



**POLITÉCNICA**

escuela técnica superior de  
**ingeniería**  
y **diseño**  
**industrial**

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y DISEÑO INDUSTRIAL

Graduado en Ingeniería Mecánica

TRABAJO FIN DE GRADO

**Diseño y construcción de un subsistema electrónico  
de control de sonido activo**

Autor: Rafael Alférez Robisco

Co-tutora:  
D.<sup>a</sup> Teresa Bravo María

CSIC - Instituto de Tecnologías  
Físicas y de la Información

Tutor:  
D. Federico Javier Muñoz  
Cano

Departamento de Ingeniería  
Eléctrica, Electrónica,  
Automática y Física Aplicada

Madrid, Febrero, 2025



## **Agradecimientos**

No puedo negar que esta etapa de mi vida ha sido y se ha hecho larga, sin embargo me ha dado la oportunidad de aprender a valorar el concepto de trabajo en equipo, y es que si bien siempre he preferido trabajar solo, no era consciente de quiénes conformaban mi verdadero equipo. Quiero hacer especial mención por todas aquellas personas que han formado parte todos estos años y han colaborado en mi evolución hasta la persona que soy hoy.

Estoy muy agradecido por mis tutores Javier Muñoz y Teresa Bravo, ambos me apoyasteis con mi idea para este trabajo y habéis sido una gran ayuda durante todo el proceso, con respuestas rápidas, atención al detalle, un excelente trato que me ha permitido realizar con motivación e ilusión un proyecto que jamás imaginé que podría llevar a cabo y disfrutar tanto.

Por supuesto, gracias a mi familia, la paciencia y apoyo de mis padres es algo que no he pasado por alto, si bien he podido darles quebraderos de cabeza alguna vez, no es algo nuevo, pero no puedo sentirme más afortunado de poder haber gozado de una formación en tan buena calidad de vida gracias a su esfuerzo, así como agradecido estoy con mi hermana por todo lo que me ha soportado en periodos intensivos de estudio, y sobre todo por lo mucho que me ha animado, aún sin ser consciente muchas veces, para afrontar cada día con alegría.

Durante estos años me he enfrentado a cursos complicados anímicamente, Marta, gracias por llegar a mi vida en el momento justo, mi mayor motivación cada mañana desde hace dos años no ha sido otra que tú, soy la versión más feliz de mi mismo y he descubierto de lo que puedo ser capaz sabiendo apoyarme en tu ayuda cuando ha sido necesario. Solo puedo estar ilusionado por las aventuras que hemos de afrontar de ahora en adelante, pues me siento muy afortunado de contar contigo para caminar por la vida juntos.

Quiero hacer especial mención por aquellos docentes que a lo largo de mi formación contribuyeron significativamente a mi progreso.

Javier Sanguino, en un curso tan duro como fue mi entrada, contar con una voz que me motivase a enfocarme en que mi capacidad estaba ahí, es algo que no tiene precio, muchas gracias.

Alberto Sanchidrián, al igual que me sucedió con Javier, contar con un trato cercano y distendido haciendo que no temiésemos a las estructuras que recién llegaban a nuestra vida, fue de gran ayuda y sobre todo, estoy muy agradecido por tu trato personal con todos, siempre comprensivo, empático y sonriente, muchas gracias.

Carmen García-Miguel, conseguiste que recuperase la ilusión por las matemáticas, aprendí de nuevo a apreciar la belleza detrás de los números que tanto tiempo atrás había perdido, muchas gracias.

Rafael Cascón, tu manera de ejercer la docencia, práctica, completa, de la mano con los alumnos, ha sido y será siempre un ejemplo de cómo hacer correctamente las cosas en el trabajo, eres una referencia de buen hacer para mi, muchas gracias.

Francisco Santos, me siento muy feliz por haber podido contar con tu docencia, no solo por la paciencia y comprensión con los alumnos, sino por la verdadera preocupación y atención demostrada por los estudiantes, no es fácil sentir la calidez de un amigo que se preocupa por ti cuando somos tal volumen de alumnos, sin embargo se sintió como una sonrisa llena de momentos, cortantes y axiles, muchas gracias.

Carmen Martínez y Yolanda Doce, en pleno confinamiento vuestro tándem docente y trato con el alumno me hicieron sentir que dentro de la seriedad y rectitud con la que se debe actuar en la vida, no es necesario tratar a las personas como números, aprendí mucho sobre mecánica de fluidos, pero sobre todo disfruté de ello y maduré en mi forma de trabajar, muchas gracias.

Juan Mario García, cuando estaba en uno de los momentos más desalentadores tras dos años complicados de inicio de carrera planteándome si debería continuar con mis estudios, los ánimos para enfrentarme a un nuevo reto como fue el concurso de ideas del cuál resulté finalmente ganador, no puede parecer mucho, pero me hizo recordar el motivo por el cual quería ser ingeniero, que quedaba más allá de los números y la teoría, sentirme capaz de resolver problemas en el mundo real y retomar así mi formación con gran ilusión, muchas gracias.

Isabel Carrillo, siempre cercana al alumno sabiendo que podíamos contar contigo, siempre tirándonos de las orejas cariñosamente para que fuésemos la mejor versión y logrando hacer de mi paso por la ETSIDI algo fantástico al mostrarme la vida universitaria con las asociaciones, la representación estudiantil y muchas otras tantas actividades, vitales para nuestro buen desarrollo. Te deseo lo mejor para las nuevas grandes etapas en las que te encaminas, allá por donde pases pueden sentirse afortunados, muchas gracias.

Irene Panea, no puedo olvidarme de agradecer tu gran dedicación con los estudiantes, yendo de la mano con Isabel, eres una persona maravillosa, siempre involucrada con las asociaciones y los proyectos de los alumnos, me siento muy feliz de haber contado contigo y todas las compañeras del equipo en subdirección, soportar todas nuestras necesidades como asociaciones no es fácil, y la empatía y cariño que siempre nos demuestras, no tiene precio, muchas gracias.

De igual forma, dentro de los miembros de la comunidad universitaria, estoy muy agradecido por el servicio de todos los conserjes para atender nuestras necesidades, del gran servicio de Fran y Nina durante todos estos años con tantos cambios que han sufrido, y en general, por el PAS compuesto por una gente maravillosa que es parte clave de lo que ha sido la familia ETSIDI, muchas gracias a todos, pues si bien para muchos están en las sombras, yo no puedo olvidar que el personal siempre ha estado cuando lo he necesitado.

Quiero terminar agradeciendo a mis compañeros más cercanos, todos habéis logrado amenizar la experiencia de estudiar en la UPM compartiendo logros y desventuras conmigo, muchas gracias a Andros, Ernesto, Javi y Jorge, el equipo original, si bien se han partido caminos de distinta forma, las anécdotas y los años juntos no tienen precio, gracias por tanto.

Martín Reigadas, gracias por tu ayuda para comprender mejor conceptos matemáticos de este proyecto que no sabía cómo enfrentar, pero sobre todo por ser un buen amigo en la vida, te deseo mucho éxito en tus objetivos, todo llegará y tienes capacidad para lograr lo que desees, aunque a veces no lo llegues a creer.

Francisco Montañés, muchísimas gracias por devanarte los sesos conmigo, no habría comprendido conceptos de programación sin tu ayuda, y sobre todo muchas gracias por ser siempre un compañero de locuras con el cual poder hablar y hablar y hablar de cualquier idea feliz.

Agradecer a Paul Stoffregen y el resto de miembros activos del foro PJRC por sus indicaciones y ayuda inestimable para comprender mejor las limitaciones y opciones de mi hardware para llevar a cabo este proyecto.

También mención muy especial para Manuel Sierra y Belén Galocha por permitirme emplear las instalaciones del Laboratorio de Ensayos y Homologación de Antenas, así como a Xiaoliang Sun y Sergio Arranz por su inestimable ayuda durante el proceso, más allá del propio proyecto es una experiencia única que no podré olvidar.

Antes de finalizar, un agradecimiento enorme para la asociación CREA, su apoyo ha sido y es de inestimable valor, muchas gracias a Dani, Marce, Carol, Cinque, Yu, Leo, Jorge, Yago y mucha más gente que seguramente olvide por concederme material y lugar para llevar a cabo los ensayos, ayudarme en tantas ocasiones con la resolución de problemas y sobre todo por vuestra amistad, cada curso ha sido único gracias a vosotros. Un abrazo enorme a todos.

De igual forma, agradecer a Pablo Quesada, pues si bien no es miembro del CREA, prácticamente se ha sentido como uno más siempre. Aprendí mucho sobre los modelos OSI y de ahí en adelante todo fueron proyectos maravillosos, muchas gracias por todo.

Por último, muchas gracias a quienes muestren interés por este proyecto, espero y deseo que en las próximas páginas haya logrado transmitir la motivación que he arrastrado conmigo a lo largo de su elaboración y resulte una lectura interesante, con esto concluyo diez años de una etapa única en mi vida.



# Índice

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. OBJETIVOS Y ALCANCE .....	3
CAPÍTULO 2. SITUACIÓN ACTUAL .....	4
2.1. FUNDAMENTOS FÍSICOS .....	4
2.1.1. ECUACIÓN DE ESTADO .....	5
2.1.2. ECUACIÓN DE CONTINUIDAD .....	7
2.1.3. ECUACIÓN DE FUERZA SIMPLE: ECUACIÓN DE EULER .....	9
2.1.4. OBTENCIÓN DE LA ECUACIÓN DE ONDA LINEALIZADA .....	11
2.2. SISTEMAS BÁSICOS DE CONTROL .....	12
2.3. SUBSISTEMAS DE CONTROL ACTIVO .....	13
2.4. CONCLUSIONES PRELIMINARES.....	15
CAPÍTULO 3. SELECCIÓN DE COMPONENTES Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO.....	16
3.1. NÚCLEO ELECTRÓNICO .....	20
3.1.1. NÚCLEO TEENSY® .....	20
3.1.2. PLACA DE CONEXIONES .....	22
3.1.3. SALIDA DE AUDIO.....	23
3.1.4. EXTENSIÓN DEL PUERTO USB .....	23
3.2. CARCASA .....	24
3.2.1. CUERPO INFERIOR .....	25
3.2.2. SUJECCIÓN PRINCIPAL.....	25
3.2.3. CUERPO SUPERIOR .....	26
3.2.4. PUERTO TIPO C .....	27
3.2.5. TAPAS Y REFUERZO.....	27
CAPÍTULO 4. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL.....	29
4.1. POSICIONAMIENTO Y CONEXIÓN DE LOS ELEMENTOS FÍSICOS DEL SISTEMA .....	29
4.2. CÓDIGO Y SOFTWARE .....	31
4.2.1. MATLAB, CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES DEL SISTEMA .....	31
4.2.1.1. LMS_ALGORITHM .....	33
4.2.1.2. FX_LMS_ALGORITHM .....	35
4.2.2. ARDUINO, IMPLEMENTACIÓN DE LOS COEFICIENTES PARA ENSAYO .....	36
4.3. ENSAYOS .....	39
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO .....	64
5.1. CONCLUSIONES .....	64
5.2. LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO .....	68
BIBLIOGRAFÍA .....	70
ANEXO .....	71
1. CÓDIGO MATLAB EMPLEADO PARA PRE-CALCULAR LOS COEFICIENTES .....	71
2. CÓDIGO MATLAB – LMS_ALGORITHM .....	71
3. CÓDIGO MATLAB – FX_LMS_ALGORITHM .....	72
4. CÓDIGO ARDUINO .....	73
5. TEENSY ANC – ESQUEMA GENERAL .....	77
6. TEENSY ANC – TEENSY AUDIO SHIELD MODIFIED .....	78
7. TEENSY ANC – TEENSY AUDIO SHIELD.....	79



# Índice de figuras

FIGURA 1: PRESTACIONES TÉCNICAS DE LOS MATERIALES POROSOS. [3].....	2
FIGURA 2: ESQUEMA DE LA CANCELACIÓN DE UNA SINUSOIDE. ....	4
FIGURA 3: ESQUEMA DEL VOLUMEN DE CONTROL DIFERENCIAL. [5].....	8
FIGURA 4: SISTEMAS DE CONTROL DE RUIDO BÁSICOS. A) SISTEMA “FEEDFORWARD” B) SISTEMA “FEEDBACK”. [1] ..	12
FIGURA 5: JERARQUÍA DE RENDIMIENTO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE RUIDO ACTIVO. ....	14
FIGURA 6: PLACA DE DESARROLLO TEENSY® 4.0. [8].....	18
FIGURA 7: ESQUEMA FRONTAL DE LA PLACA DE DESARROLLO TEENSY® 4.0. [9].....	18
FIGURA 8: ESQUEMA TRASERO DE LA PLACA DE DESARROLLO TEENSY® 4.0. [10] .....	18
FIGURA 9: ESQUEMA FRONTAL DE LA PLACA DE AUDIO PARA TEENSY® 4.0. [11].....	19
FIGURA 10: ESQUEMA TRASERO DE LA PLACA DE AUDIO PARA TEENSY® 4.0. [11].....	19
FIGURA 11: EJEMPLO DE MONTAJE PARA UN SISTEMA DE CUATRO CANALES DE AUDIO. [11] .....	19
FIGURA 12: PROTOTIPO PROPUESTO. ....	20
FIGURA 13: VISTA FRONTAL DE LOS ELEMENTOS QUE COMPONEN EL PROTOTIPO CONECTADOS ENTRE SÍ.....	20
FIGURA 14: VISTA TRASERA DE LOS ELEMENTOS QUE COMPONEN EL PROTOTIPO CONECTADOS ENTRE SÍ. ....	20
FIGURA 15: IMÁGENES DEL PROCESO DE SOLDADURA DE LAS PLACAS DE DESARROLLO TEENSY® .....	21
FIGURA 16: ESQUEMA DE CORTES PARA MODIFICAR UNA PLACA DE AUDIO REVISIÓN D PARA TEENSY® 4.0. [12] .....	22
FIGURA 17: ESQUEMA DE PUENTES PARA MODIFICAR UNA PLACA DE AUDIO REVISIÓN D PARA TEENSY® 4.0. [12] ....	22
FIGURA 18: REFERENCIA DE CONEXIÓN DE LOS PINES PARA UN PUERTO MICRO-USB TIPO B. [13].....	23
FIGURA 19: REFERENCIA DE CONEXIÓN DE LOS PINES PARA UN PUERTO USB TIPO C. [13] .....	23
FIGURA 20: EJEMPLO DE CONEXIÓN DE UN PUERTO USB-C. ....	24
FIGURA 21: ANCLAJE EN EL PROTOTIPO COMO PRUEBA DE CONCEPTO. ....	24
FIGURA 22: RENDERIZADO 3D DE LA CARCASA. VISTA FRONTAL.....	24
FIGURA 23: RENDERIZADO 3D DE LA CARCASA. VISTA TRASERA. ....	24
FIGURA 24: RENDERIZADO 3D DEL CUERPO INFERIOR. VISTA SUPERIOR.....	25
FIGURA 25: RENDERIZADO 3D DEL CUERPO INFERIOR. VISTA INFERIOR. ....	25
FIGURA 26: RENDERIZADO 3D DE LA SUJECCIÓN PRINCIPAL. ....	25
FIGURA 27: RENDERIZADO 3D DEL CUERPO SUPERIOR. VISTA SUPERIOR.....	26
FIGURA 28: RENDERIZADO 3D DEL CUERPO SUPERIOR. VISTA INFERIOR.....	26
FIGURA 29: RENDERIZADO 3D DE LA PIEZA DE SUJECCIÓN DEL PUERTO USB C A LA CARCASA SUPERIOR. ....	27
FIGURA 30: RENDERIZADO 3D DE LA TAPA FRONTAL. VISTA EXTERIOR.....	28
FIGURA 31: RENDERIZADO 3D DE LA TAPA FRONTAL. VISTA INTERIOR.....	28
FIGURA 32: RENDERIZADO 3D DE LA TAPA TRASERA. VISTA EXTERIOR.....	28
FIGURA 33: RENDERIZADO 3D DE LA TAPA TRASERA. VISTA INTERIOR. ....	28
FIGURA 34: GRÁFICA HABITUAL DEL ERROR CUADRÁTICO COMO FUNCIÓN DE DOS COEFICIENTES EN EL FILTRO DE CONTROL DIGITAL. [16].....	34
FIGURA 35: ESQUEMA DE BLOQUES DISEÑADO EN “AUDIO SYSTEM DESIGN TOOL FOR TEENSY AUDIO LIBRARY”. ....	37
FIGURA 36: VISTA DE LA DISTRIBUCIÓN DEL ALTAVOZ PRIMARIO.....	40
FIGURA 37: VISTA DE LA DISTRIBUCIÓN DEL ALTAVOZ SECUNDARIO.....	40
FIGURA 38: ONDA ACÚSTICA ENSAYO 13/11/2024.....	41
FIGURA 39: ANÁLISIS DE ESPECTRO TRAMO 1. ENSAYO 13/11/2024. ....	41
FIGURA 40: ANÁLISIS DE ESPECTRO TRAMO 2. ENSAYO 13/11/2024. ....	42
FIGURA 41: ANÁLISIS DE ESPECTRO TRAMO 3. ENSAYO 13/11/2024. ....	42

FIGURA 42: ANÁLISIS DE ESPECTRO DEL MICRÓFONO EMPLEADO.....	43
FIGURA 43: IMAGEN PANORÁMICA DE LA CÁMARA ANECOICA DURANTE LOS ENSAYOS. 16/12/2024. ....	44
FIGURA 44: DETALLE DE LA CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DURANTE LOS ENSAYOS. 16/12/2024. ....	45
FIGURA 45: ONDA ACÚSTICA ENSAYO A 100 Hz. CÁMARA ANECOICA 16/12/2024. ....	46
FIGURA 46: ANÁLISIS DE ESPECTRO, TRAMO 1, ENSAYO A 100 Hz. CÁMARA ANECOICA 16/12/2024. ....	46
FIGURA 47: ANÁLISIS DE ESPECTRO, TRAMO 2, ENSAYO A 100 Hz. CÁMARA ANECOICA 16/12/2024. ....	47
FIGURA 48: ANÁLISIS DE ESPECTRO, TRAMO 3, ENSAYO A 100 Hz. CÁMARA ANECOICA 16/12/2024. ....	47
FIGURA 49: ONDA ACÚSTICA ENSAYO A 200 Hz. CÁMARA ANECOICA 16/12/2024. ....	48
FIGURA 50: ANÁLISIS DE ESPECTRO, TRAMO 1, ENSAYO A 200 Hz. CÁMARA ANECOICA 16/12/2024. ....	48
FIGURA 51: ANÁLISIS DE ESPECTRO, TRAMO 2, ENSAYO A 200 Hz. CÁMARA ANECOICA 16/12/2024. ....	49
FIGURA 52: ANÁLISIS DE ESPECTRO, TRAMO 3, ENSAYO A 200 Hz. CÁMARA ANECOICA 16/12/2024. ....	49
FIGURA 53: ONDA ACÚSTICA ENSAYO A 300 Hz. CÁMARA ANECOICA 16/12/2024. ....	50
FIGURA 54: ANÁLISIS DE ESPECTRO, TRAMO 1, ENSAYO A 300 Hz. CÁMARA ANECOICA 16/12/2024. ....	50
FIGURA 55: ANÁLISIS DE ESPECTRO, TRAMO 2, ENSAYO A 300 Hz. CÁMARA ANECOICA 16/12/2024. ....	51
FIGURA 56: ANÁLISIS DE ESPECTRO, TRAMO 3, ENSAYO A 300 Hz. CÁMARA ANECOICA 16/12/2024. ....	51
FIGURA 57: ANÁLISIS DE ESPECTRO, TRAMO 4, ENSAYO A 300 Hz. CÁMARA ANECOICA 16/12/2024. ....	52
FIGURA 58: ANÁLISIS DE ESPECTRO, TRAMO 5, ENSAYO A 300 Hz. CÁMARA ANECOICA 16/12/2024. ....	52
FIGURA 59: ONDA ACÚSTICA ENSAYO A 1000 Hz. CÁMARA ANECOICA 16/12/2024. ....	53
FIGURA 60: ANÁLISIS DE ESPECTRO, TRAMO 1, ENSAYO A 1000 Hz. CÁMARA ANECOICA 16/12/2024. ....	53
FIGURA 61: ANÁLISIS DE ESPECTRO, TRAMO 2, ENSAYO A 1000 Hz. CÁMARA ANECOICA 16/12/2024. ....	54
FIGURA 62: ANÁLISIS DE ESPECTRO, TRAMO 3, ENSAYO A 1000 Hz. CÁMARA ANECOICA 16/12/2024. ....	54
FIGURA 63: ONDA ACÚSTICA ENSAYO A 700 Hz. CÁMARA ANECOICA 16/12/2024. ....	55
FIGURA 64: ANÁLISIS DE ESPECTRO, TRAMO 1, ENSAYO A 700 Hz. CÁMARA ANECOICA 16/12/2024. ....	55
FIGURA 65: ANÁLISIS DE ESPECTRO, TRAMO 2, ENSAYO A 700 Hz. CÁMARA ANECOICA 16/12/2024. ....	56
FIGURA 66: ANÁLISIS DE ESPECTRO, TRAMO 3, ENSAYO A 700 Hz. CÁMARA ANECOICA 16/12/2024. ....	56
FIGURA 67: ONDA ACÚSTICA ENSAYO A 200 Hz. SALA CREA 18/12/2024. ....	57
FIGURA 68: ANÁLISIS DE ESPECTRO, TRAMO 1, ENSAYO A 200 Hz. SALA CREA 18/12/2024. ....	58
FIGURA 69: ANÁLISIS DE ESPECTRO, TRAMO 2, ENSAYO A 200 Hz. SALA CREA 18/12/2024. ....	58
FIGURA 70: ANÁLISIS DE ESPECTRO, TRAMO 3, ENSAYO A 200 Hz. SALA CREA 18/12/2024. ....	59
FIGURA 71: ONDA ACÚSTICA ENSAYO A 700 Hz. SALA CREA 18/12/2024. ....	60
FIGURA 72: ANÁLISIS DE ESPECTRO, TRAMO 1, ENSAYO A 700 Hz. SALA CREA 18/12/2024. ....	60
FIGURA 73: ANÁLISIS DE ESPECTRO, TRAMO 2, ENSAYO A 700 Hz. SALA CREA 18/12/2024. ....	61
FIGURA 74: ANÁLISIS DE ESPECTRO, TRAMO 3, ENSAYO A 700 Hz. SALA CREA 18/12/2024. ....	61
FIGURA 75: ONDA ACÚSTICA ENSAYO A 200 Hz. DOMICILIO 19/12/2024. ....	62
FIGURA 76: ANÁLISIS DE ESPECTRO, TRAMO 1, ENSAYO A 200 Hz. DOMICILIO 19/12/2024. ....	62
FIGURA 77: ANÁLISIS DE ESPECTRO, TRAMO 2, ENSAYO A 200 Hz. DOMICILIO 19/12/2024. ....	63
FIGURA 78: ANÁLISIS DE ESPECTRO, TRAMO 3, ENSAYO A 200 Hz. DOMICILIO 19/12/2024. ....	63
FIGURA 79: GRÁFICO COMPARATIVO DE LA ATENUACIÓN PROMEDIO OBTENIDA EN LOS DIFERENTES ENSAYOS. ....	65
FIGURA 80: GRÁFICO COMPARATIVO DEL PROMEDIO Y LA DESVIACIÓN TÍPICA PARA CADA ENSAYO PARA OBTENER EL MISMO RENDIMIENTO. ....	66
FIGURA 81: GRÁFICO DEL NIVEL DE RUIDO CAPTADO DURANTE LOS TRAMOS EN LOS ENSAYOS REALIZADOS EN LA CÁMARA ANECOICA. ....	67

## Índice de tablas

TABLA 1: SELECCIÓN DE ESPECIFICACIONES DE LA PLACA DE DESARROLLO TEENSY® 4.0. [7] .....	17
TABLA 2: TABLA DE VALORES CON LOS RESULTADOS DE ATENUACIÓN PROMEDIO PARA TODOS LOS ENSAYOS REALIZADOS. ....	65
TABLA 3: TABLA DE LOS VALORES DE VOLUMEN CAPTADOS PARA LOS ENSAYOS REALIZADOS EN LA CÁMARA ANECOICA. ....	67

## Índice de ecuaciones

ECUACIÓN 1: ECUACIÓN DE ONDA PLANA. [4] .....	5
ECUACIÓN 2: ECUACIÓN DE ESTADO DE UN GAS PERFECTO. [4] .....	5
ECUACIÓN 3: ECUACIÓN DE ESTADO ISOTÉRMICA DE UN GAS PERFECTO. ....	6
ECUACIÓN 4: ECUACIÓN DE ESTADO ADIABÁTICO DE UN GAS PERFECTO. ....	6
ECUACIÓN 5: EXPANSIÓN DE TAYLOR DE LA ECUACIÓN DE ESTADO ADIABÁTICO DE UN GAS PERFECTO. ....	6
ECUACIÓN 6: RELACIÓN LINEAL ENTRE LAS FLUCTUACIONES DE PRESIÓN Y EL CAMBIO DE DENSIDAD. ....	6
ECUACIÓN 7: MÓDULO ADIABÁTICO DE VOLUMEN. [4] .....	6
ECUACIÓN 8: RELACIÓN LINEAL EXPRESADA EN FUNCIÓN DE LA PRESIÓN ACÚSTICA. [4] .....	6
ECUACIÓN 9: TEOREMA DEL TRANSPORTE DE REYNOLDS. [5] .....	7
ECUACIÓN 10: ECUACIÓN INTEGRAL DE CONSERVACIÓN DE LA MASA. ....	7
ECUACIÓN 11: VARIACIÓN TEMPORAL DE LA MASA PARA EL VOLUMEN DE CONTROL DIFERENCIAL. ....	8
ECUACIÓN 12: VARIACIÓN ESPACIAL DE LA MASA PARA EL VOLUMEN DE CONTROL DIFERENCIAL. ....	8
ECUACIÓN 13: FLUJO NETO DE MASA EN LA DIRECCIÓN X. ....	8
ECUACIÓN 14: FLUJO NETO DE MASA EN LA DIRECCIÓN Y. ....	8
ECUACIÓN 15: FLUJO NETO DE MASA EN LA DIRECCIÓN Z. ....	8
ECUACIÓN 16: VARIACIÓN ESPACIAL DE LA MASA PARA EL VOLUMEN DE CONTROL DIFERENCIAL COMPLETA. ....	8
ECUACIÓN 17: ECUACIÓN DIFERENCIAL DE CONSERVACIÓN DE LA MASA. ....	9
ECUACIÓN 18: ECUACIÓN DE CONTINUIDAD. ....	9
ECUACIÓN 19: RELACIÓN ENTRE LA DIFERENCIA DE DENSIDAD Y LA CONDENSACIÓN. ....	9
ECUACIÓN 20: ECUACIÓN DE CONTINUIDAD LINEALIZADA. ....	9
ECUACIÓN 21: SEGUNDA LEY DE NEWTON. [4] .....	9
ECUACIÓN 22: FUERZA NETA DIFERENCIAL EN LA DIRECCIÓN X. [4] .....	10
ECUACIÓN 23: FUERZA NETA DIFERENCIAL. ....	10
ECUACIÓN 24: RELACIÓN ENTRE LA DERIVADA LAGRANGIANA Y EULERIANA. [6] .....	10
ECUACIÓN 25: LA ACELERACIÓN COMO DERIVADA DE LA VELOCIDAD. ....	10
ECUACIÓN 26: ECUACIÓN DE EULER. ....	10
ECUACIÓN 27: ECUACIÓN DE FUERZA NO VISCOSA. ....	11
ECUACIÓN 28: DIVERGENCIA DE LA ECUACIÓN 27. ....	11
ECUACIÓN 29: APLICACIÓN DE LA DERIVADA TEMPORAL A LA ECUACIÓN 20. ....	11
ECUACIÓN 30: ECUACIÓN RESULTANTE AL COMBINAR LAS ECUACIONES 28 Y 29. ....	11
ECUACIÓN 31: DEFINICIÓN DE LA VELOCIDAD DEL SONIDO. [4] .....	11
ECUACIÓN 32: ECUACIÓN DE ONDA SIN PÉRDIDAS LINEALIZADA. ....	11

# Nomenclatura y variables

## Capítulo 1. Introducción

$\alpha$	Coefficiente de absorción sonora   Adimensional [-]
----------	---

### 2.1. Fundamentos físicos

$p$	Presión acústica   Pascales [Pa]
$x$	Posición en el espacio donde se realiza la medida   Metros [m]
$t$	Tiempo en el que se realiza la medida   Segundos [s]
$c$	Velocidad de propagación del sonido en el medio   Metros por segundo [m/s]

#### 2.1.1. Ecuación de estado

$P$	Presión total   Pascales [Pa]
$\rho$	Densidad   Kilogramos por metro cúbico [kg/m <sup>3</sup> ]
$r$	Constante cuyo valor depende del gas estudiado   Adimensional [-]
$T_k$	Temperatura absoluta   Grados Kelvin [K]
$P_0$	Presión total en el estado 0   Pascales [Pa]
$\rho_0$	Densidad en el estado 0   Kilogramos por metro cúbico [kg/m <sup>3</sup> ]
$\gamma$	Razón de los calores específicos   Adimensional [-]
$\beta$	Módulo adiabático de volumen   Metros al cuadrado por segundos al cuadrado [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
$s$	Condensación   Adimensional [-]

#### 2.1.2. Ecuación de continuidad

$B$	Magnitud de estudio.
$\beta$	Derivada de la magnitud de estudio $B$ .
$m$	Masa   Kilogramos [kg].
$\rho$	Densidad   Kilogramos por metro cúbico [kg/m <sup>3</sup> ].
$V_f$	Volumen fluido de estudio. Sistema cerrado a través del cual ni entran ni salen partículas fluidas por su frontera   Metros cúbicos [m <sup>3</sup> ].
$V_c$	Volumen de control de estudio. Sistema abierto que representa una región concreta del espacio por donde pasa fluido a través de su frontera   Metros cúbicos [m <sup>3</sup> ].
$\vec{V}$	Velocidad del volumen fluido   Metros por segundo [m/s].

$\vec{V}_c$	Velocidad del volumen de control   Metros por segundo [m/s].
$\Sigma_c$	Superficie que rodea al volumen de control   Metros cuadrados [m <sup>2</sup> ].
$\hat{n}$	Vector normal que define la superficie de control   Adimensional [-].
$A$	Superficie total de control   Metros cuadrados [m <sup>2</sup> ].
$s$	Condensación   Adimensional [-].
$\vec{u}$	Velocidad unidimensional   Metros por segundo [m/s].

### 2.1.3. Ecuación de fuerza simple: Ecuación de Euler

$\vec{F}$	Fuerza   Newtons [N].
$m$	Masa   Kilogramos [kg].
$a$	Aceleración   Metros por segundo al cuadrado [m/s <sup>2</sup> ].
$P$	Presión   Pascales [Pa].
$\emptyset$	Magnitud escalar intensiva que representa una propiedad de un fluido.
$\vec{v}$	Velocidad   Metros por segundo [m/s].
$\rho$	Densidad   Kilogramos por metro cúbico [kg/m <sup>3</sup> ].

### 4.1. Posicionamiento y conexión de los elementos físicos del sistema

<i>PCM</i>	Siglas en inglés para Modulación por Impulsos Codificados (Pulse Code Modulation), una tecnología empleada para la codificación de señales de audio en formato digital.
<i>DSD</i>	Siglas del inglés para Flujo Digital Directo (Direct Stream Digital), tecnología desarrollada por Sony Corporation y Phillips para la codificación de señales de audio en formato digital.
<i>SoX</i>	Software de edición de audio multiplataforma de código libre. Sus siglas provienen del inglés, Sound eXchange.
<i>RCA</i>	Conector eléctrico de uso común para la transmisión de señales de audio y vídeo. Sus siglas provienen de la empresa que las diseñó, en inglés, Radio Corporation of America.

#### 4.2.1. MatLab, cálculo de los coeficientes del sistema

$\mu$	Coefficiente de convergencia   Adimensional [-].
-------	--

## Resumen

En este proyecto se condensará el proceso de investigación y desarrollo de un subsistema electrónico para el control activo de ruido mediante el uso de componentes de fácil acceso, que permitan una modularidad y sostenibilidad adecuadas y sea lo más económico posible.

Es primordial entender en primer lugar la teoría y los fundamentos físicos que definen el comportamiento de las ondas de sonido y cómo deriva en el control activo de estas señales acústicas, comprendiendo su evolución histórica que concluye en los sistemas de control existentes en la actualidad, donde su finalidad principal reside en suplir las limitaciones de los sistemas pasivos de control de ruido, logrando o bien complementar a estos en situaciones en las que se desea una cancelación completa de cualquier rango de frecuencia, o bien controlar estas frecuencias más bajas del espectro audible (20 Hz – 900 Hz) que no es posible contener eficazmente con otros medios.

A partir de esta información se podrá realizar un desglose de los sistemas de control activo existentes y los subsistemas que los componen, discernir la importancia de la cohesión entre estos para el correcto funcionamiento del sistema a nivel global, y concluir por tanto que el desarrollo de este proyecto estará enfocado en la construcción de un subsistema electrónico.

Con las bases de los sistemas de control activo asentadas, se procederá con una explicación detallada de los componentes físicos seleccionados, sus características técnicas, así como las decisiones de diseño tomadas para construir un prototipo.

A continuación se realizará un desarrollo detallado del código implementado para lograr la funcionalidad deseada del dispositivo, así como del procedimiento de cálculo de los coeficientes necesarios que hacen posible tratar las señales de audio y llevar a cabo el control activo de ruido.

Para ello se llevarán a cabo múltiples ensayos en diferentes entornos durante los cuales será posible validar el rendimiento del subsistema y analizar las limitaciones técnicas de este, desglosando resultados a lo largo del rango de las frecuencias bajas y medias-bajas comprendidas entre los 100 Hz y los 800 Hz.

De entre dicho ensayos, se realizará una comparación más profunda para 200 Hz, observando cómo el medio afecta al rendimiento del sistema. Al mismo tiempo, será posible comparar los valores de atenuación obtenido a nivel global, obteniendo resultados muy positivos para el caso de 300 Hz, con una significativa atenuación perceptible con gran facilidad, así como el ensayo para 1000 Hz que representa un gran ejemplo de la importancia de emplear transductores de calidad.

Finalmente se detallarán una serie de conclusiones sobre las limitaciones técnicas alcanzadas en la construcción y optimización de este prototipo y las posibilidades de desarrollo a futuro que presenta en base a los resultados obtenidos.

# Capítulo 1.

## Introducción

El fenómeno de la cancelación del sonido no es un concepto tan moderno como puede parecer.

Es cierto que se ha implementado esta tecnología en productos de uso diario en los años recientes, por lo que llega a sorprender que la primera anotación que se tiene al respecto consta de 1878 por el ingeniero británico James Thomson [1], sin embargo, no fue hasta 1932 que se documentó y patentó la aplicación específica de la cancelación del sonido mediante interferencias destructivas por parte de Henri Coanda. [2]

Posteriormente, la tecnología siguió su evolución con su máximo desarrollo entre 1970 y 2000, pues así se refleja en el exponencial incremento de artículos científicos referentes a esta tecnología durante ese lapso de 30 años, hasta alcanzar lo que se conoce hoy en día.

