



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

Ingeniería en Informática

Proyecto de Fin de Carrera

**Algoritmos Genéticos aplicados al
Control Activo del Ruido**

Autor: Emilio Martin Gallardo

Director: Yago Sáez Achaerandio

Leganés, 2009

Co-Director: Gustavo Recio Isasi

*A mis padres, **Emilio** y **Dami**, por hacer*

*de mis **sueños** y **realidad** todo uno.*

Agradecimientos

Quiero que estas primeras líneas de agradecimientos, sean para mis **PADRES** (con mayúsculas), a ellos va dedicado este proyecto. Gracias por estar siempre ahí apoyándome de modo incondicional, por aguantar mis buenos y malos momentos, por creer en mí, por animarme cuando lo necesitaba y por un sinfín de motivos. Es tanto lo que os tengo que agradecer, que daría para escribir otro proyecto, en definitiva, **gracias por haberme dado la oportunidad de soñar y hacer que todos mis sueños se conviertan en realidad.**

A mi familia más directa, mi **hermana**, M^a Luz, quien siempre ha estado siguiendo el desarrollo de mi proyecto, apoyándome y animándome. A mi **sobrino**, “Mimi”, al que algún día espero poder ayudar y animar, a escribir líneas similares a las que yo escribo en este momento.

A mis amigos de siempre, con ellos he compartido **TODO**, siempre me han apoyado y animado a seguir adelante, haciéndose sentir de modo especial en los malos momentos, y por supuesto en los buenos. Por todos esos días, tardes y noches de risas y juerga, que hemos compartido y que compartiremos.

A mis amigos de Universidad, por todas esas horas de prácticas en las aulas, por tantos cafés tomados, por todas esas risas echadas, gracias a las cuales todo se ha hecho mucho más llevadero. Por todo lo que he aprendido de vosotros y por todo lo que hemos compartido.

A mi tutor, Yago Sáez. El ha sido el artífice de todo esto, suya fue la **idea** que ha dado lugar a este proyecto, la cual decidió compartir conmigo hace ya algún tiempo, cuando yo me empezaba a interesar por la Computación Evolutiva. Gracias por haberme confiado este proyecto, por todos los experimentos lanzados, por compartir ideas para mejorarlo, por tu dedicación, comprensión, apoyo y esfuerzo, para que el proyecto saliera adelante. A Gustavo Recio, quien también ha tenido su contribución en este proyecto, compartiendo ideas e interesándose por el desarrollo del mismo.

Por último me gustaría agradecer todo el apoyo que he recibido por parte de varias personas, ellas saben quiénes son, para las cuales solo tengo palabras de agradecimiento, ellas me han animado, apoyado y escuchado en estos últimos meses de Agosto y Septiembre de 2009, cuando más lo he necesitado.

GRACIAS.

Emilio Martín Gallardo

Índice general

CAPÍTULO 1. Introducción.....	19
1.1. Introducción.....	20
1.2. Marco Histórico.....	21
1.3. Objetivos.....	24
1.4. Estructura.....	24
CAPÍTULO 2. Introducción al Control Activo del Ruido.....	27
2.1. Introducción.....	28
2.2. Sistemas de CAR.....	28
2.3. Fundamentos acústicos.....	29
2.4. Tipos de ruido.....	36
2.5. Escenarios de aplicación.....	37
2.6. Tipos de sistemas de control.....	41
CAPÍTULO 3. Introducción a los Algoritmos Genéticos.....	49
3.1. Introducción.....	50
3.2. Funcionamiento AG.....	50
CAPÍTULO 4. Análisis y diseño del sistema propuesto.....	53
4.1. Introducción.....	54
4.2. Análisis.....	54
4.2.1. Requisitos de usuario.....	55
4.2.2. Alternativas existentes.....	60
4.2.2.1. Subsistema de simulación.....	61
4.2.2.2. Subsistema de experimentación entorno real.....	63
4.2.2.3. Subsistema de control.....	65
4.2.2.4. Alternativas agrupadas.....	65
4.3. Diseño.....	68

4.3.1.	Diseño subsistema de simulación.	68
4.3.1.1.	Sala ideal.	68
4.3.1.2.	Sala con reverberación.....	69
4.3.1.3.	Sala con reverberación y ruido.	73
4.3.2.	Diseño subsistema de experimentación entorno real.	73
4.3.3.	Diseño subsistema de control.	77
CAPÍTULO 5. Simulación de sistemas de control.....		81
5.1.	Introducción.	82
5.2.	Estrategias para el control activo del ruido.	82
5.2.1.	AG simple.	82
5.2.1.1.	AG simple en sala ideal.	83
5.2.1.2.	AG simple en sala con reverberación.....	85
5.2.1.3.	AG simple en sala con reverberación y ruido.	86
5.2.1.4.	Conclusiones.	88
5.2.2.	AG con señal invertida.	88
5.2.2.1.	AG con señal invertida en sala ideal.	89
5.2.2.2.	AG con señal invertida en sala con reverberación.....	90
5.2.2.3.	AG con señal invertida en sala con reverberación y ruido.	91
5.2.2.4.	Conclusiones.	92
5.2.3.	AG con filtros FIR.....	92
5.2.3.1.	Señales monotonaes.	95
5.2.3.2.	Señales multi tonales.	100
5.2.3.3.	Conclusiones.	104
5.2.4.	Función de evaluación.	105
5.3.	Conclusiones.	108
CAPÍTULO 6. Sistemas de control en entorno real.....		109
6.1.	Introducción.....	110



6.2.	Señales monotonales.....	110
6.2.1.	AG simple.....	110
6.2.2.	AG con señal invertida.....	113
6.2.3.	AG con filtros FIR.....	115
6.2.4.	Conclusiones.....	118
6.3.	Señales multitonales.....	119
6.3.1.	AG con filtros FIR (5).....	119
6.3.2.	AG con filtros FIR (10).....	121
6.3.3.	AG con filtros FIR (50).....	123
6.3.4.	AG FIR función de evaluación y mutación.....	124
6.3.5.	Conclusiones.....	127
6.4.	Señales ruido real.....	128
6.5.	Señales ruido real y externo al sistema.....	130
6.6.	Conclusiones.....	132
CAPÍTULO 7. Conclusiones.....		135
7.1.	Introducción.....	136
7.2.	Objetivos alcanzados.....	136
7.3.	Problemas encontrados.....	138
7.4.	Líneas futuras de investigación.....	138
CAPÍTULO 8. Anexos.....		141
8.1.	Anexo A.....	142
8.2.	Anexo B.....	147
8.3.	Anexo C.....	150
CAPÍTULO 9. Referencias.....		153



Índice de Ilustraciones

Ilustración 1: Esquema de Lueg en la patente americana.	21
Ilustración 2: Ejemplo de señales en contrafase.	28
Ilustración 3: Elementos de un sistema de control activo del ruido.	29
Ilustración 4: Reducción de la potencia acústica radiada por una fuente puntual en presencia de una matriz de fuentes secundarias.	30
Ilustración 5: Reducción de la amplitud ΔL (dB) de la amplitud de la presión originada por el campo primario como función de la diferencia en amplitud y fase entre la presión primaria y la secundaria.	34
Ilustración 6: Campo sonoro para dos fuentes puntuales, para distintas separaciones de las fuentes.	35
Ilustración 7: Máxima atenuación posible para un dipolo en contrafase.	35
Ilustración 8: Configuración de un sistema de control activo de ruido en un conducto.	38
Ilustración 9: Espectro del ruido antes y después de producirse la cancelación, con algoritmo de entrada filtrada LMS.	39
Ilustración 10: Auriculares (Sony MDR-NC500D) comerciales con control activo del ruido.	40
Ilustración 11: Esquema Auriculares con control activo del ruido.	41
Ilustración 12: Sistema de control de tipo lazo cerrado (feedback).	41
Ilustración 13: Sistema de control de tipo lazo abierto (feedforward).	42
Ilustración 14: Estructura filtro digital tipo FIR.	43
Ilustración 15: Estructura filtro digital tipo IIR.	44
Ilustración 16: Estructura filtro digital adaptativo.	45
Ilustración 17: Gradiente de la superficie del error cuadrático instantáneo.	46
Ilustración 18: Estructura filtro digital adaptativo.	47
Ilustración 19: Pseudocódigo algoritmo genético.	51
Ilustración 20: Esquema funcionamiento básico de un AG.	52
Ilustración 21: Descomposición respuesta al impulso.	69



Ilustración 22: Comparativa entre la señal original y la señal con rebotes.	71
Ilustración 23: Diagrama de bloques del reverberador de Schroeder.....	71
Ilustración 24: Comparativa entre la señal original y la señal con rebotes.	72
Ilustración 25: Esquema de los elementos del sistema CAR implementado.....	74
Ilustración 26: Imagen de la tarjeta de sonido Presonus FireBox.....	74
Ilustración 27: Diagrama polar y respuesta en frecuencia micrófono M179 cardioide (omnidireccional).	75
Ilustración 28: Micrófono CAD M179	75
Ilustración 29: Altavoces Altec Lansing CS21.....	76
Ilustración 30: Configuración utilizada en entorno real.	77
Ilustración 31: resultados sin/con CAR para AG simple en sala ideal.....	84
Ilustración 32: Resultados sin/con CAR para AG simple en sala con reverberación.	85
Ilustración 33: Comparativa resultados sin/con CAR para AG simple en sala con reverberación y ruido.....	86
Ilustración 34: Evolución de la población con AG simple y mutación Gaussiana.....	87
Ilustración 35: Evolución de la población con AG simple y mutación simple.....	88
Ilustración 36: Resultados sin/con CAR para AG con señal invertida en sala ideal.....	89
Ilustración 37: Resultados sin/con CAR para AG con señal invertida en sala con reverberación.	90
Ilustración 38: Resultados sin/con CAR para AG con señal invertida en sala con reverberación y ruido.	91
Ilustración 39: Estructura filtro adaptativo.....	92
Ilustración 40: Estructura filtro digital tipo FIR.....	93
Ilustración 41: Estructura del filtro propuesto.	93
Ilustración 42: Resultados sin/con CAR para AG FIR en sala ideal y señal monotonal.....	96
Ilustración 43: Comparativa AG FIR en sala ideal y señal monotonal.....	97
Ilustración 44: Comparativa AG FIR en sala con reverberación y señal monotonal.....	98
Ilustración 45: Resultados sin/con CAR para AG FIR en sala con reverberación y ruido, señal monotonal.....	99

Ilustración 46: Comparativa AG FIR en sala con reverberación y ruido, señal monotonal.	100
Ilustración 47: Comparativa AG FIR en sala ideal, señal multitonal.	102
Ilustración 48: Comparativa AG FIR en sala con reverberación, señal multitonal.....	103
Ilustración 49: Comparativa AG FIR en sala con reverberación y ruido, señal multitonal.	104
Ilustración 50: Resultados sin/con CAR para AG con señal invertida en sala con reverberación.	105
Ilustración 51: Filtro con ponderación A.....	106
Ilustración 52: Resultados sin/con CAR para AG con señal invertida en sala con reverberación y ruido.	107
Ilustración 53: Evolución AG con señal invertida en entorno real, señal monotonal y mutación Gaussiana.	111
Ilustración 54: Resultados sin/con CAR para AG simple en entorno real.	112
Ilustración 55: Evolución AG simple entorno real, señal monotonal y mutación Gaussiana.	114
Ilustración 56: Resultados sin/con CAR para AG con señal invertida en entorno real.	115
Ilustración 57: Evolución AG FIR 5 en entorno real, señal monotonal y mutación Gaussiana.	117
Ilustración 58: Resultados sin/con CAR para AG FIR (5) en entorno real, señal monotonal.	118
Ilustración 59: Evolución AG FIR 5 en entorno real, señal multitonal y mutación Gaussiana.	120
Ilustración 60: Resultados sin/con CAR para AG FIR (5) en entorno real, señal multitonal.	121
Ilustración 61: Evolución AG FIR 10 en entorno real, señal multitonal y mutación Gaussiana.	122
Ilustración 62: Resultados sin/con CAR para AG FIR (10) en entorno real, señal multitonal.	122
Ilustración 63: Comparativa AG FIR (50), señal multitonal, para 200, 400 y 1000 iteraciones.	124
Ilustración 64: Comparativa AG FIR (50), señal multitonal, 400 rondas, mutación Gaussiana y custom.	126
Ilustración 65: Comparativa AG FIR (50), 1000 iteraciones, para distintas funciones de mutación y evaluación.	127
Ilustración 66: Descomposición en frecuencia hasta 1000Hz de la señal ventilador.	128
Ilustración 67: Espectro de la señal ventilador sin CAR (azul) y con CAR (rojo).	129
Ilustración 68: Configuración utilizada en entorno real, con ruido externo al sistema.....	130
Ilustración 69: Descomposición en frecuencia hasta 1000Hz del ventilador real.	131

Ilustración 70: Espectro del señal ventilador sin CAR (azul) y con CAR (rojo).	132
Ilustración 71: Directividad en DirectSound.	143
Ilustración 72: Oyente en DirectSound.	144
Ilustración 73: Compatibilidad OpenAL en distintas plataformas.	145
Ilustración 74: Directorios de las simulaciones y su correspondencia con los apartados de este proyecto.	147
Ilustración 75: Contenido de archivo de resultados del simulador.	148
Ilustración 76: Contenido de archivo de resultados del simulador.	149
Ilustración 77: Directorios de los experimentos en real y su correspondencia con los apartados de este proyecto.	150
Ilustración 78: Contenido de archivo de resultados en entorno real.	151

Índice de Tablas

Tabla 1: Requisito de capacidad UG-C001	56
Tabla 2: Requisito de capacidad UG-C002	56
Tabla 3: Requisito de capacidad UG-C003	57
Tabla 4: Requisito de capacidad UG-C004	57
Tabla 5: Requisito de capacidad UG-C005	58
Tabla 6: Requisito de capacidad UG-C006	58
Tabla 7: Requisito de capacidad UG-C007	58
Tabla 8: Requisito de capacidad UG-C008	59
Tabla 9: Requisito de capacidad UG-C009	59
Tabla 10: Requisito de capacidad UG-C010	60
Tabla 11: Requisito de capacidad UG-C011	60
Tabla 12: Software para simulación acústica de recintos.....	61
Tabla 13: Especificaciones de la tarjeta de sonido Firebox Presonus.....	74
Tabla 14: Resultados AG simple en sala ideal.....	84
Tabla 15: Resultados AG simple en sala con reverberación.....	85
Tabla 16: Resultados AG simple en sala con reverberación y ruido de fondo.....	86
Tabla 17: Resultados AG con señal invertida en sala ideal.....	89
Tabla 18: Resultados AG con señal invertida en sala con reverberación y ruido de fondo.....	90
Tabla 19: Resultados AG simple en sala con reverberación y ruido de fondo.....	91
Tabla 20: Resultados AG FIR en sala ideal y señal monotonal.....	96
Tabla 21: Resultados AG FIR en sala con reverberación y señal monotonal.....	97
Tabla 22: Resultados AG FIR en sala con reverberación y ruido de fondo y señal monotonal.....	99
Tabla 23: Resultados AG FIR en sala ideal y señal multitonal.....	101
Tabla 24: Resultados AG FIR en sala con reverberación y señal multitonal.....	102

Tabla 25: Resultados AG FIR en sala con reverberación y ruido, señal multitonal.....	103
Tabla 26: Resultados AG con señal invertida en sala con reverberación y ruido, señal multitonal. .	107
Tabla 27: Resultados AG FIR (50) señal multitonal, para 200, 400 y 1000 iteraciones.	123
Tabla 28: Resumen para AG FIR (5, 10, 20, 50, 50, 50) coeficientes, para (200, 200, 200, 200, 400, 1000) iteraciones, con función de mutación custom y evaluación en dB con ponderación A.....	125
Tabla 29: Resumen para AG FIR (5, 10, 50) campo primario ruido ventilador.	129
Tabla 30: Resumen para AG FIR (25) campo primario generado por ventilador.....	131

CAPÍTULO 1. Introducción.

1.1. Introducción.

El ruido es una de las fuentes de contaminación ambiental. El control del mismo, y en su caso, la reducción de este, es hoy en día un problema de cierta envergadura tecnológica, por su complejidad temporal, frecuencial y espacial que presenta. El ruido es un problema social de bastante importancia, tanto es así que las distintas administraciones han elaborado normativas, sobre los niveles máximos de ruido que no pueden ser sobrepasados, en España destaca la Ley del Ruido (Ley 37/2003). La cancelación completa del ruido es un problema complejo, tanto desde el punto de vista tecnológico, como desde el económico; en lugar de cancelarlo completamente, normalmente es preferible reducirlo a niveles aceptables para la población que lo sufre. El control del ruido, supone por tanto, cierto compromiso entre unos niveles que no se pueden sobrepasar y el coste económico que implica no sobrepasar dichos niveles. Es curioso y paradójico observar como a medida que avanzamos social y tecnológicamente, se produce un incremento en la generación de ruido.

De acuerdo con la clasificación realizada en [12] las técnicas de control del ruido, pueden clasificarse en cuatro grandes grupos, a saber:

- Técnicas pasivas.
- Técnicas pasivas adaptativas.
- Técnicas activas.
- Técnicas híbridas pasivas-activas.

No es objeto de esta introducción, ni tampoco de este proyecto, explicar de modo amplio las distintas técnicas de control de ruido, por lo que no se hará. En general las técnicas pasivas, utilizan las propiedades absorbentes de algunos materiales, para controlar el ruido, sin añadir ningún tipo de energía adicional al sistema. Los métodos pasivos se encuentran en un estado muy maduro, siendo eficaces a frecuencias altas y medias, implicando un coste no muy elevado. Por el contrario las técnicas activas de control de ruido, introducen energía externa a la situación de ruido, dicha energía se emplea para generar un campo secundario, a través de una fuente secundaria, dicho campo secundario debe estar en oposición de fase con el campo primario (responsable del ruido). En situación de linealidad el campo primario y el campo secundario, interfieren de modo destructivo, provocando una reducción neta del nivel de ruido, este tipo de técnica es eficaz para frecuencias bajas.

Los sistemas Control Activo del Ruido (CAR) hacen uso de técnicas de filtrado adaptativo, dichas técnicas utilizan distintos algoritmos de búsqueda, para determinar los coeficientes de un filtro. En este proyecto se analizará, diseñara e implementará un sistema de CAR que realice dicha búsqueda por medio de AG.

A lo largo de este capítulo se expondrá el contexto histórico de los sistemas de CAR, así como de los AG, posteriormente se definirán los objetivos perseguidos en este proyecto, para finalmente explicar la estructura que se ha seguido en el desarrollo del mismo, realizando un breve resumen de cada capítulo.

1.2. Marco Histórico.

El control activo de ruido es un viejo concepto, cuyo interés se ha visto incrementado en los últimos 15-20 años. La atenuación de ruido acústico, mediante la superposición de ondas de presión en contrafase, se remonta a 1877 por Lord Rayleigh, tal y como se describe en [13]. El primero que pensó en las posibilidades de este principio (interferencia destructiva) para controlar el ruido fue Paul Lueg en 1933 [14], científico alemán quién patentó su idea tanto en Estados Unidos como en Alemania. En la ilustración 1, se muestra un esquema de la patente americana.

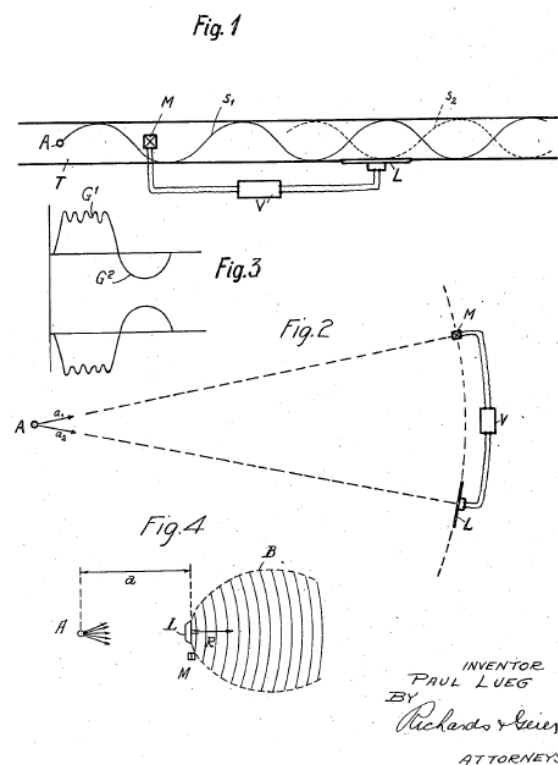


Ilustración 1: Esquema de Lueg en la patente americana.

En dicha patente, el autor dejaba claro el principio en el que se fundamenta esta técnica:

“Captando el ruido con uno o varios micrófonos y amplificando correctamente esta señal eléctrica, alimentando con esta uno o varios altavoces, se puede generar un campo secundario, en oposición de fase, que cancele un campo primario. En el caso de una tubería se puede conseguir colocando adecuadamente el micrófono y el altavoz...”

Las ideas de Lueg, no encontraron aplicación práctica hasta la década de los 50. En 1953, en los laboratorios RCA de la Universidad de Princeton, Olson y May [15] describen un “absorbente electrónico”, el cual era capaz de producir cancelaciones de entre 10 y 25 dB. Estos investigadores sugirieron aplicaciones como la reducción de ruido en coches, aviones o en los puestos de una cadena de montaje industrial.

En la misma década, Conover y Ringlee [16], aplicaron métodos de control activo del ruido, a un transformador de potencia. Puesto que el ruido del transformador era muy repetitivo, idearon una serie de filtros analógicos, que junto con un solo altavoz constituía el sistema para controlar el ruido generado por el transformador. Estos investigadores lograron atenuaciones de hasta 15 dB, aunque la cancelación en alguna dirección, producía el refuerzo en otras direcciones.

Los sistemas CAR estuvieron aletargados durante 20 años, hasta que a mediados de los 70 apareció uno de los artículos más importantes en la materia: Widrow [7]. En este trabajo se describen los principios y aplicaciones de la cancelación activa del ruido. Hasta esta fecha todos los filtros tenían pesos fijos, y solamente se podrían cancelar ruidos que fueran periódicos, por lo que si el ruido variaba en el tiempo y lo hacía de un modo no conocido, no se podía cancelar. Gracias al trabajo de Widrow, se pudieron desarrollar filtros cuyos coeficientes variasen con el tiempo, y de este modo se pudieran anular ruidos no periódicos. La principal aportación de este autor, fue elaborar un algoritmo de mínimos cuadrados (LMS) para determinar los coeficientes de un filtro adaptativo, a partir de un filtro Wiener de pesos fijos. En el trabajo descrito en [8] se expone este algoritmo LMS entre otros.

Otro factor que favoreció el desarrollo de sistemas CAR, fue el desarrollo de herramientas de procesamiento digital de la señal, realizado por Oppenheim en [17] y [18], todos estos factores unidos al continuo desarrollo tecnológico de los procesadores digitales de señal en los últimos años, permiten hoy en día la implementación de este tipo de técnicas de control activo del ruido, robustas y simples con un coste bajo.

Las razones por las cuales este tipo de técnica ha sufrido un letargo de más de 20 años, pueden ser muchas, aunque las principales son estas:

- Falta de conocimiento del fenómeno físico de cancelación acústica.
- Desarrollo de técnicas de procesado de señal.
- Carencias en el desarrollo tecnológico, que exigen estos sistemas de control y que solo se han llevado a cabo en los últimos 20 años.
- Necesidad de un conocimiento multidisciplinar, para llevar a cabo el diseño de estos sistemas de control activo del ruido, entre los que destacan:
 - Física/Acústica. (Física)
 - Procesado de señales. (Ing. Telecomunicaciones)
 - Algoritmos adaptativos y de control. (Ing. Informática/Matemáticas)

Los Algoritmos Genéticos (AG) se enmarcan dentro de los algoritmos de búsqueda dirigida, basados en probabilidad, pertenecen a un paradigma computacional, conocido como Computación Evolutiva (CE). Dicho paradigma está inspirado en una metáfora de la evolución biológica, que agrupa diferentes técnicas como son, los Algoritmos Genéticos (AG), las Estrategias Evolutivas (EE) y la Programación Genética (PG).

El nacimiento de las EE se remonta a 1963, en la Universidad Técnica de Berlín, dos estudiantes Rechenberg y Schwefel, estaban realizando experimentos en el túnel de viento, buscaban cuerpos que aerodinámicamente fueran óptimos, idearon distintos algoritmos de búsqueda, de los cuales ninguno obtuvo resultados. En tal situación, a uno de los estudiantes se le ocurrió probar con cambios aleatorios en los parámetros que definían la forma y estructura de los cuerpos, utilizando el concepto de mutación biológica, en este momento acababan de nacer las EEs. Ambos estudiantes plasmaron estas ideas en sus respectivas tesis doctorales, [19] [20]. Años después en 1975, John Holland, pionero en este campo, sentaba las bases de los AG en [21], siendo el primero en apuntar cómo la semántica de la evolución natural, podía ser usada en procesos de optimización y búsqueda. El desarrollo y popularización posterior de los AG se debe a Goldberg [22] y a De Jong [23] y [24], entre otros.

En 1992 John R. Koza publicaría [25], en el cual propone una nueva técnica, conocida como programación genética (PG), la cual permite dotar de una mayor semántica a los AG, ofreciendo la posibilidad de que los propios programas evolucionen en sí mismos, con el fin de resolver distintos problemas.

Hasta el momento se ha presentado el marco histórico de los sistemas CAR, y de los AG, sin embargo en este proyecto, como se indicó anteriormente, se combinarán ambos dominios. En [26] se presenta un sistema CAR basado en filtros IIR, con un AG simplificado, en [27] podemos encontrar un simulador CAR-AG desarrollado en MATLAB, el AG se encarga de encontrar las posiciones óptimas para lograr la mayor atenuación de ruido en un sistema de coordenadas 2D, para una fuente monotonal. En [28] se trata el control activo del ruido en conductos, a través de la aplicación de AGs y PGs (denominado según los autores control genético), la PG se utiliza para elaborar una estructura de control, mientras que el AG se utiliza para adaptar los parámetros del modelo en tiempo real. En [32] podemos encontrar un ejemplo de uso de AG modificado, como algoritmo de control en un sistema CAR instalado en el habitáculo de un vehículo, aunque los resultados obtenidos por dicho AG no son buenos.

1.3. Objetivos.

El objetivo de este proyecto es la implementación de un sistema CAR, utilizando para la elaboración del controlador de dicho sistema AGs. Para la consecución de este objetivo se definen los siguientes objetivos parciales:

- Elaboración de distintas estrategias, para utilizar los AG como controlador de un sistema de CAR.
- Validación de las distintas estrategias propuestas mediante simulaciones, con el fin de valorar cada alternativa y de obtener los parámetros óptimos de funcionamiento.
- Validación de las distintas estrategias propuestas mediante experimentaciones en un entorno real, con el fin de comprobar la bondad de las simulaciones y así obtener los parámetros óptimos de funcionamiento en un entorno real.

1.4. Estructura.

Teniendo en cuenta los objetivos anteriormente expuestos, el proyecto está dividido en nueve capítulos, desde el estado del arte de la cuestión, hasta los detalles de implementación del sistema propuesto, pasando antes por su diseño y evaluación tanto en entornos simulados como reales.

El capítulo 2 presenta una introducción sobre los sistemas CAR, exponiendo conceptos básicos, que permitan entender los distintos conceptos manejados en los sistemas CAR, como son los principios acústicos sobre los que se fundamentan este tipo de sistemas, tipos de ruidos que se pueden atenuar, distintos escenarios de aplicación práctica, así como los distintos sistemas de control y los algoritmos en los que se fundamentan.

El capítulo 3 realiza una introducción a los AG, comentando su funcionamiento y características más importantes.

El capítulo 4 realiza un análisis y diseño del sistema propuesto, exponiendo en primer lugar los requisitos que debe cumplir el sistema a construir, posteriormente se presentan las distintas alternativas para satisfacer dichos requisitos y finalmente una vez valoradas las distintas alternativas existentes, se especificará y justificará el diseño de la opción elegida.

El capítulo 5, presenta tres estrategias distintas para la construcción de un sistema CAR basado en algoritmos genéticos. Para evaluar las distintas estrategias, se realizan distintas simulaciones, haciendo uso de un simulador construido en MATLAB para tal efecto. A lo largo de este capítulo, se evalúan los distintos parámetros de configuración que controlaran el AG, centrándose en las funciones de mutación y evaluación.

Una vez evaluadas las distintas estrategias, en el capítulo 6 se validan en un entorno real, con el fin de comprobar si los datos aportados por las simulaciones son correctos, y si dichas estrategias son válidas en un entorno real no aislado acústicamente.

Finalmente, en el capítulo 7, se realiza una recapitulación de los objetivos del proyecto alcanzados, de los problemas encontrados durante la realización del mismo, así como de posibles líneas de trabajo futuras.

En los capítulos 8 y 9 se incluyen los anexos y las referencias, en los anexos cuales se explicará de modo detallado todo el material anejo al proyecto (estructura del mismo, resultados obtenidos, etc.).

CAPÍTULO 2. Introducción al Control Activo del Ruido.

2.1. Introducción.

En este capítulo se presentarán los conceptos básicos, que permitan entender los distintos conceptos manejados en los sistemas CAR, como son los principios acústicos sobre los que se fundamentan este tipo de sistemas, tipos de ruidos que se pueden atenuar, distintos escenarios de aplicación práctica, así como los distintos sistemas de control y los algoritmos en los que se fundamentan.

2.2. Sistemas de CAR.

Por Control Activo de Ruido (CAR) acústico, se entiende aquella técnica capaz de atenuar el ruido acústico, existente en un determinado medio, mediante la emisión de otro ruido acústico. Aunque parezca poco intuitivo, cancelar ruido o disminuirlo emitiendo más ruido, esto es posible cuando las ondas de presión acústica de ambos ruidos, están en oposición de fase (interferencia destructiva) tal y como se muestra en la siguiente ilustración.

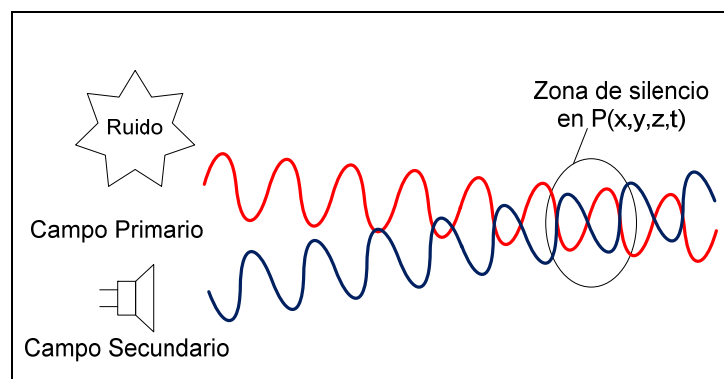


Ilustración 2: Ejemplo de señales en contrafase.

De un modo más formal podemos afirmar que, si en zona del espacio existe un campo acústico (campo primario), $P_p(x, y, z, t)$, y conseguimos generar un campo secundario, $P_s(x, y, z, t)$ tal que $P_s(x, y, z, t) + P_p(x, y, z, t) = 0$, es decir tal que $|P_p| = |P_s|$ y $\Phi_p = -\Phi_s$ donde Φ representa el espectro de fase, entonces ambos campos interferirán destructivamente cancelándose mutuamente, (demostrado en 2.3 principio de superposición). Cuando el campo acústico a cancelar es un ruido, y el campo secundario se genera de modo activo, se obtiene un sistema CAR, el cual consta de los siguientes elementos:

- Uno o varios sensores (micrófonos o acelerómetros) que detectan el campo primario.
- Uno o varios actuadores (altavoces) que generan el campo secundario.
- Un controlador que procesa las señales captadas por los sensores, y genera las señales pertinentes para que sean emitidas por los actuadores.

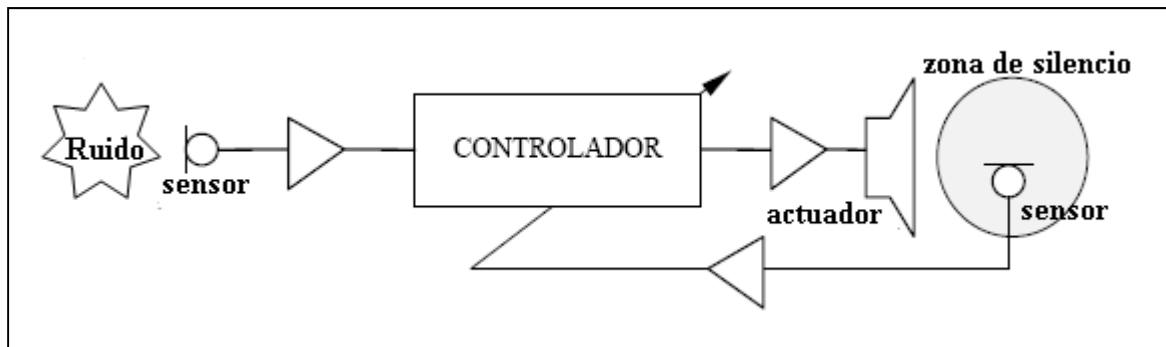


Ilustración 3: Elementos de un sistema de control activo del ruido.

Mediante esta técnica de control podemos obtener “zonas de silencio” más o menos numerosas y de mayor o menor tamaño, en los lugares del recinto en los que se desee. Tal y como se describe en [29] en la actualidad es posible crear zonas amplias de silencio, en lo que los autores denominan “sombras acústicas”, estas zonas de silencio se crean a través de sistemas CAR multicanal.

Desde el punto de vista del número de fuentes secundarias y del número de micrófonos, se usa la siguiente nomenclatura:

- Sistema de entrada y salida únicas (Single-Input Single-Output, SISO).
- Sistema de entrada única y salidas múltiples (Single-Input Multiple-Output, SIMO).
- Sistema de entradas múltiples y salida única (Multiple-Input Single-Output, MISO).
- Sistema de entradas múltiples y salidas múltiples (Multiple-Input Multiple-Output, MIMO).

2.3. Fundamentos acústicos.

Como se comentó anteriormente los sistemas CAR, están basados en el principio de superposición, por lo que solo se aplica a sistemas lineales. Los autores Nelson y Elliott han elaborado estudios sobre los fundamentos físicos que intervienen en el control activo del ruido, basándose en las interferencias destructivas del sonido y de campos vibratorios. El análisis de estos

sistemas se basa en el principio de superposición y de este modo se asume que ambos sistemas, el de ruido y control, son lineales. Dichos autores estudian la potencia acústica radiada por una matriz de puntos cuya configuración se muestra en la siguiente ilustración, [30]:

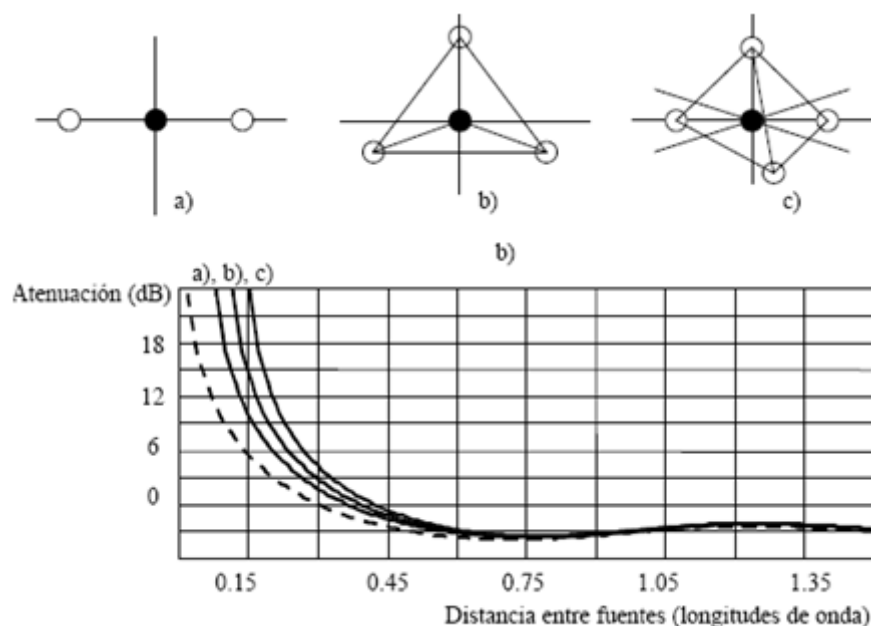


Ilustración 4: Reducción de la potencia acústica radiada por una fuente puntual en presencia de una matriz de fuentes secundarias.

En la ilustración anterior, en línea discontinua está representada la atenuación producida por una única fuente secundaria. La fuente primaria está representada por un punto sólido negro, mientras que los elementos en blanco, representan las fuentes secundarias, las cuales se encuentran equidistantes respecto a la primaria. Analizando la gráfica anterior se pueden observar varios aspectos importantes, por un lado la pendiente de la curva es directamente proporcional al número de fuentes secundarias, obteniéndose valores importantes de cancelación a partir de 3 fuentes situadas a una distancia inferior a la décima parte de la longitud de onda acústica. Por otra parte, cuando la fuente secundaria está cerca de la fuente primaria (en términos de longitud de onda), la atenuación es mayor. Por el contrario, cuando la fuente secundaria está lejos de la fuente primaria (en términos de longitud de onda) la reducción del ruido es pobre y el sonido radiado resultante será un campo de interferencias con máximas y mínimas locales. Así pues, para realizar un buen control acústico, se deben optimizar las distancias entre las fuentes secundarias y primarias (este aspecto se tratará más adelante).

Principio de superposición y linealidad.

En el movimiento de las ondas acústicas sobre un medio elástico, las variables acústicas de presión p , densidad ρ , y la velocidad de la partícula u , son perturbaciones pequeñas. Esto quiere decir que son pequeñas comparadas con sus valores ambiente p_0 y ρ_0 , y u es muy pequeño comparado con la velocidad del sonido c_0 . Por ejemplo la presión p , la cual se mide en Pascales (Pa), que podemos encontrar en situaciones reales, es del orden de 1 Pa, mientras que su valor ambiente es del orden de 10^5 Pa. Una consecuencia directa del hecho anteriormente descrito, es que las variables se pueden relacionarse unas con otras de forma lineal.

$$u = \rho c_0 / \rho_0$$

$$c_0^2 = \frac{\gamma p_0}{\rho_0} \quad [2.3.2]$$

Donde γ es el coeficiente de absorción adiabática, el cual tiene un valor de 1.4 a temperatura ambiente.

La ecuación de propagación de una onda de presión acústica, para fluctuaciones en un campo unidimensional, por ejemplo en la dirección x , viene dada por la siguiente ecuación diferencial, tal y como se expone en [30].

$$\frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2} - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad [2.3.3]$$

Donde $p(x,t)$, denota la presión instantánea en el punto x y en el instante t . Como se puede apreciar en la ecuación anterior, se ve claramente que es también lineal, ya que no aparece ningún término no-lineal, como podría ser $p^2(x,t)$. A partir de la ecuación anterior, supongamos los siguientes campos de presión $p_1(x,t)$ y $p_2(x,t)$, obteniendo.

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} [p_1(x,t) + p_2(x,t)] = \frac{\partial^2}{\partial x^2} p_1(x,t) + \frac{\partial^2}{\partial x^2} p_2(x,t) \quad [2.3.4]$$

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} [p_1(x,t) + p_2(x,t)] = \frac{\partial^2}{\partial t^2} p_1(x,t) + \frac{\partial^2}{\partial t^2} p_2(x,t) \quad [2.3.5]$$

Como consecuencia de la ecuación de propagación de onda, los campos de presión $p_1(x,t)$ y $p_2(x,t)$ son ambos lineales y contiene solo diferenciales lineales, así podemos mostrar que ambas satisfacen la ecuación de propagación de ondas, a su vez las podemos agrupar para producir otro campo de presión, el cual también satisface la ecuación de propagación de ondas. Así pues tenemos,

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) p_1(x,t) = 0, \quad \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) p_2(x,t) = 0 \quad [2.3.6]$$

agrupando ambos términos

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) (p_1(x,t) + p_2(x,t)) = 0 \quad [2.3.7]$$

Esto se conoce como principio de superposición, lo cual significa que si dos campos sonoros con variaciones de presión, varían en función de la coordenada x y en función del tiempo t , de tal modo que el campo resultante queda

$$p(x,t) = p_1(x,t) + p_2(x,t) \quad [2.3.8]$$

En términos prácticos, las ecuaciones anteriores ponen de manifiesto, que un campo de presiones nunca llegara a ser distorsionado por la presencia de otro; simplemente se suman en un momento determinado. Por otro lado hay que destacar que existen circunstancias, donde los términos no lineales, los cuales fueron desestimados en la ecuación básica utilizados para derivar la ecuación de propagación de ondas, pueden llegar a ser significativos en determinadas circunstancias, que conviene resaltar. Así por ejemplo cuando se trata con campos de presiones relativamente grandes en amplitud y con propagaciones a grandes distancias, los efectos no lineales producen distorsiones significativas. Sin embargo para las aplicaciones de interés práctico, se puede asumir que la propagación sonora se rige por términos lineales, así pues, el principio de superposición puede ser aplicado. En el capítulo 8 del trabajo realizado por Elliot [31] se pueden encontrar técnicas de control activo en sistemas no lineales.

En el control activo del ruido se dispone de un campo primario de presión, $p_p(x,t)$ de modo deliberado se introduce un campo secundario $p_s(x,t)$, el cual es igual y opuesto a $p_p(x,t)$, de tal modo que $p_p(x,t) = -p_s(x,t)$, por tanto $p(x,t) = 0$. Teniendo dos campos sonoros de frecuencia ω , especificados por su expresión compleja de presión $p_p(x)$ y $p_s(x)$, cuando ambos se suman obtenemos,

$$p(x) = p_p(x) + p_s(x) \quad [2.3.9]$$

La ecuación anterior expresada en términos de parte real e imaginaria queda como sigue,

$$p_R + jp_I = (p_{pR} + jp_{pI}) + (p_{sR} + jp_{sI}) \quad [2.3.10]$$

$$p_R = p_{pR} + p_{sR}, \quad p_I = p_{pI} + p_{sI} \quad [2.3.11]$$

El módulo y la fase del campo sonoro resultante viene dado por

$$|p(x)| = \sqrt{(p_{pR} + p_{sR})^2 + (p_{pI} + p_{sI})^2} \quad [2.3.12]$$

$$\phi(x) = \tan^{-1} \left(\frac{p_{pI} + p_{sI}}{p_{pR} + p_{sR}} \right) \quad [2.3.13]$$

Usando la relación de Euler, podemos escribir los campos primario y secundario en estos términos,

$$p_{pR} = |p_p(x)| \cos \phi_p(x), \quad p_{pI} = |p_p(x)| \operatorname{sen} \phi_p(x) \quad [2.3.14]$$

$$p_{sR} = |p_s(x)| \cos \phi_s(x), \quad p_{sI} = |p_s(x)| \operatorname{sen} \phi_s(x) \quad [2.3.15]$$

Según las ecuaciones anteriores, el objetivo para lograr una mayor atenuación, es hacer el módulo del campo de presiones resultante lo más pequeño posible. En concreto para hacer $|p(x)|$ igual a cero, necesitamos de las siguientes condiciones, $p_{pR} = -p_{sR}$, $p_{sI} = -p_{pI}$ **lo cual implica que las ecuaciones 2.3.14 y 2.3.15 deben tener el mismo módulo y una fase desfasada 180 grados. Estas son las condiciones de cancelación de la presión acústica en un punto del espacio.**

En la siguiente figura se muestra una relación entre la reducción del nivel de presión sonora apreciado, en función de la diferencia de amplitud y la fase entre la presión del campo secundario y el primario.

