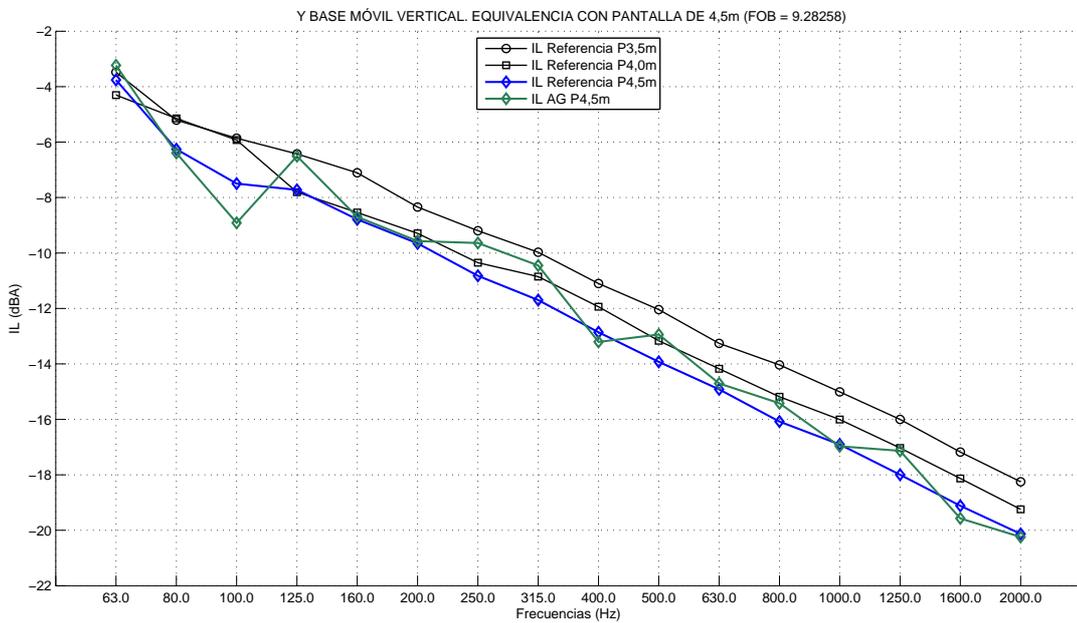


Figura 5.24: Espectro de IL frecuencial para configuración de pantalla Y base móvil vertical de eficacia similar a pantalla simple de 4,5 m

### 5.1.2.5. Evolución del AG

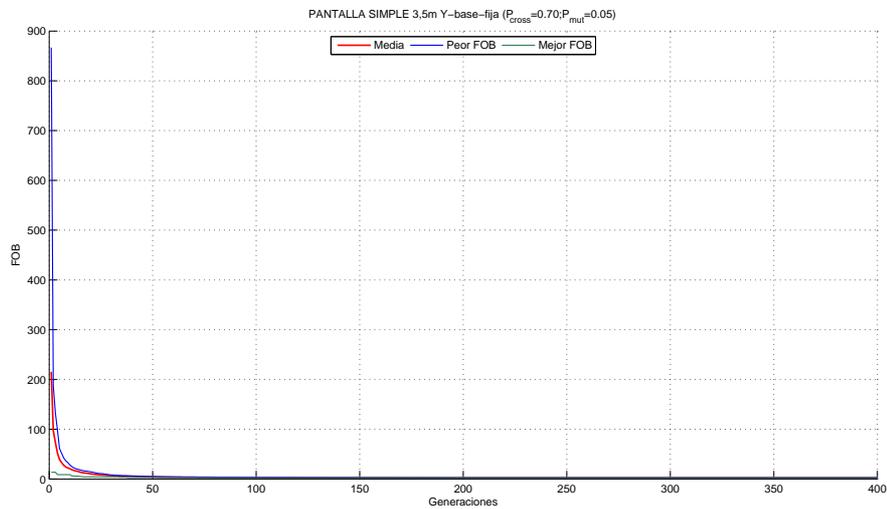


Figura 5.25: Evolución del AG para el mejor individuo de la configuración de pantalla Y base móvil vertical de eficacia similar a pantalla simple de 3,5 m.

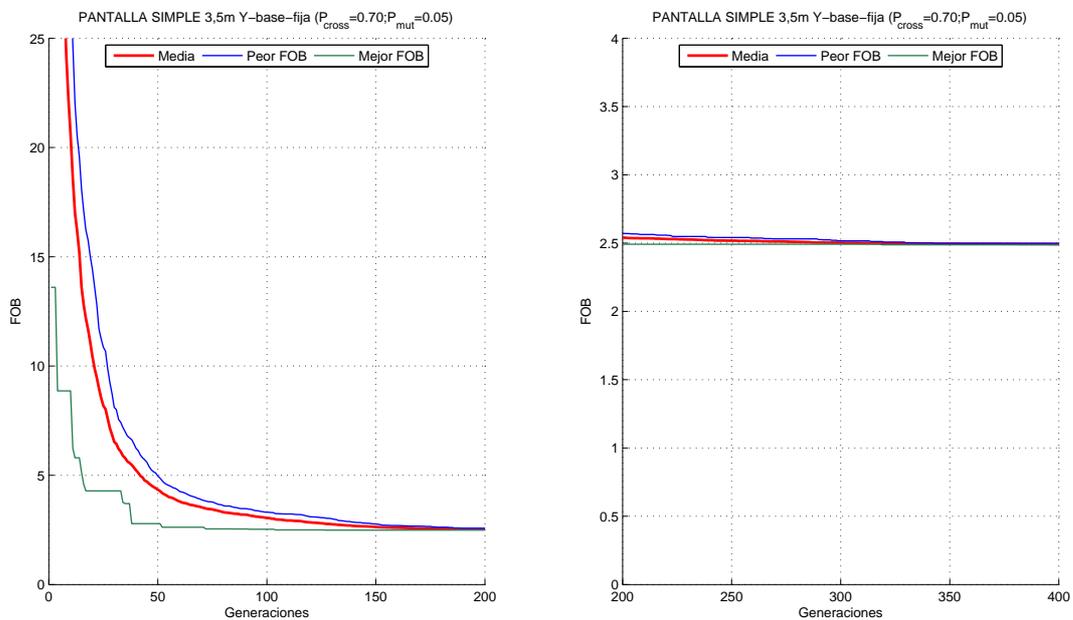


Figura 5.26: Evolución del AG. Ampliación del eje de ordenadas.

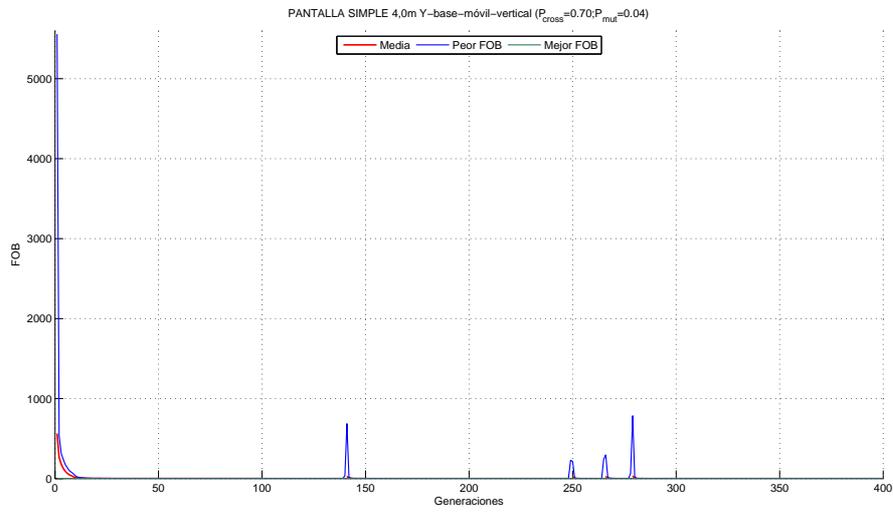


Figura 5.27: Evolución del AG para el mejor individuo de la configuración de pantalla Y base móvil vertical de eficacia similar a pantalla simple de 4,0 m.

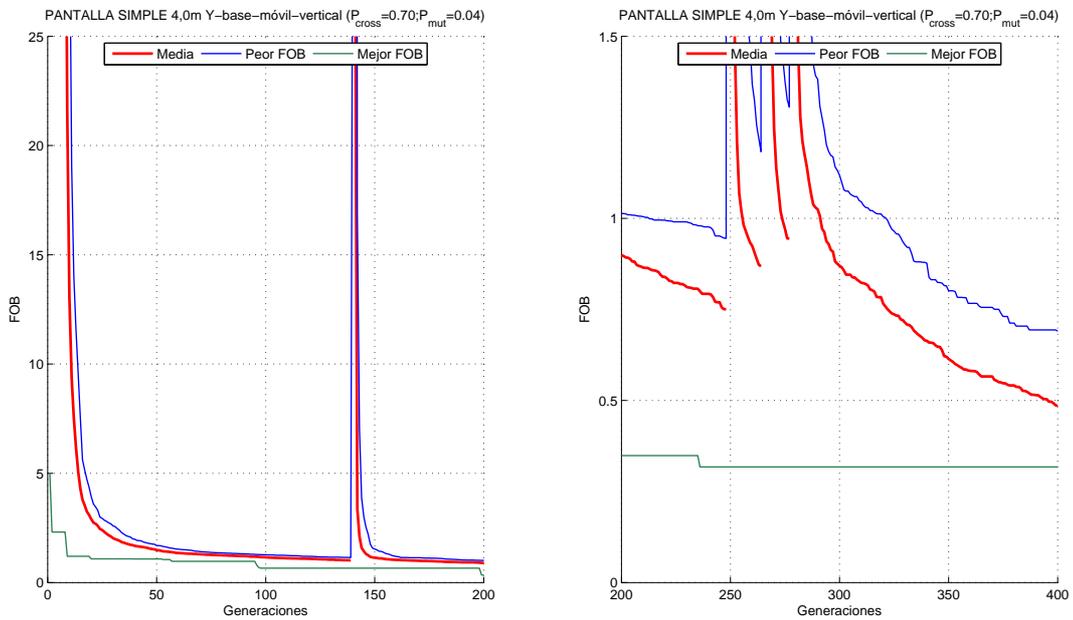


Figura 5.28: Evolución del AG. Ampliación del eje de ordenadas.

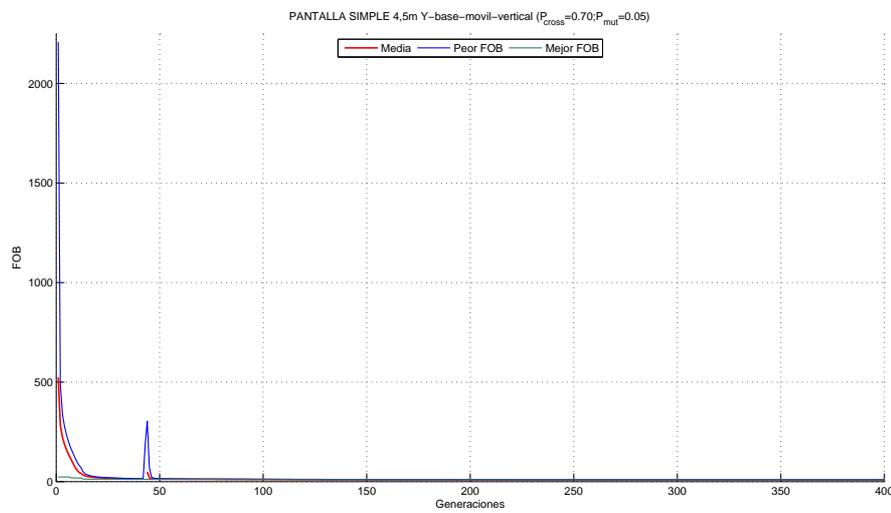


Figura 5.29: Evolución del AG para el mejor individuo de la configuración de pantalla Y base móvil vertical de eficacia similar a pantalla simple de 4,5 m.

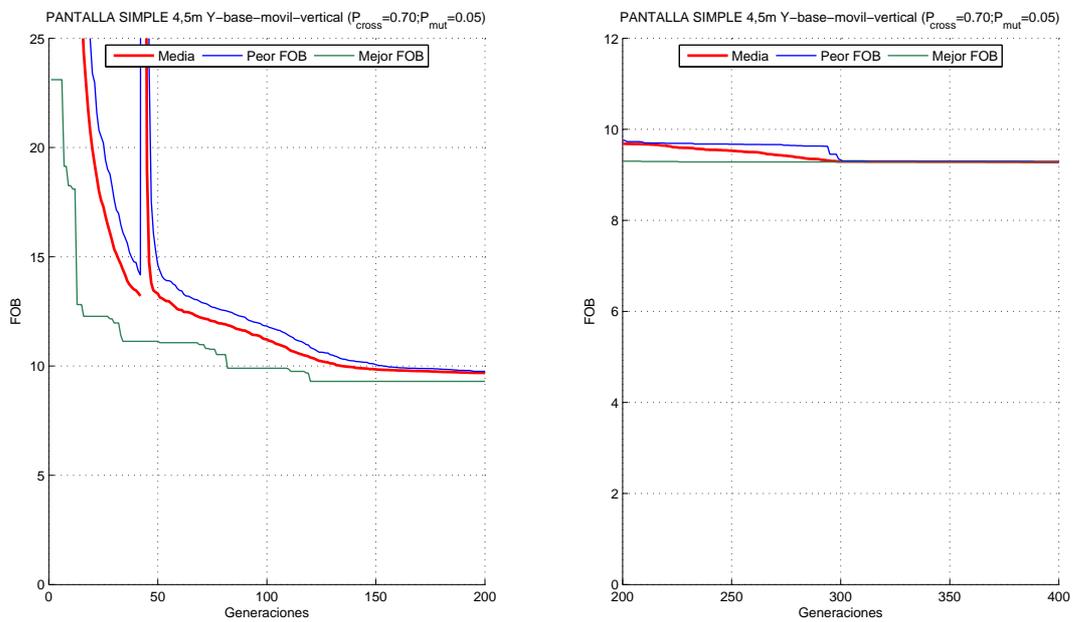


Figura 5.30: Evolución del AG. Ampliación del eje de ordenadas.

### 5.1.2.6. Conclusiones

Para la pantalla de  $h = 3,5m$  aparecen un gran número de tipologías debido a las bajas exigencias requeridas, proponiéndose configuraciones muy diferentes con eficacia similar (ver Figura 5.16). Existe la tendencia a posicionar la base bien en el lado del emisor o bien en el lado del receptor. Destacar que la configuración *Id3* logra una eficacia similar a las configuraciones *Id1* e *Id2* sin necesidad de agotar la altura efectiva máxima.

Relativo a la pantalla de  $h = 4,0m$ , destacar que se encuentran configuraciones visualmente muy parecidas con eficacia bien distinta, como por ejemplo la de los identificadores *Id1* e *Id4* (ver Figura 5.18). En este caso, la tendencia de la base de la pantalla es a posicionarse o bien en el centro o bien en el lado del receptor.

Respecto de la pantalla de  $h = 4,5m$ , en la Figura 5.20 se puede ver la tendencia natural a encontrar perfiles más parecidos entre sí (mayor homogeneidad) para dar solución a la mayor de las exigencias requeridas hasta el momento. En este caso resultar más eficaz posicionar la base en el lado del emisor.

Incluir la posibilidad de que la base de la pantalla tenga la misma coordenada que el punto de unión de los brazos no aporta una mejora respecto de la configuración *Y base fija* a la vista de los resultados. Para los distintos casos de altura efectiva de pantalla las mejores FOB son peores que para la configuración estudiada en el apartado anterior, siendo la diferencia más significativa conforme aumenta  $h$ . Sin embargo, los resultados muestran una tendencia lógica tanto entre los casos analizados como en las ejecuciones de cada caso: la dificultad para casar las curvas de referencia aumenta con la altura efectiva, por lo que los valores de las FOB aumentan con  $h$ ; asimismo, en todos los casos se observa una mayor presencia de tipologías de pantalla del tipo 1 (tipología similar al perfil de la pantalla con mejor FOB), lo que demuestra que existe una tendencia general hacia la convergencia del perfil óptimo.

Es importante destacar algo que puede resultar anecdótico: la similitud de FOB con perfiles de pantallas muy diferentes entre sí por un lado y la analogía de perfiles de pantalla con FOB muy distintas por otro. Un ejemplo del primer caso se puede contemplar en los primeros perfiles (*Id1*, *Id2* e *Id3*) para  $h = 3,5m$  y  $h = 4,0m$  (ver Figuras 5.16 y 5.18); un ejemplo del segundo caso se recoge en la Figura 5.18, donde se observa que las FOB de los perfiles *Id1* e *Id3* presenta diferencias significativas a pesar de poseer perfiles un tanto similares. A pesar de ello, la tendencia mostrada por las curvas de IL de ambos perfiles son similares, tal y como muestra la Figura 5.31.

Relativo al análisis del operador de mutación, parece que el AG muestra un buen comportamiento con probabilidades de mutación alta, especialmente para valores de  $P_{Mut} = 0,08$  y  $0,09$ .

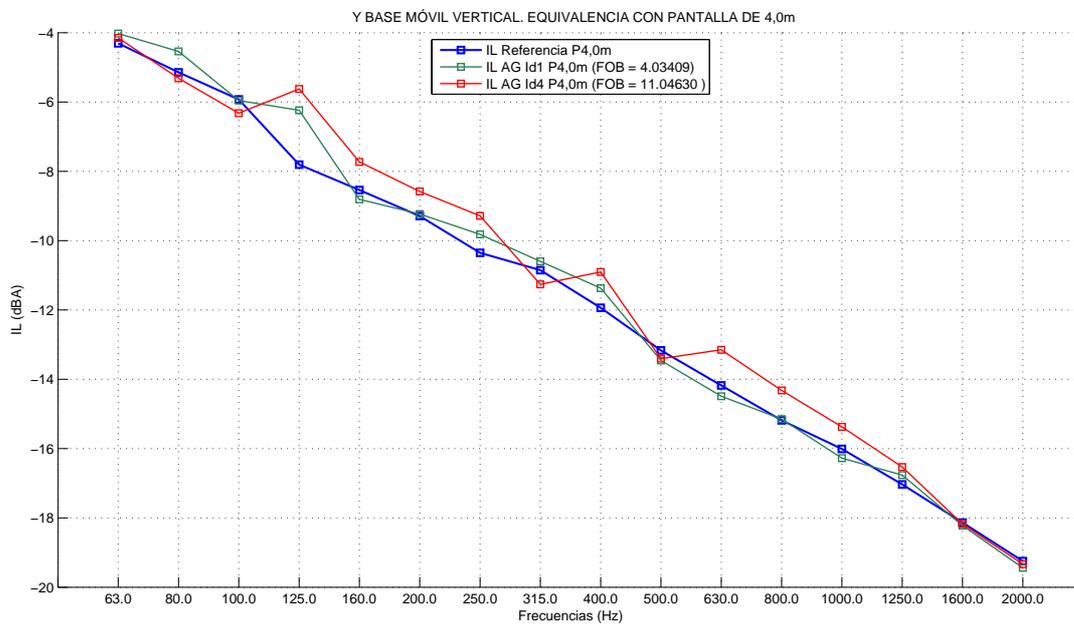
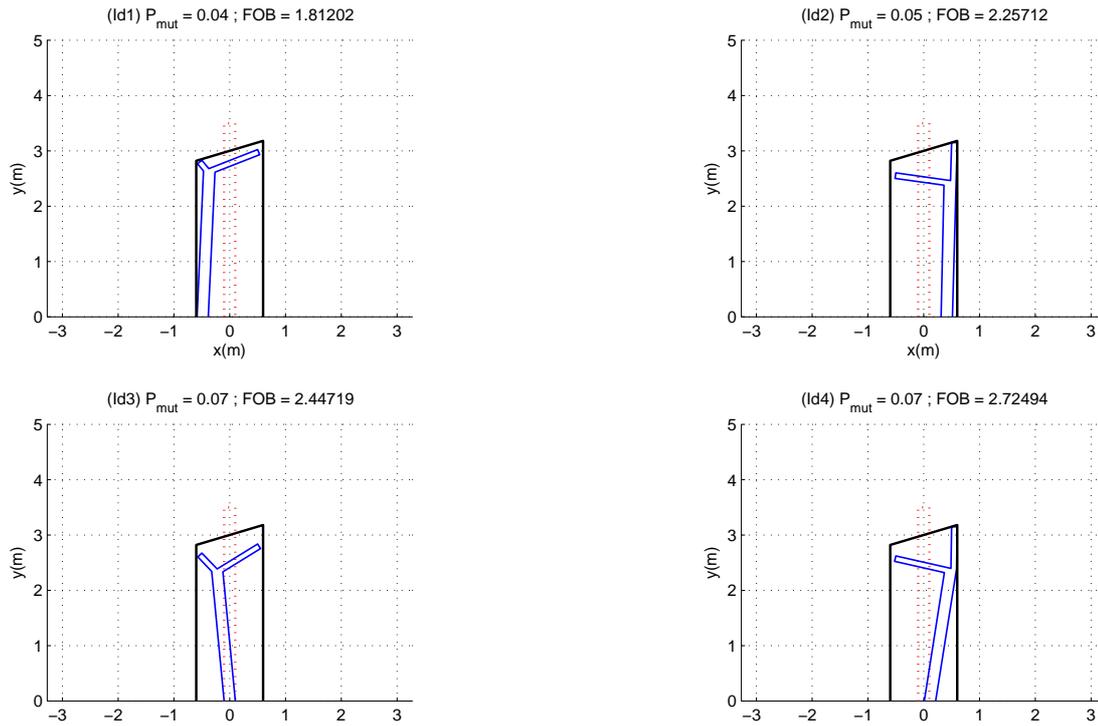


Figura 5.31: Espectro de IL frecuencial de los identificadores Id1 e Id4

### 5.1.3. Configuración *Y* base móvil

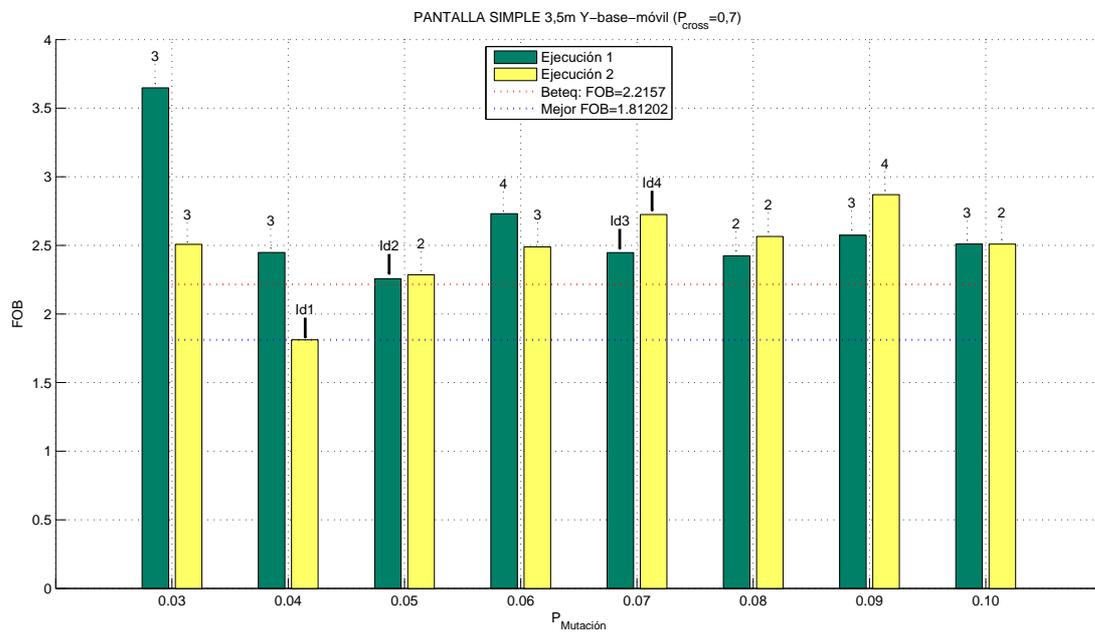
#### 5.1.3.1. Pantalla simple de 3,5 metros

En la Figura 5.32 se muestran las distintas configuraciones encontradas por el algoritmo para este problema.