La aplicación más familiar para la mayoría de personas es la reducción de los ruidos externos en los auriculares, siendo sin duda los AirPods de Apple el producto que más alcance ha tenido a la hora de dar a conocer el control activo de sonido. No obstante, como sucede con gran parte de la tecnología, el uso más extendido es en el entorno industrial, como pueden ser los sistemas de reducción de ruido para transformadores eléctricos, en helicópteros para la reducción de la transmisión del rotor a la cabina, sistemas de auriculares de protección, etc.

Si se concentra la atención en los métodos de control actuales, es sencillo darse cuenta rápidamente que los materiales pasivos porosos están muy extendidos, véase por ejemplo, en la acústica estructural, donde es posible encontrar distintos paneles compuestos por esta materia que tiene unas especificaciones de tratamiento de las frecuencias altas y medias muy bueno, de forma que son capaces de absorberlas y disiparlas de forma muy efectiva.

Sin embargo, como se puede observar en la figura 1, las frecuencias más bajas quedan fuera de su alcance, por lo que hacen necesaria la existencia de otros sistemas alternativos que, si bien no son tan sencillos y económicos, tienen su razón de ser en satisfacer las necesidades que no pueden ser cubiertas por estos materiales porosos.

En este gráfico se puede ver un ejemplo genérico del comportamiento de los materiales porosos relacionando su coeficiente de absorción sonora  $\alpha$  ("SAB" en el gráfico son las siglas del inglés "*Sound Absorption Beta*") frente a las frecuencias sobre las que actuaría.

El coeficiente de absorción sonora es una representación que indica la comparación entre el sonido absorbido y el reflejado por un material, por tanto se representa por un número adimensional que se encuentra entre 0 (el material refleja todo el sonido) y 1 (el material absorbe todo el sonido).

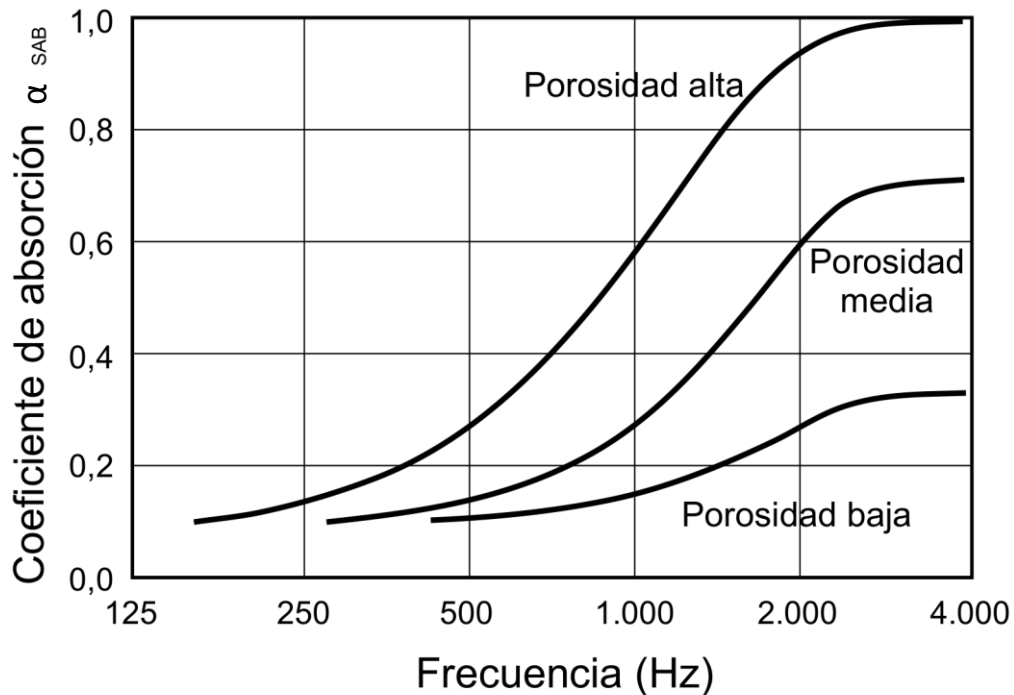


Figura 1: Prestaciones técnicas de los materiales porosos. [3]

El coeficiente de absorción es fundamental para el diseño y selección de materiales a la hora de construir entornos especialmente sensibles al sonido, como pueden ser los auditorios, los estudios de grabación y los espacios industriales, es por eso que este concepto está muy presente en el ámbito arquitectónico.

Para estudiar un material y obtener los resultados que se muestran en el gráfico, se mide su valor en condiciones controladas, generalmente cámaras anecoicas donde se emplean micrófonos y altavoces para determinar la presión sonora en el espacio físico.

Cada vez existe más ruido en el rango de las bajas frecuencias, desde sistemas de aire acondicionado, aviones, los ruidos de rodadura del transporte, etcétera, esto hace que actualmente existan múltiples áreas de investigación en activo, pues estas técnicas también presentan una serie de limitaciones y sobre todo, presentan una serie de conceptos físicos diferentes en los cuales las ondas interactúan entre sí frente a los mecanismos de atenuación de los métodos pasivos.

Es precisamente por la creciente evolución de conocimiento y tecnología a nuestro alcance que se propone la idea de utilizar componentes básicos de fácil acceso para cualquier usuario final y que permitan, con unas sencillas nociones, construir una versión simplificada de estos productos industriales que, por una fracción del coste, otorguen mayor reparabilidad y doten de la capacidad de aplicar sistemas de control activo de ruido en contextos que no se habían planteado previamente, reduciendo considerablemente la contaminación acústica de nuestro día a día.

## **1.1. Objetivos y alcance**

El objetivo global de este trabajo será realizar un proyecto de investigación y desarrollo para fabricar un dispositivo versátil capaz de cancelar sonido en cualquier clase de entorno, acercando un producto específico del ámbito profesional a todo el público general.

Este dispositivo deberá estar fabricado con componentes comunes, de fácil acceso para cualquier usuario y que garanticen una alta reparabilidad.

Para ello se planteará el caso de partida de las festividades de barrio de una ciudad, en donde la contaminación ambiental generada por la música se expande a varios kilómetros alrededor, por tanto se pretende contener el ruido residual que se percibe.

Los hitos a cubrir para alcanzar dicho objetivo serán:

- Investigación de los fundamentos de las tecnologías actuales y los materiales necesarios para la construcción de un dispositivo capaz de cumplir con el objetivo.
- Construcción, ensayo y desarrollo de un prototipo básico funcional. (Elección del hardware y desarrollo del software necesario).
- Validación del prototipo.

Una vez se ha alcanzado este último punto, el trabajo restante consistirá en la optimización del dispositivo hasta alcanzar un límite técnico o de competencias.

## Capítulo 2.

### Situación actual

#### 2.1. Fundamentos físicos

Primero, es necesario comprender los parámetros involucrados así como las herramientas con las cuales se cuenta para poder construir un prototipo capaz.

La estructura básica que compone los sistemas de control de ruido está fundamentada en el mecanismo físico de la cancelación del sonido mediante el “ataque” con una señal destructiva sobre la señal original.

En el esquema de la figura 2 se puede observar una representación de este concepto, un fenómeno simple que se ha estudiado desde el siglo diecinueve como ya se ha anticipado en la introducción. Si se toma una señal sinusoidal y se enfrenta a otra compuesta por el mismo periodo y amplitud, pero desfasada en  $\pi$  radianes, la suma de ambas producirá resultado nulo, es decir, se cancelarán entre sí.

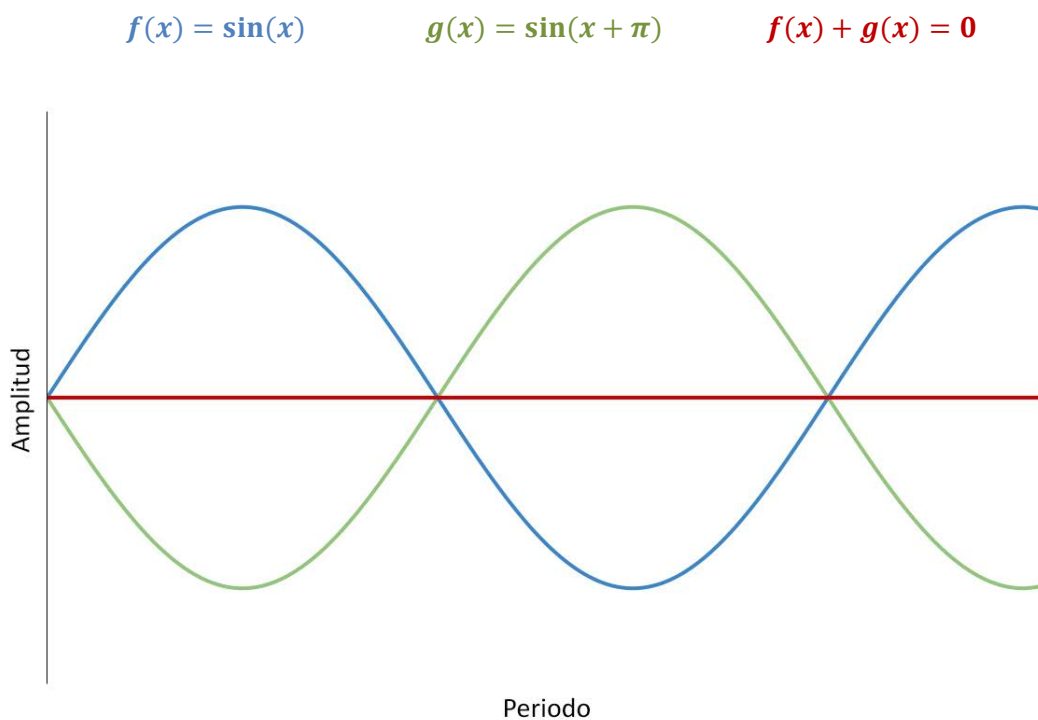


Figura 2: Esquema de la cancelación de una senoide.

Una vez se traslada la teoría a un entorno tridimensional real, se han de afrontar distintas problemáticas, como el movimiento de la fuente de sonido o la complejidad de este.

Asimismo, hay que tener en cuenta que no existe una fuente ideal, aún cuando se enfrentasen las ondas generadas por dos altavoces idénticos en sus características técnicas, siempre existirán diferencias constructivas que harán que no sea posible cancelar completamente su sonido, pero sí lograr una gran atenuación.

No obstante, nuevamente a comienzos del siglo diecinueve, Jean-Baptiste Joseph Fourier realizó importantes aportaciones a las series trigonométricas ya existentes para el análisis y resolución de la ecuación de conducción del calor. La técnica que empleó es lo que se conoce como series de Fourier en su honor, y se ha aplicado ampliamente en distintos campos, incluido el de la acústica.

Gracias a ello se puede aproximar una onda tridimensional real como una descomposición en una familia de sinusoidales que forman una superposición de varios modos de vibración simultáneos, por lo que es posible definir matemáticamente cada una de estas ondas planas mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$

*Ecuación 1: Ecuación de onda plana. [4]*

En esta ecuación se define la propagación de una onda plana donde presión acústica “*p*” está en función del tiempo y el espacio, y “*c*” indica la velocidad de propagación en el medio en que se encuentra (en el caso del aire, el sonido se propaga a 340 metros por segundo).

El primer término muestra la derivada segunda de la presión acústica respecto a la posición, lo que representa la curvatura de la onda de presión, mientras que en el segundo término se encuentra la inversa de la velocidad de propagación al cuadrado en producto con la derivada segunda de la presión acústica en función del tiempo. Esta derivada representa la aceleración de dicha presión.

Dicha ecuación surge de varios conceptos básicos sobre el comportamiento de los fluidos; estos son la ecuación de estado, la ecuación de continuidad y la ecuación de Euler. Se procederá a realizar un desarrollo más profundo de cada una de ellas para tener una comprensión más amplia del origen de la ecuación 1.

### **2.1.1. Ecuación de estado**

La ecuación de estado relaciona las fuerzas restauradoras internas con las deformaciones correspondientes; para un medio fluido se han de definir tres propiedades físicas que describan su comportamiento termodinámico, por ejemplo, la ecuación de estado de un gas perfecto.

$$P = \rho r T_k$$

*Ecuación 2: Ecuación de estado de un gas perfecto. [4]*

Si el fluido está contenido en un medio tal que la temperatura permanece constante, entonces es posible describir la ecuación de estado isotérmica.

$$\frac{P}{P_0} = \frac{\rho}{\rho_0}$$

*Ecuación 3: Ecuación de estado isotérmica de un gas perfecto.*

Por otro lado, se conoce de forma empírica que los procesos acústicos son casi adiabáticos, por lo que su entropía permanece casi constante, por lo que se define la ecuación para un estado adiabático, donde “ $\gamma$ ” será la razón de los calores específicos.

$$\frac{P}{P_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^\gamma$$

*Ecuación 4: Ecuación de estado adiabático de un gas perfecto.*

Pero para fluidos diferentes a un gas perfecto es más sencillo definir experimentalmente la relación isentrópica entre la presión y las fluctuaciones de densidad, para lo cual se realiza una expansión de Taylor.

$$P = P_0 + \left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_{\rho_0} (\rho - \rho_0) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial \rho^2}\right)_{\rho_0} (\rho - \rho_0)^2 + \dots$$

*Ecuación 5: Expansión de Taylor de la ecuación de estado adiabático de un gas perfecto.*

Las derivadas parciales son constantes determinadas para la compresión y expansión adiabática del fluido alrededor de su densidad de equilibrio, por lo que para fluctuaciones pequeñas solo se retendrán los términos de más bajo orden, lo que da la siguiente relación.

$$P - P_0 \doteq \beta \left(\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0}\right)$$

*Ecuación 6: Relación lineal entre las fluctuaciones de presión y el cambio de densidad.*

Y es posible expresarlo en términos de la presión acústica “ $p$ ” y la condensación “ $s$ ” sabiendo que “ $\beta$ ” es el módulo adiabático de volumen.

$$\beta = \rho_0 \left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_{\rho_0}$$

$$p \doteq \beta s$$

*Ecuación 7: Módulo adiabático de volumen. [4]*

*Ecuación 8: Relación lineal expresada en función de la presión acústica. [4]*

La condensación representa la fracción de cambio en la densidad del medio debido a la onda sonora, pero para poder expresar esta relación es necesaria la restricción esencial de que la condensación ha de ser pequeña.

### 2.1.2. Ecuación de continuidad

A la hora de estudiar el comportamiento cinemático de los fluidos se puede realizar mediante dos enfoques, por un lado existe el punto de vista Lagrangiano, el cual se centra en analizar cada una de las partículas fluidas, mientras que por otra parte está al análisis Euleriano, el cual se centra en analizar una región espacial del fluido.

Así pues, si se quiere conocer el movimiento de un fluido en relación a su masa, el interés reside en analizar todo el volumen fluido, sin embargo también es posible analizar los cambios sobre un volumen de control, que es mucho más sencillo de operar.

Para ello, se hace uso del Teorema de Transporte de Reynolds, el cual permite relacionar la derivada temporal del volumen fluido (enfoque Lagrangiano) con la derivada del volumen de control (enfoque Euleriano), que se dividirá en la contribución temporal y espacial de las propiedades del fluido, simplificando las operaciones de cálculo.

$$\frac{dB_{V_f}}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{V_f(t)} \beta dV = \frac{d}{dt} \int_{V_c(t)} \beta dV + \int_{\Sigma_c} \beta \cdot (\vec{V} - \vec{V}_c) \cdot \hat{n} dA$$

*Ecuación 9: Teorema del Transporte de Reynolds. [5]*

“B” será la magnitud de estudio y “β” será el resultado de dividir dicha magnitud entre el volumen. Para el caso de estudio que se está realizando, la variable “B” será la masa, por lo que la variable “β” será la densidad “ρ”.

Así pues, si se aplica el Teorema del Transporte de Reynolds y se establece un sistema donde la variación temporal total del sistema fluido es nula, se tendrá que:

$$\frac{dm_{V_f}}{dt} = 0 = \frac{d}{dt} \int_{V_c(t)} \rho dV + \int_{\Sigma_c} \rho \cdot (\vec{V} - \vec{V}_c) \cdot \hat{n} dA$$

*Ecuación 10: Ecuación integral de conservación de la masa.*

Definiendo un volumen de control fijo “ $V_c = 0$ ”, con forma cúbica tal que “ $dV \equiv V_c$ ”, se desarrollarán cada uno de los miembros en distinto color en la ecuación 10 de la forma abajo descrita, en base al análisis que se muestra en la siguiente imagen.

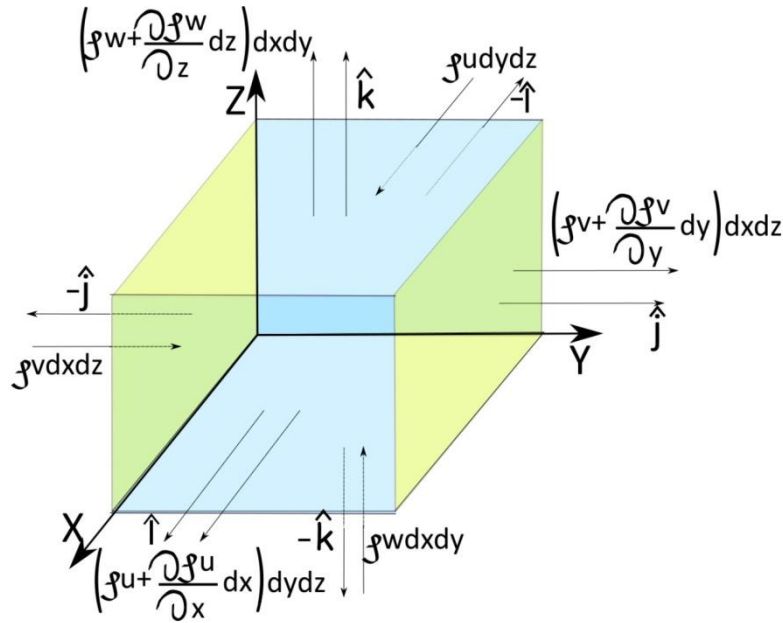


Figura 3: Esquema del volumen de control diferencial. [5]

$$\frac{d}{dt} \int_{V_c(t)} \rho dV \approx \frac{\partial \rho}{\partial t} dxdydz = \frac{\partial \rho}{\partial t} dV$$

Ecuación 11: Variación temporal de la masa para el volumen de control diferencial.

$$\int_{\Sigma_c} \rho \cdot (\vec{V} - \vec{V}_c) \cdot \hat{n} dA = \int_{\Sigma_c} \rho (\vec{V} \cdot \hat{n}) dA \approx \phi(m)_x + \phi(m)_y + \phi(m)_z$$

Ecuación 12: Variación espacial de la masa para el volumen de control diferencial.

Cada término se corresponde según el esquema en la figura 3 a:

$$\phi_x = \left( \rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx \right) dydz - \rho u dydz \quad \phi_y = \left( \rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} dy \right) dxdz - \rho v dxdz \quad \phi_z = \left( \rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} dz \right) dxdy - \rho w dxdy$$

Ecuación 13: Flujo neto de masa en la dirección X.

Ecuación 14: Flujo neto de masa en la dirección Y.

Ecuación 15: Flujo neto de masa en la dirección Z.

Si se realiza la suma de los flujos en todas las caras, se observará que corresponde con la divergencia del producto de la densidad con el volumen definido.

$$\int_{\Sigma_c} \rho (\vec{V} \cdot \hat{n}) dA \approx \phi(m)_x + \phi(m)_y + \phi(m)_z = \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dxdydz + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} dxdydz + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} dxdydz = \left( \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right) dV = \nabla \cdot (\rho \vec{V}) dV$$

Ecuación 16: Variación espacial de la masa para el volumen de control diferencial completa.

Si se sustituyen ambas soluciones en la ecuación 10, se obtendrá la ecuación diferencial de conservación de la masa.

$$0 = \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) dV$$

*Ecuación 17: Ecuación diferencial de conservación de la masa.*

El primer término, al ser temporal, indica la rapidez con la que la masa aumenta en el volumen, y dado que el influjo neto debe ser igual a la rapidez de aumento, la ecuación se simplifica.

$$0 = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V})$$

*Ecuación 18: Ecuación de continuidad.*

Esta es la ecuación de continuidad, cuyo segundo término implica que no es lineal, pero usando el hecho de que la densidad “ $\rho_0$ ” es una constante en el espacio y en el tiempo, así como que la condensación es muy pequeña:

$$\rho = \rho_0 (1 + s)$$

$$0 = \frac{\partial s}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{u}$$

*Ecuación 19: Relación entre la diferencia de densidad y la condensación.*

*Ecuación 20: Ecuación de continuidad linealizada.*

De esta forma se obtiene la ecuación de continuidad linealizada.

### 2.1.3. Ecuación de fuerza simple: Ecuación de Euler

La última ecuación involucrada es la ecuación de Euler. En los fluidos reales, la viscosidad y el hecho de que los procesos acústicos no son completamente adiabáticos, introduce términos disipativos, pero al pasar por alto los efectos de la conductividad térmica en la ecuación de estado, se ignorarán también los efectos de la viscosidad y el fluido se asumirá como no viscoso.

Partiendo de la segunda ley de Newton y considerando nuevamente un volumen de control diferencial del elemento fluido “ $dV$ ” tal que “ $dV = dx dy dz$ ”, que contiene una cantidad también diferencial de masa “ $dm$ ”, se tiene que:

$$\vec{F} = m \vec{a} \rightarrow d\vec{f} = dm \vec{a}$$

*Ecuación 21: Segunda ley de Newton. [4]*

Y en ausencia de viscosidad, la fuerza neta que experimentará el elemento para la dirección “x” será:

$$df_x = \left[ P - \left( P + \frac{\partial P}{\partial x} dx \right) \right] dy dz = -\frac{\partial P}{\partial x} dV$$

*Ecuación 22: Fuerza neta diferencial en la dirección X. [4]*

Las ecuaciones para las direcciones “y” y “z” serán análogas, de forma que el vector fuerza se puede definir mediante la divergencia de la presión “P”.

$$d\vec{f} = -\nabla P dV$$

*Ecuación 23: Fuerza neta diferencial.*

Para la aceleración del fluido es algo más complejo. Regresando a los enfoques Lagrangianos y Eulerianos para un mejor análisis, en primer lugar, se definirá la relación entre la derivada Lagrangiana (derivada sustancial) y la derivada Euleriana (compuesta por la derivada local y convectiva):

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \phi$$

*Ecuación 24: Relación entre la derivada Lagrangiana y Euleriana. [6]*

La derivada sustancial define la variación temporal de cualquier magnitud fluida intensiva siguiendo la trayectoria de la partícula, de ahí que se fundamente en la visión Lagrangiana de estudiar a las partículas, y al igual que se empleó la visión Euleriana para un cálculo más sencillo de la ecuación de continuidad, se empleará la anterior relación para definir la aceleración.

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v}$$

*Ecuación 25: La aceleración como derivada de la velocidad.*

Dado que es posible relacionar a la masa del elemento con su densidad y su volumen tal que “ $dm = \rho dV$ ”, es posible sustituir a esta junto con el desarrollo de las ecuaciones 23 y 25 en la ecuación 21:

$$-\nabla P = \rho \left[ \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right]$$

*Ecuación 26: Ecuación de Euler.*

Esta ecuación, conocida como la ecuación de Euler, describe una fuerza no lineal y no viscosa.

Bajo el requisito de una condensación mucho más pequeña que la componente convectiva de la aceleración, y a su vez esta es también mucho más pequeña que la componente local, el término convectivo se puede eliminar y se puede reemplazar la densidad “ $\rho$ ” por “ $\rho_0$ ”.

Además, dado que la presión “ $P_0$ ” es constante, se puede sustituir la variación de presión total “ $\nabla P$ ” por la variación de presión acústica “ $\nabla p$ ”, de forma que:

$$-\nabla p = \rho_0 \frac{\partial \vec{v}}{\partial t}$$

*Ecuación 27: Ecuación de fuerza no viscosa.*

Esta es la ecuación de fuerza no viscosa, válida para procesos acústicos de pequeña amplitud.

### 2.1.4. Obtención de la ecuación de onda linealizada

Tomando las ecuaciones 8, 20 y 27, si se combinan se obtiene una única ecuación diferencial con una variable dependiente. La velocidad de la partícula se puede eliminar al combinar las ecuaciones 20 y 27. Primero se realizará la divergencia de la ecuación 27 y después se aplica la derivada temporal de a la ecuación 20, donde se establece que “ $\frac{\partial(\nabla \cdot \vec{v})}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t}\right)$ ” [4]:

$$-\nabla \cdot (\nabla p) = \rho_0 \nabla \cdot \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\nabla^2 p$$

*Ecuación 28: Divergencia de la ecuación 27.*

$$\frac{\partial^2 s}{\partial t^2} + \nabla \cdot \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t}\right) = 0$$

*Ecuación 29: Aplicación de la derivada temporal a la ecuación 20.*

Combinando ambas ecuaciones se llega a:

$$\nabla^2 p = \rho_0 \frac{\partial^2 s}{\partial t^2}$$

*Ecuación 30: Ecuación resultante al combinar las ecuaciones 28 y 29.*

Si ahora se conoce que la velocidad del sonido en el medio queda definida mediante la ecuación 31, es posible emplear la ecuación 8 y así se obtendría la ecuación de onda sin pérdidas linealizada, la cuál es la fuente de la ecuación 1.

$$c = \sqrt{\frac{\beta}{\rho_0}}$$

*Ecuación 31: Definición de la velocidad del sonido. [4]*

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$

*Ecuación 32: Ecuación de onda sin pérdidas linealizada.*

## 2.2. Sistemas básicos de control

Tomando todo lo anterior como base teórica, se pueden establecer unos criterios básicos a la hora de estructurar un sistema de control activo.

Por un lado, se introducirá una señal secundaria que tiene como objetivo suprimir a la proveniente de la fuente primaria, justo cómo está representado en la figura 2. Dado que no es posible cancelar completamente la señal, primero se definirá qué rango de frecuencias se quieren abordar, y se emplearán una serie de fuentes complementarias que aporten información para optimizar la atenuación lo máximo posible.

Esto es relevante porque los sistemas de control activos se han empleado de forma ideal para combatir frecuencias bajas, principalmente aquellas inferiores a los 500 Hercios, mientras que para las frecuencias más altas es mucho más efectivo a nivel de costes emplear sistemas físicos de absorción (paneles acústicos, por ejemplo).

Es posible diferenciar dos sistemas principales a la hora de abordar un control activo del ruido:

- Sistemas retroalimentados (“*feedback*”)
- Sistemas anticipativos (“*feed forward*”)

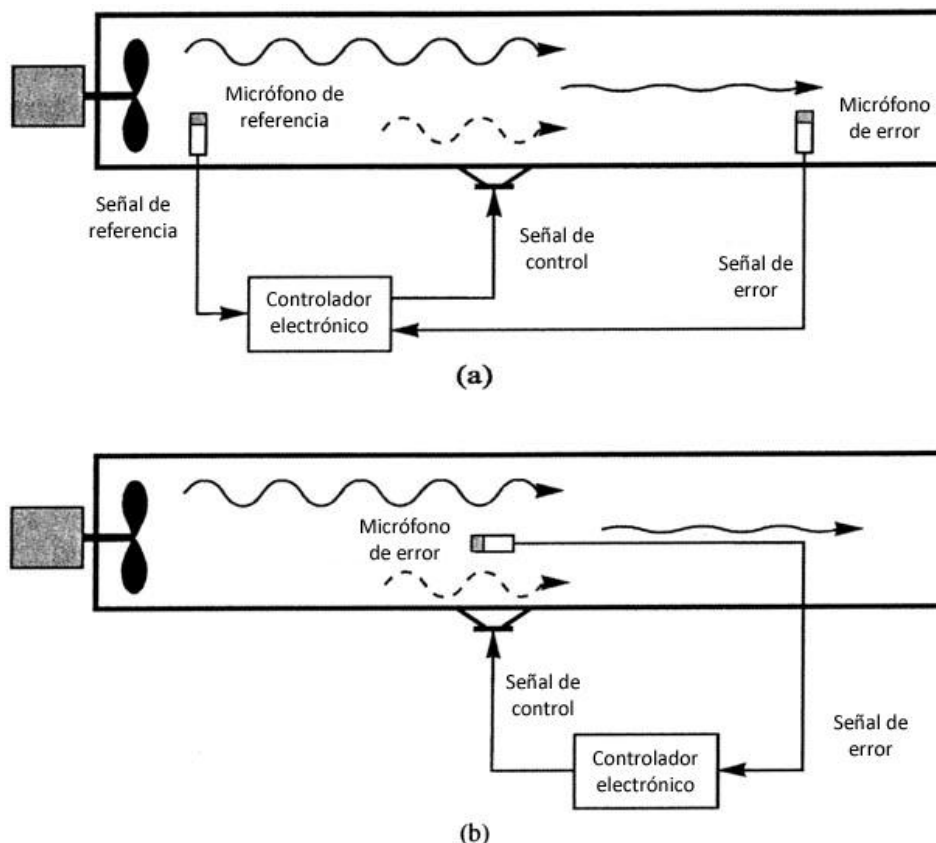


Figura 4: Sistemas de control de ruido básicos. a) Sistema "Feedforward" b) Sistema "Feedback". [1]

Los sistemas retroalimentados (*“feedback”*), estudian la señal resultante del proceso de control, se concluyen las modificaciones necesarias a realizar en el proceso de control y se introduce una nueva señal corregida en el sistema.

Sin embargo, los sistemas anticipativos (*“feed forward”*), primero estudian la señal que desean controlar, introducen al sistema dicha señal secundaria que debe atenuar la fuente principal de sonido y, posteriormente, analizan el resultado del proceso. Al igual que en los sistemas básicos, se calculan las modificaciones necesarias a aplicar y se obtiene la señal nueva corregida.

Aunque ambos son muy similares, los sistemas anticipativos son más beneficiosos, pues al introducir la información sobre la fuente de ruido previamente a que se produzca la cancelación activa, se tendrá una señal de referencia inicial de una calidad muy alta.

No obstante, si no se tiene acceso al ruido primario, por ejemplo, porque la fuente se encuentra muy lejos del sistema, lo cual haría que al captar la señal con el micrófono de referencia, su calidad fuese mala pues incluiría ruido no correlado con aquel que se quiere cancelar, un sistema retroalimentado sería mucho más adecuado ya que este toma la señal de salida a la cual va aplicando correcciones.

Puesto que se ha comentado que las diferencias constructivas más sutiles dificultan que se pueda cancelar de forma efectiva un sonido, cobra bastante importancia tener una imagen lo más limpia posible de la señal a tratar, por lo que es preferible no introducir una señal de referencia de mala calidad y trabajar solo con la señal de error, empleando un sistema retroalimentado.

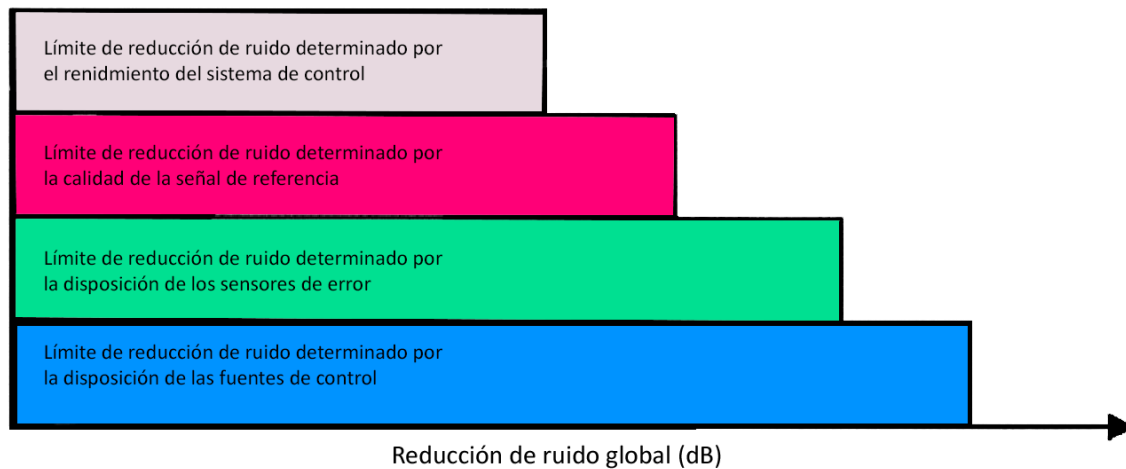
Para realizar todo este análisis será necesario utilizar un controlador electrónico que pueda interpretar las señales y regular los parámetros de la manera correcta, así como todos los componentes asociados que conlleva.

### **2.3. Subsistemas de control activo**

Por un lado se encuentra el subsistema físico, este estará compuesto por los transductores, sensores, fuentes de control, de error, etc. Es el encargado de proveer de una estructura acústica de calidad al sistema para que se pueda cancelar de forma efectiva la señal primaria deseada.

En sintonía también se tiene el subsistema electrónico, el cual lo conformarán el controlador electrónico, convertidores analógicos y digitales, así como los elementos de control necesarios según la construcción del mismo (véase, interruptores). Y es muy importante que sea un tándem con el sistema físico, por ello destacar de nuevo que este sistema se encuentre “en sintonía”, pues un sistema físico muy robusto no producirá el resultado deseado si el sistema electrónico es deficiente y viceversa.

En el siguiente esquema se representa de una forma mucho más visual la importancia de cada componente de un sistema activo y su consecuente aportación a la reducción global del ruido:



*Figura 5: Jerarquía de rendimiento de un sistema de control de ruido activo.*

Todo ello conlleva que existan ciertos principios básicos para el diseño de un sistema de control del ruido. Por una parte, independientemente de si el sistema es unidimensional o tridimensional, la efectividad del proceso dependerá en gran medida de la disposición física de las fuentes de control y los sensores de error.

Es decir, si la fuente primaria se encuentra en movimiento, la capacidad de regulación (“*controllability*”) y la estabilidad (“*stability*”) se verán seriamente afectadas y, en consecuencia, la efectividad del proceso se ve gravemente comprometida.

En los sistemas anticipativos la disposición física se pueden optimizar de forma independiente al controlador, sin embargo en los sistemas de retroalimentación básica esto no es así, lo que implica que la disposición sea muchísimo más vital a la hora de diseñar el controlador.

Asimismo, es muy importante el tamaño de la fuente primaria comparado con el tamaño de longitud de onda de la menor frecuencia a controlar. Porque, evidentemente, una pequeña fuente de control no será efectiva para controlar globalmente la fuente principal a cancelar bajo estas circunstancias, si tiene muchas longitudes de onda en su dimensión, será extremadamente compleja de modificar en su impedancia de radiación.

## **2.4. Conclusiones preliminares**

Se hace evidente que el control activo del sonido es un concepto que tiene una base teórica bien fundamentada gracias a las series de Fourier y la ecuación de onda plana, por lo que se pueden construir funciones matemáticas con la capacidad de cubrir las necesidades que no pueden abarcar otras técnicas, eso sí, siempre teniendo en cuenta la dificultad de construir un sistema eficaz en destruir la señal acústica en su totalidad, pues son sistemas sensibles que pueden dar lugar a señales constructivas no deseadas.

Sin embargo, el objetivo de este trabajo queda más enfocado en el desarrollo de un subsistema de control electrónico que pueda emplear distintos subsistemas físicos acorde a la señal primaria que se desee controlar, otorgando así su capacidad de ser versátil, y por tanto, cualquier problemática asociada a las características de dichos subsistemas físicos no será contemplada ni quedará cubierta por este trabajo más allá de tomar las medidas necesarias para poder corroborar el funcionamiento del prototipo.