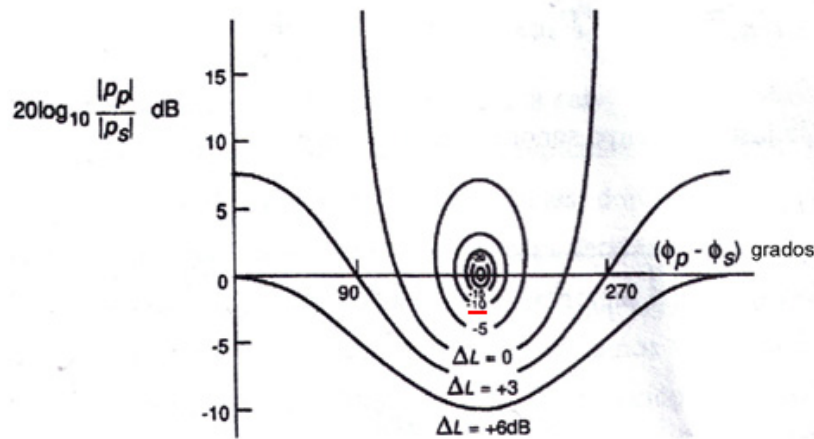


Ilustración 5: Reducción de la amplitud ΔL (dB) de la amplitud de la presión originada por el campo primario como función de la diferencia en amplitud y fase entre la presión primaria y la secundaria.

Como puede verse en la ilustración anterior, para producir una reducción de 10 dB del nivel de presión sonora apreciado, la amplitud del campo secundario debe estar entre ± 2.5 dB de la amplitud del campo primario y sus fases no pueden diferir más de 20° , la cual se encuentra subrayada en rojo.

Proximidad de las fuentes.

La distancia de separación entre las fuentes debe de ser pequeña para que la reducción de energía total sea posible. La cuestión pertinente en este caso es, ¿cuánto de cerca deben de estar las fuentes? En primer lugar y antes de cuantificar este parámetro, se deben establecer las unidades de medida para cuantificar este parámetro. Como se puede apreciar en la ilustración 6, podemos identificar dos fuentes de ruido, las cuales se encuentran separadas una distancia determinada. Los anillos concéntricos a las fuentes, simbolizan los frentes de onda los cuales salen de las fuentes sonoras y representan las crestas y los valles. La distancia relativa en longitudes de onda (λ) del sonido se define como la distancia entre dos crestas sucesivas de una onda. La longitud de onda λ , varía con la frecuencia (f), así pues para una frecuencia dada, la longitud de onda λ , es de modo aproximado:

$$\lambda [m] = \frac{343 [m/s]}{f [Hz]} \tag{2.3.16}$$

donde 343 m/s es la velocidad del sonido en el aire.

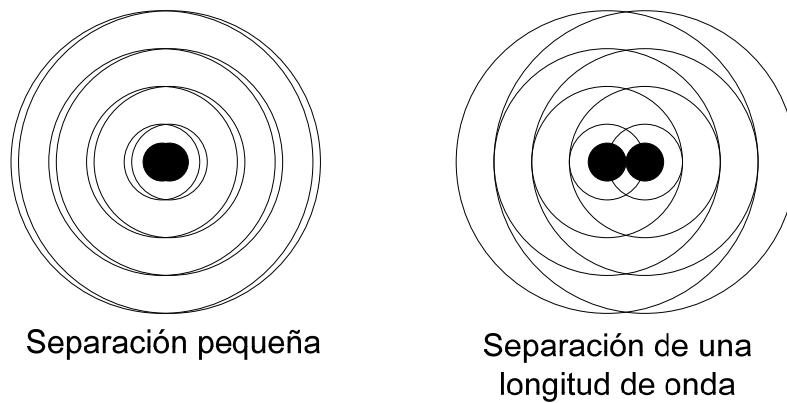


Ilustración 6: Campo sonoro para dos fuentes puntuales, para distintas separaciones de las fuentes.

Como se puede observar en la ilustración 7, el máximo nivel de reducción de potencia acústica utilizando una sola fuente secundaria, varía con la distancia entre la fuente primaria y la secundaria, así pues a mayor distancia entre las fuentes, la reducción de potencia acústica decrece.

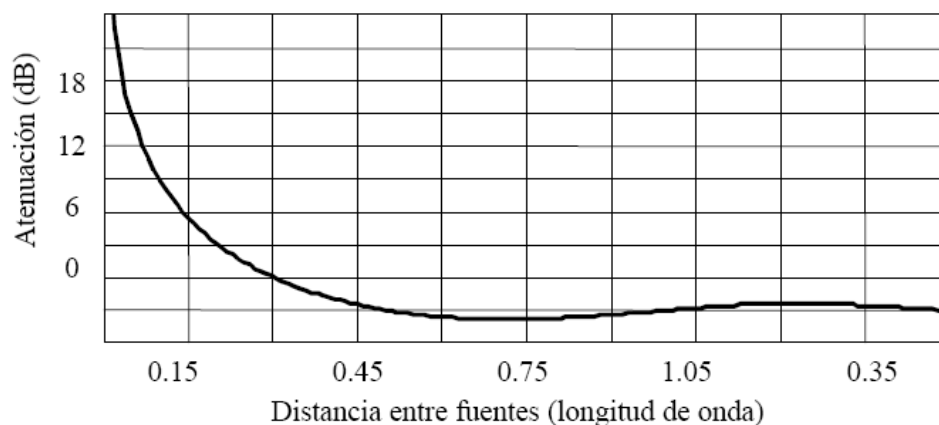


Ilustración 7: Máxima atenuación posible para un dipolo en contrafase.

Es importante destacar que la disminución de la potencia acústica radiada sólo es realmente significativa para una separación de las fuentes inferior a una décima parte de la longitud de onda radiada. Así por ejemplo, para una frecuencia de 100 Hz la longitud de onda es 3.4 m. (ver ecuación 2.3.16), teniendo en cuenta que la disminución es solo significativa en una décima parte de la longitud de onda, tendríamos una separación de unos 34 cm. De igual modo, para una frecuencia de 5 kHz esta separación es de sólo 0.68 cm. Esto indica que realmente el margen de frecuencias de trabajo va a ser muy bajo, generalmente hasta los 500 Hz. Este resultado muestra de un modo claro, el motivo por el cual las técnicas pasivas y activas de control de ruido son complementarias, las técnicas pasivas no son efectivas para frecuencias bajas, o si lo son es a costa de incrementar su

coste y tamaño, siendo este el escenario ideal de actuación para las técnicas de control activo del ruido.

2.4. Tipos de ruido.

Existen varios tipos de ruido acústico que son objeto de control activo. Las características del ruido dependen fundamentalmente de la fuente acústica que lo origina y, en menor medida, del camino acústico recorrido desde la propia fuente hasta el punto objeto de control. El margen de frecuencias de trabajo para un sistema de control activo de ruido, llega aproximadamente hasta los 500 Hz. Las dimensiones de cancelación acústica que se obtienen, disminuyen con la frecuencia. Estas zonas, para atenuaciones de presión acústica superiores a 20 dB, pueden considerarse como esferas virtuales de diámetro la décima parte de la longitud de la onda acústica. Para un ruido de frecuencia 500 Hz esta zona de atenuación sería solamente de unos 7 cm. El ruido acústico a partir de estas frecuencias es mejor atenuarlos con métodos pasivos, ya que se obtienen mejores resultados. A continuación, se enumeran los distintos tipos de ruido acústico atendiendo a su distribución espectral.

- **Ruido tonal o tono puro ideal.** Este ruido corresponde a una senoide pura y habitualmente sirve como señal de prueba en la experimentación de los sistemas de control activo de ruido. A veces, se utiliza conjuntamente con una señal enmascarante como el ruido blanco, ruido aleatorio de nivel espectral constante. También suele emplearse una senoide con una frecuencia variable cíclicamente en un determinado intervalo de interés, por ejemplo entre 100 y 200 Hz. Ruidos predominantemente sinusoidales son fáciles de atenuar con un sistema de control activo de ruido, alcanzándose atenuaciones mayores a 20 dB en determinadas frecuencias.
- **Ruido periódico.** Este tipo de ruido acústico es el que se encuentra habitualmente en situaciones reales. Las fuentes de ruido, son generalmente sistemas que tienen algún tipo de funcionamiento cíclico. Ejemplos típicos suelen ser: ruido producido por sistemas de movimiento de aire en el interior de conductos (sistemas de aire acondicionado, sistemas extractores, etc.), ruidos de motor en el interior de los vehículos de transporte, ruido de movimiento de hélices en aviones, ruido de transformadores de alta potencia, etc. Son ruidos constituidos por una frecuencia

fundamental, acompañada de los correspondientes armónicos, enmascarados con ruido aleatorio de banda ancha.

- **Ruido de banda ancha.** Este tipo de ruido presenta un nivel espectral constante con respecto a la frecuencia. Puede ser de carácter aleatorio, como el producido por el viento al chocar contra la estructura de un automóvil, el ruido de rodadura de un vehículo. Cuando el ruido presenta estas características se asemeja al ruido blanco gaussiano o uniforme, y puede analizarse según estos modelos. En ambos casos, son ruidos de difícil control y los sistemas de control activo de ruido ofrecen unas escasas prestaciones de atenuación, debido sin duda, a la imposibilidad de obtener una correcta predicción de los mismos y al no disponer de buenas referencias para atenuarlos.

2.5. Escenarios de aplicación.

Los sistemas CAR tienen distintos escenarios de aplicación, cada uno de ellos con sus particularidades propias, así pues conviene diferenciarlos de modo claro. De modo general los sistemas CAR pueden utilizarse en las telecomunicaciones, hidroacústica, vibraciones y en atenuación acústica de ruido aéreo, siendo este último el campo de acción del presente proyecto.

Atendiendo a un punto de vista geométrico, las aplicaciones de los sistemas CAR pueden clasificarse en las siguientes categorías:

- Ruido en conductos: Conductos tuberías de calefacción, ventilación, aire acondicionado o tubos de escape de automóviles.
- Ruido interior: Ruido en espacios cerrados.
- Ruido en espacio libre: Ruido radiado en un espacio abierto.
- Ruido en protectores auditivos: Similar al ruido interior pero a una escala mucho menor y con una geometría algo más compleja.

Ruido en conductos.

Una gran parte de los trabajos sobre CAR se han centrado en los conductos de calefacción, aire acondicionado, ventilación o conductos para la extracción de humos. La principal causa es su amplio potencial de aplicación en sistemas industriales y por la tanto su gran atractivo desde el punto de vista económico, por otro lado desarrollar de modo experimental estos sistemas resulta relativamente fácil. Tal y como propusiera Paul Lueg [14], en la ilustración 8 se muestra un dispositivo de control activo de ruido para un conducto.

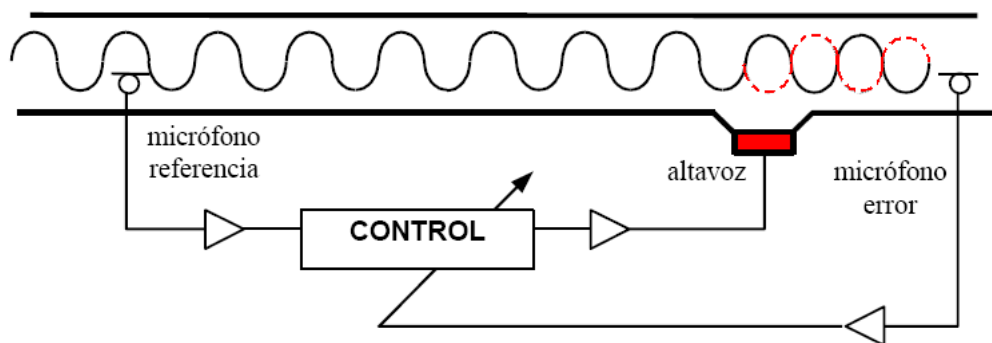


Ilustración 8: Configuración de un sistema de control activo de ruido en un conducto.

En la figura anterior podemos apreciar como el dispositivo de control del sistema CAR, a partir de la señal $x(n)$ recogida por un micrófono en el interior de un conducto (micrófono de referencia), genera una nueva señal $y(n)$ ajustada en amplitud y fase, tal que al emitir dicha señal por el dispositivo electro-acústico (altavoz), este produce una cancelación acústica en el interior del tubo. El sistema de control, modifica dinámicamente su funcionamiento, para conseguir en todo momento la cancelación acústica.

Un micrófono (micrófono de error), situado a continuación del altavoz, entrega una señal eléctrica $e(n)$ al controlador, para que este autoajuste el control y obtenga la mínima señal eléctrica del micrófono.

En el trabajo recogido en la referencia [28] se trata el control activo del ruido en conductos, a través de la aplicación de AGs y PG (denominado según los autores control genético), la PG se utiliza para elaborar una estructura de control, mientras que el AG se utiliza para adaptar los parámetros del modelo en tiempo real.

Ruido interior.

El ruido producido dentro de un espacio interior puede ser atenuado con distintas técnicas, así por ejemplo típicamente nos podemos encontrar con dos situaciones bien diferenciadas, la fuente que genera el ruido se encuentra dentro del espacio interior, o la fuente se encuentra fuera del espacio interior. Cuando la fuente de ruido está en el interior, la fuente de cancelación puede situarse cerca de la primera. Por el contrario, una fuente situada en el exterior, como puede ser la hélice de del motor de una avioneta, o el ruido producido en el interior de un vehículo por el motor del mismo, aunque consta de pocas frecuencias, en el interior de la cabina/habitáculo es realmente complicado de anular. Para el caso del vehículo, en [32] se pueden apreciar resultados utilizando el algoritmo de entrada filtrada LMS, por otra parte se propone el uso de, AG aunque sin resultados. A continuación se muestra una imagen de los resultados obtenidos.

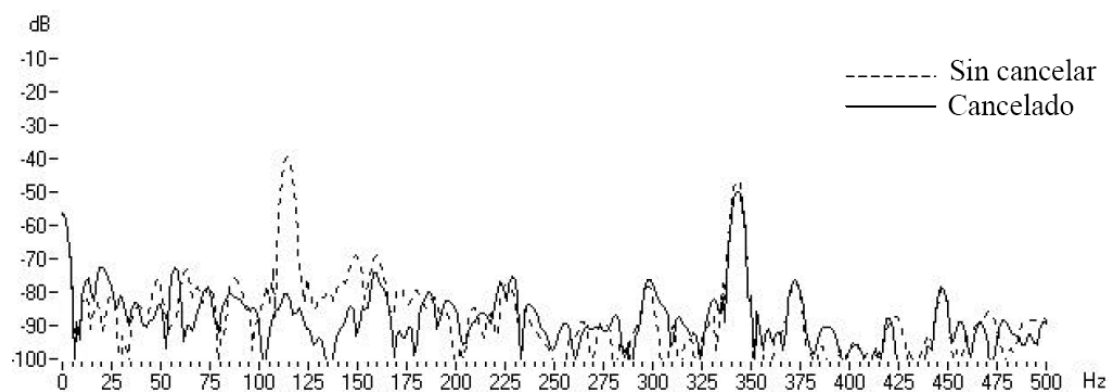


Ilustración 9: Espectro del ruido antes y después de producirse la cancelación, con algoritmo de entrada filtrada LMS.

Así pues el ruido depende de las superficies que delimitan el recinto en el cual nos encontremos, de los materiales de dichas superficies, y de los demás objetos presentes en dicho recinto. Las superficies que delimitan el recinto, producen ondas estacionarias a ciertas frecuencias, así pues los modos propios de un recinto rectangular de dimensiones L_x, L_y, L_z vienen determinados por la ecuación.

$$f_{n_x n_y n_z} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{n_x \pi}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y \pi}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z \pi}{L_z}\right)^2} \quad [2.3.17]$$

Donde las frecuencias propias de resonancia de la sala se obtienen sustituyendo los valores de n_x , n_x y n_x por valores enteros, y C es la velocidad del sonido en el aire. Dependiendo del número de modos propios de la sala, la atenuación será mayor o menor. Así pues, si solamente existe un modo propio, solamente será necesario utilizar una fuente secundaria pudiendo llegar a atenuaciones de hasta 20 dB. Por otro lado, si la sala cuenta con varios modos propios, serán necesarias varias fuentes secundarias, obteniendo resultados muchos más discretos, ya que al atenuar una frecuencia perteneciente a un modo propio, la estaremos incrementando en otra frecuencia perteneciente a otro.

Protecciones auditivas.

El caso de las protecciones auditivas es similar al del ruido interior en recintos, con la particularidad de que las dimensiones del recinto son muy pequeñas. De hecho, la situación acústica más simple se produce cuando el espacio del recinto es pequeño comparado con la longitud de onda de la frecuencia de interés. En este ejemplo de aplicación el espacio queda definido entre el tímpano y los auriculares. Este es un ejemplo de sistema de control de ruido híbrido, por un lado los aislantes del auricular cancelan ruido a frecuencias altas (>1000 Hz), mientras que por otro el sistema CAR las cancela para las frecuencias bajas. Actualmente existen protectores auditivos, tanto para uso militar como para uso civil, en este último ámbito podemos encontrar auriculares con precios que van desde los 100€-400€, dependiendo del modelo [33,34], los cuales logran reducciones de hasta 25dB a 300 Hz.



Ilustración 10: Auriculares (Sony MDR-NC500D) comerciales con control activo del ruido.

Este tipo de sistemas suelen usar un esquema similar al que se muestra en la siguiente ilustración.

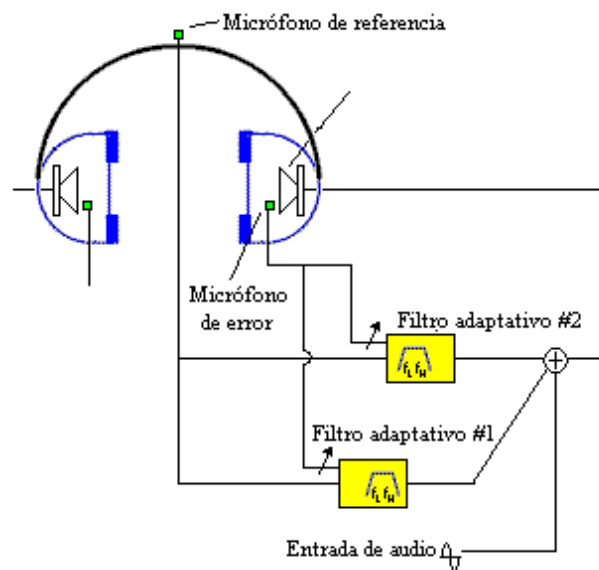


Ilustración 11: Esquema Auriculares con control activo del ruido.

2.6. Tipos de sistemas de control.

Atendiendo al tipo de configuración de control, se pueden diferenciar con dos tipos claramente diferenciados, sistemas de control con lazo abierto (feedforward) o sistemas de control con lazo cerrado (feedback).

En un sistema CAR con un tipo de control de lazo cerrado (feedback), la señal de error que recoge el micrófono $e(k)$ es la suma del campo primario y del campo secundario (generado por el altavoz). El controlador debe lograr que la señal de error sea mínima. A continuación se muestra un esquema de este tipo de sistema de control.

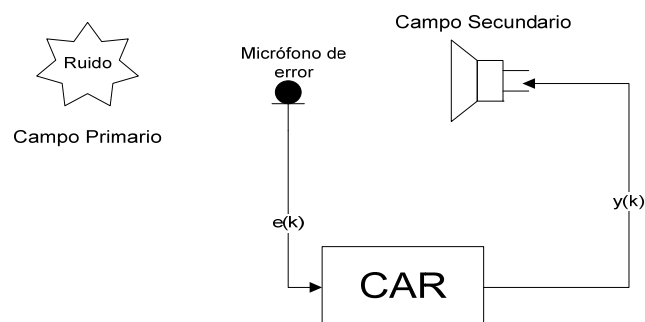


Ilustración 12: Sistema de control de tipo lazo cerrado (feedback).

Por otro lado, en un sistema CAR con control de tipo lazo abierto (feedforward), contamos además con una señal de referencia $r(k)$, la cual es captada por el micrófono de error, y transmitida al sistema de CAR para su posterior tratamiento. Un ejemplo de este tipo de sistema de control se puede observar en la siguiente ilustración.

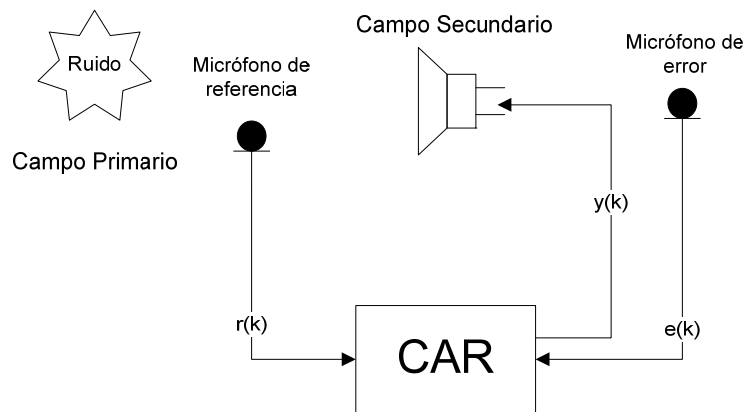


Ilustración 13: Sistema de control de tipo lazo abierto (feedforward).

Como se desprende de las ilustraciones anteriores, la principal diferencia entre un sistema y otro es que en el segundo, contamos con una señal de referencia del ruido generado por el campo primario, la cual llega al controlador del sistema CAR.

Una vez que se han presentado los tipos de sistemas de control existentes, se expondrá de modo muy breve, las distintas técnicas adaptativas más utilizadas en estos sistemas CAR.

Algoritmos adaptativos de control.

El controlador del sistema CAR ha de ser capaz de adaptarse a las condiciones cambiantes del entorno acústico en el que se encuentre, como son variaciones de frecuencia, amplitud, y fase. Se podría pensar en un principio en un diseño analógico del controlador, sin embargo, la complejidad de este tipo de controladores, no hacen recomendable el uso de sistemas analógicos. Este tipo de controladores se implementan en sistemas digitales, los cuales, tras recibir las señales analógicas (micrófono de error o de referencia) y discretizarlas, las procesa mediante filtros digitales, de tal modo que la señal de error se reduzca.

Podemos encontrar dos tipos de filtros digitales, FIR (Finite Impulse Response) e IIR (Infinte Impulse Response).

- **Filtros FIR (Finite Impulse Response)**

Los datos de entrada pasan por un sistema discreto FIR que aplica a los datos $x(n)$ una determinada función de transferencia, obteniendo unos nuevos datos.

$$y(n) = \sum_{K=0}^M w(n)x(n-k) \quad [2.3.18]$$

donde M representa el número de coeficientes del filtro FIR, y $w(n)$ representa cada uno de los coeficientes del mismo. A continuación se puede observar un ejemplo de filtro digital FIR:

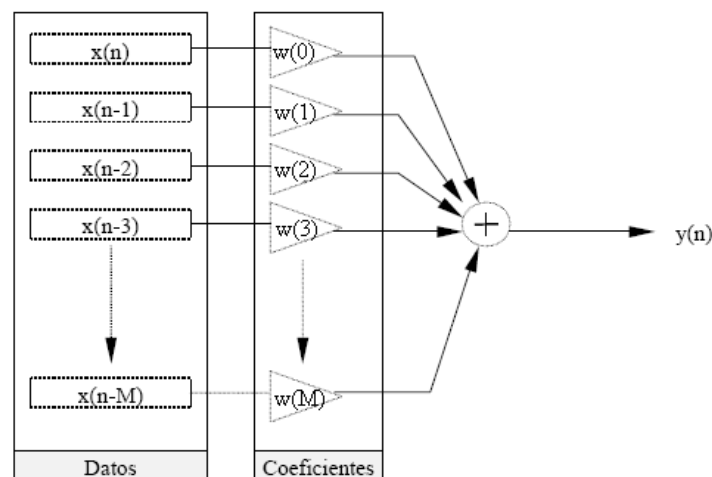


Ilustración 14: Estructura filtro digital tipo FIR.

Cualquier función de transferencia analógica puede modelarse mediante un filtro FIR. Los parámetros que determinan la similitud de la misma dependen de los valores $w(n)$ y de su número (posiciones de memoria) M tal y como se expone en [18], por consiguiente, cuantos más coeficientes mejor aproximación. El número de coeficientes $M+1$, determina el máximo retardo que puede aplicar el filtro FIR a los datos de entrada $x(n)$.

Por lo tanto, el parámetro M será un factor a tener en cuenta en el diseño del controlador. Por ejemplo, si estamos muestreando a 5.000 Hz y se estima necesario que el controlador sea capaz de realizar cambios de fase equivalentes a 10 msg, el número mínimo de coeficientes del filtro será: $M = 10^2 \cdot fs = 0,01 \cdot 5.000 = 50$ coeficientes. Para variar la amplitud de la señal y hacerla

coincidir exactamente con la amplitud de la señal del ruido, el filtro simplemente realiza un escalado de los valores de los coeficientes $w(n)$, atenuándolos o realzándolos.

- **Filtros IIR (Infinite Impulse Response)**

En el caso de los filtros IIR, los datos de entrada $x(n)$ se pasan por un sistema discreto con la siguiente estructura.

Los filtros IIR requieren un menor número de coeficientes para modelar la misma función de transferencia que los filtros FIR. De este modo los datos de salida, a diferencia de los filtros FIR, realimentan el algoritmo de cálculo por medio de los coeficientes de realimentación $v(n)$.

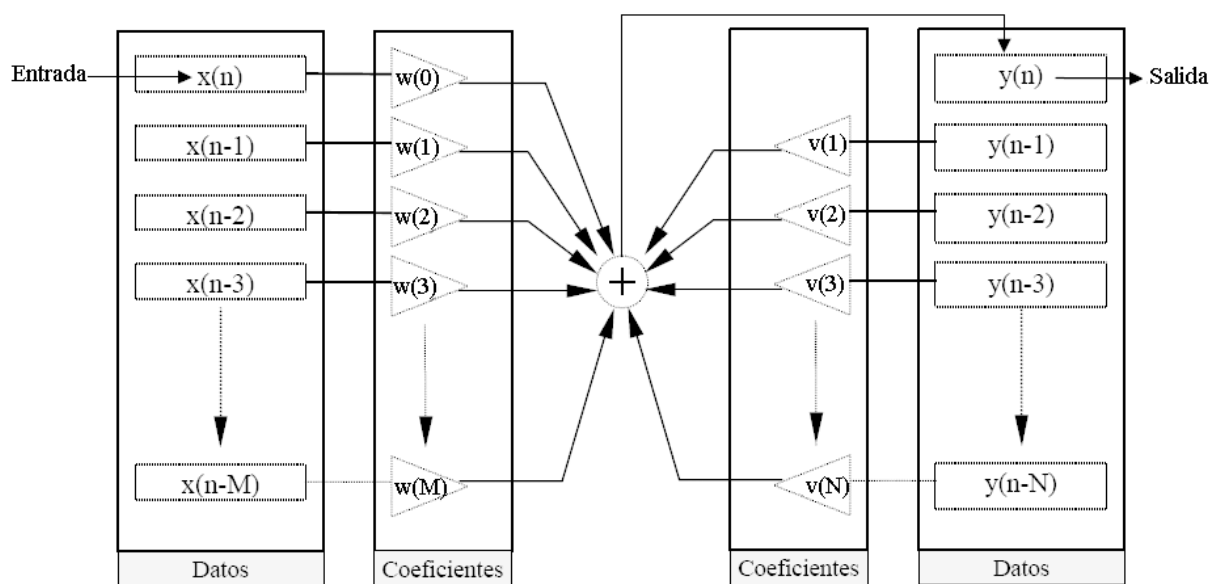


Ilustración 15: Estructura filtro digital tipo IIR.

El principal inconveniente de este tipo de filtro, es la potencial inestabilidad del mismo, es decir una entrada acotada (finita) puede producir una salida no acotada (infinita), de ahí que su uso no esté muy extendido en los sistemas CAR.

Una vez que se han presentado los distintos tipos de filtros digitales (FIR, IIR), se pueden explicar, de un modo breve, los distintos algoritmos adaptativos más utilizados en los sistemas CAR. De modo independiente al tipo de filtro usado, todos los algoritmos adaptativos, a partir de las señales de entrada del sensor de referencia, $x(n)$ y del sensor de error, $e(n)$, realiza los cálculos precisos para ir actualizando los coeficientes del filtro muestra a muestra, aproximándose a la señal deseada $d(n)$

y minimizando el nivel de la señal de error $e(n) = d(n) - y(n)$, tal y como se puede apreciar en la siguiente ilustración.

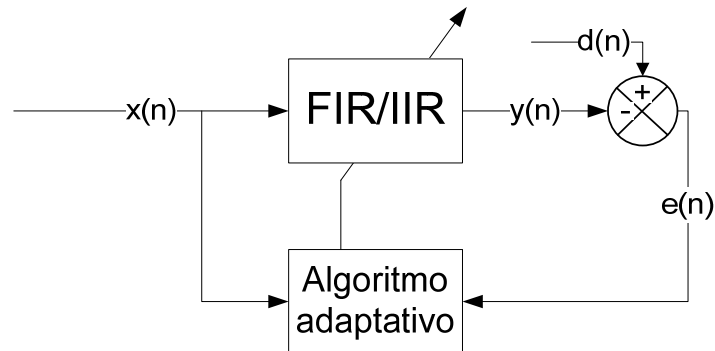


Ilustración 16: Estructura filtro digital adaptativo.

La mayoría de los algoritmos adaptativos, buscan los coeficientes óptimos mediante algoritmos de máxima pendiente (steepest descent), según la dirección opuesta al gradiente de la superficie de error, véase [35] para obtener una descripción detallada de cada uno de los algoritmos aquí mostrados.

Uno de los algoritmos adaptativos más conocidos y utilizados por su simplicidad y prestaciones, es el filtro adaptativo FIR LMS [7,8], en dicho algoritmo la señal de error queda determinada por la siguientes ecuaciones.

$$e(n) = d(n) - \sum_{k=0}^M w(k)x(n-k) \quad [2.3.20]$$

El error cuadrático instantáneo queda definido por

$$e^2(n) = \left[d(n) - \sum_{k=0}^M w(k)x(n-k) \right]^2 \quad [2.3.21]$$

El gradiente de la superficie del error cuadrático instantáneo, así como la búsqueda, de cada uno de los coeficientes del filtro FIR, $w(k)$ es actualizado según se muestra en ilustración 17, y en la ecuación 2.3.22.

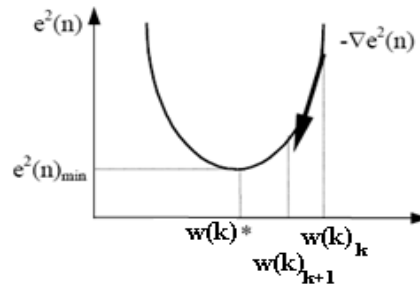


Ilustración 17: Gradiente de la superficie del error cuadrático instantáneo.

$$w(k)_{n+1} = w(k)_n - \mu \nabla_{w(k)} e^2(n) \quad [2.3.22]$$

$$\nabla_{w(k)} e^2(n) = 2e(n) \nabla_{w(k)} e(n) = 2e(n) \frac{\partial e(n)}{\partial w(k)} \quad [2.3.23]$$

$$\frac{\partial e(n)}{\partial w(k)} = \frac{\partial}{\partial w(k)} \left(d(n) - \sum_{k=0}^M w(k)x(n-k) \right) = -x(n-k) \quad [2.3.24]$$

Sustituyendo 2.3.24 en 2.3.22 obtenemos

$$w(k)_{n+1} = w(k)_n + 2e(n)x(n-k) \quad [2.3.25]$$

Es decir, tal y como se muestra en 2.3.22, los coeficientes en la iteración siguiente se calculan a partir de los valores de la iteración actual, menos el gradiente del error cuadrático instantáneo, $e^2(n)$, multiplicado por una constante μ , la cual es el paso de adaptación, responsable de la evolución y convergencia del propio algoritmo adaptativo; así por ejemplo, un paso de adaptación muy grande provocará una convergencia prematura, y una oscilación de una determinada magnitud alrededor del error cuadrático mínimo. Por el contrario, si se elige un paso de adaptación pequeño, la convergencia del algoritmo será lenta, aunque la oscilación alrededor del error cuadrático mínimo será de menor magnitud.

Este mismo algoritmo LMS, se puede implementar en filtro IIR, aunque al hacerlo nos encontramos con dos problemas que se deben de tener en cuenta:

- Inestabilidad, tal y como se indicaba anteriormente, los filtros IIR son potencialmente inestables.
- La superficie de la señal de error presenta numerosos mínimos, lo cual puede provocar que el algoritmo, se quede estancado en un óptimo local.
- Soluciones a ambos problemas se pueden encontrar en las referencias [36] y [37].

Otros tipos de algoritmos adaptativos son los conocidos como algoritmos adaptativos de entrada filtrada, en los cuales los algoritmos IIR y FIR LMS son modificados para circunstancias concretas, en algunos sistemas CAR. Así por ejemplo en estas configuraciones, las señales $d(n)$ e $y(n)$, no son restadas directamente, sino que atraviesan una función de transferencia $H(z)$, la cual incluye: la etapa de conversión digital-analógica, el amplificador de potencia, la función de transferencia electro-acústica del altavoz, el camino acústico entre el altavoz y el micrófono, el amplificador de micrófono, y por último la etapa de conversión analógica-digital, tal y como se puede apreciar en la siguiente ilustración.

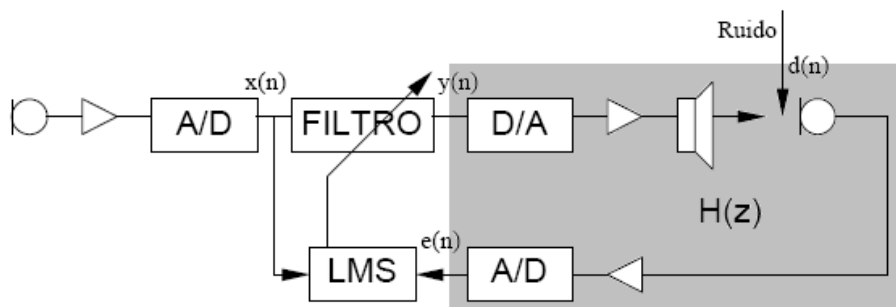


Ilustración 18: Estructura filtro digital adaptativo.

Los dos algoritmos más comunes, que responden al esquema anterior, son el algoritmo filtered-X LMS y el algoritmo filtered-U LMS, de los cuales se pueden consultar sus detalles en [3] y [39] respectivamente. El principal inconveniente de este tipo de algoritmo reside en hacer una correcta estimación de la función de transferencia $H(z)$.

A lo largo de este capítulo se han presentado los conceptos básicos de los sistemas CAR, explicando cuáles son los principios acústicos sobre los que se fundamentan este tipo de sistemas, los tipos de ruidos que se pueden atenuar, distintos escenarios de aplicación práctica, así como los distintos sistemas de control y los algoritmos en los que se fundamentan.

CAPÍTULO 3. Introducción a los Algoritmos Genéticos.

3.1. Introducción.

En este capítulo se realizará una breve introducción al funcionamiento de los Algoritmos Genéticos (AG). Los AG se enmarcan dentro de los algoritmos de búsqueda dirigida, basados en probabilidad, pertenecen a un paradigma computacional conocido como Computación Evolutiva (CE). Dicho paradigma está inspirado, en una metáfora de la evolución biológica que agrupa diferentes técnicas como, los AG, las Estrategias Evolutivas (EE) y la Programación Genética (PG).

John Holland, en [21], sentó las bases de esta nueva técnica de inteligencia artificial, consistente en la búsqueda heurística de una solución para un problema dado, inspirándose en la selección natural darwiniana [42].

3.2. Funcionamiento AG.

Un AG, se basa en la evolución de una población de individuos, donde cada uno de ellos representa, de modo abstracto, una solución a un problema de búsqueda/optimización que deseamos tratar.

Puesto que cada individuo representa, una solución al problema, dicha representación abstracta se puede codificar o representar de múltiples maneras. La codificación de cada individuo se conoce como genotipo, mientras que al efecto que éste produce al aplicarse como posible solución al problema, se le denomina fenotipo. Desde sus inicios los AG se han representado mediante cadenas de bits, sin embargo, hoy en día es frecuente encontrar otro tipo de representaciones: codificación Gray [40], números enteros y reales [41] o incluso objetos de lenguajes de programación POO.

Esta población de individuos va evolucionando a lo largo de las generaciones (iteraciones del algoritmo), de tal modo que los individuos de la población se adaptan al problema para ofrecer mejores soluciones. Para que dicha adaptación se lleve a cabo, se necesita poder evaluar la bondad o eficacia de cada individuo, en lo que a la resolución del problema se refiere (función de evaluación) y de unos mecanismos para reproducir la evolución en estos: selección de los mejores individuos, cruzamiento y mutación.

La primera generación de individuos (población inicial) del algoritmo es tradicionalmente generada de manera aleatoria, todos y cada uno de los individuos de la misma son evaluados para conocer la

bondad de la solución que codifican (valor de fitness). Este valor, es utilizado para distinguir a los mejores individuos del resto, los cuales serán seleccionados de una u otra forma, para generar los que formarán la siguiente población.

A los individuos seleccionados se les aplica el operador de cruzamiento, para recrear la recombinación genética que se produce en la descendencia, de manera que el genoma del nuevo individuo es el resultante de la combinación de los genomas de los dos primeros. De esta forma, la nueva solución del problema hereda una mezcla de las características de las dos anteriores.

No obstante, para que la evolución tenga lugar, una vez creado el nuevo individuo se le debe aplicar el operador de mutación. Este mecanismo consiste en la alteración aleatoria de uno o más genes del individuo, de manera que la solución al problema se vea afectada, bien sea favorable o bien desfavorablemente. Una vez que se ha generado una población entera a partir de la primera, ésta última se desecha y la nueva pasa a ser evaluada, comenzando así de nuevo el ciclo que se repetirá durante un número determinado de iteraciones.

El genoma de estos individuos ha sido, (en lo que se conoce como algoritmo genético canónico), representada mediante valores binarios, aunque en otras implementaciones es posible utilizar codificaciones diferentes. Otra modificación al algoritmo genético canónico consiste en la utilización del elitismo, que consiste en promocionar automáticamente de una generación a la siguiente el mejor de los individuos de la población. De esta forma, se evita perder la mejor solución encontrada hasta el momento, y a lo largo de sucesivas generaciones. En la siguiente figura se muestra un esquema del funcionamiento.

```
INICIO
INICIALIZAR población con soluciones candidatas aleatorias;
EVALUAR cada candidato;
REPETIR HASTA (CONDICIÓN DE FINAL = verdadera) DO
{
1. SELECCIONAR padres;
2. CRUZAR pares de padres;
3. MUTAR la descendencia obtenida;
4. EVALUAR nuevos candidatos;
5. REEMPLAZAR individuos, para obtener la siguiente generación;
}
FIN
```

Ilustración 19: Pseudocódigo algoritmo genético.

En la siguiente ilustración se puede apreciar un esquema de funcionamiento de un AG.

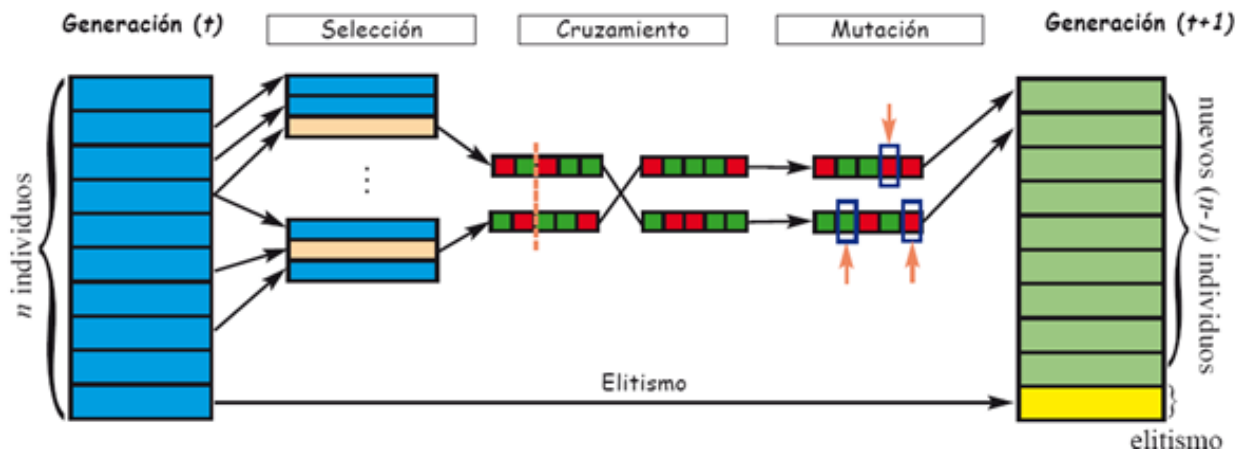


Ilustración 20: Esquema funcionamiento básico de un AG.

Durante el presente capítulo se han presentado los conceptos básicos relacionados con los AGs, realizando una breve introducción a su historia y explicando su funcionamiento.

CAPÍTULO 4. Análisis y diseño del sistema propuesto.

4.1. Introducción.

A lo largo de este capítulo se analizará de un modo exhaustivo el problema tratado en este proyecto: el control activo del ruido utilizando algoritmos genéticos. En primer lugar, se expondrán los requisitos que debe cumplir el sistema a construir, posteriormente se presentarán distintas alternativas para satisfacer dichos requisitos y finalmente, una vez valoradas las distintas alternativas existentes, se especificará y justificará el diseño de la opción elegida.

4.2. Análisis.

Tal y como se especificó en la introducción de este proyecto los objetivos a abordar son los siguientes.

1. Elaboración de distintas estrategias para utilizar los AG como controlador de un sistema de CAR.
2. Validación de las distintas estrategias propuestas, mediante simulaciones, con el fin de obtener los parámetros óptimos de funcionamiento.
3. Validación de las distintas estrategias propuestas, mediante experimentaciones en un entorno real, con el fin de obtener los parámetros óptimos de funcionamiento.

Por otro lado, y antes de centrar el proyecto en el análisis del sistema a construir, cabe destacar, que el uso de AG aplicados a un sistema CAR en un entorno real, plantea algunos inconvenientes que se deben considerar a la hora de construir el sistema propuesto:

1. No se puede garantizar que no exista ruido externo al realizar los experimentos en un entorno real, dicho ruido externo será captado por el micrófono.
2. De lo anterior, se desprende que un **mismo individuo generado por el AG**, puede presentar **distintas evaluaciones**, para instantes de tiempo distintos, aun cuando la **solución** que representa el individuo **sea la misma** en ambos instantes de tiempo.
3. De lo anterior, se puede concluir que las técnicas propuestas deben ser robustas frente a este tipo de situaciones de ruido externo, tanto en las simulaciones como en los experimentos en entornos reales.