**Figura 5.32:** *Y* base móvil: configuraciones en *Y* encontradas con eficacia similar a la pantalla simple de 3,5 m.

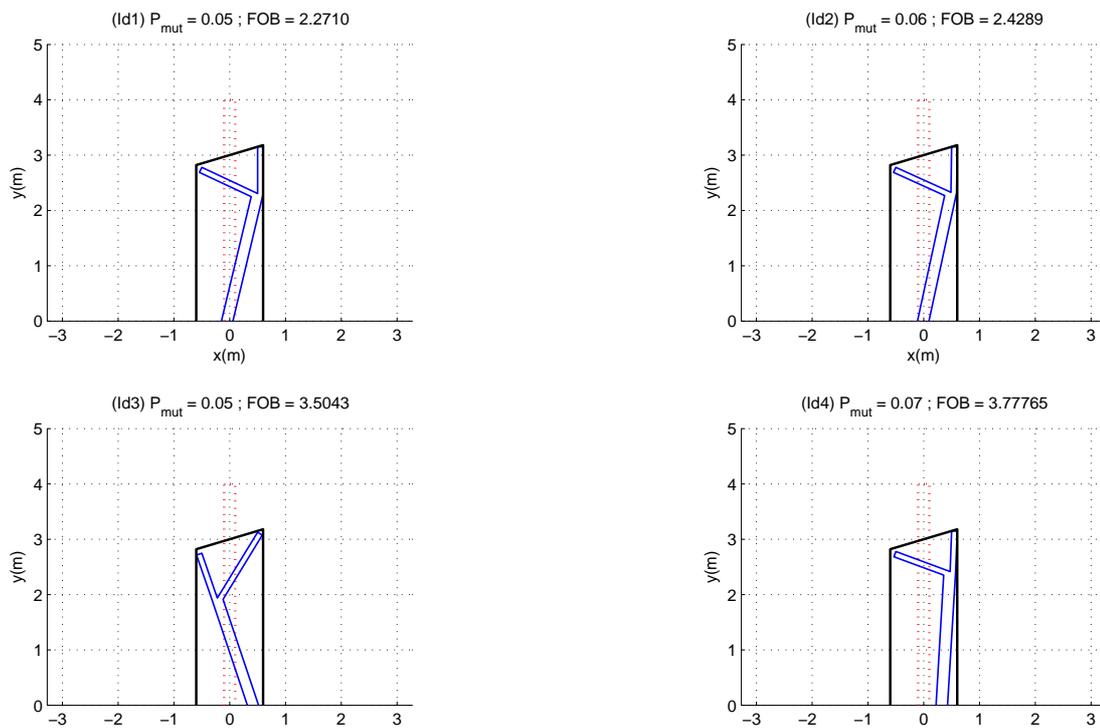
La Figura 5.33 recoge los valores de las distintas ejecuciones realizadas, identificándose los correspondientes a los individuos mostrados en la Figura 5.32.



**Figura 5.33:** Y base móvil: valores de la FOB para las distintas probabilidades de mutación y ejecuciones realizadas.

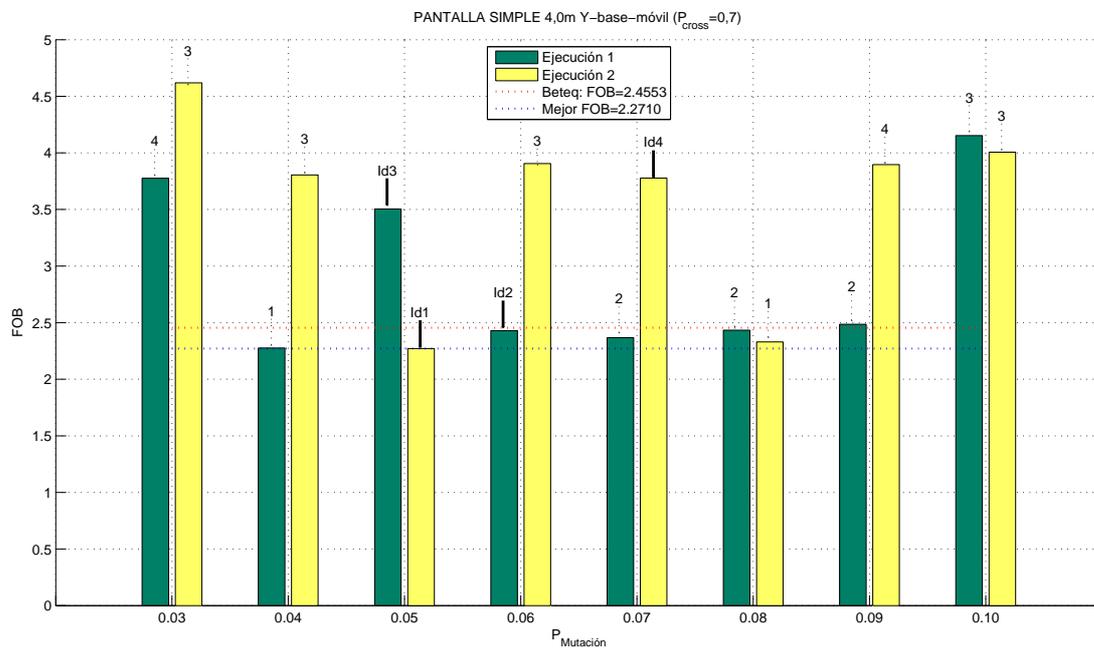
### 5.1.3.2. Pantalla simple de 4,0 metros

En la Figura 5.34 se muestran las distintas configuraciones encontradas por el algoritmo para este problema.



**Figura 5.34:** Y base móvil: configuraciones en Y encontradas con eficacia similar a la pantalla simple de 4,0 m.

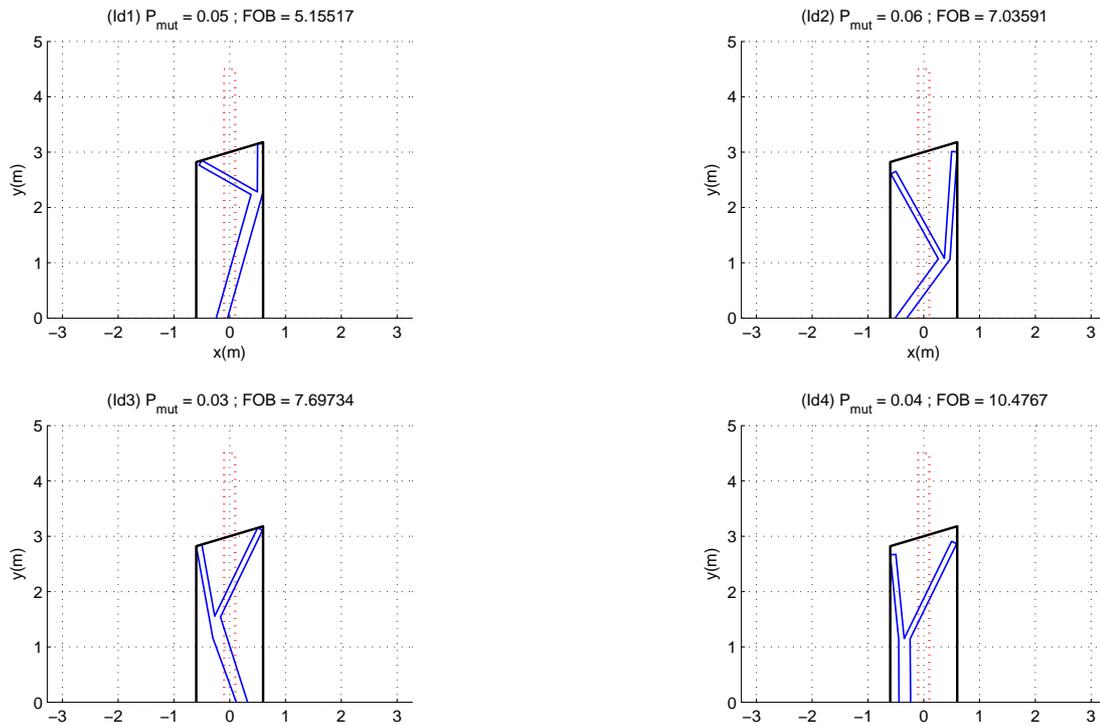
La Figura 5.35 recoge los valores de las distintas ejecuciones realizadas, identificándose los correspondientes a los individuos mostrados en la Figura 5.34.



**Figura 5.35:** Y base móvil: valores de la FOB para las distintas probabilidades de mutación y ejecuciones realizadas.

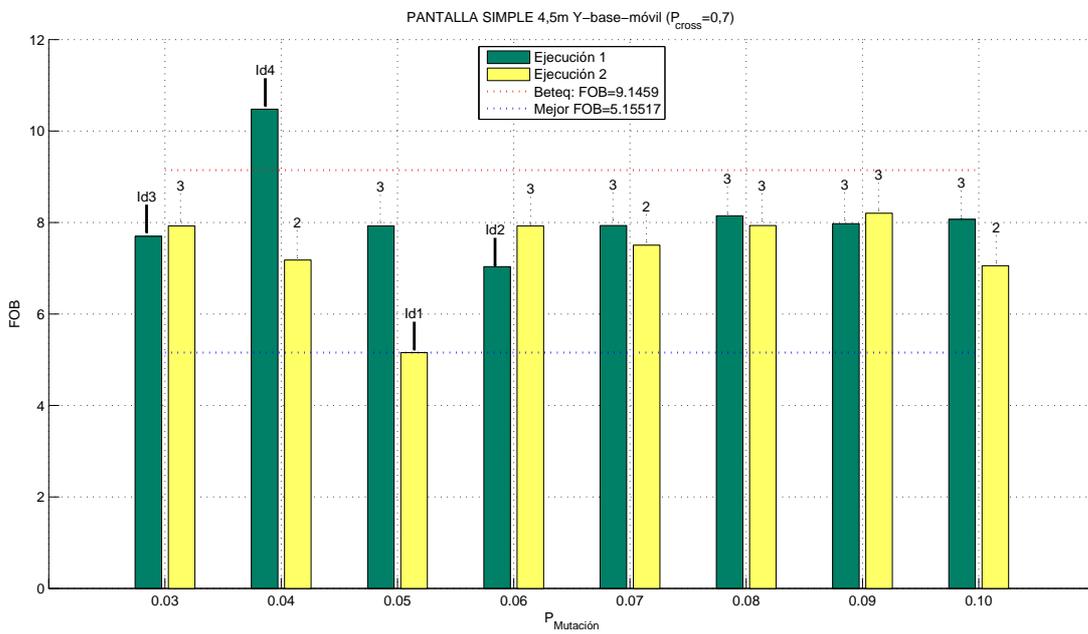
### 5.1.3.3. Pantalla simple de 4,5 metros

En la Figura 5.36 se muestran las distintas configuraciones encontradas por el algoritmo para este problema.



**Figura 5.36:** *Y base móvil: configuraciones en Y encontradas con eficacia similar a la pantalla simple de 4,5 m.*

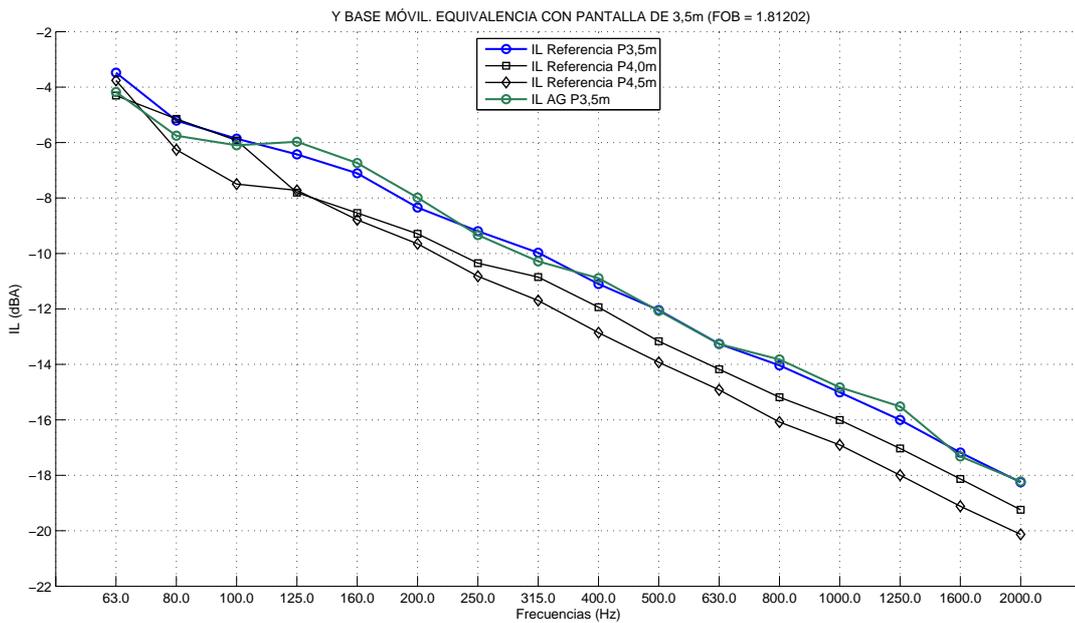
La Figura 5.37 recoge los valores de las distintas ejecuciones realizadas, identificándose los correspondientes a los individuos mostrados en la Figura 5.36.



**Figura 5.37:** Y base móvil: valores de la FOB para las distintas probabilidades de mutación y ejecuciones realizadas.

#### 5.1.3.4. Espectros del coeficiente de pérdida por inserción

Las Figuras 5.38, 5.39 y 5.40 muestran los espectros de IL de las mejores soluciones encontradas por el AG para la configuración *Y base móvil* frente a las curvas de referencia a las que pretenden ajustarse. Se puede observar como a medida que la altura efectiva ( $h$ ) de la pantalla simple disminuye es más fácil acercarse a dichas curvas de referencia.



**Figura 5.38:** Espectro de IL frecuencial para configuración de pantalla *Y base móvil* de eficacia similar a pantalla simple de 3,5 m.

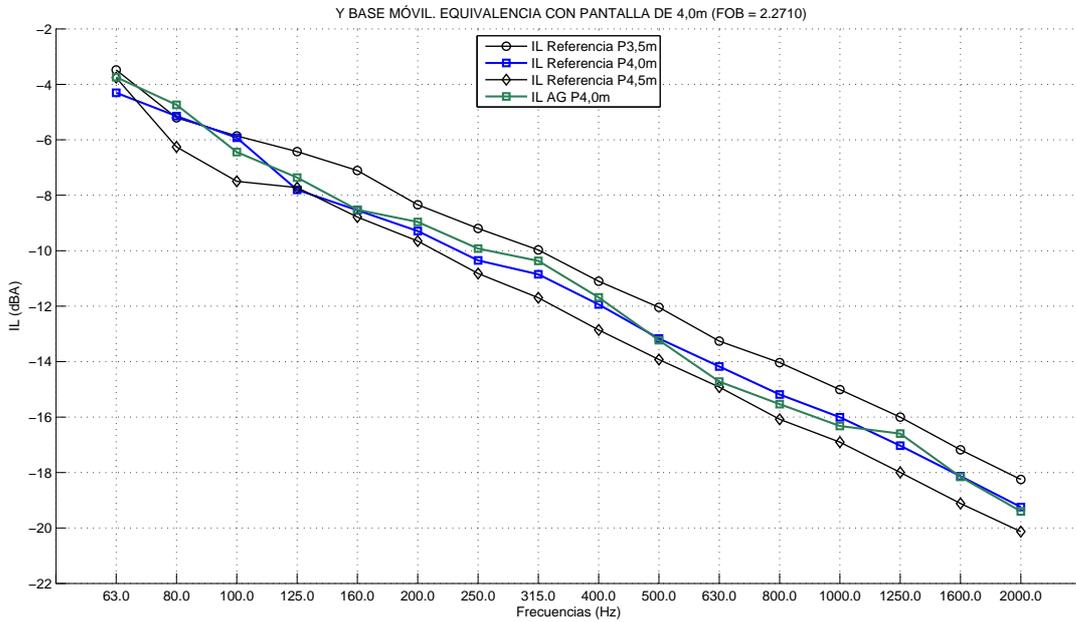


Figura 5.39: Espectro de IL frecuencial para configuración de pantalla Y base móvil de eficacia similar a pantalla simple de 4,0 m.

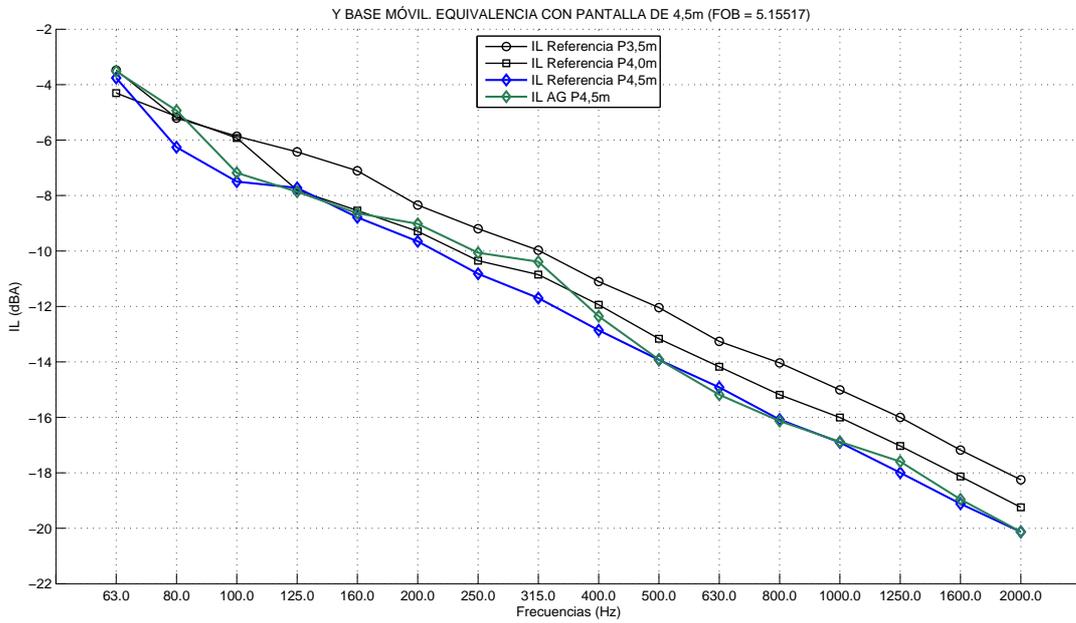


Figura 5.40: Espectro de IL frecuencial para configuración de pantalla Y base móvil de eficacia similar a pantalla simple de 4,5 m.

### 5.1.3.5. Evolución del AG

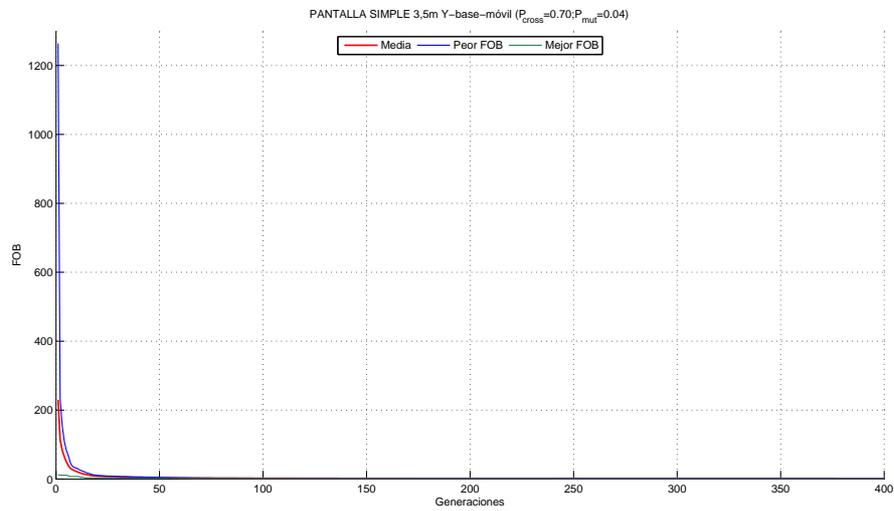


Figura 5.41: Evolución del AG para el mejor individuo de la configuración de pantalla Y base móvil de eficacia similar a pantalla simple de 3,5 m.

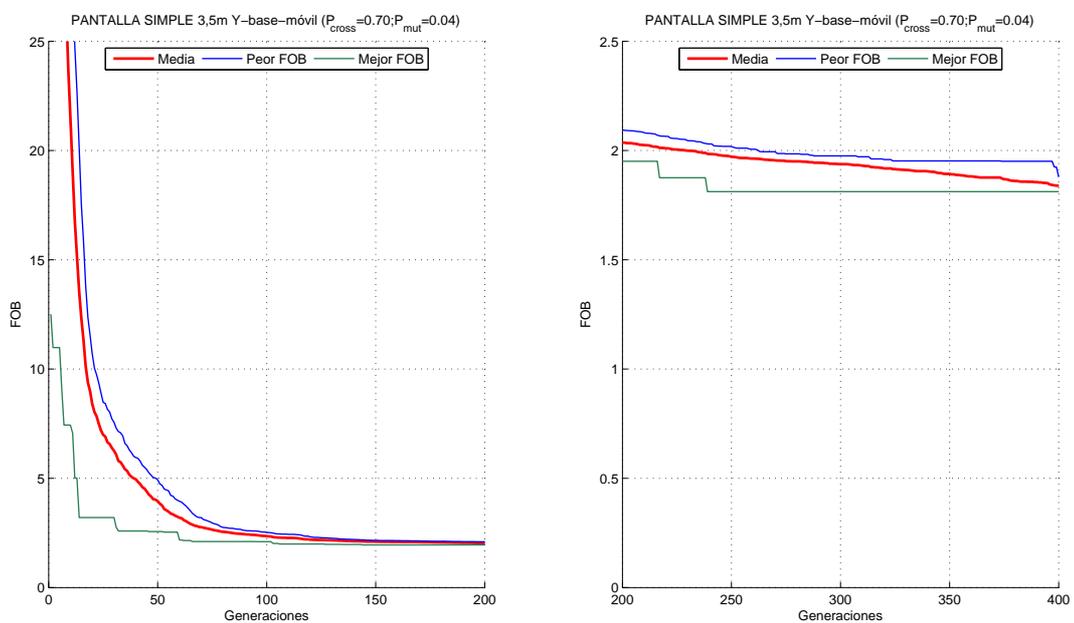


Figura 5.42: Evolución del AG. Ampliación del eje de ordenadas.