Para ello, se procurará otorgar al dispositivo la capacidad de operar como sistema anticipativo o retroalimentado según las necesidades a cubrir.

Para que el sistema además sea económico, sostenible y accesible, será necesario definir con mayor profundidad sus componentes y la clase de control que llevará a cabo, todo ello será tratado a continuación.

## Capítulo 3.

### Selección de componentes y construcción del prototipo

El proceso de selección de componentes tiene que realizarse acorde a los hitos que se desean cubrir, motivo por el cual se empleará la placa de desarrollo Teensy®.

Este proyecto busca ser capaz de construir un dispositivo versátil, con componentes accesibles al usuario final, por lo que resulta ideal emplear hardware que sea también accesible en su software.

Se escogerá la versión 4.0 de la placa de desarrollo de Teensy® a fin de gozar de todas sus ventajas, entre las cuales se tiene que ofrece la capacidad de trabajar con el software ampliamente extendido de Arduino, complementando su IDE con el módulo de “Teensyduino” de forma mucho más simple que en las revisiones previas.

La programación en el entorno de Arduino es sencilla, está ampliamente documentada y en su esencia es lenguaje C, no sin algunas sutiles diferencias que buscan facilitar el aprendizaje y la experimentación de los usuarios, por lo que es sencillo encontrar una gran cantidad de ejemplos, tutoriales y proyectos documentados para hacer realidad prácticamente cualquier idea, siempre que el hardware posea la capacidad de llevarlo a cabo.

Precisamente es por este mismo motivo que su uso está extendido en el ámbito educativo en actividades de las asignaturas de ciencias y tecnología durante la educación secundaria obligatoria, por ello resulta ideal para este proyecto.

Para la construcción de un subsistema electrónico que procese señales de audio, hay que tomar en consideración que será necesario emplear frecuencias de muestreo elevadas, por lo que las placas de desarrollo tradicionales de Arduino se encuentran algo limitadas en cuanto a potencia.

En el caso de la placa de desarrollo Teensy® 4.0, porta un procesador ARM Cortex-M7 con una velocidad nominal de 600 MHz, el cual es capaz de ofrecer un rendimiento de hasta cuarenta veces la potencia de un Arduino Zero tradicional, lo que hace posible la implementación de módulos adicionales tales como las placas adaptadoras de audio, módulos que dotan de la posibilidad de añadir líneas de entrada y salida de audio en estéreo con alta calidad de sonido a nivel de un CD de audio, es decir, una profundidad de bits de 16 y una frecuencia de muestreo de 44.1 kilohercios.

<b>Teensy® 4.1</b>	
<b>Procesador</b>	IMXRT1062DVL6
<b>Núcleo</b>	Cortex-M7
<b>Unidad de coma flotante (FPU)</b>	32 y 64 bits
<b>Velocidad nominal (“overclock”)</b>	600 MHz (912 MHz)
<b>Memoria ROM</b>	1984 kilobytes
<b>Memoria RAM</b>	1024 kilobytes
<b>Memoria ROM programable (EEPROM)</b>	1080 bytes (emulados)
<b>Acceso directo a la memoria</b>	32 canales
<b>Interfaz digital</b>	40 pines
<b>Interfaz de pruebas</b>	24 pines
<b>Voltaje de salida</b>	3.3 V
<b>Corriente de salida</b>	10 mA
<b>Voltaje de entrada</b>	Solo 3.3V
<b>Entradas analógicas</b>	14 pines
<b>Contadores PWM, 32 bit</b>	3
<b>Contadores PWM, 16 bit</b>	32
<b>Comunicación USB</b>	2
<b>Comunicación Serial</b>	7
<b>Entradas de Audio Analógico</b>	5* pines estéreo
<b>Salidas de Audio Analógico</b>	5* pines estéreo

*Tabla 1: Selección de especificaciones de la placa de desarrollo Teensy® 4.0. [7]*

Desde las versiones 3.X de la plataforma Teensy®, era posible soportar configuraciones de hasta cuatro canales de sonido, permitiendo apilar dos placas de audio conformando un sándwich electrónico que también resulta ideal para los propósitos de este proyecto, ya que cada placa ofrece una entrada de línea estéreo de alta calidad, así como sus correspondientes salidas, de las cuales solo será necesaria una para la señal de control.

En las siguientes imágenes se pueden ver con más detalle los componentes y el esquema de conexiones que ofrece esta plataforma.



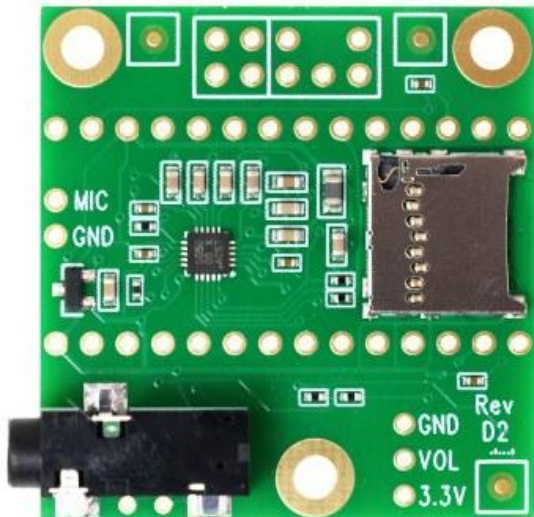


Figura 9: Esquema frontal de la placa de audio para Teensy® 4.0. [11]



Figura 10: Esquema trasero de la placa de audio para Teensy® 4.0. [11]

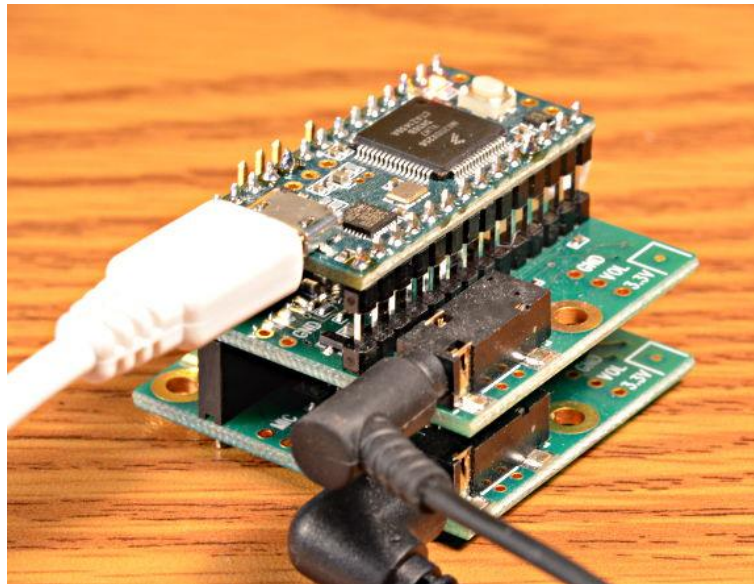
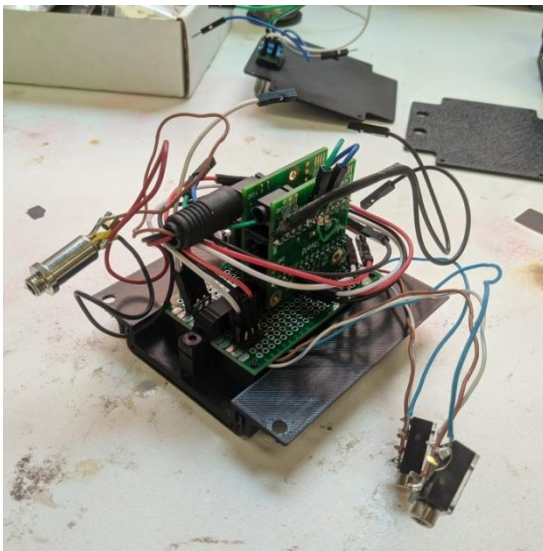


Figura 11: Ejemplo de montaje para un sistema de cuatro canales de audio. [11]

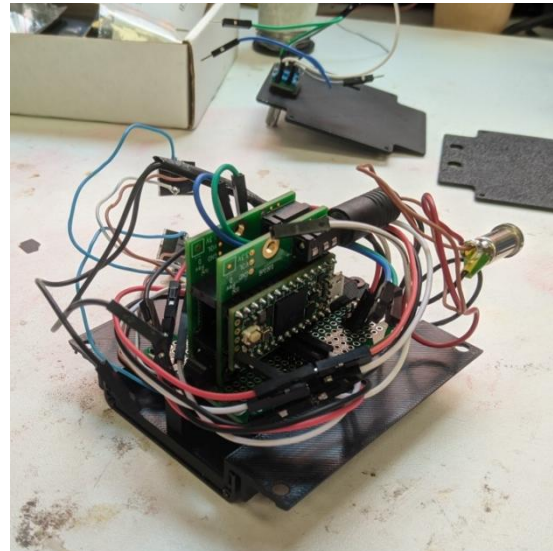
Para simplificar y ejemplificar de una manera orientativa el modelo final buscado para este subsistema electrónico, se construye el siguiente prototipo.



*Figura 12: Prototipo propuesto.*



*Figura 13: Vista frontal de los elementos que componen el prototipo conectados entre sí.*



*Figura 14: Vista trasera de los elementos que componen el prototipo conectados entre sí.*

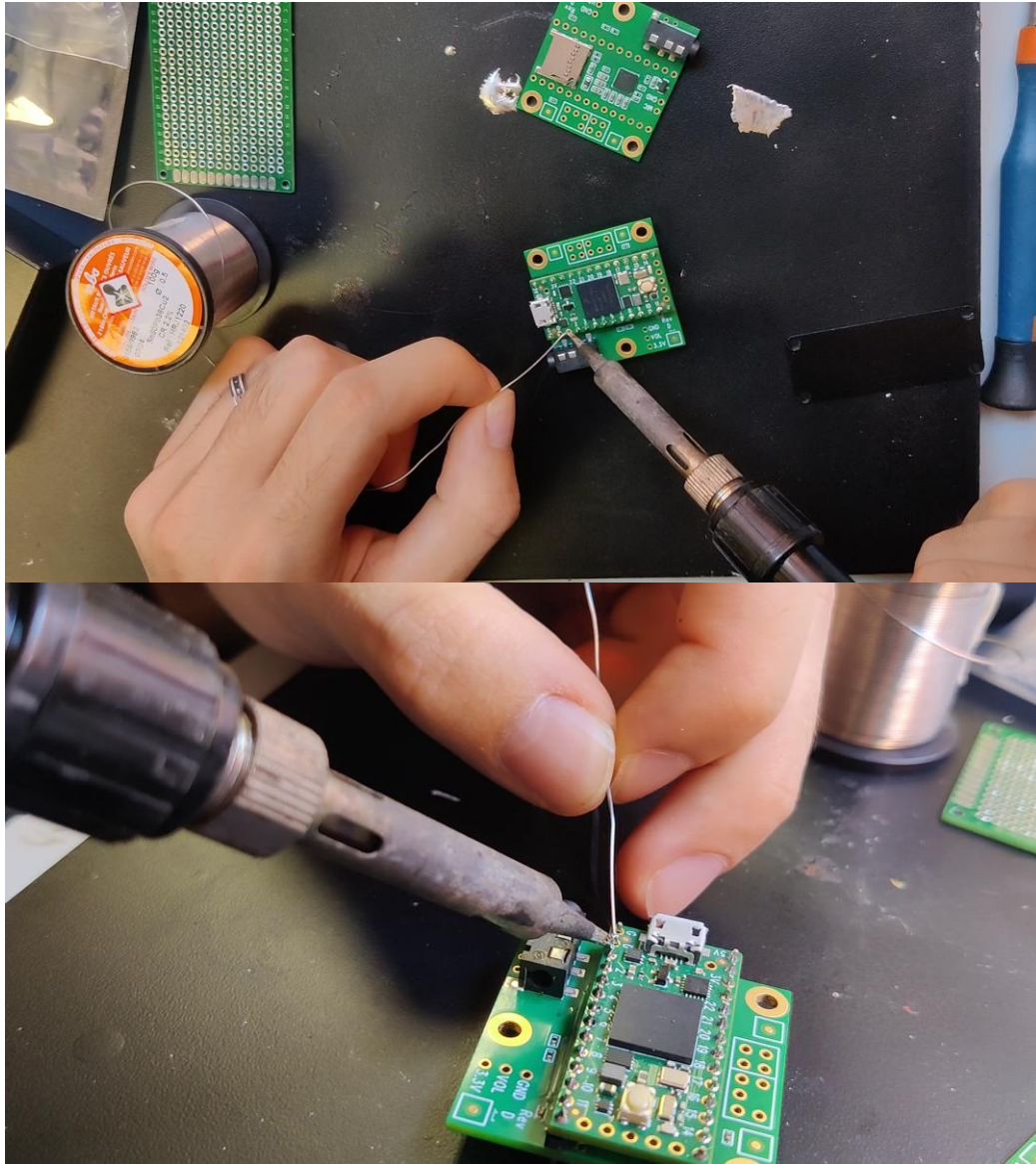
## **3.1. Núcleo electrónico**

### **3.1.1. Núcleo Teensy®**

En primer lugar se soldaron las placas de audio junto a la placa de desarrollo conformando el sistema de conexión para cuatro canales de audio, procurando compactar el conjunto.

La forma más eficiente de lograr reducir el espacio al mínimo sin interferir los elementos entre sí ha sido mediante el empleo de pines, soldando en primer lugar una serie de machos entre la placa de desarrollo y una de las placas de audio.

Posteriormente se suelda a la segunda placa de audio pines hembra y de esta forma se pueden conectar las tres unidades sin interferencias entre sí.

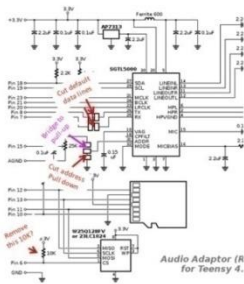


*Figura 15: Imágenes del proceso de soldadura de las placas de desarrollo Teensy®*

No obstante, si se observan las figuras del punto anterior, no es posible conectar de forma directa la segunda placa de audio con el resto del núcleo y obtener dos entradas de línea diferentes, pues ambas compartirían los mismos pines de conexión de datos y la misma dirección de cara a la placa principal.

Para ello es necesario cortar las líneas de comunicación de datos de el pin 8 y de la dirección, y posteriormente se realiza un puente entre el pin 6 y el nuevo punto de conexión del pin 8 (que ahora no se comunica con dicho pin) y se crea otro puente entre los dos puntos de conexión indicados en la figura 16 a continuación, de esta forma se logrará que los canales de audio de esta segunda placa se transmitan a través del pin 8 y su dirección interna sea diferente a la de la anterior placa de audio.

### Step 1: Cut data lines



### Step 2: Reconnect the Data Lines

- Connect Pin 6 to "TX" (formerly Pin 8)
- Connect flying lead with Arduino-style female to "RX" (formerly Pin 7)
  - Will go to Teensy 4 pin 32
  - Epoxy to board for strain relief

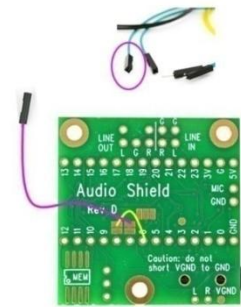


Figura 16: Esquema de cortes para modificar una placa de audio revisión D para Teensy® 4.0. [12]

Figura 17: Esquema de puentes para modificar una placa de audio revisión D para Teensy® 4.0. [12]

También es posible modificar el pin 7 de la misma manera que se ha modificado el pin 8 para conectar directamente la placa de audio con en el pin 32 de la placa de desarrollo, de manera que se obtendría una salida de audio adicional en esta placa que sería independiente de la placa anterior.

Los diagramas de conexiones se pueden observar de forma más detallada en el anexo al final de este documento.

## 3.1.2. Placa de conexiones

Seguidamente, mediante la placa de conexiones, se soldaron los cables a los puntos de las placas de audio del anterior núcleo para poder tener dos puertos de entrada, con conexión de jack de 3.5 milímetros cada una.

Al estar conectados de forma intermedia mediante la placa de conexiones, es posible reemplazarlos de forma sencilla en caso de que sea necesario, y permite la libertad de situarlos en una posición más cómoda para el usuario final.

Asimismo, la placa de conexiones provee de un medio para seguir complementando y desarrollando a futuro el subsistema introduciendo elementos, como una pantalla, sin tener que realizar conexiones directas con el núcleo, facilitando la modularidad del sistema.

### 3.1.3. Salida de audio

De igual forma a las conexiones de entrada de audio mencionadas en el punto anterior, se conecta una sencilla extensión macho-hembra para la salida de jack de 3.5 milímetros de una de las dos placas de audio, lo que permite nuevamente situar este conector en una posición más cómoda para el usuario final y garantiza su sencilla reparabilidad.

Esto es posible porque para este proyecto no se ha llevado a cabo la modificación del pin 7 mencionada en el punto 3.1.1, pues no es necesario el uso de cuatro canales independientes de salida de audio, y resulta mucho más conveniente disponer de dos puertos diferentes para el mismo propósito ante cualquier posible fallo de una de las conexiones.

### 3.1.4. Extensión del puerto USB

Para simplificar el funcionamiento de este proyecto, se ha conectado un cable micro USB tipo B a conexión USB tipo A y se empleará tanto para la alimentación del dispositivo como para la transferencia de datos.

No obstante, a fin de estandarizar la conexión adaptándola a las nuevas regulaciones en materia de sostenibilidad europea, queda como trabajo a futuro implementar una extensión de conexión de micro USB tipo B a un puerto de entrada tipo C conectado en modo USB 2.0.

Para ello se realizará la conexión del puerto micro USB tipo B y el puerto USB C siguiendo los esquemas mostrados a continuación. Una extensión de este tipo no solo adapta el puerto de conexión a un estándar más moderno, sino que simplifica la reparación de uno de los puntos de fallo más habituales de la electrónica de consumo, pues tan solo sería necesario sustituir dicha extensión en caso de una rotura del puerto frente a los costes materiales, temporales y de mano de obra que tendría la reparación del puerto alojado en la propia placa de desarrollo.

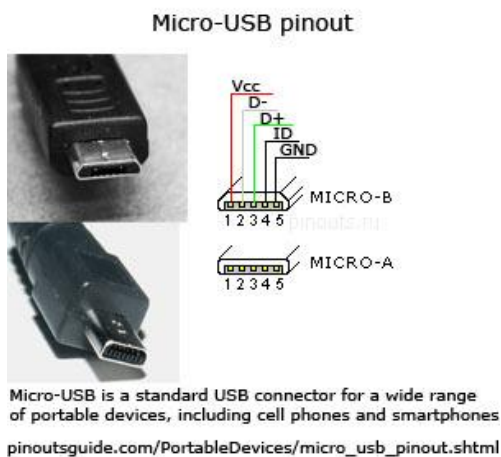


Figura 18: Referencia de conexión de los pines para un puerto Micro-USB tipo B. [13]

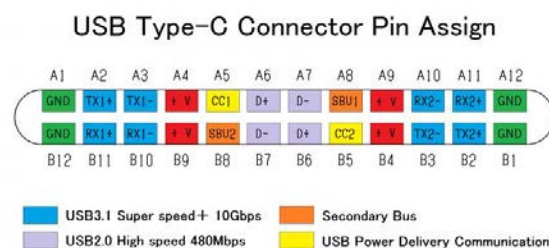
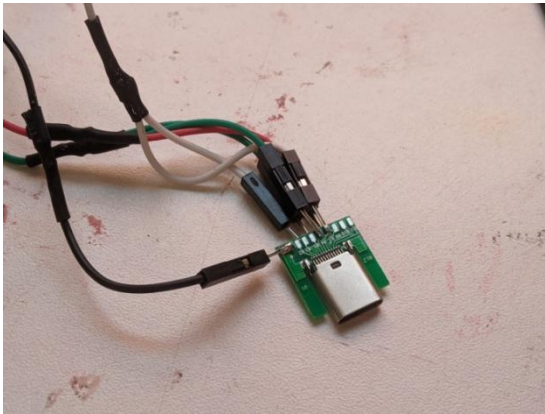
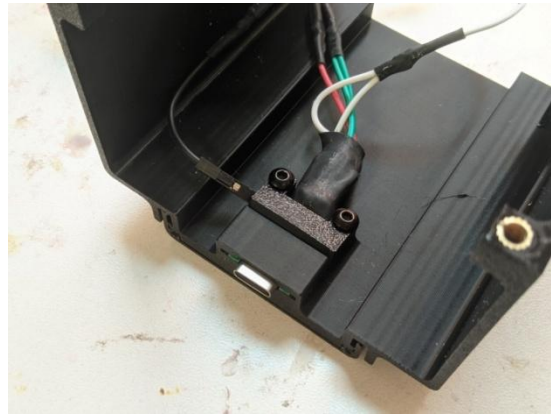


Figura 19: Referencia de conexión de los pines para un puerto USB tipo C. [13]

En las siguientes imágenes se puede observar un ejemplo realizado para este prototipo.



*Figura 20: Ejemplo de conexión de un puerto USB-C.*

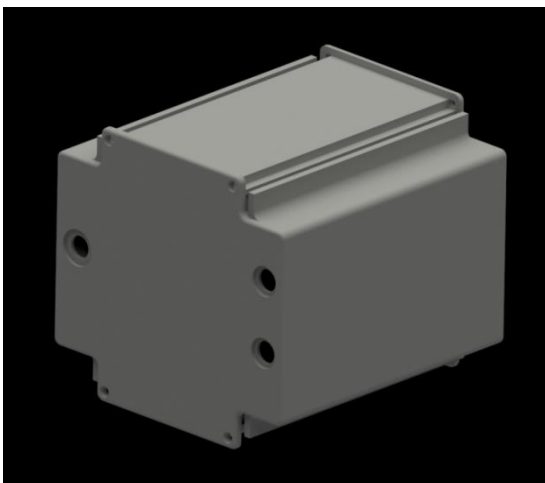


*Figura 21: Anclaje en el prototipo como prueba de concepto.*

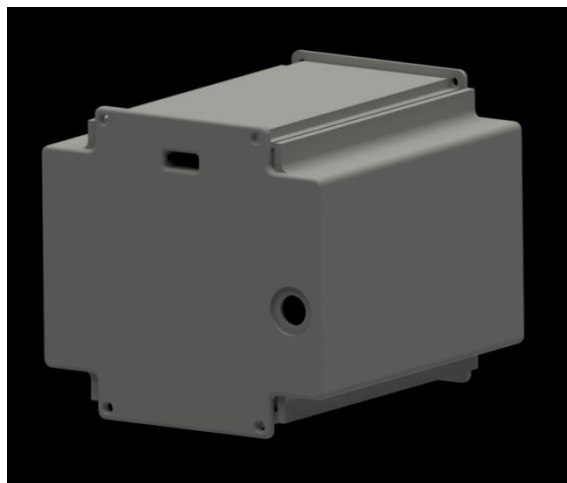
Debido a la fragilidad de estos conectores, dado que durante el proyecto ha sido necesario manipular frecuentemente los componentes, tras varias roturas se ha optado por utilizar el cable mencionado.

### **3.2. Carcasa**

Para contener todos los componentes se ha realizado mediante diseño en 3D un cuerpo que permite distribuirlos de manera conveniente y cómoda para trabajar con el prototipo, así como ensayar y validar su funcionamiento, permitiendo sustituirlos en la circunstancia en que sea necesario.



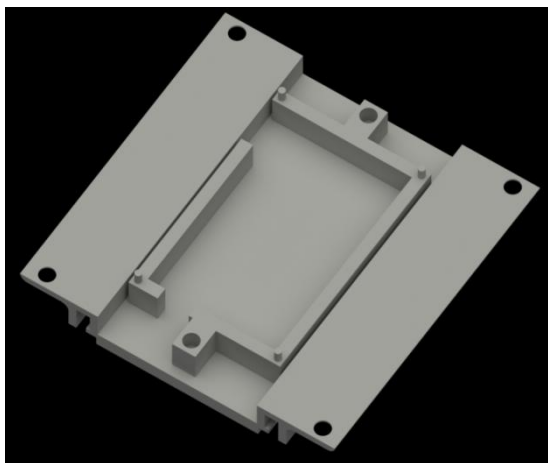
*Figura 22: Renderizado 3D de la carcasa. Vista frontal.*



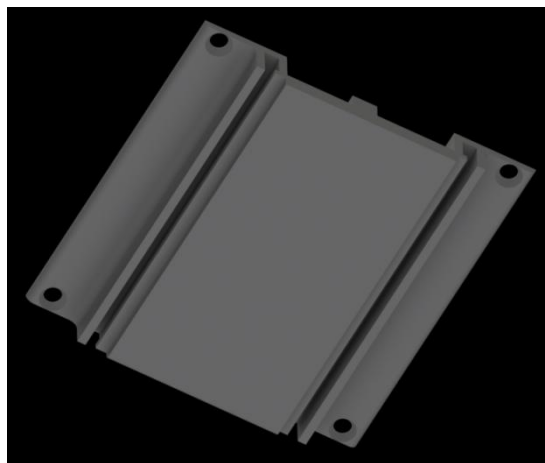
*Figura 23: Renderizado 3D de la carcasa. Vista trasera.*

### 3.2.1. Cuerpo inferior

El cuerpo inferior del prototipo está diseñado para alojar la placa de conexiones y el conjunto de placas de desarrollo Teensy® mediante una sujeción central que permite situarla en posición vertical a la par que mantener la placa de conexiones en posición con ayuda de unos pequeños puntos de anclaje en los extremos de la placa.



*Figura 24: Renderizado 3D del cuerpo inferior. Vista superior.*

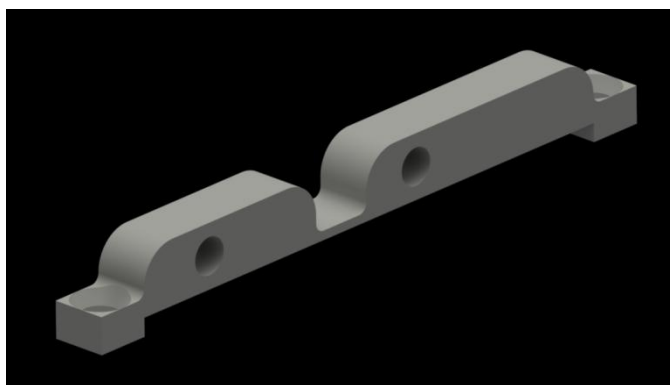


*Figura 25: Renderizado 3D del cuerpo inferior. Vista inferior.*

### 3.2.2. Sujeción principal

La sujeción principal consiste en una estructura en forma de barra cuadrada con orificios en los extremos que permite sujetarla al cuerpo inferior mediante tornillería. A su vez, porta en su alma dos insertos que permiten sujetar nuevamente mediante tornillería el núcleo de placas de desarrollo en posición vertical.

De esta forma se consigue compactar todo el núcleo de conexiones principal en el centro del cuerpo, y la pieza de sujeción impide el movimiento tanto de la placa de conexiones como del núcleo Teensy®.



*Figura 26: Renderizado 3D de la sujeción principal.*

### 3.2.3. Cuerpo superior

El cuerpo superior, mucho más voluminoso, aloja los orificios para poder unir mediante tornillería el cuerpo inferior y conformar una envoltura.

Está diseñado como complemento del cuerpo inferior permitiendo espacio para maniobrar con comodidad los cables por su interior y presenta estructuras soporte para alojar los puertos de entradas y salidas de jack de audio y USB.

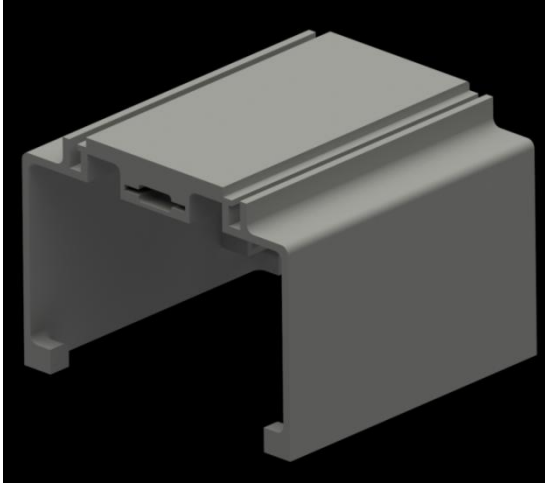


Figura 27: Renderizado 3D del cuerpo superior. Vista superior.

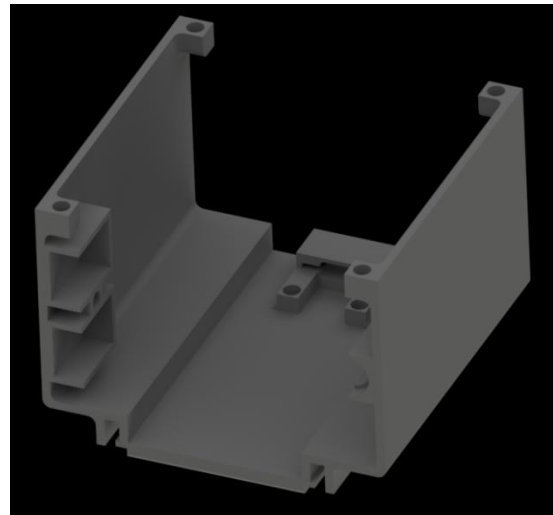
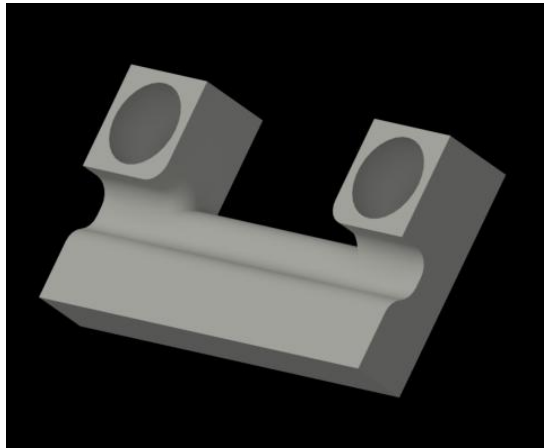


Figura 28: Renderizado 3D del cuerpo superior. Vista inferior.

### 3.2.4. Puerto tipo C

Se ha realizado un diseño del anclaje para un puerto tipo C, el cual requiere que sea posible fijar su posición sin dañar los puntos de conexión, para ello se ha realizado sobre el cuerpo superior un espacio que pueda alojarlo, y complementado con una pequeña pieza de sujeción mediante tornillería, se impide su movimiento, con excepción de la dirección del plano de conexión del propio puerto, movimiento que queda completamente restringido una vez se monta la tapa trasera de la carcasa.



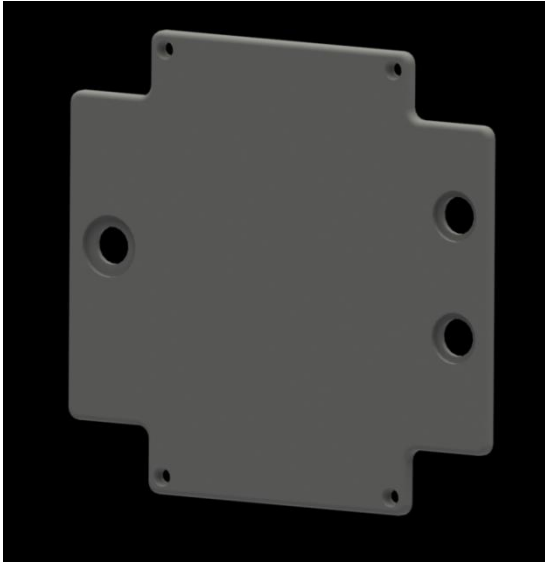
*Figura 29: Renderizado 3D de la pieza de sujeción del puerto USB C a la carcasa superior.*

Como se ha mencionado con anterioridad en el punto 3.1.4, su labor para los fines de este proyecto es ilustrativa, pues no se empleará dicha conexión a fin de simplificar las operaciones con el prototipo.

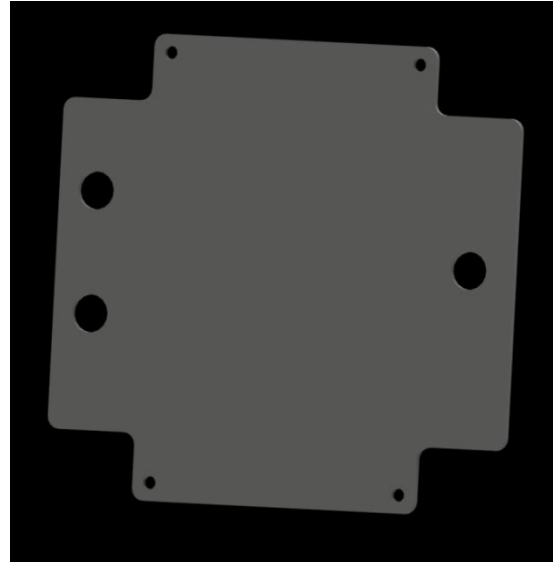
### 3.2.5. Tapas y refuerzo

El chasis se diseñó con la idea de poder alojar dos complementos metálicos que aportasen una mayor rigidez a la estructura, situándose en la parte superior e inferior, reforzando de esta manera el conjunto de la carcasa y otorgando una protección extra frente a impactos de los elementos más vulnerables.

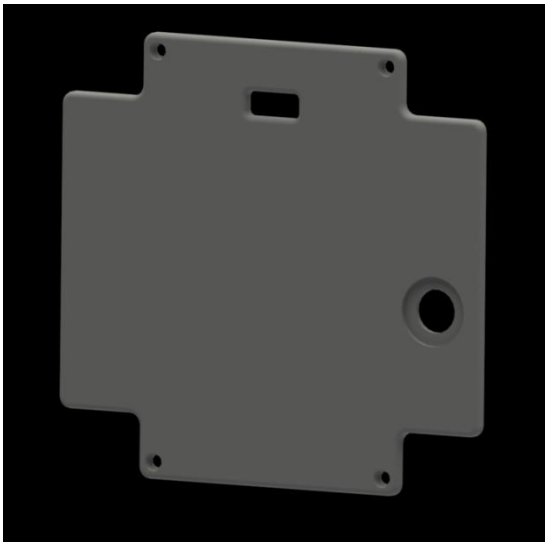
Las tapas van atornilladas a dichos refuerzos, se cuenta con una frontal que posee los orificios y alojamientos para los puertos de entrada de línea de audio y el puerto de salida para la señal de control, mientras que la trasera cuenta con el alojamiento del codificador rotativo y el orificio para la conexión USB.