4.2.1. Requisitos de usuario.

A partir de los objetivos generales comentados anteriormente, se pueden obtener los demás requisitos involucrados en el proyecto, los cuales se expondrán en forma de requisitos de usuario. Para ello, cada requisito de usuario se ha definido con una serie de atributos:

- **Identificación:** cada requisito de usuario incluirá una identificación, para facilitar la trazabilidad, que es valor único identificativo del requisito que lo diferencia del resto.
- **Necesidad:** define la importancia de que el requisito sea implementado por el sistema. Esta propiedad puede orientar el éxito o fracaso del proyecto. Los valores posibles son: Esencial, Deseable u Opcional.
- **Prioridad:** cada requisito de usuario incluirá una medida de la prioridad que posee, para que el desarrollador pueda decidir la planificación del desarrollo. Sus valores pueden ser: Alta, Media o Baja.
- **Estabilidad:** algunos requisitos de usuario pueden permanecer estables durante toda la vida esperada del software; otros pueden ser más dependientes de la retroalimentación que se obtenga en los requisitos software, o el diseño. Tales requisitos inestables se deben señalar, para prestarles la atención que requieren a lo largo del desarrollo del proyecto. Es decir, especifica el grado de la posibilidad de que ese requisito varíe en el transcurso del proyecto.
- **Claridad:** un requisito de usuario es claro si tiene una, y sólo una, interpretación. La claridad implica la falta de ambigüedad. Si un término es utilizado en cierto contexto y tiene múltiples significados, se debe aclarar su interpretación o debe ser reemplazado por un término más específico. Sus valores son: Alta, Media o Baja.
- **Verificabilidad:** cada requisito de usuario será verificable. Esto significa que debe ser posible comprobar fehacientemente que el requisito se ha incorporado en el diseño, es decir, que se puede probar que el software aplica el requisito. Sus valores pueden ser: Alta, Media o Baja.
- **Descripción:** explicación detallada del objetivo principal del requisito.
- **Justificación:** explicación de la razón principal, por la cual se incluye dicho el requisito en el sistema.

IDENTIFICADOR: UG-C001	
PRIORIDAD: <input checked="" type="checkbox"/> ALTA <input type="checkbox"/> MEDIA <input type="checkbox"/> BAJA	NECESIDAD: <input checked="" type="checkbox"/> ESENCIAL <input type="checkbox"/> DESEABLE <input type="checkbox"/> OPCIONAL
CLARIDAD: <input checked="" type="checkbox"/> ALTA <input type="checkbox"/> MEDIA <input type="checkbox"/> BAJA	VERIFICABILIDAD: <input checked="" type="checkbox"/> ALTA <input type="checkbox"/> MEDIA <input type="checkbox"/> BAJA
ESTABILIDAD:	Durante toda la vida del sistema.
DESCRIPCIÓN:	Ofrecer la posibilidad de realizar experimentos tanto en un entorno simulado , como en un entorno real .
JUSTIFICACIÓN:	Para construir un sistema CAR basado en AG, se debe poder realizar evaluaciones de las distintas estrategias propuestas. Dichas evaluaciones se deben poder realizar tanto en un entorno simulado , como en un entorno real .

Tabla 1: Requisito de capacidad UG-C001

IDENTIFICADOR: UG-C002	
PRIORIDAD: <input checked="" type="checkbox"/> ALTA <input type="checkbox"/> MEDIA <input type="checkbox"/> BAJA	NECESIDAD: <input checked="" type="checkbox"/> ESENCIAL <input type="checkbox"/> DESEABLE <input type="checkbox"/> OPCIONAL
CLARIDAD: <input checked="" type="checkbox"/> ALTA <input type="checkbox"/> MEDIA <input type="checkbox"/> BAJA	VERIFICABILIDAD: <input checked="" type="checkbox"/> ALTA <input type="checkbox"/> MEDIA <input type="checkbox"/> BAJA
ESTABILIDAD:	Durante toda la vida del sistema.
DESCRIPCIÓN:	Almacenar los resultados procedentes de los experimentos, tanto en un entorno real como simulado .
JUSTIFICACIÓN:	Los resultados de los experimentos se deben poder consultar para su posterior análisis y evaluación.

Tabla 2: Requisito de capacidad UG-C002

IDENTIFICADOR: UG-C003	
PRIORIDAD: <input checked="" type="checkbox"/> ALTA <input type="checkbox"/> MEDIA <input type="checkbox"/> BAJA	NECESIDAD: <input type="checkbox"/> ESENCIAL <input checked="" type="checkbox"/> DESEABLE <input type="checkbox"/> OPCIONAL
CLARIDAD: <input checked="" type="checkbox"/> ALTA <input type="checkbox"/> MEDIA <input type="checkbox"/> BAJA	VERIFICABILIDAD: <input type="checkbox"/> ALTA <input checked="" type="checkbox"/> MEDIA <input type="checkbox"/> BAJA
ESTABILIDAD:	Durante toda la vida del sistema.

DESCRIPCIÓN:	Las simulaciones se deberán aproximar lo más posible a la realidad. Es decir deberán contemplar los siguientes aspectos acústicos. 1) Absorción. 2) Atenuación. 3) Reflexión especular. 4) Reflexión difusa o Dispersión. 5) Difracción. 6) Interferencia. 7) Sonido directo. 8) Sonido reflejado.
JUSTIFICACIÓN:	Las estrategias propuestas deben funcionar de un modo similar, tanto en el entorno simulado como en real .

Tabla 3: Requisito de capacidad UG-C003

IDENTIFICADOR: UG-C004	
PRIORIDAD: <input checked="" type="checkbox"/> ALTA <input type="checkbox"/> MEDIA <input type="checkbox"/> BAJA	NECESIDAD: <input checked="" type="checkbox"/> ESENCIAL <input type="checkbox"/> DESEABLE <input type="checkbox"/> OPCIONAL
CLARIDAD: <input checked="" type="checkbox"/> ALTA <input type="checkbox"/> MEDIA <input type="checkbox"/> BAJA	VERIFICABILIDAD: <input checked="" type="checkbox"/> ALTA <input type="checkbox"/> MEDIA <input type="checkbox"/> BAJA
ESTABILIDAD:	Durante toda la vida del sistema.
DESCRIPCIÓN:	Las simulaciones se deberán poder lanzar de modo automático, por parte de otro programa.
JUSTIFICACIÓN:	Los AG deberán poder usar el simulador con el fin de evaluar a cada individuo.

Tabla 4: Requisito de capacidad UG-C004

IDENTIFICADOR: UG-C005	
PRIORIDAD: <input checked="" type="checkbox"/> ALTA <input type="checkbox"/> MEDIA <input type="checkbox"/> BAJA	NECESIDAD: <input checked="" type="checkbox"/> ESENCIAL <input type="checkbox"/> DESEABLE <input type="checkbox"/> OPCIONAL
CLARIDAD: <input checked="" type="checkbox"/> ALTA <input type="checkbox"/> MEDIA <input type="checkbox"/> BAJA	VERIFICABILIDAD: <input checked="" type="checkbox"/> ALTA <input type="checkbox"/> MEDIA <input type="checkbox"/> BAJA
ESTABILIDAD:	Durante toda la vida del sistema.
DESCRIPCIÓN:	El tiempo consumido por las simulaciones deberá de ser inferior al consumido por el mismo experimento realizado en un entorno real .

JUSTIFICACIÓN:	Las simulaciones se realizan para evaluar de un modo rápido las distintas estrategias de los AG, carece de sentido realizar simulaciones que consuman un mayor tiempo computacional, ya que en ningún caso van a aportar la misma exactitud que el experimento en real.
-----------------------	--

Tabla 5: Requisito de capacidad UG-C005

IDENTIFICADOR: UG-C006	
PRIORIDAD: <input checked="" type="checkbox"/> ALTA <input type="checkbox"/> MEDIA <input type="checkbox"/> BAJA	NECESIDAD: <input checked="" type="checkbox"/> ESENCIAL <input type="checkbox"/> DESEABLE <input type="checkbox"/> OPCIONAL
CLARIDAD: <input type="checkbox"/> ALTA <input checked="" type="checkbox"/> MEDIA <input type="checkbox"/> BAJA	VERIFICABILIDAD: <input checked="" type="checkbox"/> ALTA <input type="checkbox"/> MEDIA <input type="checkbox"/> BAJA
ESTABILIDAD:	Durante toda la vida del sistema.
DESCRIPCIÓN:	Ofrecer la posibilidad de reproducir/repetir los resultados obtenidos en los experimentos (reales y simulados). Evidentemente siempre y cuando no se cambien las condiciones bajo las cuales se realizaron dichos experimentos.
JUSTIFICACIÓN:	Los resultados se deben poder reproducir para poder comprobar in-situ la eficacia de la solución encontrada por el AG.

Tabla 6: Requisito de capacidad UG-C006

IDENTIFICADOR: UG-C007	
PRIORIDAD: <input checked="" type="checkbox"/> ALTA <input type="checkbox"/> MEDIA <input type="checkbox"/> BAJA	NECESIDAD: <input checked="" type="checkbox"/> ESENCIAL <input type="checkbox"/> DESEABLE <input type="checkbox"/> OPCIONAL
CLARIDAD: <input checked="" type="checkbox"/> ALTA <input type="checkbox"/> MEDIA <input type="checkbox"/> BAJA	VERIFICABILIDAD: <input checked="" type="checkbox"/> ALTA <input type="checkbox"/> MEDIA <input type="checkbox"/> BAJA
ESTABILIDAD:	Durante toda la vida del sistema.
DESCRIPCIÓN:	Permitir reproducir distintos sonidos a través de los altavoces, los cuales se encargarán de generar el campo primario y secundario (ver apartado 2.2).
JUSTIFICACIÓN:	Para poder realizar experimentos en un entorno real, es necesario poder emitir sonidos a través de altavoces.

Tabla 7: Requisito de capacidad UG-C007

IDENTIFICADOR: UG-C008	
PRIORIDAD: <input checked="" type="checkbox"/> ALTA <input type="checkbox"/> MEDIA <input type="checkbox"/> BAJA	NECESIDAD: <input checked="" type="checkbox"/> ESENCIAL <input type="checkbox"/> DESEABLE <input type="checkbox"/> OPCIONAL

CLARIDAD: <input checked="" type="checkbox"/> ALTA <input type="checkbox"/> MEDIA <input type="checkbox"/> BAJA		VERIFICABILIDAD: <input checked="" type="checkbox"/> ALTA <input type="checkbox"/> MEDIA <input type="checkbox"/> BAJA	
ESTABILIDAD:	Durante toda la vida del sistema.		
DESCRIPCIÓN:	Permitir la grabación de sonidos por medio de un micrófono, haciendo posible seleccionar como mínimo los siguientes parámetros. 1) Duración en segundos. 2) Frecuencia de muestreo. 3) Numero de bits por muestra.		
JUSTIFICACIÓN:	Para poder realizar experimentos en un entorno real, es necesario poder grabar el resultado por medio de un micrófono.		

Tabla 8: Requisito de capacidad UG-C008

IDENTIFICADOR: UG-C009			
PRIORIDAD: <input checked="" type="checkbox"/> ALTA <input type="checkbox"/> MEDIA <input type="checkbox"/> BAJA		NECESIDAD: <input checked="" type="checkbox"/> ESENCIAL <input type="checkbox"/> DESEABLE <input type="checkbox"/> OPCIONAL	
CLARIDAD: <input checked="" type="checkbox"/> ALTA <input type="checkbox"/> MEDIA <input type="checkbox"/> BAJA		VERIFICABILIDAD: <input checked="" type="checkbox"/> ALTA <input type="checkbox"/> MEDIA <input type="checkbox"/> BAJA	
ESTABILIDAD:	Durante toda la vida del sistema.		
DESCRIPCIÓN:	Los experimentos en un entorno real se deberán poder lanzar de modo automático, por parte de otro programa.		
JUSTIFICACIÓN:	Los AG deberán poder realizar experimentos en un entorno real con el fin de evaluar a cada individuo.		

Tabla 9: Requisito de capacidad UG-C009

IDENTIFICADOR: UG-C010			
PRIORIDAD: <input checked="" type="checkbox"/> ALTA <input type="checkbox"/> MEDIA <input type="checkbox"/> BAJA		NECESIDAD: <input checked="" type="checkbox"/> ESENCIAL <input type="checkbox"/> DESEABLE <input type="checkbox"/> OPCIONAL	
CLARIDAD: <input checked="" type="checkbox"/> ALTA <input type="checkbox"/> MEDIA <input type="checkbox"/> BAJA		VERIFICABILIDAD: <input checked="" type="checkbox"/> ALTA <input type="checkbox"/> MEDIA <input type="checkbox"/> BAJA	
ESTABILIDAD:	Durante toda la vida del sistema.		

DESCRIPCIÓN:	Permitir definir los siguientes parámetros de configuración del AG. <ol style="list-style-type: none"> 1. Función de evaluación. 2. Función de selección. 3. Función de reproducción/cruce. 4. Función de mutación. 5. Tamaño de la población. 6. Numero de variables de cada individuo. 7. Tipo de codificación (bits, enteros, reales) usada para el genotipo de cada individuo.
JUSTIFICACIÓN:	Para poder evaluar las distintas estrategias del AG, se deben poder modificar los distintos parámetros de funcionamiento del mismo.

Tabla 10: Requisito de capacidad UG-C010

IDENTIFICADOR: UG-C011	
PRIORIDAD: <input checked="" type="checkbox"/> ALTA <input type="checkbox"/> MEDIA <input type="checkbox"/> BAJA	NECESIDAD: <input checked="" type="checkbox"/> ESENCIAL <input type="checkbox"/> DESEABLE <input type="checkbox"/> OPCIONAL
CLARIDAD: <input checked="" type="checkbox"/> ALTA <input type="checkbox"/> MEDIA <input type="checkbox"/> BAJA	VERIFICABILIDAD: <input checked="" type="checkbox"/> ALTA <input type="checkbox"/> MEDIA <input type="checkbox"/> BAJA
ESTABILIDAD:	Durante toda la vida del sistema.
DESCRIPCIÓN:	Almacenar los mejores individuos de cada iteración, tanto en un entorno simulado como en real .
JUSTIFICACIÓN:	Los mejores resultados obtenidos se deben poder recuperar y reproducir dichos resultados.

Tabla 11: Requisito de capacidad UG-C011

4.2.2. Alternativas existentes.

A tenor de lo expuesto en los requisitos de usuario, podemos contemplar tres grandes módulos o subsistemas para satisfacer los requisitos propuestos, a saber, el módulo de **simulación**, módulo de **experimentación en un entorno real**, y módulo de **control**. En este apartado se valoraran cada una de las alternativas existentes para cada módulo. Posteriormente, y puesto que los módulos deben interactuar unos con otros, se elegirá la alternativa que mejor satisfaga las necesidades de cada uno de los módulos y del conjunto del sistema a implementar.

4.2.2.1. Subsistema de simulación.

La construcción del simulador está relacionada con los requisitos UG-C001, UG-C002, UG-C003, UG-C004, UG-C005, UG-C006. Algunos requisitos presentan intereses enfrentados, como por ejemplo el UG-C003 y el UG-C005, ya que a mayor grado de similitud entre las simulaciones y lo que sucedería en un entorno real (UG-C003), mayor coste computacional de la simulación (UG-C005). Para la construcción del simulador se contemplan tres grandes alternativas, las cuales se pasan a detallar.

1. SOFTWARE DE SIMULACION ACÚSTICA.

Esta alternativa lo que propone es utilizar software especializado de acústica de recintos para realizar las simulaciones. Este tipo de software nos permite definir recintos, fuentes de sonido, oyentes, materiales con los que está construida la sala, y en base a todo esto realizar simulaciones bastante precisas. En la actualidad existe numeroso software especializado entre los que destacan.

Nombre	Precio	Dirección web	País de origen
ODEON 6.5	5080-14400 €	http://www.dat.dtu.dk/~odeon	Finlandia
CATT V8	2400 – 4800 €	http://www.caesoft.es/productos/catt/catt_pg_marcos.htm	Suiza
RayNoise	24.650 €	http://www.lmsintl.com	Bélgica
ULYSSES	995 €	http://www.ifbsoft.de	Alemania
SoundPlan	6.000 €	http://www.soundplan.com	Suiza
PlantNoise	2100 €	http://www.soeh.ubc.ca/hodgson_research/plantnoise.htm	Canadá.
MagiCAD	2600-3500 €	http://www.progman.fi	Finlandia

Tabla 12: Software para simulación acústica de recintos.

- **Ventajas**

- La principal ventaja de utilizar este tipo de software, es que cumple muy bien con lo especificado en el requisito UG-C003.

- **Desventajas.**

- El coste computacional, aumenta a medida que lo hace grado de realismo en las simulaciones. No cumple con el requisito UG-C005.
- Ninguno de los programas anteriores permite realizar simulaciones de modo automático, por parte de otro programa. No cumple con el requisito UG-C004.
- Software bastante especializado, que normalmente tiene un coste económico elevado y requiere formación.

2. CONSTRUCCIÓN SOFTWARE DE SIMULACION ACÚSTICA.

Esta alternativa plantea construir un software propio de simulación acústica, la construcción de este tipo de software requiere sin duda un coste de desarrollo bastante elevado, constituyendo por si solo un proyecto de final de carrera, o incluso una tesis doctoral, tal y como se puede apreciar en [43], [44] y [45].

Una posible alternativa sería limitar la funcionalidad del simulador reduciendo su parecido con la realidad y no contemplando todos los efectos acústicos contemplados en AG-UC003, por ejemplo, solo contemplar reverberación, a cambio de obtener un desarrollo más sencillo y un coste computacional menor para las simulaciones.

- **Ventajas**

- El coste computacional disminuye (UG-C005).
- Posibilidad de realizar simulaciones de forma automática (UG-C004).
- Coste de desarrollo menor, al limitar la funcionalidad del simulador.

- **Desventajas**

- El grado de semejanza entre las simulaciones y la realidad será menor. No cumple con el requisito UG-C003.

3. UTILIZACIÓN DE API'S DE SONIDO 3D.

La idea principal de esta alternativa, consiste en realizar un simulador basado en librerías de sonido en 3D, dichas librerías se ocuparían en principio añadir los efectos necesarios, siendo necesaria “solamente” la implementación del simulador en un lenguaje de programación específico. Algunas de las API'S existentes en la actualidad son:

- DirectSound de Microsoft DirectX.
- EAX (Environmental Audio Extensions).
- OpenAL.
- Java 3D.

Un pequeño resumen sobre las características de estas librerías se puede encontrar en el ANEXO A.

- **Ventajas**

- El coste computacional disminuye (UG-C005).
- Posibilidad de realizar simulaciones de formas automática (UG-C004).

- **Desventajas**

- El grado de semejanza entre las simulaciones y la realidad será menor que en el caso de utilizar la alternativa 1.
- El coste de implementación aumenta, ya que se requiere cierta formación específica para las distintas librerías.

4.2.2.2. Subsistema de experimentación entorno real.

La construcción del software para realizar experimentos en un entorno real, está relacionada con los requisitos UG-C001, UG-C002, UG-C006, UG-C007, UG-C008, UG-C009. Para la construcción de este tipo de software se contemplan dos alternativas.

1. IMPLEMENTACIÓN EN UN DSP (Procesador digital de señal).

La idea principal de esta alternativa es utilizar un procesador digital de señal (DSP), Un DSP es procesador cuya configuración hardware está optimizada para realizar los algoritmos típicos de procesamiento de señal, tales como, filtrado FIR, análisis espectral FFT, etc. Hoy en día, existen en el mercado varias firmas comerciales que desarrollan arquitecturas de DSP:

- Texas Instruments TMS320XXX.
- Motorola DSP56000 y DSP96000.
- Analog Devices ADSP2100 y ADSP21000.

- Lucent Technologies (ATT) DSP16 y DSP32.

Al DSP se conectarán los actuadores (actuadores) del sistema de CAR y los sensores (micrófonos), siendo este el responsable de su control.

- **Ventajas**

- Arquitectura hardware especializada en el procesado de señal.
- Cumple con todos los requisitos.

- **Desventajas**

- Al tratarse de una arquitectura hardware específica, se cuenta con memoria y recursos mucho más limitados que los de un ordenador personal (PC).
- La implementación final se debe realizar en ensamblador. Otra alternativa es desarrollarlo en otro lenguaje como C, y después convertirlo a la arquitectura del propio DSP. En cualquier caso aumenta el tiempo de desarrollo.
- Coste económico, aunque existen DSP de bajo coste con funcionalidades muy limitadas (1 solo canal de entrada y 1 solo canal de salida).

2. IMPLEMENTACION EN UN PC + TARJETA DE SONIDO.

En esta alternativa, lo que se propone es utilizar un PC junto con una tarjeta de sonido, a la cual se conectarían los actuadores (altavoces) y los sensores (micrófonos) del sistema CAR, desarrollando un software específico para cumplir con los requisitos de este módulo. Dentro de esta alternativa, tenemos varias opciones, a la hora de elegir el lenguaje de programación en el cual vamos a desarrollar el software, dicho lenguaje tendrá que ofrecer posibilidad de utilizar la tarjeta de sonido.

- **Java:** Cuenta con un API que proporciona los servicios suficientes para cumplir con los requisitos de este módulo. Se puede encontrar una guía completa en [49].
- **DirectSound de Microsoft DirectX:** Con esta alternativa podemos desarrollar el software necesario en cualquier lenguaje soportado por .NET, es decir, que se adapte a las especificaciones del CLI (Common Language Infrastructure), como por ejemplo C#.

- **MATLAB:** Cuenta con “*Data Acquisition Toolbox*” [50], el cual ofrece una interfaz para poder acceder a la tarjeta de sonido y cumplir con los requisitos de este módulo.
- **Ventajas**
 - Tiempo de desarrollo menor que con la alternativa 1. Al no tratarse de una arquitectura hardware especializada, el software se puede desarrollar en cualquier lenguaje de programación, como los citados anteriormente.
 - Cumple con todos los requisitos.
- **Desventajas**
 - Operaciones de procesado de señal no optimizadas (si lo están en MATLAB).

4.2.2.3. Subsistema de control.

La construcción de este subsistema está relacionada con los requisitos UG-C010 y UG-C011. Dicho subsistema se encargará de implementar las distintas funcionalidades de un AG, las cuales se comentaron brevemente en el capítulo 3, y en el requisito UG-C010. Este subsistema, estará acoplado con los otros dos subsistemas (simulación y experimentación real), por lo cual se debería implementar bajo el mismo marco de trabajo que los otros dos subsistemas. Para los lenguajes de programación existen distintas librerías, las cuales tienen características similares y satisfacen completamente lo especificado en UG-010 y UG-011. Éstas se comentan brevemente para los distintos lenguajes citados anteriormente.

- **Java:** Existen numerosas librerías entre las que destaca JGAP [51], la cual ofrece funciones para AGs y para PG.
- **.Net:** Existen menos librerías que para Java, destaca GAL [52] la cual ofrece de modo más que suficiente lo especificado en los requisitos, aunque solamente es para AGs.
- **MATLAB:** Cuenta con “*Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox*” [53] la cual ofrece lo especificado por los requisitos de este módulo.

4.2.2.4. Alternativas agrupadas.

Como se puede apreciar, existen distintas alternativas a la hora de diseñar los distintos módulos, como ya se ha comentado, dichos módulos deberán interactuar entre sí, para finalmente

implementar un sistema CAR y cumplir con los objetivos y requisitos del proyecto. Así pues, las distintas alternativas de cada módulo o subsistema se deben agrupar, constituyendo alternativas globales para el desarrollo del proyecto. A continuación se detallaran dichas alternativas, eligiendo una de ellas y justificando dicha elección.

1. IMPLEMENTACIÓN EN UN DSP.

La idea principal es realizar tanto subsistema de control (AG), como el subsistema de experimentación en real, en un DSP. Para llevar esta alternativa a cabo, no se implementarían los subsistemas directamente en lenguaje ensamblador, primero se implementarían los subsistemas en otro lenguaje como puede ser C, o MATLAB. Posteriormente, y una vez realizadas las simulaciones, se programaría el DSP con el código generado y se pasaría a probar en un entorno real.

- **Ventajas**

- Arquitectura hardware especializada en el procesado de señal.
- Sistema más portable a distintos escenarios que la alternativa 2.

- **Inconvenientes**

- Puesto que los AG se deben implementar en el propio DSP, y el DSP cuenta con menos memoria que un PC convencional, esto puede afectar a las siguientes funcionalidades:
 - A todas las funcionalidades del AG requisito UG-C010.
 - Imposibilidad de cumplir con el requisito UG-C011 en el propio DSP.
 - Imposibilidad de cumplir con el requisito UG-C002.
- La implementación final se debe realizar en ensamblador. Otra alternativa es desarrollarlo en otro lenguaje como C, y después convertirlo a la arquitectura del propio DSP. En cualquier caso aumenta el tiempo de desarrollo.
- Coste económico, aunque existen DSP de bajo coste con funcionalidades muy limitadas (1 solo canal de entrada y 1 solo canal de salida).

2. IMPLEMENTACIÓN EN UN PC+TARJETA DE SONIDO.

Esta alternativa se basa en agrupar toda funcionalidad de los subsistemas descritos con anterioridad, en un PC junto con una tarjeta de sonido, a la cual se conectarían los actuadores (altavoces) y los sensores (micrófonos) del sistema CAR.

Bajo esta alternativa, cada uno de los subsistemas se podría implementar en principio, en cualquiera de las opciones que se describieron con anterioridad, sin embargo es conveniente implementar todo el sistema bajo el mismo marco de trabajo, carece de sentido implementar el simulador en C# y el de experimentación en entorno real en Java.

Los marcos de desarrollo como .NET o Java no cuentan con algunas funcionalidades básicas para el procesado de señal, tales como filtrado FIR, análisis espectral FFT, etc. Por otro lado y aunque para el subsistema de experimentación en real, existen librerías en ambos marcos de desarrollo, que nos permiten cumplir con los requisitos exigidos, dichas librerías están diseñadas para ser usadas en la creación de videojuegos o aplicaciones multimedia.

Según lo expuesto anteriormente, se puede observar como el entorno de desarrollo más versátil y que abarca todas las funcionalidades de nuestro sistema, es MATLAB. Bajo este entorno de trabajo se pueden desarrollar las simulaciones, limitando la funcionalidad de éstas con el fin de disminuir el coste computacional. Por otro lado, MATLAB cuenta con numerosas librerías para cumplir con los requisitos de los demás subsistemas como son “*Data Acquisition Toolbox*” [50] y “*Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox*” [53], además de muchas otras que pueden ser útiles en un futuro. Además, elegir un marco de desarrollo tan estandarizado y utilizado en distintas industrias, (como MATLAB) nos ofrecerá mayor fiabilidad a la hora de utilizar librerías ya programadas.

- **Ventajas**

- Tiempo de desarrollo menor, al no tratarse de una arquitectura tan especializada como la alternativa 1.
- Gran capacidad de memoria, comparada con la alternativa 1, posibilitando cumplir con todos los requisitos del sistema.

- **Inconvenientes**

- Sistema menos portable que la alternativa 1.

Por todos los motivos expuestos anteriormente, se elige la alternativa 2, ya que es mucho más versátil que la alternativa 1, tiene un menor tiempo desarrollo, y cumple mejor con los requisitos

exigidos por el sistema. No obstante, como futuras líneas de investigación se podría implementar la alternativa 1, una vez concluido este proyecto y en caso de que los resultados obtenidos fueran favorables.

4.3. Diseño.

Una vez expuestas y valoradas las distintas alternativas, y seleccionada la que mejor se adaptaba a los requisitos del sistema, se especifica a continuación el diseño de cada subsistema.

4.3.1. Diseño subsistema de simulación.

Este subsistema debe cumplir con lo especificado en el requisito UG-C003, sin embargo tal y como se comentó anteriormente, algunos requisitos presentan intereses enfrentados, como por ejemplo el UG-C003 y el UG-C005, ya que a mayor grado de similitud entre las simulaciones y lo que sucedería en un entorno real (UG-C003), mayor es el coste computacional de la simulación. El objetivo fundamental de realizar simulaciones, es comprobar de un modo sencillo y rápido la adecuación de los distintos algoritmos propuestos. Por este motivo, el requisito UG-C003 verá recortada parte de su funcionalidad. Se comenzará simulando una sala ideal, en la que no existan rebotes ni ruido externo para posteriormente simular estos efectos. A continuación se explicarán en mayor detalle cada una de estas configuraciones.

4.3.1.1. Sala ideal.

En esta aproximación, se supondrá de forma intencionada que la señal recogida por el micrófono, será simplemente la suma de las señales emitidas por los altavoces, es decir, la señal resultante será la suma de las dos señales sin aplicarle ninguna transformación y sin aplicarle ninguna señal de ruido de fondo (tal y como ocurriría en el sistema real). De un modo más analítico tendremos:

1. $P_p(x, y, z, t)$ campo primario, conocido que deseamos anular, $X_{\text{Primario}}(t)$.

2. $P_s(x, y, z, t)$ campo secundario, desconocido, el cual será calculado por el AG, $X_{\text{Secundario}}(t)$.
3. Un micrófono situado en la posición (x, y, z) que medirá la señal resultante entre el campo primario y secundario. Tendremos que $X_{\text{Resultado}}(t) = X_{\text{Primario}}(t) + X_{\text{Secundario}}(t)$

4.3.1.2. Sala con reverberación

En esta aproximación, realizaremos una serie de transformaciones sobre las señales de tal modo que se simulen los “rebotes” que éstas experimentarían en una situación real. El objetivo de esta configuración es comprobar el comportamiento del AG bajo estas condiciones.

Para simular los rebotes, se utilizará una técnica sencilla, que es parecida a la utilizada por las API'S existentes para la simulación de sonidos en 3D [12], en última instancia la energía de una señal emitida en una sala, y recogida por un micrófono presenta el siguiente esquema:

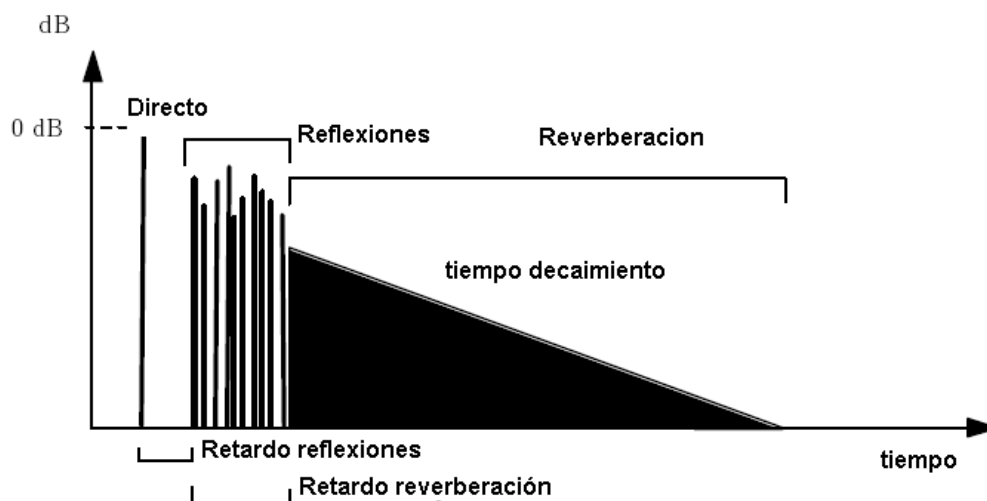


Ilustración 21: Descomposición respuesta al impulso.

Como se puede apreciar en la ilustración anterior, cuando un sonido es emitido en una sala y captado por un micrófono, el primer sonido captado, es el sonido directo, posteriormente llegan las reflexiones (transcurrido un retardo) que poseen una intensidad menor que el sonido directo, y posteriormente se capta la reverberación, la cual desaparece transcurrido el tiempo de decaimiento.

Es posible, añadir estos efectos de reverberación a una señal determinada, dichos efectos se pueden añadir utilizando diverso software (como el mostrado en la tabla 12). Este software se basa en técnicas como son el trazado de rayos, de la cual se puede obtener una implementación matemática en [3], método basado en imágenes, elementos finitos o técnicas híbridas como la presentada en [4].

En [5] se puede obtener una descripción detallada de cada una de las técnicas anteriores. Como ya se ha comentado anteriormente, los cálculos empleados por este tipo de técnicas son bastantes costosos, en lo que se refiere a tiempo computacional.

Por otro lado, además de este software especializado, existen distintos algoritmos para a partir de una señal dada, añadirle efectos de reverberación en MATLAB, como los que se proponen en [6].

En una primera aproximación, se puede suponer que una muestra $X(t_n)$ de una señal dada, sea combinación lineal de las muestras anteriores, de tal modo que la muestra enésima, sea la que más afecte a la muestra $n+1$, así sucesivamente. Esto se puede expresar de un modo más formal como sigue:

$$X(t_n) = X(t_n) + \alpha \cdot X(t_{n-1}) + \beta \cdot X(t_{n-1}) + \chi \cdot X(t_{n-2}) + \dots + \delta \cdot X(t_{n-k}) \mid \alpha \geq \beta \geq \chi \dots \geq \delta$$

Este primera aproximación presenta un problema bastante notable, por ejemplo al aplicar dicha transformación a la señal $X_{Ruido}(t) = sen(t)$, la transformación que se aplicará será la siguiente:

$$X_{Ruido}(t_n) = X(t_n) + 0.9 \cdot X(t_{n-1}) + 0.8 \cdot X(t_{n-2}) + 0.7 \cdot X(t_{n-3}) + \dots + 0.1 \cdot X(t_{n-9})$$

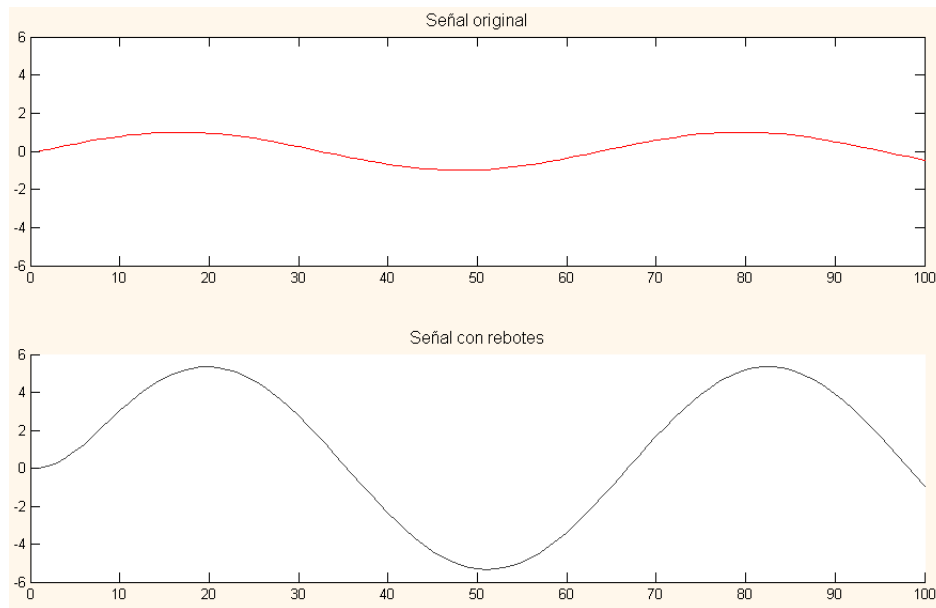


Ilustración 22: Comparativa entre la señal original y la señal con rebotes.

Como se puede apreciar en la ilustración anterior, al tratarse de una señal periódica, la transformación lo único que modifica es la amplitud de la señal. Puesto que los valores de la señal deberán oscilar entre -1 y 1, al finalizar la transformación anterior, la señal se normalizará entre dichos valores, resultando una señal semejante a la original.

Con el fin de solucionar los problemas anteriores, podemos utilizar un esquema de filtros como el que se muestra en el siguiente diagrama de bloques.

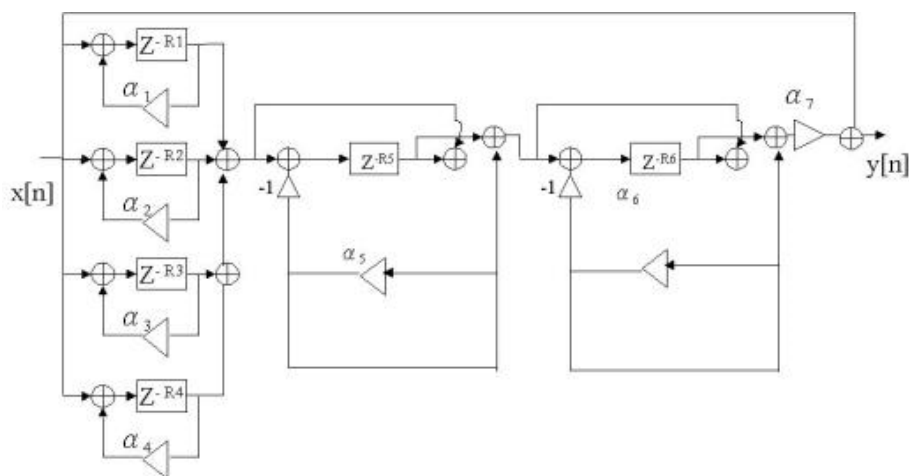


Ilustración 23: Diagrama de bloques del reverberador de Schroeder.

El esquema anterior está formado por cuatro filtros “comb” (o filtros peine) y dos filtros “paso todo”, la implementación en MATLAB se puede encontrar en el archivo SimuHabitacion.m, dentro del material adjunto al proyecto. De un modo más analítico tendremos que:

1. $P_p(x, y, z, t)$ campo primario, conocido que deseamos anular, $X_{\text{Primario}}(t)$. Y el cual será modificado a través del reverberador de Schroeder.
2. $P_s(x, y, z, t)$ campo secundario, desconocido, el cual será calculado por el AG, $X_{\text{Secundario}}(t)$. También se modificará a través del reverberador de Schroeder.
3. Un micrófono situado en la posición (x, y, z) que medirá la señal resultante entre el campo primario y secundario.

Tendremos que $X_{\text{Resultado}}(t) = X_{\text{Sala}}(X_{\text{Primario}}(t)) + X_{\text{Sala}}(X_{\text{Secundario}}(t))$.

A continuación se muestra una comparativa entre una señal original y la señal modificada con los efectos de reverberación.

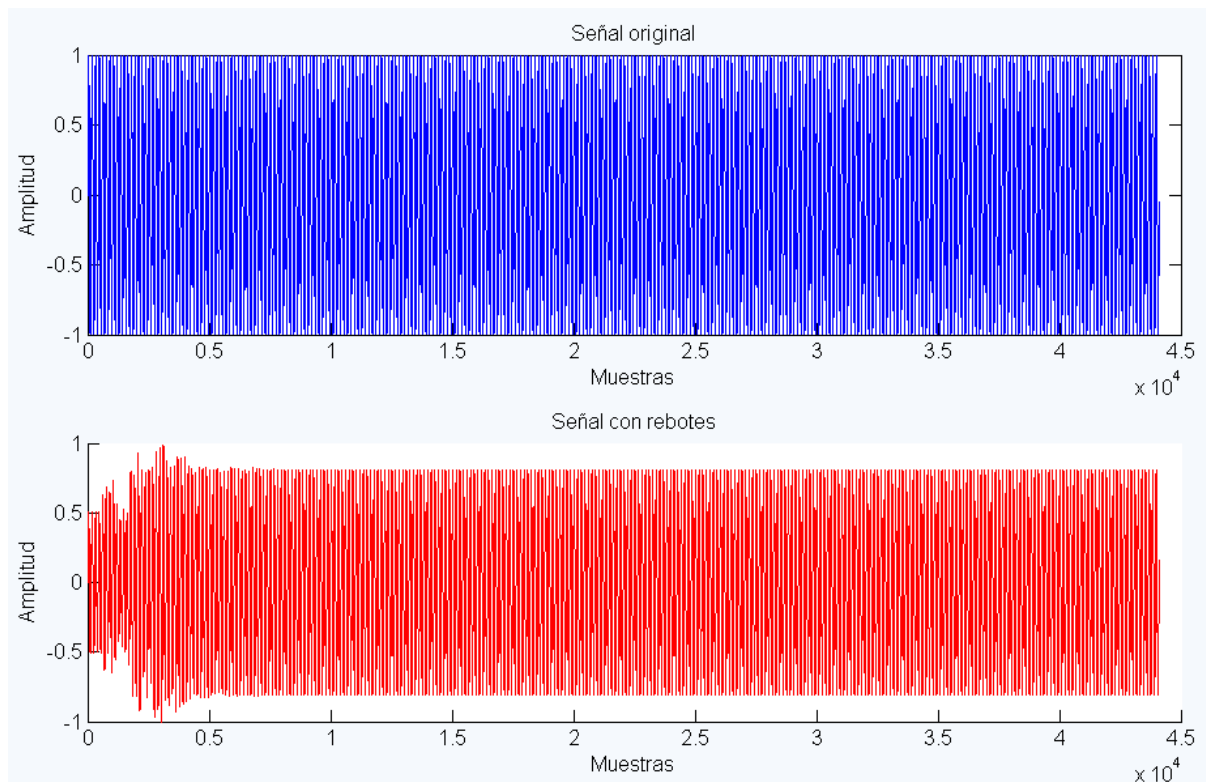


Ilustración 24: Comparativa entre la señal original y la señal con rebotes.

4.3.1.3. Sala con reverberación y ruido.

Además de los efectos expuestos en el apartado anterior, otro factor a tener en cuenta, es el ruido de fondo. El ruido de fondo estará presente en cualquier experimento real, ya que aunque se disponga de una sala perfectamente aislada e insonorizada del exterior, siempre existirán elementos interiores, como puede ser el propio ordenador (sus ventiladores) que provocarán ruido aleatorio. Este ruido provoca que un mismo individuo pueda ser evaluado de distinto modo, en función de la cantidad de ruido de fondo que exista. Una posibilidad para solventar dicho problema, es realizar más de una evaluación del individuo en cuestión, y calcular la evaluación del individuo como la media de las evaluaciones realizadas.

El ruido de fondo se simulará del siguiente modo: a la hora de evaluar a cada individuo en la función de evaluación, se generará una señal pseudoaleatoria con valores comprendidos entre $[-0.1, 0.1]$. Dicha señal será sumada a los campos primarios y secundarios, que en esta configuración ya han sido modificados previamente para añadirle efectos de reverberación. De un modo más analítico tenemos que:

1. $P_p(x, y, z, t)$ campo primario, conocido que deseamos anular, $X_{\text{Primario}}(t)$. Y el cual será modificado a través del reverberador de Schroeder.
2. $P_s(x, y, z, t)$ campo secundario, desconocido, el cual será calculado por el AG, $X_{\text{Secundario}}(t)$. También se modificará a través del reverberador de Schroeder.
3. Un micrófono situado en la posición (x, y, z) que medirá la señal resultante entre el campo primario, el secundario y ruido aleatorio.

Tendremos que $X_{\text{Resultado}}(t) = X_{\text{Sala}}(X_{\text{Primario}}(t)) + X_{\text{Sala}}(X_{\text{Secundario}}(t)) + X_{\text{Ruido}}$.

4.3.2. Diseño subsistema de experimentación entorno real.

Este subsistema debe cumplir con lo especificado en los requisitos UG-C001, UG-C002, UG-C006, UG-C007, UG-C008, UG-C009. Como ya se expusiera para la construcción de este subsistema se utilizará "Data Acquisition Toolbox" [50], el cual permite entre otras cosas, cumplir con los requisitos UG-C007 y UG-C008. Por otro lado se deberá contar con los elementos físicos, detallados en el siguiente esquema.

