UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Telecomunicació
i Aeroespacial de Castelldefels

TRABAJO FINAL DE GRADO

TÍTULO: Enmascaramiento de acúfenos mediante técnicas de procesado digital

TITULACIÓN: Grado en Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación

AUTOR: Miguel Jawhari Gimeno

DIRECTOR: Gabriel Montoro López

FECHA DEPÓSITO: 07/09/2025

TÍTULO: Enmascaramiento de acúfenos mediante técnicas de procesado digital

TITULACIÓN: Grado en Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación

AUTOR: Miguel Jawhari Gimeno

DIRECTOR: Gabriel Montoro López

FECHA DEPÓSITO: 07/09/2025

Resumen

El tinnitus es una percepción sonora sin fuente externa que afecta a millones de personas en todo el mundo, reduciendo su calidad de vida. Actualmente no existe un tratamiento universalmente efectivo, por lo que se investigan enfoques alternativos como el enmascaramiento sonoro. Este trabajo de fin de grado propone una solución basada en procesamiento digital de señales (DSP) para atenuar la percepción del tinnitus tonal mediante un sistema de filtrado personalizado.

La metodología consistió en identificar la frecuencia del tinnitus mediante prueba subjetiva con tonos puros, generar diferentes tipos de ruido (blanco, rosa, marrón y modulado) y aplicar un filtro notch centrado en la frecuencia objetivo. Todo ello se implementó en MATLAB, realizando análisis espectral y pruebas con paciente para evaluar la efectividad de cada configuración.

Además, se exploró una implementación experimental en Python para el procesamiento del sonido ambiental en tiempo real, capturado por micrófono y filtrado al instante, con especial atención a la latencia y estabilidad del sistema.

Los resultados mostraron que el enmascaramiento fue efectivo durante la reproducción en la mayoría de los casos, siendo el ruido blanco el que ofreció mejores sensaciones de confort y supresión. Sin embargo, la persistencia de este efecto una vez detenido el sonido (llamada inhibición residual) fue menos consistente y dependió de múltiples factores.

En conjunto, el sistema resultó flexible, adaptable a distintas preferencias auditivas y bien tolerado por el paciente, lo que lo posiciona como una posible herramienta terapéutica de apoyo. Como propuesta de mejora futura, se plantea desarrollar una aplicación móvil que permita ajustar los parámetros de forma intuitiva, facilitando su uso tanto en entornos clínicos como domésticos.

TITLE: Tinnitus masking using digital signal processing techniques

DEGREE: Bachelor's Degree in Telecommunications Systems Engineering

AUTHOR: Miguel Jawhari Gimeno

DIRECTOR: Gabriel Montoro López

SUBMISSION DATE: 07/09/2025

Abstract

Tinnitus is the perception of sound without any external source, affecting millions of people worldwide and significantly reducing their quality of life. Since there is no universally effective treatment, alternative approaches such as sound masking are being explored. This bachelor's thesis proposes a digital signal processing (DSP)-based system aimed at reducing tonal tinnitus perception through personalized notch filtering.

The methodology included identifying the tinnitus frequency through subjective matching with pure tones, generating different noise types (white, pink, brown, and modulated), and applying a notch filter centered on the target frequency. The entire system was developed in MATLAB, where spectral analysis and patient trials were conducted to evaluate the effectiveness of each configuration.

Additionally, an experimental implementation in Python was tested to filter ambient noise in real time using a microphone input, with a focus on minimizing latency and maintaining audio quality.

Results showed that masking was effective during playback in most sessions, especially when using white noise, which was also rated as the most comfortable by the subject. However, the persistence of the effect after the sound stopped (known as residual inhibition) was less consistent and varied depending on multiple factors.

Overall, the system proved to be flexible, user-adaptable, and well-tolerated, suggesting its potential as a complementary therapeutic tool. As a future improvement, the development of a mobile application is proposed, allowing users to intuitively configure the parameters and enabling use in both clinical and home settings.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han hecho posible la realización de este trabajo.

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi profesor y director de este TFG, Dr. Gabriel Montoro, por su guía y apoyo constante. Este proyecto me ha permitido adentrarme en un campo que nunca había considerado, como es el de la medicina, y combinarlo con las ciencias y tecnologías de la telecomunicación. Le agradezco especialmente su paciencia y comprensión.

A mi madre, por su tiempo, dedicación y entrega durante las pruebas realizadas. Sé que ha asumido con gran responsabilidad este papel, y quiero agradecerle el esfuerzo y la implicación que ha demostrado.

Finalmente, quisiera dedicar este trabajo a todas las personas que padecen tinnitus. Por desgracia, todavía no existe una cura definitiva para este problema, y mi deseo es que pequeñas investigaciones como esta contribuyan, aunque sea modestamente, a mejorar su calidad de vida.