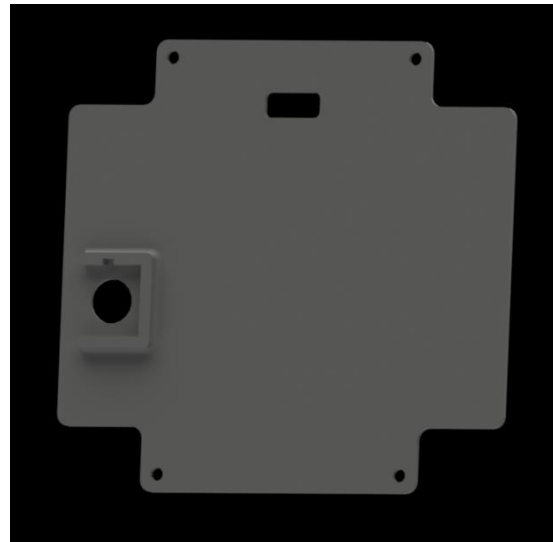
*Figura 30: Renderizado 3D de la tapa frontal. Vista exterior.*



*Figura 31: Renderizado 3D de la tapa frontal. Vista interior.*



*Figura 32: Renderizado 3D de la tapa trasera. Vista exterior.*



*Figura 33: Renderizado 3D de la tapa trasera. Vista interior.*

El codificador rotativo (conocidos habitualmente por su denominación en inglés “encoders”) permite al usuario modificar algunos parámetros sencillos si es necesario. Actualmente se encuentra conectado a la placa de desarrollo en los pines 4 y 5 para el giro y al pin de encendido y apagado para la pulsación.

## Capítulo 4.

### Validación experimental

Si se pone el foco en el objetivo de este proyecto, donde se quiere validar que los componentes seleccionados pueden conformar un subsistema electrónico funcional capaz de llevar a cabo cancelación de ruido de forma activa, se habrá de limitar la complejidad de cálculo y procesado en la medida de lo posible.

Para ello, los ensayos se han diseñado buscando tener el máximo control sobre las variables del entorno y acotando aquellas que podrían provocar errores no relacionados con la capacidad del sistema. El proceso consistirá en cancelar un ruido que estará simulado por una onda sinusoidal de frecuencia constante, en el rango de las frecuencias bajas y medias-bajas, que tomando en cuenta la capacidad física de los transductores disponibles, estará comprendida entre los 100 Hz y los 800 Hz.

El procedimiento de ensayo sería por tanto:

1. Posicionamiento y conexión de los elementos físicos del sistema.
2. Cálculo de las funciones de transferencia y los coeficientes del sistema.
3. Implementación de los coeficientes calculados en el subsistema electrónico y ensayo.

#### 4.1. Posicionamiento y conexión de los elementos físicos del sistema

Como se concluyó anteriormente de manera preliminar, los sistemas de cancelación activos son sensibles a las alteraciones del medio en que se encuentran, tanto de la posición de sus componentes como de las características del entorno. Más adelante se podrá observar en los resultados de los ensayos realizados.

Primero se situarán todos los elementos físicos del sistema para el ensayo, por un lado se tienen los altavoces, uno simulará ser una fuente de ruido y el otro será la fuente de cancelación activa. En el punto en el cuál se desea que se produzca la cancelación de ruido se situará el micrófono.

Ambos son altavoces pasivos compuestos por un altavoz de graves “*woofer*” y dos altavoces de agudos “*tweeters*”. El micrófono es una unidad de solapa, también conocidos como “*lavalier*”.

En un primer momento se contempló el uso de otros altavoces pasivos, pero como se podrá observar más adelante, debido a los resultados obtenidos se optó por su sustitución.

Para simplificar los ensayos y limitar las variables como se ha mencionado, ambos altavoces recibirán el mismo sonido de una frecuencia sinusoidal, esto simulará la señal que recoge el

micrófono de un sistema anticipativo sin necesidad de emplear uno, reduciendo la complejidad y partiendo simultáneamente de una muestra de alta fidelidad.

No obstante, el altavoz encargado de la cancelación estará conectado al subsistema electrónico, y este a su vez al reproductor, mientras que el altavoz primario encargado de emitir el ruido estará conectado de forma directa con este último.

Así pues, el subsistema actuará principalmente como un filtro que procesará la señal que llega al altavoz secundario para que la salida de este sea adecuada para obtener una cancelación efectiva del seno.

Para los ensayos se ha empleado como reproductor un dispositivo móvil con conexión de jack de 3.5 mm, donde se ha hecho uso de un cable divisor que permite contar con dos salidas de jack de 3.5 mm.

Este dispositivo móvil porta un procesador modelo Snapdragon 860 tipo "SoC" ("*System on a Chip*", en español sistema en "*chip*", ya que un solo "*chip*" contiene todos los elementos necesarios para un sistema electrónico completo). [14]

Todos los procesadores de dicha generación portan dentro de su "SoC" un convertor digital-analógico ("*DAC*" *Digital-Analog Converter*) modelo WCD9380, capaz de procesar audio en alta fidelidad hasta 32 bit de profundidad y 384 kHz de frecuencia de muestro en formato PCM, además de su capacidad de procesar DSD nativo. [15]

Al mismo tiempo, el dispositivo está modificado para garantizar que se emplea el procesador WCD9380 para procesar el audio, y las muestras se reproducen mediante la aplicación Poweramp, la cual permite configurar los parámetros de salida de audio en alta resolución.

Los valores estableciendo son de 32 bit de profundidad y 352.8 kHz de frecuencia de muestreo con remuestreo SoX al 97%.

A una de estas salidas se conecta un cable de jack de 3.5 mm a conexión RCA que a su vez está conectado al amplificador de los altavoces en uno de sus canales de audio, de forma que vaya directo al altavoz que se ha definido como primario, la fuente de emisión de ruido.

Dicho amplificador está compuesto por un ecualizador gráfico marca Kindher cuyo propósito original era servir de amplificador y ecualizador en un sistema de sonido de un vehículo, pero se ha reutilizado y adaptado para su uso como amplificador de escritorio.

La otra salida se conecta a una de las entradas del subsistema electrónico mediante un cable de jack 3.5 mm a jack 3.5 mm, y la salida de este se conecta mediante un cable de jack de 3.5 mm a conexión RCA al otro canal del amplificador, de forma que la señal procesada irá directa al altavoz definido como secundario, la fuente de cancelación de ruido.

El subsistema será alimentado mediante USB y siempre por sistemas en batería, pues durante las pruebas realizadas se descubrió que si el sistema era alimentado por la red eléctrica se

introducía una señal de 50 Hz acoplada sobre la señal procesada, lo cual es suficientemente significativo como para alterar los resultados de los ensayos, pues la señal sería diferente en función de la alimentación del sistema.

## **4.2. Código y software**

Para pre-calcular los coeficientes que se han de aplicar en el subsistema con el fin de procesar la señal que ha de emitir el altavoz secundario, se emplearán muestras de audio y un breve código de MatLab.

Estos coeficientes pre-calculados para las condiciones físicas del sistema que se está ensayando, se introducirán en el código en lenguaje C mediante Arduino que será actualizado en la placa Teensy® para que pueda procesar la señal.

Se procederá a profundizar en ambos.

### **4.2.1. MatLab, cálculo de los coeficientes del sistema**

El código empleado para pre-calcular los coeficientes se puede encontrar en el anexo, punto 1.

Se va a proceder a desarrollarlo detenidamente. En primer lugar se limpia la salida en pantalla con “`clc`”, así elimina cualquier instrucción que se haya realizado previamente en la ventana principal de MatLab de forma que cuando termine de ejecutarse el código solo se vea un texto indicando “Hecho”, esto es lo que se puede observar en la última línea como “`fprintf('Hecho \n')`”.

Lo primero que hace es cargar las muestras de audio con el módulo “`audioread`”, estos archivos se han grabado previamente y permiten calcular las funciones de transferencia que definen el sistema físico.

El primer archivo es “`x.wav`”, el cual contiene una grabación que representa la mejor muestra posible del ruido a cancelar, en el caso es la onda sinusoidal de la frecuencia que se está ensayando. Para su obtención se grabó el sonido acercando el micrófono lo más próximo posible al altavoz evitando la saturación.

Existe una línea comentada que se refiere a un archivo “`x1.wav`” que no se ha empleado en estos ensayos porque para calcular la función de transferencia de ambos altavoces se ha utilizado la misma señal sinusoidal, pero en caso de que se calculase dicha función para el altavoz secundario mediante una muestra de ruido blanco, se tendría que hacer uso de este archivo independiente y se debería de indicar como variable de cálculo para la función LMS (ahora se tratará con más detalle).

Por esta misma razón, se definen los archivos “`Primario.wav`” y “`Secundario.wav`”, que son empleados como las variables “`d`” y “`d1`” respectivamente para el cálculo de dichas funciones.

Después se define la variable “H”, que hace referencia al número de coeficientes que se utilizarán para procesar la señal de audio y obtener la cancelación deseada. Se emplean 128 porque en los ensayos se ha observado que el sistema Teensy® no es capaz en la actualidad de operar con más valores. Si bien es posible modificar las librerías de filtrado FIR del sistema, escapan a las tareas que comprenden este trabajo y serían algo a mejorar para una implementación más compleja en futuros desarrollos de este subsistema.

Asimismo, el uso de valores inferiores también afecta a los resultados del sistema, en condiciones favorables no supone un cambio apreciable en eficacia, pero en entornos más complejos la eficacia del sistema disminuye y hace necesario emplear valores más grandes para el coeficiente de convergencia  $\mu$ .

El coeficiente de convergencia  $\mu$  es vital en el proceso de cálculo de los coeficientes del filtro, pues determina la tasa de actualización de los coeficientes de este. Su valor es positivo, y es recomendable que sea pequeño, ya que si bien los valores más altos aceleran la convergencia del algoritmo, también introducen ruido en la señal de salida. Los valores bajos garantizan la estabilidad del sistema, y la elección del valor suele estar fundamentada en pruebas empíricas, se comienza con valores bajos y se aumentan según las necesidades de convergencia del sistema, sin comprometer la estabilidad de este.

Este coeficiente es clave, será el valor a modificar en cada ensayo que se realizará posteriormente para conseguir la atenuación deseada y optimizar el sistema, por ello, en el caso de implementar un código más avanzado que estuviese enfocado en un sistema activo completamente adaptativo, el valor más importante y sobre el cual se actuaría para obtener una nueva señal de control sería este.

A continuación, se define una matriz de coeficientes “w\_ini” de una fila y tantas columnas como coeficientes se hayan definido en “H”, y es inicializada haciendo que todos sus valores sean 0.

Ahora se define el primer coeficiente de convergencia “mu”, este será empleado por la función “LMS\_algorithm” para calcular los coeficientes “ws” que definen la función de transferencia para el altavoz que se define como secundario, el encargado de la cancelación de ruido. Más adelante se analizará con más detalle esta función.

Una vez se obtienen los valores “ws”, se inicializa nuevamente la matriz “w\_ini” con todos sus valores a 0, y se define un nuevo coeficiente de convergencia “mu” que como se ha mencionado, la teoría indica que ha de ser pequeño, por ello se emplea 0.001 o menor, y a partir de ahí se va aumentando progresivamente en pequeños escalones de unidades si la convergencia no es suficiente.

Para saber precisamente la efectividad de dicha convergencia, estos nuevos valores junto a los definidos con anterioridad para el altavoz que se ha considerado primario, es decir, la fuente de ruido, se introducen en la función “FX\_LMS\_algorithm”.

Esta función devolverá los coeficientes pre-calculados “w” que son de aquellos de interés para procesar la señal y obtener la cancelación de ruido deseada. Es por eso que se emplea a continuación “writematrix(w, 'coeff.txt’)” para almacenar en un archivo de texto dichos valores y que resulte más sencillo de manipular y poder así copiarlos para su posterior uso en el código en C de la placa de desarrollo Teensy®.

Ahora se van a desarrollar el proceso de cálculo detrás de las funciones LMS y FX\_LMS y el porqué de ambas.

#### 4.2.1.1. LMS\_algorithm

El algoritmo LMS (por sus siglas del inglés “*Lean Mean Square*”) es un algoritmo matemático perteneciente a la familia de algoritmos de gradiente estocástico. Destaca por su simplicidad, no requiere de funciones de correlación ni de inversión de matriz de autocorrelación.

Estas características han hecho que fuese empleado durante muchos años en los sistemas de cancelación de eco en teléfonos, y al mismo tiempo es ideal para la docencia.

El código empleado se encuentra en el punto 2 del anexo, y se utiliza en la Universidad Politécnica de Madrid como parte de uno de los ejercicios de laboratorio del Máster Universitario en Ingeniería Acústica.

Cada una de las variables de entrada y salida quedan explicadas al comienzo de este en los comentarios previos.

Como se comentaba al comienzo de esta explicación, el algoritmo LMS se define como un algoritmo de gradiente, concretamente descendente, y opera sumando al valor actual del coeficiente del filtro un pequeño porcentaje del gradiente negativo de la superficie de error, de manera que es posible calcular un nuevo grupo de coeficientes del filtro mejorados.

Si se minimiza el error en base a este criterio se logrará minimizar también la perturbación acústica no deseada en el punto de detección de error, es decir, para el caso de estos ensayos, se atenuará lo máximo posible la onda sinusoidal en el punto en que se encuentra situado el micrófono.

Se utiliza un criterio de error al cuadrado porque si el objetivo fuese la minimización de la señal de error (sin elevar al cuadrado), se obtendría una señal negativa muy grande, algo que no es deseable. En la siguiente figura se muestra una superficie de error correspondiente a un filtro FIR de tan solo dos coeficientes. Como se ha mencionado anteriormente, se utilizan muchos más valores para el filtro, concretamente 128, el máximo admisible por este sistema, lo que constituye una superficie de error multidimensional, que no puede ilustrarse fácilmente, así que a modo de ejemplo se tomarán solo dos coeficientes.

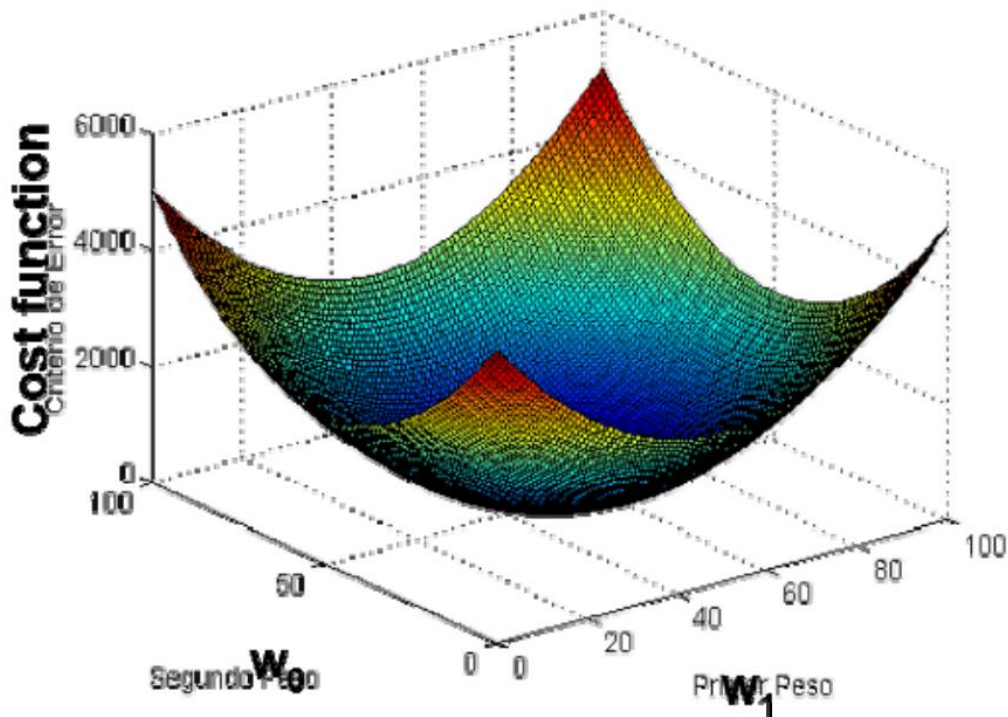


Figura 34: Gráfica habitual del error cuadrático como función de dos coeficientes en el filtro de control digital. [16]

Como se puede observar, la figura que se forma es un hiper-paraboloide con silueta de bañera. Existe una combinación de coeficientes que corresponden con el fondo de esta curva de bañera que harán mínimo el error en base al criterio mencionado. [16]

El procedimiento del código entonces sigue con la declaración de las variables y constantes que toman parte en el cálculo de este algoritmo.

Primero se define la matriz de coeficientes para el filtrado FIR de control con “w”, y se iguala al valor de entrada “w\_ini” que se había definido con anterioridad, a continuación se inicializa la variable “N” con la longitud de la señal de referencia de error “x”, la cual se obtenía de la muestra de error “x.wav”, y se define el número de coeficientes de control en base a la longitud de la matriz de coeficientes “w”, esto es lo que se ha denominado “H”.

Se inicializan dos matrices columna, la matriz “y” representará la señal “x” una vez ha sido procesada por los coeficientes “H” en el filtro FIR de control, y la matriz “e” representará la señal de error que resulta de la diferencia de “x” menos “y”.

Con todos los parámetros definidos es posible aplicar el bucle “for”. En este bucle el proceso tomará el valor de “H” previo al valor de referencia de “x” que se esté evaluando, se operará matemáticamente mediante una convolución con el coeficiente “w” correspondiente lo que procesará la señal “x” dando lugar a un valor de la señal de salida “y”.

Con este valor para la señal procesada, se toma el correspondiente de la señal original, es decir, la muestra que se obtiene del altavoz secundario en este caso particular, el ruido que se desea cancelar, usualmente ruido blanco, pero que en este caso particular también es el mismo seno, se define mediante “ $d$ ” y se hace la diferencia con “ $y$ ”, lo que devuelve como resultado la señal de error “ $e$ ”.

Si la señal procesada “ $y$ ” fuese idéntica a la señal de entrada “ $d$ ”, el resultado sería una señal de error nula, por lo que el valor de los coeficientes “ $w$ ” para el filtro sería idóneo, lo cual no es lo usual, por ello se redefine el valor del coeficiente en base al error mediante la aplicación del algoritmo LMS como tal, multiplicando el valor de la señal de error por el valor de la señal de referencia y el coeficiente de convergencia “ $\mu$ ” que se haya definido.

Con cada iteración se ajustan los valores de los coeficientes aproximándose a los valores del fondo de la curva de bañera y minimizando por tanto el error, que en consecuencia minimiza el ruido.

Dentro del código principal, esta función permite definir los coeficientes que describen la función de transferencia del sonido desde la fuente de sonido secundaria, es decir, el altavoz encargado de producir la cancelación de la señal sinusoidal. Estos coeficientes quedan recogidos en la matriz “ $ws$ ” que será necesaria para la función `FX_LMS_algorithm` a continuación.

#### **4.2.1.2. FX\_LMS\_algorithm**

Una vez se cuenta con una representación de la variación del sonido desde la fuente secundaria, se tomarán estos valores en conjunto para operar mediante el algoritmo FXLMS.

Estas siglas hacen referencia al inglés como “*Filtered-X Lean Mean Square*”, que toman su nombre en base al objetivo de este algoritmo, el cual es el resultado de incluir los efectos de la señal de cancelación en el cálculo de los coeficientes de la fuente primaria, es decir, el origen del ruido que se desea cancelar.

Para ello será necesario tener en cuenta esta versión filtrada de la señal de referencia que es denominada “ $x$ ”, esto da lugar a que el resultado de este algoritmo sea la versión para control activo y control de vibraciones del algoritmo estándar LMS.

El código de esta función se encuentra en el punto 3 del anexo al final de este documento. Al igual que sucedía con anterioridad, este código es empleado con fines didácticos en la Universidad Politécnica de Madrid como parte de uno de los ejercicios de laboratorio del Máster Universitario en Ingeniería Acústica.

Como se puede observar, el código comienza definiendo las variables de la misma forma que lo hacía para el algoritmo LMS, siendo estas las mismas junto a la inclusión de los coeficientes “ws” que se obtuvieron y que definen la función de transferencia para el altavoz secundario.

Una vez se inicia el proceso de cálculo como tal, se toma como referencia no solo “H”, sino que también se considera “S” como los datos procedentes de los coeficientes de la fuente secundaria, es decir, se contempla la variable equivalente para la señal “x” filtrada.

Se calcula entonces la señal de salida “y” en función de la señal de entrada “x” proveniente del altavoz primario, y el valor de esta se pasa por tanto por el valor del coeficiente “ws” correspondiente que define como se transmitirá por el altavoz secundario para que la salida “yf” sea la señal procesada deseada tomando en cuenta el mínimo del sistema al completo, no solo entre la fuente primaria y el micrófono, sino como se ve dicha señal modificada al ser transmitida desde la fuente secundaria con el fin de producir la cancelación.

Esta señal procesada “yf” es por tanto la que se comparará con la señal de ruido primaria “d” para obtener el error, y al igual que se ha contemplado la variación de la señal de salida respecto al sistema completo, se hace lo mismo con la señal de referencia de entrada “x”, obteniendo el valor de “xxf” que será el cuál se tomará junto al error obtenido y el valor de “mu” que se haya definido para re-calcular el valor de los coeficientes del sistema.

Los valores de los coeficientes que se obtienen en la matriz “w” son los que se deben de introducir en el subsistema electrónico para que el filtro digital FIR procese la señal de audio que se capta y se produzca la cancelación del ruido deseado, para el ensayo actual sería el sonido de la sinusoidal.

#### **4.2.2. Arduino, implementación de los coeficientes para ensayo**

Para programar el subsistema electrónico se hace uso del IDE de Arduino, el cual tiene soporte oficial de la herramienta “teensyduino” a partir de su versión 2.0 y permite programar la placa acorde a las diferentes necesidades de forma sencilla.

El código empleado se puede encontrar en el punto 4 del anexo al final de este documento, ahora se procederá a explicar las decisiones dentro del mismo. En primer lugar, en el encabezado se incluyen las librerías necesarias para el funcionamiento del sistema.

Las librerías “Audio.h”, “Wire.h”, “SPI.h”, “SD.h” y “SerialFlash.h” forman parte del sistema Teensy®. Las librerías “Encoder.h” y “libmathq15.h” se incluyeron para un sencillo control del codificador rotativo y para la conversión de los coeficientes de convergencia “w” para su correcta aplicación en el filtro FIR.

Después, como indica el propio código, se encuentra el código generado mediante la “GUItool”, la herramienta gráfica web oficial, y en este caso se obtiene a partir de la construcción del siguiente sistema:

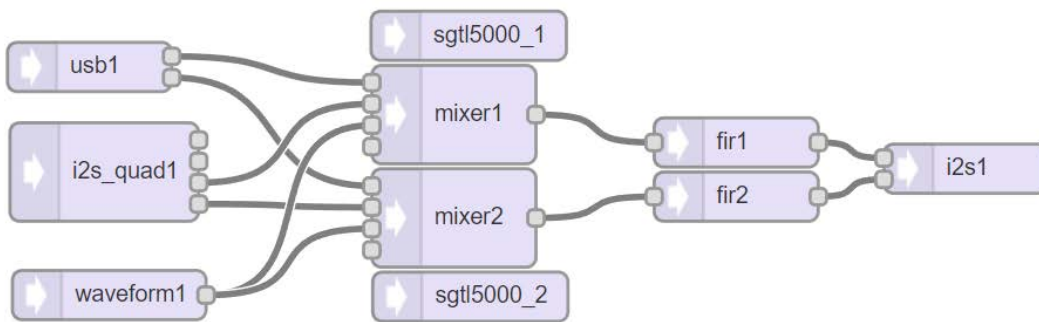


Figura 35: Esquema de bloques diseñado en "Audio System Design Tool for Teensy Audio Library".

El código describe cómo están conectados los elementos físicos del sistema y cómo se pretende que estos funcionen. Así pues, hay 3 fuentes de entrada:

1. usb1 representa la conexión USB del subsistema, este aparecerá en cualquier dispositivo que soporte audio por USB como una salida y entrada de audio, de forma que para este proyecto en concreto, es posible recibir audio digital con una profundidad de 16 bit y una frecuencia de muestreo de 44.1 kHz. Uno de los nodos representa el canal izquierdo y el otro el canal derecho.
2. i2s\_quad1 representa las entradas analógicas de línea de un sistema de 4 canales de audio, como es el caso particular actual en el cual el subsistema está constituido por un sándwich de dos placas Audio Shield. Cada uno de los nodos representará los canales en estéreo de las entradas de línea de audio, dos son canales izquierdos y los otros dos son canales derechos.
3. waveform1 es una función que permite generar señales de audio desde la propia placa. Esta opción está configurada para poder generar señales sinusoidales desde el propio subsistema para el cálculo de los coeficientes sin necesidad de recurrir a archivos externos si fuese necesario, no obstante, para los ensayos posteriores este elemento no fue utilizado, por ello estará comentado dentro del código.

Si bien es posible utilizar todas las fuentes de entrada de audio de forma simultánea, el objetivo de los bloques mixer1 y mixer2 a los cuales conectan sus nodos no es realmente combinar todos estos sonidos, sino garantizar una única salida de audio por cada canal.

Los bloques sgtl5000\_1 y sgtl5000\_2 permiten definir el microchip encargado del procesamiento de audio en el sistema, en este caso es el chip integrado en ambos Audio Shield, que al tratarse de dos placas pues se han de indicar dos procesadores.

Cada uno de los canales de salida es filtrado mediante un filtro FIR, estos son fir1 y fir2; ambos emplearán los mismos coeficientes “w” para procesar la señal. Cada canal de audio es enviado entonces a i2s1, este bloque define la salida de audio analógico estéreo, en el prototipo será el jack de 3.5 mm para este fin.

Una vez queda definido cómo y de qué manera se desea que opere el dispositivo, se define la función “Encoder” para los pines 4 y 5, lo que permitirá de forma sencilla indicar al sistema que hay presente un codificador rotativo conectado a dichos pines y se podrán aplicar diversas modificaciones en el sistema en base a dicha entrada.

Después se definen las constantes decimales para el volumen y una variable “j” que servirá para la función “waveform” en caso de necesitar generar un seno desde el propio dispositivo.

Se define el número de coeficientes del filtro FIR, aquí es muy importante asegurar que este valor está establecido como “const int”, dado que el sistema requiere que esta variable tome dicho formato para operar correctamente.

Entonces se declara un vector decimal “w” con todos los coeficientes pre-calculados que se obtienen del proceso anterior en MatLab.

Asimismo, se define un vector en formato q15 que es denominado como “coeffs” y que tendrá el tamaño de la longitud del filtro FIR, esto es la variable “size”. Esto es muy importante porque el filtro FIR solo opera con valores en formato q15.

A continuación se procederá a definir las características fijas del sistema, comenzando por la comunicación fijando 115200 baudios, pues es conocido como un valor estándar para la comunicación de audio, así como un “buffer” de memoria de 12 unidades para obtener un compromiso adecuado sin impactar en la velocidad de procesamiento de la señal de audio.

No obstante, en la configuración del IDE de Arduino, se ha establecido que el sistema opere a 600 MHz, sin embargo si se llegasen a encontrar ciertas dificultades para procesar la señal con una baja latencia, sería posible aumentar la velocidad de este hasta valores cercanos al doble de frecuencia, garantizando un rendimiento superior, pero sería necesario aplicar refrigeración al procesador según indica la documentación y el propio IDE. [8]

Ahora se inicializan los procesadores de audio SGTL 5000 de cada una de las placas de Audio Shield, una se señala como (LOW) y otra como (HIGH), se indica que hay líneas de entrada y se establece el volumen en base a la variable “vol” que se definió con anterioridad.

Después, se define como han de operar los elementos “mixer” del sistema, los cuales tan solo han de tomar las señales de los canales que reciben, en este caso nodos 0, 1 y 2, y no modificar su ganancia en absoluto, por ello toman un valor de 1.0. Cada cual tiene su descripción correctamente indicada según a que fuente corresponde.

Hasta este punto todo ha sido cuestión de establecer las características del sistema y cómo ha de operar, ahora sin embargo es cuando se aplican los coeficientes pre-calculados para procesar la señal y obtener la cancelación deseada.

Primero, es necesario convertir los coeficientes en formato decimal provenientes de MatLab a q15 para poder introducirlos en los filtros FIR. Para ello se llama a la función “transformCoeff”, en la cual se declara la matriz de coeficientes en formato q15, los coeficientes “w” y el tamaño de ambos vectores.

Gracias a la librería que se mencionó previamente este proceso es tan sencillo como realizar un bucle “for” que convierta uno a uno cada valor decimal del vector “w” y lo asigne en la matriz “coeffs” en formato q15, esto es lo que se puede observar al final del código en la función de conversión.

Una vez se tienen los coeficientes como valores útiles, se inicializan los filtros FIR para cada canal de audio, declarando los coeficientes que se han de tomar y el número total de ellos, esto es “fir.begin(coeffs, size)”.

Para tomar las muestras de audio en el proceso previo en MatLab, y poder tener en consideración el subsistema conectado como parte de los elementos del sistema de audio, se encuentran comentadas las funciones “fir.begin(FIR\_PASSTHRU, 0)”, las cuales permiten que el sonido pase a través del subsistema sin ser procesado por dichos filtros.

De esta forma era posible grabar las muestras x.wav, Primario.wav y Secundario.wav antes de calcular los coeficientes “w”.

Después, lo que resta es el código en bucle que tan solo contempla la función encoderFN(), función muy sencilla que mediante la librería análoga permite leer los cambios que suceden en el codificador rotativo y ajustar el volumen (para este caso) del subsistema electrónico, así como la función “waveform” que se encuentra comentada tal y como se ha indicado previamente, pues no ha sido necesario emplearla para los posteriores ensayos.

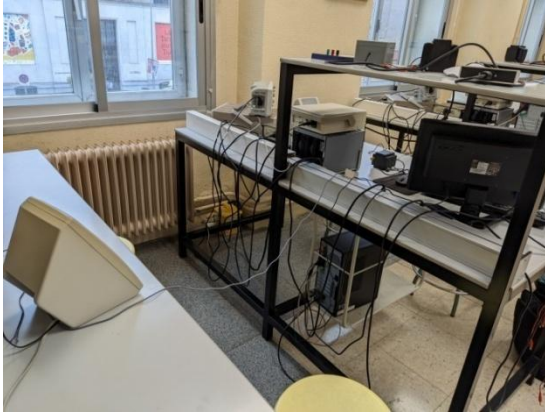
### **4.3. Ensayos**

Una vez explicado el cálculo de los coeficientes y la preparación de los ensayos, se puede proceder a analizar los resultados de estos.

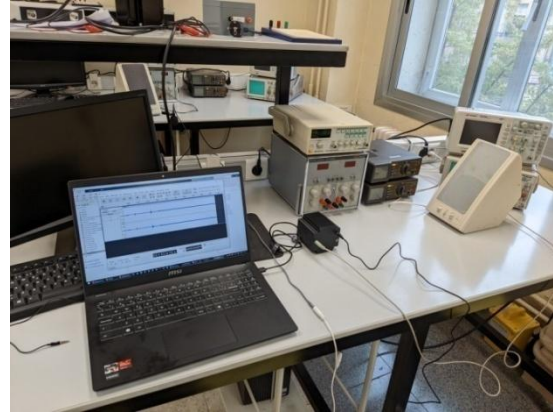
En primer lugar se llevaron a cabo pruebas simples con unos altavoces de calidad limitada en el laboratorio de analógica de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial de la Universidad Politécnica de Madrid.

La sala presenta unas características acústicas algo desfavorables, pues existe algo de reverberación, se encuentra situada junto a un pasillo transitado y sus ventanas dobles no impiden que entre cierto ruido de la calle.

Estas condiciones no se describen con afán de excusar los resultados obtenidos, sino de ponerlos en el contexto adecuado para poder compararlos con los obtenidos posteriormente en las posteriores pruebas en diferentes entornos, y comprender cómo los cambios en el medio así como en la calidad de los transductores afecta a la eficacia del sistema, algo que fue mencionado en la figura 5.



*Figura 36: Vista de la distribución del altavoz primario.*



*Figura 37: Vista de la distribución del altavoz secundario.*

Para comprobar el correcto funcionamiento del sistema, se ha empleado el programa de audio Audacity, el cual permite captar audio en formato WAV en alta resolución y presenta herramientas sencillas de análisis de la señal de audio.

El procedimiento consistía en grabar el sonido con el altavoz primario únicamente conectado emitiendo el ruido, en el caso del ensayo propuesto consiste en un seno a diferentes frecuencias para cada ensayo, y pasados unos segundos se conecta la fuente secundaria de cancelación, se mantiene encendida también por unos segundos y nuevamente se vuelve a desconectar para observar que los valores de la señal de ruido captada retornan a los iniciales.

Para esta distribución, tomando como señal de ruido un seno de 800 Hz de frecuencia, la señal resultante del ensayo es la siguiente:

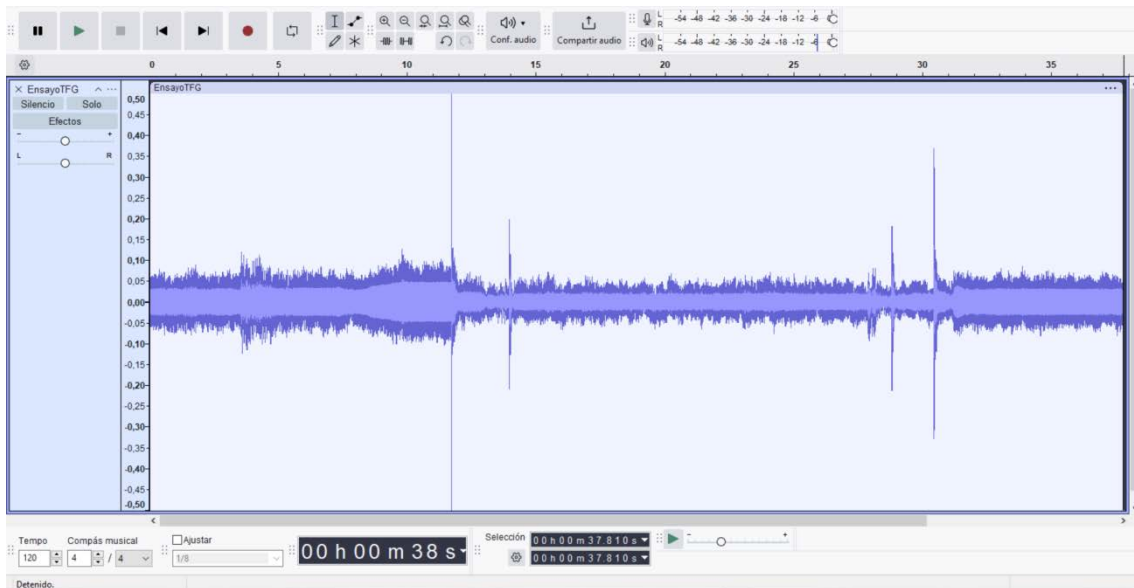


Figura 38: Onda acústica ensayo 13/11/2024.

Como se puede observar, durante los primeros 12 segundos el subsistema se encontraba apagado, al activar el interruptor del altavoz secundario la señal de cancelación entra en acción atenuando el seno, y al volver a apagar dicha fuente a los 30 segundos, el ruido regresa.

Estas variaciones se pueden ver con mayor precisión en los siguientes análisis.