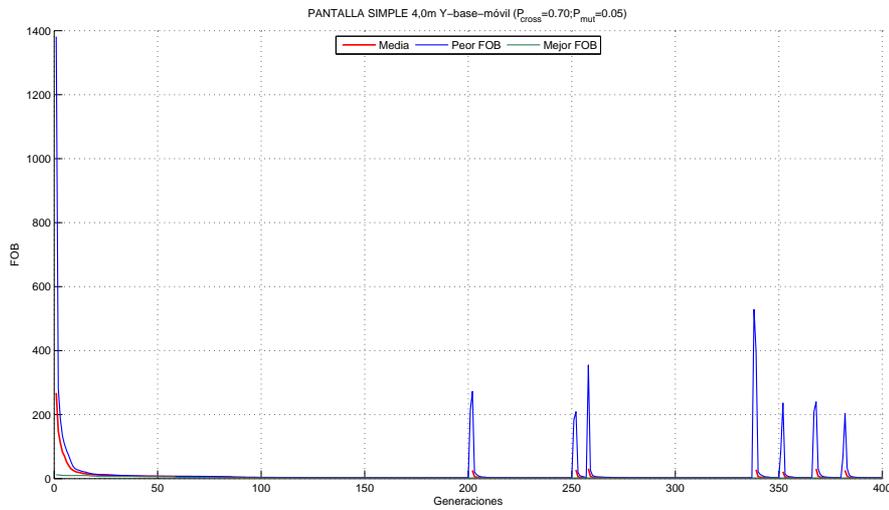


Figura 5.43: Evolución del AG para el mejor individuo de la configuración de pantalla Y base móvil de eficacia similar a pantalla simple de 4,0 m.

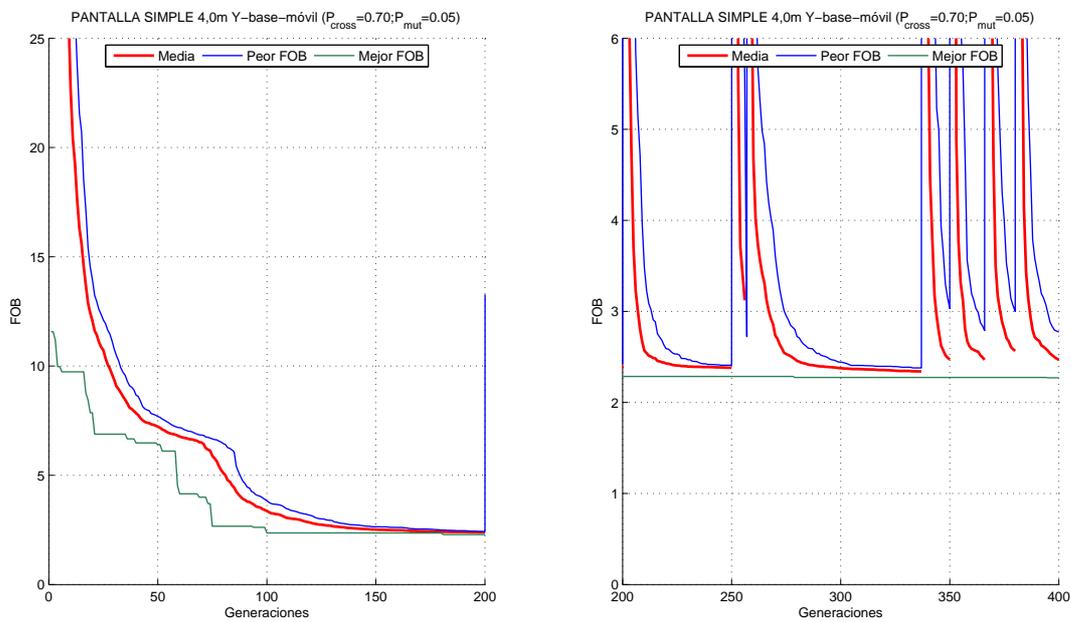


Figura 5.44: Evolución del AG. Ampliación del eje de ordenadas.

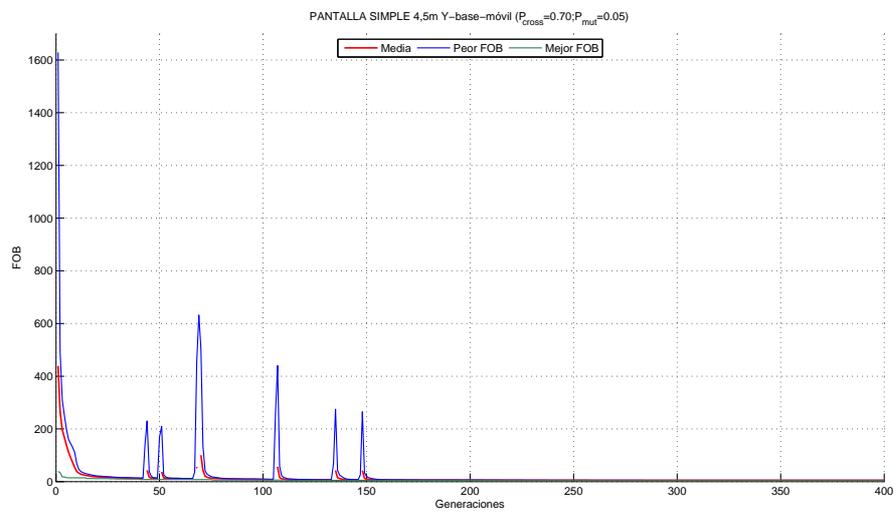


Figura 5.45: Evolución del AG para el mejor individuo de la configuración de pantalla Y base móvil de eficacia similar a pantalla simple de 4,5 m.

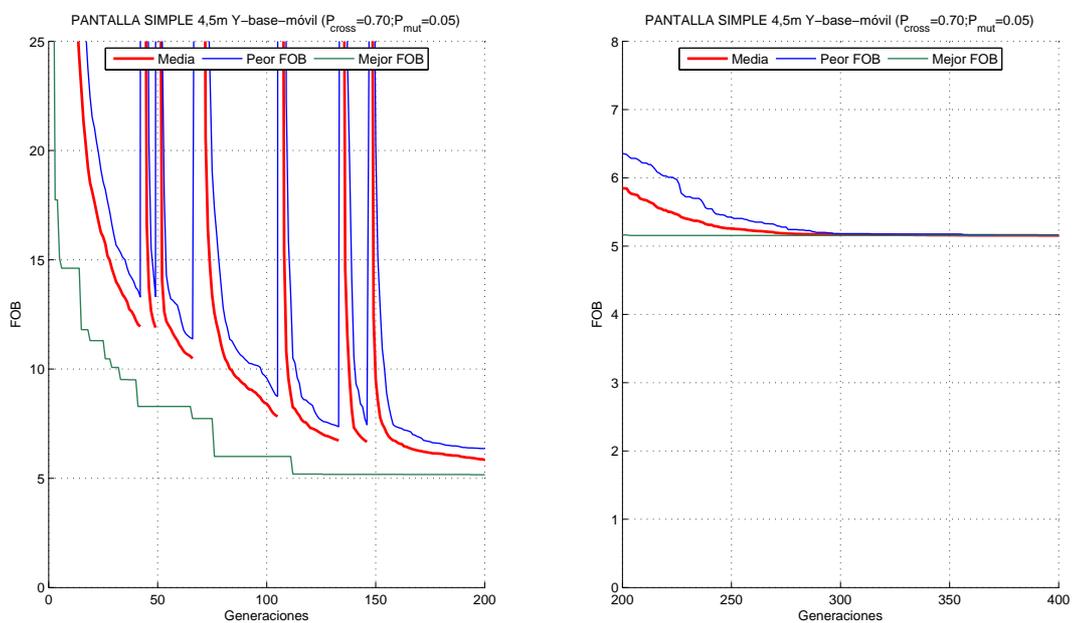


Figura 5.46: Evolución del AG. Ampliación del eje de ordenadas.

### 5.1.3.6. Conclusiones

Para la pantalla de  $h = 3,5m$  se obtienen FOB mejores que para el caso homólogo de las configuraciones *Y base fija* e *Y base móvil vertical* (ver Figura 5.33). Se puede ver además como existe una gran dispersión de tipologías, debida a la baja exigencia del problema (ver Figura 5.32), donde perfiles con configuraciones distintas poseen eficacias similares (por ejemplo, *Id1* e *Id2*). Destacar que a pesar de haber codificado el movimiento libre de la coordenada  $\xi$  de la base, los individuos con configuraciones similares a *Id3* e *Id4* tratan de comportarse como *Y base fija*.

Relativo a la pantalla de  $h = 4,0m$  destacar que las mejores soluciones tratan de comportarse como *Y base fija*, tal y como se muestra en la Figura 5.34.

Respecto de la pantalla de  $h = 4,5m$ , cuando los individuos evolucionan con configuraciones similares a *Y base móvil vertical (Id4)* poseen una mala eficacia; por el contrario, cuando evolucionan con configuraciones similares a *Y base fija* la eficacia de los mismos es mucho mejor (ver Figura 5.36).

Es un acierto incluir como variable de diseño la coordenada  $x_i$  del centro de la base de la pantalla. Definitivamente se trata de la mejor configuración de pantalla en *Y* estudiadas hasta el momento, pues encuentra individuos con mejores FOB para todos los casos. Por lo general, no existe una gran dispersión de resultados en las ejecuciones de cada caso por lo que no es extraño encontrar que los perfiles que más se repiten no se correspondan con los del tipo *Id1*. Esto no indica, sin embargo, que la tendencia de los resultados no sea la convergencia hacia al perfil óptimo.

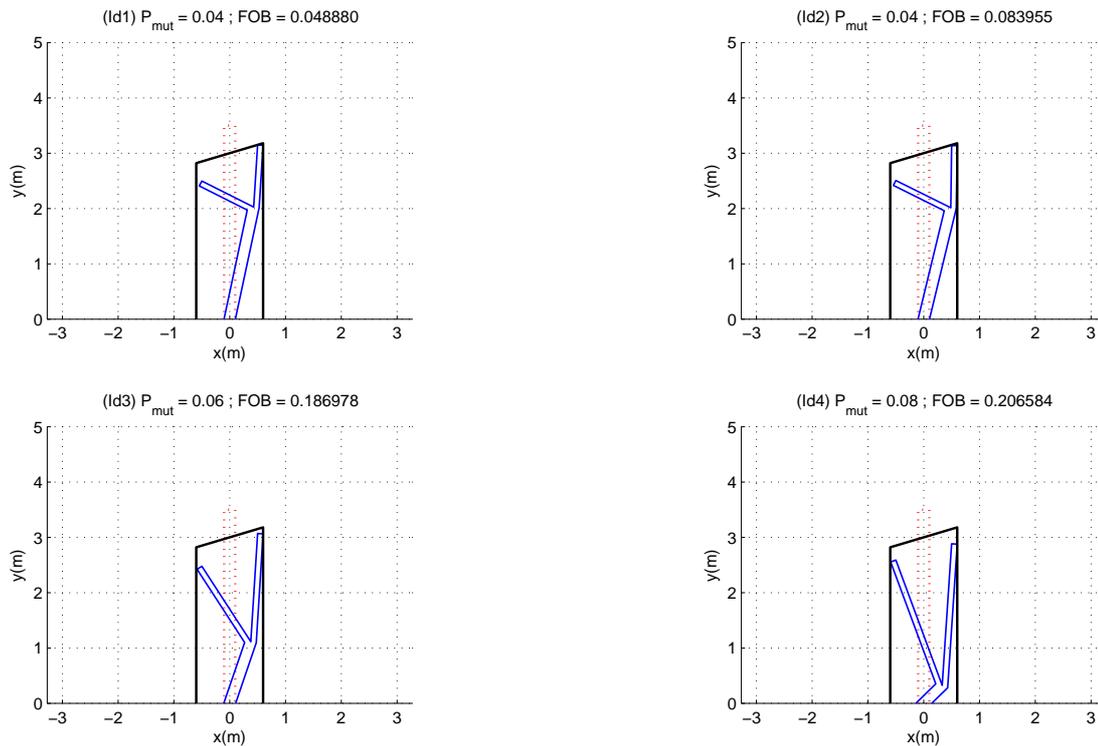
Relativo al análisis del operador de mutación, parece que el AG muestra un buen comportamiento con  $P_{Mut} = 0,08$  para todos los casos.

## 5.2. Problema con varios receptores

### 5.2.1. Configuración *Y* base fija

#### 5.2.1.1. Pantalla simple de 3,5 metros

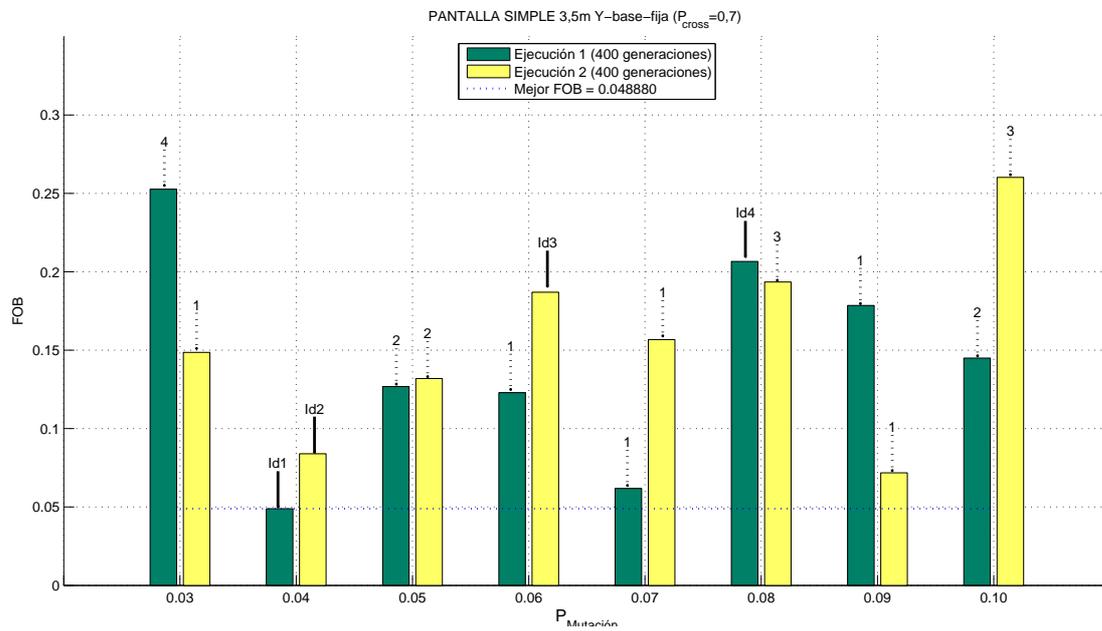
En la Figura 5.47 se muestran las distintas configuraciones encontradas por el algoritmo para este problema.<sup>2</sup>



**Figura 5.47:** *Y* base fija: configuraciones en *Y* encontradas con eficacia similar a la pantalla simple de 3,5 m.

La Figura 5.48 recoge los valores de las distintas ejecuciones realizadas, identificándose los correspondientes a los individuos mostrados en la Figura 5.47.

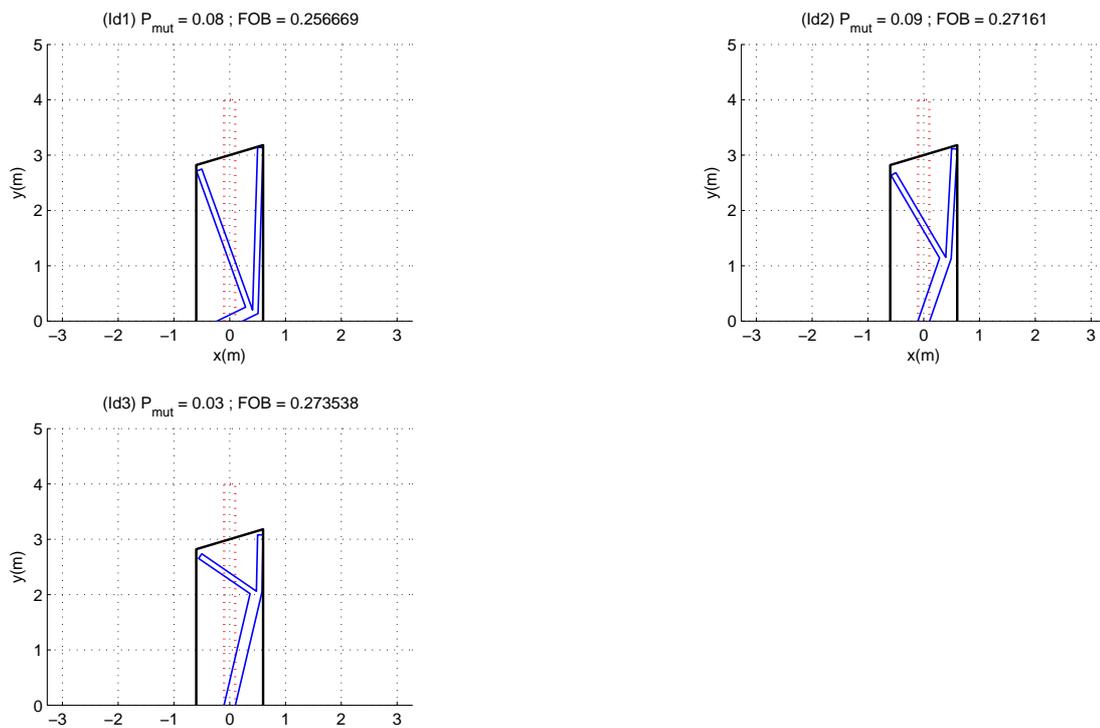
<sup>2</sup>Con objeto de facilitar el estudio, se muestran los mejores individuos de cada perfil tipo.



**Figura 5.48:** Y base fija: valores de la FOB para las distintas probabilidades de mutación y ejecuciones realizadas.

### 5.2.1.2. Pantalla simple de 4,0 metros

En la Figura 5.49 se muestran las distintas configuraciones encontradas por el algoritmo para este problema.



**Figura 5.49:** *Y base fija: configuraciones en Y encontradas con eficacia similar a la pantalla simple de 4,0 m.*

La Figura 5.50 recoge los valores de las distintas ejecuciones realizadas, identificándose los correspondientes a los individuos mostrados en la Figura 5.49.

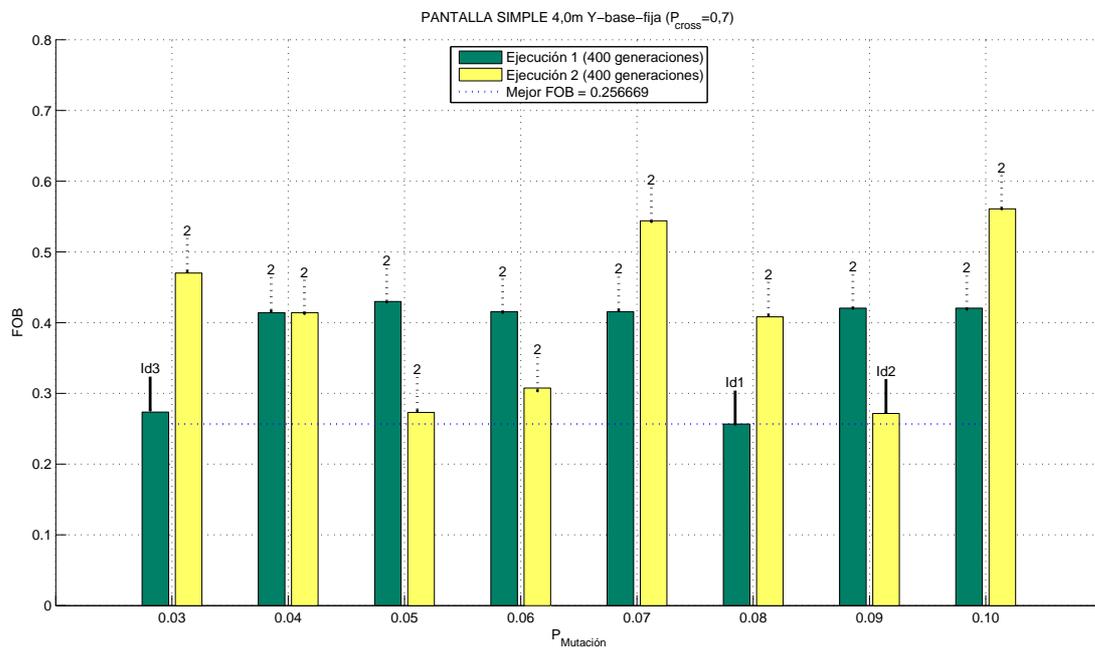
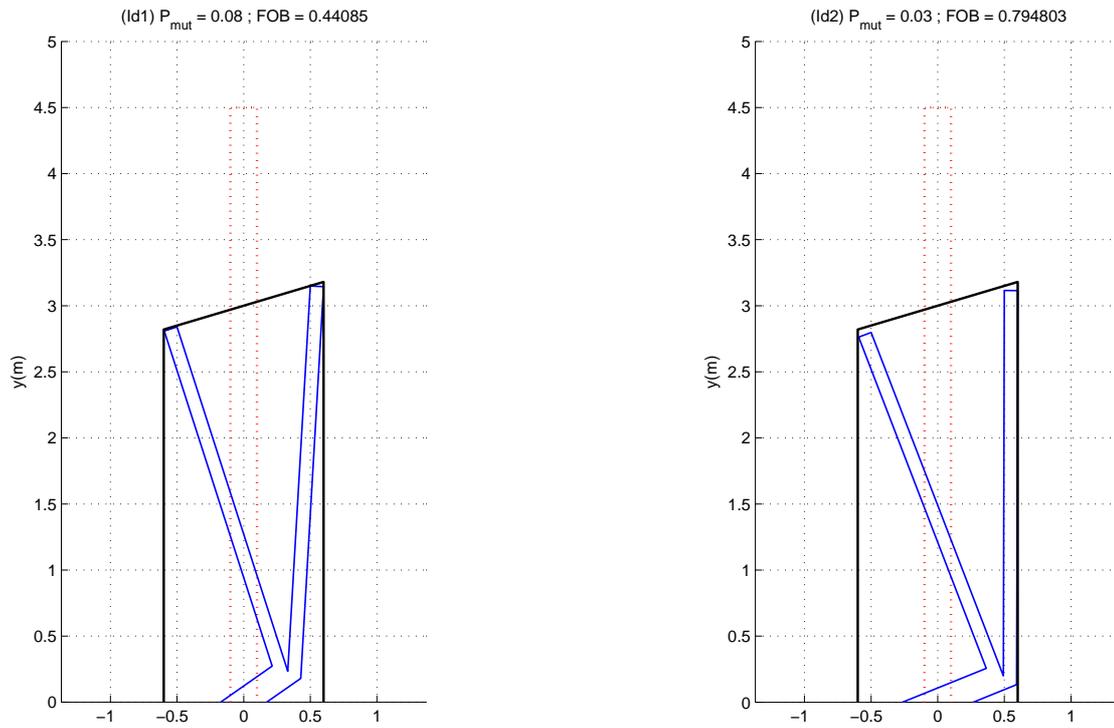


Figura 5.50: Y base fija: valores de la FOB para las distintas probabilidades de mutación y ejecuciones realizadas.