ÍNDICE

GLOSARIO 6

1 INTRODUCCIÓN 9

1.1 Presentación del problema del tinnitus 9

1.2 Impacto en la calidad de vida 10

1.3 Tendencias actuales y aumento de la incidencia 10

1.4 Casos conocidos de tinnitus 10

1.5 Tratamientos actuales y sus limitaciones 11

1.6 Objetivo del TFG 11

1.7 Estructura del documento 12

2 ESTADO DEL ARTE 13

2.1 Fisiología del tinnitus: origen y mecanismos neuronales 13

2.2 Métodos tradicionales de enmascaramiento 13

2.3 Procesamiento digital de señales en tinnitus 14

2.4 Limitaciones de los enfoques actuales 14

2.5 Terapias comerciales basadas en filtrado de frecuencias 15

3 METODOLOGÍA 19

3.1 Enfoque del trabajo 19

3.2 Herramientas y entornos utilizados 19

3.3 Diseño del sistema 20
3.3.1 Identificación de la frecuencia del tinnitus 20
3.3.2 Generación del ruido enmascarador 21
3.3.3 Aplicación del filtro notch 21
3.3.4 Reproducción del ruido filtrado 21

3.4 Procedimiento experimental 22
3.4.1 Pruebas de simulación (MATLAB) 22
3.4.2 Pruebas en tiempo real (Python) 22
3.4.3 Pruebas con sujeto de estudio 23

3.5 Dificultades técnicas y soluciones adoptadas ... 24

3.6 Conclusión del capítulo ... 25

4 IMPLEMENTACIÓN ... 27

4.1 Introducción a la implementación ... 27

4.2 Implementación en MATLAB ... 27
4.2.1 Diseño del filtro notch ... 27
4.2.2 Visualización espectral de los diferentes ruidos ... 29
4.2.3 Reproducción del sonido filtrado ... 35
4.2.4 Exportación del audio ... 35

4.3 Implementación en Python ... 35
4.3.1 Captura y reproducción en tiempo real ... 35
4.3.2 Diseño del filtro notch ... 35
4.3.3 Pruebas de latencia y estabilidad ... 36

4.4 Pruebas auditivas con paciente ... 36
4.4.1 Diseño de las sesiones de prueba ... 37
4.4.2 Equipos utilizados ... 37
4.4.3 Resultados observados ... 37
4.4.4 Limitaciones de las pruebas ... 38

4.5 Comparativa entre métodos ... 38
4.5.1 Ruido blanco vs. ruido rosa ... 38
4.5.2 Sonido modulado ... 39
4.5.3 Auriculares convencionales vs. conducción ósea ... 39
4.5.4 Filtrado vs. sonido sin filtrar ... 39

4.6 Conclusión del capítulo ... 40

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN ... 41

5.1 Introducción al análisis de resultados ... 41

5.2 Metodología de evaluación y sesiones realizadas ... 41

5.3 Resultados por tipo de ruido y configuración ... 42
5.3.1 Ruido blanco filtrado ... 42
5.3.2 Ruido rosa filtrado ... 43
5.3.3 Ruido blanco modulado filtrado (tipo “olas”) ... 43
5.3.4 Ruido marrón filtrado ... 43
5.3.5 Sin filtrado (ruido blanco puro) ... 43

5.4 Observaciones relevantes y casos atípicos ... 44

5.5 Conclusión del capítulo ... 45

6 ESTUDIO DE SOSTENIBILIDAD ... 47

6.1 Sostenibilidad social **47**

6.2 Sostenibilidad económica **47**

6.3 Sostenibilidad medioambiental **48**

6.4 Perspectiva ética **48**

7 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE MEJORA **49**

7.1 Conclusiones **49**

7.2 Líneas futuras de mejora **50**
7.2.1 Posible desarrollo como aplicación móvil 50

REFERENCIAS **51**

ANEXO **53**

Anexo 1. Terapias actuales contra el tinnitus **53**
Anexo 1.1. Terapia sonora 54
Anexo 1.2. Tinnitus Retraining Therapy (TRT) 55
Anexo 1.3. Terapia de Discriminación Auditiva (ADT) 56
Anexo 1.4. Terapia Cognitivo-Conductual (TCC) 57
Anexo 1.5. Terapia farmacológica 58

Anexo 2. Entorno MATLAB **60**
Anexo 2.1. Filtro notch en MATLAB (filtronotch.m) 60
Anexo 2.2. Ruido rosa con filtrado notch (sin zoom) (sinzoom_mainROSA.m) 61
Anexo 2.3. Ruido rosa con filtrado notch (análisis con zoom) (mainROSA.m) 62
Anexo 2.4. Ruido marrón con filtrado notch (main_marron.m) 63
Anexo 2.5. Ruido blanco modulado con filtrado notch (main_blanco_modulado.m) 64
Anexo 2.6. Script principal (MAINSCRIPT.m) del ruido blanco filtrado 65

Anexo 3. Entorno Python **66**
Anexo 3.1. Procesamiento en tiempo real con notch básico (filtrado_tinnitus1.py) 66
Anexo 3.2. Reducción de latencia y suavizado del filtrado (f_t1.py) 68
Anexo 3.3. Filtrado notch con cancelación parcial de ruido ambiente (f_t_anti.py) 69
Anexo 3.4. Procesamiento en tiempo real con notch estable (f_t.py) 71
Anexo 3.5. Conclusión del desarrollo en Python 73