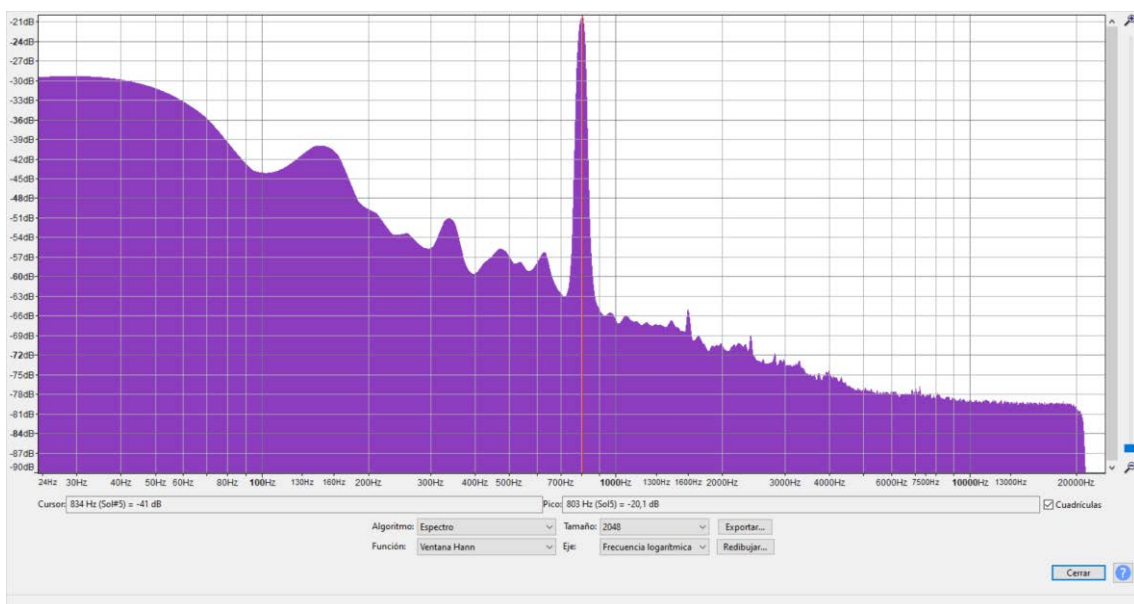


Figura 39: Análisis de espectro tramo 1. Ensayo 13/11/2024.

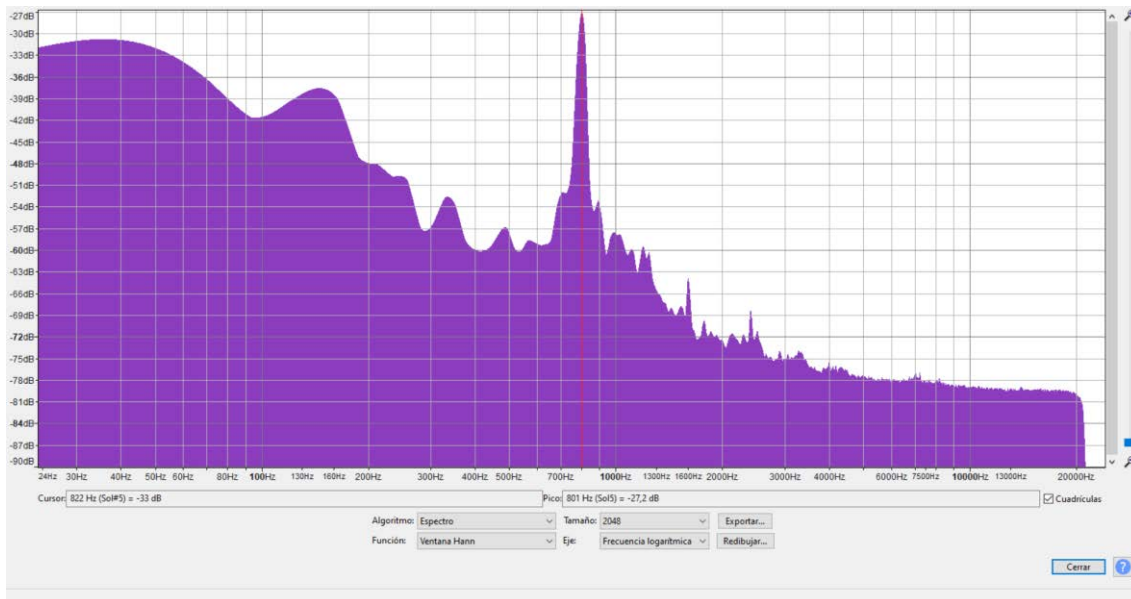


Figura 40: Análisis de espectro tramo 2. Ensayo 13/11/2024.

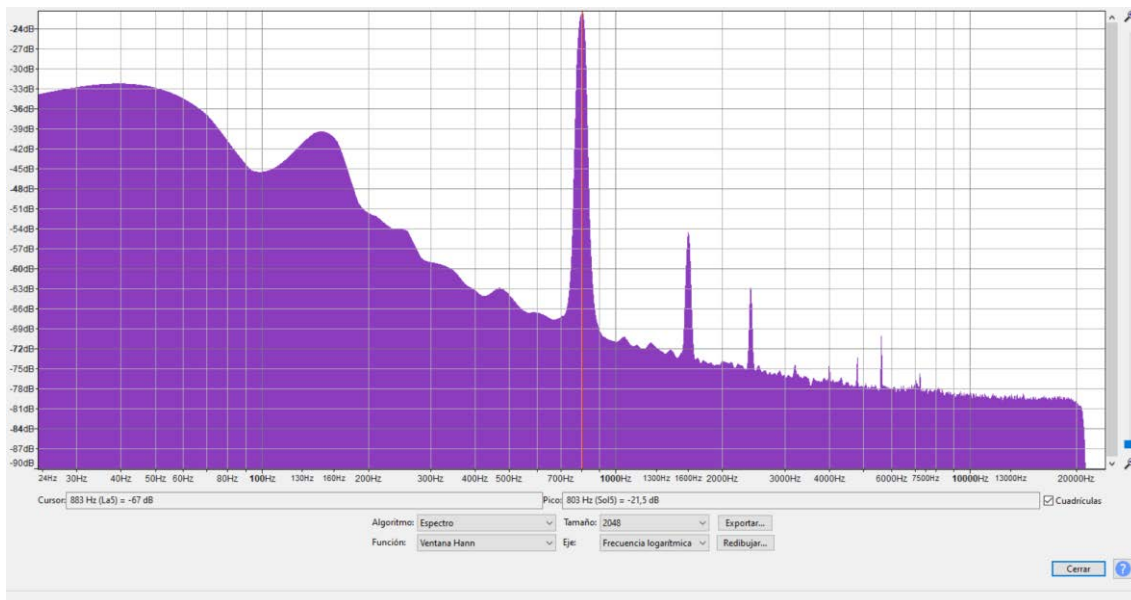


Figura 41: Análisis de espectro tramo 3. Ensayo 13/11/2024.

Como se puede apreciar, para el primer tramo en la banda de 800 Hz existe un valor pico de -20 decibelios, una vez se pone en marcha el sistema, en el tramo 2 se puede observar que el valor pico se ha atenuado hasta los -27 decibelios, y una vez se vuelve a apagar el sistema la señal detectada regresa a los -21 decibelios.

Si bien estos primeros resultados fueron favorables, 800 Hz se encuentran más dentro del entorno de las frecuencias medias que en las frecuencias bajas, por lo que era necesario comprobar el resto del espectro, sin embargo no fue posible ensayar apropiadamente valores menores.

Durante el siguiente mes se estuvo analizando esta discordancia de resultados hasta encontrar que el problema era la suma de las limitaciones del micrófono empleado junto a las limitaciones de los altavoces. Nuevamente, es necesario regresar a la importancia de emplear un subsistema físico adecuado para todo sistema de control de ruido activo.

Los altavoces empleados tenían una pobre respuesta por debajo de 300 Hz, con serias dificultades para representar correctamente cualquiera de estas frecuencias, y ambas unidades eran similares pero no iguales, presentaban diferencias sustanciales de sonido, que si bien podían ajustarse con los mandos integrados, no hacían que el sonido fuese lo suficientemente similar.

Por otro lado, empleando un altavoz de alta fidelidad se bombardeó el micrófono a distintas frecuencias para evaluar la capacidad de este para captar audio en el rango deseado, obteniendo como sorpresa el siguiente análisis de espectro.

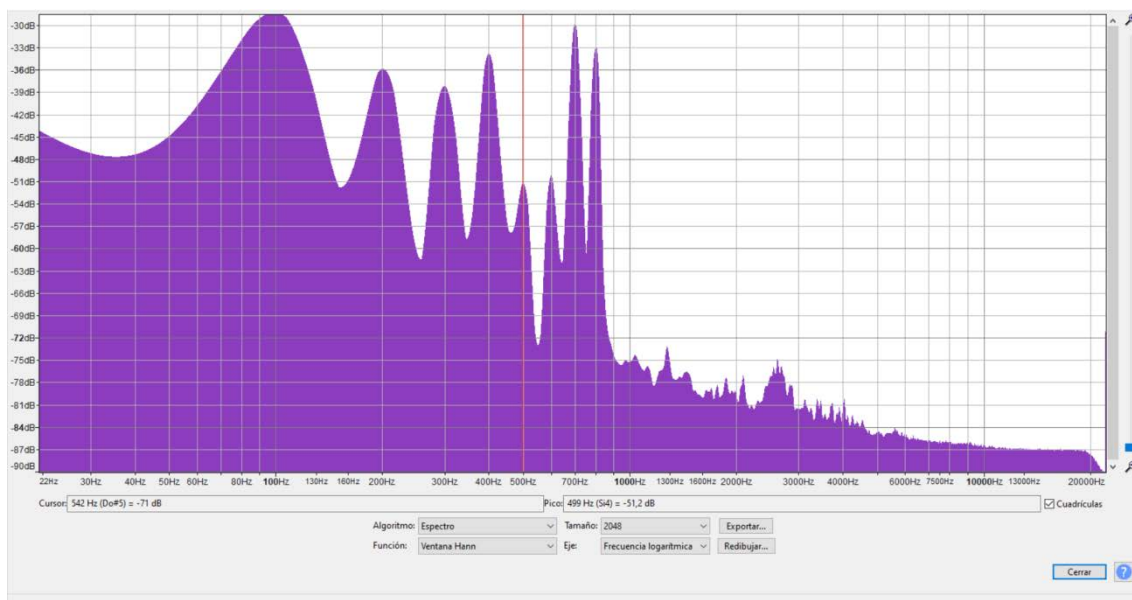
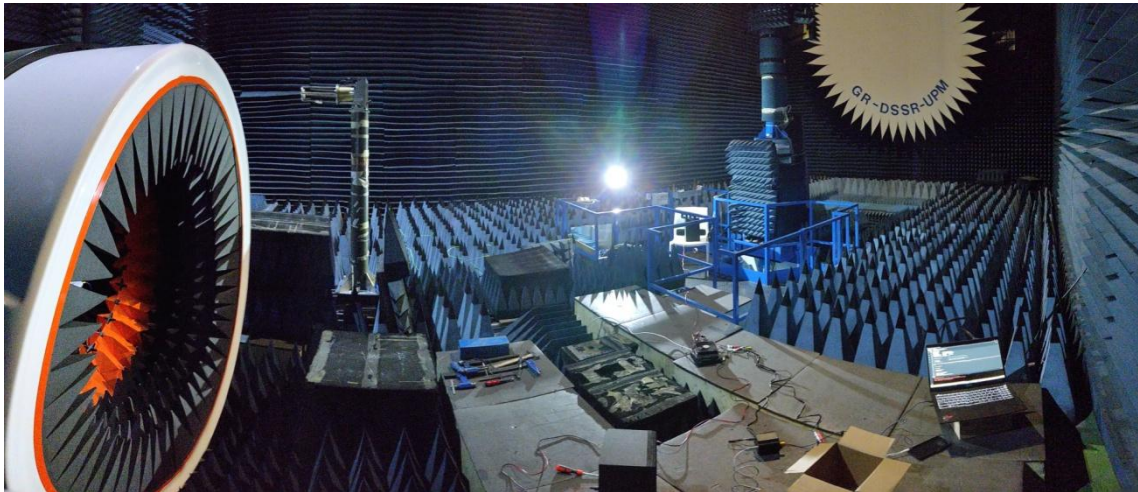


Figura 42: Análisis de espectro del micrófono empleado.

Cómo se puede observar, el micrófono no es capaz de grabar sonido adecuadamente entre 400 Hz y 700 Hz, sin embargo presenta una representación muy buena para frecuencias superiores y buenas para las frecuencias inferiores, pero con la limitación de captar también mucho ruido electromagnético en el rango de entre 80 Hz y 300 Hz.

Con la finalidad de reducir al mínimo las limitaciones físicas del sistema, se sustituyeron los altavoces por dos unidades iguales entre sí de mejor calidad, con una representación más fiel de las frecuencias bajas. No obstante están constituidos por un altavoz de frecuencias medias (conocido normalmente como “woofer”), por lo que las frecuencias más bajas que pertenecen al ámbito de los “subwoofers” como pueden ser 30 Hz o 60 Hz no fueron ensayadas.

Asimismo, se realizó una solicitud de una fecha para poder utilizar alguna de las cámaras anecoicas que utilizan en el Laboratorio de Ensayos y Homologación de Antenas (LEHA), dado que si bien su construcción y los dispositivos que en esta se encuentran no están pensados para el ensayo de audio, el diseño de la sala con el fin de aislar su interior de interferencias electromagnéticas garantiza una mayor limpieza en las señales captadas por el micrófono, y también provee de un entorno absorbente a las frecuencias más altas y las reverberaciones.



*Figura 43: Imagen panorámica de la cámara anecoica durante los ensayos. 16/12/2024.*

Esto se vio reflejado de forma instantánea en los resultados de las pruebas realizadas, pues los valores que se debían emplear para coeficiente de convergencia  $\mu$  pasaban de un orden de magnitud de 0.01 a 0.0001 para prácticamente la totalidad de los ensayos.

En ambas imágenes es posible observar la distribución de todos los elementos del sistema, no obstante en la siguiente figura se puede apreciar con algo más de detalle la disposición de los componentes.



*Figura 44: Detalle de la configuración del sistema durante los ensayos. 16/12/2024.*

La fuente primaria, situada sobre una silla para tener la misma altura en el horizonte con la fuente secundaria, estaba conectada a unos 12 metros de distancia del micrófono, el cual se encontraba en una posición fija en la caja que se observa en el centro de la figura 44, mientras que la fuente secundaria se situaba aproximadamente a medio metro de distancia a su izquierda.

Comenzando por una frecuencia de 100 Hz, la señal de audio presenta nuevamente tres tramos marcados para el sistema apagado, encendido y nuevamente apagado. Como se mencionaba anteriormente, en este rango de frecuencia el micrófono sufre con las señales electromagnéticas, y si bien la cámara favorecía mucho su rendimiento, no mitigaba por completo sus deficiencias, por lo que fue necesario emplear un valor de  $\mu$  de 0.001.

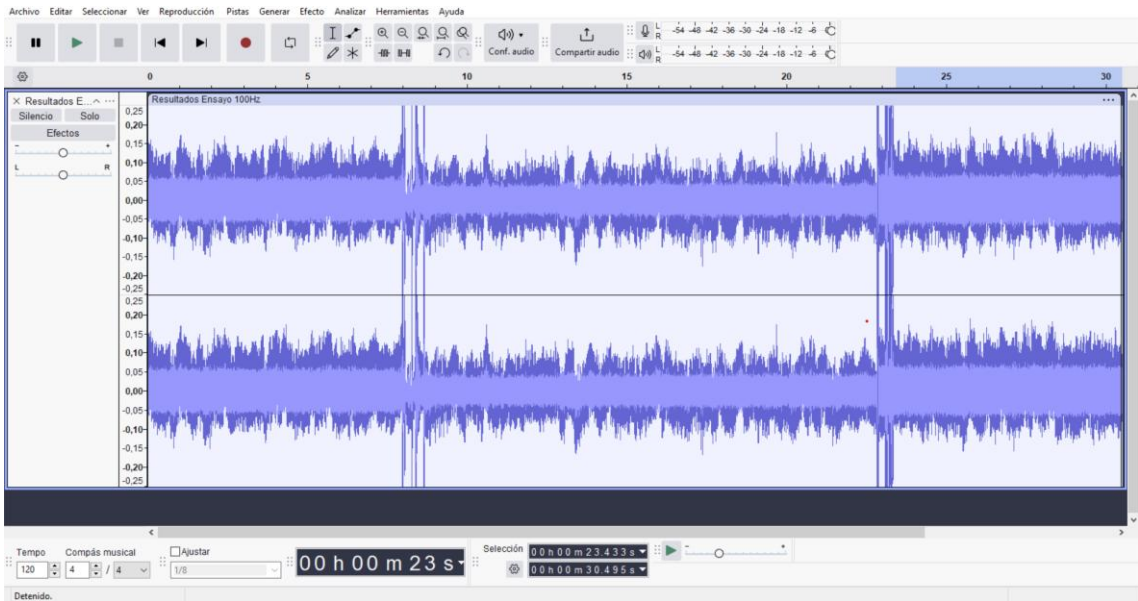


Figura 45: Onda acústica ensayo a 100 Hz. Cámara anecoica 16/12/2024.

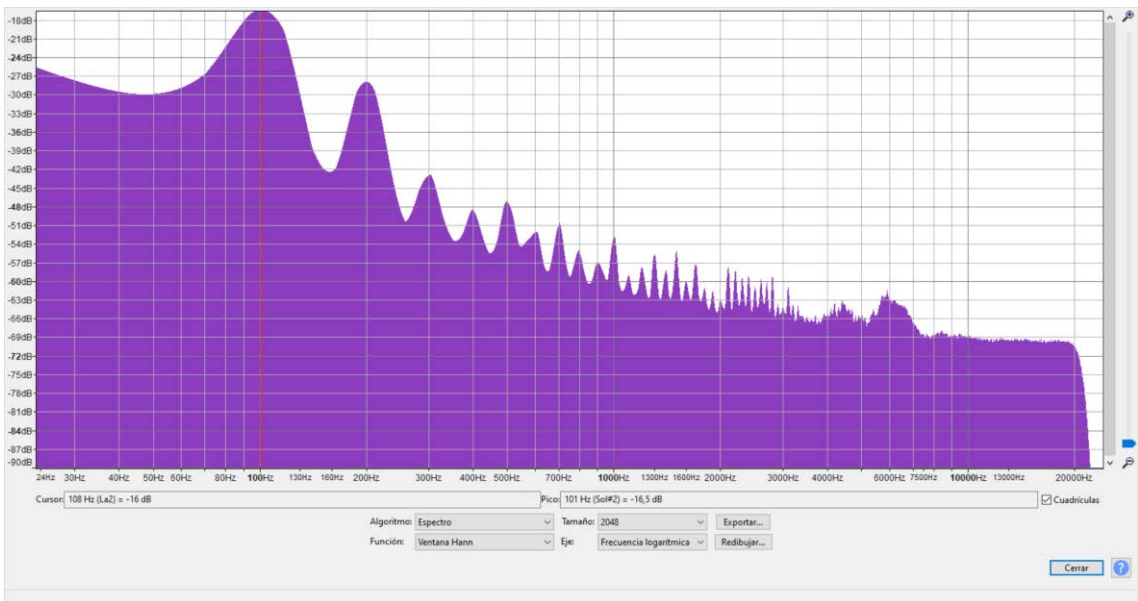


Figura 46: Análisis de espectro, tramo 1, ensayo a 100 Hz. Cámara anecoica 16/12/2024.

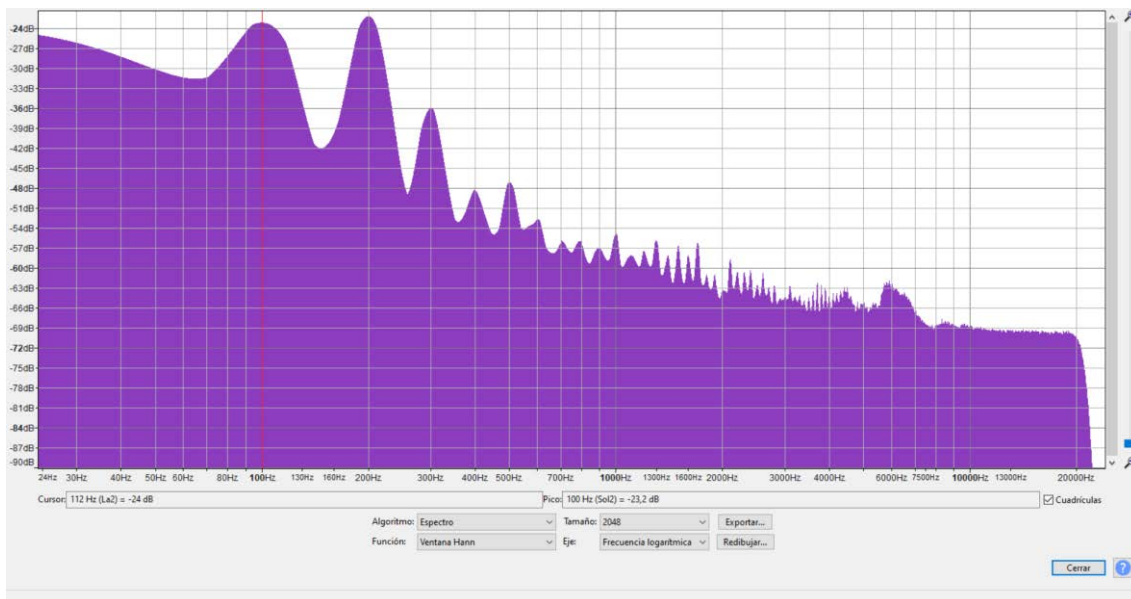


Figura 47: Análisis de espectro, tramo 2, ensayo a 100 Hz. Cámara anecoica 16/12/2024.

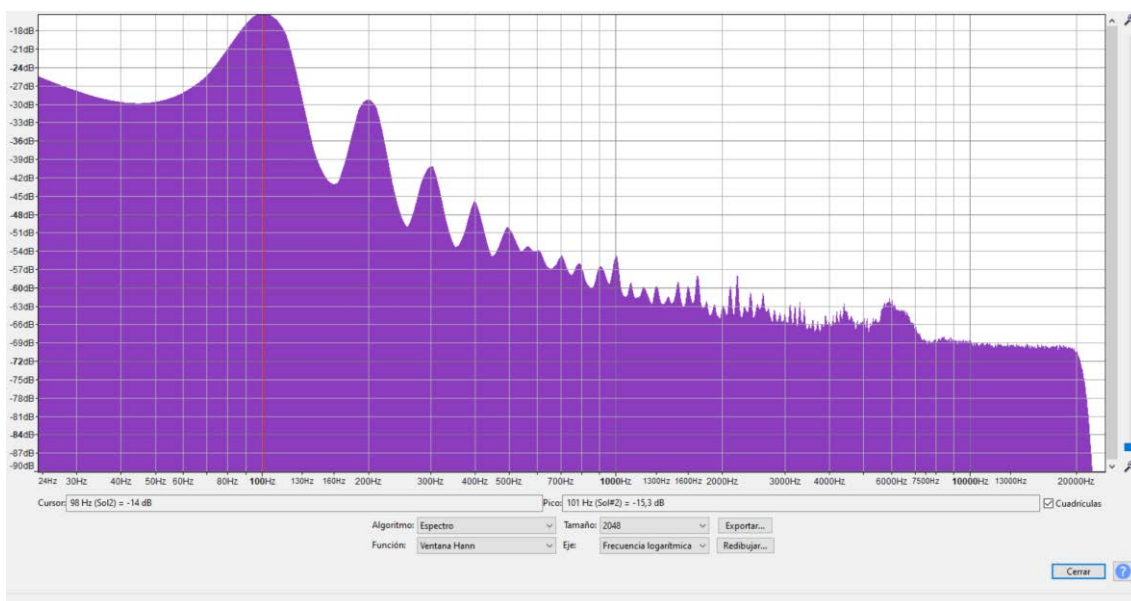


Figura 48: Análisis de espectro, tramo 3, ensayo a 100 Hz. Cámara anecoica 16/12/2024.

Como se puede observar, la atenuación resultante es de unos 7 decibelios para un seno de 100 Hz, se logra reducir de un valor de entorno -16 dB a -23 dB.

Aumentando un escalón a los 200 Hz se obtiene la siguiente señal para un valor del coeficiente de convergencia  $\mu$  de 0.0001.

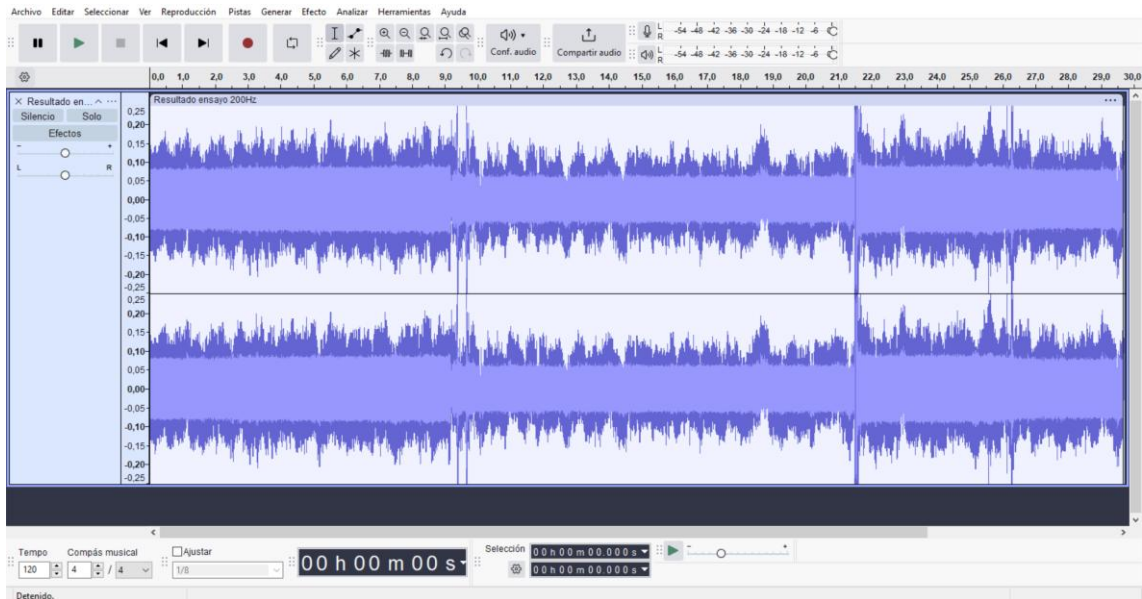


Figura 49: Onda acústica ensayo a 200 Hz. Cámara anecoica 16/12/2024.

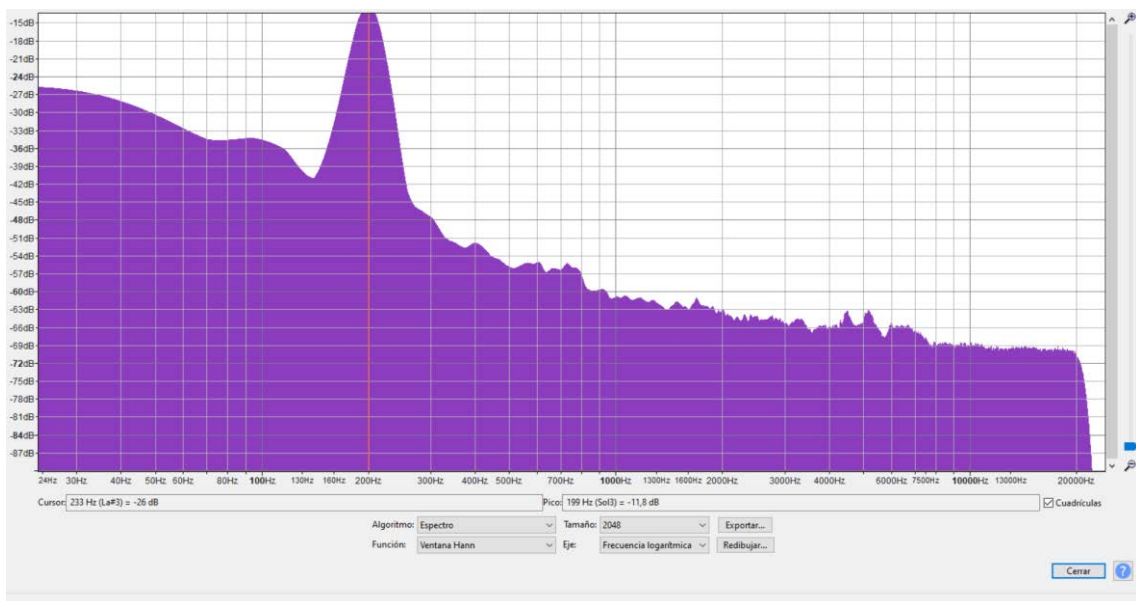


Figura 50: Análisis de espectro, tramo 1, ensayo a 200 Hz. Cámara anecoica 16/12/2024.

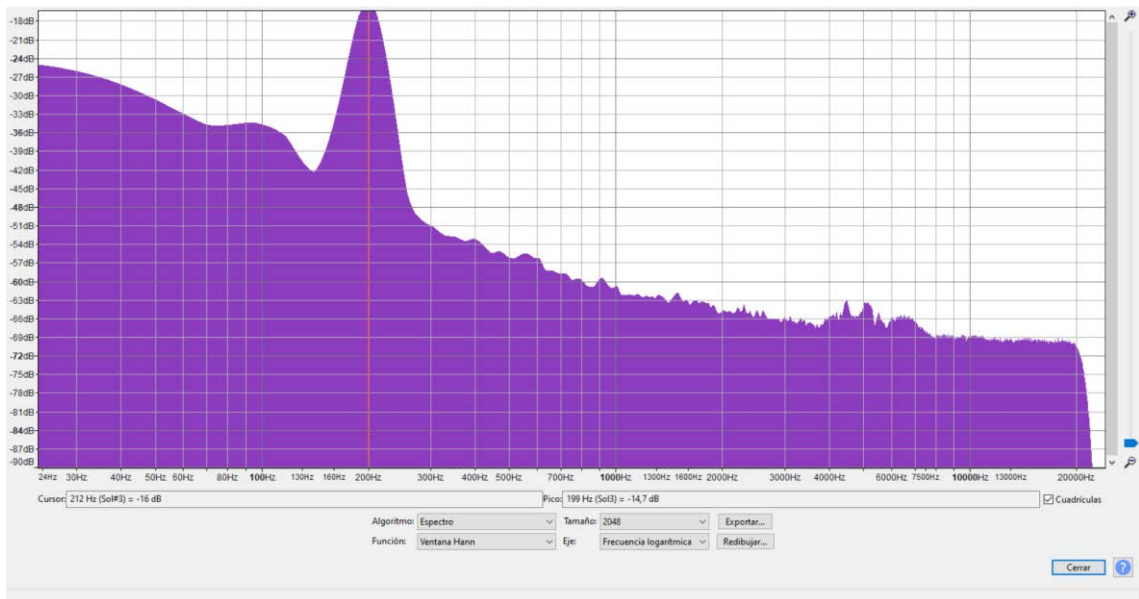


Figura 51: Análisis de espectro, tramo 2, ensayo a 200 Hz. Cámara anecoica 16/12/2024.

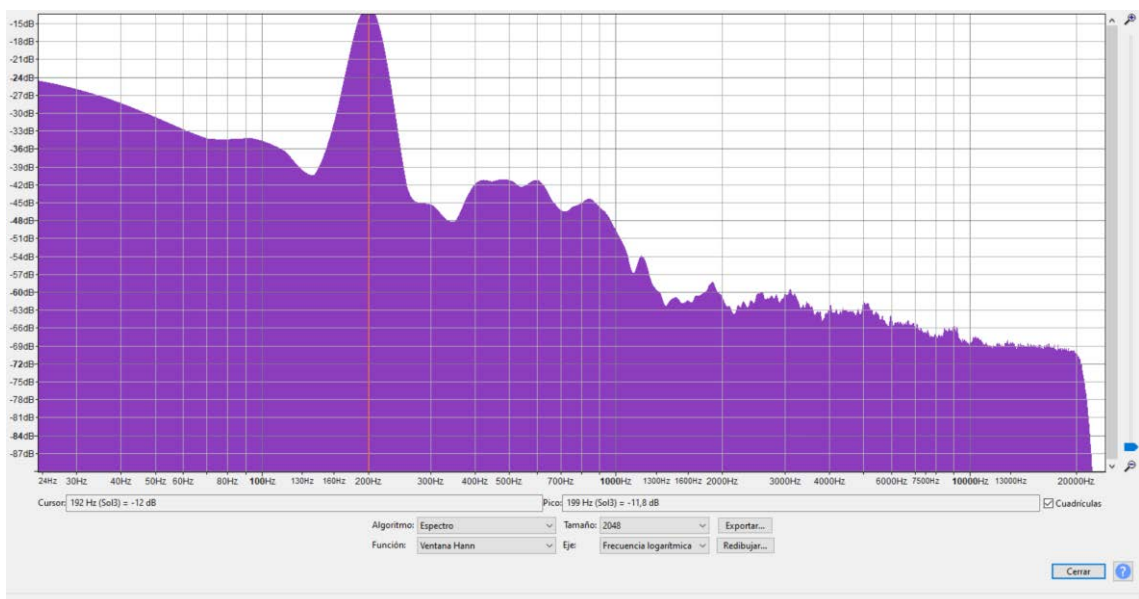


Figura 52: Análisis de espectro, tramo 3, ensayo a 200 Hz. Cámara anecoica 16/12/2024.

Los altavoces presentaban una vibración que enmascaraba la señal de seno a 200 Hz, lo que supuso que si bien la atenuación fue de tan solo 3 decibelios, era efectiva pues el resto del sonido quedaba enmascarado por dicha vibración.

Un contraste muy grande con la frecuencia de 300 Hz, ensayo en el cual se aprovechó para comprobar nuevamente como puede verse afectada la efectividad del sistema si alguno de los elementos que lo componen es desplazado.

Para esta señal se cuenta con 5 tramos marcados, en los tramos 1 y 3 se encuentra la señal de ruido sin tratar, mientras que en los tramos 2 y 4 el sistema está en funcionamiento.

Para el último tramo el micrófono fue desplazado hacia la fuente de audio secundaria, lo que provocó que saliese de la región espacial donde se produce la cancelación activa y la onda “destructiva” pasó a ser “constructiva”, por lo que la intensidad del seno subió rápidamente en unos 7 decibelios.

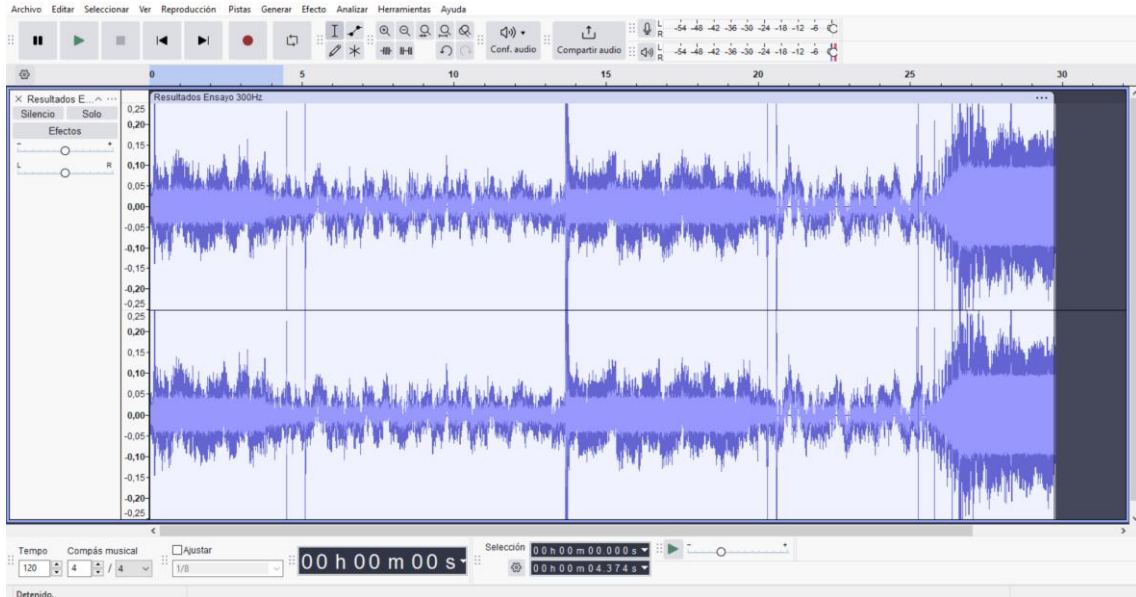


Figura 53: Onda acústica ensayo a 300 Hz. Cámara anecoica 16/12/2024.