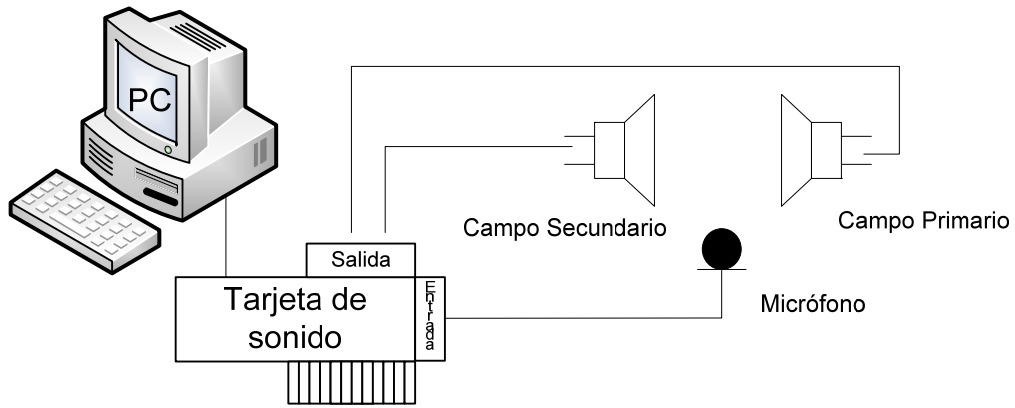


Ilustración 25: Esquema de los elementos del sistema CAR implementado.

Como se puede apreciar los elementos necesarios para la construcción del sistema, son la tarjeta de sonido, micrófono y altavoces. La tarjeta de sonido utilizada es “Presonus Firebox” [54], de la cual se muestra una imagen a continuación y se detallan sus características técnicas.

Ancho de banda del pre-amplificador.....	10Hz a 50kHz
Impedancia de entrada del pre-amplificador	1.3k Ohms
Impedancia de entrada de Instrumentos	1M Ohms
THD del pre-amplificador.....	<0.005%
EIN del pre-amplificador.....	-125dB
Ganancia del pre-amplificador	45dB
Impedancia de la entrada de línea	10k Ohms
Impedancia de Salidas TRS.....	51Ohms
Impedancia de Salidas TRS Main.....	51 Ohms
Salida de auriculares.....	150mW/Ch 20Hz-20kHz
Alimentación Phantom.....	48V +/- 2V
Suministro de potencia.....	Adaptador externo, conmutación interna
Alimentación del Bus.....	Puerto FireWire de 6 pines
Convertidores Analógico-Digital.....	24-bits / hasta 96khz
Rango dinámico de ADC.....	107db
DAC.....	24-bits/ hasta 96kHz
Rango dinámico de DAC.....	110db
Velocidad de IEEE1394.....	400mbps

Tabla 13: Especificaciones de la tarjeta de sonido Firebox Presonus



Ilustración 26: Imagen de la tarjeta de sonido Presonus FireBox.

Entre las características de esta tarjeta podemos destacar las siguientes:

- Firewire (IEEE 1394) plug and play.
- 24-Bit / 44.1, 48, 88.2, 96K.
- Grabación/reproducción 6 entradas/10 salidas a 24-bit/96K.
- 2 Preamplificadores de micro/instrumento.
- 2 entradas de línea analógicas, 6 salidas de línea analógicas.
- Entrada/salida S/PDIF.
- Entrada/salida MIDI.

El micrófono utilizado es un modelo M179 del fabricante CAD [55], entre sus características más relevantes destaca, su diafragma de condensador variable (cardioid, subcardioid, hipercardioid, bidireccional y omnidireccional), y su respuesta plana en frecuencia tal y como se puede apreciar en la siguiente figura.

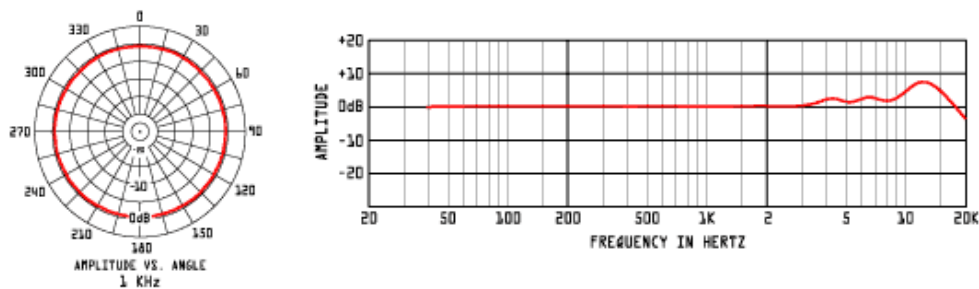


Ilustración 27: Diagrama polar y respuesta en frecuencia micrófono M179 cardioid (omnidireccional).

Como se puede apreciar entre los 40Hz y los 2KHz el micrófono ofrece una respuesta en frecuencia totalmente plana, dicha característica se pierde a partir de los 3KHz. A continuación se muestra una imagen del micrófono utilizado.



Ilustración 28: Micrófono CAD M179

Los altavoces utilizados son Altec Lansing modelo CS21, sus características técnicas se muestran continuación:

- Nivel de presión acústica (SPL): 108 dB.
- Potencia total continua: 110 Vatios RMS.
- Altavoces frontales: 30 Vatios/canal, 8 ohmios, 10% distorsión armónica THD, 140–20000Hz, dos canales cargados.
- Subwoofer: 50 Vatios, 4 ohmios, 10% de distorsión armónica THD, 27 – 113 Hz, un canal cargado.
- Respuesta de sistema: 35 Hz – 18 kHz (-10dB).
- Proporción señal/ruido @ entrada de 1 kHz: > 86 dB.

En la siguiente ilustración se muestra una fotografía de los altavoces utilizados.



Ilustración 29: Altavoces Altec Lansing CS21.

Una vez expuestos los elementos físicos que interaccionarán con el subsistema de experimentación en entorno real, se explicará el procedimiento seguido para evaluar cada estrategia y la configuración presente en los experimentos realizados.

En primer lugar se contará con dos altavoces, los cuales se encuentran uno de otro separado 20cm, en el punto medio entre estos, y superado 10 cm, se situará el micrófono, el cual recogerá la señal resultante, y posibilitará evaluar a cada individuo.

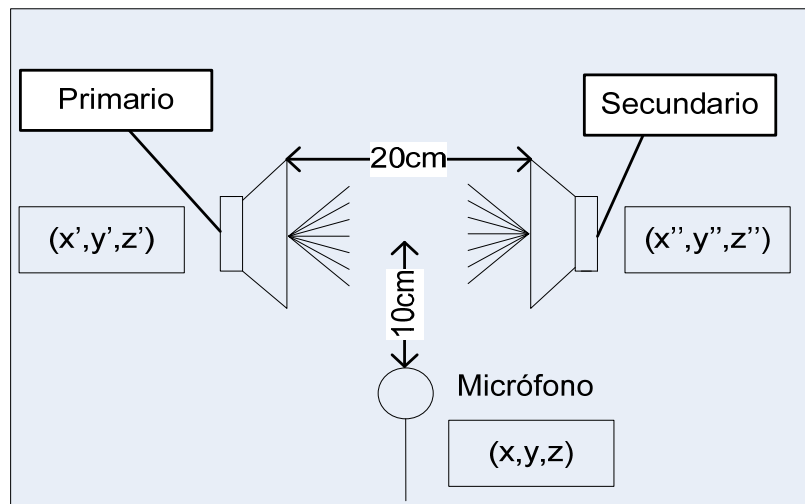


Ilustración 30: Configuración utilizada en entorno real.

La idea principal, es generar un campo primario conocido (ruido) mediante un altavoz situado en la posición (x', y', z') , el cual se tratará de anular con un campo secundario desconocido, que deberá ser calculado por el AG y generado por otro altavoz situado en la posición (x'', y'', z'') . Para comprobar si el ruido se anula o no, se contará con un micrófono, situado en la posición (x, y, z) que recogerá la señal resultante. De un modo más analítico tenemos.

1. $P_p(x, y, z, t)$ campo primario, conocido que deseamos anular, generado por el altavoz situado en (x', y', z') .
2. $P_s(x, y, z, t)$ campo secundario, desconocido, generado por el altavoz situado en (x'', y'', z'') y que será calculado por el AG.
3. Un micrófono situado en la posición (x, y, z) que medirá la señal resultante entre el campo primario y secundario.

En función de los resultados obtenidos, se contempla la posibilidad de modificar el esquema anterior, y que el campo primario, no sea generado por un altavoz de nuestro sistema, sino por una fuente de ruido real, como puede ser un ventilador, o alguna fuente de ruido similar.

4.3.3. Diseño subsistema de control.

La construcción de este subsistema está relacionada con los requisitos UG-C010 y UG-C011. Dicho subsistema se encargará de implementar las distintas funcionalidades de un AG, las

cuales se comentaron brevemente en el capítulo 3, y en el requisito UG-C010. Este subsistema deberá interactuar con el subsistema de simulación y de experimentación en entorno real, como ya se explicó anteriormente se utilizará el “*Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox*” [53] el cual nos permitirá personalizar, en caso de que fuera necesario, los operadores de selección, cruce, mutación y evaluación. De modo independiente a si los experimentos se realicen en un entorno real, o se utilice el simulador, el AG siempre seguirá el mismo algoritmo para evaluar a cada candidato. En primer lugar, al comienzo de cada iteración se obtendrán señales de referencia, las cuales, serán el resultado de:

- a) Emitir campo primario, señal recogida por el micrófono → Variable SinAr.
- b) Emitir campo primario y a la vez emitir como campo secundario, el primario invertido, señal recogida por el micrófono → Variable ArInv.

Las señales anteriores se tomarán como referencia. Una vez hecho esto, se pasará a evaluar a cada individuo, para lo cual se deberá emitir el campo primario y a la vez emitir como campo secundario la solución ofrecida por cada individuo. Dicha solución dependerá de la codificación utilizada y de la estrategia del AG. Posteriormente el proceso será exactamente el mostrado en la ilustración 19 del capítulo 3.

Las distintas estrategias planteadas en este proyecto se explicarán con mayor detalle en los capítulos 5 y 6, adelantándonos a dichos capítulos se puede indicar, que en este proyecto se plantean tres estrategias distintas, a saber.

- AG simple.
- AG con señal invertida.
- AG con filtros FIR.

La primera estrategia, AG simple, plantea que el AG busque la señal que emitida como campo secundario, minimice el nivel de ruido (captado o simulado), sin necesidad de información sobre la señal emitida como campo primario.

La segunda estrategia, AG con señal invertida, plantea que el AG busque que señal que sumada a la señal invertida y emitida como campo secundario, minimice el nivel de ruido (captado o simulado). En este caso, sí necesitamos información sobre la señal que se emite como campo primario.

La tercera estrategia, AG con filtros FIR, plantea que el AG busque los coeficientes de un filtro FIR, de tal modo que al filtrar la señal emitida como campo primario, y emitir dicha señal filtrada como

campo secundario, se minimice el nivel de ruido (captado o simulado). En este caso también, necesitamos conocer información sobre que señal emitimos, como campo primario.

CAPÍTULO 5. Simulación de sistemas de control.

5.1. Introducción.

A lo largo de este capítulo se evaluarán cada una de las estrategias propuestas, mediante simulación. Las distintas estrategias fueron resumidas brevemente en el apartado 4.3.3 del capítulo. Por otro lado las simulaciones se realizarán con distintas configuraciones de sala, tal y como se expuso en el apartado 4.3.1. Tal y como se explicó en el capítulo anterior, estas simulaciones tienen por objetivo evaluar las distintas estrategias planteadas aplicadas a sistemas CAR.

5.2. Estrategias para el control activo del ruido.

En este apartado se explicarán con mayor detalle cada una de las estrategias planteadas en el apartado 4.3.3. Además, dichas estrategias serán evaluadas para las distintas configuraciones de sala. En primer lugar, se realizarán simulaciones con señales monotonaes, valores estándares para la funciones de evaluación y mutación, así como distintas configuraciones de la sala; sala ideal, sala con reverberación y sala con reverberación y ruido. Todas las medidas expuestas, serán el resultado de obtener la media aritmética resultante de realizar 10 experimentos, con los mismos parámetros de simulación.

Posteriormente, cuando se encuentre alguna estrategia que obtenga resultados adecuados, se analizará en mayor detalle, analizando dichos parámetros (fitness y mutación) para obtener mejores resultados.

5.2.1. AG simple.

Con este tipo de estrategia el AG, deberá ser capaz de encontrar los 44100 valores de una señal, que al aplicarla como campo secundario, cancele al campo primario, cuya señal será un tono puro de 300 Hz. Esta estrategia se puede considerar muy sencilla, y aunque los resultados que se obtienen no son buenos, sirve para realizar una aproximación al problema, y dar una idea de la complejidad del mismo. Las simulaciones se realizarán para las distintas configuraciones de la sala, finalmente se hará una valoración de este tipo de estrategia.

Dada la señal $X_{\text{Primario}}(t)$ se desea encontrar la señal $X_{\text{Secundario}}(t)$, tal que $X_{\text{Resultado}}(t) = X_{\text{Primario}}(t) + X_{\text{Secundario}}(t) = 0$. Se puede comprobar de modo analítico, que dicha

solución en ausencia de otros factores (como ruido de fondo), es el campo primario invertido. Desde otro punto de vista es la misma señal presente en el campo primario multiplicado por -1.

Con esta configuración el AG a utilizar tendrá las siguientes características:

- Tipo de campo primario: Tono puro de 300 Hz.
- Codificación: Decimal. Rango [-1 , 1]
- Tamaño de la población: 50 individuos.
- Numero de variables: 44100.
- Numero de generaciones: 200
- Operador de selección: Torneo, 3 individuos.
- Porcentaje de cruce: 90%
- Porcentaje de mutación: 10%
- Tipo de mutación: Uniforme y Gaussiana (Se probarán ambas).
- Función de evaluación: $F_E = \frac{1}{F_s} \cdot \sum |x(t)| \quad \forall x(t) \in X_{\text{Resultado}}(t)$, donde F_s es la frecuencia de muestreo en este caso 44100.

Como se puede apreciar nos encontramos en un espacio de búsqueda bastante amplio, tenemos 44100 variables de valores reales en el rango [-1, 1].

5.2.1.1. AG simple en sala ideal.

Con este tipo de estrategia y con este tipo de sala, en la cual no se simulan reverberación ni ruido de fondo, se obtienen los siguientes resultados para los distintos tipos de mutación probados. Como se puede apreciar, los resultados son bastante malos ya que en ningún caso se logra reducir el campo primario, es decir la señal sin “antiruido” obtiene un mejor resultado que la señal con el “antiruido”, lo cual pone en evidencia las deficiencias de este tipo de estrategia.

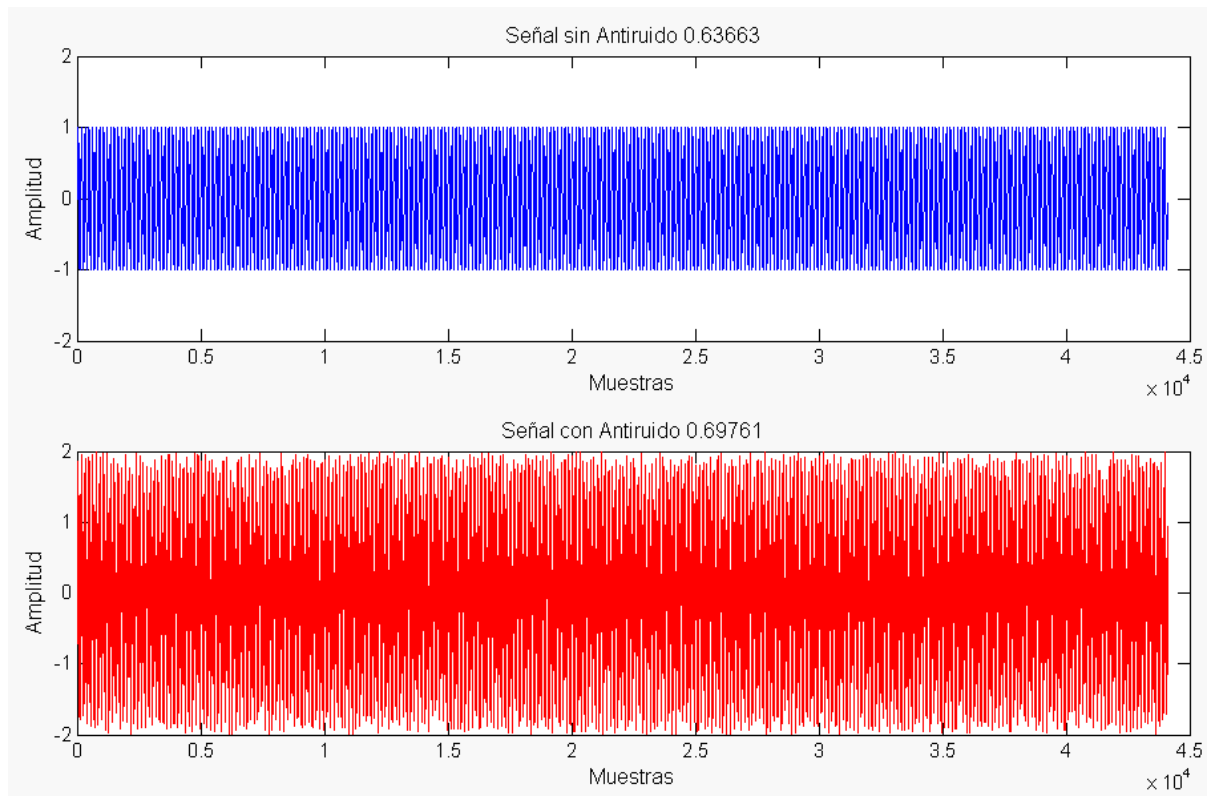


Ilustración 31: resultados sin/con CAR para AG simple en sala ideal.

Como se puede apreciar en la imagen anterior, la señal con “anti ruido” tiene casi el doble de amplitud que la señal sin anti ruido, de ahí que este tipo de estrategia se descarte. A continuación se muestran los valores de fitness obtenidos.

Tipo señal	Sala	MUTACIÓN	
		Uniforme 0.5	Gaussiana
MONOTONAL	No reverberación no ruido	0,6977426	0,7418920

Tabla 14: Resultados AG simple en sala ideal.

Como se puede apreciar claramente en la tabla anterior, en ningún caso se obtiene un valor de fitness inferior a 0.63663, valor obtenido por el campo primario en ausencia del secundario, así pues este tipo de estrategia no es la más adecuada para el control activo del ruido, probablemente se debe al altísimo número de variables (44100) involucradas en la solución del problema.

5.2.1.2. AG simple en sala con reverberación.

Al igual que en la simulación anterior, se muestran los resultados obtenidos con la estrategia actual y con una configuración de sala en la cual, sí existe reverberación, pero no ruido de fondo. Como se puede apreciar los resultados siguen siendo desfavorables.

Tipo señal	Sala	MUTACIÓN	
		Uniforme 0.5	Gaussiana
MONOTONAL	Si reverberación no ruido	0,6142065	0,6488359

Tabla 15: Resultados AG simple en sala con reverberación.

Como se puede apreciar claramente en la tabla anterior, en ningún caso se obtiene un valor de fitness inferior a 0.51081, valor obtenido por el campo primario en ausencia del secundario, tal y como se muestra en la siguiente ilustración. Como se puede apreciar el resultado es similar al obtenido anteriormente.

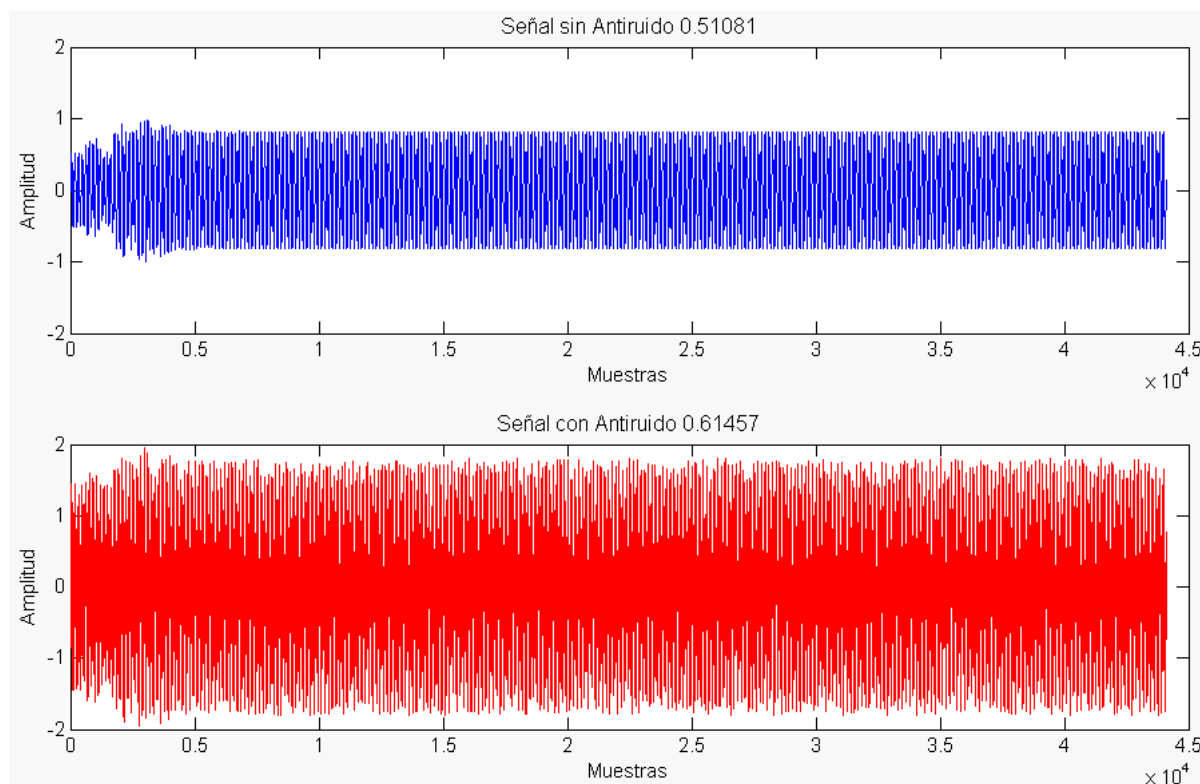


Ilustración 32: Resultados sin/con CAR para AG simple en sala con reverberación.

5.2.1.3. AG simple en sala con reverberación y ruido.

Al igual que en la simulación anterior, se muestran los resultados obtenidos con la estrategia actual y con una configuración de sala en la cual, sí existe reverberación y ruido de fondo, tal y como ocurrirá en una situación real. Como se puede apreciar los resultados no mejoran.

Tipo señal	Sala	MUTACIÓN	
		Uniforme 0.5	Gaussiana
MONOTONAL	Si reverberación si ruido	0,6164364	0,6532059

Tabla 16: Resultados AG simple en sala con reverberación y ruido de fondo.

El mejor resultado encontrado al aplicar este tipo de estrategia a un sistema de control activo del ruido, es el siguiente según las simulaciones realizadas.

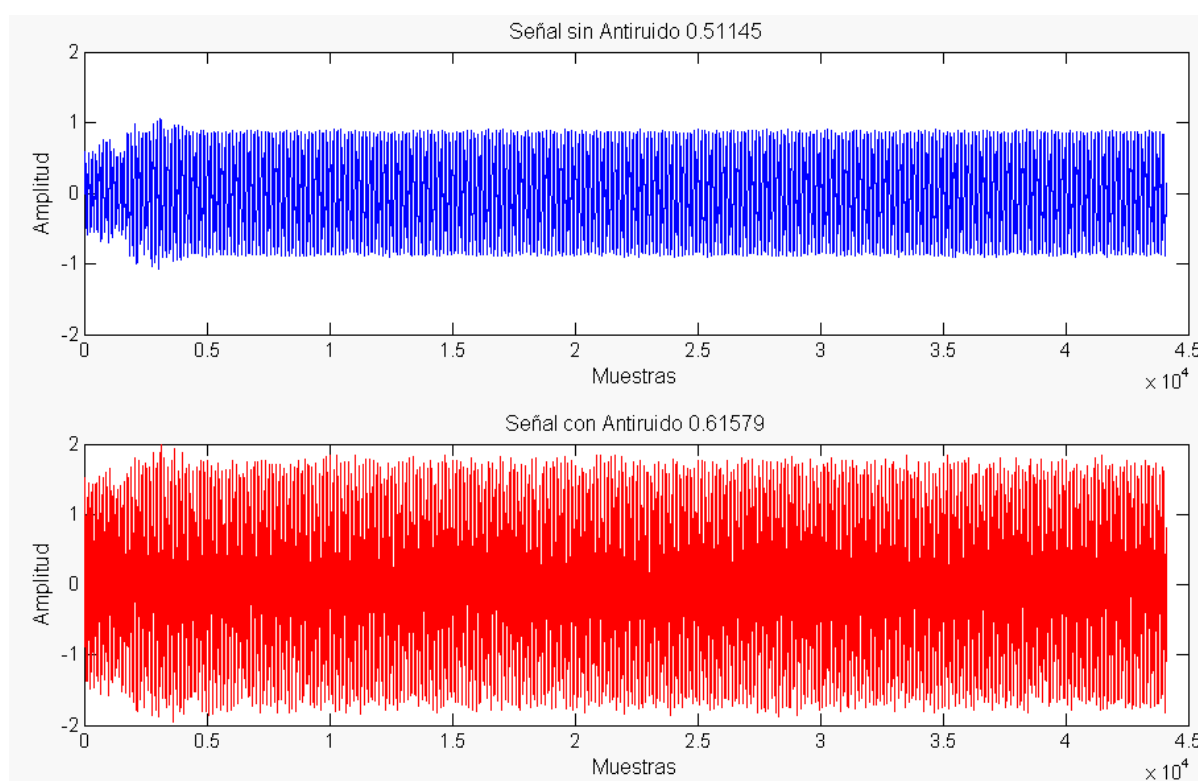


Ilustración 33: Comparativa resultados sin/con CAR para AG simple en sala con reverberación y ruido.

Al igual que con las otras configuraciones de sala, no se consigue en ningún momento atenuar el campo primario. Como se puede observar, la mejor solución obtiene un fitness de 0.61579, la cual

dista bastante de mejorar el valor de 0.51145 obtenido por el campo primario, en ausencia del secundario.

Como punto a destacar, en esta simulación y con la función de mutación Gaussiana, el resultado de la evolución empeora en vez de mejorar, haciendo que el AG no evolucione hacia la solución, tal y como se muestra en la siguiente ilustración.

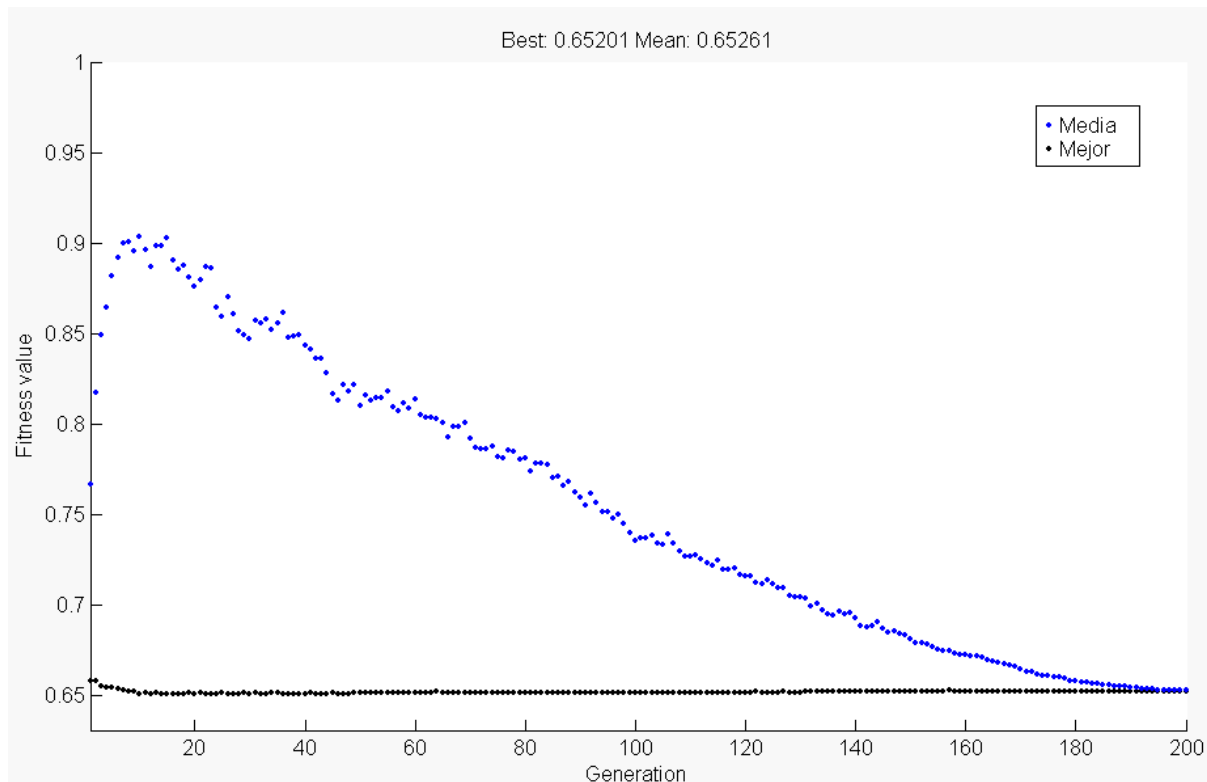


Ilustración 34: Evolución de la población con AG simple y mutación Gaussiana.

Como se puede observar en la ilustración 34, la distancia entre el valor medio de fitness de la población (azul) y el mejor individuo de la misma (negro), se mantiene constante. En el caso de la utilizar una función de mutación Gaussiana esta distancia no se mantiene constante, sino que va disminuyendo a medida que transcurren las rondas ejecutadas por AG, tal y como se muestra en la figura anterior. Se puede apreciar como el AG evoluciona, pero en ningún caso consigue anular ruido, lo único que consigue es atenuar el propio ruido creado por el propio campo secundario. Con ambas funciones de mutación se consiguen resultados similares, sin embargo con el tipo de mutación uniforme, se consiguen resultados ligeramente mejores. A continuación se muestra un gráfico con dicha función de mutación y su evolución.

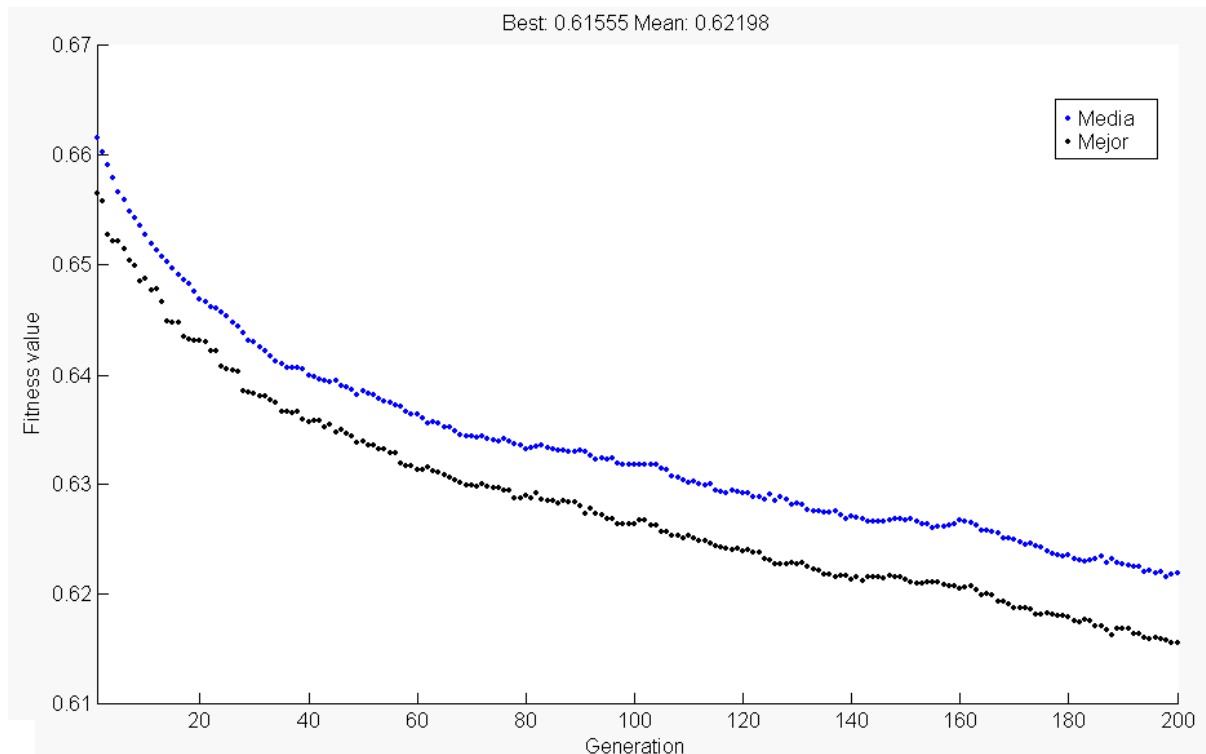


Ilustración 35: Evolución de la población con AG simple y mutación simple.

5.2.1.4. Conclusiones.

Como se ha podido observar, este tipo de estrategia no parece en absoluto adecuada para el control activo del ruido en un sistema real, ya que en ninguna de las simulaciones se ha conseguido disminuir el campo primario al aplicarle un campo secundario calculado por el propio AG. Como ya se ha comentado, el espacio de búsqueda es enorme, tenemos 44100 variables, con precisión decimal, en el rango $[-1, 1]$, lo cual complica bastante la evolución del AG hacia la solución, haciéndola inviable con 200 rondas de ejecución.

5.2.2. AG con señal invertida.

Con el fin de solventar los problemas que presenta la estrategia anterior, las cuales quedaron patentes en el mismo, se propone una nueva estrategia para el control activo del ruido usando AG. En este caso, al campo secundario se le sumará la señal del campo primario invertida, de tal modo que el AG solo deberá hacer pequeñas modificaciones para obtener una cancelación total del campo primario.

Dada la señal $X_{\text{Primario}}(t)$ se desea encontrar la señal $X_{\text{Solucion}}(t)$, tal que $X_{\text{Resultado}}(t) = X_{\text{Primario}}(t) + X_{\text{PrimarioInv}}(t) + X_{\text{Secundario}}(t) = 0$, donde $X_{\text{PrimarioInv}}(t)$ es el campo primario invertido. Se puede comprobar de modo analítico, que dicha solución en ausencia de otros factores (como ruido de fondo), es una señal con “todo ceros”.

5.2.2.1. AG con señal invertida en sala ideal.

Al igual que en apartados anteriores, con esta configuración no se simulará reverberación ni ruido de fondo. A continuación se muestran los resultados obtenidos.

		MUTACIÓN	
Tipo señal	Sala	Uniforme 0.5	Gaussiana
MONOTONAL	No reverberación no ruido	0,4690515	0,4923459

Tabla 17: Resultados AG con señal invertida en sala ideal.

Como se puede apreciar en el siguiente grafico, con este tipo de estrategia ambas funciones de mutación consiguen mejorar el resultado obtenido por el campo primario, en ausencia del secundario.

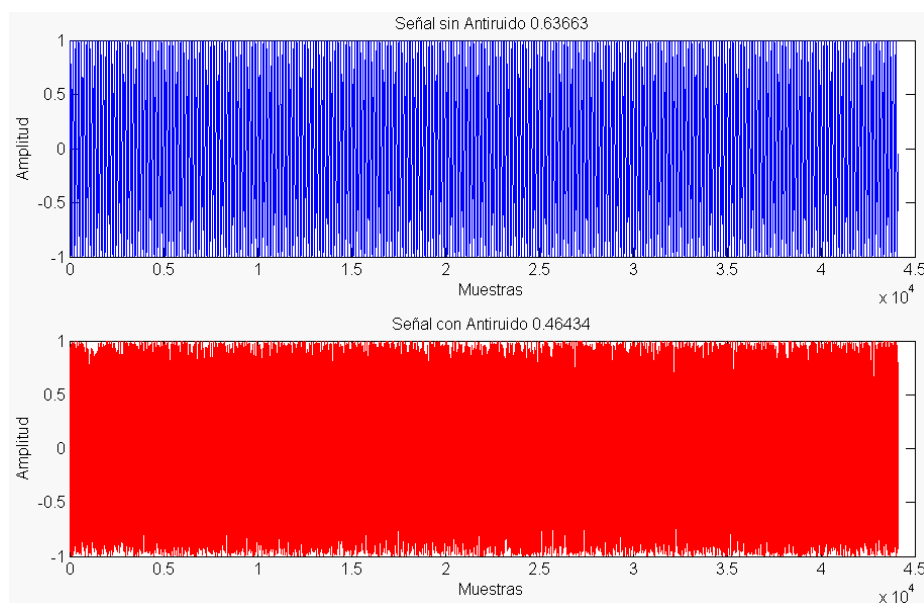


Ilustración 36: Resultados sin/con CAR para AG con señal invertida en sala ideal.

En cualquier caso, y aunque con este tipo de técnica, se logre mejorar al campo primario en ausencia del secundario, esta mejora no es perceptible cuando se reproducen ambos sonidos. Lo cual sugiere que la función de evaluación no es la más adecuada, sin embargo este problema se tratará posteriormente, en el apartado 5.2.4.

5.2.2.2. AG con señal invertida en sala con reverberación.

Al igual que en la simulación anterior, se muestran los resultados obtenidos con la estrategia actual y con una configuración de sala en la cual, sí existe reverberación, pero no ruido de fondo. Como se puede apreciar, los resultados siguen mejorando los obtenidos por el campo primario en ausencia del secundario, pero no se observa una atenuación clara del campo primario.

		MUTACIÓN	
Tipo señal	Sala	Uniforme 0.5	Gaussiana
MONOTONAL	Si reverberación no ruido	0,4692797	0,4906163

Tabla 18: Resultados AG con señal invertida en sala con reverberación y ruido de fondo.

En la ilustración 36, se puede apreciar de un modo mucho más claro como la función de evaluación o fitness no es adecuada.

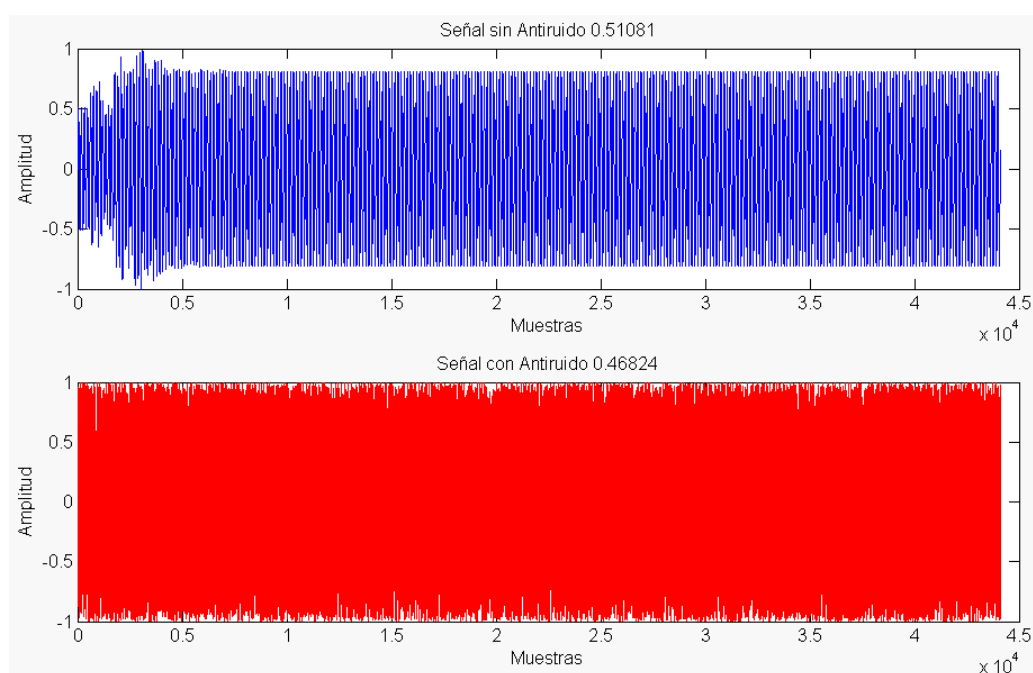


Ilustración 37: Resultados sin/con CAR para AG con señal invertida en sala con reverberación.

5.2.2.3. AG con señal invertida en sala con reverberación y ruido.

Al igual que en la simulación anterior, se muestran los resultados obtenidos con la estrategia actual y con una configuración de sala en la cual, sí existe reverberación y ruido de fondo, tal y como ocurrirá en una situación real. Como se puede apreciar los resultados siguen siendo poco alentadores.

Tipo señal	Sala	MUTACIÓN	
		Uniforme 0.5	Gaussiana
MONOTONAL	Si reverberación si ruido	0,4711851	0,4953251

Tabla 19: Resultados AG simple en sala con reverberación y ruido de fondo.

El mejor resultado al aplicar el sistema de control activo del ruido con esta técnica y según las simulaciones realizadas hasta al momento, es el siguiente.

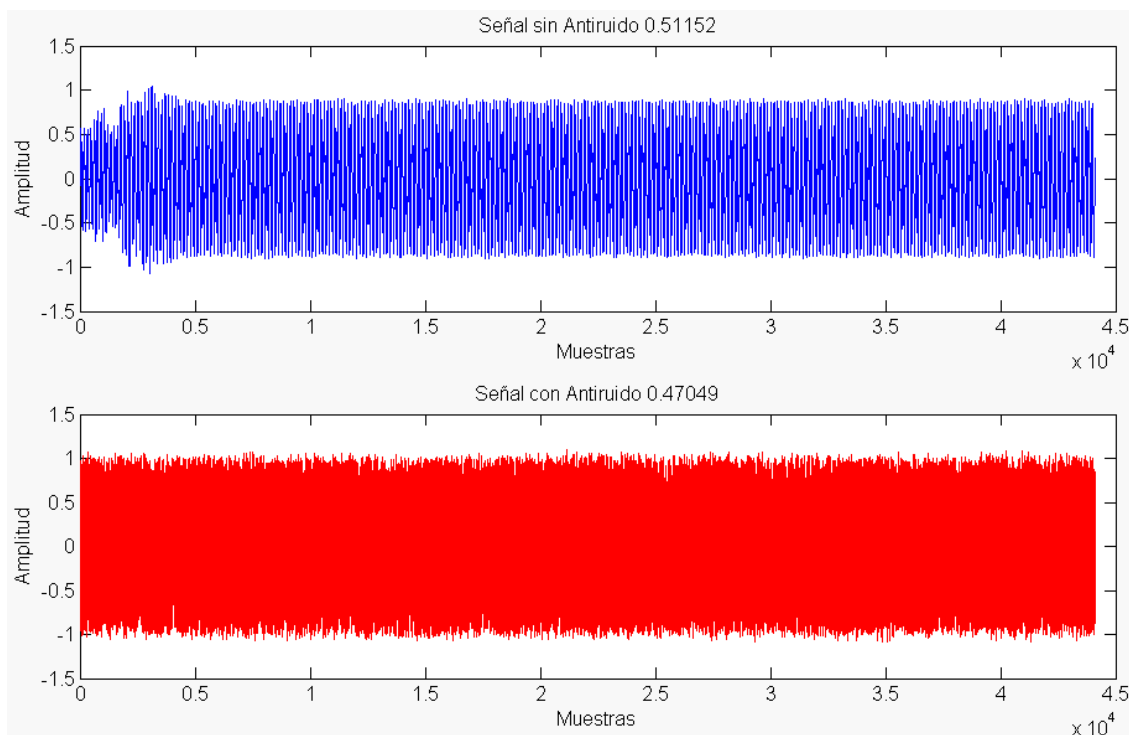


Ilustración 38: Resultados sin/con CAR para AG con señal invertida en sala con reverberación y ruido.

Al igual que en los casos anteriores, el fitness obtenido por el campo primario en ausencia del secundario es de 0.51152, mientras que en presencia de ambos se obtiene un fitness de 0.47049.