Anexo 4. Detalles de las pruebas realizadas **74**
Anexo 4.1. Sesiones de abril 2025 (primeras pruebas) 75
Anexo 4.2. Sesiones de mayo 2025 (auriculares de conducción ósea y ruido modulado) 77
Anexo 4.3. Sesiones de junio 2025 (hallazgos finales) 79
Anexo 4.4. Conclusiones 80

Índice de figuras

Figura 1.1: Representación anatómica del oído interno, donde se aprecia la cóclea y las estructuras vasculares cercanas. 9
Figura 3.1: Esquema general del sistema propuesto 19
Figura 3.2: Diagrama de bloques del sistema de enmascaramiento implementado en MATLAB 22
Figura 3.3: Diagrama de bloques del sistema en tiempo real desarrollado en Python 23
Figura 4.1: Respuesta en frecuencia del filtro notch tipo Butterworth centrado en 3700 Hz.. 28
Figura 4.2: Espectro de magnitud del ruido blanco antes y después del filtrado notch. 30
Figura 4.3: Espectro de magnitud del ruido rosa con y sin filtrado notch. 31
Figura 4.4: Espectro del ruido rosa con y sin filtrado notch (ampliado). 32
Figura 4.5: Comparación del espectro completo del ruido marrón antes y después del filtrado notch 33
Figura 4.6: Zoom del espectro del ruido marrón entre 3500 y 4000 Hz, mostrando el efecto del filtro notch. 34

Índice de tablas

Tabla 9.1. Resultados de las pruebas iniciales con auriculares convencionales y distintos tipos de ruido en abril de 2025. 76
Tabla 9.2. Resultados de las pruebas realizadas en mayo de 2025 utilizando auriculares de conducción ósea y comparativas con auriculares convencionales. 78
Tabla 9.3. Resultados de las pruebas finales en junio de 2025, donde se observaron los efectos más relevantes de inhibición residual. 79

Glosario

ADT	Auditory Discrimination Therapy (Terapia de Discriminación Auditiva)
dB	Decibelio (unidad logarítmica de nivel de sonido)
DSP	Digital Signal Processing (Procesamiento Digital de Señales)
EETAC	Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i Aeroespacial de Castelldefels
FFT	Fast Fourier Transform (Transformada Rápida de Fourier)
FIR	Finite Impulse Response (Filtro de Respuesta Finita al Impulso)
Hz	Hertz (unidad de frecuencia, ciclos por segundo)
IIR	Infinite Impulse Response (Filtro de Respuesta Infinita al Impulso)
MATLAB	Matrix Laboratory (entorno de programación para cálculo numérico y simulación)
rTMS	Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation (Estimulación Magnética Transcraneal Repetitiva)
TRT	Tinnitus Retraining Therapy (Terapia de Reentrenamiento del Tinnitus)
TFG	Trabajo de Fin de Grado
TFE	Treball de Fi d'Estudis (denominación en catalán del TFG)
UPC	Universitat Politècnica de Catalunya

1 Introducción

1.1 Presentación del problema del tinnitus

El **tinnitus o acúfenos**, es una percepción auditiva anómala que se manifiesta como un sonido persistente sin una fuente externa. Puede presentarse en forma de zumbidos, pitidos o siseos, y afecta a un porcentaje significativo de la población. Se estima que entre un 10% y un 20 % [1][2] de las personas experimentará tinnitus en algún momento de su vida, con una incidencia mayor en adultos mayores y en individuos expuestos a ruidos intensos. Aunque no es una enfermedad en sí misma, el tinnitus es un síntoma que puede estar asociado a diversos problemas auditivos y neurológicos, como la presbiacusia, la exposición prolongada a ruidos, enfermedades del oído interno y trastornos neurológicos.

El origen del tinnitus suele estar relacionado con una disfunción en la transmisión y procesamiento de las señales auditivas. Se ha demostrado [3] que la neuroplasticidad juega un papel fundamental en la persistencia del tinnitus, ya que la falta de estímulo auditivo adecuado puede inducir cambios en la actividad neuronal del sistema auditivo central. Estos cambios pueden generar una amplificación anómala de la señal nerviosa, provocando la percepción de un sonido inexistente. La comprensión de estos mecanismos es clave para el desarrollo de tratamientos efectivos. La Figura 1.1 ilustra la anatomía del oído interno y muestra cómo el daño en las células ciliadas de la cóclea puede contribuir a la aparición del tinnitus.