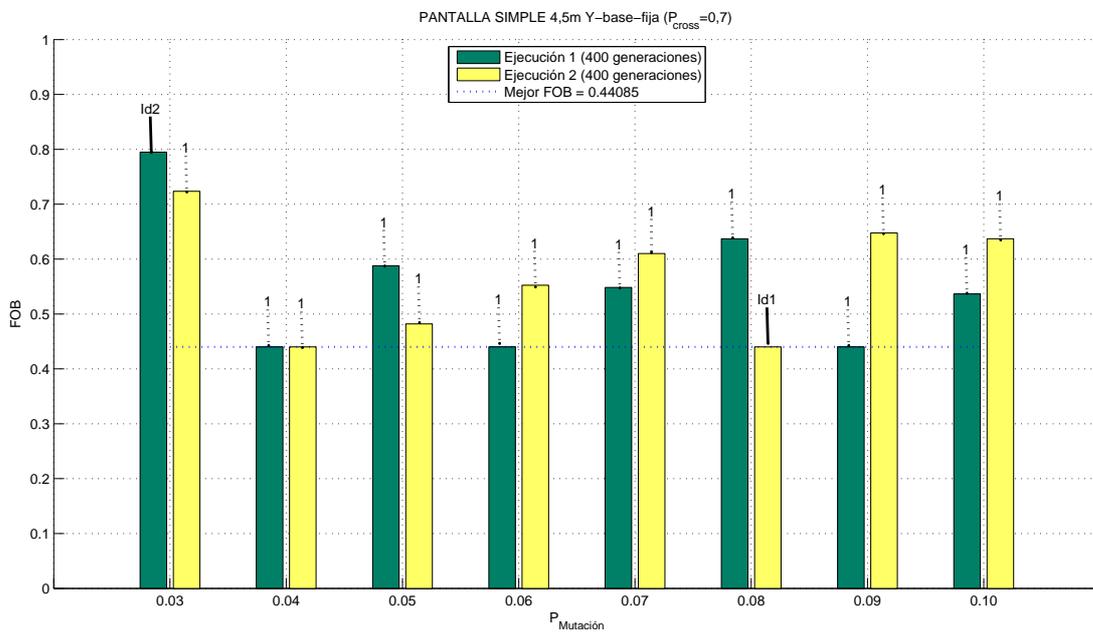
### 5.2.1.3. Pantalla simple de 4,5 metros

En la Figura 5.51 se muestran las distintas configuraciones encontradas por el algoritmo para este problema.



**Figura 5.51:** Configuraciones en  $Y$  encontradas con eficacia similar a la pantalla simple de 4,5 m.

La Figura 5.52 recoge los valores de las distintas ejecuciones realizadas, identificándose los correspondientes a los individuos mostrados en la Figura 5.51.



**Figura 5.52:** Y base fija: valores de la FOB para las distintas probabilidades de mutación y ejecuciones realizadas.

### 5.2.1.4. Espectros del coeficiente de pérdida por inserción

Las Figuras 5.53, 5.54 y 5.55 muestran los espectros de IL de las mejores soluciones encontradas por el AG para la configuración *Y base fija* frente a las curvas de referencia a las que pretenden ajustarse.

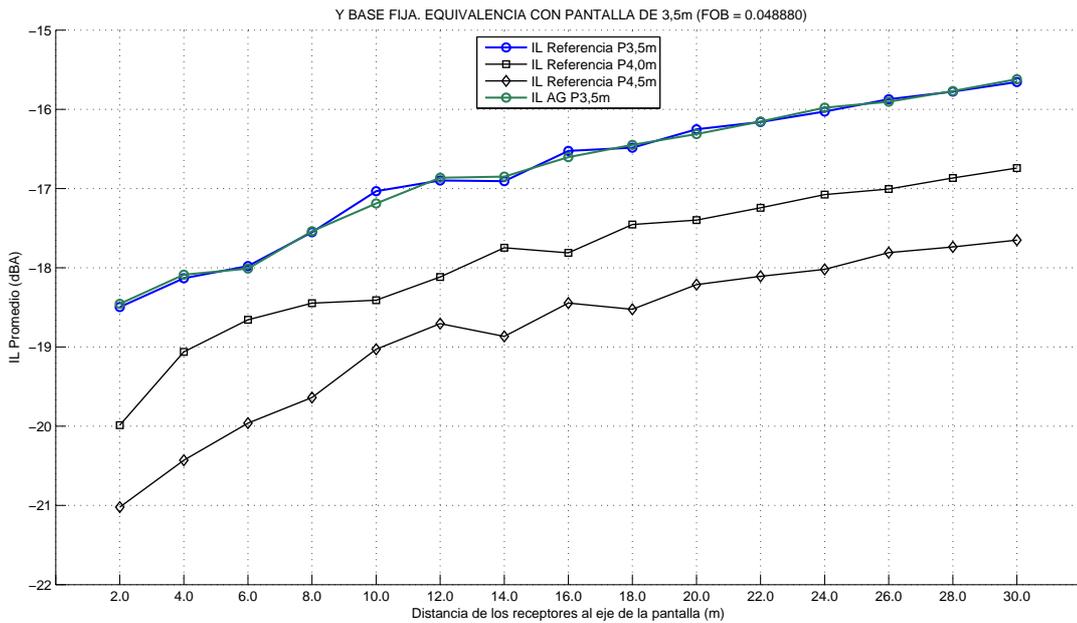


Figura 5.53: IL espectral para configuración de pantalla *Y* base fija de eficacia similar a pantalla simple de 3,5 m.

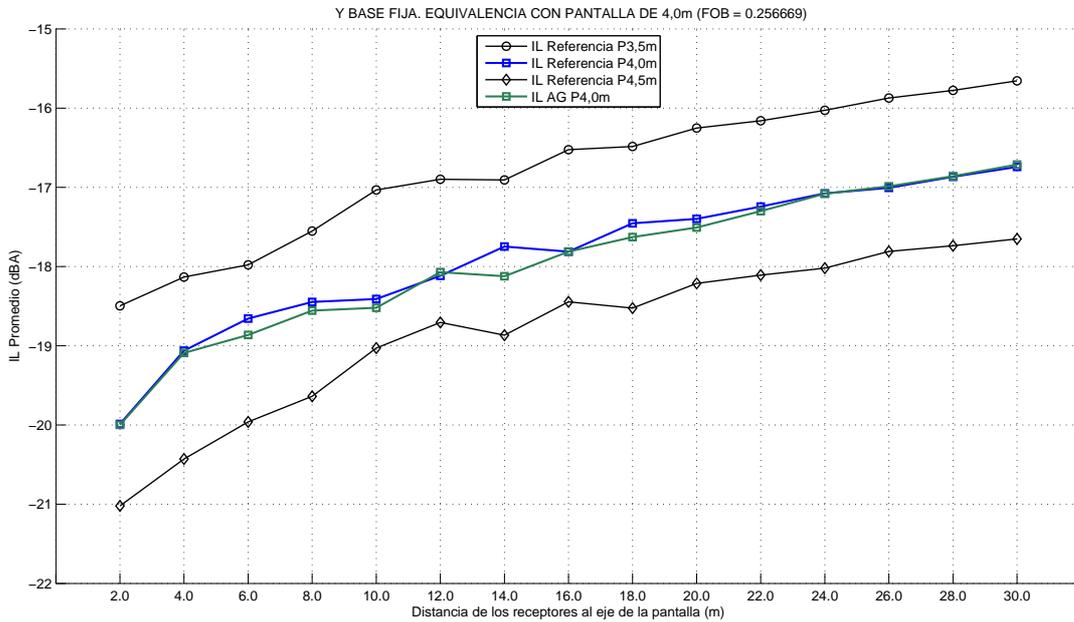


Figura 5.54: *IL* espectral para configuración de pantalla *Y* base fija de eficacia similar a pantalla simple de 4,0 m.

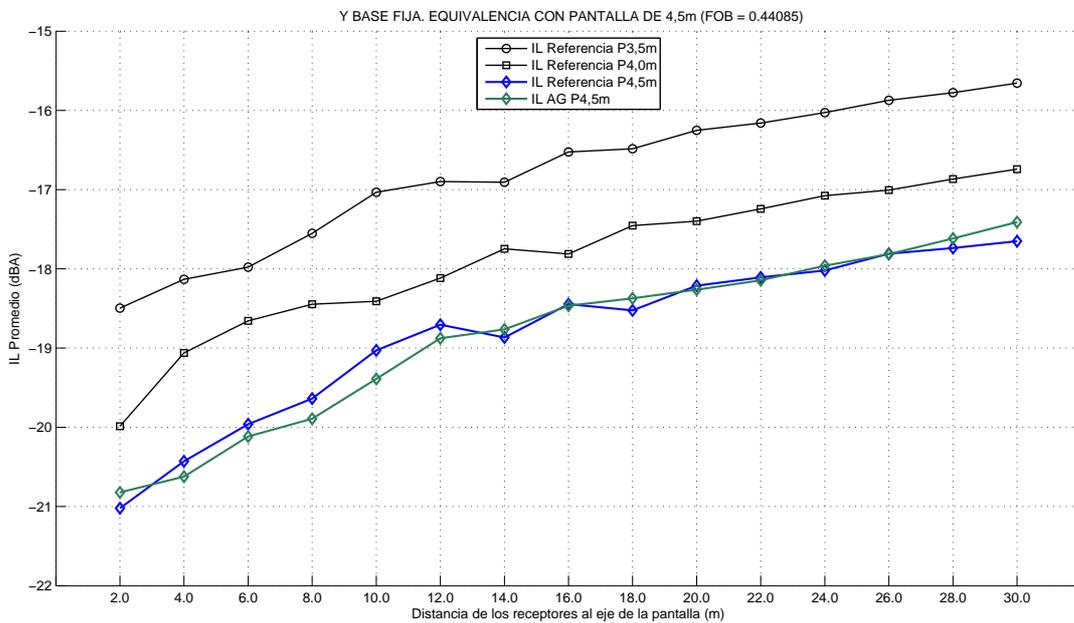


Figura 5.55: Espectro de *IL* frecuencial para configuración de pantalla *Y* base fija de eficacia similar a pantalla simple de 4,5 m.

5.2.1.5. Evolución del AG

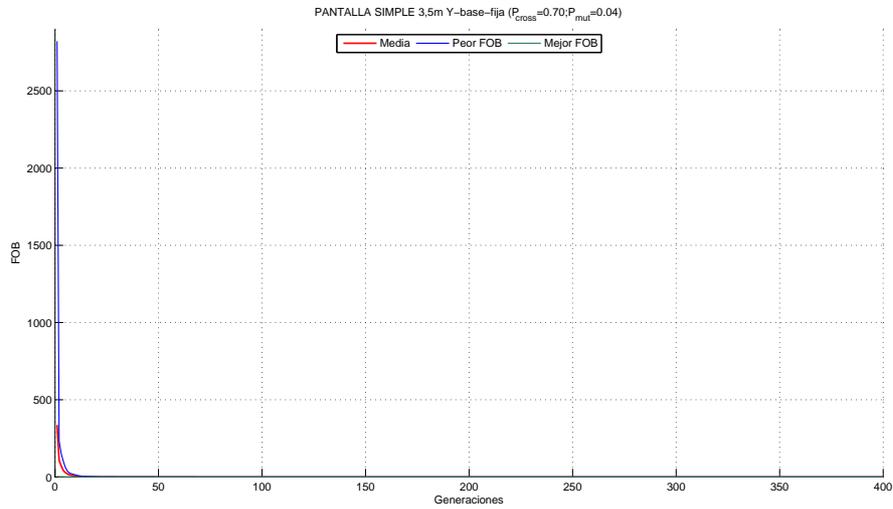


Figura 5.56: Evolución del AG para el mejor individuo de la configuración de pantalla Y base fija de eficacia similar a pantalla simple de 3,5 m.

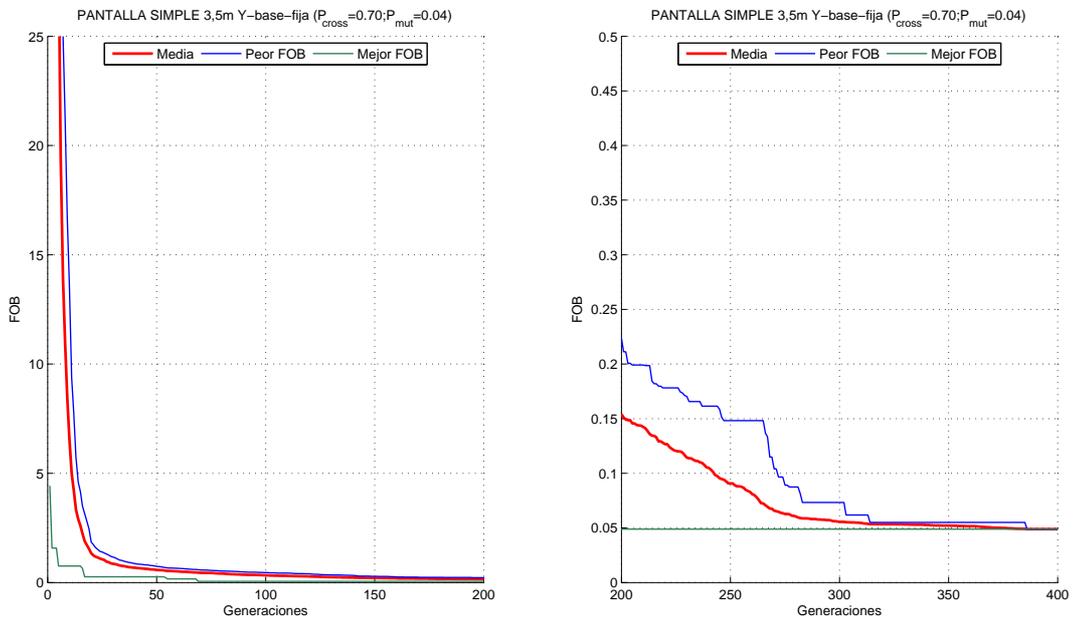


Figura 5.57: Evolución del AG. Ampliación del eje de ordenadas.

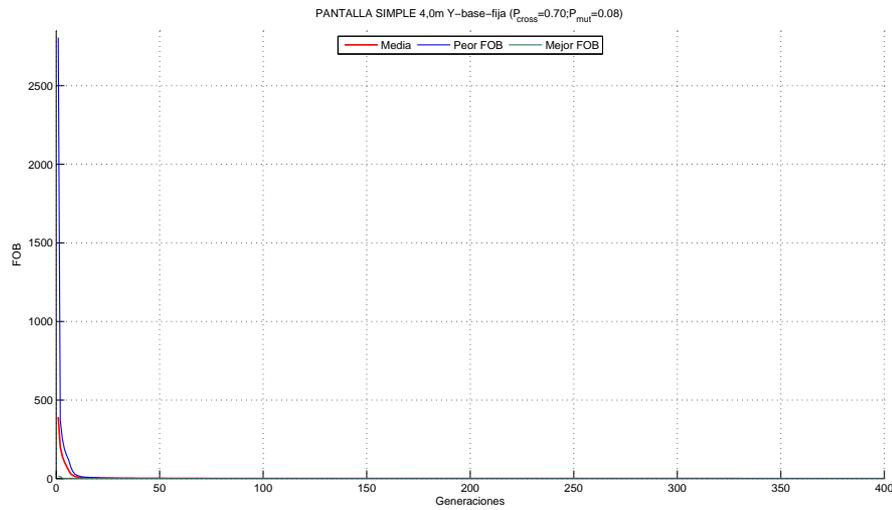


Figura 5.58: Evolución del AG para el mejor individuo de la configuración de pantalla Y base fija de eficacia similar a pantalla simple de 4,0 m.

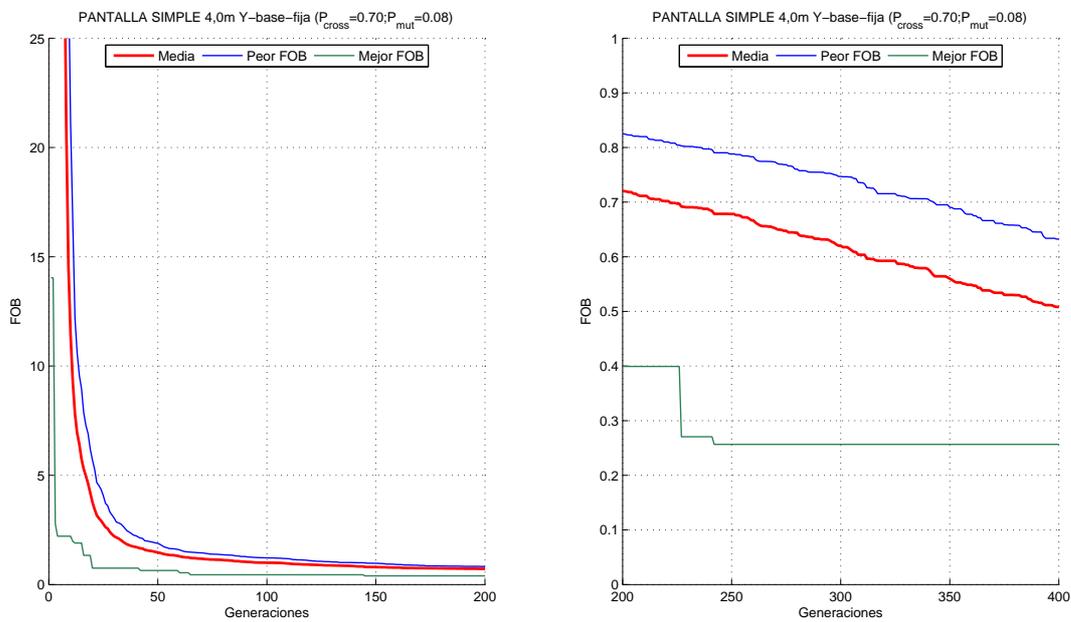
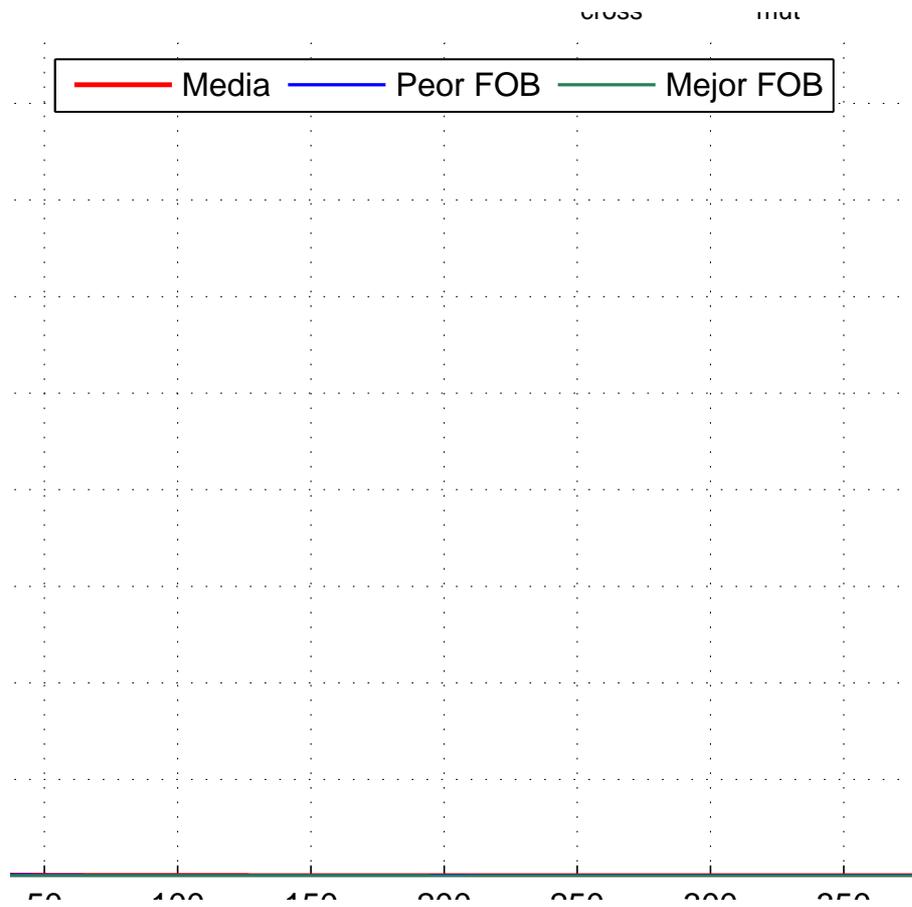


Figura 5.59: Evolución del AG. Ampliación del eje de ordenadas.



**Figura 5.60:** Evolución del AG para el mejor individuo de la configuración de pantalla Y base fija de eficacia similar a pantalla simple de 4,5 m.

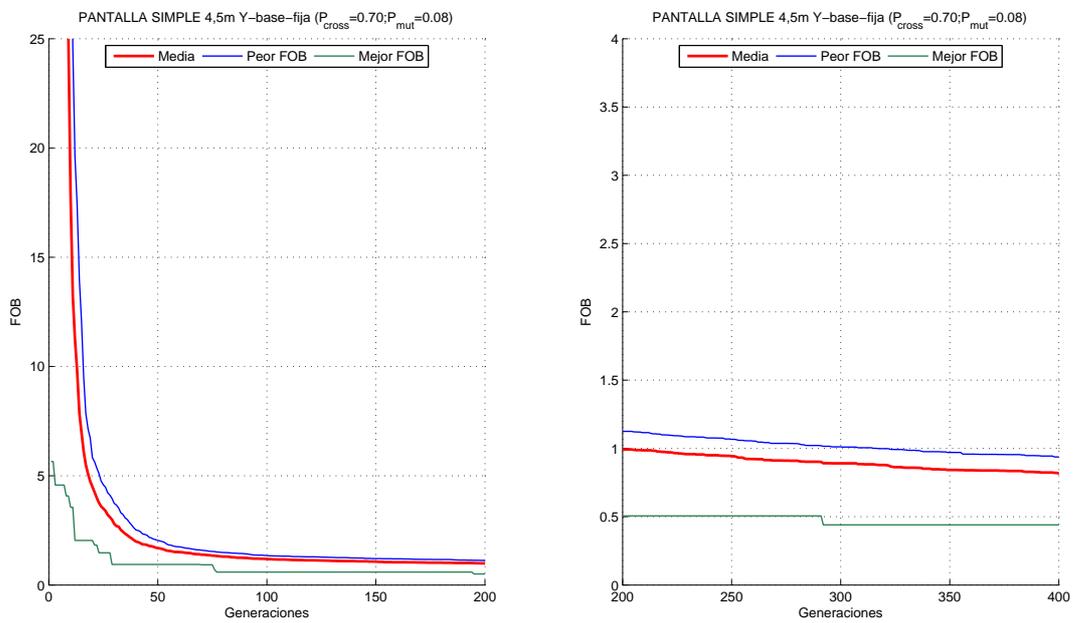


Figura 5.61: Evolución del AG. Ampliación del eje de ordenadas.

### 5.2.1.6. Conclusiones

Destacar que para este tipo de problemas, ya desde las exigencias más bajas ( $h = 3,5m$ ) existe una mayor homogeneidad de perfiles, con funciones objetivo muy buenas sin necesidad de que los brazos de la pantalla agoten la altura efectiva máxima (ver Figuras 5.47 y 5.48). En este caso existe una tendencia a inclinar la pantalla hacia el lado del receptor.