Sorprendente se puede apreciar como un menor fitness no implica necesariamente un menor ruido, por lo tanto en la siguiente estrategia se deberá corregir dicha función, para que guíe de un mejor modo la evolución del AG.

5.2.2.4. Conclusiones.

Como se ha tratado de demostrar empíricamente, con este tipo de estrategia, aunque se consigue mejorar los resultados obtenidos por el campo primario en ausencia del secundario, se ha concluido que no reduce ruido notablemente.

Al igual que con el otro tipo de estrategia (AG simple), el número de variables involucradas para encontrar la solución, sigue siendo demasiado grande. Sigue habiendo 44100 variables, en el rango $[-1,1]$. En la siguiente estrategia se intentará reducir este número al mínimo posible, de tal forma que se reduzca el espacio de búsqueda.

5.2.3. AG con filtros FIR.

Como se expuso en el capítulo 2, las estrategias convencionales para el control activo del ruido, se basan principalmente en estrategias de filtrado adaptativo, los cuales fueron propuestas por Widrow en [7]. En este trabajo Widrow elaboró un algoritmo de mínimos cuadrados (LMS) para determinar los coeficientes de un filtro adaptativo, a partir de un filtro Wiener de pesos fijos. En [8] además de estos algoritmos se pueden encontrar otras alternativas. Como se puede ver en la siguiente figura, en este tipo de filtros se cuenta con una señal de entrada $x(n)$, una señal de error $e(n)$, una señal de salida $y(n)$ y una señal deseada $d(n)$.

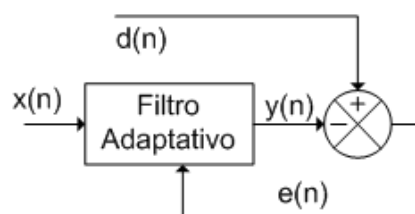


Ilustración 39: Estructura filtro adaptativo.

En este tipo de estrategia el filtro adaptativo, será un filtro FIR, el cual calculará la señal de salida del siguiente modo,

$$y(n) = \sum_{k=0}^M w(n)x(n-k)$$

Donde M representa el número de coeficientes del filtro FIR, y $w(n)$ representa cada uno de los coeficientes del mismo. Realizar un filtrado con un filtro digital FIR se puede ver en la siguiente figura.

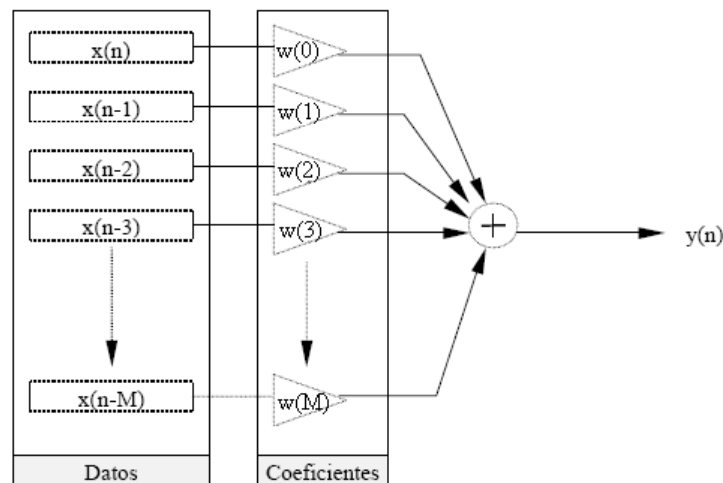


Ilustración 40: Estructura filtro digital tipo FIR.

Por su parte, el AG deberá calcular los M coeficientes del filtro FIR, de tal modo que al realizar el filtrado del campo primario $x(n)$, la señal resultante $y(n)$ (campo secundario) sumada al campo primario sea mínima. Es decir, tendremos el siguiente esquema (véase figura 41), el cual difiere ligeramente del mostrado anteriormente, ya que en este caso no contamos con la señal deseada $d(n)$.

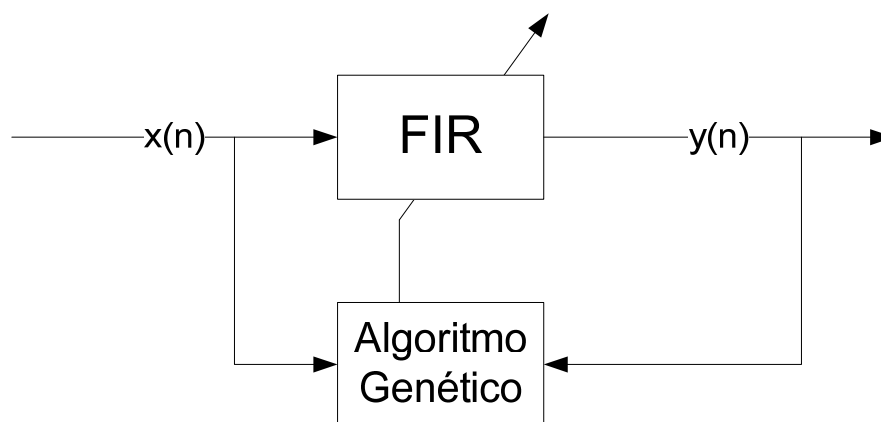


Ilustración 41: Estructura del filtro propuesto.

A partir del resultado obtenido en $y(n)$, la función de evaluación asignará un nivel de aptitud a cada individuo, de modo que los coeficientes del filtro FIR calculados por AG se aproxime a la mejor solución.

Como en las demás estrategias planteadas, se realizarán las simulaciones para las distintas configuraciones de la sala. Cabe destacar que el número de coeficientes del filtro FIR será fijo para todos los individuos de la población, por lo cual, para las simulaciones, se realizarán pruebas con un número variable de coeficientes, a saber 5, 10, 20 y 50.

Puesto que, los resultados obtenidos con este tipo de estrategia mejoran notablemente respecto a los obtenidos por las estrategias planteadas anteriormente, se realizarán simulaciones con distintas funciones de mutación, evaluación, así como con señales multitonales. Se probarán las siguientes funciones de mutación.

1. **Uniforme de parámetro X:** Cada gen del individuo tiene una probabilidad de X % de mutar. La mutación se realiza dentro del rango establecido para la población.
2. **Gaussiana de parámetros Scale y Shrink:** A cada gen del individuo se le suma un vector aleatorio, obtenido de una distribución Gaussiana de media 0. La desviación típica de la distribución, se controla mediante los parámetros "Scale" y "Shrink".
 - a. El parámetro Scale determina dicha desviación en la primera generación.
 - b. El parámetro "Shrink" determina como la desviación típica se va reduciendo a medida que avanzan las generaciones. En las simulaciones se utilizarán los parámetros por defecto, de tal modo que en la última generación la desviación típica sea igual a 0.

$$\sigma_k = \sigma_{k-1} \left(1 - \text{Shrink} \frac{k}{\text{Generaciones}} \right)$$

3. **Custom de parámetro X:** Cada gen del individuo tiene una probabilidad de X % de mutar. La mutación puede sumar o restar hasta el 50% del valor actual del gen a mutar.

4. **Custom1 de parámetro X:** Cada gen del individuo tiene una probabilidad de X% de mutar. La mutación puede sumar o restar hasta el 50% del valor de la mediana de ese gen para la población actual.

5.2.3.1. Señales monotonaes.

En este apartado se realizarán simulaciones para las distintas configuraciones de la sala, pero siempre con el mismo tipo de señal para generar el campo primario, en este caso serán señales monotonaes o tonos puros. Dada la señal $X_{\text{Primario}}(t)$ se desea encontrar la señal $X_{\text{Secundario}}(t)$, tal que $X_{\text{Resultado}}(t) = X_{\text{Primario}}(t) + \text{FIR}_M(X_{\text{Primario}}(t)) = 0$, es decir se desean encontrar los pesos de un filtro FIR con M coeficientes, tal que al filtrar el campo primario con dicho filtro, la nueva señal resultante anule al campo primario.

Con esta configuración el AG a utilizar tendrá las siguientes características:

- Tipo de campo primario: Tono puro de 300 Hz.
- Codificación: Decimal. Rango [-1 , 1]
- Tamaño de la población: 50 individuos.
- Numero de variables: [5, 10, 20, 50] dependiendo del número de coeficientes del filtro.
- Numero de generaciones: 200
- Operador de selección: Torneo, 3 individuos.
- Porcentaje de cruce: 90%
- Porcentaje de mutación: 10%
- Tipo de mutación: Uniforme, Gaussiana, Custom y Custom1 (Se probarán todas).
- Función de evaluación: $F_E = \frac{1}{F_s} \cdot \sum |x(t)| \quad \forall x(t) \in X_{\text{Resultado}}(t)$, donde F_s es la frecuencia de muestreo en este caso 44100.

Sala ideal.

Al igual que en apartados anteriores, con esta configuración no se simulará reverberación ni ruido de fondo. Como se comento anteriormente las pruebas se simularan para

distintas tasa de mutación, a saber, uniforme 0.1, uniforme 0.2, Gauss, custom 0.5 y custom1 0.5, los resultados se exponen a continuación.

Coefficientes	Uniforme 0.1	Uniforme 0.2	Uniforme 0.5	Gaussiana	Custom 0.5	Custom1 0.5
AG FIR 5	8,59256E-03	4,97148E-03	3,95307E-03	8,23295E-04	4,56746E-04	5,01630E-03
AG FIR 10	1,36557E-03	4,20775E-03	4,20701E-03	1,53457E-03	7,71321E-04	1,05698E-03
AG FIR 20	5,47429E-04	4,70439E-03	3,06986E-03	1,50550E-03	5,46373E-04	3,49574E-04
AG FIR 50	5,77039E-04	4,29466E-03	4,60240E-03	2,36962E-03	8,05633E-04	5,77021E-04

Tabla 20: Resultados AG FIR en sala ideal y señal monotonal.

Como se puede apreciar en la tabla 20, los resultados obtenidos por este tipo de técnica, mejoran de modo notable los obtenidos por las estrategias anteriormente planteadas en los apartados 5.2.1 y 5.2.2. A continuación se muestra uno de los “peores” resultados obtenidos (uniforme 0.1 y 5 coeficientes), con este tipo de técnica, lo cual pone en evidencia la diferencia entre la simulación obtenida solo con el campo primario, y la simulación obtenida al aplicar al campo primario uno secundario, calculado por el AG.

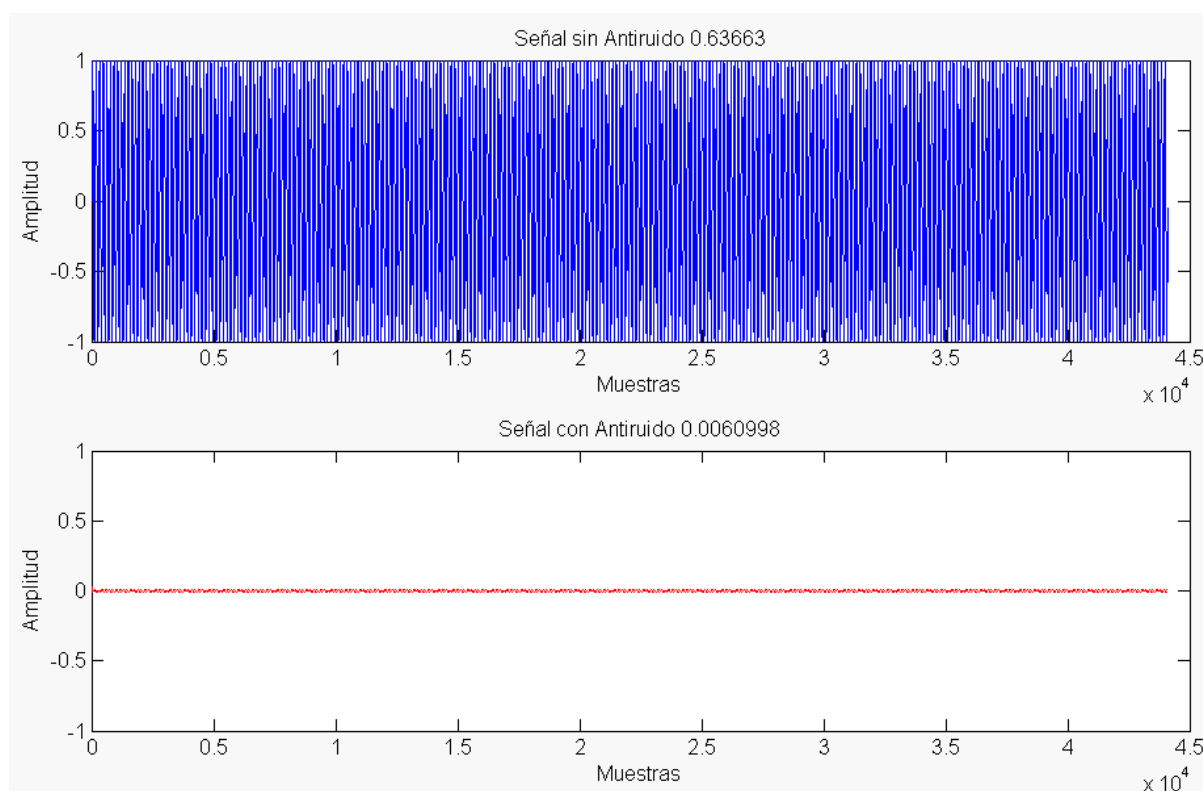


Ilustración 42: Resultados sin/con CAR para AG FIR en sala ideal y señal monotonal.

En el siguiente gráfico (ilustración 42) se puede apreciar, como la función de mutación que obtiene mejores resultados en términos de robustez, para las simulaciones con distinto número de

coeficientes en el filtro es la función custom, en cualquier caso, se debe esperar a los resultados de las simulaciones con otras configuraciones de sala.

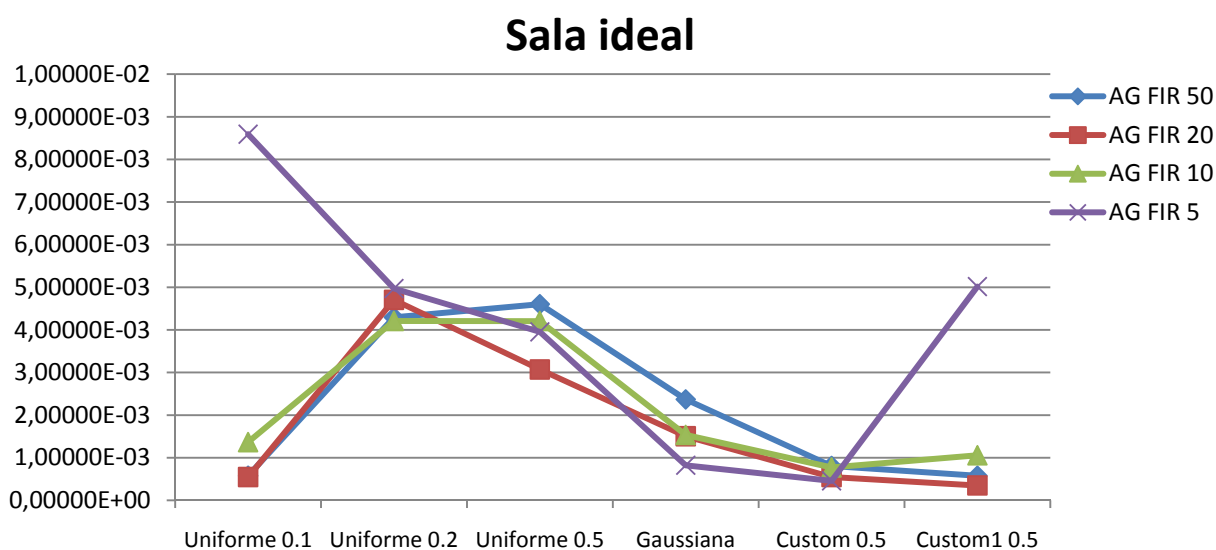


Ilustración 43: Comparativa AG FIR en sala ideal y señal monotonal.

Sala con reverberación.

Al igual que en la simulación anterior, se muestran los resultados obtenidos con la estrategia actual y con una configuración de sala en la cual, si existe reverberación pero no ruido de fondo. Como se puede apreciar, los resultados siguen mejorando los obtenidos por el campo primario en ausencia del secundario, observándose una atenuación clara del campo primario.

Coefficientes	Uniforme 0.1	Uniforme 0.2	Uniforme 0.5	Gaussiana	Custom 0.5	Custom1 0.5
AG FIR 5	8,82194E-03	6,86362E-03	3,21815E-03	1,02097E-03	8,02477E-04	1,87918E-03
AG FIR 10	5,74125E-04	3,47590E-03	3,01404E-03	1,87643E-03	5,11679E-04	5,00792E-04
AG FIR 20	7,53535E-04	4,13436E-03	4,95381E-03	2,14099E-03	1,26398E-03	9,74334E-04
AG FIR 50	3,06588E-03	4,33784E-03	6,26610E-03	5,83267E-03	3,40209E-03	3,55744E-03

Tabla 21: Resultados AG FIR en sala con reverberación y señal monotonal.

Como se puede observar en la tabla 21, los resultados obtenidos con este tipo de estrategia son similares a los obtenidos, en el apartado anterior, con otra configuración de sala.

A continuación se muestra una grafica (ilustración 43) con los resultados obtenidos por cada función de mutación. Comparando los resultados obtenidos con una configuración de sala ideal, en está

simulación los resultados empeoran de manera generalizada, lo cual es normal debido al aumento del grado de complejidad del campo primario a anular. Como ocurriera en el caso anterior, la función de mutación que obtiene mejores resultados, es la función custom. Así pues, esta función de mutación (custom) empieza a tener algunas propiedades interesantes. Habrá que esperar a realizar más simulaciones para obtener conclusiones que tengan un mayor respaldo en base a las simulaciones.

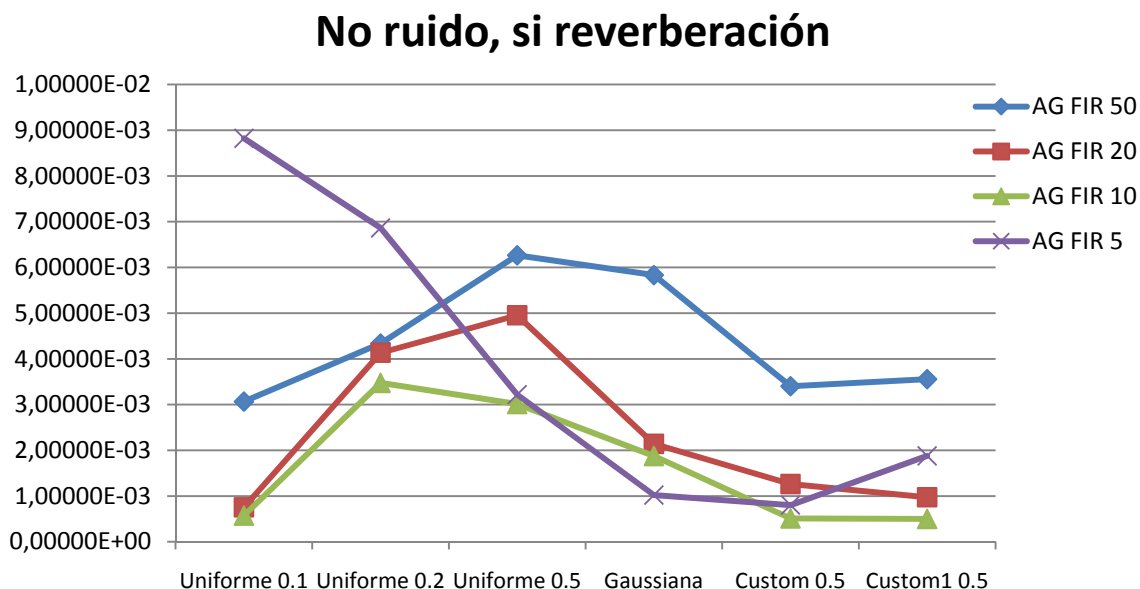


Ilustración 44: Comparativa AG FIR en sala con reverberación y señal monotonal.

En esta simulación los resultados obtenidos por el AG son muy similares a los obtenidos en el apartado anterior, por lo que no se muestra una figura comparativa entre los resultados obtenidos con sistema CAR activado y desactivado.

Sala con reverberación y ruido.

Al igual que en la simulación anterior, se muestran los resultados obtenidos con la estrategia actual y con una configuración de sala en la cual, sí existe reverberación y ruido de fondo, tal y como ocurrirá en una situación real. Como se puede apreciar los resultados siguen siendo positivos, aunque como es lógico, empeoran debido al ruido aleatorio de fondo simulado.

Coefficientes	Uniforme 0.1	Uniforme 0.2	Uniforme 0.5	Gaussiana	Custom 0.5	Custom1 0.5
AG FIR 5	3,38115E-02	2,78664E-02	2,83079E-02	2,56074E-02	2,57380E-02	2,82894E-02
AG FIR 10	3,82444E-02	4,23251E-02	3,66089E-02	3,32728E-02	2,49604E-02	3,27962E-02
AG FIR 20	5,88378E-02	6,04227E-02	6,12486E-02	6,52564E-02	2,50742E-02	6,30331E-02
AG FIR 50	1,17130E-01	1,16528E-01	1,19917E-01	1,28690E-01	3,30529E-02	1,15467E-01

Tabla 22: Resultados AG FIR en sala con reverberación y ruido de fondo y señal monotonal.

Como se puede apreciar en este caso, los AG no son capaces de anular el ruido aleatorio, ya que éste como se comentó anteriormente, es generado de modo aleatorio y es sumado a cada individuo en cada llamada a la función de evaluación.

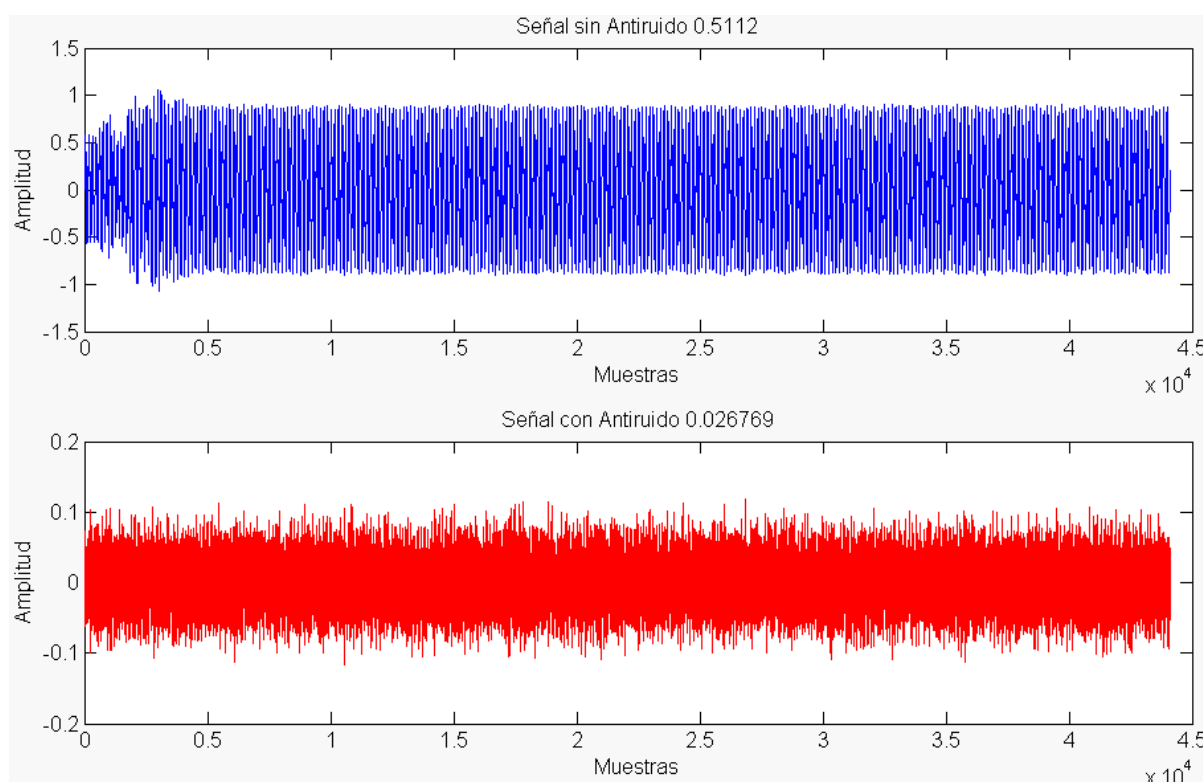


Ilustración 45: Resultados sin/con CAR para AG FIR en sala con reverberación y ruido, señal monotonal.

Como se puede apreciar, esta estrategia es capaz de anular el campo primario en su totalidad, lo que no consigue reducir, como es lógico, es el ruido aleatorio, el cual simula ruido de fondo que puede aparecer en una sala. El ruido aleatorio está en el rango [-0.1, 0.1], cabe destacar que las señales anteriormente mostradas, no se encuentran en la misma escala en el eje de las ordenadas. Esto es debido simplemente a la necesidad de mostrar con mayor detalle, el rango de la señal resultante, de aplicar al campo primario el campo secundario, calculado por el AG.

A continuación se muestra una gráfica (ilustración 45) con los resultados obtenidos por cada función de mutación. Comparando los resultados obtenidos, con una configuración de sala ideal, y con una en la que exista reverberación, en esta simulación los resultados empeoran de manera generalizada. Lo cual es normal debido al aumento del grado de complejidad del campo primario a anular, ya que en este caso además se cuenta con un ruido de fondo el cual es simulado. Como ocurriera en los casos anteriores, la función de mutación que obtiene mejores resultados, es la función custom, tal y como se puede observar en el siguiente gráfico. Así pues, esta función de mutación custom, ha sido la que ha obtenido mejores resultados para señales monotonaes.

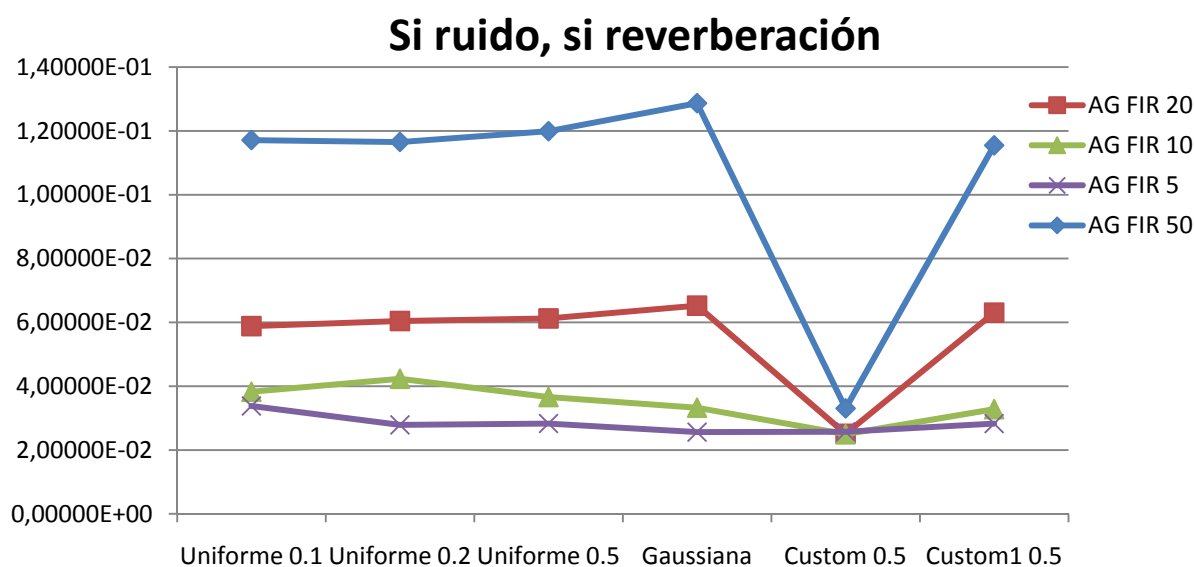


Ilustración 46: Comparativa AG FIR en sala con reverberación y ruido, señal monotonal.

5.2.3.2. Señales multitonaes.

En este apartado se realizarán simulaciones para las distintas configuraciones de la sala, pero siempre con el mismo tipo de señal para generar el campo primario, en este caso, a diferencia de lo que se mostró en la sección 5.2.3.1 serán señales multitonaes, y las funciones de mutación a evaluar serán las mismas.

Con esta configuración el AG a utilizar tendrá las siguientes características:

- Tipo de campo primario: Multitono de 100+200+300 Hz.
- Codificación: Decimal. Rango [-1 , 1]
- Tamaño de la población: 50 individuos.

- Numero de variables: [5, 10, 20, 50] dependiendo del número de coeficientes del filtro.
- Numero de generaciones: 200
- Operador de selección: Torneo, 3 individuos.
- Porcentaje de cruce: 90%
- Porcentaje de mutación: 10%
- Tipo de mutación: Uniforme, Gaussiana, Custom y Custom1 (Se probarán todas).
- Función de evaluación: $F_E = \frac{1}{F_S} \cdot \sum |x(t)| \quad \forall x(t) \in X_{\text{Resultado}}(t)$, donde F_S es la frecuencia de muestreo en este caso 44100.

Sala ideal.

Siguiendo con el mismo procedimiento aplicado en simulaciones anteriores, con esta configuración no se simulará reverberación ni ruido de fondo. Como se comento anteriormente las pruebas se simularan para distintas tasa de mutación, a saber, uniforme 0.1, uniforme 0.2, Gauss, custom 0.5 y custom1 0.5, los resultados se exponen a continuación.

Coeficientes	Uniforme 0.1	Uniforme 0.2	Uniforme 0.5	Gaussiana	Custom 0.5	Custom1 0.5
AG FIR 5	3,06254E-03	1,78856E-03	3,00799E-03	7,99480E-04	5,94457E-04	1,12842E-03
AG FIR 10	1,76174E-03	2,98194E-03	3,09516E-03	3,04381E-03	1,64889E-03	1,30909E-03
AG FIR 20	5,66346E-03	1,01128E-02	8,01969E-03	9,12311E-03	5,50023E-03	5,71859E-03
AG FIR 50	1,63684E-02	1,28721E-02	1,88342E-02	1,51230E-02	1,10908E-02	1,55230E-02

Tabla 23: Resultados AG FIR en sala ideal y señal multitonal.

Como se puede apreciar en el siguiente gráfico (ilustración 46), a diferencia generar el campo primario con una señal monotonal, en este caso se puede observar una clara diferencia entre usar un número distinto de coeficientes. Se distingue claramente como los mejores resultados se obtienen, usando 5 ó 10 coeficientes. Con 20 coeficientes los resultados empeoran, y usando 50, empeoran aún más. Esto probablemente se deba a que con un mayor número de variables, el espacio de búsqueda aumenta y por lo tanto se necesitan más de 200 rondas de evolución. Por otro lado, para un mismo número de coeficientes la función de mutación que presenta un mejor comportamiento, es la función custom, la cual ya presentó buenos resultados con señales monotonales.

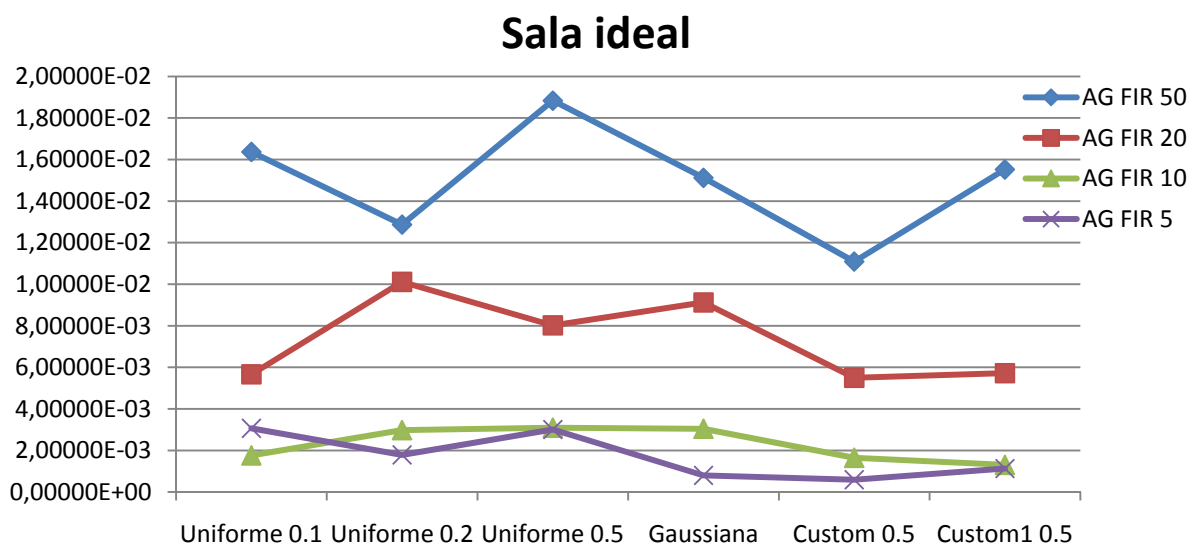


Ilustración 47: Comparativa AG FIR en sala ideal, señal multitoneal.

Sala con reverberación.

Al igual que en la simulación anterior, se muestran los resultados obtenidos con la estrategia actual y con una configuración de sala en la cual, si existe reverberación pero no ruido de fondo. Como se puede apreciar, los resultados siguen mejorando los obtenidos por el campo primario en ausencia del secundario, observándose una atenuación clara del campo primario. Los resultados para las distintas funciones de mutación se muestran a continuación.

Coefficientes	Uniforme 0.1	Uniforme 0.2	Uniforme 0.5	Gaussiana	Custom 0.5	Custom1 0.5
AG FIR 5	6,89461E-03	2,67204E-03	2,30350E-03	2,25867E-03	5,90573E-04	2,26846E-03
AG FIR 10	1,26314E-03	3,30156E-03	2,19424E-03	2,14634E-03	1,16941E-03	1,37108E-03
AG FIR 20	3,35643E-03	9,22105E-03	4,07209E-03	6,89628E-03	4,06399E-03	4,98227E-03
AG FIR 50	1,11017E-02	1,57040E-02	1,47966E-02	1,86962E-02	1,00492E-02	8,31811E-03

Tabla 24: Resultados AG FIR en sala con reverberación y señal multitoneal.

Al igual que en el caso anterior, los mejores resultados se obtienen con filtros de 5 y 10 coeficientes, con ese número de coeficientes los resultados, son bastante similares para cada una de las distintas funciones de mutación. Las funciones de mutación que obtienen mejores resultados, son las funciones custom y custom1.

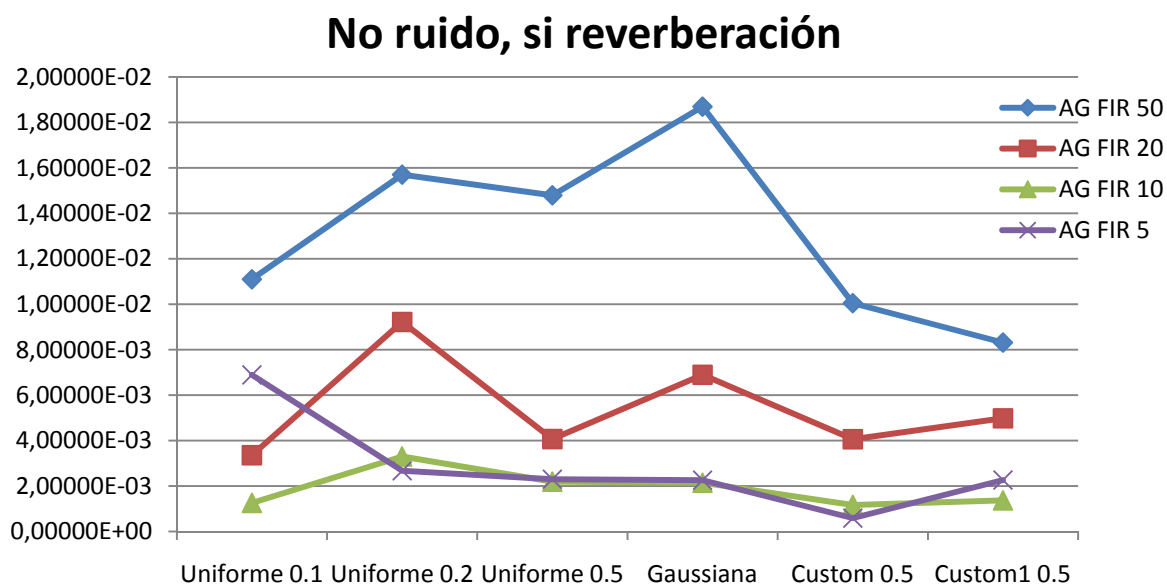


Ilustración 48: Comparativa AG FIR en sala con reverberación, señal multitonal.

Se observa una muy clara diferencia entre utilizar filtros con 20 o 50 coeficientes, como ya se comentó anteriormente utilizar un número mayor de coeficientes, hace mayor el espacio de búsqueda y eleva el tiempo de convergencia para encontrar una mejor solución.

Sala con reverberación y ruido.

Al igual que en la simulación anterior, se muestran los resultados obtenidos con la estrategia actual y con una configuración de sala en la cual, sí existe reverberación y ruido de fondo, tal y como ocurrirá en una situación real. Como se puede apreciar, los resultados siguen siendo favorables, aunque como es lógico, empeoran debido al ruido aleatorio de fondo simulado.

Coeficientes	Uniforme 0.1	Uniforme 0.2	Uniforme 0.5	Gaussiana	Custom 0.5	Custom1 0.5
AG FIR 5	2,83343E-02	2,32563E-02	2,36281E-02	2,16384E-02	2,26712E-02	2,41564E-02
AG FIR 10	3,05202E-02	3,23794E-02	3,14970E-02	2,65815E-02	2,16030E-02	3,06852E-02
AG FIR 20	4,62830E-02	5,23603E-02	5,13011E-02	5,11284E-02	2,11136E-02	5,07496E-02
AG FIR 50	1,09107E-01	1,15500E-01	1,07077E-01	1,18193E-01	2,84900E-02	1,10137E-01

Tabla 25: Resultados AG FIR en sala con reverberación y ruido, señal multitonal.

Los resultados obtenidos, son bastante similares a los obtenidos utilizando una señal monotonal como campo primario, tal y como se muestra en la siguiente ilustración. Al igual que en los otros

experimentos, en los cuales existía una configuración de sala, con ruido y reverberación, los resultados empeoran respecto a otras configuraciones, en las cuales no se simulan estos efectos.

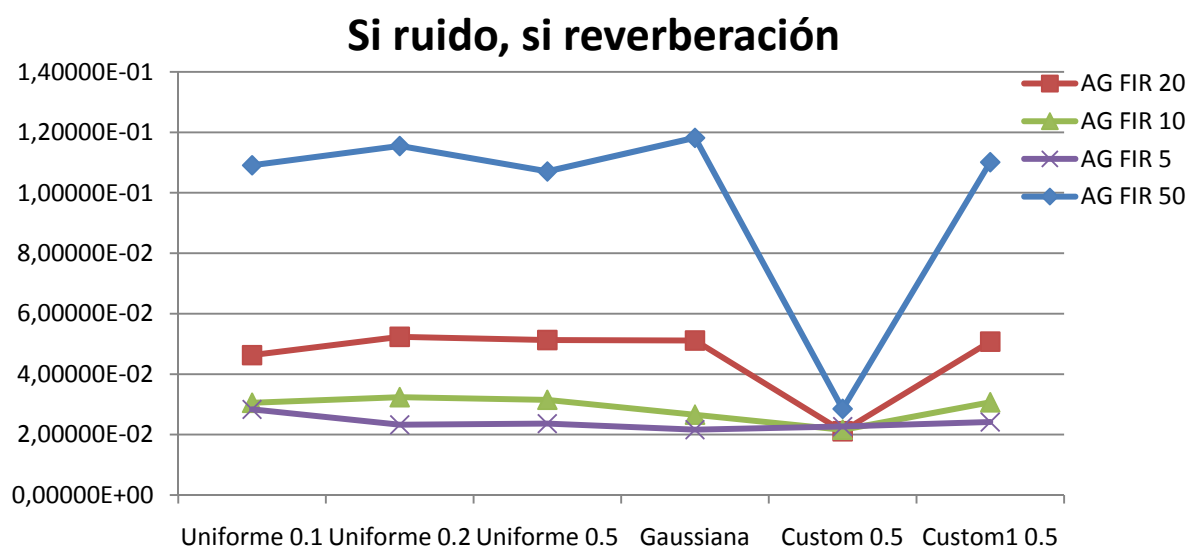


Ilustración 49: Comparativa AG FIR en sala con reverberación y ruido, señal multitonal.

Se puede apreciar como la función de mutación que presenta un mejor comportamiento, de modo independiente al número de coeficientes de los filtros, es la función custom, el resto de funciones de mutación ofrecen resultados, más dispersos dependiendo del número de coeficientes del filtro.

5.2.3.3. Conclusiones.

Como se ha tratado de demostrar, con este tipo de estrategia, se consigue una atenuación notable cuando el sistema CAR se encuentra activado. De hecho se ha comprobado como con este tipo de estrategia, se consigue anular casi completamente el campo primario, para las distintas configuraciones de sala.

Por otro lado, se han evaluado distintas funciones de mutación, quedando patente que la función que ofrece mejores resultados, es la función de mutación custom. Las otras funciones de mutación, ofrecen en general resultados mucho más dispersos.

Se ha puesto de manifiesto que a medida que aumentamos el número de coeficientes del filtro, el AG tarda más tiempo en encontrar soluciones equivalentes a las encontradas por AG, con un número menor de coeficientes, lo cual es completamente lógico, ya que, al aumentar el número de coeficientes del filtro FIR, se aumenta también el espacio de búsqueda. En cualquier caso, con este

tipo de estrategia, se ha reducido el espacio de búsqueda respecto a las anteriores estrategias probadas, ya que se ha pasado de 44100 variables a como máximo 50, lo cual es una reducción muy significativa.

5.2.4. Función de evaluación.

Tal y como se puso de manifiesto en el apartado 5.2.2, la función de evaluación, en algunas ocasiones, no refleja fielmente el nivel de ruido que percibiría un ser humano, ya que señales que presentan un ruido más perceptible por los humanos, obtienen mejores evaluaciones en la función de evaluación. Este es el caso del siguiente resultado, esto se ha comprobado de modo experimental reproduciendo ambas señales. Se pueden apreciar diferencias de intensidad muy notables (véase ilustración 49).

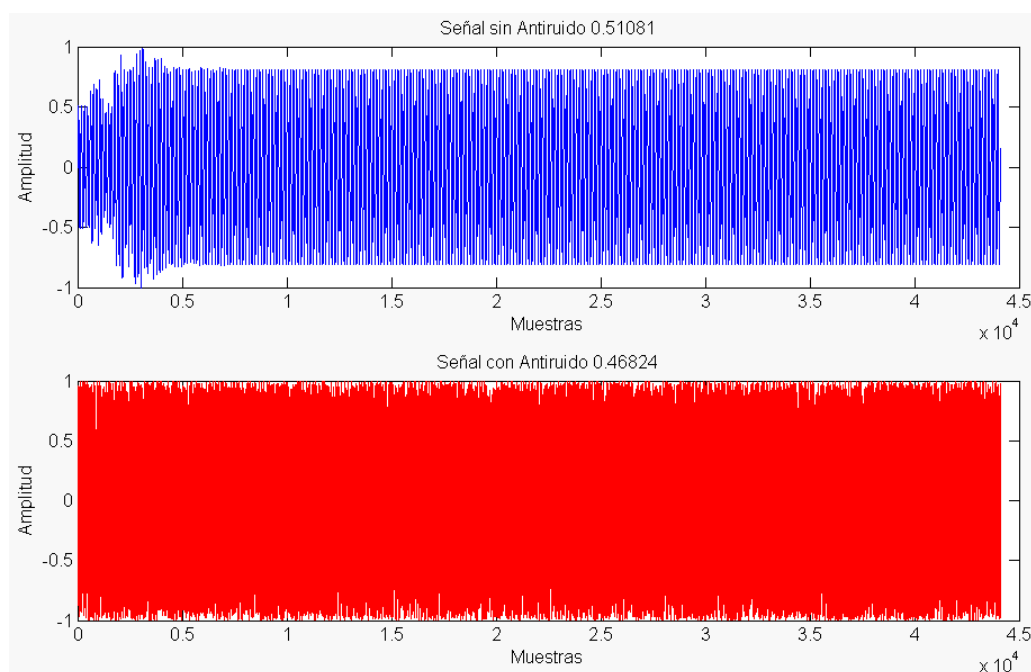


Ilustración 50: Resultados sin/con CAR para AG con señal invertida en sala con reverberación.