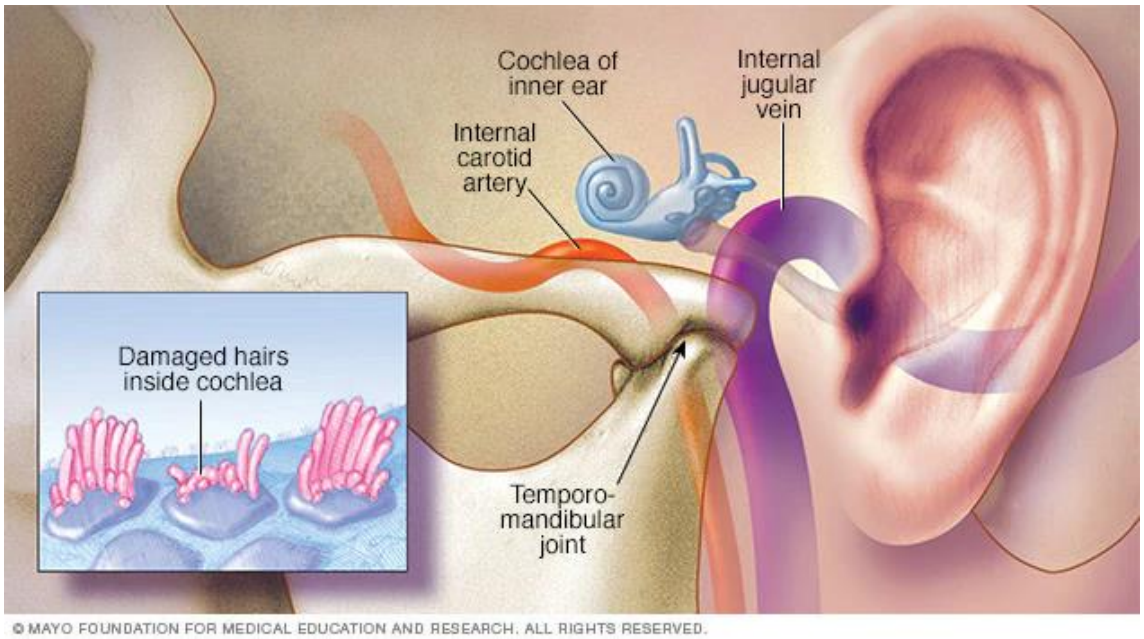

Figura 1.1: Representación anatómica del oído interno, donde se aprecia la cóclea y las estructuras vasculares cercanas. El recuadro destaca el daño en las células ciliadas dentro de la cóclea, una de las causas más comunes del tinnitus.

1.2 Impacto en la calidad de vida

El tinnitus no solo es un fenómeno auditivo, sino que también tiene importantes implicaciones en la calidad de vida de los afectados. La presencia constante de un sonido intrusivo puede provocar problemas de concentración, dificultades para conciliar el sueño, irritabilidad, ansiedad y estrés. En casos más severos, el tinnitus puede derivar en depresión, aislamiento social y una disminución en el rendimiento laboral y académico [1] [4].

Estudios recientes [5] han sugerido que el tinnitus puede afectar diferentes áreas del cerebro, incluyendo aquellas relacionadas con la atención y la regulación emocional. Esta interacción explica por qué algunos pacientes experimentan un empeoramiento de los síntomas en situaciones de estrés o fatiga. Además, la falta de un tratamiento universalmente efectivo genera incertidumbre y frustración en los afectados, aumentando la necesidad de desarrollar nuevas estrategias terapéuticas.

1.3 Tendencias actuales y aumento de la incidencia

En los últimos años, el uso de auriculares se ha integrado de forma natural en la vida cotidiana. Ya sea para escuchar música, podcasts, ver videos, participar en videollamadas o aislarse del ruido del entorno, cada vez más personas (especialmente jóvenes) pasan varias horas al día con dispositivos introducidos directamente en el canal auditivo. Esta exposición continuada a niveles elevados de sonido, a menudo sin pausas ni conciencia del volumen, está favoreciendo un deterioro progresivo de la audición.

Lo preocupante es que esta pérdida auditiva generada por la exposición a ruidos elevados suele desarrollarse de forma silenciosa, sin síntomas evidentes en sus primeras fases. Sin embargo, a medida que avanza, puede dar lugar a problemas auditivos persistentes como el tinnitus, alterando la percepción auditiva de quien lo padece. En este escenario, no resulta difícil imaginar que la incidencia de los acúfenos continúe aumentando en los próximos años. Por ello, resulta más necesario que nunca investigar soluciones técnicas accesibles, personalizables y adaptadas a las nuevas dinámicas de consumo de sonido.

1.4 Casos conocidos de tinnitus

El tinnitus no solo afecta a la población general, sino también a figuras reconocidas del mundo del arte, la música o el cine. Por ejemplo, el director español Pedro Almodóvar ha reconocido en entrevistas que sufre tinnitus crónico, un pitido constante que afecta su concentración y descanso. Del mismo modo, músicos como Chris Martin (Coldplay) o Eric Clapton han declarado públicamente su lucha contra el tinnitus, a menudo como consecuencia de exposiciones prolongadas a volúmenes altos.

Estas experiencias sirven para visibilizar la realidad del tinnitus y demuestran que incluso personas acostumbradas a trabajar con sonido pueden verse gravemente afectadas. Este tipo de casos refuerza la importancia de investigar soluciones efectivas y adaptadas al estilo de vida de cada usuario.