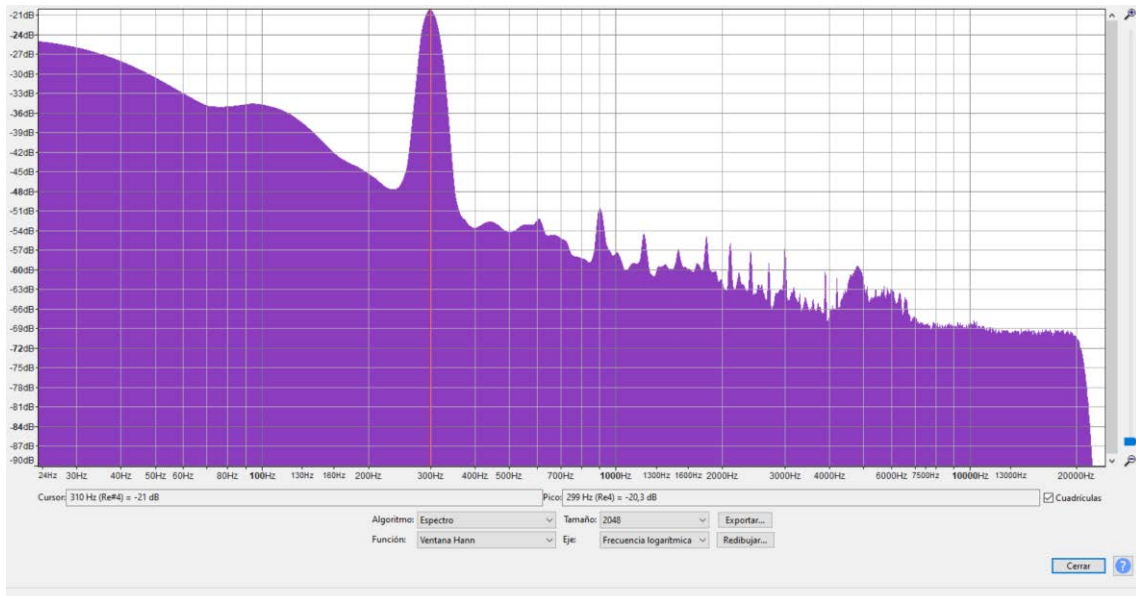


Figura 54: Análisis de espectro, tramo 1, ensayo a 300 Hz. Cámara anecoica 16/12/2024.

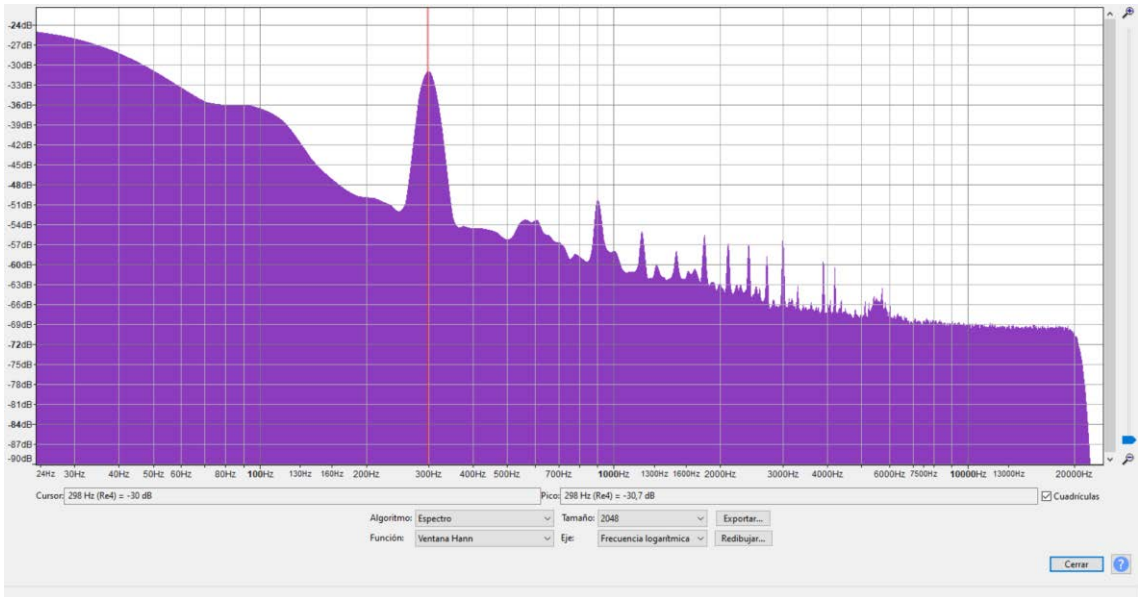


Figura 55: Análisis de espectro, tramo 2, ensayo a 300 Hz. Cámara anecoica 16/12/2024.

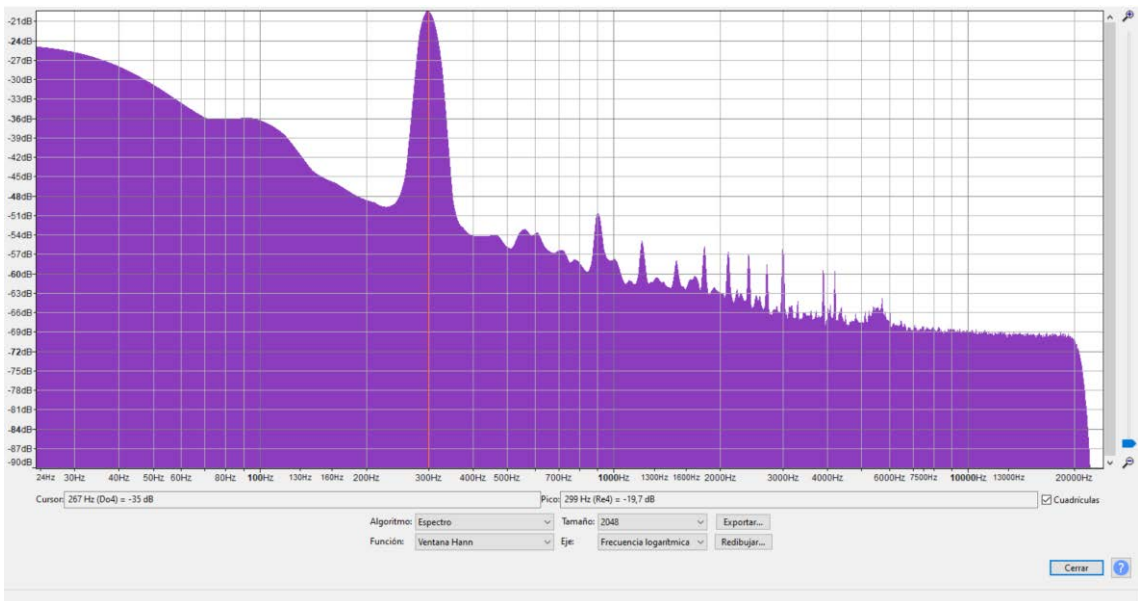


Figura 56: Análisis de espectro, tramo 3, ensayo a 300 Hz. Cámara anecoica 16/12/2024.

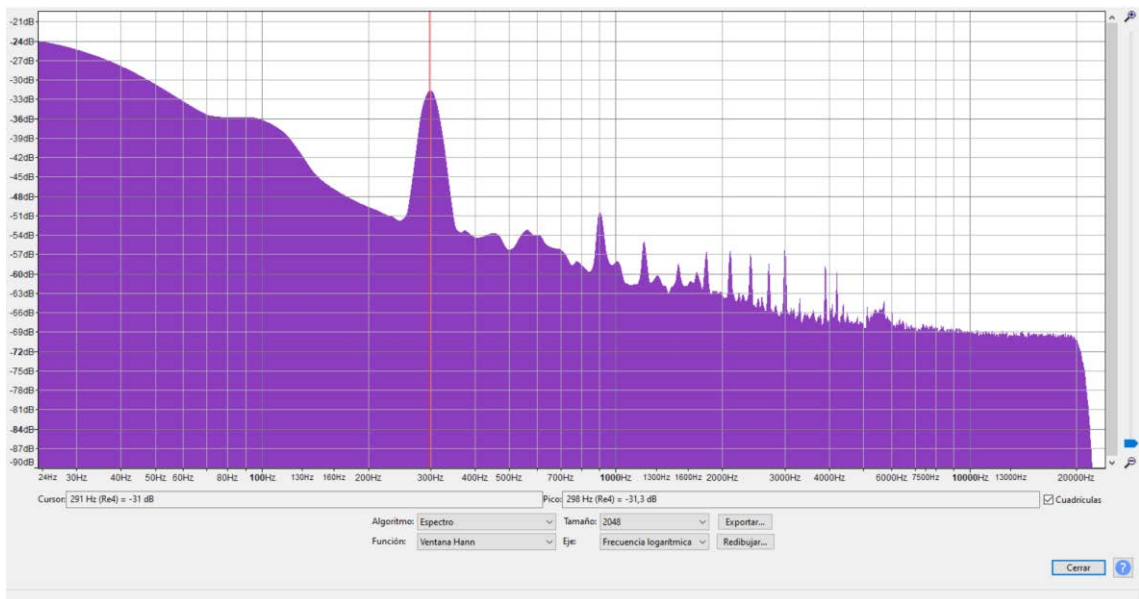


Figura 57: Análisis de espectro, tramo 4, ensayo a 300 Hz. Cámara anecoica 16/12/2024.

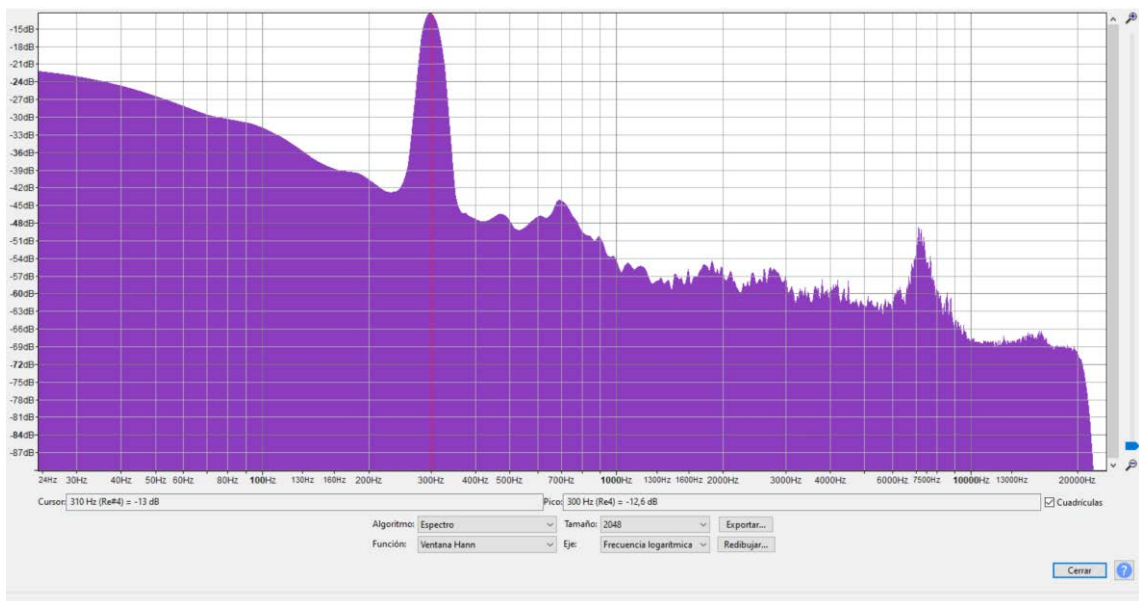


Figura 58: Análisis de espectro, tramo 5, ensayo a 300 Hz. Cámara anecoica 16/12/2024.

Manteniendo una posición idónea dentro del punto para el cual se pre-calcularon los coeficientes empleados, se puede observar como se produce una atenuación de 10 decibelios en ambas ocasiones, reduciendo la señal de ruido de -20 dB a -30 dB.

Sin embargo, como se ha mencionado, para el último tramo, al desplazar el micrófono hacia la fuente secundaria, rápidamente sale del campo de cancelación y la señal aumenta hasta los -12 dB.

Para este ensayo, y sobre todo por lo sorprendentemente eficiente que resultaba el sistema con estos altavoces para esta frecuencia, se pudo contar con la presencia de Xiaoliang y Sergio, quienes se encuentran a cargo de los ensayos de LEHA, y tuvieron la cortesía de colaborar en la verificación de la efectividad del sistema más allá del micrófono, pues ambos confirmaron la atenuación casi completa del seno en la misma área.

Esto es relevante porque debido a las características constructivas del micrófono, hay resultados que si bien en primera instancia no parecían efectivos, al realizar el análisis de espectro la imagen era muy diferente, y es que el micrófono si percibía una gran atenuación.

Para verificar esta condición decidí aprovechar las características de la sala y ensayar una frecuencia media de 1000 Hz, la cual es mucho más próxima al rango vocal femenino y sobre todo se aproxima mucho a la curva de diseño de un micrófono de las características del que se está empleando para estos ensayos.

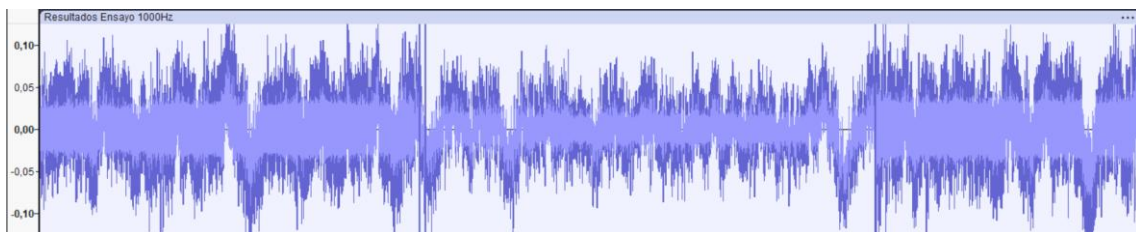


Figura 59: Onda acústica ensayo a 1000 Hz. Cámara anecoica 16/12/2024.

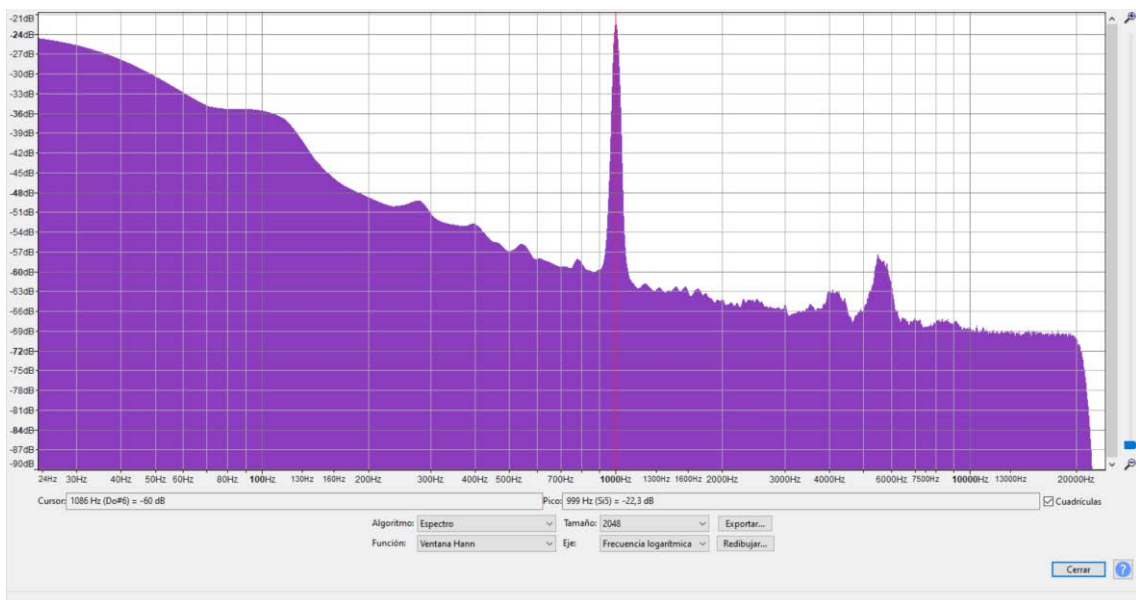


Figura 60: Análisis de espectro, tramo 1, ensayo a 1000 Hz. Cámara anecoica 16/12/2024.

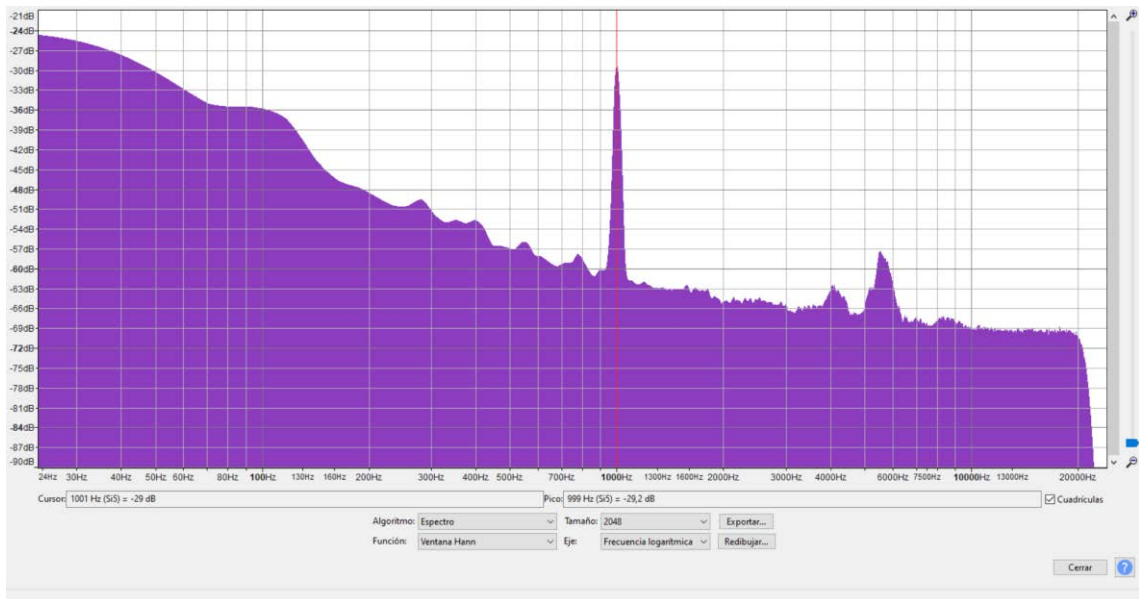


Figura 61: Análisis de espectro, tramo 2, ensayo a 1000 Hz. Cámara anecoica 16/12/2024.

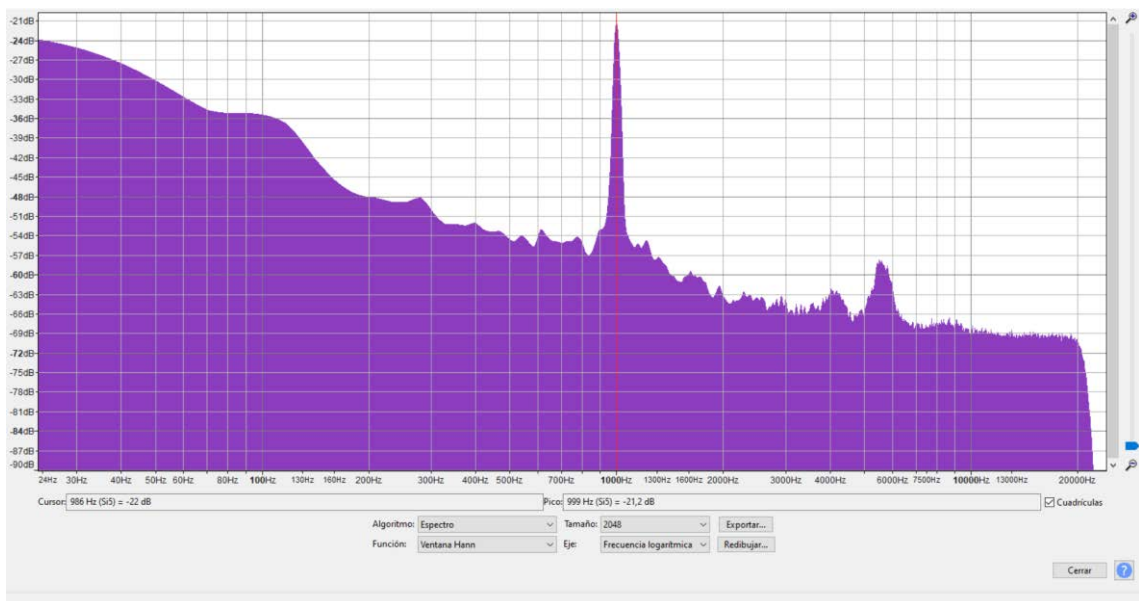


Figura 62: Análisis de espectro, tramo 3, ensayo a 1000 Hz. Cámara anecoica 16/12/2024.

Y efectivamente se vio reflejado, si bien al aumentar la frecuencia el área física del espacio donde se produce una cancelación efectiva se reduce a una esfera de menor radio, el micrófono en la posición óptima para la cual se han pre-calculado los coeficientes observa una atenuación de 7 decibelios que no se percibía como tal en persona. Fue necesario emplear un coeficiente de convergencia  $\mu$  de valor 0.0005, y el resultado se percibía peor al obtenido para un coeficiente de valor 0.0001 a una frecuencia de 700 Hz:

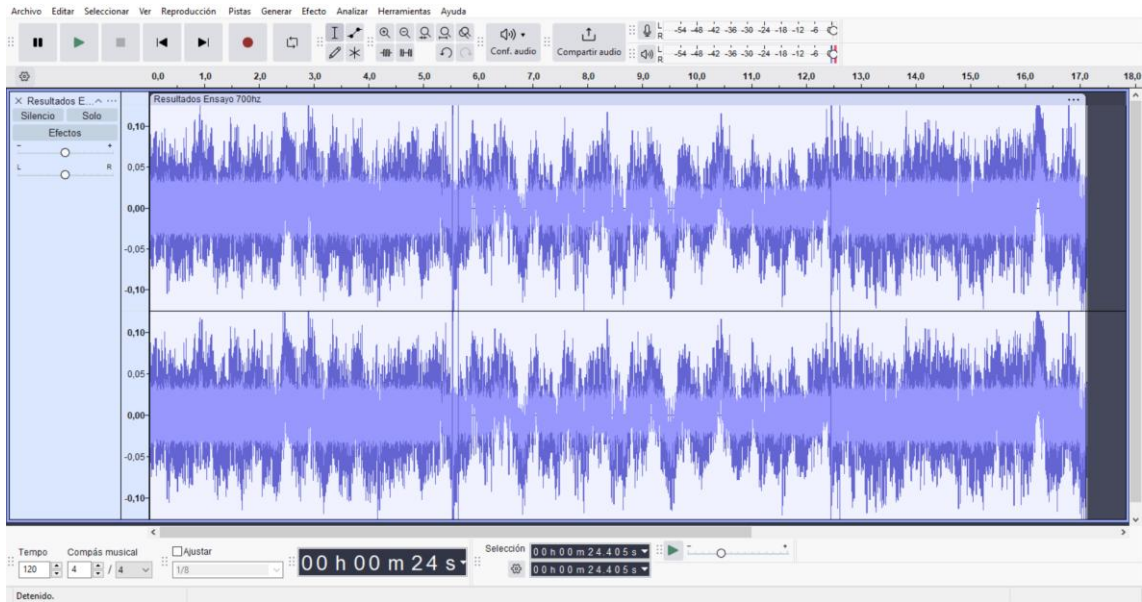


Figura 63: Onda acústica ensayo a 700 Hz. Cámara anecoica 16/12/2024.

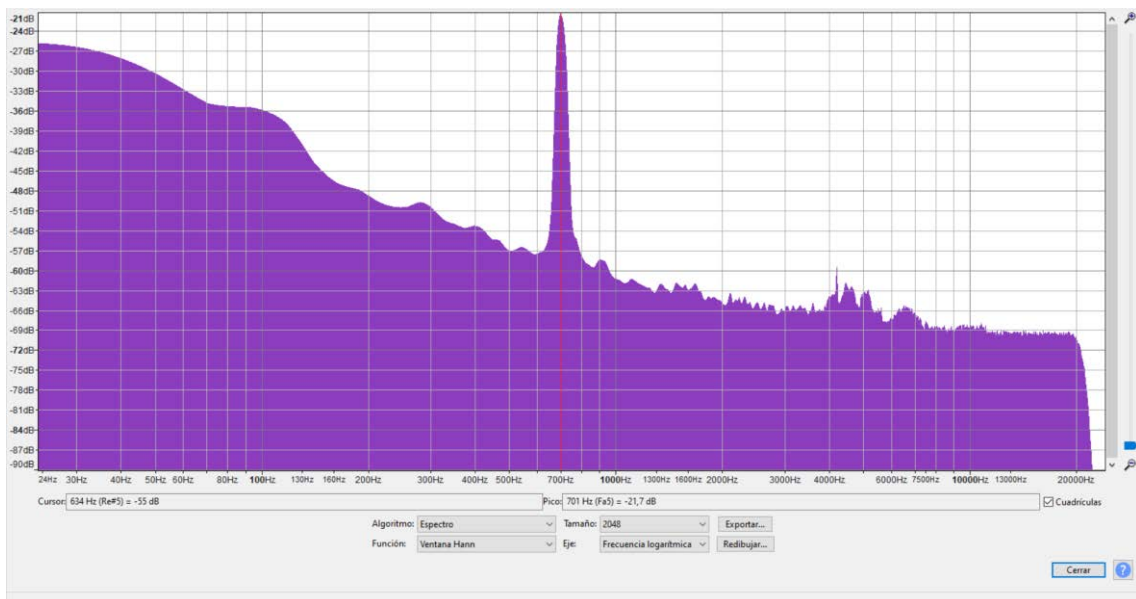


Figura 64: Análisis de espectro, tramo 1, ensayo a 700 Hz. Cámara anecoica 16/12/2024.

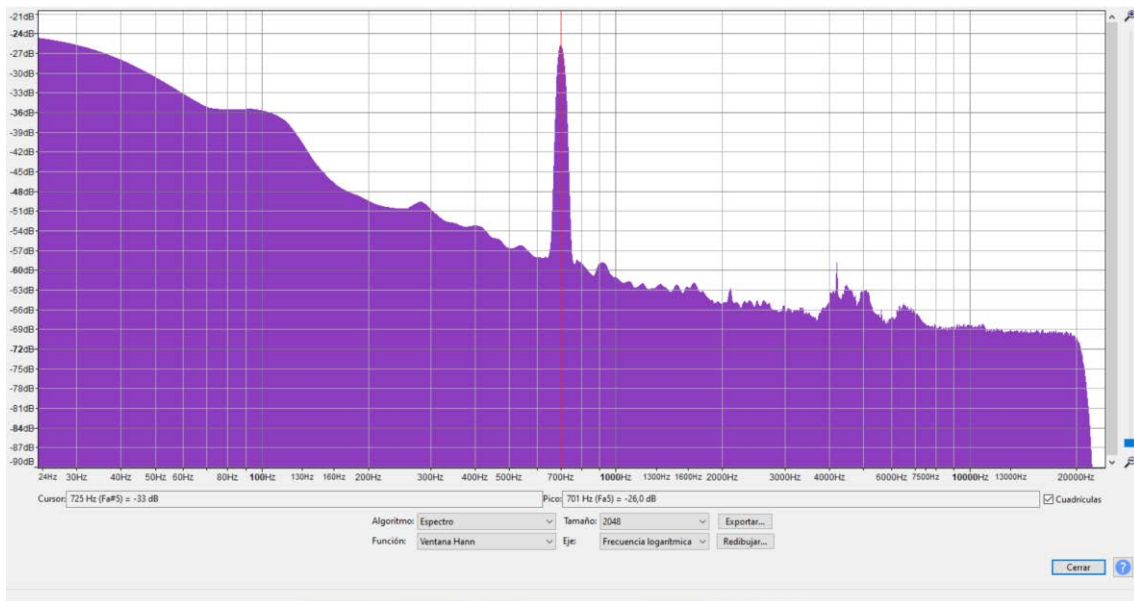


Figura 65: Análisis de espectro, tramo 2, ensayo a 700 Hz. Cámara anecoica 16/12/2024.

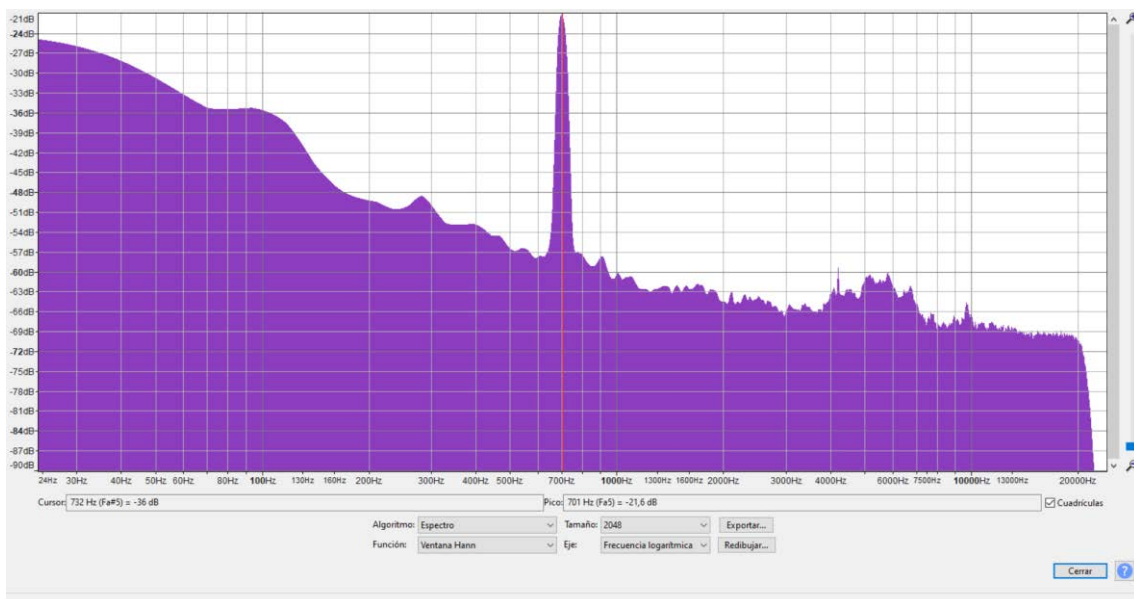


Figura 66: Análisis de espectro, tramo 3, ensayo a 700 Hz. Cámara anecoica 16/12/2024.

Y sin embargo, como se puede observar en los análisis de cada tramo para 700 Hz, la atenuación observada era de alrededor de 4.5 decibelios. Una diferencia de 3 decibelios debería de ser significativa como para poder apreciarla con el oído humano, pero para este caso particular no era así, la reducción del área física sumado a la configuración del micrófono hacían que hubiese pequeñas diferencias.

No obstante, nuevamente cabe destacar que para una frecuencia tan elevada no sería práctico emplear un sistema de cancelación activa como el que se está utilizando para estos ensayos, los resultados obtenidos frente a sistemas pasivos no justifican el uso de un sistema activo sobre las otras soluciones existentes, este ensayo tenía como finalidad comprobar que, al igual que sucede con las personas, el sonido es un tanto subjetivo de la capacidad del receptor.

Para contrastar los resultados obtenidos, se repitieron los ensayos en la sala de la asociación CREA (Club de Robótica, Electrónica y Automática) de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial, la cual se presenta con una gran superficie de trabajo central y a lo largo de todas sus paredes se encuentran distintos medios de almacenaje para componentes de la asociación, lo cual sumado a la presencia de algunas personas daba lugar a unas condiciones más realistas de un entorno de trabajo sin características particularmente idóneas para cancelar señales de baja frecuencia.

El primer ensayo fue para una frecuencia de 200 Hz.

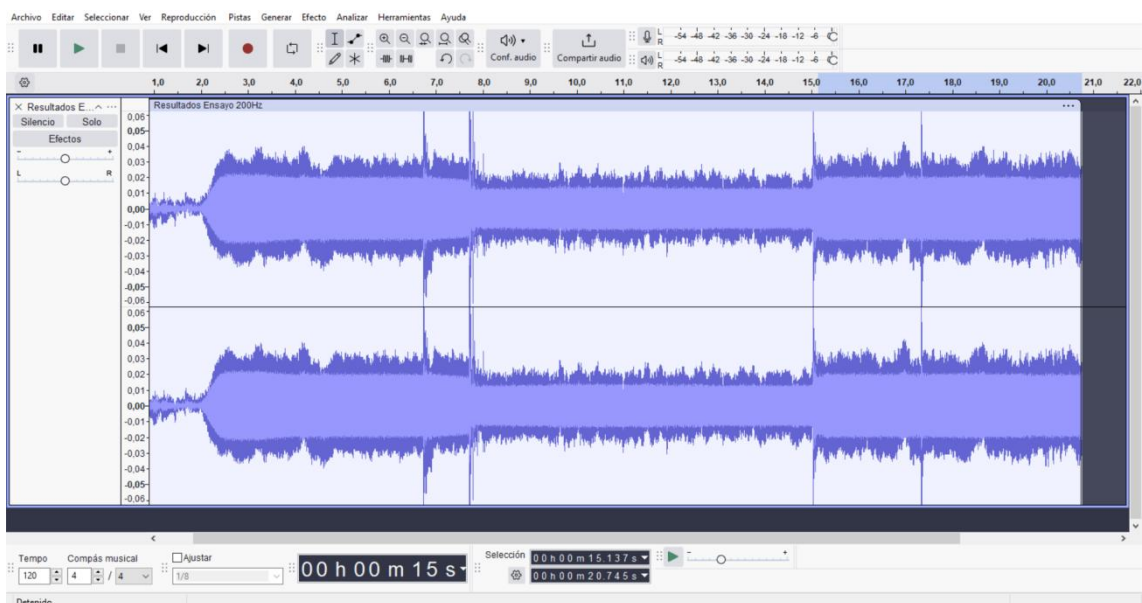


Figura 67: Onda acústica ensayo a 200 Hz. Sala CREA 18/12/2024.