Como se desprende de la figura anterior, la segunda señal obtiene una evaluación de 0.46824, mientras que la primera señal obtiene una evaluación de 0.51081, siendo esta segunda evaluación un peor resultado, ya que estamos minimizando. Estos hechos ponen de manifiesto que la función de evaluación siguiente, no es más adecuada para aplicar a un sistema de control activo del ruido, basado en algoritmos genéticos.

$$F_E = \frac{1}{F_S} \cdot \sum |x(t)| \quad \forall x(t) \in X_{\text{Resultado}}(t)$$

La medición del ruido se encuentra en estado avanzado, existiendo hoy en día dispositivos que permiten su medición en tiempo real, dichos dispositivos, se conocen como sonómetros, en los capítulos 5, 9 y 11 de [10] podemos encontrar una amplia explicación sobre cómo se debe medir el ruido. Puesto que en las simulaciones no se podrá contar con este tipo de dispositivos, otra opción perfectamente válida es realizar una estimación del nivel de ruido que contiene una señal a través de distintos filtros. En [11] se presenta una guía de cómo diseñar un sonómetro con ponderación A, en MATLAB. Así pues, para la función de evaluación, utilizaremos el programa implementado en MATLAB denominado “estimateLevel.m”, el cual nos devuelve el nivel de ruido con ponderación A de una señal dada. Sin profundizar en la implementación, se puede decir que para obtener el nivel en decibelios con ponderación A de una señal dada, basta con filtrar la señal de entrada con un filtro A. El efecto final de éste sobre la señal de entrada, es amplificar o atenuar determinadas frecuencias, en la figura siguiente se muestra dicha atenuación.

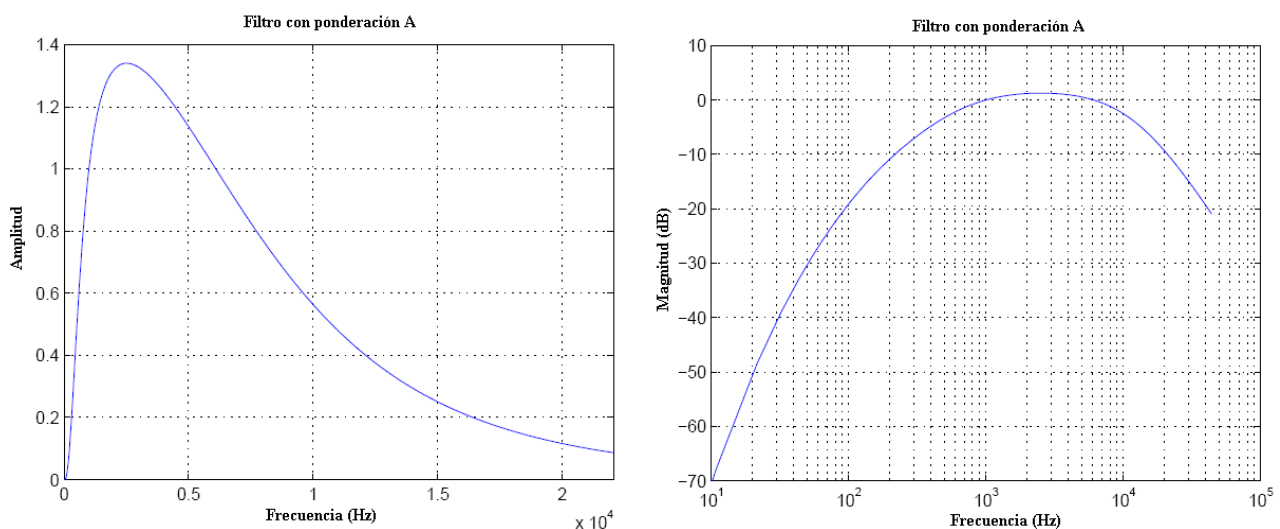


Ilustración 51: Filtro con ponderación A.

Así pues, los experimentos realizados en el apartado 5.2.2 se repetirán esta vez con la nueva función de evaluación, los experimentos sólo se realizarán para las funciones de mutación uniforme 0.5 y gaussiana. Por otra lado, solamente se realizarán los experimentos para una configuración de sala en la cual exista reverberación y ruido de fondo, ya que simplemente se desea comprobar cuál es el resultado de la función de evaluación. En la siguiente tabla (tabla 26) se muestran los resultados obtenidos en media (10 experimentos) por cada función de mutación.

Tipo señal	Sala	Uniforme 0.5	Gaussiana
MULTITONAL	Si reverberación si ruido	88,61926	87,96444

Tabla 26: Resultados AG con señal invertida en sala con reverberación y ruido, señal multitoneal.

Como se puede apreciar en la siguiente imagen (ilustración 51), en este caso, la señal resultante de aplicar conjuntamente el campo primario y el secundario, obtiene (en todos los casos), un peor resultado que la señal resultante de aplicar solamente el campo primario.

Por lo tanto, esta función de evaluación valora de un modo más similar a como lo haría un humano que escuchase ambas señales. El resultado que obtiene el campo primario en solitario es de 71.75 dBA, mientras que la señal resultante de aplicar ambos campos a la vez, obtiene un resultado de 88.54 dBA, lo cual es una clarísima diferencia, y más si tenemos en cuenta que una diferencia en 20 dB representa un aumento de cien veces en magnitud. En este caso entre ambas señales hay una diferencia de 16.79 dB.

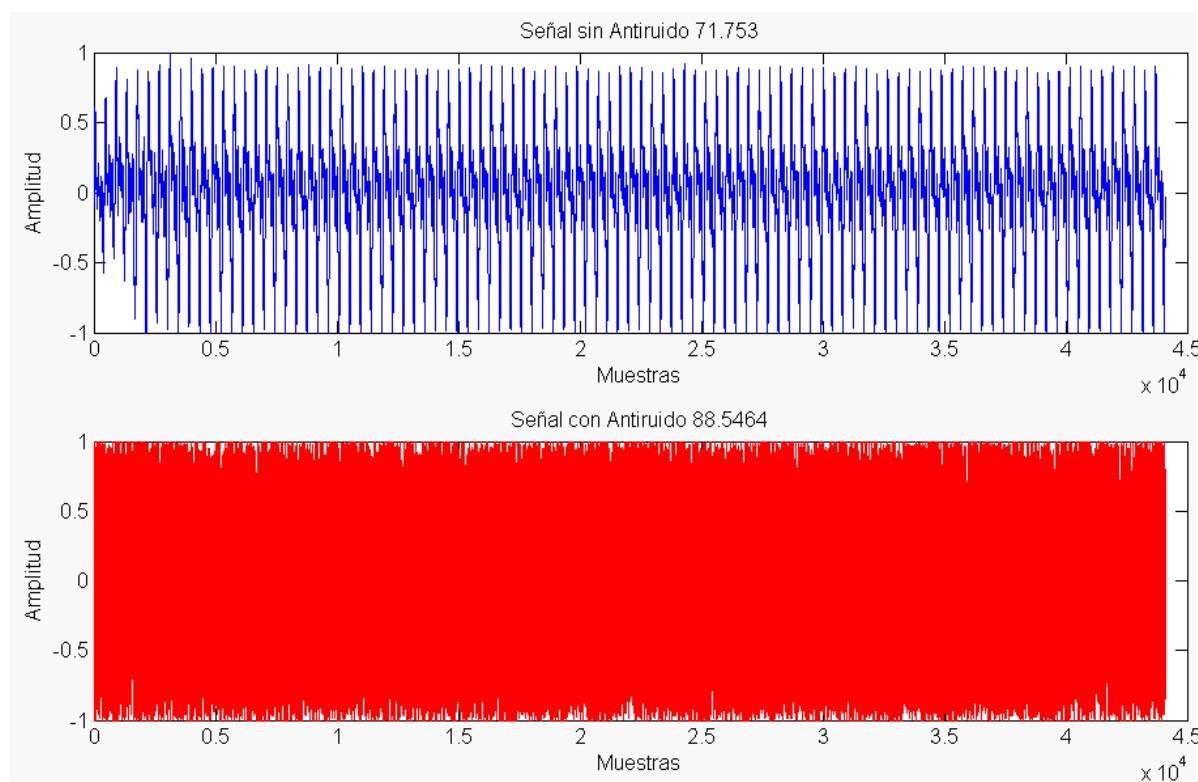


Ilustración 52: Resultados sin/con CAR para AG con señal invertida en sala con reverberación y ruido.

5.3. Conclusiones.

A lo largo de este capítulo se ha utilizado el simulador construido en MATLAB, tal y como se comentó en la sección 4.3.1. Dicho sistema ha permitido evaluar distintas estrategias de AG aplicadas al control activo del ruido, con distintas configuraciones de sala; sala ideal, sala con reverberación y sala con reverberación y ruido.

Posteriormente se han evaluado las tres estrategias presentadas en la sección 4.3.3 para el control activo del ruido, a saber, AG simple, AG con señal invertida y AG con filtros FIR. Como se expuso en cada uno de los apartados correspondientes a cada estrategia, las dos primeras estrategias obtienen malos resultados, ya que ni tan siquiera consiguen una mejora mínima. Por otro lado, y dependiendo de la configuración de la sala, el AG con filtros FIR presentan muy buenos resultados en las simulaciones, por lo que parecen la mejor opción para utilizarse en un sistema real. En cualquier caso, las tres estrategias se deberán probar en un sistema real, con el fin de asegurar, que las conclusiones obtenidas a partir de los datos de las simulaciones son las correctas.

Adicionalmente y a medida que las estrategias han presentado mejores resultados, se han evaluado distintas funciones de mutación, resultando la función de mutación custom la que mejores resultados ha obtenido para un número distinto de coeficientes del filtro FIR.

Finalmente, y puesto que a lo largo de las simulaciones se detectó que la función de evaluación, no evaluaba de un modo correcto el nivel de ruido presente en una señal, se decidió cambiar ésta por otro tipo de función, que permitiera una evaluación del nivel en dB de ruido con ponderación A. Dicha función de evaluación permitió mejorar los resultados notablemente, tal y como se recoge en 5.2.4.

Obtenidas todas las conclusiones anteriores, procedentes de las más de 1500 simulaciones realizadas en este capítulo, queda contrastar el sistema en un entorno real.

CAPÍTULO 6. Sistemas de control en entorno real.

6.1. Introducción

A lo largo de este capítulo se evaluarán en un entorno real los algoritmos propuestos en el capítulo 4, y con los cuales ya se realizaron simulaciones en el capítulo 5. El principal objetivo es observar en un entorno real, el comportamiento de los distintos algoritmos propuestos. Como ya se comentó en capítulos anteriores, realizar una evaluación de dichos algoritmos en un entorno real, supone un incremento en tiempo y coste, por lo que a diferencia de los experimentos realizada en capitulo anterior. En este caso cada experimento no se repetirá 10 veces para posteriormente obtener el valor medio. Al igual que sucediera en el capítulo anterior, se comenzará la experimentación con señales monotonaes, posteriormente se experimentará con señales multitonaes y finalmente se experimentará con señales de ruidos reales, como puede ser el de un ventilador.

6.2. Señales monotonaes.

En este apartado se realizarán experimentos en una sala real, siempre con el mismo tipo de señal para generar el campo primario, en este caso serán señales montonaes o tonos puros. Se probarán las tres técnicas para el CAR con AG planteadas en el capítulo anterior, la función mutación a utilizar será Gaussiana, mientras que la función de evaluación será la siguiente:

$$F_E = \frac{1}{F_S} \cdot \sum |x(t)| \quad \forall x(t) \in X_{\text{Resultado}}(t) \quad [6.2.1]$$

6.2.1. AG simple.

En este tipo de técnica tal y como se planteó en el apartado 5.2.1, cada individuo de la población del AG, estará formado por 44100 variables, en un rango [-1,1]. Dada la señal $X_{\text{Primario}}(t)$ se desea encontrar la señal $X_{\text{Solucion}}(t)$, tal que $X_{\text{Resultado}}(t) = X_{\text{Primario}}(t) + X_{\text{Secundario}}(t) = 0$. Los resultados de las simulaciones no fueron buenos, con este experimento se desea contrastar la validez de dichas simulaciones.

Con esta configuración el AG a utilizar tendrá las siguientes características:

- Tipo de campo primario: Tono puro de 300 Hz.
- Codificación: Decimal. Rango [-1 , 1]
- Tamaño de la población: 50 individuos.
- Numero de variables: 44100.
- Numero de generaciones: 200
- Operador de selección: Torneo, 3 individuos.
- Porcentaje de cruce: 90%
- Porcentaje de mutación: 10%
- Tipo de mutación: Gaussiana.
- Función de evaluación: $F_E = \frac{1}{F_s} \cdot \sum |x(t)| \quad \forall x(t) \in X_{\text{Resultado}}(t)$, donde F_s es la frecuencia de muestreo en este caso 44100.

Los resultados tras 200 rondas de ejecución, se muestran en la siguiente gráfica (ilustración 53), el mejor individuo obtiene un fitness de 0.1695866, mientras que la media de la población obtiene un fitness de 0.1701371 en la última ronda de evaluación.

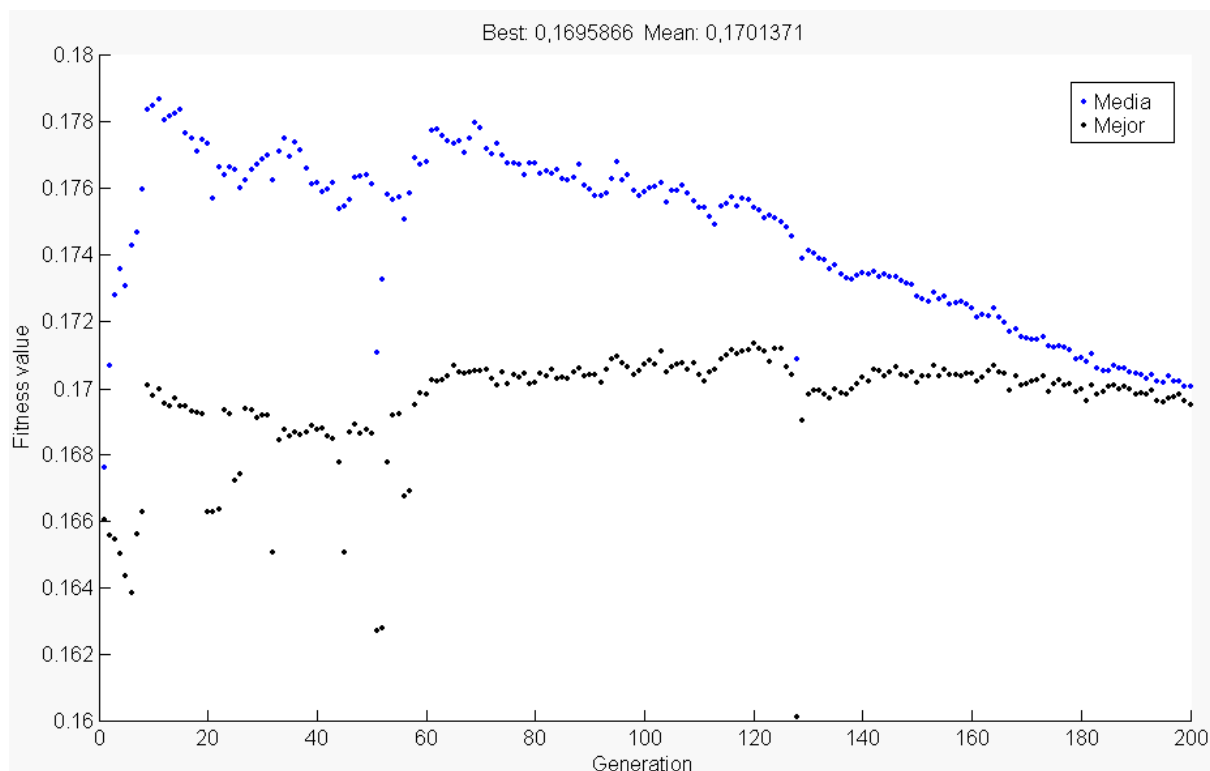


Ilustración 53: Evolución AG con señal invertida en entorno real, señal monotonal y mutación Gaussiana.

Como se puede observar en la figura anterior, la evolución seguida por AG es bastante atípica, ya que en vez de mejorar los resultados comienzan a empeorar a medida que avanzan las rondas. Por otro lado se puede observar, como en determinadas rondas se obtiene resultados, que mejoran notablemente los anteriores y posteriormente dichos resultados empeoran drásticamente, esto se puede deber a distintos factores:

- El principal es el ruido de fondo de la sala, el cual es aleatorio.
- Por otra parte, la estrategia elegida, como se mostró en las simulaciones realizadas en el apartado 5.2.1, no es adecuada para un sistema CAR basado en AG, principalmente por el enorme espacio de búsqueda que genera dicha estrategia.
- La función de evaluación, no refleja fielmente el nivel de ruido presente en una señal, así como tampoco refleja la percepción que tendría un humano al oírla. Este hecho se comentó ampliamente en la sección 5.2.4.

A continuación se muestra una comparativa entre el mejor resultado obtenido por este tipo de técnica, y la señal captada solamente con el campo primario, es decir sin activar el sistema de CAR.

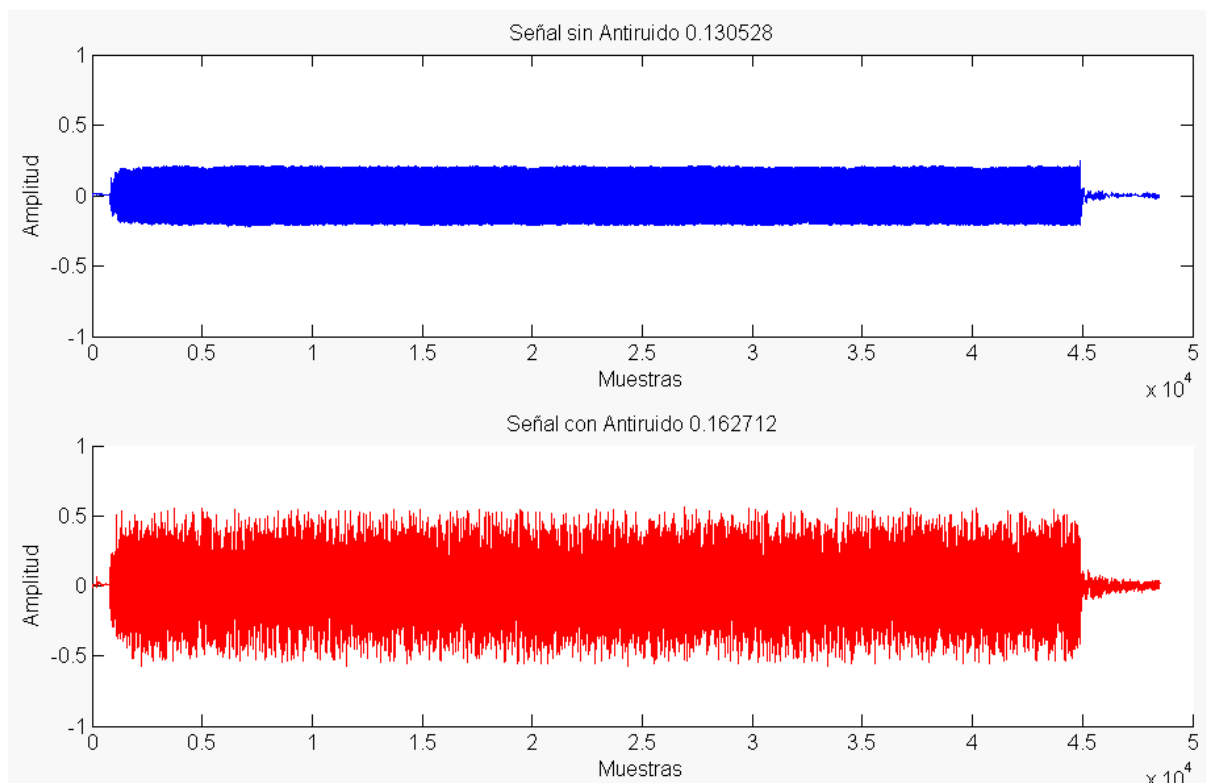


Ilustración 54: Resultados sin/con CAR para AG simple en entorno real.

Como se puede apreciar en la imagen anterior, los resultados obtenidos no son buenos, ya que el sistema CAR con este tipo de estrategia empeora los resultados obtenidos sin utilizar dicho sistema, es decir, con el sistema CAR en funcionamiento se obtiene un mayor ruido que sin él. Este dato, confirma las simulaciones realizadas en el apartado 5.2.1 del capítulo anterior, así como la necesidad de utilizar otro tipo de estrategias, para desarrollar un sistema CAR basado en AG.

6.2.2. AG con señal invertida.

En este tipo de técnica, tal y como se planteó en el apartado de simulación 5.2.2, cada individuo de la población del AG, estará formado por 44100 variables, en un rango [-1,1]. Dada la señal $X_{\text{Primario}}(t)$ se desea encontrar la señal $X_{\text{Solucion}}(t)$, tal que $X_{\text{Resultado}}(t) = X_{\text{Primario}}(t) + X_{\text{PrimarioInv}}(t) + X_{\text{Secundario}}(t) = 0$, donde $X_{\text{PrimarioInv}}(t)$ es el campo primario invertido. Los resultados de las simulaciones con este tipo de estrategia tampoco fueron buenos, aunque mejoraron a los obtenidos con la estrategia anterior. Con este experimento se desea comprobar, cual es su comportamiento en un entorno real.

La configuración del AG es la misma (excepto en la estrategia) que en el apartado anterior, es decir campo primario es generado por señales monotonaes, misma función de mutación, evaluación, así como los mismos parámetros para la población del AG.

Tras 200 rondas de ejecución los resultados se muestran en la siguiente gráfica (ilustración 55), el mejor individuo obtiene un fitness de 0.09302813, mientras que la media de la población obtiene un fitness de 0.09426924, ambos resultados en la última ronda de evaluación.

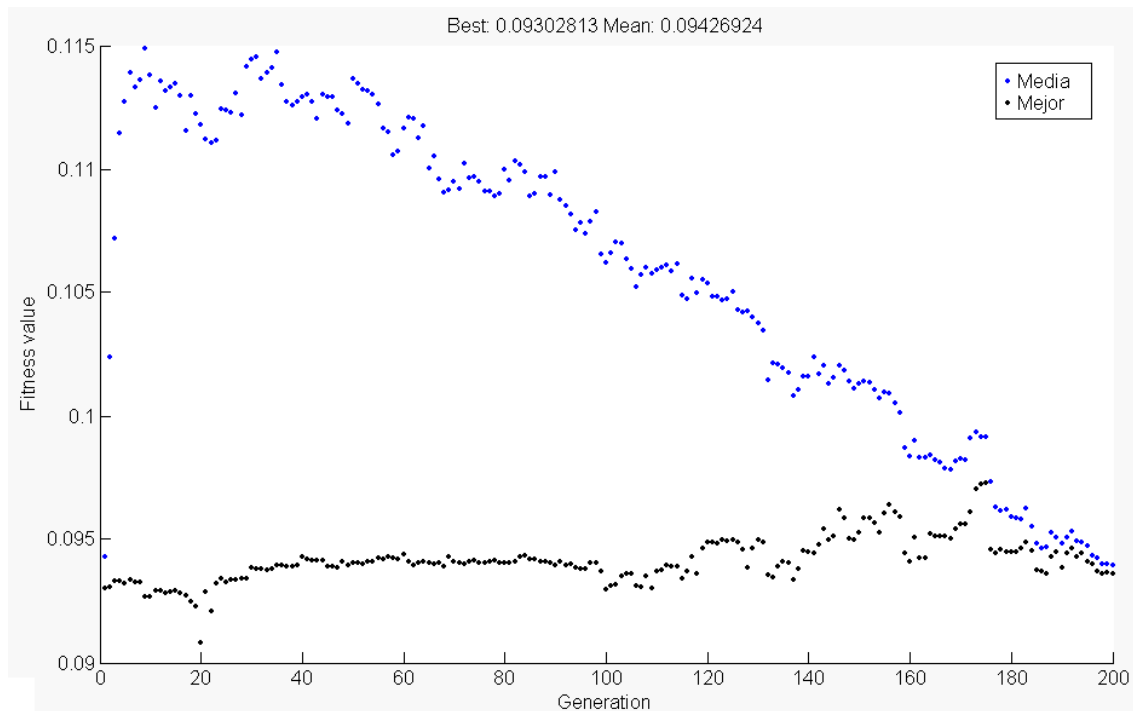


Ilustración 55: Evolución AG simple entorno real, señal monotonal y mutación Gaussiana.

Como se puede apreciar claramente, este tipo de estrategia no evoluciona, ya que los resultados ofrecidos por el mejor individuo en ocasiones mejoran notablemente, para posteriormente empeorar en igual medida. Esto se debe a los mismos factores comentados en el apartado anterior, y más concretamente al ruido de fondo existente en la sala.

A continuación se muestra una comparativa, entre el mejor resultado obtenido por este tipo de técnica, y la señal captada solamente con el campo primario, es decir sin activar el sistema de CAR.

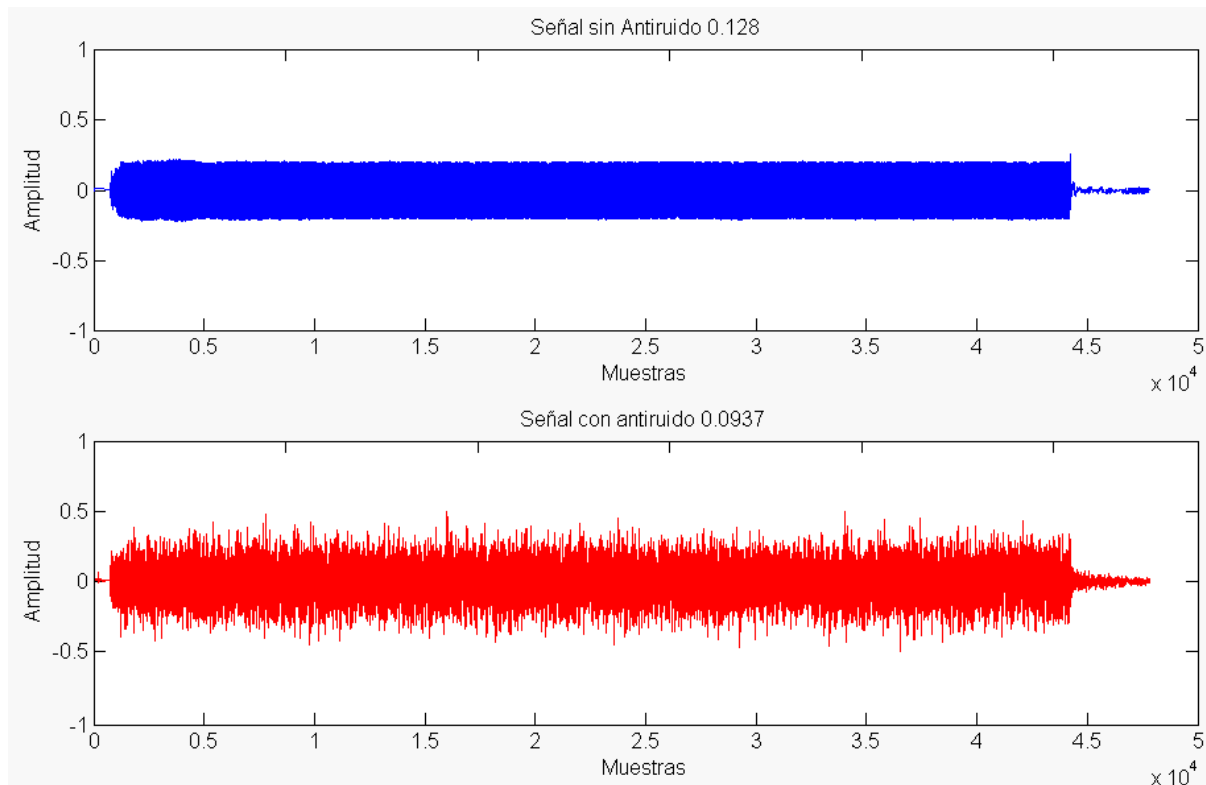


Ilustración 56: Resultados sin/con CAR para AG con señal invertida en entorno real.

Como se puede observar en la imagen anterior, los resultados obtenidos no son buenos, ya que aunque mejoran los resultados obtenidos por AG simple, con esta estrategia el sistema CAR empeora los resultados que se obtienen sin utilizar dicho sistema. Este dato confirma las simulaciones realizadas en el apartado 5.2.2 del capítulo anterior.

Por otro lado, se puede observar como la función de evaluación no refleja fielmente el nivel de ruido captado por el micrófono, lo cual provoca que el AG no converja hacia una solución, este hecho también se puso de manifiesto en las simulaciones realizadas en el apartado 5.2.4.

La conclusión tras las pruebas realizadas es que este tipo de técnica se debe de descartar para construir un sistema CAR.

6.2.3. AG con filtros FIR.

Este tipo de estrategia fue la que mejor resultados obtuvo en las simulaciones, por lo que se quiere comprobar su efectividad en un entorno real. Tal y como se comentó en el apartado 5.2.3, dada la señal $X_{\text{Primario}}(t)$ se desea encontrar la señal $X_{\text{Secundario}}(t)$, tal que

$X_{\text{Resultado}}(t) = X_{\text{Primario}}(t) + \text{FIR}_M(X_{\text{Primario}}(t)) = 0$, es decir se desean encontrar los pesos de un filtro FIR con M coeficientes, tal que al filtrar el campo primario con dicho filtro, la nueva señal resultante anule al campo primario. En este caso puesto que se trata de un experimento en un entorno real y no de una simulación, lo que se pretende es que al emitir la señal filtrada (campo secundario) ésta atenúe la señal emitida como campo primario.

Con esta configuración el AG a utilizar tendrá las siguientes características:

- Tipo de campo primario: Monotono de 300 Hz.
- Codificación: Decimal. Rango [-10 , 10]
- Tamaño de la población: 50 individuos.
- Numero de variables: 5, en este caso solo se prueba con filtro FIR de 5 coeficientes.
- Numero de generaciones: 200
- Operador de selección: Torneo, 3 individuos.
- Porcentaje de cruce: 90%
- Porcentaje de mutación: 10%
- Tipo de mutación: Gaussiana.
- Función de evaluación: $F_E = \frac{1}{F_s} \cdot \sum |x(t)| \quad \forall x(t) \in X_{\text{Resultado}}(t)$, donde F_s es la frecuencia de muestreo en este caso 44100.

Tras 200 rondas de ejecución los resultados se muestran en la siguiente gráfica, el mejor individuo obtiene un fitness de 0.0073113, mientras que la media de la población obtiene un fitness de 0.014227, ambos resultados en la última ronda de evaluación.

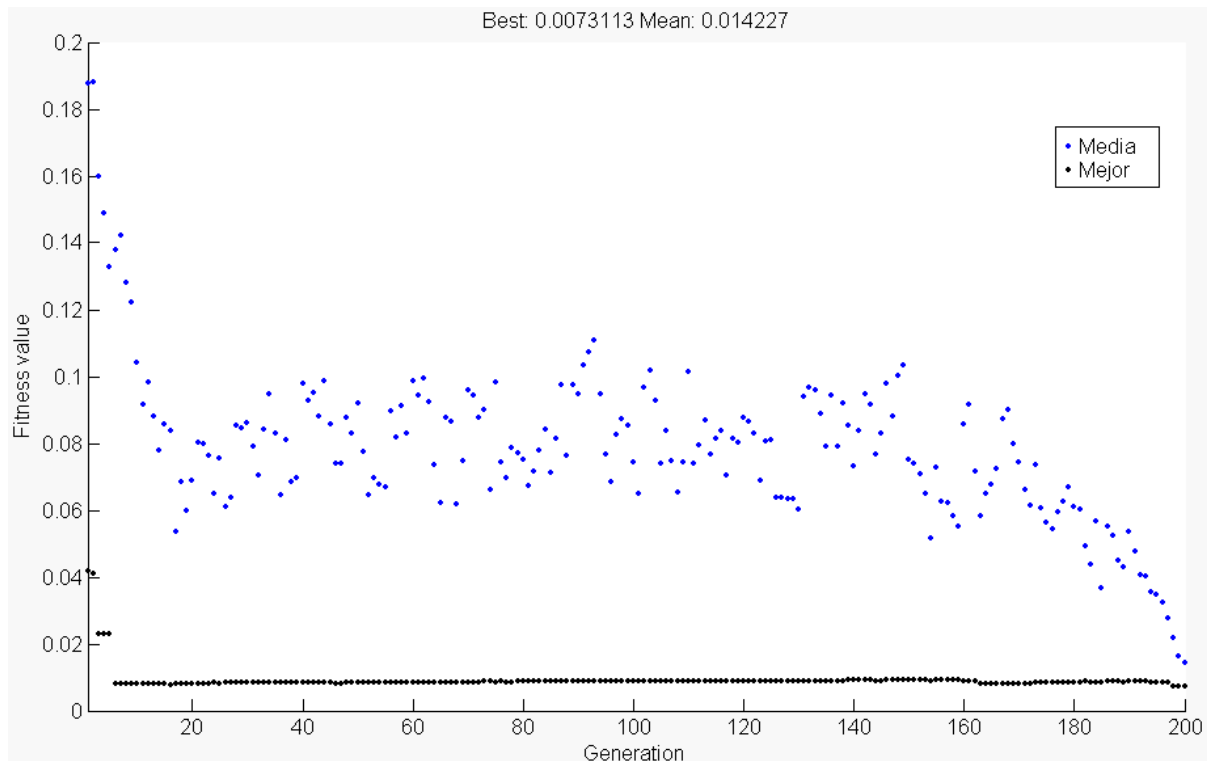


Ilustración 57: Evolución AG FIR 5 en entorno real, señal monotonal y mutación Gaussiana.

En la figura anterior, se puede ver como la evolución en este caso es mucho más uniforme, desde el comienzo se obtienen buenos resultados con evaluaciones de 0.04, dicho resultado es mucho mejor que el mejor resultado obtenido con las estrategias planteadas anteriormente. En este caso no se aprecian esas variaciones del mejor individuo, (como las que se pueden apreciar en los apartados 6.2.1 y 6.2.2), así pues, ya que se usan los mismos parámetros de configuración (función de evaluación, mutación, selección, etc...) se puede deducir que dichas variaciones se producen por el tipo de estrategia elegida. Y por consiguiente **las estrategias AG simple y AG con señal invertida implican un espacio de búsqueda enorme, lo cual provoca la falta de convergencia del AG.**

A continuación se muestra una comparativa, entre el mejor resultado obtenido por este tipo de técnica, y la señal captada solamente con el campo primario, es decir sin activar el sistema de CAR.

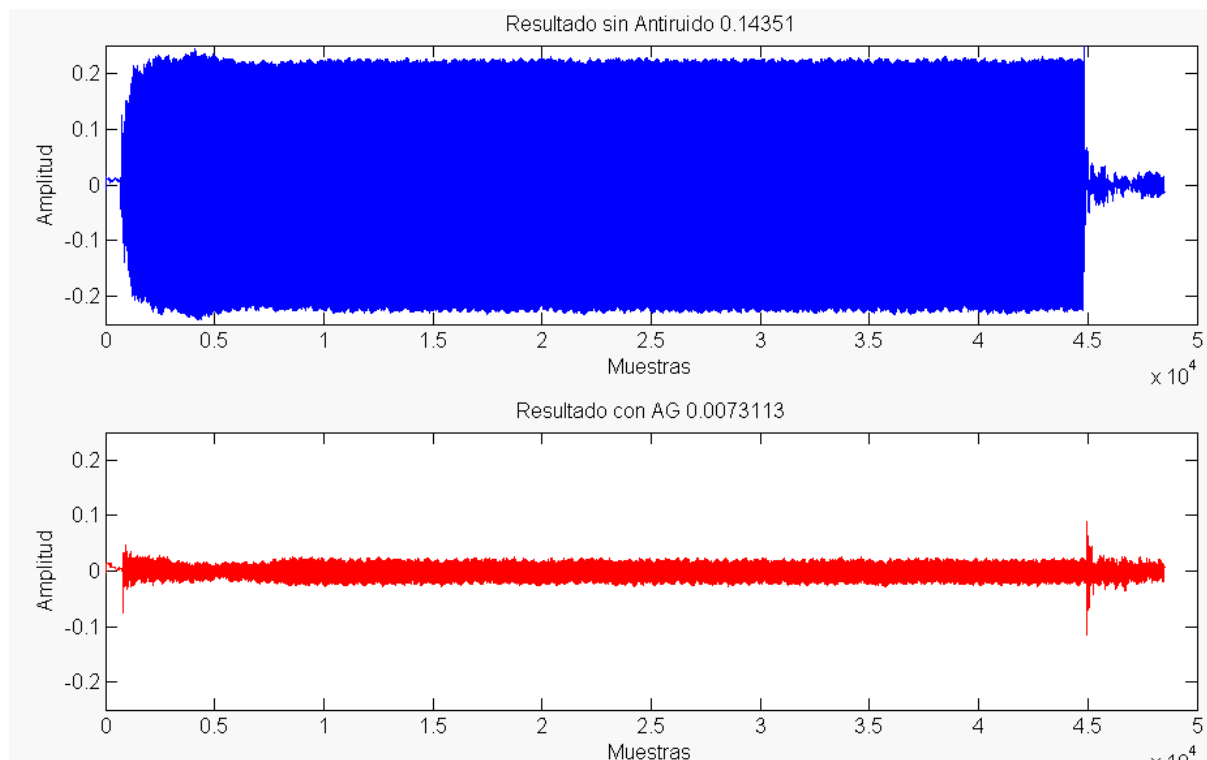


Ilustración 58: Resultados sin/con CAR para AG FIR (5) en entorno real, señal monotonal.

Como se puede observar en la imagen anterior, el resultado obtenido con este tipo de técnica es notablemente mejor que el obtenido con las técnicas anteriores, AG simple y AG con señal invertida, este resultado mejora los obtenidos en las simulaciones realizadas en el apartado 5.2.3.2.3 (sala con reverberación y ruido) las cuales obtuvieron un fitness medio de $2,56074E-02$, mientras que en este caso se obtiene un fitness de $7,3113E-03$ (lo cual mejora notablemente los resultados de las simulaciones). Este hecho se puede deber a que en la sala no existe un ruido de fondo tan notable como el introducido en las simulaciones.

6.2.4. Conclusiones.

Como se ha podido observar en los resultados de los experimentos realizados, las estrategias “AG simple” y “AG con señal invertida” tampoco funcionan en un entorno real, como ya anticiparan las simulaciones realizadas en el capítulo anterior. Esto se debe a que este tipo de estrategias presentan un espacio de búsqueda demasiado grande, lo cual unido a otros factores como el ruido de fondo y la función de evaluación, provoca los malos resultados obtenidos. Así pues, las estrategias planteadas, “AG simple” y “AG con señal invertida” no parecen adecuadas para sistemas CAR basados en AG.

Por otro lado, queda demostrado como la estrategia “AG FIR” es la que mejores resultados obtiene, y por tanto, la mejor opción para la construcción de un sistema CAR basado en AG. Los resultados obtenidos con señales monotonaes utilizando solamente 5 coeficientes, han mejorado incluso los resultados obtenidos en las simulaciones, por lo cual se realizarán más pruebas para este tipo de estrategia.

6.3. Señales multitonales.

A tenor de los resultados obtenidos en el apartado anterior, en este apartado se realizarán experimentos en real con la estrategia “AG FIR”. En este caso la señal que generará el campo primario será una señal multitonal, compuesta de tres tonos de 100, 200 y 300 Hz. Puesto que los resultados obtenidos con las otras estrategias, “AG simple” y “AG con señal invertida” no fueron buenos, ya incluso con señales monotonaes, no existe razón alguna para realizar experimentos con este tipo de estrategias para señales multitonales, por lo que no se realizarán.

A lo largo de esta sección se realizarán experimentos con filtros de 5, 10, 20 y 50 coeficientes, las rondas de ejecución serán 200, excepto con 50 coeficientes en el cual se realizarán además 400 y 1000 rondas de ejecución. Para todos los experimentos de este apartado se utilizarán las mismas funciones de mutación y evaluación, así como los parámetros de configuración relacionados con la población del AG que fueron utilizados en el apartado 6.2.

6.3.1. AG con filtros FIR (5).

En este apartado se realizarán experimentos con la estrategia “AG FIR” y se utilizará para ello 5 coeficientes, como ya se comentó se utilizarán señales multitonales. Los resultados tras 200 rondas de ejecución se muestran a continuación.

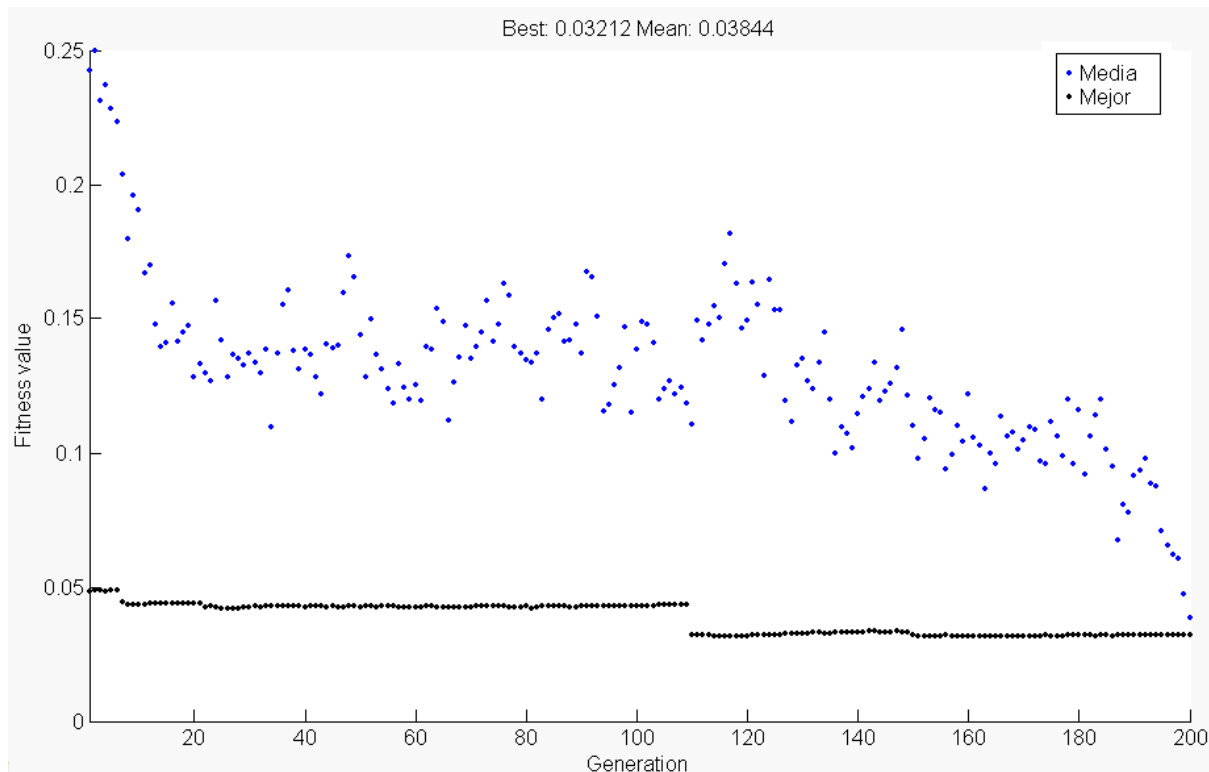


Ilustración 59: Evolución AG FIR 5 en entorno real, señal multitonal y mutación Gaussiana.