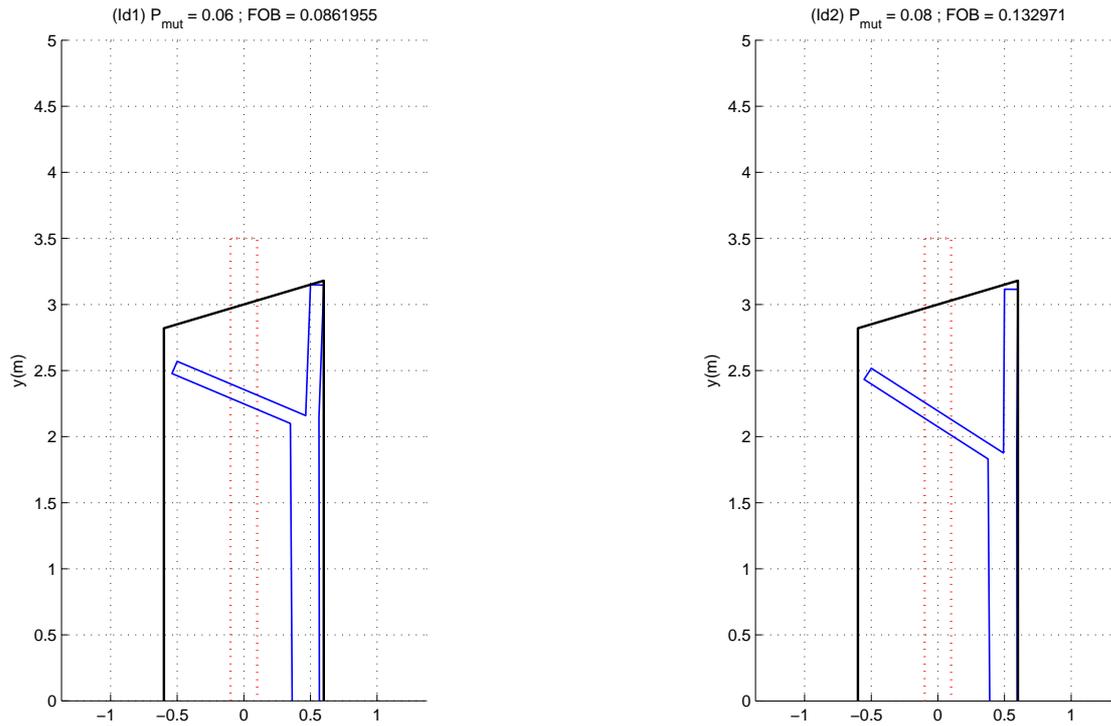
Relativo a la pantalla de  $h = 4,0m$  se mantiene la tendencia anterior de inclinar la pantalla hacia el lado del receptor aunque aumentando ligeramente la longitud de los brazos. Además, aparecen perfiles distintos que proporcionan eficacia acústica similar (ver Figura 5.49).

Respecto de la pantalla de  $h = 4,5m$ , en la Figura 5.51 se puede ver cómo continúa la tendencia a inclinar la pantalla hacia el lado del receptor, aumentando considerablemente la longitud de los brazos hasta agotar la altura efectiva máxima, de manera que supone prácticamente toda la configuración de la pantalla.

## 5.2.2. Configuración *Y* base móvil vertical

### 5.2.2.1. Pantalla simple de 3,5 metros

En la Figura 5.62 se muestran las distintas configuraciones encontradas por el algoritmo para este problema.



**Figura 5.62:** *Y* base móvil vertical: configuraciones en *Y* encontradas con eficacia similar a la pantalla simple de 3,5 m.

La Figura 5.63 recoge los valores de las distintas ejecuciones realizadas, identificándose los correspondientes a los individuos mostrados en la Figura 5.62.

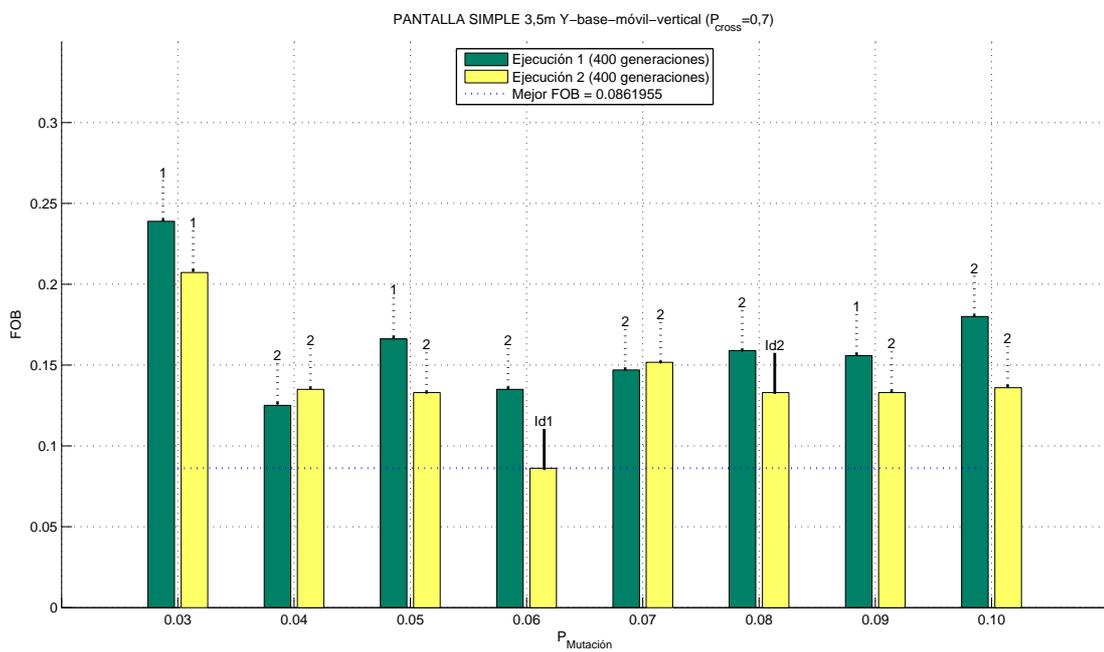
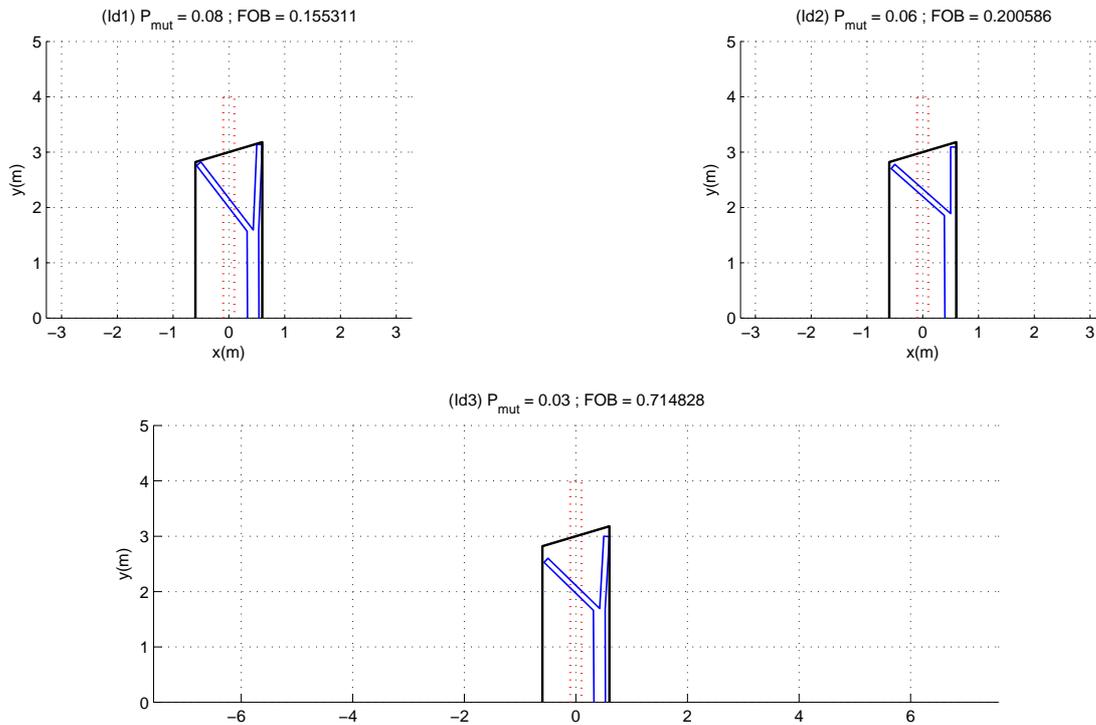


Figura 5.63: Y base móvil vertical: valores de la FOB para las distintas probabilidades de mutación y ejecuciones realizadas.

### 5.2.2.2. Pantalla simple de 4,0 metros

En la Figura 5.64 se muestran las distintas configuraciones encontradas por el algoritmo para este problema.



**Figura 5.64:** *Y* base móvil vertical: configuraciones en *Y* encontradas con eficacia similar a la pantalla simple de 4,0 m.

La Figura 5.65 recoge los valores de las distintas ejecuciones realizadas, identificándose los correspondientes a los individuos mostrados en la Figura 5.64.

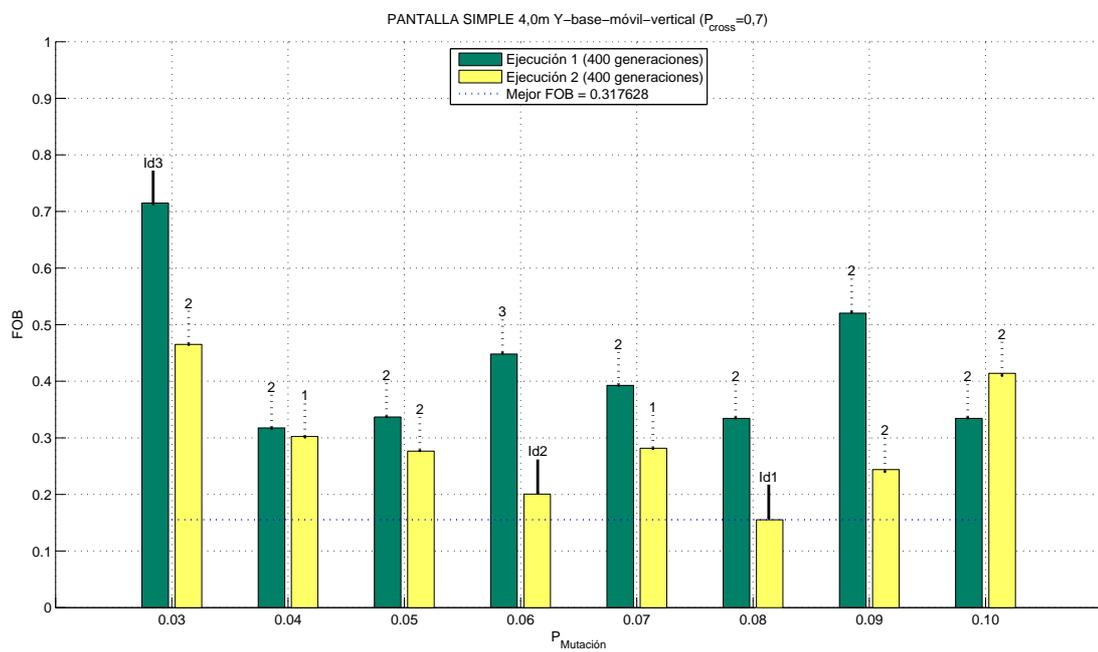
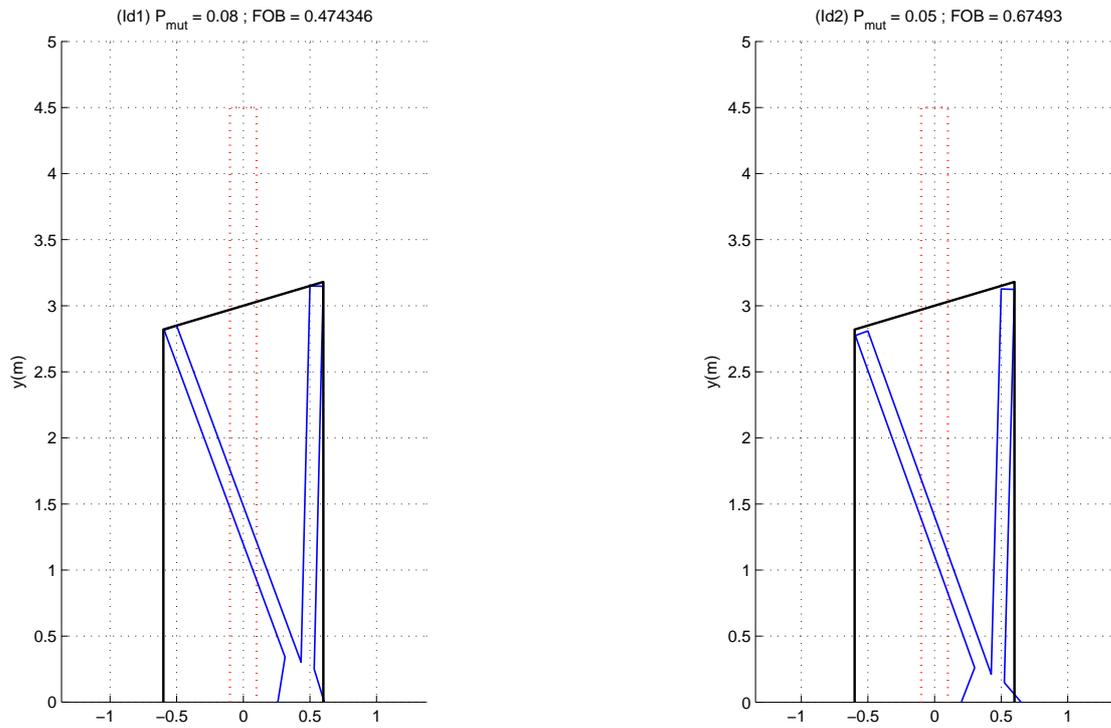


Figura 5.65: Y base móvil vertical: valores de la FOB para las distintas probabilidades de mutación y ejecuciones realizadas.

### 5.2.2.3. Pantalla simple de 4,5 metros

En la Figura 5.66 se muestran las distintas configuraciones encontradas por el algoritmo para este problema.



**Figura 5.66:** *Y base móvil vertical: configuraciones en Y encontradas con eficacia similar a la pantalla simple de 4,5 m.*

La Figura 5.67 recoge los valores de las distintas ejecuciones realizadas, identificándose los correspondientes a los individuos mostrados en la Figura 5.66.

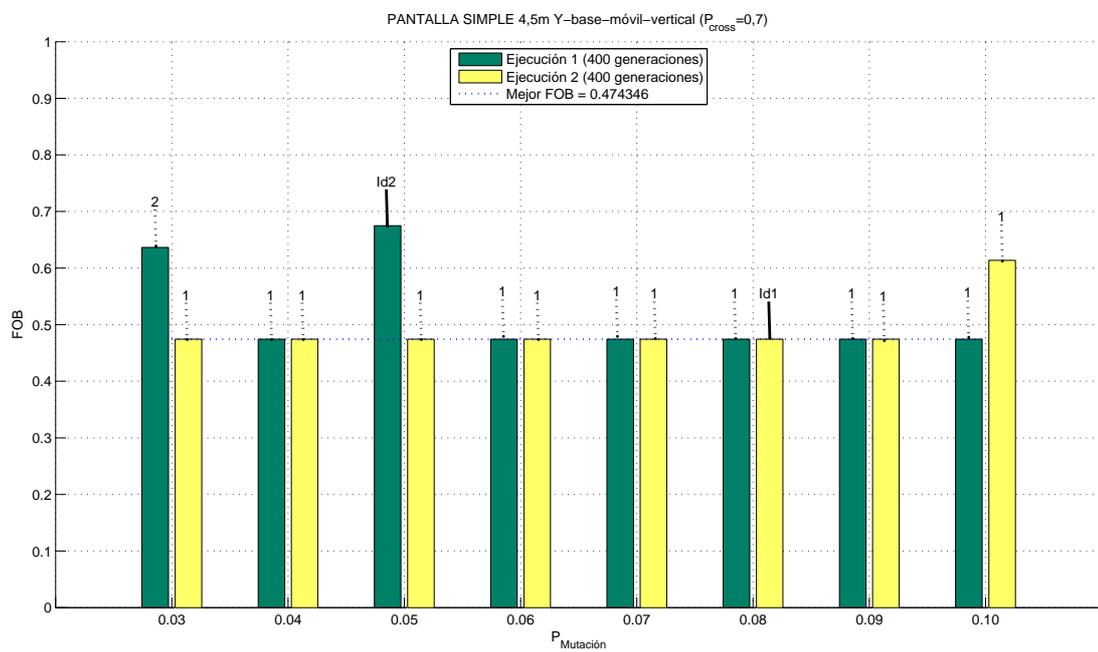
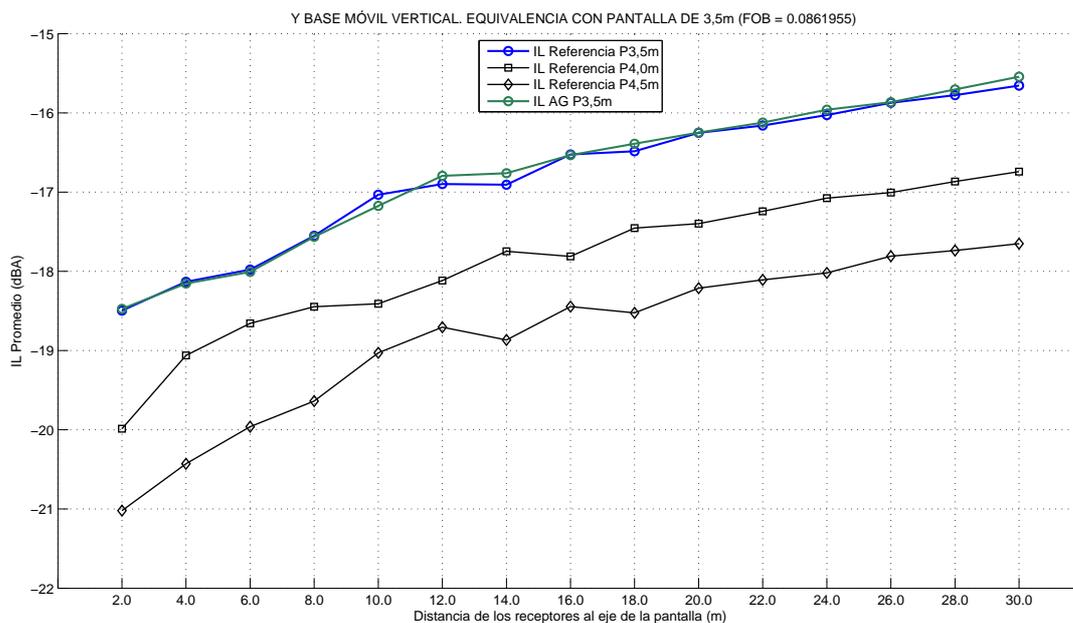


Figura 5.67: Y base móvil vertical: valores de la FOB para las distintas probabilidades de mutación y ejecuciones realizadas

#### 5.2.2.4. Espectros del coeficiente de pérdida por inserción

Las Figuras 5.68, 5.69 y 5.70 muestran los espectros de IL de las mejores soluciones encontradas por el AG para la configuración *Y base móvil vertical* frente a las curvas de referencia a las que pretenden ajustarse. Se puede observar como a medida que la altura efectiva ( $h$ ) de la pantalla simple disminuye es más fácil acercarse a dichas curvas de referencia.



**Figura 5.68:** *IL espectral para configuración de pantalla Y base móvil vertical de eficacia similar a pantalla simple de 3,5 m.*

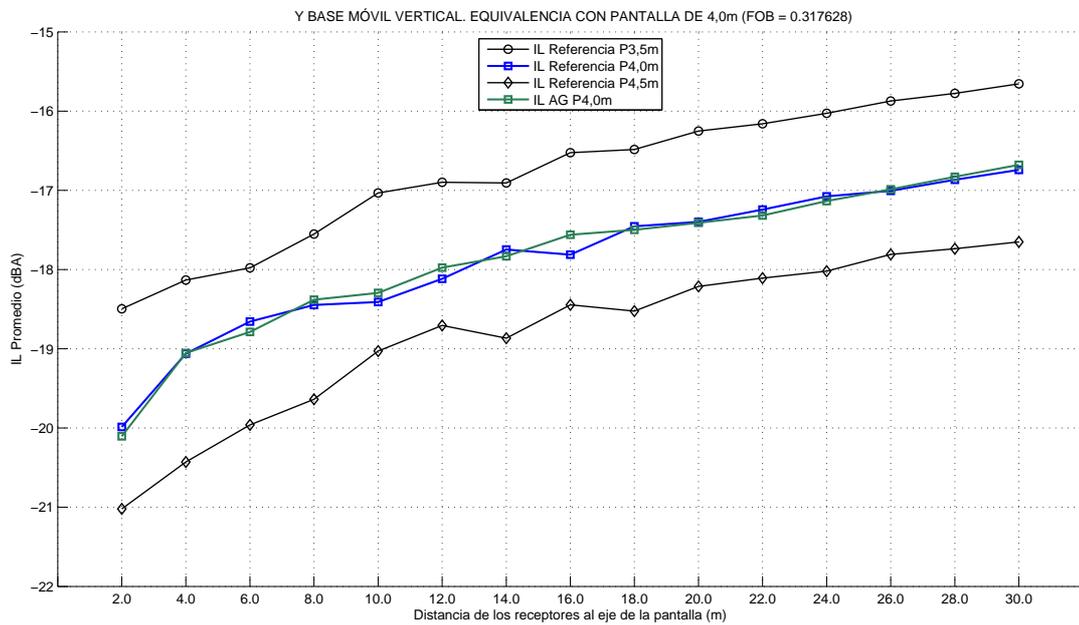


Figura 5.69: IL espectral para configuración de pantalla Y base móvil vertical de eficacia similar a pantalla simple de 4,0 m.