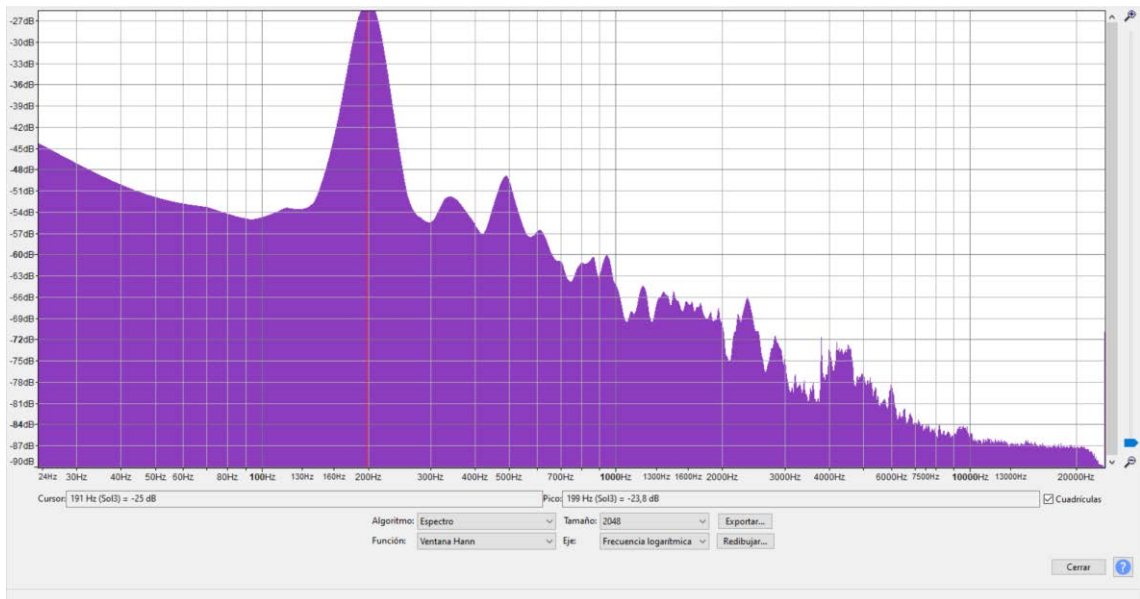


Figura 68: Análisis de espectro, tramo 1, ensayo a 200 Hz. Sala CREA 18/12/2024.

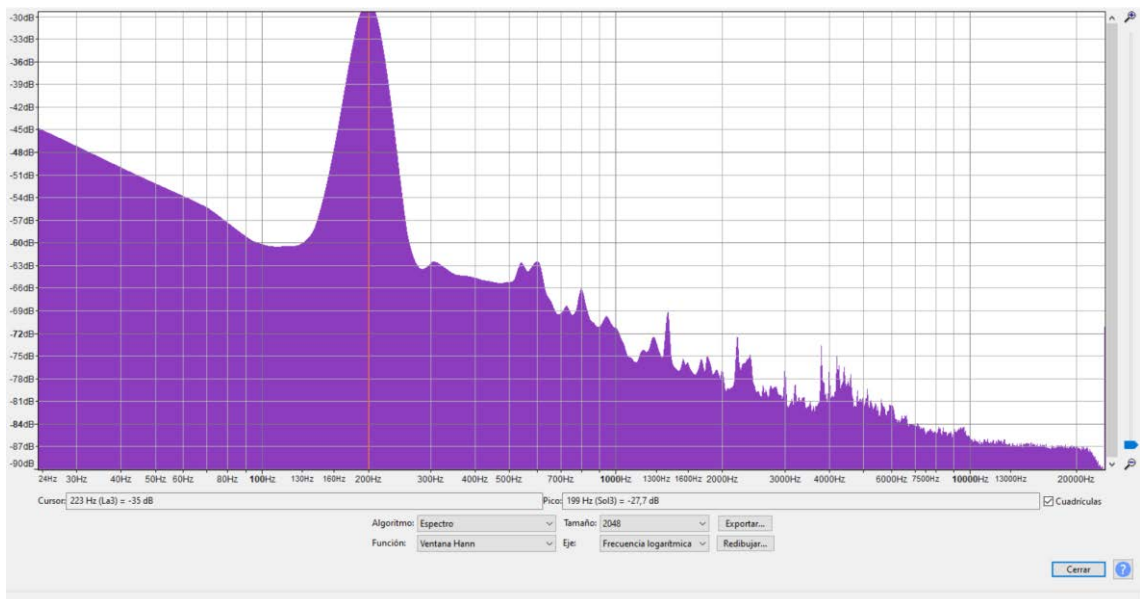


Figura 69: Análisis de espectro, tramo 2, ensayo a 200 Hz. Sala CREA 18/12/2024.

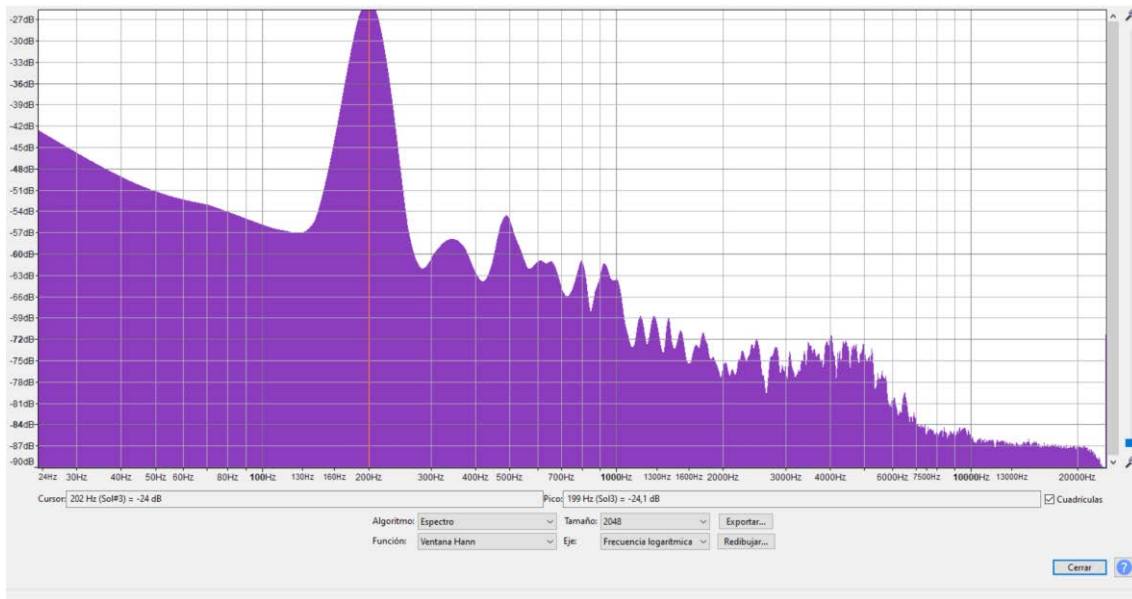


Figura 70: Análisis de espectro, tramo 3, ensayo a 200 Hz. Sala CREA 18/12/2024.

Como se puede observar, la atenuación que se aprecia es de aproximadamente 4 decibelios.

Tomando en cuenta que fue necesario emplear un valor para el coeficiente de convergencia  $\mu$  de 0.001, si se compara con los resultados obtenidos para la cámara anecoica previamente, se puede observar que aún pese a las condiciones más complejas dan como resultado una atenuación similar pero superior. De igual forma, se escogió esta frecuencia como referencia inicial para ver si las vibraciones de los altavoces tenían un impacto mucho mayor que en las condiciones favorables y poder hacer una mejor comparativa.

Posteriormente, con la finalidad de evaluar el extremo opuesto de las frecuencias bajas y entrando a valorar las frecuencias medias, se realizaron pruebas para 700 Hz.

Los resultados que se pueden observar a continuación dan una atenuación aproximada de 4.5 decibelios, que si bien se comparan nuevamente con las condiciones ideales de la cámara anecoica, se vuelve a observar que de igual forma, pese a las condiciones más complejas y haber requerido un coeficiente de convergencia mayor, el resultado de la atenuación también ha sido constante.

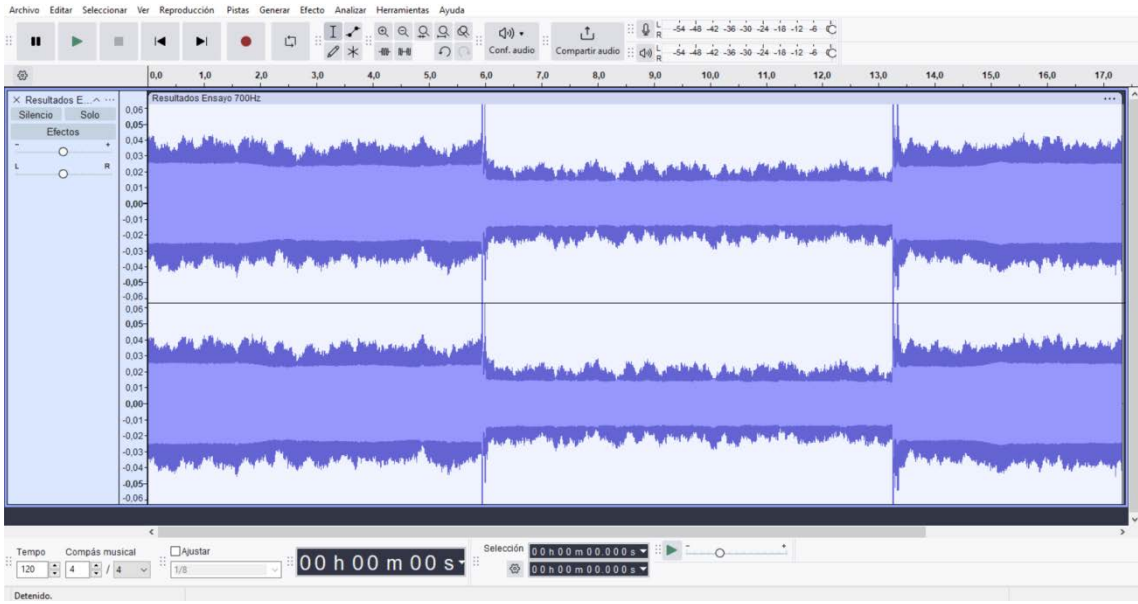


Figura 71: Onda acústica ensayo a 700 Hz. Sala CREA 18/12/2024.

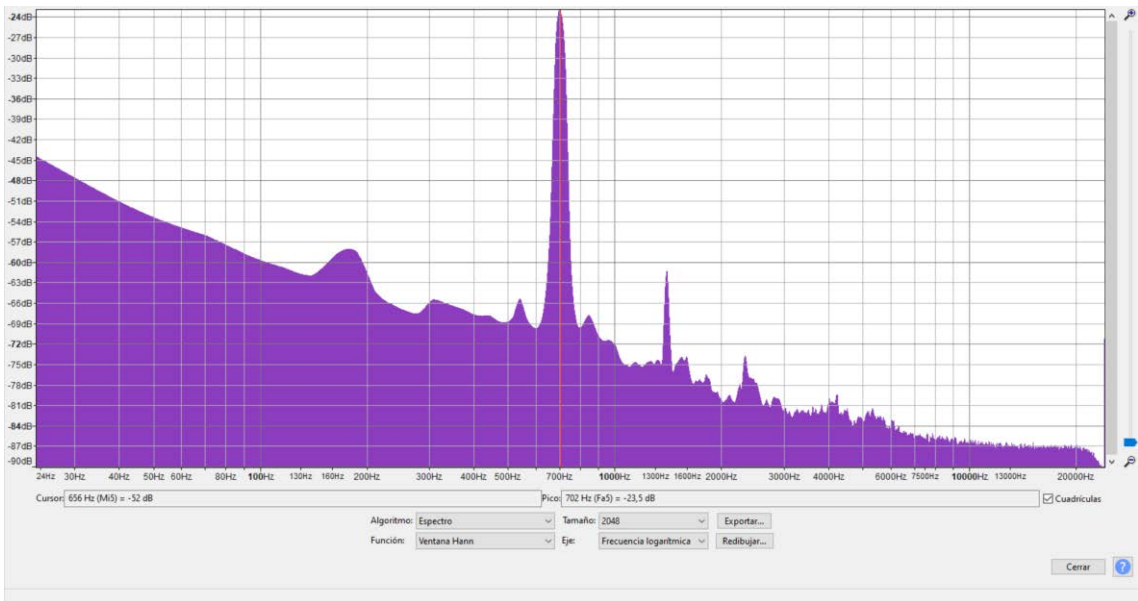


Figura 72: Análisis de espectro, tramo 1, ensayo a 700 Hz. Sala CREA 18/12/2024.

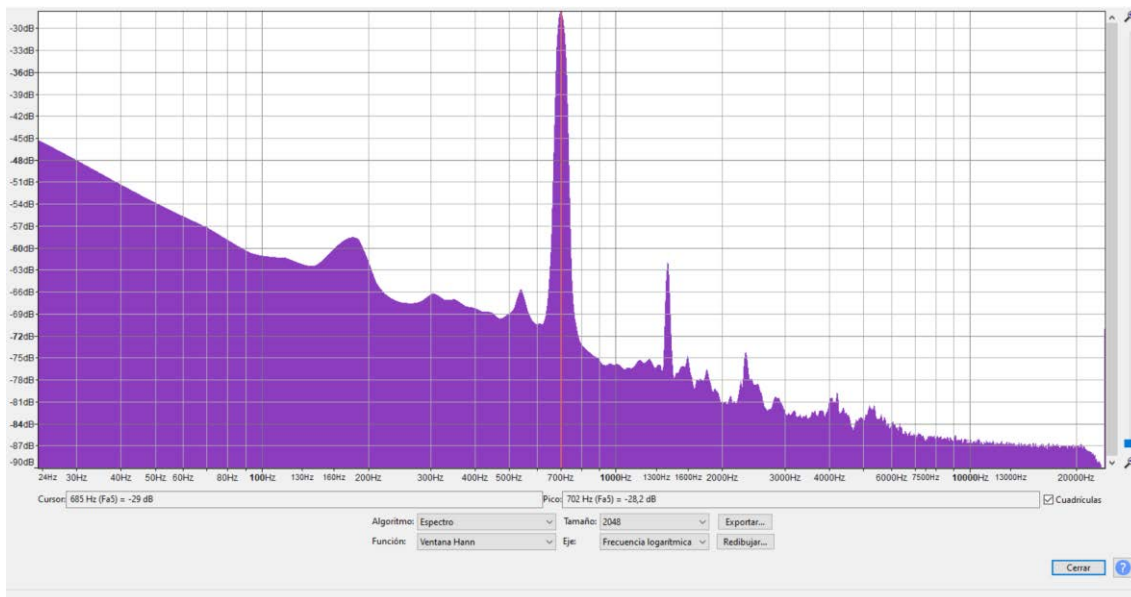


Figura 73: Análisis de espectro, tramo 2, ensayo a 700 Hz. Sala CREA 18/12/2024.

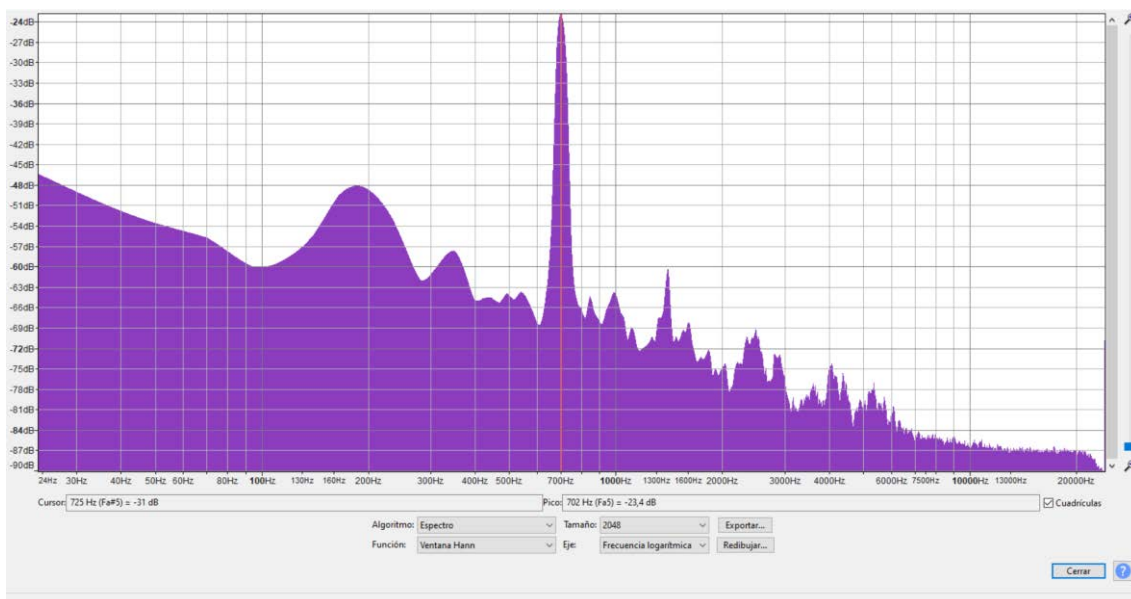


Figura 74: Análisis de espectro, tramo 3, ensayo a 700 Hz. Sala CREA 18/12/2024.

En último lugar, para probar el sistema en un entorno más cotidiano, se distribuyeron los altavoces en el salón de un domicilio, repitiendo el ensayo para una frecuencia de 200 Hz, pues se buscaba enfrentar nuevamente las condiciones más complejas para el sistema.

Sin embargo, el valor del coeficiente de convergencia  $\mu$  necesario finalmente fue de tan solo 0.00001, y los resultados obtenidos vuelven a alinearse con los anteriores casos demostrando una atenuación aproximada de 4 decibelios.

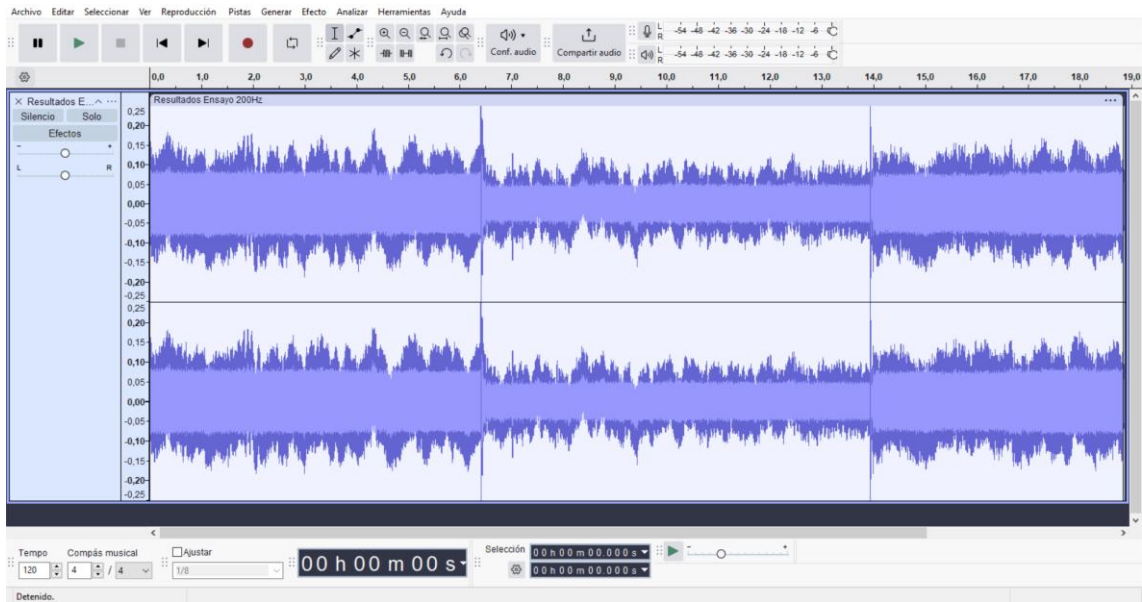


Figura 75: Onda acústica ensayo a 200 Hz. Domicilio 19/12/2024.

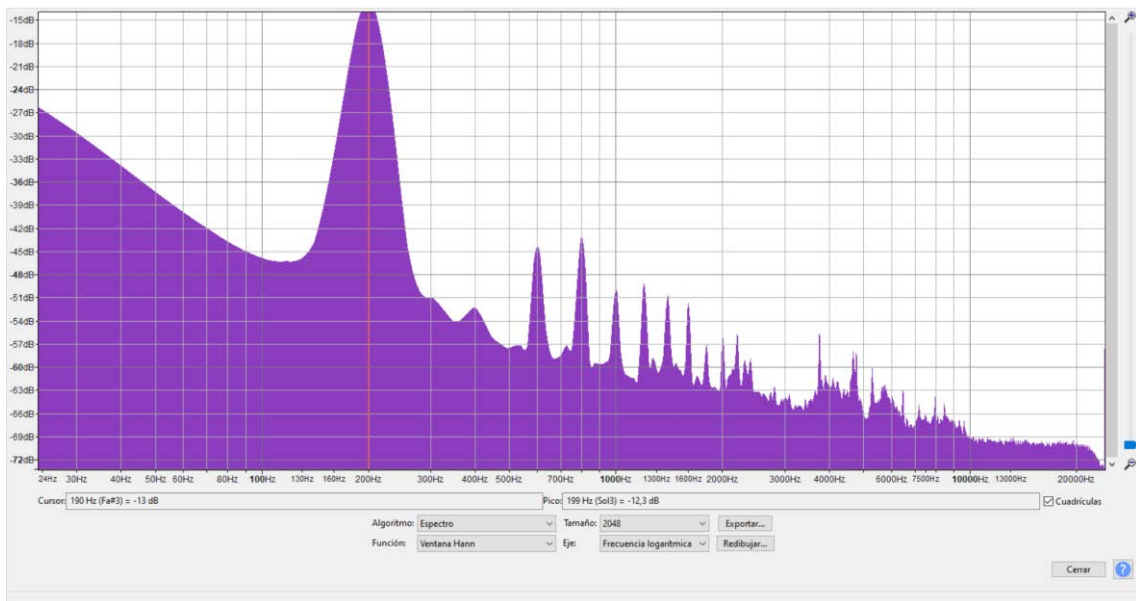


Figura 76: Análisis de espectro, tramo 1, ensayo a 200 Hz. Domicilio 19/12/2024.

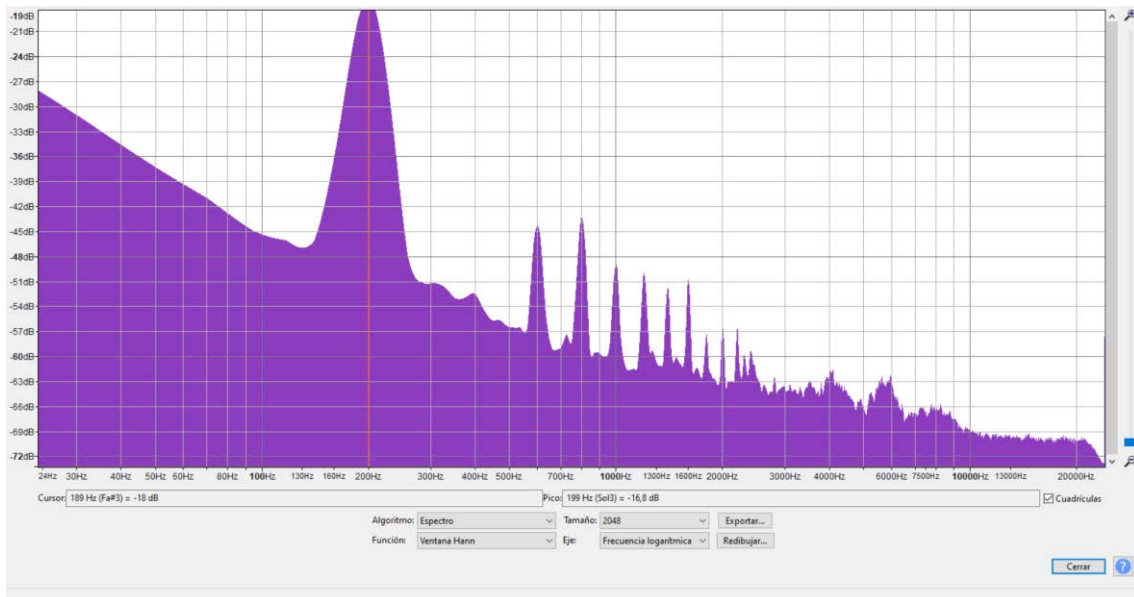


Figura 77: Análisis de espectro, tramo 2, ensayo a 200 Hz. Domicilio 19/12/2024.

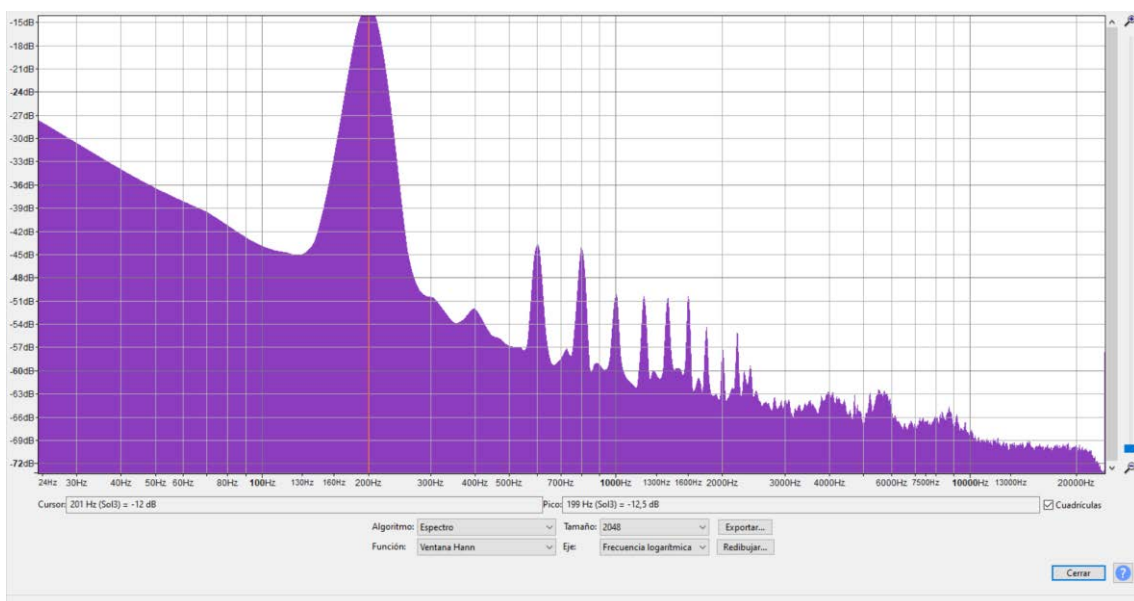


Figura 78: Análisis de espectro, tramo 3, ensayo a 200 Hz. Domicilio 19/12/2024.

Para todas estas pruebas la mayor diferencia entre los diferentes lugares de ensayo fue tener que ajustar adecuadamente el valor del coeficiente de convergencia, pues si bien para aquellos realizados en la cámara anecoica los valores de  $\mu$  tenían una gran efectividad en cada simulación de MatLab, pese a que en la señal de error es posible apreciar que la optimización no es perfecta, el resultado es superior a los obtenidos para los posteriores ensayos en otros lugares, donde el valor del coeficiente de convergencia se postula como algo mucho más crucial para garantizar una cancelación efectiva.

## **Capítulo 5.**

### **Conclusiones y líneas futuras de trabajo**

#### **5.1. Conclusiones**

Los resultados obtenidos arrojan múltiples conclusiones así como existen múltiples interpretaciones según los intereses que se busquen.

En primer lugar, enfocándolos hacia los objetivos de este trabajo, se puede concluir de forma simple que el hardware empleado es suficientemente capaz de cubrir las necesidades físicas operativas, pudiendo filtrar la señal de audio en alta resolución con una latencia mínima.

Además, ofrece un margen que permite aumentar su rendimiento si fuese necesario para suplir mayores demandas. Si bien es cierto que existen ciertas limitaciones como pueda ser el número máximo de coeficientes aplicables para el filtrado FIR, al ser una plataforma ampliamente documentada y de código abierto, se goza de la libertad para realizar las modificaciones que se consideren necesarias en las librerías existentes para conseguir mejores resultados y exprimir más el potencial del hardware.

Por las características de los componentes se hace sencillo construir sistemas ampliamente modulares, otorgando una gran reparabilidad y personalización para cualquier proyecto desarrollado sobre una base similar.

Por otro lado, se hace fehaciente la vital relación entre los principales subsistemas que componen un sistema completo de control activo del ruido. Si bien los resultados obtenidos demuestran que es posible lograr una atenuación constante y replicable, es necesario ser meticulosos a la hora de configurar el sistema, tomando en cuenta la calidad de los transductores empleados.

Si se representan todos los valores de atenuación obtenidos en los diferentes ensayos para las múltiples frecuencias se pueden observar de manera mucho más fehaciente las características a las que han estado expuestos los ensayos.

Durante el ensayo de 200 Hz realizado en la cámara anecoica, por cuestiones internas del laboratorio se interrumpió el ensayo al comienzo de las medidas y se desplazó el ascensor sobre el cual estaba situado el altavoz primario.

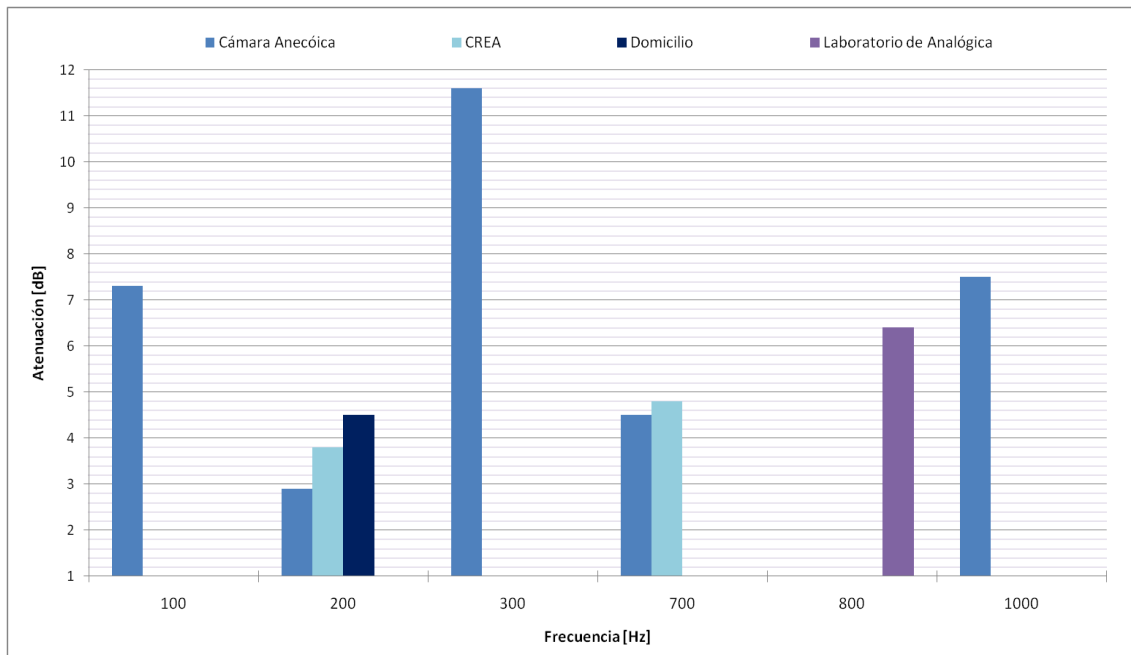


Figura 79: Gráfico comparativo de la atenuación promedio obtenida en los diferentes ensayos.

Ensayos				
Frecuencia (Hz)	Atenuación (dB)			
	Cámara Anecoica	CREA	Domicilio	Laboratorio de Analógica
100	7,3	--	--	--
200	2,9	3,8	4,5	--
300	11,6	--	--	--
700	4,5	4,8	--	--
800	--	--	--	6,4
1000	7,5	--	--	--

Tabla 2: Tabla de valores con los resultados de atenuación promedio para todos los ensayos realizados.

Si se toma como ejemplo los ensayos a 200 Hz realizados, analizando los valores de la señal de error, se obtiene que el promedio de la cámara anecoica será de -0.000026, el valor de la sala de CREA será de 0.000083 y por último, para el domicilio se obtendría un valor de -0.000128.

Si se ordena cada una de las configuraciones en base a sus errores se obtiene que la implementación que presenta el menor error es la realizada en la cámara anecoica, seguida por la realizada en la sala de CREA y en último lugar estaría el domicilio.

Sin analizar con demasiado detalle estos valores en base a su contexto es sencillo asumir que es lógico que para las condiciones más complejas el error sea mayor, sin embargo si se toma en consideración la atenuación obtenida rápidamente es posible observar que para lograr el mismo rendimiento hay una relación directa entre el aumento de la complejidad del medio y la optimización necesaria del sistema.

En primer lugar, al haberse visto alteradas las condiciones para el ensayo en la cámara anecoica, el resultado no es tan favorable como en los ensayos posteriores, pero sí que posee

el menor error de todos ellos, mientras que para unas características muy buenas pero en un entorno más desfavorable como es el domicilio, la atenuación es superior para un error similar.

Esto se ve mejor reflejado en el valor de la desviación típica, pues si bien el ensayo en la cámara anecoica presentaba el menor error, su desviación es la más alta con un valor de 0.0271, seguido por el ensayo en el domicilio con una desviación de 0.0206, mientras que para la sala de CREA se obtiene una desviación considerablemente menor de tan solo 0.0045.

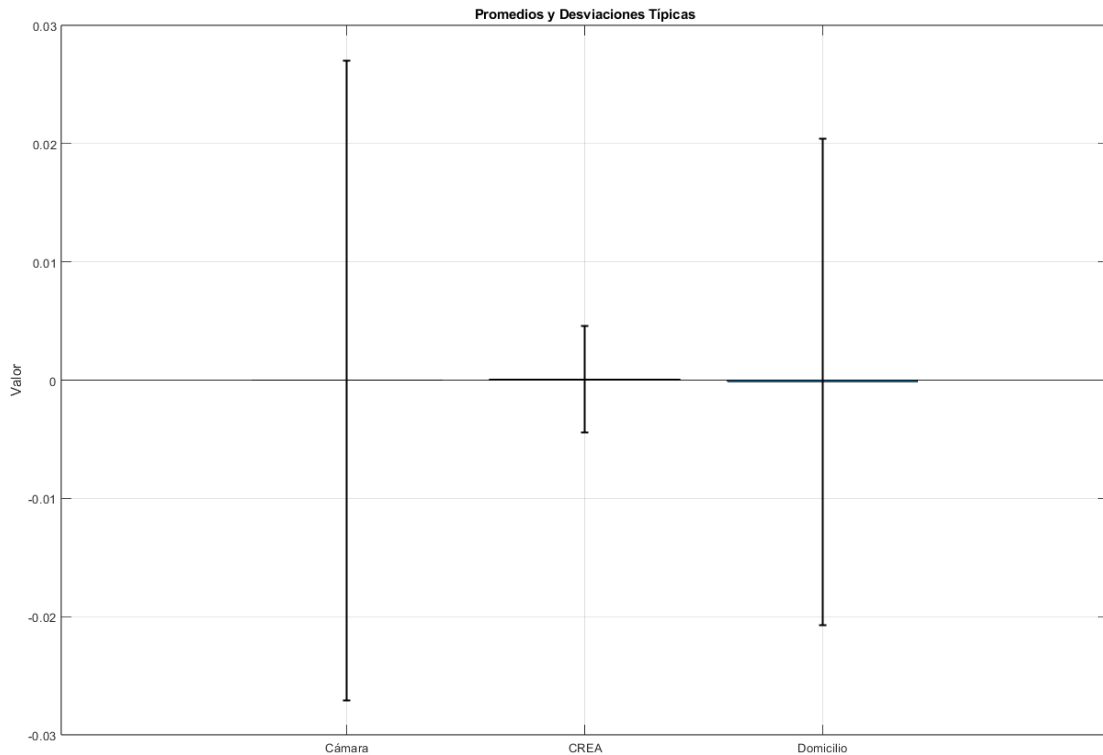


Figura 80: Gráfico comparativo del promedio y la desviación típica para cada ensayo para obtener el mismo rendimiento.