Como se puede apreciar en el gráfico anterior, la evolución del AG es en este caso, mucho más uniforme que con las estrategias anteriores. Desde el comienzo se obtienen buenos resultados, para finalmente obtener un fitness de 0.03212. No obstante, los resultados empeoran si los comparamos, con el mismo experimento realizado con señales monotonaes en el apartado 5.3.3, el cual obtiene un fitness de 0.007311. A continuación se muestra una comparativa, entre el mejor resultado obtenido por este tipo de técnica, y la señal captada solamente con el campo primario, es decir sin activar el sistema de CAR.

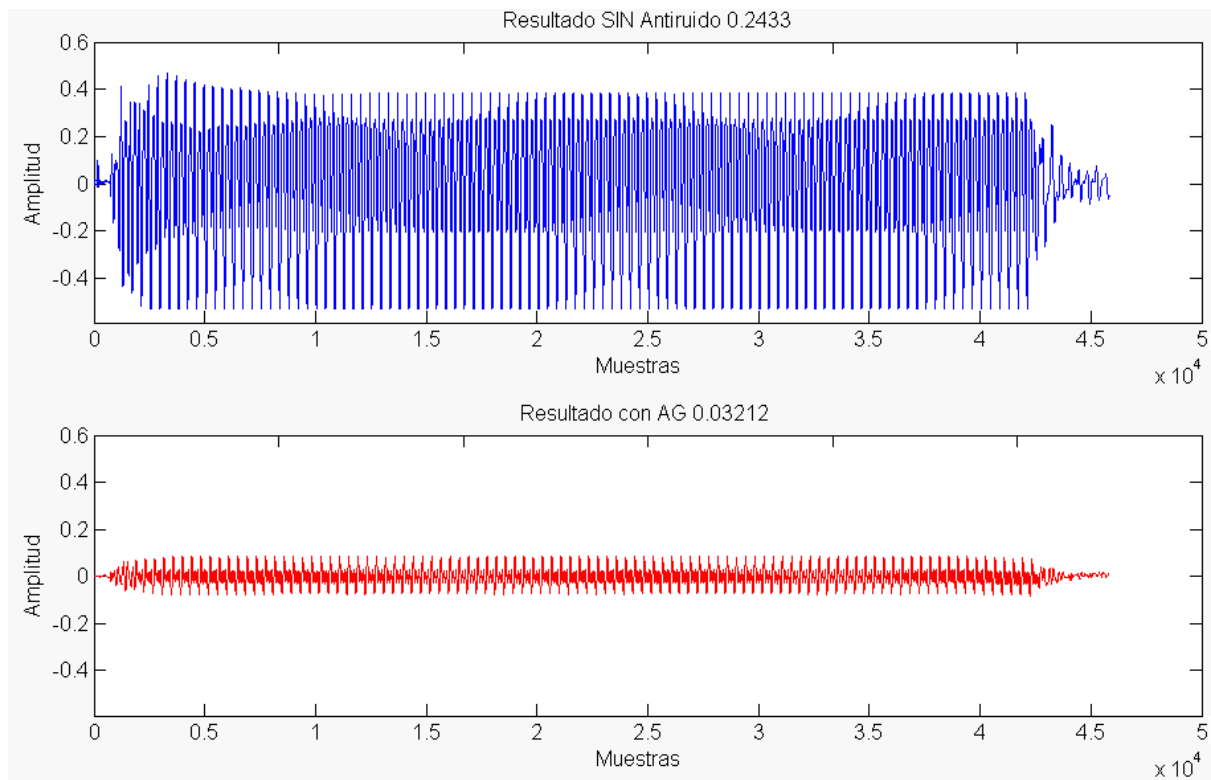


Ilustración 60: Resultados sin/con CAR para AG FIR (5) en entorno real, señal multitonal.

6.3.2. AG con filtros FIR (10).

Al igual que en el apartado anterior, se utilizará la misma estrategia, esta vez se utilizarán 10 coeficientes, con lo cual el espacio de búsqueda aumenta. Todos los demás parámetros seguirán siendo los mismos. Los resultados tras 200 rondas de ejecución se muestran a continuación, el mejor individuo obtiene un fitness de 0.05588, este resultado empeora respecto al obtenido con 5 coeficientes en el apartado 5.4.1.

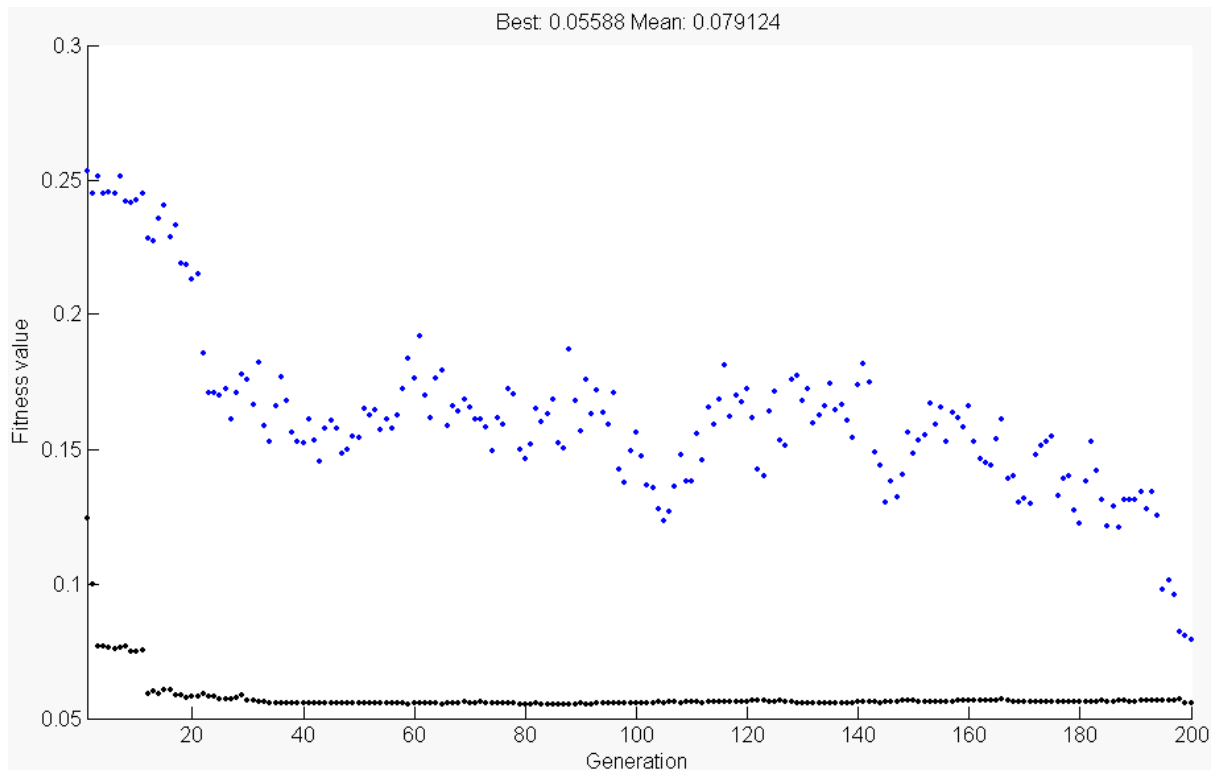


Ilustración 61: Evolución AG FIR 10 en entorno real, señal multitonal y mutación Gaussiana.

A continuación se muestra una comparativa, entre el mejor resultado obtenido por este tipo de técnica, y la señal captada solamente con el campo primario, es decir sin activar el sistema de CAR.

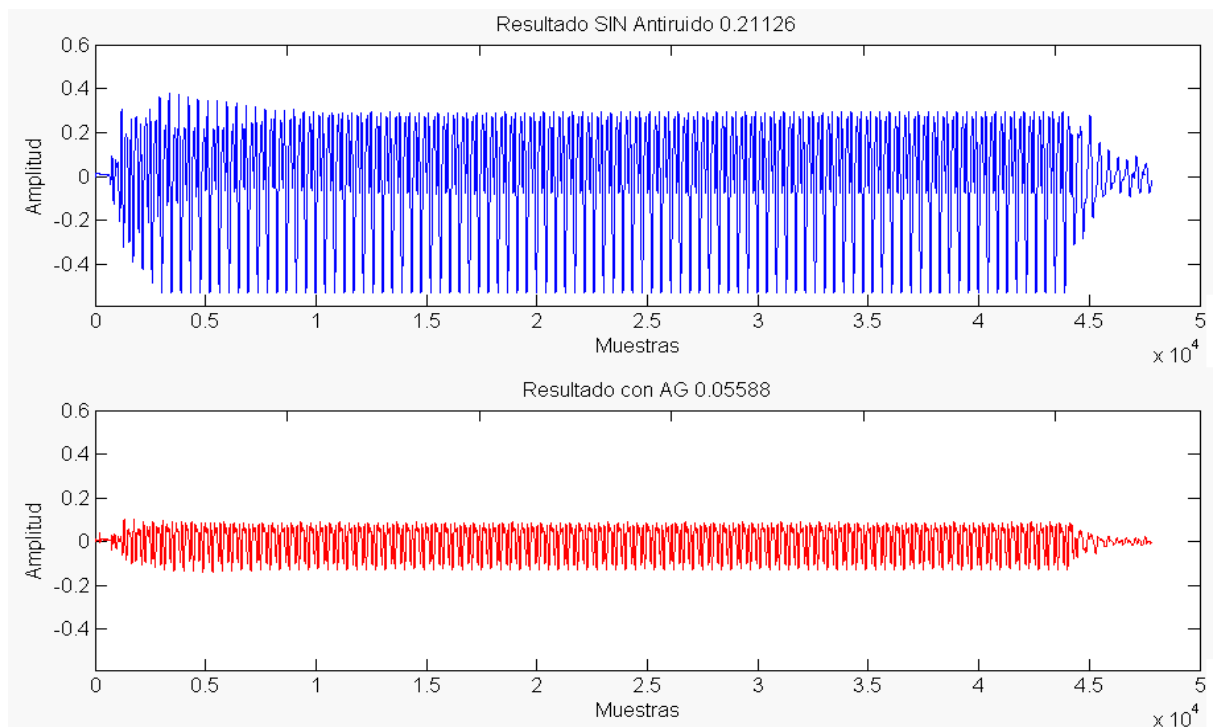


Ilustración 62: Resultados sin/con CAR para AG FIR (10) en entorno real, señal multitonal.

6.3.3. AG con filtros FIR (50).

En este apartado, tal y como se comentó en la introducción de este capítulo, se realizarán experimentos para 200, 400 y 1000 rondas de ejecución. Como se ha podido observar en los apartados anteriores, al aumentar el número de coeficientes del filtro, el espacio de búsqueda aumenta, y al utilizar siempre 200 rondas de evaluación, esto provoca que los resultados empeoren. Con estos experimentos comprobaremos si al aumentar el número de rondas, se pueden conseguir mejores resultados. A continuación se muestra una tabla con los resultados obtenidos para los distintos números de iteraciones.

	Iteraciones		
Coeficientes	200	400	1000
AG FIR 50	4,53280E-02	5,68620E-02	2,94280E-02

Tabla 27: Resultados AG FIR (50) señal multitonal, para 200, 400 y 1000 iteraciones.

Como se puede apreciar en la gráfica anterior, los mejores resultados se obtienen con 1000 iteraciones, sin embargo, el tiempo empleado para obtener dichos resultados ha sido de 21 horas de ejecución (aproximadamente). Por el contrario, para ejecutar 200 iteraciones se requiere únicamente la quinta parte del tiempo de ejecución.

A continuación se muestra una comparativa, entre los tres mejores resultados obtenidos para los distintos números de iteraciones.

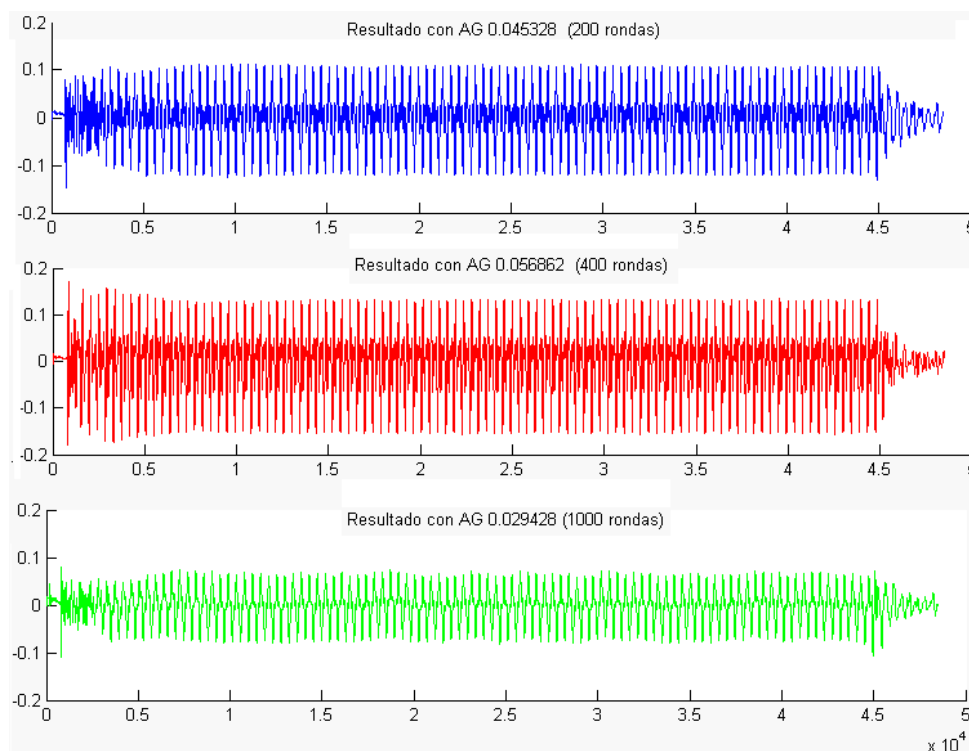


Ilustración 63: Comparativa AG FIR (50), señal multitonal, para 200, 400 y 1000 iteraciones.

6.3.4. AG FIR función de evaluación y mutación.

Los experimentos realizados entre las secciones 6.3.1-6.3.3, siempre han utilizado la función de mutación Gaussiana y la siguiente función de evaluación.

$$F_E = \frac{1}{F_S} \cdot \sum |x(t)| \quad \forall x(t) \in X_{\text{Resultado}}(t)$$

La cual se reduce a realizar el sumatorio del valor absoluto de todas las muestras de la señal recogidas por el micrófono y dividir el resultado entre la frecuencia de muestreo (F_S) la cual, como ya se ha comentado, es siempre de 44100.

Como se demostrara en las simulaciones realizadas en el capítulo 5, la función de mutación que ofrece mejores resultados es la función custom. Por otra parte, como se concluyera en la sección 5.2.4, la función de evaluación utilizada para realizar los experimentos de las secciones 6.3.1-6.3.3 de este mismo capítulo, no evalúa de un modo correcto el nivel de ruido, presente en la señal captada por el micrófono. Así pues, con el fin de comprobar si los resultados alcanzados en las secciones 6.3.1-6.3.3 son mejorables, se repetirán dichos experimentos, pero esta vez utilizando la

función de mutación custom y como función de evaluación la implementada como sonómetro en el archivo “estimateLevel.m”. Esta función devuelve el ruido de una señal en dB con ponderación A. Las pruebas se repetirán para las siguientes configuraciones:

- AG FIR 5 coeficientes 200 rondas.
- AG FIR 10 coeficientes 200 rondas.
- AG FIR 20 coeficientes 200 rondas.
- AG FIR 50 coeficientes 200, 400 y 1000 rondas.

A continuación, en la siguiente tabla, se muestra un resumen de los resultados obtenidos. Los resultados completos se pueden consultar en el material anexo al proyecto.

Tipo Señal	Iteraciones	Estrategia	Mejor resultado AG	Resultado sin CAR
Multitonal	200	AG FIR 5	30,06 dB	46,60 dB
		AG FIR 10	30,00 dB	46,53 dB
		AG FIR 20	26,42 dB	46,40 dB
		AG FIR 50	25,23 dB	46,50 dB
	400	AG FIR 50	22,84 dB	46,65 dB
	1000	AG FIR 50	24,19 dB	45,77 dB

Tabla 28: Resumen para AG FIR (5, 10, 20, 50, 50, 50) coeficientes, para (200, 200, 200, 200, 400, 1000) iteraciones, con función de mutación custom y evaluación en dB con ponderación A.

En los resultados anteriores se puede apreciar como en algunos casos se consigue una atenuación de más de 23 dB. Sin embargo, puesto que en estos experimentos se utiliza una función de evaluación distinta a la utilizada 6.3.1-6.3.3, los resultados obtenidos no se pueden comparar de modo directo. A continuación se muestran los resultados obtenidos para las distintas configuraciones de filtros FIR. Los mejores resultados se obtienen para las estrategias AG FIR(50) con 200, 400 y 1000 rondas de evaluación, para el resto de estrategias se obtienen resultados similares.

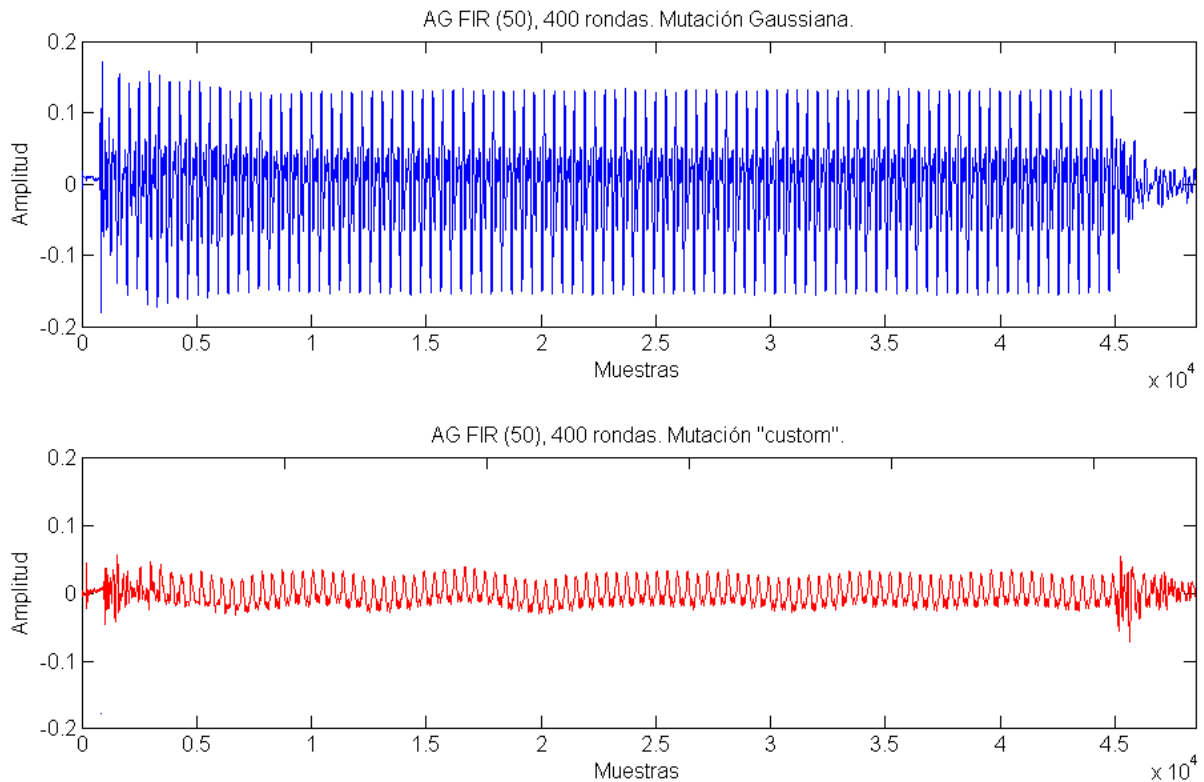


Ilustración 64: Comparativa AG FIR (50), señal multitonal, 400 rondas, mutación Gaussiana y custom.

Otro factor a destacar son las gráficas de evolución obtenidas con unas y otras funciones de evaluación y mutación. Utilizando la función de evaluación presentada en la ecuación 6.2.1, y la función de mutación gaussiana, se puede apreciar como el valor medio de fitness de la población y el del mejor individuo se mantienen siempre a una distancia, reduciéndose esta distancia a medida que se aproxima el final de la ejecución. Además, en las últimas iteraciones se puede apreciar, al reducirse la distancia entre media y mejor, que se alcanzan nuevas soluciones mejores, por lo que no se puede determinar con certeza si el AG converge o no.

Por el contrario utilizando la función de mutación custom y de evaluación dB con ponderación A, la media y el mejor individuo se mantienen más cercanos y los resultados son mucho más uniformes a lo largo de todas las iteraciones. En consecuencia se puede afirmar que el algoritmo converge en las primeras rondas de ejecución, fluctuando en las siguientes. Este hecho, como ya se ha explicado, se debe al ruido externo y a las condiciones cambiantes de la sala. En la ilustración 65 se muestra una comparativa, entre las distintas gráficas de evolución, remarcando en rojo los efectos señalados con anterioridad.

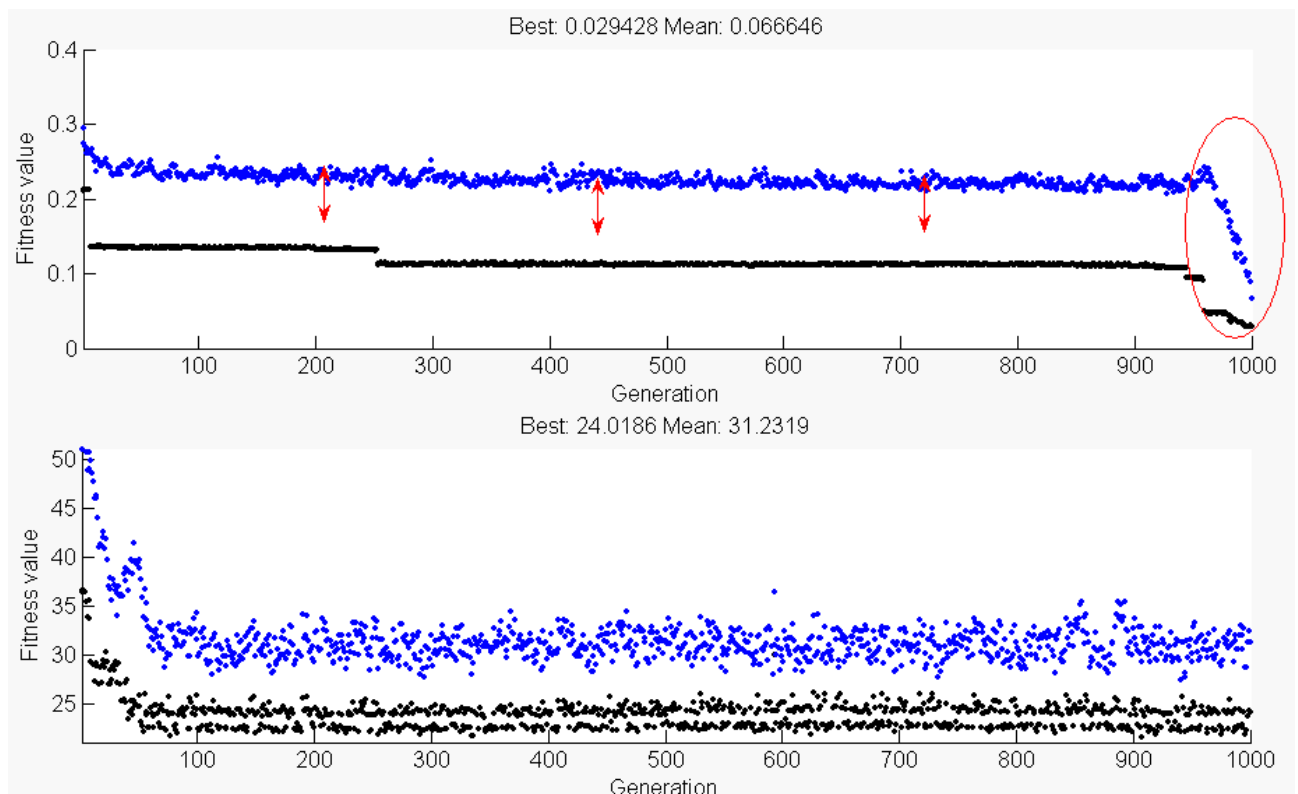


Ilustración 65: Comparativa AG FIR (50), 1000 iteraciones, para distintas funciones de mutación y evaluación.

6.3.5. Conclusiones.

A lo largo del apartado 6.3 se han realizado experimentos con señales multitonales, para generar el campo primario, los resultados se pueden considerar prometedores ya que se consiguen atenuaciones de hasta 23 dB con ponderación A, tal y como se mostrará en el apartado 6.3.4. En dicha sección se ha demostrado como la función de evaluación y mutación, influyen en la convergencia del AG y en la capacidad de éste para encontrar soluciones, las cuales ofrezcan una mayor atenuación de ruido, tal y como se puede observar en la ilustraciones 63 y 64.

Por otro lado, se ha podido constatar de modo experimental, que las funciones de mutación y de evaluación que mejores resultados presentan son, la función de mutación custom y la función de evaluación usando dB con ponderación A, tal y como recoge en las simulaciones del capítulo 5.

6.4. Señales ruido real.

En este apartado se utilizará una señal de un ventilador previamente grabada para generar el campo primario. La configuración a utilizar será la misma que en los apartados anteriores, los experimentos se realizarán para AG FIR con 5, 10, 20 y 50 coeficientes, durante 200 iteraciones. Se ha decidido realizar solamente 200 iteraciones, ya que los resultados obtenidos en apartados anteriores muestran mejoras entre 2-5 dB utilizando un número mayor de iteraciones (400 y 1000) para obtener dichos resultados. Ya que el tiempo de convergencia se multiplica por dos o por cinco, se decide realizar experimentos con únicamente 200 iteraciones.

La señal utilizada como campo primario es una señal obtenida de un ventilador y cuya frecuencia se muestra en la siguiente ilustración. Como se puede apreciar, la señal cuenta con varias frecuencias predominantes.

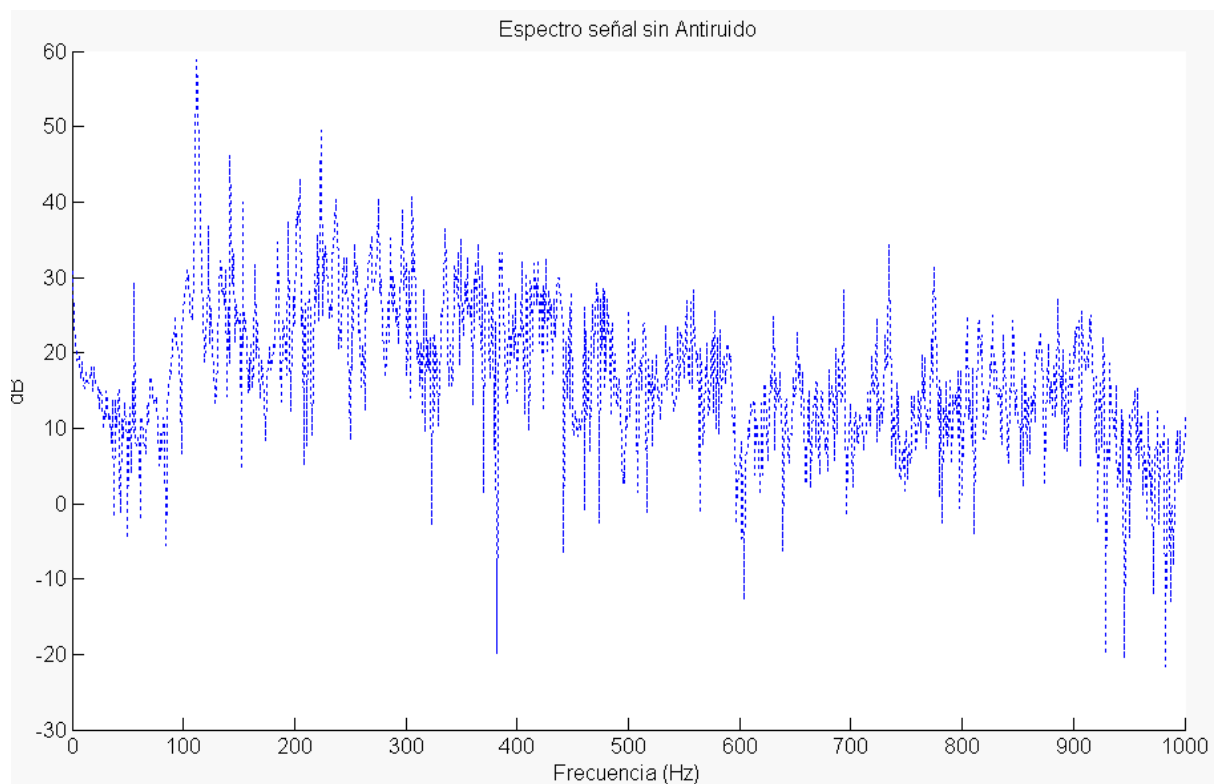


Ilustración 66: Descomposición en frecuencia hasta 1000Hz de la señal ventilador.

A continuación se mostrarán los resultados obtenidos para la estrategia AG-FIR con 5, 10, y 50 coeficientes.

Tipo Señal	Iteraciones	Estrategia	Mejor resultado AG	Resultado sin CAR
Ventilador	200	AG FIR 5	28,65 dB	33,35 dB
		AG FIR 10	28,80 dB	33,58 dB
		AG FIR 50	32.53 dB	37,89 dB

Tabla 29: Resumen para AG FIR (5, 10, 50) campo primario ruido ventilador.

Como se puede observar en la tabla anterior, al experimentar con un sonido real (no uno sintetizado), que contenga varias frecuencias propias, los resultados que se consiguen son bastante más discretos, obteniendo reducciones de hasta 5dB con nivel de ponderación A. Esto quiere decir que son 5dB perceptibles, y no solo, en una banda de frecuencias. A continuación se muestra la descomposición en frecuencias, de la señal captada por el micrófono sin activar el CAR, y la descomposición en frecuencias con sistema CAR en funcionamiento.

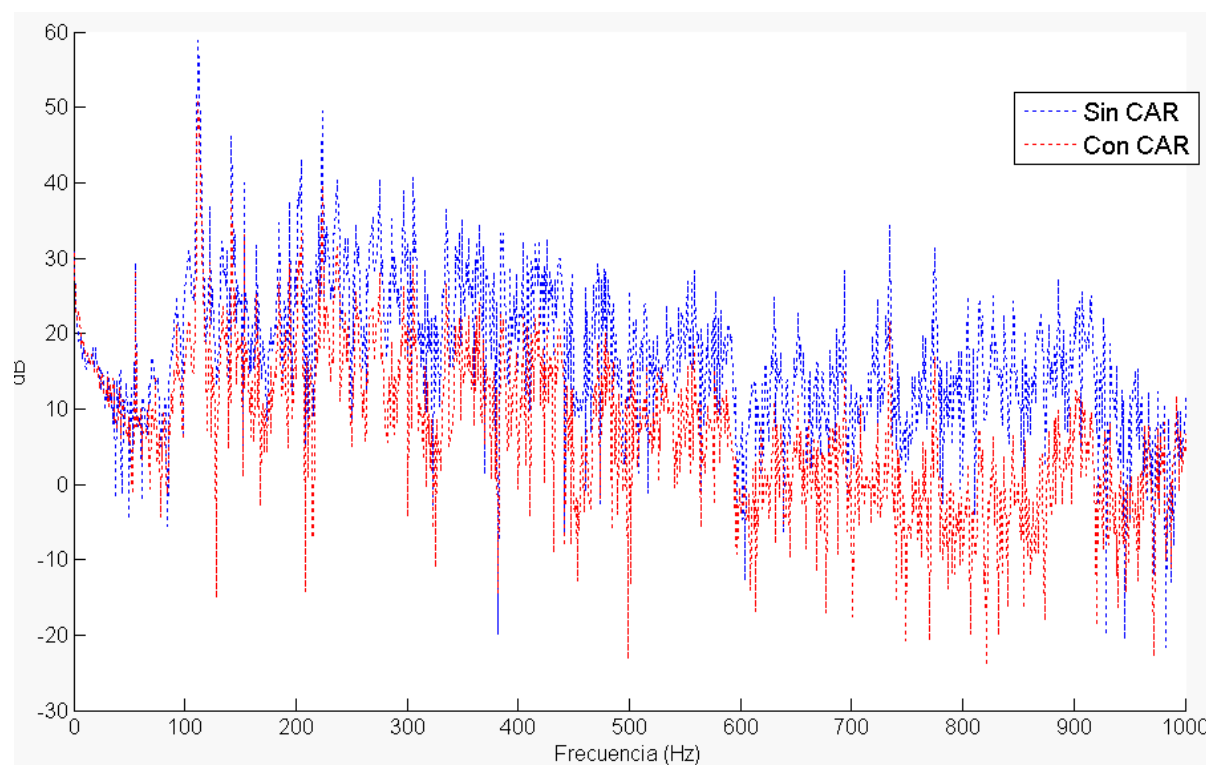


Ilustración 67: Espectro de la señal ventilador sin CAR (azul) y con CAR (rojo).

Como se puede observar en la imagen anterior, al utilizar como función de evaluación el nivel de ruido captado por el micrófono con ponderación A, el resultado que obtenemos es una reducción global, es decir no se obtiene una reducción de 5 dB en una banda de frecuencia concreta, sino que se reducen 5 dB en la sensación sonora percibida por un humano. Representando una reducción global de ruido en varias frecuencias, tal y como se muestra en la ilustración anterior.

6.5. Señales ruido real y externo al sistema.

En este apartado se intentará aplicar el sistema construido a una situación real de ruido. Hasta el momento todos los experimentos realizados han tenido como factor común que la fuente de ruido era generada por el propio sistema, con el fin de evaluar las distintas estrategias. En esta última sección se probará el sistema construido con una fuente de ruido real, que esté generada por un ventilador, extractor o similar.

Para realizar estos experimentos debemos cambiar la configuración de nuestro sistema, ya que ahora no vamos a conocer la señal que generará el campo primario (es externa). Por ello se deberá captar en primer lugar el sonido que deseamos atenuar, estableciendo una señal de referencia, la cual será filtrada a través de filtros FIR y del AG. En la siguiente ilustración se muestra el esquema utilizado para este experimento.

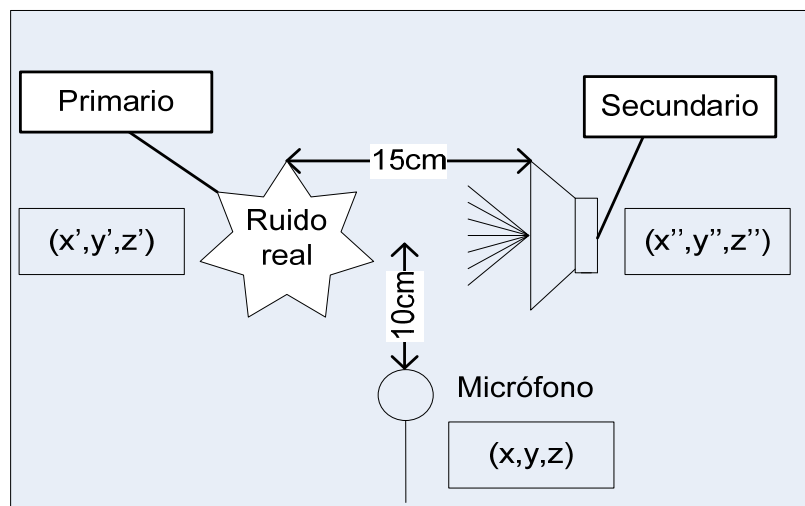


Ilustración 68: Configuración utilizada en entorno real, con ruido externo al sistema.

Como se puede observar, para esta configuración solamente se utilizará un altavoz para generar el campo secundario, mientras que el campo primario estará generado por un ventilador. A continuación (en la ilustración 69) se muestra el espectro de la señal generada y grabada por el micrófono con sistema CAR desactivado.

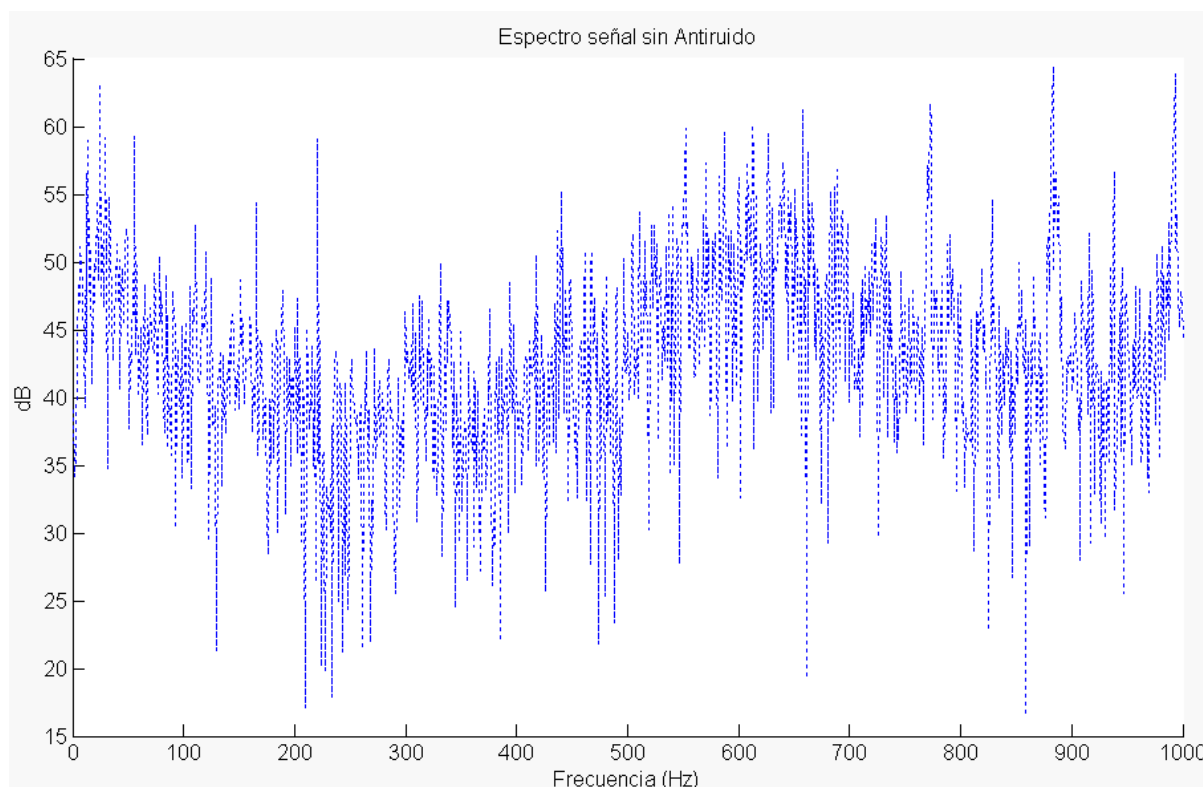


Ilustración 69: Descomposición en frecuencia hasta 1000Hz del ventilador real.

Como se observa en la ilustración 69, esta señal presenta numerosas frecuencias predominantes, lo cual disminuirá la capacidad del sistema CAR para obtener atenuaciones relevantes. Con esta configuración se ejecutarán 400 rondas, a continuación se muestran los resultados obtenidos:

Tipo Señal	Iteraciones	Estrategia	Mejor resultado AG	Resultado sin CAR
Ventilador	400	AG FIR 25	84.123 dB	85.117 dB

Tabla 30: Resumen para AG FIR (25) campo primario generado por ventilador.

Como se puede apreciar en la tabla anterior, los resultados obtenidos en este caso consiguen una mejora mínima de 1 dB con ponderación A. Se debe tener en cuenta, que en este experimento el campo primario es generado por un ventilador real, a diferencia de la experimentación realizada en 6.4; la cual era una señal grabada y emitida por uno de los altavoces. A continuación se muestra la descomposición en frecuencias, de la señal captada por el micrófono sin activar el CAR, y la descomposición en frecuencias con sistema CAR en funcionamiento.

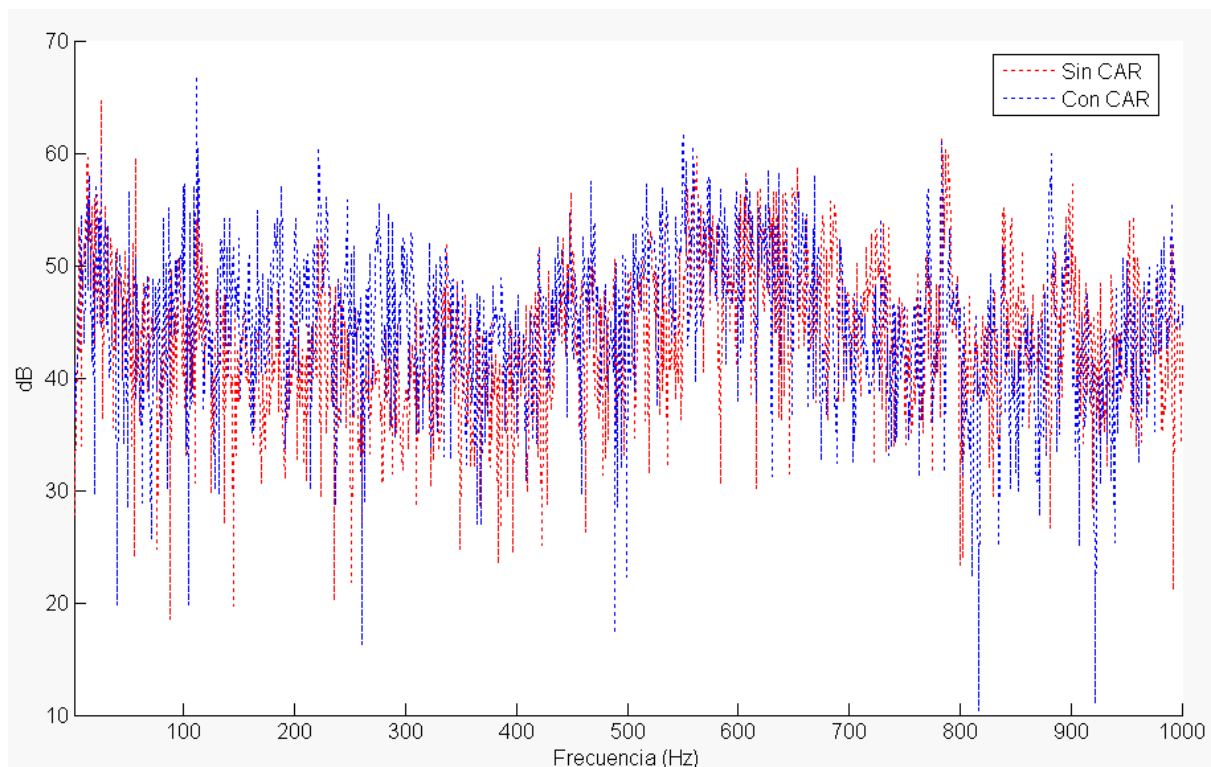


Ilustración 70: Espectro del señal ventilador sin CAR (azul) y con CAR (rojo).