1.5 Tratamientos actuales y sus limitaciones

A pesar de los avances en el estudio del tinnitus, actualmente no existe una cura definitiva. Los tratamientos disponibles se centran en mitigar sus efectos y mejorar la calidad de vida de los pacientes. Entre las estrategias más utilizadas [6] se encuentran:

- **Terapia sonora**: uso de ruido blanco, ruido rosa o sonidos personalizados para enmascarar el tinnitus y reducir su percepción.

- **Terapia cognitivo-conductual (TCC)**: ayuda a los pacientes a modificar su respuesta emocional ante el tinnitus, reduciendo el impacto negativo en su bienestar.

- **Tratamientos farmacológicos**: uso de ansiolíticos y antidepresivos para manejar los síntomas asociados, aunque sin abordar directamente el tinnitus.

- **Neuromodulación y estimulación cerebral**: técnicas experimentales como la estimulación magnética transcraneal (rTMS) buscan modificar la actividad neuronal implicada en el tinnitus.

Si bien algunas de estas terapias pueden ser efectivas en ciertos casos, presentan limitaciones importantes. La terapia sonora no elimina el tinnitus, solo lo enmascara temporalmente. La terapia cognitivo-conductual requiere un proceso prolongado de adaptación y no es efectiva en todos los pacientes. Los fármacos pueden generar efectos secundarios y no solucionan el trasfondo del problema. Por su parte, las técnicas de neuromodulación aún están en fase experimental y no han sido ampliamente adoptadas.

1.6 Objetivo del TFG

Dado que el tinnitus es un problema multifactorial sin una solución definitiva, este Trabajo de Fin de Grado se propone investigar una alternativa basada en el **procesamiento digital de señales (DSP)**. El objetivo es desarrollar un sistema que permita atenuar la percepción del tinnitus mediante un filtrado digital de la señal auditiva. Específicamente, se busca:

1. Analizar el impacto del tinnitus y la efectividad de los tratamientos actuales.

2. Investigar el uso del filtrado digital de señales para mitigar el tinnitus.

3. Diseñar y simular un sistema de filtrado de banda eliminada adaptado a la frecuencia del tinnitus de cada paciente.

4. Implementar el sistema en **MATLAB** y evaluar su rendimiento.

5. Proponer mejoras y futuras líneas de investigación para optimizar la solución desarrollada.

Este enfoque busca aprovechar los avances en procesamiento digital para ofrecer una alternativa personalizada y potencialmente más efectiva que los métodos convencionales.

1.7 Estructura del documento

El presente documento se organiza de la siguiente manera:

- **Capítulo 1: Introducción.** Se contextualiza el problema del tinnitus, su impacto, la motivación del estudio y los objetivos del TFG.

- **Capítulo 2: Estado del arte.** Se describen los fundamentos del tinnitus, su impacto en la calidad de vida y los tratamientos actuales con sus limitaciones.

- **Capítulo 3: Metodología.** Se detalla la metodología utilizada, incluyendo el diseño del sistema de filtrado y su implementación en MATLAB.

- **Capítulo 4: Implementación.** Se explican los aspectos técnicos del diseño, simulación y pruebas del sistema propuesto.

- **Capítulo 5: Resultados y evaluación.** Se presentan los resultados obtenidos y un análisis sobre la viabilidad de la solución.

- **Capítulo 6: Estudio de sostenibilidad.** Se analizan las implicaciones sociales, económicas y ambientales del proyecto.

- **Capítulo 7: Conclusiones y trabajo futuro.** Se resumen los hallazgos principales y se sugieren posibles mejoras y extensiones del estudio.

Con esta estructura, el documento pretende ofrecer un recorrido lógico desde la contextualización del problema hasta la propuesta de una solución viable mediante tecnologías de telecomunicaciones.

2 Estado del Arte

2.1 Fisiología del tinnitus: origen y mecanismos neuronales

El tinnitus o acúfeno, no es una enfermedad en sí, sino un síntoma que refleja una alteración en el procesamiento del sonido en el sistema nervioso. Aunque puede tener su origen en el oído interno (como consecuencia de daños en las células ciliadas de la cóclea), cada vez hay más consenso en que su persistencia está ligada a **procesos del sistema nervioso central**, especialmente en la **corteza auditiva** y en circuitos asociados a la percepción del sonido [1][2][5].

Cuando se produce una pérdida auditiva, el cerebro parece intentar "compensar" la falta de entrada sensorial amplificando la actividad neuronal en ciertas frecuencias. Esta reorganización del mapa auditivo, provocada por la **plasticidad cerebral**, puede generar una actividad anómala en la corteza auditiva, interpretada como un sonido que no existe en el entorno real [3].

Además, otras estructuras como el sistema límbico [7] (implicado en las emociones) y el tálamo (que regula la atención) juegan un papel fundamental en cómo se percibe y tolera el tinnitus. Esta interacción explica por qué dos personas con un mismo perfil auditivo pueden vivir el acúfeno de forma completamente distinta: una apenas lo nota, mientras que otra puede sufrir ansiedad o insomnio.