Si se plasman estos valores en un gráfico es mucho más evidente; para conseguir los mismos resultados que es posible encontrar en las condiciones ideales que estaban presentes en la cámara anecoica, es necesario optimizar el modelo de la forma más precisa posible, así pues, para las condiciones del domicilio en donde si bien la sala no presentaba una gran acústica, las condiciones de silencio y la invariabilidad del medio permiten que no sea necesaria una gran optimización, sumado a que las fuentes estaban a una distancia menor, por lo que la vibración no servía de atenuante previo de la fuente primaria, se puede observar que el rango que admite a error es inferior a la cámara, pero aún así ciertamente amplio, mientras que para la sala de CREA en donde las condiciones eran mucho más complejas, la tolerancia al error se reduce al mínimo.

Así pues, esto lleva a concluir que la tolerancia al error aumenta tanto en cuanto los factores involucrados en el sistema de control de ruido activo están correctamente compenetrados y optimizados para la labor que han de desempeñar.

Nuevamente es necesario referirse a la figura 5 en donde se mostraba como solo la contribución conjunta de todos los elementos en simbiosis es capaz de producir un aumento significativo en la reducción de ruido global.

Y la mejor demostración de este factor, junto al ensayo a 200 Hz, se puede observar en la siguiente figura.

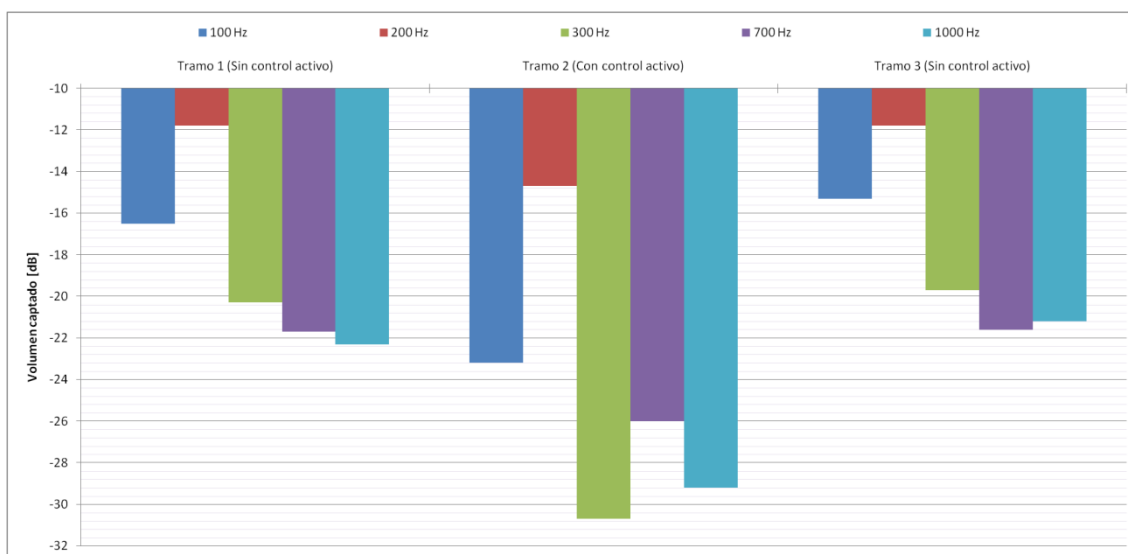


Figura 81: Gráfico del nivel de ruido captado durante los tramos en los ensayos realizados en la cámara anecoica.

Ensayos Cámara Anecoica				
Frecuencia (Hz)	Medición (dB)			Promedios (dB)
	Tramo 1 (Sin control activo)	Tramo 2 (Con control activo)	Tramo 3 (Sin control activo)	
100 Hz	-16,5	-23,2	-15,3	7,3
200 Hz	-11,8	-14,7	-11,8	2,9
300 Hz	-20,3	-30,7	-19,7	10,7
700 Hz	-21,7	-26	-21,6	4,35
1000 Hz	-22,3	-29,2	-21,2	7,45
<b>Promedio acotado (dB)</b>				<b>6,37</b>

Tabla 3: Tabla de los valores de volumen captados para los ensayos realizados en la cámara anecoica.

Con una media acotada de atenuación de 6.37 dB, los valores obtenidos en el ensayo a 200 Hz distan de haber sido los más óptimos que podía ofrecer el conjunto del sistema empleado.

Esto junto al hecho de que fuese necesario el sustituir los altavoces para los ensayos por las limitaciones físicas para obtener los resultados deseados, supone que se determine que el sistema presentará un límite de rendimiento que contribuirá al conjunto del sistema.

En base a los resultados obtenidos, es posible concluir que el subsistema electrónico que se ha constituido en este proyecto tiene gran capacidad de contribución a la reducción global del ruido pese a que los elementos que complementan el sistema no presenten una capacidad equiparable.

Tomando en consideración los costes globales que conllevan la elaboración de un subsistema como el empleado para este proyecto, los cuales se encuentran sujetos a la variabilidad de los precios de los componentes y de la complejidad constructiva que se desee, estos oscilarían entre 50€ y 100€, junto con la funcionalidad evaluada y las características en materia de reparabilidad y sostenibilidad del dispositivo, es posible concluir que se han cubierto los objetivos básicos que se buscaban para este proyecto y se permite asentar unas bases sólidas para poder desarrollar en trabajos a futuro que se encuentran más allá de las competencias técnicas y temporales planificadas para este trabajo.

## **5.2. Líneas futuras de trabajo**

Si bien es posible concluir que este proyecto se puede presentar como una base sólida de desarrollo, es necesario concretar aquellos puntos particulares que harían posible construir un dispositivo con capacidad dinámica completa para el control activo.

Al presentarse como una plataforma de código abierto ampliamente documentado, junto con la gran actividad de los foros oficiales de la marca, la flexibilidad hace posible la implementación las operaciones de cálculo realizadas en MatLab directamente desde el propio dispositivo en tiempo real, con las modificaciones de las librerías existentes mencionadas con anterioridad, así como el posible desarrollo de otras tantas nuevas que den lugar a los coeficientes pre-calculados para los ensayos de este proyecto.

También sería importante analizar las limitaciones de rendimiento del subsistema empleando una correcta refrigeración y aplicando las frecuencias máximas admitidas, esto permitiría tener una visión más clara de la capacidad de respuesta a los cambios de un sistema mucho más complejo que sea capaz de controlar una muestra de sonido dinámica, contemplando frecuencias por encima de los valores medios.

Por otro lado, al tratarse de una plataforma retro-compatible, según se vayan lanzando nuevas revisiones al mercado será posible seguir aplicando estos mismo conceptos base con unas limitaciones mucho menores, y si se ha tomado en consideración la modularidad del sistema la mejora de este puede consistir en un proceso tan sencillo como la actualización del núcleo Teensy® por la versión más reciente con el código previamente desarrollado, manteniendo los costes bajos y permitiendo utilizar por más tiempo el sistema al completo, que sumado a la posibilidad de reutilizar en núcleo que se retira para otros proyectos, hace que se pueda hablar de sistemas sostenibles en línea con las medidas que ya aplican modelos de negocio como el de la empresa de tecnología Framework.

Al mismo tiempo, el sistema empleado representa una vez más un ejemplo de lo importante que es tomar en consideración el conjunto de los componentes a la hora de desarrollar cualquier proyecto a futuro, pues si bien puede ser una buena base sobre la que asentarse, es necesario asegurarse que los demás eslabones contribuirán adecuadamente en el sistema para lograr el objetivo de reducción deseado, por lo que aún si no se van a realizar grandes cambios en el propio subsistema electrónico, sí que sería de vital importancia considerar los elementos del subsistema físico con los cuales será emparejado a la hora de su configuración.

Esto parte por ejemplo de la base de contemplar el uso de los amplificadores en las líneas de entrada y salida, así como un mejor aislamiento de las conexiones y extensiones realizadas para prevenir las perturbaciones de la red eléctrica que se solapan sobre las señales procesadas por el subsistema.

Asimismo, en la línea de mejora de los componentes, sería bueno considerar un rediseño de la implementación del puerto USB tipo C, para que este resulte mucho más sólido y sencillo de reparar frente a la idea expuesta en este proyecto, pues si bien era una conexión mucho más versátil, también se convirtió en el principal punto débil, rompiéndose hasta 4 puertos diferentes.

Por último, al tener la posibilidad de construir el dispositivo en base a las necesidades dimensionales de cada caso en particular, sería importante estudiar las opciones que ofrece de forma nativa la plataforma para mejorar la experiencia de usuario, empleando diferentes mandos como los codificadores rotativos para modificar distintos parámetros como el valor del coeficiente de convergencia  $\mu$  sin necesidad de modificar el código al completo, así como incorporar una pantalla que lo facilite.

Gracias a esto sería posible elaborar kits de desarrollo similares a los ya existentes para la plataforma de Arduino que lograrían verdaderamente acercar esta clase de productos a un gran público general, permitiendo el uso de aplicaciones diversas, desde actividades formativas hasta la reducción de ruido en entornos laborales donde un sistema industrial no tendría sentido por su elevado coste de implementación frente al rendimiento que se requiere.

## Bibliografía

- [1] C. H. Hansen, *Understanding Active Noise Cancellation*. Taylor & Francis e-Library, 2003.
- [2] H. Coanda, "Procédé et dispositif de protection contre les bruits (Brevets) - Data INPI," 1932 [Online]. Available: <https://data.inpi.fr/brevets/FR762121?q=FR762121#FR762121>
- [3] A. Carrión, *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. 1998. [Online]. Available: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.3/36341>
- [4] E. K. Lawrence, R. F. Austin, B. C. Alan, and V. S. James, *Fundamentos de Acústica*, 4th Edition. Limusa, 1995.
- [5] C. Martínez Arévalo, "Diapositivas de clase | Capítulo 2 - Ecuaciones Básicas." *Mecánica de Fluidos*, Grado en Ingeniería Mecánica, Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial, pp. 5–22, 2019.
- [6] C. Martínez Arévalo, "Diapositivas de clase | Capítulo 1 - Def. y prop. fluidos - Cinemática de la partícula." *Mecánica de Fluidos*, Grado en Ingeniería Mecánica, Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial, pp. 23–26, 2019.
- [7] "Teensy Technical Specifications." Accessed: Jul. 10, 2024. [Online]. Available: <https://www.pjrc.com/teensy/techspecs.html>
- [8] "Teensy® 4.0 Development Board." Accessed: Jan. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.pjrc.com/store/teensy40.html>
- [9] "Teensy® 4.0 Front Side," p. 1, 2024, [Online]. Available: [https://www.pjrc.com/teensy/card10a\\_rev2\\_web.pdf](https://www.pjrc.com/teensy/card10a_rev2_web.pdf)
- [10] "Teensy® 4.0 Back Side," p. 1, 2024, [Online]. Available: [https://www.pjrc.com/teensy/card10b\\_rev2\\_web.pdf](https://www.pjrc.com/teensy/card10b_rev2_web.pdf)
- [11] "Audio Adaptor Boards for Teensy 3.x and Teensy 4.x." Accessed: Jul. 11, 2024. [Online]. Available: [https://www.pjrc.com/store/teensy3\\_audio.html](https://www.pjrc.com/store/teensy3_audio.html)
- [12] "Teensy 4.1 and 4-channel audio (AudioInputI2SQaud)." Accessed: Aug. 17, 2024. [Online]. Available: <https://forum.pjrc.com/index.php?threads/teensy-4-1-and-4-channel-audio-audioinputi2squad.61123/post-241517>
- [13] "Pinout Guide." Accessed: Jul. 12, 2024. [Online]. Available: <https://pinoutguide.com>
- [14] "Qualcomm® Snapdragon 855+/860 Mobile Platform." Accessed: Jan. 08, 2025. [Online]. Available: <https://www.qualcomm.com/products/mobile/snapdragon/smartphones/snapdragon-8-series-mobile-platforms/snapdragon-855-plus-and-860-mobile-platform#Overview>
- [15] "Qualcomm® WCD9385." Accessed: Jan. 08, 2025. [Online]. Available: <https://www.qualcomm.com/products/internet-of-things/consumer/audio/mobile-audio/wcd9385>
- [16] T. Bravo María, "Active Noise Control - First Exercise." *Laboratorio de Ingeniería Acústica, Máster en Ingeniería Acústica*, Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación, p. 14, 2024.

## Anexo

En las siguientes páginas se pueden encontrar adjuntos código, planos y esquemas detallados.

### 1. Código MatLab empleado para pre-calcular los coeficientes

```
clc
[x fs]=audioread('x.wav');% Señal de referencia correspondiente a x.wav
%[x1 fs]=audioread('x1.wav');% Señal de referencia correspondiente a x1.wav
[d fs]=audioread('Primario.wav');% Fuente de ruido primaria
[d1 fs]=audioread('Secundario.wav'); % Fuente de emisión de la señal de
control

H=128;% Coeficientes empleados por el filtro para los algoritmos
w_ini=zeros(1,H);% Inicializamos los coeficientes del filtro a 0
w_ini(1)=1;
mu=0.02;% Coeficiente de convergencia
[e1,y1,ws] = LMS_algorithm(d1,x,w_ini,mu);%Llamamos a la función LMS
algorithm

w_ini=zeros(1,H);% Inicializamos nuevamente los coeficientes del filtro a 0
mu=0.001;% Coeficiente de convergencia
[e,y,w] = FX_LMS_algorithm(d,x,w_ini,mu,ws);% Llamamos a la función
FX_LMS_algorithm

writematrix(w, 'coeff.txt');

fprintf('Hecho \n')
```

### 2. Código MatLab – LMS\_algorithm

```
function [e,y,w] = LMS_algorithm(d,x,w_ini,mu)
%Esta función implementa la respuesta temporal de un filtro FIR para la
reducción activa
%de una perturbación acústica que se actualiza con el algoritmo Least-Mean-
Square(LMS)
%Datos de entrada
%d: Señal del sonido original que hay que anular con el ruido secundario en
función del tiempo
%x: Señal de referencia que se introduce en el controlador en función del
tiempo
%w_ini: Valores iniciales de los coeficientes FIR que se actualizarán
posteriormente con el algoritmo LMS.
%mu: Coeficiente de convergencia del algoritmo LMS.
%Datos de salida
%e: Señal residual adquirida en el micrófono de error tras la cancelación en
función del tiempo
%y: %Señal de control generada por el filtro para la cancelación activa con
la señal d
%w: Valores de los pesos de control óptimos para el filtro FIR en función de
las interacciones.
%Constantes e inicialización de las variables
```

```

w=w_ini; % Igualar los valores del filtro en la primera iteración a los de
los datos de entrada.
N=length(x);%Longitud de la señal de referencia
H=length(w);%Longitud del filtro de control FIR (H=M+1)
e=zeros(1,N);%Define un vector fila de ceros para almacenar la señal de error
y=zeros(1,N);%Define un vector fila de ceros para almacenar la señal de
control

%Calcular los coeficientes del filtro en función de las iteraciones
ih=0:-1:-H+1;% Definir un índice para acceder a los datos H para la
convolución con la señal de referencia
for k=H:N          %Bucle en las interacciones para el cálculo de los
coeficientes H
    xk=x(k+ih);    %Selección de los datos precedentes H de la señal de
entrada x
    y(k)=xk*w';    %Convolución de la señal de entrada con los coeficientes
del filtro
    e(k)=d(k)-y(k); %Interferencia entre la señal original y la de control
    w=w+mu*e(k)*xk; %Aplicación del algoritmo LMS para la actualización de
los coeficientes del filtro
end

```

### 3. Código MatLab – FX\_LMS\_algorithm

```

function [e,y,w] = FX_LMS_algorithm(d,x,w_ini,mu,ws)
%Esta función implementa la respuesta temporal de un filtro activo de
cancelación de ruido
%utilizando la señal de referencia filtrada por la vía de transferencia
secundaria que se ha estimado anteriormente
%Datos de entrada
%d: Señal del sonido original que hay que cancelar con el ruido secundario en
función del tiempo
%x: Señal de referencia que se introduce en el controlador en función del
tiempo
%w_ini: Valores iniciales de los coeficientes FIR que se actualizarán
posteriormente con el algoritmo LMS.
%mu: Coeficiente de convergencia del algoritmo LMS
%ws: Función electroacústica entre la fuente secundaria y el micrófono de
error estimada off-line
%Datos de salida
%e: Señal residual adquirida en el micrófono de error tras la cancelación en
función del tiempo
%y: %Señal de control generada por el filtro para la cancelación activa con
la señal d
%w: Valores de los pesos de control óptimos para el filtro FIR en función de
las interacciones.

%Constantes e inicialización de variables
w=w_ini; %Iguala los valores del filtro en la primera iteración a los de los
datos de entrada
N=length(x);%Longitud de la señal de referencia
H=length(w);%Longitud de la señal de control del filtro FIR (H=M+1)
S=length(ws);%Longitud del filtro para la identificación de la ruta
secundaria

```

```

e=zeros(1,N);%Definir un vector fila de ceros para almacenar la señal de
error
y=zeros(1,N);%Definir un vector fila de ceros para almacenar la señal de
control
yf=zeros(1,N);%Definir un vector fila de ceros para almacenar la señal de
control filtrado por la función de transferencia de la ruta secundaria
xf=zeros(1,N);%Definir un vector fila de ceros para almacenar la señal de
control filtrado por la función de transferencia de la ruta secundaria

%Calcular los coeficientes del filtro en function de las iteraciones
ih=0:-1:-H+1;%Definir un índice para acceder a los datos H para la
convolución con la señal de referencia para el filtro adaptativo.
is=0:-1:-S+1;%Define un índice para acceder a los datos S de la ruta de
transferencia secundaria estimada

for k=max(H,S):N           %Bucle en las interacciones para el cálculo de
los coeficientes del filtro
    xk=x(k+ih);          %Selección de los H datos precedentes de la señal de
entrada x
    y(k)=xk*w';          %Convolución de la señal de entrada con los coeficientes
del filtro

    %Filtrado de la señal de control con la vía de transferencia secundaria
yy=y(k+is); %Selección de los S datos precedentes de la señal de salida y
yf(k)=yy*ws'; % Filtrado de estos datos de salida con la función de
transferencia secundaria proporcionada como entrada

    e(k)=d(k)-yf(k); %Interferencia entre las señales original y de control:
error o señal residual
    % Filtrado de la señal de referencia con la ruta de transferencia
secundaria
    xx=x(k+is); %Selección de los S datos precedentes de la señal de
referencia s
    xf(k)=xk*ws';%Convolución de la señal de referencia con la ruta de
transferencia secundaria

    xxf=xf(k+ih); %Selección de los H datos precedentes de la señal de
entrada filtrada xf
    w=w+mu*e(k)*xxf;%Aplicación del algoritmo FX-LMS para la actualización de
los coeficientes del filtro
end

```

#### 4. Código Arduino

```

#include <Audio.h>

#include <Wire.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <SerialFlash.h>
#include <Encoder.h>
#include <libmathq15.h>

// GUItool: begin automatically generated code
AudioInputUSB          usb1;          //xy=332,263

```

```

AudioInputI2SQuad      i2s_quad1;      //xy=341,327
AudioSynthWaveform    waveform1;      //xy=344,402
AudioMixer4           mixer1;      //xy=554,292
AudioMixer4           mixer2;      //xy=554,355
AudioFilterFIR        fir1;        //xy=726,309
AudioFilterFIR        fir2;        //xy=726,342
AudioOutputI2S        i2s1;        //xy=866,325
AudioConnection       patchCord1(usb1, 0, mixer1, 0);
AudioConnection       patchCord2(usb1, 1, mixer2, 0);
AudioConnection       patchCord3(i2s_quad1, 2, mixer1, 1);
AudioConnection       patchCord4(i2s_quad1, 3, mixer2, 1);
AudioConnection       patchCord5(waveform1, 0, mixer1, 2);
AudioConnection       patchCord6(waveform1, 0, mixer2, 2);
AudioConnection       patchCord7(mixer1, fir1);
AudioConnection       patchCord8(mixer2, fir2);
AudioConnection       patchCord9(fir1, 0, i2s1, 0);
AudioConnection       patchCord10(fir2, 0, i2s1, 1);
AudioControlSGTL5000  sgtl5000_1;    //xy=563,244
AudioControlSGTL5000  sgtl5000_2;    //xy=564,403
// GUItool: end automatically generated code

Encoder encoder(4, 5);          // Inicio el encoder con sus pines correspondientes

float vol = 0.7;                // Defino el nivel de volumen para ambos Audio Shield
float j = 0.0;                  // Defino la variable para activar el seno
const int size = 128;

double w[] = {-0.00469736414125448, -0.00845567080346478, -0.00955738130013776, -
0.00764783948027278, -
0.00333867849478365, 0.00201000975925008, 0.00671184541319939, 0.00927549737037603, 0.00889326066643
777, 0.00569007562874221, 0.000675200712390193, -0.00456330567284496, -0.00837290847056867, -
0.00955171852206775, -0.00772403064203489, -
0.003469108738953, 0.00186756234553347, 0.00659643944039242, 0.00922728598134767, 0.0089258837589821
8, 0.00578829934081868, 0.000814135608056087, -0.00443345366112391, -0.00829246360585894, -
0.009545411518768, -0.00779441249139678, -
0.00359378471745823, 0.00172587528905582, 0.00648301627568806, 0.00918088280495098, 0.00895976561479
393, 0.00589544839566299, 0.000953597544821564, -0.00429909108280126, -0.00820861555772293, -
0.00953489276914879, -0.00786309046939154, -
0.00371886912821663, 0.00158801227752266, 0.00637713690282617, 0.00913810221279491, 0.00899413274076
447, 0.00599556610317599, 0.00109200468885495, -0.00416901297801348, -0.00812503506634997, -
0.00952770387883349, -0.0079299114417642, -
0.0038445946585028, 0.0014468504442768, 0.0062626906663711, 0.00909142211536289, 0.00902915105709584
, 0.00610360036847026, 0.0012400675224402, -0.00402883592027468, -0.00803254281207319, -
0.00950998620095959, -0.00799646195437838, -
0.00397199395193817, 0.00129488324778871, 0.00613969728341646, 0.00902700562901857, 0.00904894347753
947, 0.00619750594735751, 0.00137735788905689, -0.00389397077168632, -0.00794852117551086, -
0.00950255085973001, -0.00806801716623452, -
0.00409914631297043, 0.00114910713621456, 0.0060179135283747, 0.00896916284602241, 0.009073293108076
08, 0.00629391002644375, 0.00150949699951598, -0.00376574319418764, -0.00786410110964959, -
0.00948794958899934, -0.00813302148878795, -
0.00422194634571721, 0.00100444783967135, 0.00589507655574524, 0.00890771133295813, 0.00908470400142
576, 0.0063747277173799, 0.00163342079400946, -0.00363743261010945, -0.00777695925550455, -
0.0094727895046942, -0.0081923087090046, -
0.00434186456998076, 0.000865906586963498, 0.00578025222563565, 0.00885574788752292, 0.0091147507118
2304, 0.00647627715991875, 0.00177600975409286, -0.00350111913259297, -0.00768694054444114, -
0.00945711780527312, -0.00825640387305933, -
0.00446110838738236, 0.000726703371409721, 0.00566774696558606, 0.00880142208240949, 0.0091366832719
4334, 0.00657290642544738, 0.00191713677029691, -0.00335959000819229, -0.00758532434694106, -
0.00943379007650661, -0.00831097944857597, -
0.0045801787759045, 0.000583323782798151, 0.00554672032538055, 0.00874030810604871, 0.00916040089782

```

```

836,0.00666764378076455,0.00205533399992578,-0.00322160149180785,-0.0074951699693251,-
0.00940751818948448,-0.00837117022087177,-
0.00469503059365825,0.000440104725267185,0.00542101502818898};

q15_t coeffs[size];

void setup() {

    Serial.begin(115200);
    AudioMemory(12);

    // Inicializo el Audio Shield 1
    sgtl5000_1.setAddress(LOW);
    sgtl5000_1.enable();
    sgtl5000_1.inputSelect(AUDIO_INPUT_LINEIN);
    sgtl5000_1.volume(vol);

    // Inicializo el Audio Shield 2
    sgtl5000_2.setAddress(HIGH);
    sgtl5000_2.enable();
    sgtl5000_2.inputSelect(AUDIO_INPUT_LINEIN);
    sgtl5000_2.volume(vol);

    // Se configuran los mixer para que pueda contar con las 3 entradas de audio
    mixer1.gain(0, 1.0); // Canal izquierdo de la entrada USB
    mixer1.gain(1, 1.0); // Canal izquierdo de la entrada de línea
    mixer1.gain(2, 1.0); // Canal izquierdo de un seno generado

    mixer2.gain(0, 1.0); // Canal derecho de la entrada USB
    mixer2.gain(1, 1.0); // Canal derecho de la entrada de línea
    mixer2.gain(2, 1.0); // Canal derecho de un seno generado

    // Transformo los coeficientes
    transformCoeffs(coeffs, w, size);

    // Inicio los filtros FIR
    fir1.begin(coeffs, size);
    fir2.begin(coeffs, size);

    /* fir1.begin(FIR_PASSTHRU, 0);
    fir2.begin(FIR_PASSTHRU, 0); */

}

void loop() {

    // Encoder
    encoderFN();

    // En caso de no emplear el generador de ondas, comentar esta sección
    //waveform1.begin(j, 4000, WAVEFORM_SINE);

}

/* FUNCIONES AUXILIARES */

// Función Encoder
void encoderFN() {

```

```

int i = 0;
i = i + encoder.read(); // Cada giro del encoder detecta los pasos, de enclavamiento a
enclavamiento son cuatro pasos o bien positivos o bien negativos según el sentido, así que
sumará o restará 1 cada vez.

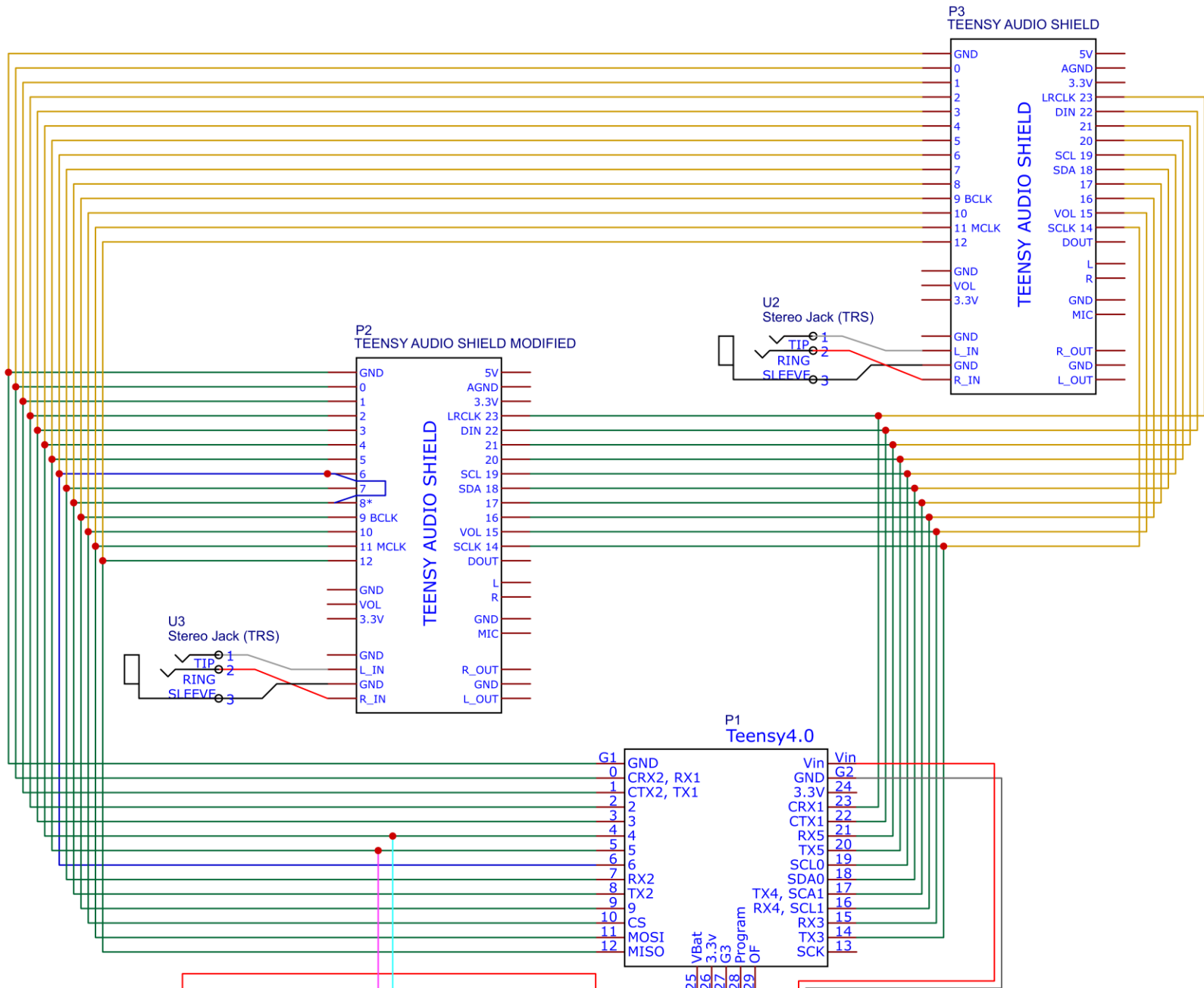
if (i <= -4){
    if (vol <= 1.0) {
        vol += 0.05;
    }
    encoder.write(0); // En caso de ser menor a 4 se habrá realizado un giro en el sentido
de aumento, por tanto se realiza la suma a la variable j y se reinicia el encoder a 0. En el
caso contrario se hará lo opuesto y también se reinicia a 0.
}else if (i >= 4){
    if (vol > 0) {
        vol -= 0.05;
    }
    encoder.write(0);
}

sgtl5000_1.volume(vol);
sgtl5000_2.volume(vol);
}

/* Función Transformación de coeficientes para el filtro FIR
void transformCoeffs(q15_t out[], double in[], int k)
{
    for (int i = 0 ; i < k ; i++)
        out[i] = static_cast<q15_t>(in[i] * 32767.0);
} */

// Función Transformación de coeficientes para el filtro FIR
void transformCoeffs(q15_t out[], double in[], int k)
{
    for (int i = 0 ; i < k ; i++)
        out[i] = q15_from_float(in[i]);
}

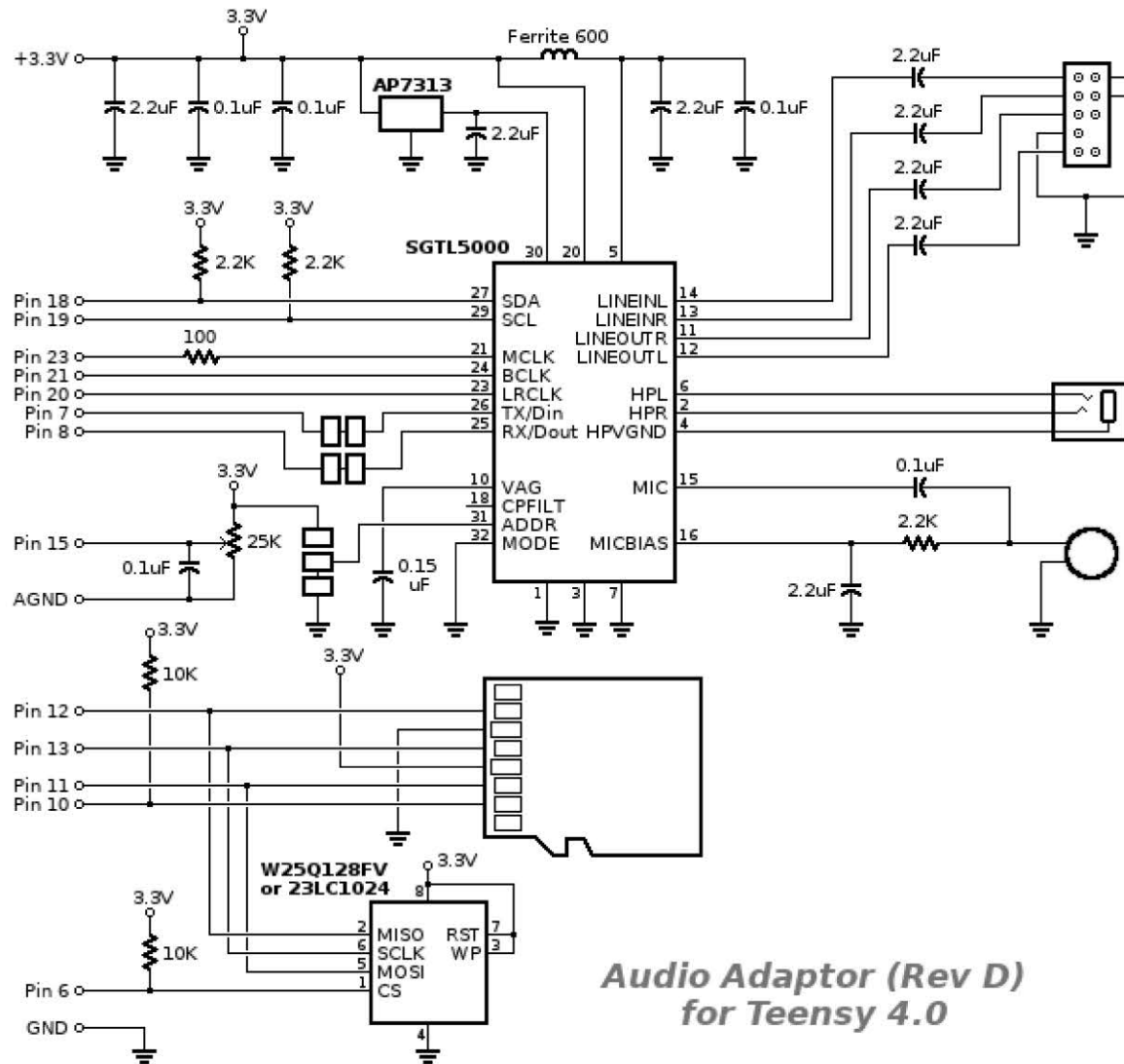
```



TITLE: <b>Teensy ANC - Esquema General</b>		REV: 1.0
Company: N/A		Sheet: 1/3
Date: 2024-10-17	Drawn By: Rafael Alf3rez Robisco	







### Audio Adaptor (Rev D) for Teensy 4.0

[https://www.pjrc.com/store/teensy3\\_audio.html](https://www.pjrc.com/store/teensy3_audio.html)

TITLE:	Teensy ANC - TEENSY AUDIO SHIELD	REV: D
EasyEDA	Company: N/A	Sheet: 3/3
	Date: 2024-10-17	Drawn By: Rafael Alf3rez Robisco