Tal y como se puede apreciar en la imagen anterior, una reducción de 1 dB con ponderación A, no supone una reducción general en varias bandas de frecuencia. En algunas bandas se produce dicha reducción mientras que en otras no se produce.

6.6. Conclusiones.

A lo largo de este capítulo se han realizado distintos experimentos en un entorno real, con el fin de comprobar la validez de los resultados obtenidos en el capítulo 5 de simulación. Se han realizado experimentos con distintos tipos de ruidos (ver 2.4), monotonales, multitonales, ruidos reales y ruidos externos. Los resultados obtenidos han ido empeorando a medida que las señales contenían más frecuencias propias, tal y como era de esperar. Para señales monotonales se consiguen atenuaciones muy pronunciadas, para multitonales atenuaciones de 25dBA, para ruidos reales, se consiguen atenuaciones de 5 dBA y para ruidos externos al sistema se consiguen atenuaciones de 1dBA. Hay que destacar que dichas atenuaciones son con ponderación A, es decir expresan la reducción en la sensación sonora percibida por un humano.

Como se expusiera en el capítulo 5, las funciones de mutación y de evaluación que mejores resultados presentaban eran, la función de mutación custom y la función de evaluación usando dB con ponderación A. A lo largo de este capítulo se ha podido comprobar de modo experimental, tal y como se muestra en el apartado 6.3.4.

En este capítulo se han realizado más de 25 pruebas en un entorno real, en principio pueden parecer pocas pruebas, sin embargo, hay que tener en cuenta que se debe contar con una sala lo más silenciosa posible, para realizar los experimentos. Como ya se ha comentado anteriormente, el tiempo que tarda cada experimento es bastante elevado, y se han necesitado más de 150 horas de experimentación para obtener los resultados recogidos en este capítulo.

CAPÍTULO 7. Conclusiones.

7.1. Introducción.

A lo largo de este capítulo se expondrán las conclusiones del proyecto, comentando los objetivos que se han alcanzado con la realización del mismo, así como las aportaciones de este. Posteriormente se citarán los problemas y dificultades más relevantes encontradas. Y finalmente se plantearán distintas líneas de investigación a través de las cuales se podrán mejorar y ampliar aquellos objetivos que no se han alcanzado de modo completo.

7.2. Objetivos alcanzados.

Tal y como se indicó en el primer capítulo de este proyecto, el objetivo del mismo es la implementación de un sistema CAR, utilizando para la elaboración del controlador de dicho sistema CAR AGs. Dicho objetivo se puede descomponer en varios objetivos parciales.

1. **Elaboración de distintas estrategias, para utilizar los AG como controlador de un sistema de CAR.**

En el apartado 4.3.3 se planteaban 3 estrategias distintas que utilizan los AG como controlador de un sistema CAR, las cuales son:

- **AG simple**
- **AG con señal invertida**
- **AG con filtros FIR.**

2. **Evaluación de las distintas estrategias propuestas, mediante simulaciones, con el fin de valorar cada alternativa y de obtener los parámetros óptimos de funcionamiento.**

A lo largo del capítulo 4, en los apartados 4.2.1 y 4.3.1, se analizó y diseño un simulador en MATLAB, el cual ha permitido, evaluar distintas estrategias de AG, aplicados al control activo del ruido. Dicho simulador, como se expusiera en este mismo apartado, puede funcionar con distintas configuraciones de sala (sala ideal, sala con reverberación y sala con reverberación y ruido).

A lo largo del capítulo 5 se han evaluado las tres estrategias presentadas. Como se expuso en cada uno de los apartados correspondientes a cada estrategia, del capítulo 5, las dos primeras estrategias presentan malos resultados, ya que ni tan siquiera consiguen una mejora mínima.

Esto está motivado por el espacio de búsqueda que supone utilizar este tipo de estrategias. Por otro lado, y dependiendo de la configuración de la sala, el AG con filtros FIR presenta muy buenos resultados en las simulaciones, consiguiendo una atenuación casi total.

Además en el capítulo 5, se han evaluado distintos parámetros determinantes, como son las funciones de mutación y de evaluación. Las conclusiones obtenidas sobre los parámetros óptimos de funcionamiento, han sido extraídas a partir de más de 1500 simulaciones, cada una de las cuales ha supuesto una evolución de 200 iteraciones para una población de 50 individuos. Por otro lado las conclusiones obtenidas sobre dichos parámetros de funcionamiento óptimos, se han vuelto a evaluar a lo largo del capítulo 6.

3. Evaluación de las distintas estrategias propuestas, mediante experimentaciones en un entorno real, con el fin de comprobar la bondad de las simulaciones, y obtener los parámetros óptimos de funcionamiento en un entorno real.

A lo largo del capítulo 4, en los apartados 4.2.1 y 4.3.2, se analizó y diseñó un sistema para la experimentación en un entorno real en MATLAB. Dicho sistema ha permitido evaluar las distintas estrategias de AG aplicadas a un sistema CAR en un entorno real. Estos experimentos han puesto de manifiesto como los resultados de las simulaciones, así como las conclusiones de las mismas, se corresponden con lo que sucede en un entorno real.

Se han realizado más de 25 experimentos en un entorno real, los cuales han necesitado más de 150 horas de experimentación. Se ha experimentado con distintos tipos de señales como fuente de ruido monotonales, multitonales y ruidos reales. Para señales monotonales se consiguen atenuaciones muy pronunciadas, para multitonales atenuaciones de 25dBA, y finalmente para ruidos reales, se consiguen atenuaciones de 5 dBA. Hay que destacar que dichas atenuaciones son con ponderación A, es decir, expresan la reducción en la sensación sonora percibida por un humano.

Finalmente, se ha podido constatar (de modo experimental), que las funciones de mutación y de evaluación que mejores resultados han presentado son: la función de mutación custom y la función de evaluación usando dB con ponderación A, tal y como se recoge en las simulaciones del capítulo 5. Con estos experimentos, se han obtenido los parámetros óptimos de funcionamiento del sistema.

7.3. Problemas encontrados.

A lo largo de la realización de este proyecto han surgido algunos problemas que se han debido que solventar de un modo u otro. El objetivo de este apartado es resaltarlos para facilitar en la medida de lo posible futuras investigaciones.

En primer lugar para llevar a cabo el diseño de estos sistemas de control activo del ruido es necesario un conocimiento multidisciplinar.

- Física/Acústica. (Física).
- Procesado de señales. (Ing. Telecomunicaciones).
- Algoritmos adaptativos y de control. (Ing. Informática/Matemáticas).

La necesidad de este conocimiento multidisciplinar ha implicado una labor de documentación y recopilación de información extensa, especialmente en la parte concerniente a la acústica y al procesado de señales.

Otro de los principales problemas a la hora de aplicar AG en un sistema CAR, es el comentado en la sección 4.2, un mismo individuo generado por el AG, puede presentar distintas evaluaciones, para instantes de tiempo distintos, aun cuando la solución que representa el individuo sea la misma en ambos instantes de tiempo. Esto es debido al ruido externo tal y como se comentó anteriormente.

Otro problema ha sido el tiempo empleado para realizar experimentos en un entorno real, ya que para algunos experimentos han sido necesarias más de 24 horas ininterrumpidas de pruebas, con lo cual se han tenido que lanzar dichos experimentos de forma remota, en aquellos días que se tenían las mejores condiciones de experimentación (fines de semana).

7.4. Líneas futuras de investigación.

Una vez que se ha puesto de manifiesto que los Algoritmos Genéticos se pueden aplicar como controlador de un sistema de Control Activo del Ruido, existen algunos aspectos que se podrían mejorar. Por otro lado, también han surgido nuevas ideas y líneas de investigación, las cuales podrían dar como resultado otros proyectos.

Dentro de los filtros FIR basados en AG, podemos encontrar distintas alternativas que pueden resultar interesantes.

En primer lugar como se ha podido apreciar en las gráficas de evolución, los AG con filtros FIR convergen hacia la solución en número temprano de rondas, éste es un aspecto que se podría aprovechar, de cara a una futura implementación en un DSP.

Por otro lado, se podrían implementar filtros FIR cuyo número de coeficientes no fuera fijo, es decir, cada individuo de la población tendría un número de coeficientes, estos coeficientes podrían variar y no ser el mismo para los distintos individuos de la población. Esta alternativa resulta bastante atractiva, ya que no se tendría que decidir el número de coeficientes del filtro, sino que este se podría ir modificando de modo dinámico durante la evolución del algoritmo.

Otra posible línea de investigación, sería utilizar filtros IIR, en lugar de filtros FIR. Puesto que este tipo de filtros pueden ser inestables, en la función de evaluación los individuos que representen este tipo de soluciones se penalizarían, o directamente se impediría aplicando técnicas de corrección.

Otros tipos de técnicas de computación evolutiva, que podrían resultar interesantes en el ámbito de este proyecto. Por ejemplo se podrían utilizar estrategias evolutivas en lugar de algoritmos genéticos. Este tipo de técnica se podría aplicar tanto a filtros FIR como a filtros IIR. Otra opción interesante consistiría en desarrollar filtros FIR/IIR mediante el uso de Programación Genética, existiendo la posibilidad de aplicar varios filtros y no solo uno como se ha realizado en este proyecto.

A lo largo de este proyecto se ha trabajado con sistemas CAR monocal o SISO (Single-Input-Single-Output), una interesante vía de investigación sería el desarrollo de sistemas CAR multicanal, basados en técnicas de computación evolutiva para optimización multi-objetivo.

CAPÍTULO 8. Anexos.

8.1. Anexo A

En este anexo se expondrán las distintas APIs existentes en la actualidad, que nos permitan realizar una simulación de cómo se propagaría el sonido en una sala. En primer lugar se realizará una breve presentación del grupo de investigación *Interactive Audio Special Interest Group* (IASIG) haciendo especial referencia a *Interactive 3D Audio Rendering Guidelines*, artículo en el que se describen las directrices mínimas que debe contener cualquier API de sonido en 3D. Posteriormente se describirán las distintas APIs existentes.

El *Interactive Audio Special Interest Group*, se creó para compartir ideas relacionadas con el sonido interactivo, [46]. El IASIG está formado por diversos grupos de trabajo, encargados de distintos aspectos relacionadas con el sonido, como son, sonido en internet, la síntesis de sonido y el sonido espacial o 3D.

El 3D Working Group (3DWG) perteneciente al IASIG, publicó dos documentos, en [47] y [48], los cuales se conocen como I3DL1 y I3DL2. El I3DL1 establece los requisitos mínimos exigibles a cualquier API, además define un léxico, de tal modo que los distintos conceptos relacionados con el sonido en 3D sean comprensibles por cualquiera. Por otra parte el I3DL2 define conceptos más avanzados del sonido 3D, definiendo entre otras cosas, el modelado de la propia habitación. De estos dos documentos se pueden extraer las siguientes recomendaciones:

Modelo de reverberación: La respuesta al impulso de la habitación (Room Impulse Response, RIR) se divide en sonido directo, reflexiones tempranas, y reflexiones tardías o cola reverberante. La cola reverberante, se controla a través de un parámetro, que define el tiempo en el cual un sonido emitido decae 60dB.

Distancia Fuente-Receptor: La distancia entre la fuente de sonido y el receptor del mismo, se caracteriza por el factor “roll-off”, el cual define la velocidad con la que decrece un sonido en función de la distancia respecto a la fuente de sonido.

Oclusión y obstrucción: Efectos diseñados para producir en el oyente la sensación de estar detrás un objeto, el cual está entre la fuente y el mismo oyente, y por otro lado producir la sensación de que la fuente se encuentre en otra habitación. Típicamente estos fenómenos causan un filtrado (filtro paso bajo) en la fuente de sonido.

DirectSound de Microsoft DirectX.

Microsoft DirectX es un conjunto de APIs creadas con el objetivo de facilitar las tareas relacionadas con el ámbito multimedia, especialmente enfocada al desarrollo de videojuegos en el sistema operativo Microsoft Windows. Desarrollado en C++, existe la posibilidad de utilizar el API sin la necesidad de desarrollar en C++ (Unmanaged Code), por otra parte existe la posibilidad de desarrollar aplicaciones utilizando otros lenguajes como, C#, J#, Visual Basic .Net, en lo que se conoce como "Managed Code" [56].

DirectSound forma parte de DirectX (hasta su versión 9.0), ofreciendo a los desarrolladores, un sistema capaz de "grabar sonidos recogidos por un dispositivo de entrada, reproducirlos a través de diferentes dispositivos de salida, utilizando efectos avanzados como el posicionamiento en 3D, y el filtrado para crear efectos como eco, distorsión y reverberación".

En DirectSound una fuente de sonido queda definida por su posición, orientación y directividad. La directividad se caracteriza por dos conos, cada uno con un ángulo, y el volumen percibido dentro del cono interior y fuera del cono exterior. Así para un oyente situado dentro del cono interior, el nivel sonoro es igual a un valor relativo de 0dB, (ilustración 67 Li). Un oyente situado fuera del cono exterior, percibirá un nivel sonoro con un valor de $-Vol_o$ (ilustración 67, Lo) y finalmente para un oyente situado dentro del cono exterior y fuera del interior (ilustración 67 Lt), el nivel sonoro disminuirá hasta Vol_o de modo lineal a medida que aumente su ángulo respecto a la fuente.

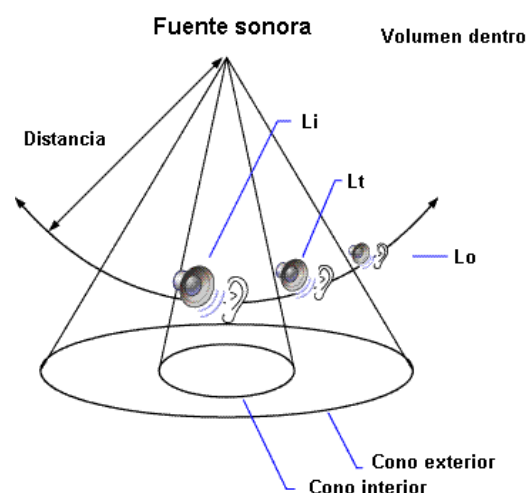


Ilustración 71: Directividad en DirectSound.

Por otro lado un oyente queda definido por su posición y por su orientación, la cual se define mediante dos vectores perpendiculares entre sí (ilustración 68). Además de la atenuación causada debido a la directividad de la fuente de sonido, explicada anteriormente, la distancia entre la fuente de sonido y el oyente provoca otra atenuación. Cuando se define una fuente de sonido, se debe definir una distancia mínima, y una máxima, un oyente situado entre estas dos distancia, experimentará una atenuación de 6dB cada vez que su distancia a la fuente se doble, a una distancia mayor de la máxima el sonido será inaudible para el oyente.

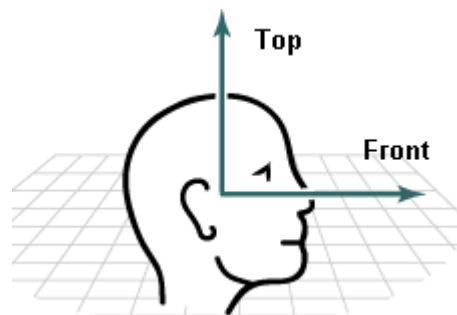


Ilustración 72: Oyente en DirectSound.

Además de las características anteriores, a partir de su versión 9.0 DirectX, incluye un modelo de reverberación que sigue las recomendaciones de [48]. En su versión 10.0 DirectX (Marzo del 2009) Microsoft recomienda no utilizar DirectSound y utilizar en su lugar XAudio2 [57].

EAX (Environmental Audio Extensions).

EAX es un conjunto de funcionalidades desarrollada por Creative Technologies, que pueden ser usadas como extensión de DirectSound y OpenAL, estas extensiones cumplen con todas las recomendaciones expuestas en [48]. Además, permite añadir a las escenas reflexiones agrupadas o individuales. Actualmente, en su versión 5.0, no se puede usar de forma nativa en Microsoft Windows Vista, y se recomienda utilizarlo a través de OpenAL 1.1. En [58] se puede encontrar una descripción completa de la problemática.

OpenAL.

Es una API de audio multiplataforma desarrollada por Creative Labs para el renderizado eficiente de audio posicional y multicanal en tres dimensiones. Inicialmente ideada para su uso en videojuegos, actualmente se puede usar para otras aplicaciones de audio [59]. OpenAL es compatible con las siguientes plataformas:

Plataforma	Dispositivo	Licencia
BSD	native	Open Source (LGPL)
IRIX	native	Open Source (LGPL)
Solaris	native	Open Source (LGPL)
Linux	ALSA	Open Source (LGPL)
	OSS	Open Source (LGPL)
Macintosh OS 8/9	Sound Manager	Open Source (LGPL)
Macintosh OS X	Core Audio	Open Source (Apple)
Microsoft Windows	Creative Audigy	Creative Labs, Inc.
	Creative Audigy 2	Creative Labs, Inc.
	Creative Audigy 4	Creative Labs, Inc.
	Creative X-Fi	Creative Labs, Inc.
	DirectSound	Open Source (LGPL)
	DirectSound3D	Open Source (LGPL)
	MMSYSTEM	Open Source (LGPL)
	NVIDIA nForce	Open Source (LGPL)
Microsoft Xbox	native	Creative Labs, Inc.
Microsoft Xbox 360	native	Creative Labs, Inc.

Ilustración 73: Compatibilidad OpenAL en distintas plataformas.

Con la intención de agregar funcionalidades extras en el futuro, OpenAL utiliza un mecanismo basado en extensiones, cada cual puede incluir sus propias extensiones en la distribución de OpenAL, así por ejemplo una extensión de OpenAL es EFX (Effects Extension) la cual permite usar EAX 5.0 y X-RAM a través de OpenAL [60].

El funcionamiento global de OpenAL se puede dividir en objetos fuentes de sonido, oyentes y buffers.

- **Fuente de sonido:** Una fuente de sonido queda definido por su posición, directividad (similar a DirectX), dirección y velocidad.

- **Oyente:** Contiene información a cerca de la información sobre la velocidad, posición y orientación del sistema de referencia, además de la ganancia general aplicada a todo sonido. Sólo puede haber un oyente por contexto.
- **Buffer:** Los buffers contiene la información del sonido en formato PCM (Pulse Code Modulation), bien en 8 o 16 bits, en formato mono o estéreo.

Java 3D.

Java3D API es una extensión del lenguaje de programación Java, para crear aplicaciones interactivas y animadas, en [61] se puede encontrar más información.

En su versión 1.3 posibilita efectos de reverberación avanzados, y coeficientes de absorción en el aire. La directividad de las fuentes de sonido son similares a las establecidas por DirectX, con la salvedad de que para cada fuente de sonido, se puede establecer un número arbitrario de “conos” cada uno con una orientación y nivel de ganancia distinto. Según la especificación 1.3 Java3D cumple con lo establecido en [48].

Cabe destacar que existen librerías [62] o [63] que permiten utilizar las funcionalidades de OpenAL, en Java.

8.2. Anexo B.

En este anexo se explicarán los resultados de las simulaciones realizadas, y las cuales se adjuntan en DVD anejo a este proyecto. Como se comentó en el capítulo 5, se han realizado más de 1500 simulaciones y los datos procedentes de dichas simulaciones ocupan algo más de 1.3 GB. Así pues se considera necesario explicar de un modo claro el contenido de cada directorio.

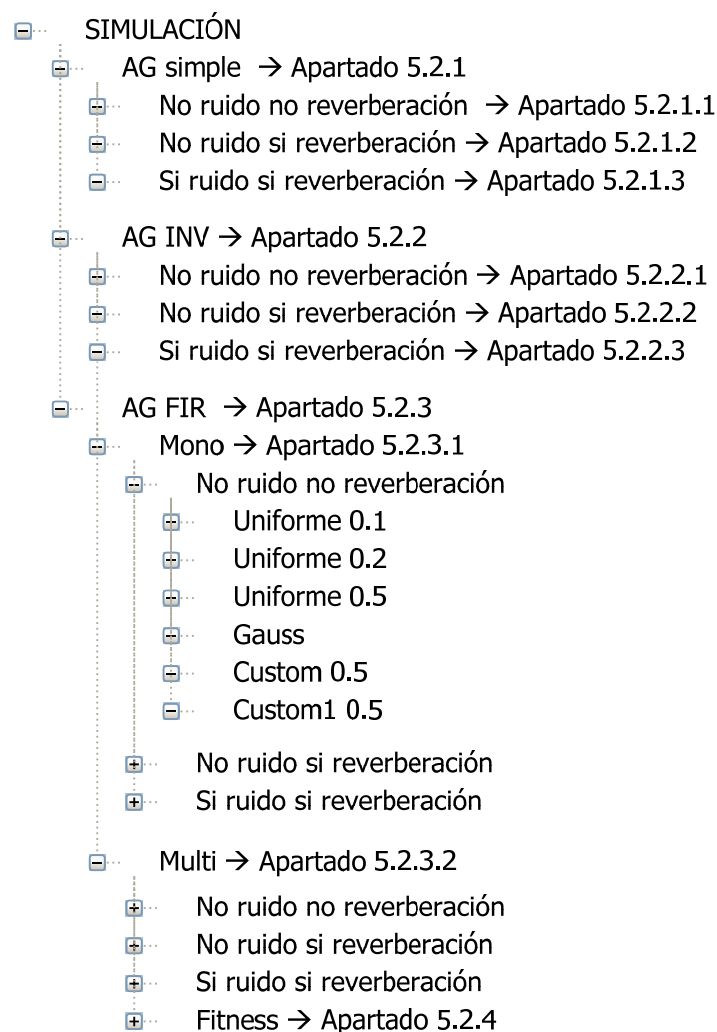


Ilustración 74: Directorios de las simulaciones y su correspondencia con los apartados de este proyecto.

En la imagen anterior se puede apreciar la correspondencia entre los subdirectorios del DVD y los apartados de este proyecto. Por otro lado dentro de cada subdirectorio hoja (aquel no tiene más subdirectorios) se encuentran los resultados. Como se explico durante el capítulo 5 de simulación, apartado 5.2, los resultados presentados son la media de realizar 10 experimentos, con los mismos

parámetros de simulación, los datos guardados de las simulaciones son dos, por una parte tenemos la grafica de la evolución del AG y por el resultado obtenido por el AG, el nombre de cada archivo define el contenido del mismo. Así por ejemplo

- **res-mutacion-Tipo-Factor-Coeff-Exp.fig** → Archivo de resultados.

Tipo → Tipo de función de mutación, uniforme, gaussiana, custom, custom1.

Factor → Parámetro de la función de mutación. Puede ser 0.1, 0.2 o 0.5.

Coeff → Número de coeficientes del filtro FIR, cuando se trate de esta estrategia.

Exp → Número de experimento, para esa configuración.

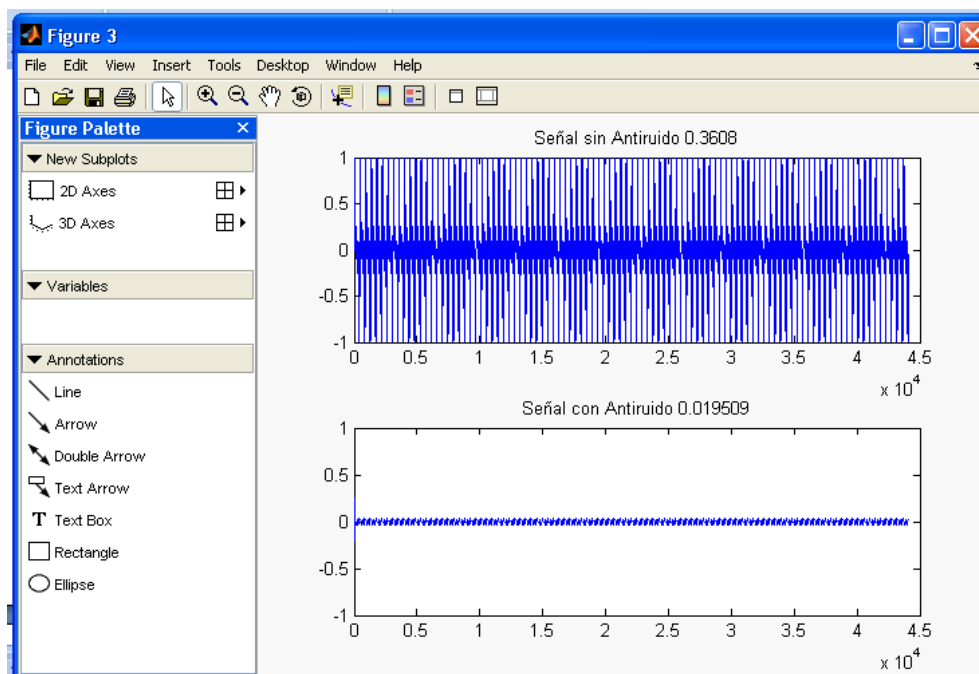


Ilustración 75: Contenido de archivo de resultados del simulador.

Como se puede apreciar en la imagen anterior, se guarda el resultado de la simulación sin el sistema CAR activado, y con el activo. El otro tipo de archivo que se guarda tiene el siguiente formato.

- **evo-mutacion-Tipo-Factor-Coeff-Exp.fig** → Archivo de evolución.

Tipo → Tipo de función de mutación, uniforme, gaussiana, custom, custom1.

Factor → Parámetro de la función de mutación. Puede ser 0.1, 0.2 o 0.5.

Coef→ Número de coeficientes del filtro FIR, cuando se trate de esta estrategia.

Exp→ Número de experimento, para esa configuración.

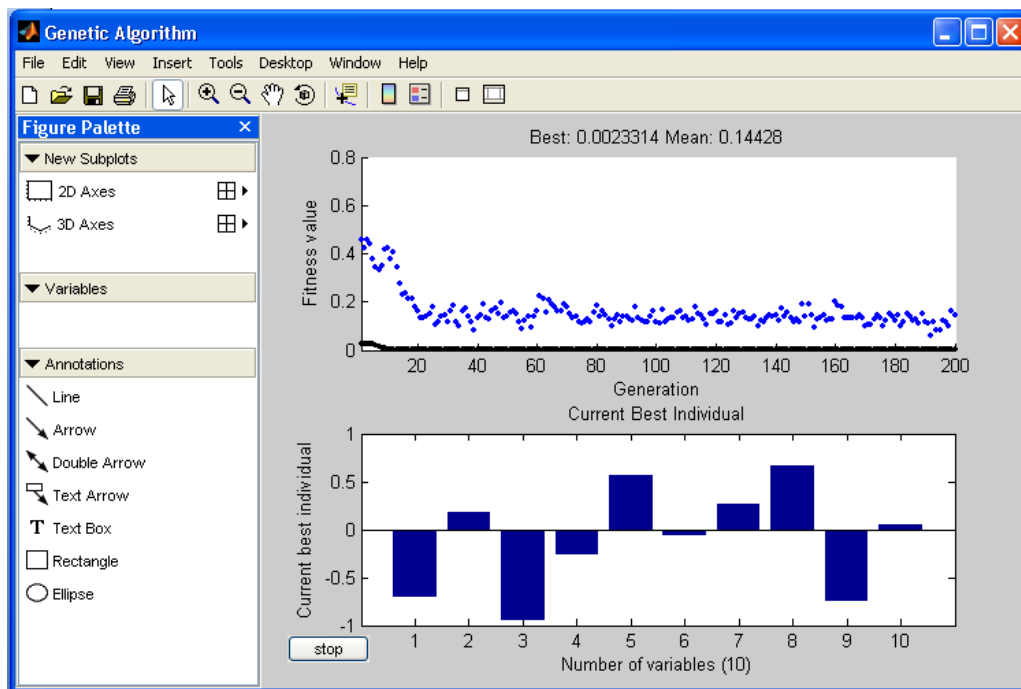


Ilustración 76: Contenido de archivo de resultados del simulador.

Como se puede apreciar en la imagen anterior, se guarda el resultado de la evolución, así como el mejor individuo obtenido hasta ese momento, en el caso concreto de la imagen anterior se puede apreciar como el individuo tiene 10 variables, las cuales se corresponden con un filtro FIR de 10 coeficientes.

8.3. Anexo C.

En este anexo se explicarán los resultados de las simulaciones realizadas, y las cuales se adjuntan en DVD anejo a este proyecto. Como se comentó en el capítulo 6, se han realizado más de 25 experimentos en un entorno real, en las cuales se ha invertido algo más de 150 horas de experimentación. Los datos procedentes de dichos experimentos ocupan algo más de 4 GB, así pues se considera necesario explicar de un modo claro el contenido cada directorio y su relación con cada apartado de este proyecto.

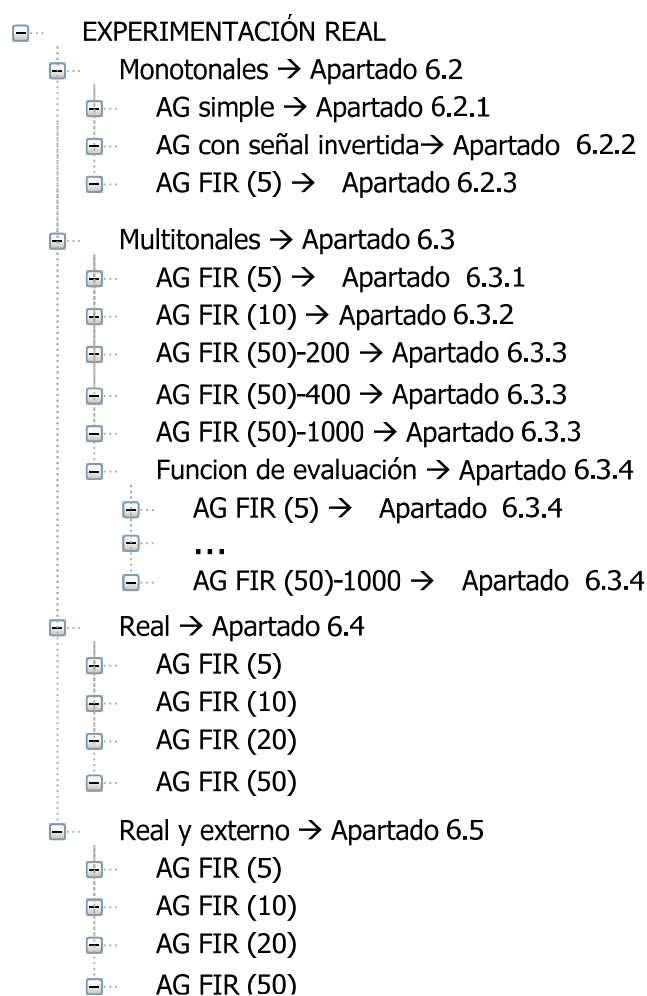


Ilustración 77: Directorios de los experimentos en real y su correspondencia con los apartados de este proyecto.

En la imagen anterior se puede apreciar la correspondencia entre los subdirectorios del DVD y los apartados de este proyecto. Por otro lado dentro de cada subdirectorio hoja (aquel no tiene más

subdirectorios) se encuentran los resultados. Como se explicó durante el capítulo 6 de experimentación en entorno real, por cada ronda se generarán los siguientes archivos:

- **Grabado SinAr X.wav** → Sonido captado por el micrófono, mientras el sistema CAR está desactivado, es decir solo se capta el ruido que desea atenuar.
- **Grabado Ar Invertido X.wav** → Sonido captado por el micrófono, mientras el sistema CAR está emitiendo campo secundario la señal invertida que se emite por el primario.
- **GrabaciónMejorX.wav** → Mejor resultado conseguido por la estrategia AG, para esa ronda. Este archivo contiene la grabación que resultó ser la mejor en una ronda, hay que destacar que se trata de la señal captada por el micrófono.
- **MejorX.wav** → Es la señal que ha conseguido el mejor resultado (según función de evaluación) para esa ronda.
- **Evo -Coef.fig** → Archivo de evolución, similar al mostrado en la ilustración 72.
- **Res -Coef.fig** → Archivo de resultados, diferente del mostrado en la ilustración 71, se muestra su contenido a continuación.

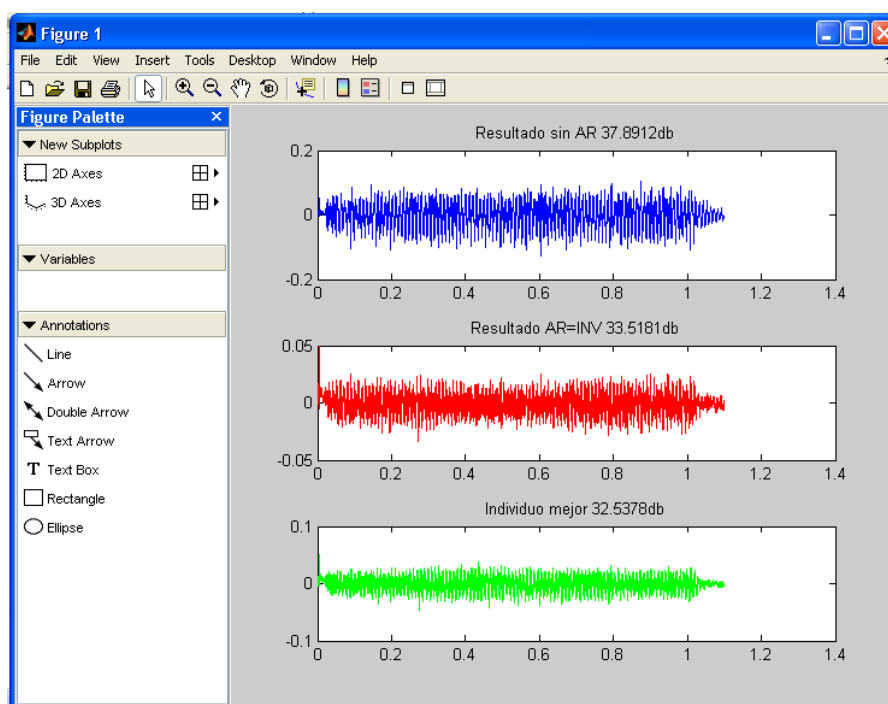


Ilustración 78: Contenido de archivo de resultados en entorno real.

CAPÍTULO 9. Referencias.

- [1] Jens Holger RINDEL, Claus LYNGE CHRISTENSEN., "Room acoustic simulation and auralization - How close can we get to the real room ? ", WESPAC 8, 2003.
- [2] IASIG. Interactive 3D Audio Rendering Guidelines, Level 1.0. 1999
<http://www.iasig.org/pubs/3dl2v1.pdf>
- [3] David Oliva Elorza, "Room acoustics modeling using the raytracing method: implementation and evaluation", 2005] University of Turku, Department of Physics.
- [4] Roberto A. Tenenbaum, Thiago S. Camilo, Thiago S. Camilo, Samir N. Y. Gerges, "Hybrid Method for Numerical Simulation of Room Acoustics with Auralization" Volume 29, 2, 2007.
- [5] L. Savioja, "Modeling Techniques for Virtual Acoustics". Helsinki University of Technology, Telecommunications Software and Multimedia Laboratory, Report TML-A3, 1999.
- [6] José R. Beltrán; Fernando A. Beltrán, "Matlab Implementation of Reverberation Algorithms" Journal of New Music Research, 1744-5027, Volume 31, 2, pp. 153–161, 2002.
- [7] Widrow B., Glover J.R., McCool J.M. et al. "Adaptive noise cancelling principles and applications," Proceedings of the IEEE 63, pp. 1692-1716, 1975.
- [8] Widrow B. and Stearns S.D., "Adaptive Signal Processing", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1985.
- [9] ISO 3744:1994 "Acoustics - Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure".
- [10] "Manual de medidas acústicas y control del ruido" / [ed.] Cyril M. Harris ; traducción, Aurora Suengas Goenetxea, Juan José Rodríguez ; [revisión técnica], Ignacio Español Etxaniz ; [prólogo] de Juan Miguel Hernández León. 3ª ed., [1ª en español] Madrid [etc.] : McGraw-Hill Interamericana , 1995.
- [11] Douglas R. Lanman, "EN 253: Matlab Exercise #3 Design of a Sound Level Meter", 29 November 2005.
- [12] Bernhard, Robert J. "The state of the art of active-passive noise control" In Inst. of Noise Control Engineering: Proceedings of the 1994 National Conference on Noise Control Engineering, Progress in Noise Control for Industry, pp. 421-428, 1994.
- [13] Van Overbeek, M., 1993 "Active control of periodic noise". Active control of periodic noise". TNO-TPD, Delft.
- [14] Lueg P., 1933 "Process of silencing sound oscillations," U.S. Patent 2,043,416 27.
- [15] Olson, H.F and May E.G. "Electronic sound absorber". J. Acoust. Soc. Am., Volume 25, 6, pp. 1130-1136, 1953.
- [16] Conover, W. B and Ringlees, R.J. "Recent contribution to transformer audio noise control", AIEE Trans., Volume 74, 1, pp. 77-90, 1955.

-
- [17] Oppenheim A.V. and Schafer R.W., "Digital Signal Processing", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1975.
- [18] Oppenheim A.V. and Schafer R.W., "Discrete-Time Signal Processing", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1989.
- [19] Rechenberg, I. "Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution". Frommann-Holzboog, Stuttgart. 1973.
- [20] Schwefel, H.-P. "Numerische Optimierung von Computermodellen mittels der Evolutionsstrategie", Basel: Birkhäuser. 1977.
- [21] Holland J.H., "Adaptation in Natural and Artificial Systems", Ann Arbor, MI: The University of Michigan Press, 1975.
- [22] Goldberg D.H., "Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning", New York: Addison-Wesley, 1989.
- [23] De Jong K., "A 10 year perspective", Proc. Int. Conf. Genetic Algorithms and Their Applications, pp. 169-177, 1985.
- [24] De Jong K., "Learning with the genetic algorithm: an overview", Machine Learning, Volume 3, pp. 121-137, 1988.
- [25] Koza, John R. "Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection." Cambridge, MA: The MIT Press. 1992.
- [26] Mínguez A. and Recuero M., "A Simple Genetic Algorithm for Active Noise Control", ICA-ASA 98, pp. 289-290, 1998.
- [27] N. Jafferri and M. O. Tokhi "Active noise control design with a simple genetic algorithm" Department of Automatic Control and Systems Engineering, The University of Sheffield.
- [28] James Cunha Werner, Jose Sotelo Junior, Raul G. Lima, Terence C. Fogarty "Active Noise Control In Ducts Using Genetic Algorithms" São Paulo University, 1999.
- [29] S.E Wright, H. Atmoko. "Active Control of Environmental Noise, VII: Performance of multi-frequency, multi-channel, freefield sound cancelling systems." Journal of Sound and Vibration, Volume 258, 2, pp. 203-232, 2002.
- [30] Nelson P.A. and Elliott S.J., "Active Control of Sound", Academic Press, 1992.
- [31] Elliott, S.J., "Signal processing for active control", San Diego [etc.]: Academic Press, 2001.
- [32] Antonio Mínguez, Manuel Recuero "Control activo del ruido en un automóvil", TecniAcustica, 1999.
- [33] http://www.bose.com/controller?url=/shop_online/headphones/noise_cancelling_headphones/quietcomfort_15/index.jsp
- [34] <http://www.sony.es/product/hed-travel/mdr-nc500d>

- [35] Elliott, S.J., Capítulo: Optimal and Adaptive Digital Filters, Signal Processing for Active Control, Academic Press, pp. 49-102, 2001.
- [36] Shink J.J., "Adaptive IIR filtering", IEEE ASSP Magazine, Volume 6, 2, pp 4-21, 1989.
- [37] Stearns S.D., "Error surfaces of recursive adaptive filters", IEEE Trans. , Volume 28, 6, pp. 603-606, 1981.
- [38] Burgess J.C., "Active adaptive sound control in a duct: A computer simulation", J. Acoust. Soc. Am., Volume 70, pp. 715-726, 1981.
- [39] Eriksson L.J., "Development of the Filtered-U Algorithm for Active Noise Control", J. Acoust. Soc. Am., Volume 89, 1, pp. 257-265, 1991.
- [40] Frank Gray, "Pulse Code Communication", U.S. Patent 2,632,058.
- [41] Hall J., "A Novel, Real-Valued Genetic Algorithm for Optimizing Radar Absorbing Materials", Technical Report NASA, NASA/CR-2004-212669.
- [42] Darwin C. "El origen de las especies". Círculo de lectores S.A, 1997.
- [43] Lauri Savioja, "Modeling Techniques for Virtual Acoustic" J. Audio Eng. Soc, Volume 47, pp. 675-705, 1999.
- [44] Riitta Väänänen, "Parametrization, Auralization, and Authoring of Room Acoustics for Virtual Reality Applications", Helsinki University of Technology, 2003.
- [45] David Oliva Elorza, "Room acoustics modeling using the raytracing method: implementation and Evaluation", University of Turku Department of Physics, 2005.
- [46] Interactive Audio Special Interest Group (IA-SIG) homepage:
<http://www.iasig.org/>
- [47] IASIG. Interactive 3D Audio Rendering Guidelines, Level 1.0. 1998
<http://www.iasig.org/pubs/3dl2v1.pdf>
- [48] IASIG. Interactive 3D Audio Rendering Guidelines, Level 2.0. 1999
<http://www.iasig.org/pubs/3dl2v1a.pdf>
- Java Sound Programmer Guide.
- [49] http://java.sun.com/j2se/1.5.0/docs/guide/sound/programmer_guide/contents.html
- [50] Data Acquisition ToolBox.
<http://www.mathworks.com/products/daq/>
- [51] Java Genetic Algorithms Package.
<http://jgap.sourceforge.net/>
- [52] Genetic Algorithm Library
<http://www.codeproject.com/KB/recipes/geneticlibrary.aspx>

-
- [53] Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox
<http://www.mathworks.com/products/gads/>
- [54] Manual de usuario Presonus FireBox.
http://www.presonus.com/media/manuals/04_Firebox_Espanol.pdf
- [55] Micrófono CAD M179.
<http://www.cadaudio.com/M179.php>
- [56] Managed Code
[http://msdn.microsoft.com/en-us/library/bb318664\(VS.85\).aspx](http://msdn.microsoft.com/en-us/library/bb318664(VS.85).aspx)
- [57] Deprecated Audio Technologies.
[http://msdn.microsoft.com/en-us/library/cc308001\(VS.85\).aspx](http://msdn.microsoft.com/en-us/library/cc308001(VS.85).aspx)
- [58] OpenAl Windows Vista
<http://connect.creativelabs.com/openal/OpenAL%20Wiki/OpenAL%C2%AE%20and%20Windows%20Vista%E2%84%A2.aspx>
- [59] OpenAl HomePage
<http://www.openal.org>
- [60] OpenAl SDK Windows
<http://connect.creativelabs.com/openal/OpenAL%20Wiki/OpenAL%C2%AE%20and%20Windows%20Vista%E2%84%A2.aspx>
- [61] Java 3D
<http://java.sun.com/javase/technologies/desktop/java3d/>
- [62] Java OpenAl homepage
<https://joal.dev.java.net/>
- [63] Lightweight Java Game Library homepage
<http://www.lwjgl.org/>