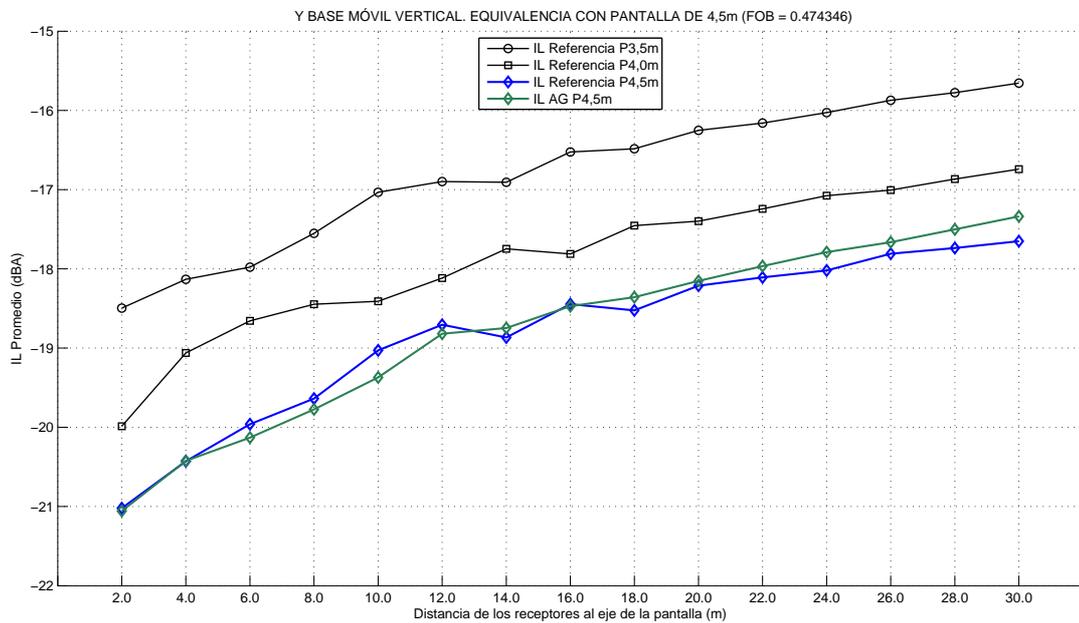


Figura 5.70: IL espectral para configuración de pantalla Y base móvil vertical de eficacia similar a pantalla simple de 4,5 m.

## 5.2.2.5. Evolución del AG

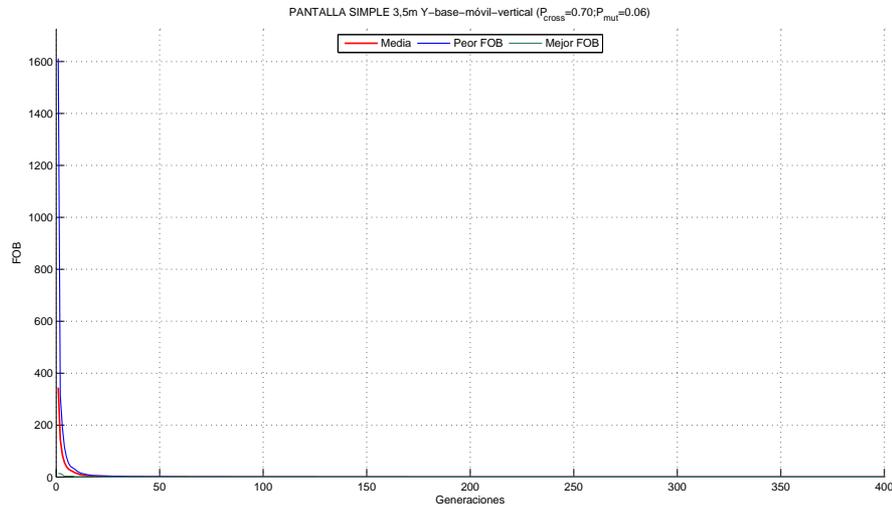


Figura 5.71: Evolución del AG para el mejor individuo de la configuración de pantalla Y base móvil vertical de eficacia similar a pantalla simple de 3,5 m.

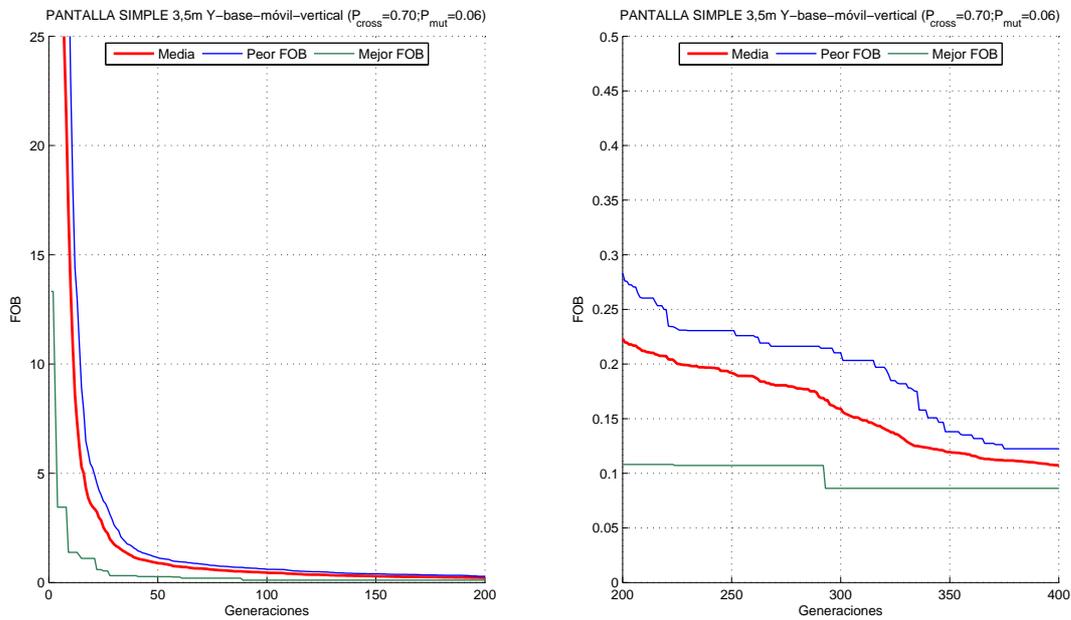


Figura 5.72: Evolución del AG. Ampliación del eje de ordenadas.

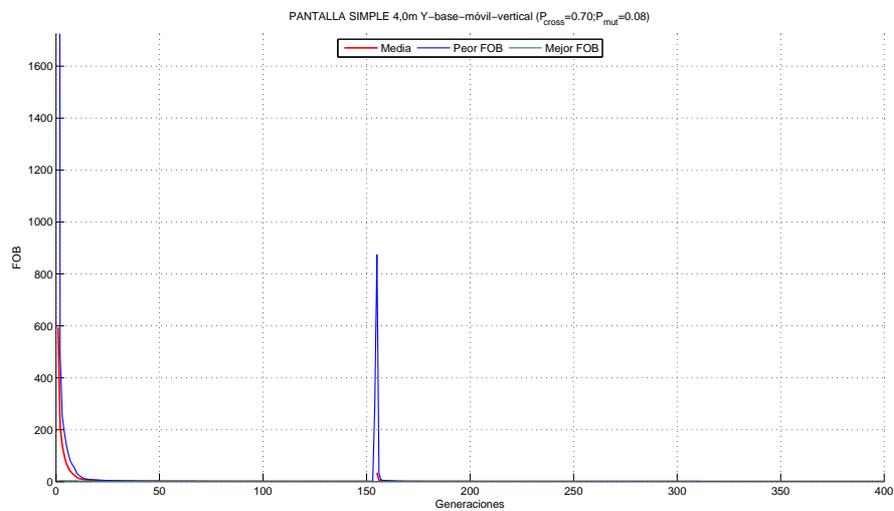


Figura 5.73: Evolución del AG para el mejor individuo de la configuración de pantalla Y base móvil vertical de eficacia similar a pantalla simple de 4,0 m.

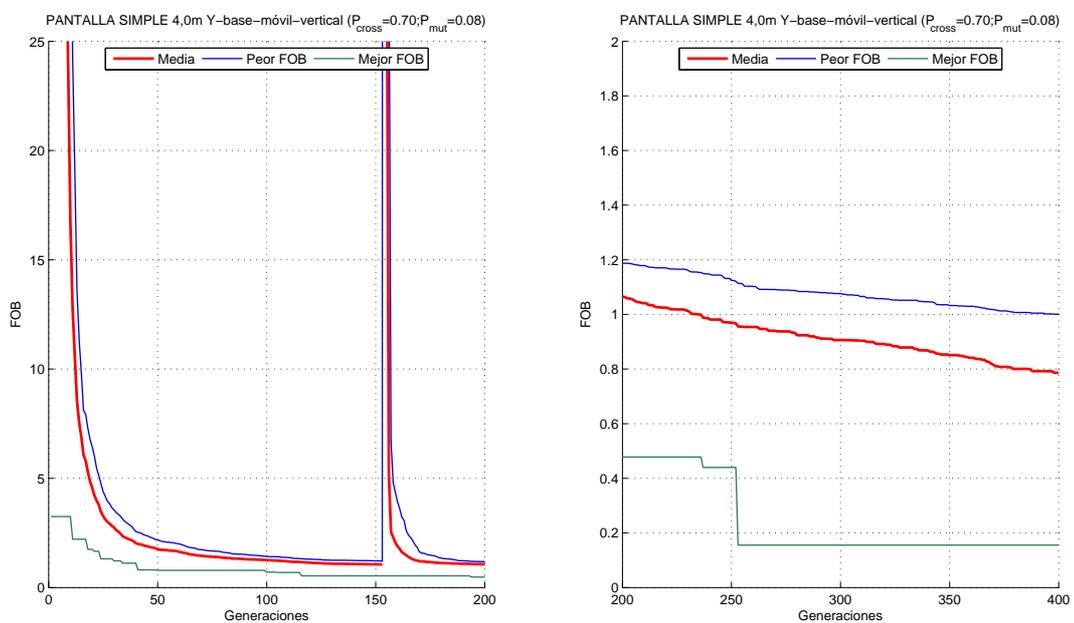


Figura 5.74: Evolución del AG. Ampliación del eje de ordenadas.

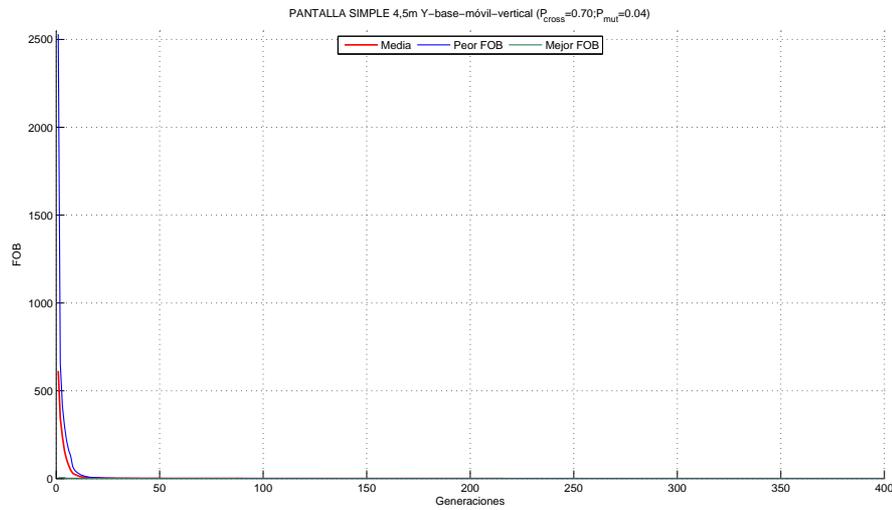


Figura 5.75: Evolución del AG para el mejor individuo de la configuración de pantalla Y base móvil vertical de eficacia similar a pantalla simple de 4,5 m.

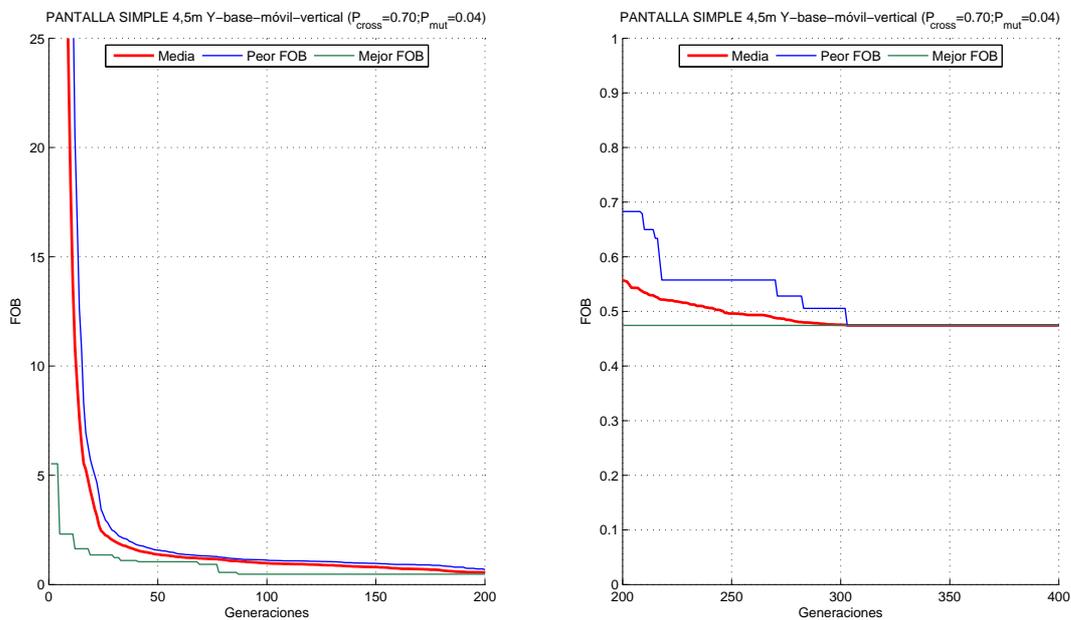


Figura 5.76: Evolución del AG. Ampliación del eje de ordenadas.

### 5.2.2.6. Conclusiones

Para la pantalla de  $h = 3,5m$  vemos cómo existe una homogeneización de los perfiles encontrados por el AG (ver Figura 5.62), con tendencia a posicionar la base de la pantalla en el lado del receptor.

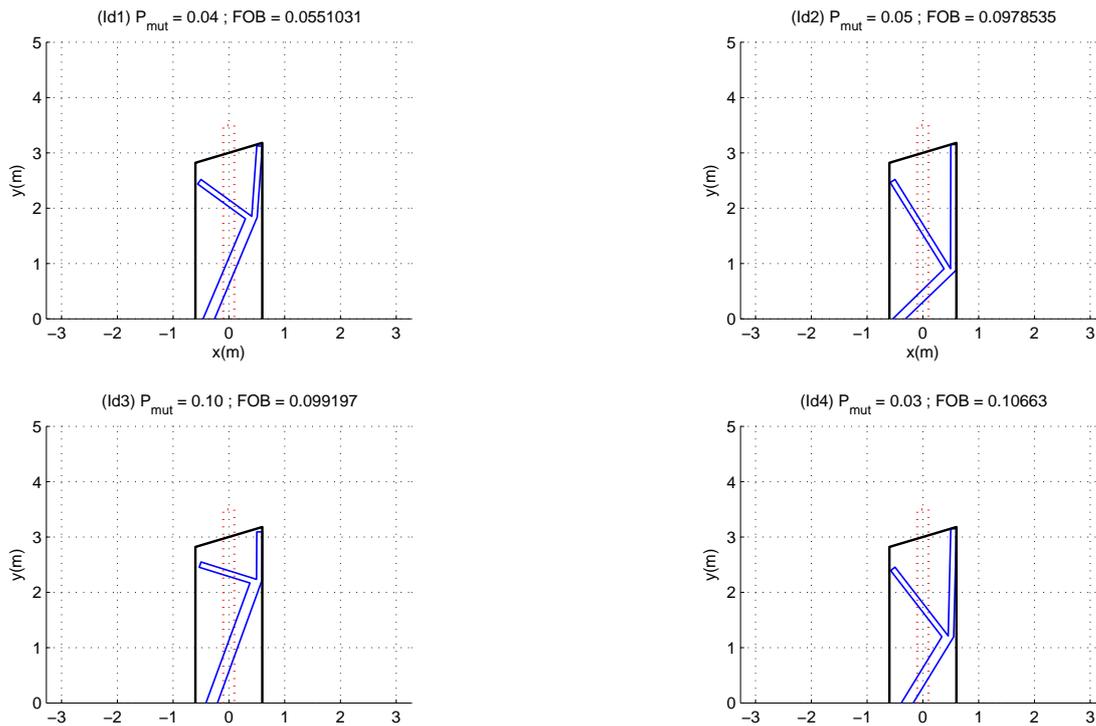
Relativo a la pantalla de  $h = 4,0m$  vemos en la Figura 5.64 cómo se conserva la tendencia anteriormente mencionada, aunque aumentando ligeramente la longitud de ambos brazos en busca de la altura efectiva máxima.

Respecto de la pantalla de  $h = 4,5m$  destacar que las tendencias vistas en las pantallas de  $h = 3,5m$  y  $h = 4,0m$  alcanzan su máxima expresión. En este caso se puede observar cómo por encontrarnos en los límites del problema, los brazos de la pantalla agotan la altura efectiva máxima siendo la longitud de los mismos tal que se podría decir que la configuración de la pantalla es exclusivamente los brazos de la misma (ver Figura 5.66).

### 5.2.3. Configuración *Y* base móvil

#### 5.2.3.1. Pantalla simple de 3,5 metros

En la Figura 5.77 se muestran las distintas configuraciones encontradas por el algoritmo para este problema.



**Figura 5.77:** *Y* base móvil: configuraciones en *Y* encontradas con eficacia similar a la pantalla simple de 3,5 m.

La Figura 5.78 recoge los valores de las distintas ejecuciones realizadas, identificándose los correspondientes a los individuos mostrados en la Figura 5.77.

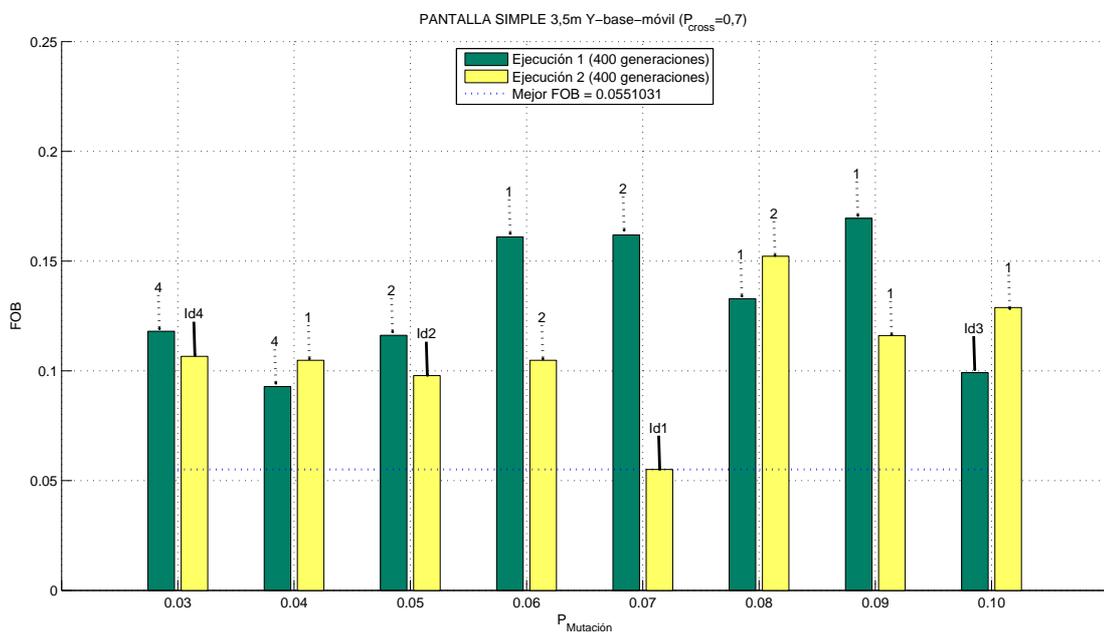
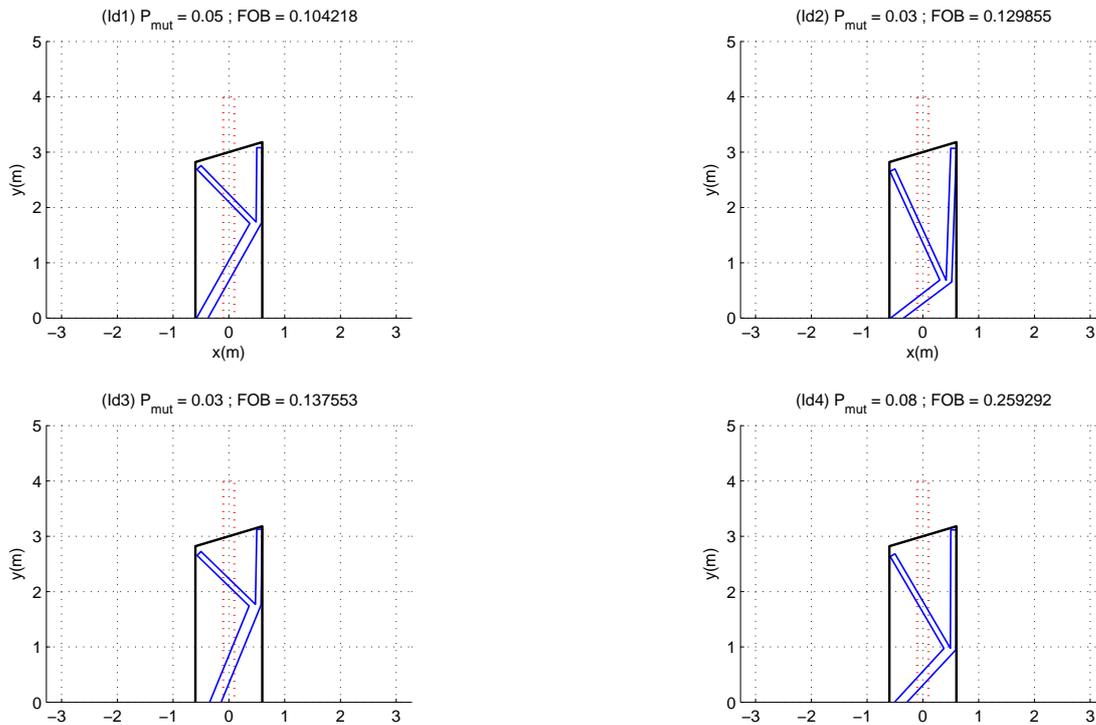


Figura 5.78: Y base móvil: valores de la FOB para las distintas probabilidades de mutación y ejecuciones realizadas.

### 5.2.3.2. Pantalla simple de 4,0 metros

En la Figura 5.79 se muestran las distintas configuraciones encontradas por el algoritmo para este problema.



**Figura 5.79:** Configuraciones en  $Y$  encontradas con eficacia similar a la pantalla simple de 4,0 m.

La Figura 5.80 recoge los valores de las distintas ejecuciones realizadas, identificándose los correspondientes a los individuos mostrados en la Figura 5.79.