2.2 Métodos tradicionales de enmascaramiento

A lo largo del tiempo, se han desarrollado distintos enfoques terapéuticos [2][5][6][8] para mitigar la percepción del tinnitus. Muchos de ellos comparten un mismo objetivo: disminuir la atención que el paciente presta al acúfeno o interferir acústicamente con su percepción, sin necesidad de eliminarlo completamente.

Terapia sonora

La terapia sonora es uno de los métodos más utilizados. Consiste en introducir un sonido externo (como ruido blanco, rosa, sonidos naturales o música suave) con el fin de reducir el contraste entre el tinnitus y el silencio. De este modo, se pretende hacer que el acúfeno resulte menos perceptible o incluso desaparezca momentáneamente mientras el sonido está activo.

Este enfoque puede aplicarse mediante altavoces ambientales, aplicaciones móviles o audífonos con generadores de ruido integrados. Su efectividad depende en gran medida del tipo de sonido utilizado, del volumen y de si coincide o no con la frecuencia del tinnitus del paciente. En general, el efecto suele ser temporal, y en muchos casos no se observa una mejora mantenida tras detener la estimulación sonora.

Terapia de reentrenamiento del tinnitus (TRT)

Desarrollada por Jastreboff y Hazell en los años 90, la TRT combina la exposición continua a sonidos neutros con un proceso de asesoramiento psicológico. Su finalidad es facilitar la habituación: que el cerebro aprenda a ignorar el acúfeno, del mismo modo que filtra otros estímulos no relevantes del entorno.

Esta terapia actúa sobre tres niveles: el sistema auditivo, el sistema límbico (emociones) y el sistema autonómico (respuesta al estrés). Aunque requiere meses de seguimiento y constancia, ha mostrado buenos resultados en ciertos perfiles de pacientes.

Terapia de discriminación auditiva (ADT)

Esta terapia propone realizar ejercicios específicos de atención auditiva, en los que el paciente debe distinguir y clasificar sonidos de distinta frecuencia, intensidad o duración. El objetivo es reentrenar la corteza auditiva y reducir el protagonismo del tinnitus en la percepción sonora.

Aunque es una técnica menos conocida que la TRT, estudios recientes han demostrado su potencial para generar cambios neuroplásticos favorables. Sin embargo, exige una participación activa del paciente y suele aplicarse en entornos clínicos especializados.

2.3 Procesamiento digital de señales en tinnitus

En los últimos años, el procesamiento digital de señales (DSP, por sus siglas en inglés) ha emergido como una herramienta prometedora para el desarrollo de terapias personalizadas contra el tinnitus, especialmente en su forma tonal. Esta rama de la ingeniería permite manipular señales acústicas con precisión, aplicando algoritmos y filtros que actúan sobre frecuencias específicas del espectro auditivo.

Una de las estrategias más exploradas es el uso de **filtros notch o filtros de banda eliminada**. Estos filtros están diseñados para suprimir una banda estrecha de frecuencias, idealmente centrada en la frecuencia que el paciente identifica como su tinnitus. El principio es simple: si se consigue eliminar o atenuar esa frecuencia concreta del sonido ambiental o de una señal de ruido, se puede interferir con la percepción del acúfeno, o al menos reducir su intensidad.

La principal ventaja del DSP en este contexto es la personalización. Cada paciente puede tener un tinnitus diferente en cuanto a frecuencia, timbre o intensidad. El filtrado digital permite ajustar con precisión el sistema terapéutico a las características individuales de cada caso. Además, la posibilidad de generar distintos tipos de ruido (blanco, rosa, etc.) y aplicarles filtros específicos abre la puerta a terapias mucho más flexibles que las tradicionales.

Otra línea de investigación dentro del DSP es la adaptación en tiempo real. Mediante el uso de micrófonos, microcontroladores o incluso smartphones, se puede capturar el sonido ambiental, procesarlo con un filtro digital que elimine la frecuencia del tinnitus y reproducirlo de inmediato a través de auriculares. Esta técnica permite convivir con un entorno acústico más “limpio” desde el punto de vista del paciente, lo que podría favorecer la habituación y la disminución del malestar.

2.4 Limitaciones de los enfoques actuales

A pesar de la diversidad de terapias disponibles, el tinnitus continúa siendo un problema clínico de difícil abordaje. Ningún tratamiento actual garantiza una cura definitiva, y la mayoría de los métodos tienen una efectividad parcial y variable según el paciente. Esta realidad plantea varios retos tanto a nivel médico como tecnológico.

Las terapias sonoras tradicionales, como el uso de ruido blanco o sonidos ambientales, actúan principalmente como métodos de enmascaramiento, sin modificar los mecanismos neuronales que originan el tinnitus. Su efecto es temporal, y en muchos casos desaparece al cesar la estimulación. Por otro lado, técnicas como la TRT o la terapia cognitivo-conductual requieren una implicación prolongada del paciente, con resultados que pueden tardar meses en manifestarse. Además, no todos los pacientes responden de forma positiva a estos tratamientos.