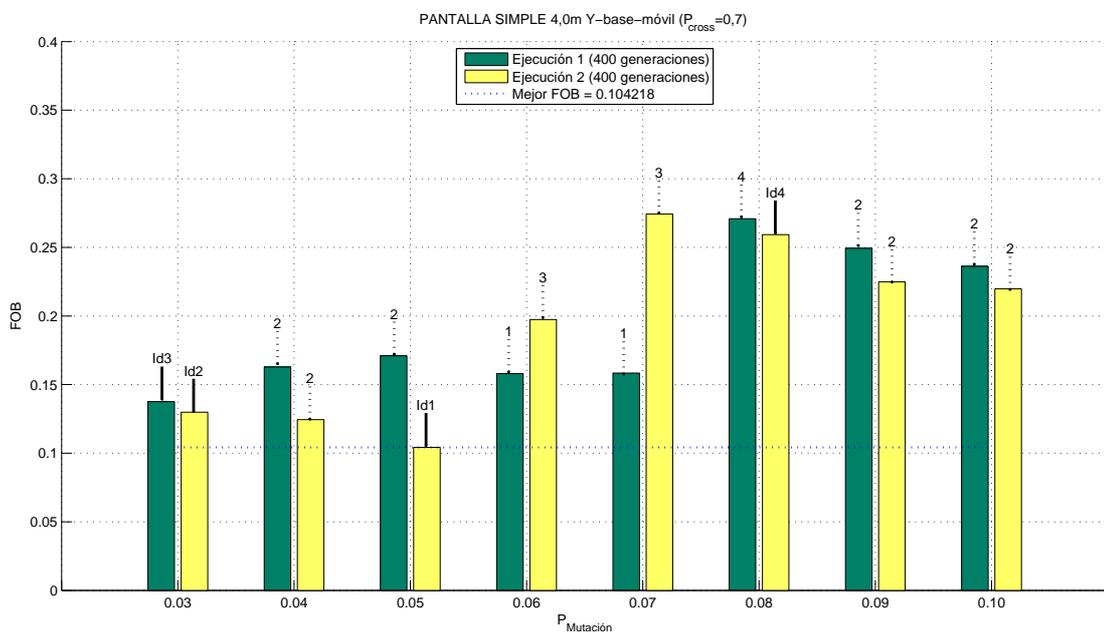
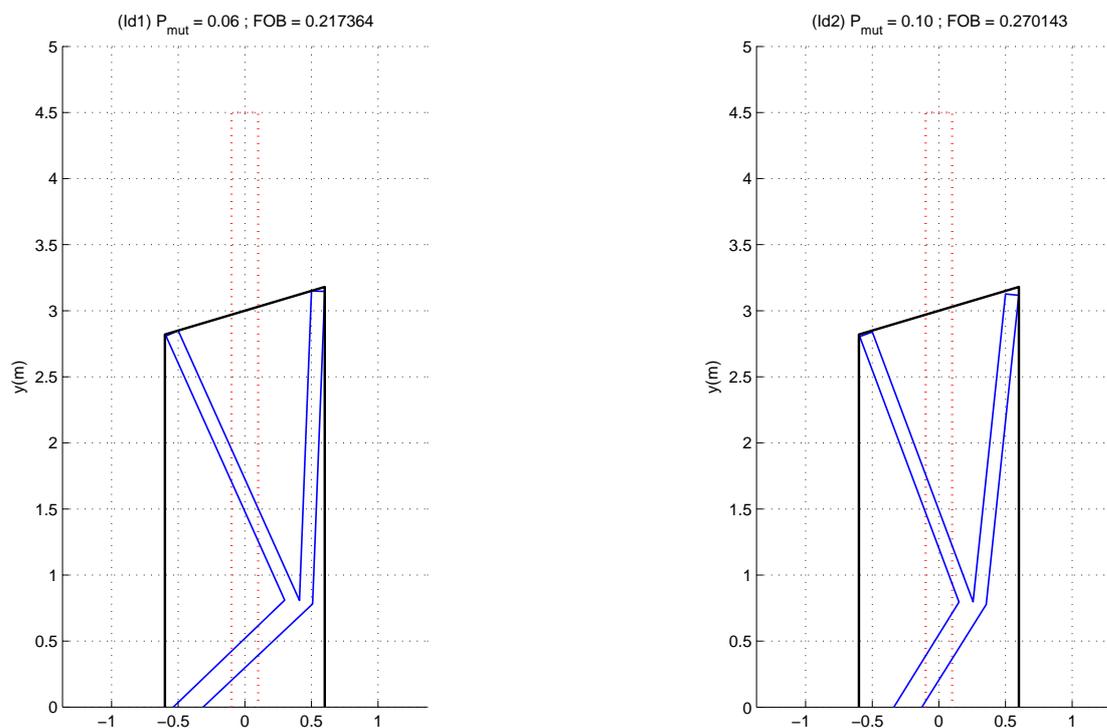


Figura 5.80: Y base móvil: valores de la FOB para las distintas probabilidades de mutación y ejecuciones realizadas.

### 5.2.3.3. Pantalla simple de 4,5 metros

En la Figura 5.81 se muestran las distintas configuraciones encontradas por el algoritmo para este problema.



**Figura 5.81:** *Y base móvil: configuraciones en Y encontradas con eficacia similar a la pantalla simple de 4,5 m.*

La Figura 5.82 recoge los valores de las distintas ejecuciones realizadas, identificándose los correspondientes a los individuos mostrados en la Figura 5.81.

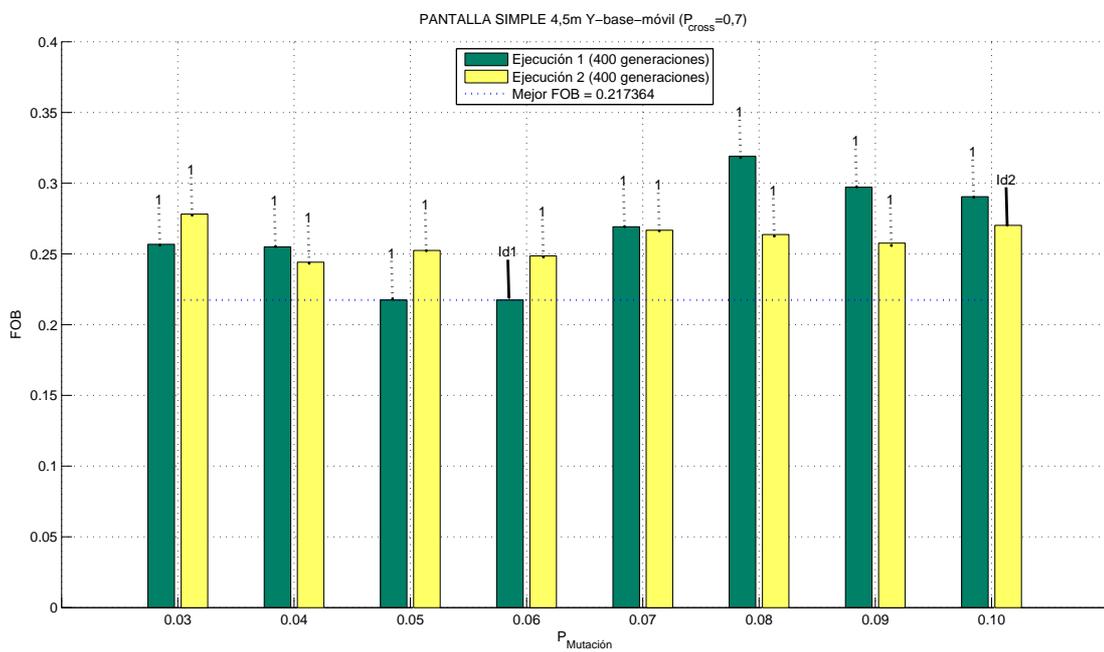
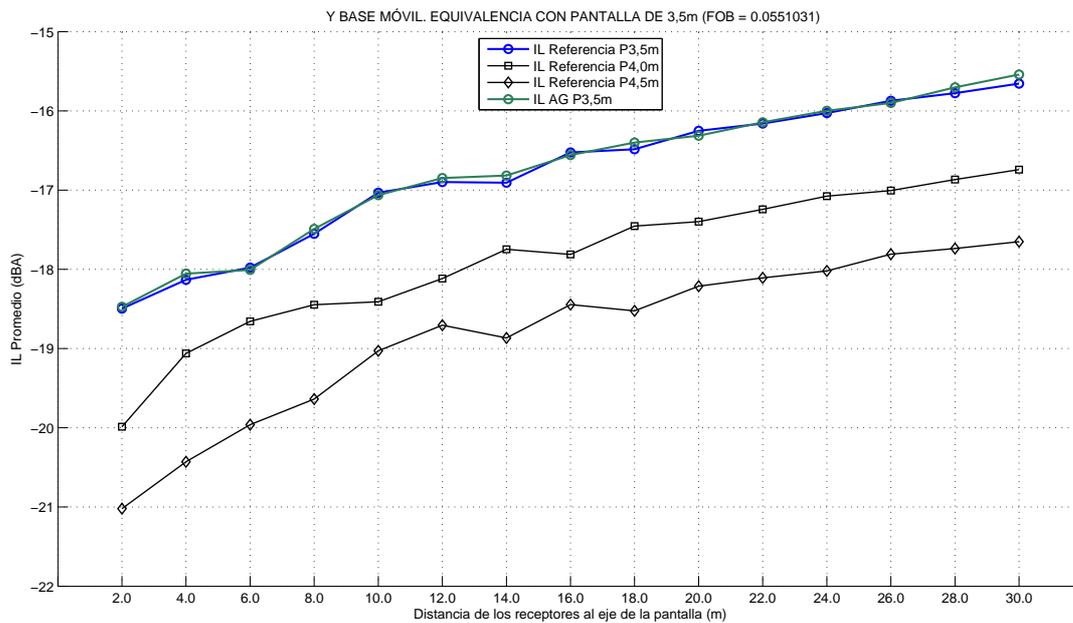


Figura 5.82: Y base móvil: valores de la FOB para las distintas probabilidades de mutación y ejecuciones realizadas.

#### 5.2.3.4. Espectros del coeficiente de pérdida por inserción

Las Figuras 5.83, 5.84 y 5.85 muestran los espectros de IL de las mejores soluciones encontradas por el AG para la configuración *Y base móvil* frente a las curvas de referencia a las que pretenden ajustarse. Se puede observar como a medida que la altura efectiva ( $h$ ) de la pantalla simple disminuye es más fácil acercarse a dichas curvas de referencia.



**Figura 5.83:** Espectro de IL frecuencial para configuración de pantalla *Y* base móvil de eficacia similar a pantalla simple de 3,5 m.

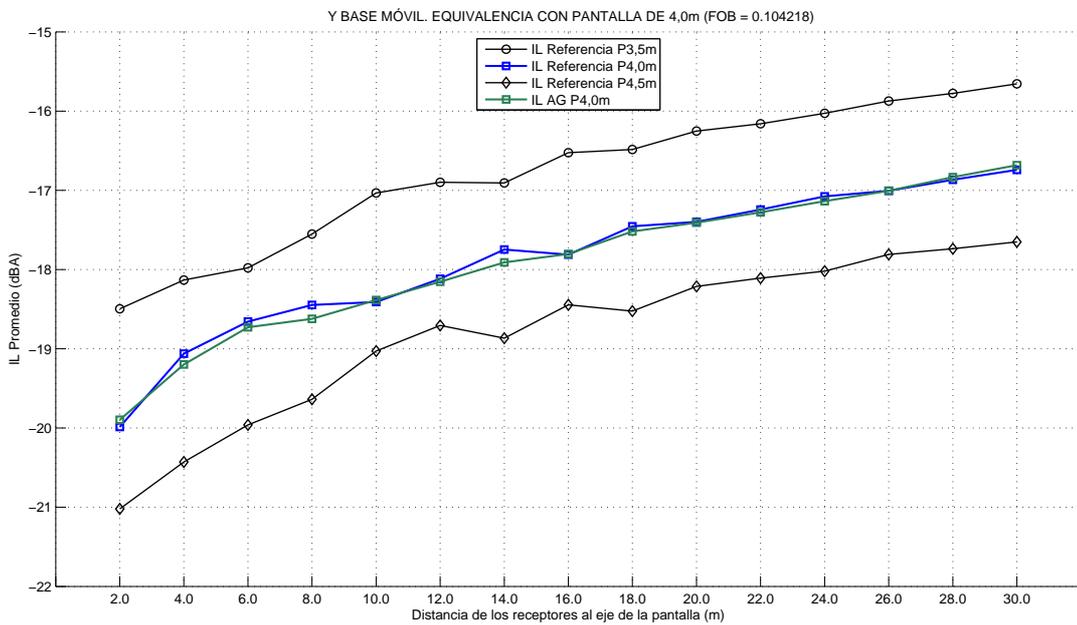


Figura 5.84: Espectro de IL frecuencial para configuración de pantalla Y base móvil de eficacia similar a pantalla simple de 4,0 m.

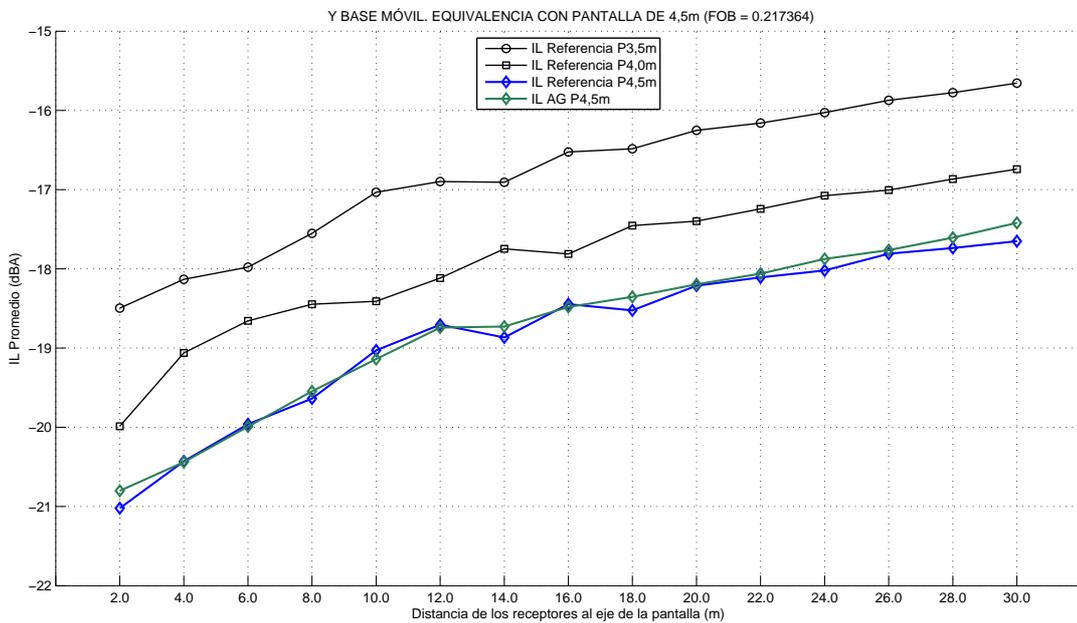


Figura 5.85: Espectro de IL frecuencial para configuración de pantalla Y base móvil de eficacia similar a pantalla simple de 4,5 m.

### 5.2.3.5. Evolución del AG

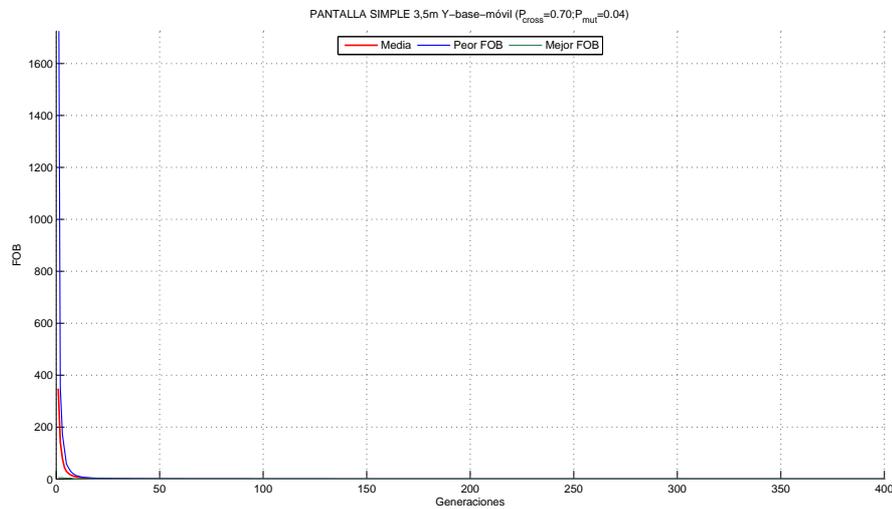


Figura 5.86: Evolución del AG para el mejor individuo de la configuración de pantalla Y base móvil vertical de eficacia similar a pantalla simple de 3,5 m.

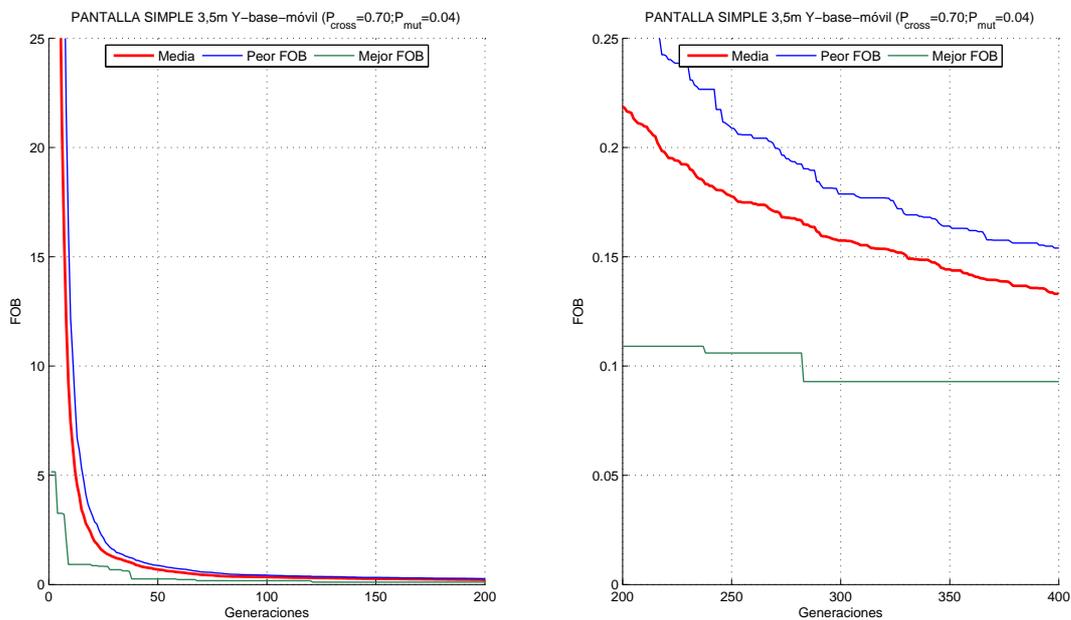


Figura 5.87: Evolución del AG. Ampliación del eje de ordenadas.

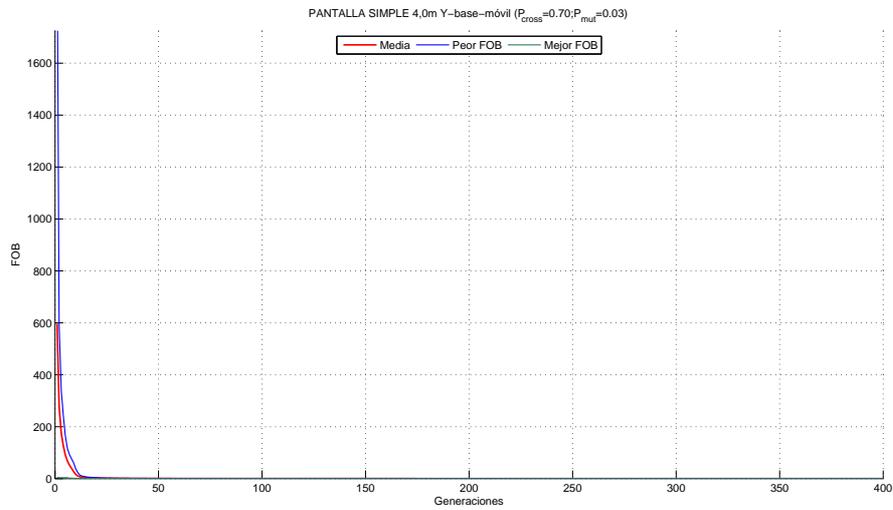


Figura 5.88: Evolución del AG para el mejor individuo de la configuración de pantalla Y base móvil vertical de eficacia similar a pantalla simple de 4,0 m.

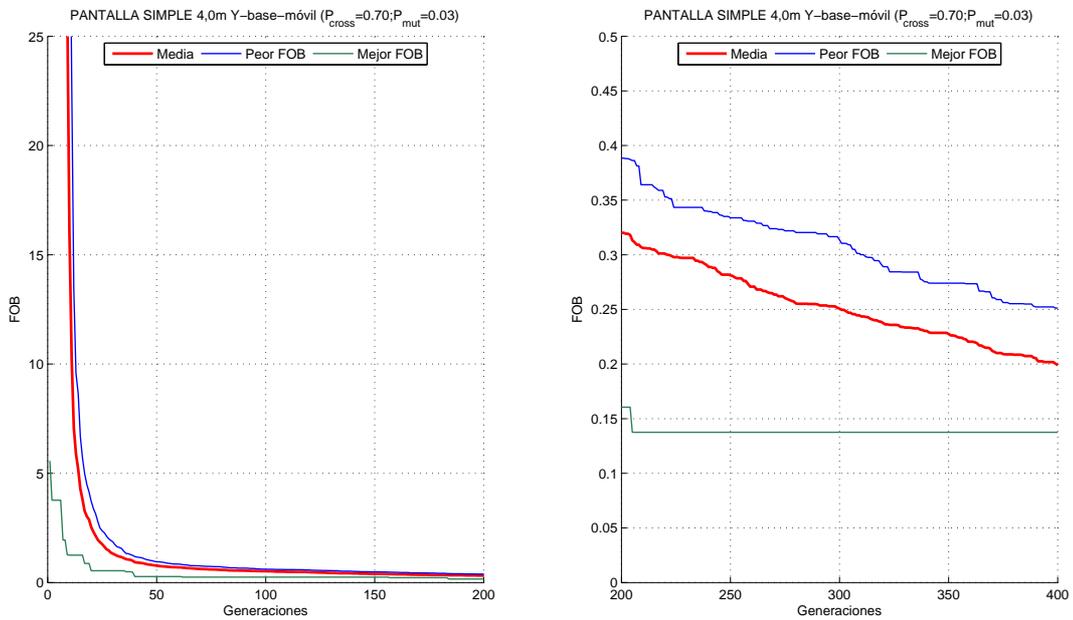


Figura 5.89: Evolución del AG. Ampliación del eje de ordenadas.

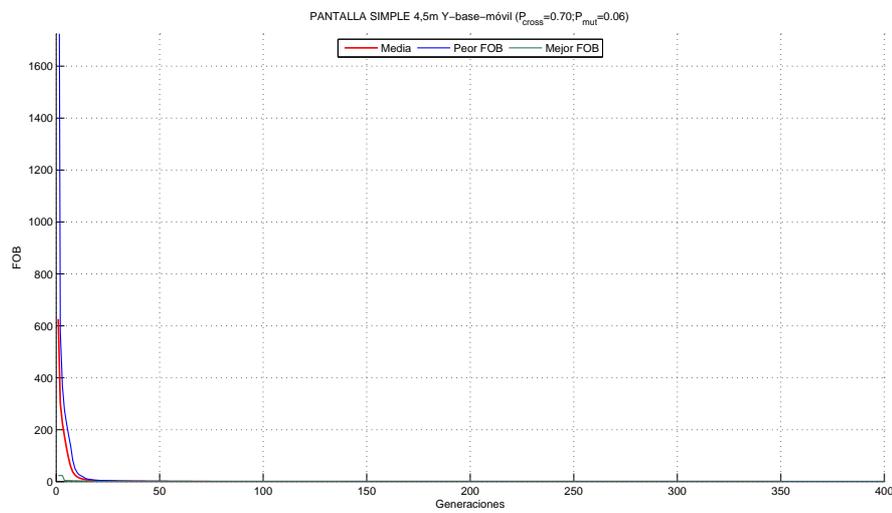


Figura 5.90: Evolución del AG para el mejor individuo de la configuración de pantalla Y base móvil vertical de eficacia similar a pantalla simple de 4,5 m.