En cuanto a las terapias basadas en procesamiento digital de señales, aunque representan un avance significativo, también enfrentan limitaciones importantes. Una de las más relevantes es la dificultad para identificar con precisión la frecuencia del tinnitus, ya que esta percepción es altamente subjetiva y puede variar a lo largo del día o según el estado emocional del paciente. Esto complica la configuración de filtros notch eficaces y personalizados.

A nivel técnico, el desarrollo de sistemas en tiempo real conlleva desafíos como la **latencia**, que puede generar una experiencia auditiva poco natural, especialmente cuando se trata de filtrar el sonido ambiente. También hay que considerar la calidad del filtrado, ya que si el notch es demasiado ancho puede distorsionar el sonido general, y si es demasiado estrecho puede no eliminar la frecuencia objetivo con suficiente eficacia.

Por último, muchas de estas soluciones aún no han sido validadas a gran escala en estudios clínicos. Aunque existen ensayos y aplicaciones comerciales, la evidencia científica sobre su eficacia sostenida sigue siendo limitada, lo que frena su adopción en contextos médicos generalizados.

Estas limitaciones, sin embargo, no deslegitiman el potencial de las terapias digitales. Al contrario, ponen de relieve la necesidad de seguir investigando enfoques personalizados, adaptativos y técnicamente optimizados, como el que se plantea en este Trabajo de Fin de Grado.

2.5 Terapias comerciales basadas en filtrado de frecuencias

En los últimos años han surgido diversas soluciones comerciales que aplican principios del procesamiento digital de señales para el tratamiento del tinnitus, particularmente mediante el uso de filtros de frecuencia adaptados a cada paciente. A diferencia de las terapias tradicionales basadas en ruido generalizado, estas propuestas persiguen una intervención más precisa sobre el espectro auditivo afectado, con el objetivo de modular la actividad neuronal asociada al tinnitus tonal.

Una de las técnicas más representativas es el filtrado notch o de banda eliminada. Esta estrategia ha sido incorporada por varias aplicaciones y dispositivos terapéuticos, que permiten al usuario cargar su propia música o reproducir ruido modificado con dicho filtrado.

Tinnitracks (Terapia de Música Personalizada con Notch – TMNMT)

Tinnitracks [9] es una aplicación desarrollada por la empresa alemana Sonormed, basada en la idea de eliminar la frecuencia del tinnitus de la música preferida del paciente. Para ello, el usuario debe determinar su frecuencia de tinnitus mediante una prueba auditiva, y luego cargar canciones que serán procesadas mediante un filtro notch centrado en esa frecuencia.

El objetivo es provocar una reducción de la hiperactividad cortical asociada a dicha banda, favoreciendo la plasticidad neuronal y, con el tiempo, una disminución de la percepción del acúfeno. Esta técnica, conocida como Terapia de Música Personalizada con Notch (TMNMT), ha sido objeto de estudios clínicos que apuntan a una mejora moderada en ciertos perfiles de pacientes, aunque su eficacia generalizada aún se encuentra en evaluación.

Signia Notch Therapy

Signia [10], una reconocida marca de audífonos, ha desarrollado una tecnología de tratamiento denominada Terapia Notch, orientada específicamente al tinnitus tonal. A diferencia de otros enfoques basados en sonidos añadidos (como ruido blanco o música), esta técnica no introduce ningún estímulo auditivo externo, sino que modula internamente la salida del audífono para suprimir la frecuencia del tinnitus de forma pasiva.

El sistema funciona mediante la identificación de la frecuencia aproximada del acúfeno del paciente y la aplicación de un procesamiento digital que reduce su presencia sin alterar el resto del sonido percibido. Es decir, no genera un “ruido” como tal, sino que aplica un filtro notch interno sobre un ruido estático generado dentro del dispositivo.

El objetivo es promover una **habituación natural del sistema auditivo al tinnitus**, sin añadir estímulos adicionales que puedan resultar molestos o invasivos. Según la empresa, este enfoque discreto ha mostrado resultados positivos en estudios clínicos y se presenta como una alternativa viable para pacientes con tinnitus tonal bien definido, especialmente cuando se busca una solución cómoda y silenciosa para el día a día.

AudioNotch

AudioNotch [11] es una plataforma en línea que permite a los usuarios generar sonidos personalizados para el tratamiento del tinnitus. Su funcionamiento es similar al de Tinnitracks, pero ofrece una mayor flexibilidad al permitir aplicar un filtro notch sobre diferentes tipos de sonidos, como ruido blanco, ruido rosa o música instrumental.

El paciente puede ajustar manualmente la frecuencia del filtro en función de su tinnitus, y la plataforma genera archivos de audio para escucha terapéutica diaria. El objetivo, al igual que en otras terapias basadas en filtrado, es reducir progresivamente la actividad neuronal relacionada con la percepción del acúfeno mediante sesiones prolongadas de exposición.

Aunque no es una terapia clínicamente prescrita, AudioNotch se presenta como una herramienta accesible para pacientes que desean explorar un enfoque personalizado desde casa. Su eficacia, como en otros casos, depende de la constancia, la personalización y la adaptación a cada caso particular.