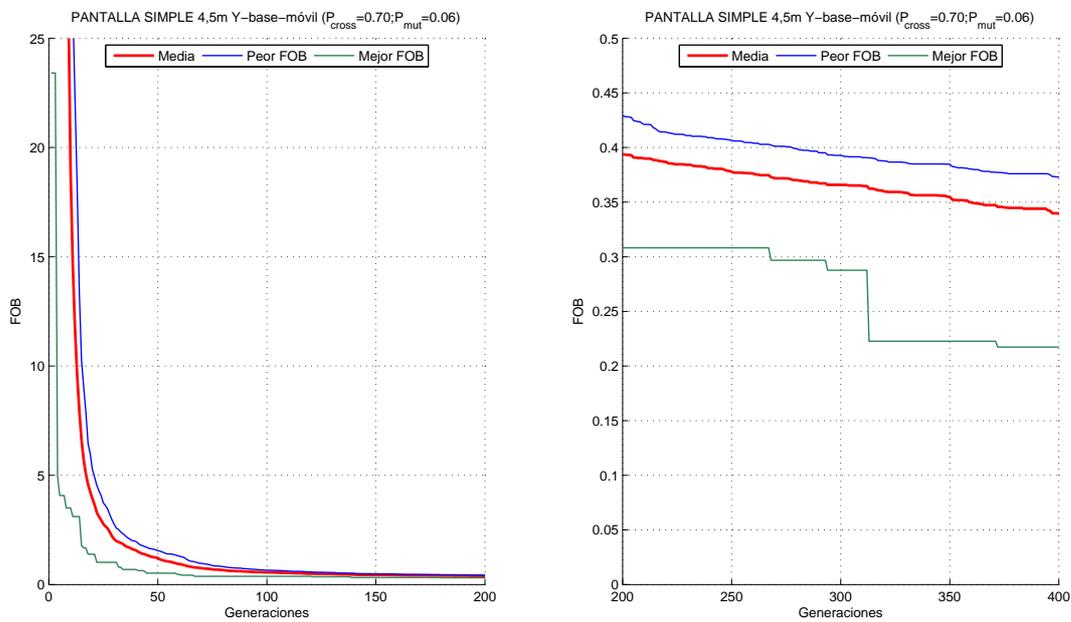


Figura 5.91: Evolución del AG. Ampliación del eje de ordenadas.

**5.2.3.6. Conclusiones**

Para la pantalla de  $h = 3,5m$  vemos cómo existe una homogeneización de los perfiles encontrados por el AG (ver Figura 5.77), con tendencia a posicionar la base de la pantalla en el lado del emisor e inclinar la pantalla hacia el lado del receptor.

Relativo a la pantalla de  $h = 4,0m$  vemos en la Figura 5.79 cómo se conserva la tendencia anteriormente mencionada, aunque aumentando ligeramente la longitud de ambos brazos en busca de la altura efectiva máxima.

Respecto de la pantalla de  $h = 4,5m$  destacar que las tendencias vistas en las pantallas de  $h = 3,5m$  y  $h = 4,0m$  se puede ver cómo continúa la tendencia a inclinar la pantalla hacia el lado del receptor, aumentando considerablemente la longitud de los brazos hasta agotar la altura efectiva máxima (ver Figura 5.81).



# Capítulo 6

## Desarrollos Futuros

### 6.1. A corto plazo

En el horizonte temporal más próximo se pretende, inicialmente, establecer un número de ejecuciones suficientes que permita establecer las valoraciones y conclusiones definitivas acerca de los problemas y casos estudiados en este trabajo; un total de 8 ó 10 ejecuciones podría ser válido para este fin.

Por otro lado, sería interesante proponer nuevas soluciones geométricas que traten de mejorar la relación eficacia/economía, es decir, conseguir mayores niveles de pérdida por inserción, manteniendo acotada la longitud total de la sección transversal (y por tanto el peso) de la barrera. Las soluciones son múltiples, aunque se propone el estudio de diseños de pantallas que se consideran variantes de la pantalla en Y, como las configuraciones que se muestran en las Figuras 6.1, 6.2, 6.3 y 6.4. Asimismo, se propone el estudio de la disposición de pantallas simples colocadas en serie, para una altura efectiva dada (Figura 6.5).

En los estudios realizados en este trabajo se ha considerado que la pantalla posee un comportamiento perfectamente reflejante. Sería de interés observar cuál sería el comportamiento del tratamiento superficial sobre la atenuación de los niveles de ruido. Es por ello que se propone el estudio de distintas configuraciones de pantalla con tratamiento superficial para evaluar la influencia que pueda tener la capacidad absorbente de la superficie de la misma en su eficacia, con respecto al caso de pantallas completamente reflejantes.

Otro punto de interés es la influencia que el borde de la pantalla puede tener en la difracción de la onda que se propaga. Se propone el estudio de la influencia que este efecto, conocido como *efecto borde*, tiene sobre el ángulo de difracción de la onda tras encontrarse con la barrera, mediante la adaptación geométrica del borde superior de la misma (Figura 6.6).

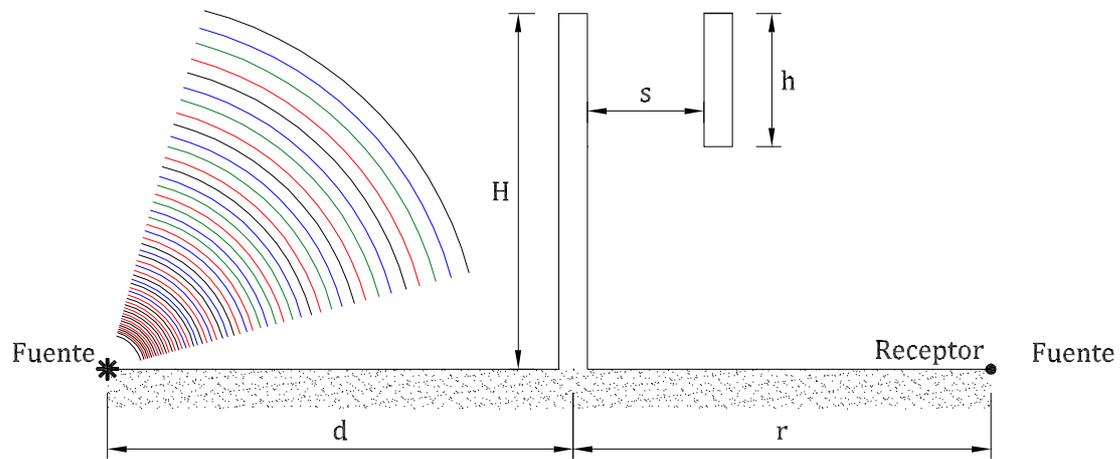


Figura 6.1: Propuesta de estudio. Variante tipo 1 de pantalla en Y.

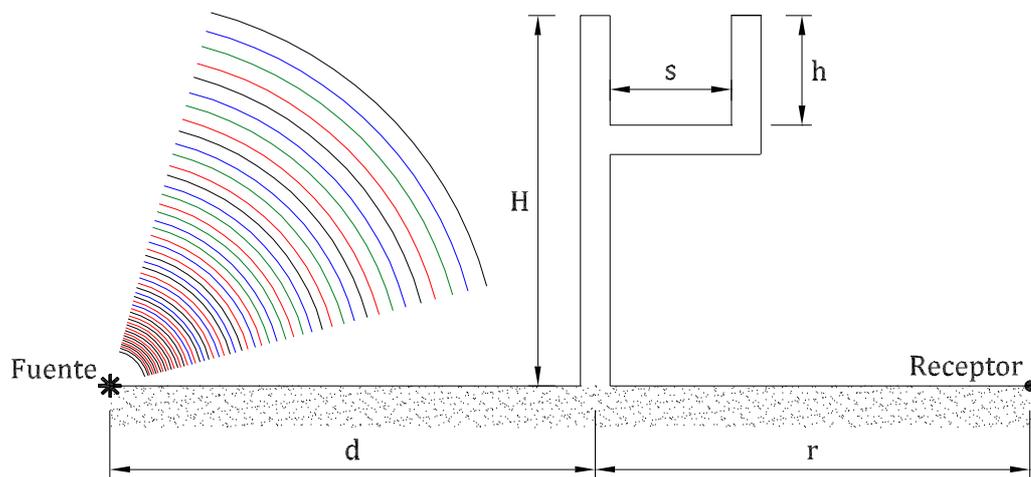


Figura 6.2: Propuesta de estudio. Variante tipo 2 de pantalla en Y.

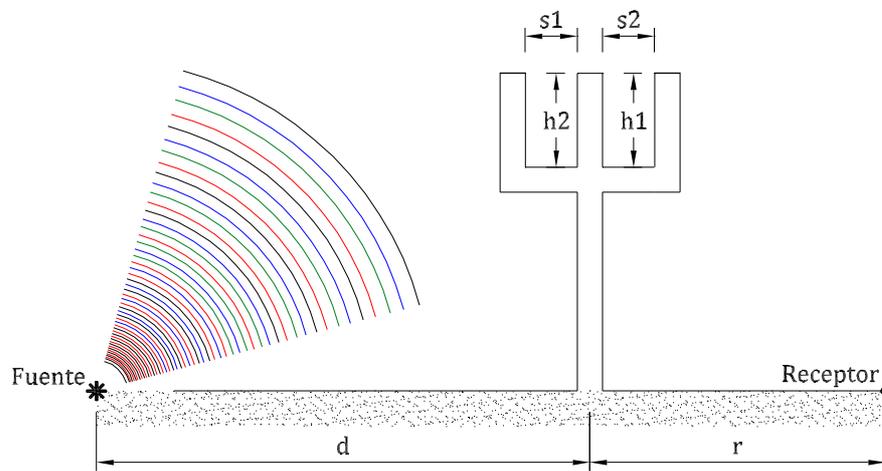


Figura 6.3: Propuesta de estudio. Variante tipo 3 de pantalla en Y.

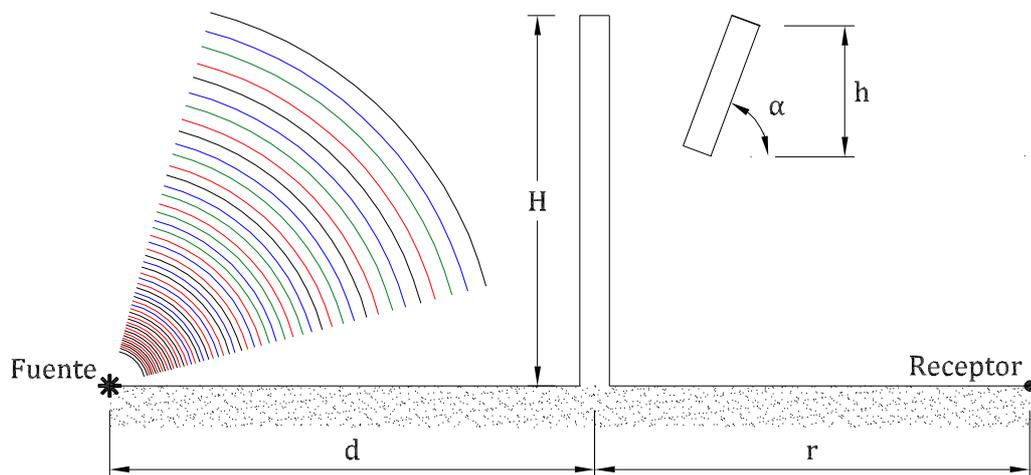
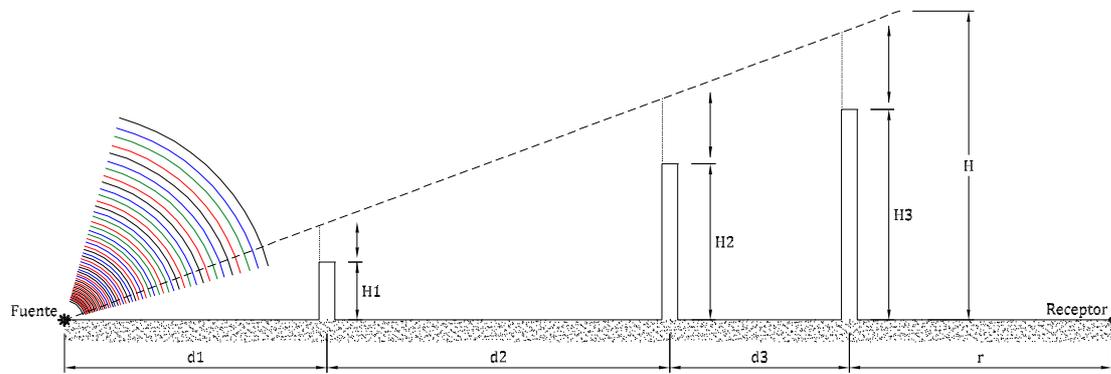
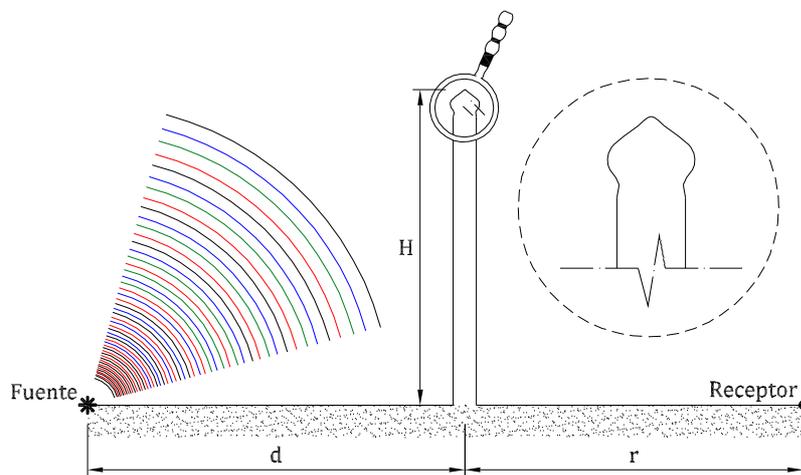


Figura 6.4: Propuesta de estudio. Variante tipo 4 de pantalla en Y.



**Figura 6.5:** Propuesta de estudio. Pantallas simples dispuestas en serie.

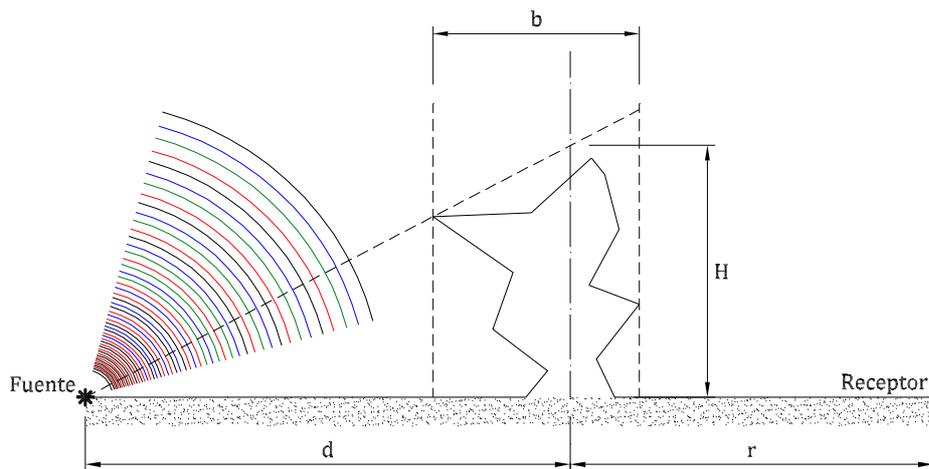


**Figura 6.6:** Propuesta de estudio. Adaptación del borde superior de la pantalla para minimizar el efecto borde.

## 6.2. A largo plazo

Se plantean además una serie de estudios a realizar en un horizonte temporal más lejano. Entre ellos cabe destacar la propuesta de desarrollo de un protocolo que permita el diseño de pantallas genéricas, fijando una proyección sobre la horizontal y una altura efectiva máxima de la barrera, a partir de una serie de puntos (Figura 6.7). Para poder llevar a cabo este estudio es necesario modificar previamente el programa que implementa el Método de los Elementos de Contorno (POSAMEC), pues actualmente presenta una limitación relativa a la imposibilidad de eliminar las frecuencias espúreas susceptibles de aparecer en este tipo de casos.

Toda vez que se hayan llevado a cabo los estudios propuestos, sería de gran interés ampliar el protocolo a otros problemas de ondas acústicas. Así, se propone el desarrollo de medidas encaminadas al aislamiento de fuentes sonoras (atenuación de intensidad acústica mediante la inclusión de tratamientos absorbentes) y al control activo de ruido.



**Figura 6.7:** Propuesta de estudio. Protocolo para minimizar el impacto acústico mediante diseños genéricos de pantallas.



# Bibliografía

- [1] J Domínguez. Boundary elements in dynamics. *CMP-Elsevier*, 1993.
- [2] O. Von Estorff. Numerical methods in acoustics: facts, fears, future. plenary lecture. *International congress on acoustics, Madrid*, 2007.
- [3] F. Magoules and editor. Computational methods for acoustics problems. *Saxe, Coburg Publications*, 2008.
- [4] R. Seznec. Diffraction of sound barrires: use of the boundary element technique. *J Sound Vib*, 73:195–209, 1980.
- [5] D.C. Hothersall, S.N. Chandler-Wilde, and M.N. Hajmirzae. Efficiency of single noise barriers. *J Sound Vib*, 146(2):303–22, 1993.
- [6] D.C. Hothersall, D.H. Crombie, and S.N. Chandler-Wilde. The performance of t-profile and associated noise barriers. *Appl Acoust*, 32:269–87, 1991.
- [7] D.H. Crombie and D.C. Hothersall. The performance of multiple noise barriers. *J Sound Vib*, 176(4):459–73, 1993.
- [8] G. Winter, R. Berriel, P. Cuesta, B. Galván, D. Greiner, and I. Sánchez. Improving performance of genetic algorithms in shape optimization. *ECCOMAS computational fluid dynamics. John Wiley and Sons*, pages 209–14, 1998.
- [9] J.F. Wang, J. Periaux, and M. Sefrioui. Parallel evolutionary algorithms for optimization problems in aerospace engineering. *J Comput Appl Math*, 149(1):155–169, 2002.
- [10] A. Oyama, M.S. Liou, and S. Obayashi. Transonic axial-flow blade optimization: Evolutionary algorithms/three dimensional navier-stokes solver. *J Propul Power*, 20(4):612–9, 2004.
- [11] S.Ñagarathinam, L. González, E. Whitney, S. Karkenahalli, and J. Periaux. Aerodynamic optimisation using a robust evolutionary algorithm and grid-free flowsolver. *44th AIAA arospace sciences meeting and exhibit, AIAA Paper*, pages 2006–0052, 2006.

- 
- [12] T. Burczynski, A. Osyczka, and editors. Iutam symposium on evolutionary methods in mechanics. solid mechanics and its applications. *Kluwer Academic Publishers*, 117, 2004.
- [13] W. Annicchiarico and M. Cerrolaza. Structural shape optimisation 3d finite-element models based on genetic algorithms and geometric modeling. *Finite Elem Anal Des*, 37(5):403–15, 2001.
- [14] E. Kita and H. Tanie. Shape optimization of continuum structures by genetic algorithms and boundary element method. *Eng Anal Bound Elem*, 19:129–36, 1997.
- [15] K.L. Katsifarakis, D.K. Karpouzou, and N. Theodossiou. Combined use of bem and genetic algorithms in groundwater flow and mass transport problems. *Eng Anal Bound Elem*, 23:555–65, 1999.
- [16] S.J. Elliott and P.A. Nelson. Active noise control. *IEEE Signal Proc Mag*, 10(4):12–35, 1993.
- [17] K.S. Tang, K.F. Man, S. Kwong, and P.J. Fleming. Ga approach for active noise control. algorithms and architecture for real-time control. *Belgium, 31 May-2 June*, pages 13–9, 1995.
- [18] E.A. Divo, A.J. Kassab, and M.S. Ingber. Shape optimization of acoustic scattering bodies. *Eng Anal Bound Elem*, 27:659–703, 2003.
- [19] M. Baulac, J. Defrance, and P. Jean. Optimization of multiple edge barriers with genetic algorithms coupled with a nelder-mead local search. *J Sound Vib*, 300(1-2):71–87, 2007.
- [20] M. Cerrolaza, W. Annicchiarico, and M. Martínez. Optimization of 2d boundary element models using b-splines and genetic algorithms. *Eng Anal Bound Elem*, 24:427–40, 2000.
- [21] D. Greiner, J.J. Aznárez, O. Maseo, and G. Winter. Shape design of noise barriers using evolutionary optimization and boundary element. *The Fifth International Conference on Engineering Computational Technology, Civil-Comp-Press, Las Palmas de Gran Canaria, Spain*, September 2006.
- [22] J.J. Aznárez, D. Greiner, O. Maseo, and G. Winter. A methodology for optimum design of y-shape noise barriers. *International Congress on Acoustics 2007, International Commission for Acoustics y Sociedad Española de Acústica, Madrid, 2-7 September 2007*.

- 
- [23] D. Greiner, J.J. Aznárez, O. Maseo, and G. Winter. Improving the design of m-shape noise barriers using the boundary element method and evolutionary algorithms. *The Ninth International Conference on the Application of Artificial Intelligence to Civil, Structural and Environmental Engineering, Civil-Comp-Press, St. Julians (Malta)*, September 2007.
- [24] O. Maseo, D. Greiner, J.J. Aznárez, , and G. Winter. Design of noise barriers with boundary elements and genetic algorithms. *Advances in Boundary Element Techniques IX, Sevilla, España. (Keynote Lecture)*, pages 101–106, July 2008.
- [25] D. Greiner, B. Galván, J.J. Aznárez, O. Maseo, and G. Winter. Robust design of noise attenuation barriers with evolutionary multiobjective algorithms and the boundary element method. *Lecture Notes in Computer Science Series (LNCS), Evolutionary Multi-Criterion Optimization, Eds: M. Ehrgott et al., Springer*, 5467:261–274, September 2009.
- [26] D. Greiner, J.J. Aznárez, O. Maseo, and G. Winter. Single- and multi-objective shape design of y-noise barriers using evolutionary computation and boundary elements. *Advances in Engineering Software, Elsevier*, 41(2):368–378, 2010.
- [27] O. Maeso, J.J. Aznárez, and J. Domínguez. Three-dimensional models of reservoir sediment and effects on seismic response of arch dams. *Earthquake Eng Struct Dynam*, 33:1103–23, 2004.
- [28] L.A. Padrón, J.J. Aznárez, and O. Maeso. Bem-fem coupling model for the dynamic analysis of piles and pile groups. *Eng Anal Bound Elem*, 31:473–84.
- [29] Orlando Maeso Fortuny y Juan José Aznárez González. *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, 1997.
- [30] Draft Document CENT/TC226/TG1 N/36. Test method for classifyingn the acoustic performance of rosa traffic noise reducing devices. 1992.