Por lo tanto, las terapias comerciales basadas en el filtrado de frecuencias específicas, como Tinnitracks, AudioNotch o Signia Notch Therapy, representan un paso adelante respecto a las estrategias sonoras tradicionales. Aunque su eficacia no está universalmente validada y sigue siendo objeto de estudio, estas propuestas demuestran que es posible aplicar principios de

procesamiento digital de señales (DSP) al tratamiento del tinnitus tonal de forma accesible, personalizable y no invasiva.

Esta línea de desarrollo, aún en evolución, respalda el enfoque adoptado en este TFG: diseñar e implementar un sistema basado en filtros notch digitales que se adapte a la frecuencia del acúfeno de cada paciente, explorando su viabilidad práctica tanto en simulación como en tiempo real.

3 Metodología

3.1 Enfoque del trabajo

Este TFG propone un enfoque centrado en la aplicación del DSP para mitigar la percepción del tinnitus tonal. Frente a las estrategias tradicionales, este trabajo propone un enfoque de enmascaramiento personalizado mediante filtrado digital adaptado a la frecuencia del acúfeno de cada paciente.

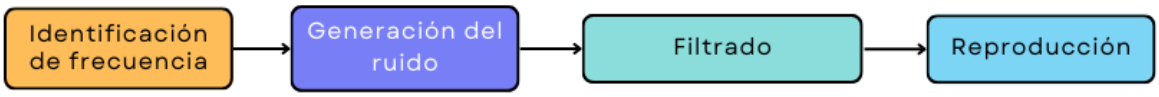

Figura 3.1: Esquema general del sistema propuesto

La solución se fundamenta en el uso del filtro de banda eliminada (notch filter), diseñado para suprimir una banda estrecha del espectro auditivo coincidente con la frecuencia del tinnitus. Este tipo de filtro se aplica sobre distintos tipos de señales, como ruido blanco o rosa, generando un sonido modificado que busca **enmascarar o atenuar** la percepción del acúfeno.

El proyecto se desarrolla en dos fases técnicas:

- En primer lugar, se ha implementado el sistema en MATLAB, con el objetivo de validar el comportamiento del filtrado sobre señales sintéticas y analizarlo en el dominio espectral.

- Adicionalmente, se ha diseñado una segunda versión en Python capaz de funcionar en tiempo real, captando sonido ambiental a través de micrófono, aplicando el filtro notch en directo y reproduciendo el resultado al instante.

Además, se ha realizado una evaluación práctica con una persona que presenta tinnitus tonal (la madre del autor), lo que ha permitido testar el sistema en condiciones reales, identificar limitaciones y valorar su aplicabilidad.

Este enfoque busca aprovechar las ventajas del procesamiento digital (precisión, personalización, y adaptabilidad) para ofrecer una alternativa técnica y flexible a los tratamientos actuales del tinnitus.

3.2 Herramientas y entornos utilizados

En este apartado se detallan los entornos y recursos técnicos utilizados para el desarrollo e implementación del sistema, tanto en MATLAB como en Python.

- **MATLAB**: ha sido el entorno principal para la creación de señales, el diseño de filtros digitales y el análisis espectral. Se ha utilizado para validar la efectividad de diferentes configuraciones de filtros notch aplicados sobre varios tipos de ruido. También ha permitido realizar representaciones gráficas del espectro de señal antes y después del filtrado, facilitando la interpretación de resultados.

- **Python**: se ha empleado para testear el sistema en tiempo real, utilizando librerías como:
    - sounddevice: para la captura y reproducción de audio mediante el micrófono y altavoces.
    - scipy.signal: para la creación del filtro notch en tiempo real.
    - numpy: para el procesamiento y manipulación de las señales.
- **Generador de frecuencias**: se utilizó una aplicación móvil de tonos puros para **sintonizar** la frecuencia del tinnitus del sujeto de prueba través de un proceso de comparación auditiva guiada, que determinó la frecuencia más cercana al pitido percibido. Esta estimación sirvió de base para el diseño del filtro notch personalizado.
- **Auriculares**: se realizaron pruebas tanto con auriculares **convencionales** como con modelos de **conducción ósea**, con el objetivo de analizar las diferencias en la percepción del sonido filtrado y su tolerancia por parte del usuario durante las sesiones prácticas.
- **Transformada Rápida de Fourier (FFT)**: herramienta fundamental para el análisis espectral, utilizada tanto en MATLAB como en Python para confirmar que el filtrado se produce correctamente en la banda deseada.

Estas herramientas han sido seleccionadas por su disponibilidad, capacidad de personalización, facilidad de uso y compatibilidad con tareas de procesamiento de señal en entorno académico y experimental.

3.3 Diseño del sistema

El sistema desarrollado para mitigar el tinnitus tonal se basa en un enfoque de procesamiento digital que suprime la frecuencia percibida mediante un filtro de banda eliminada. Esta estrategia se implementó en cuatro fases principales: identificación de la frecuencia del acúfeno, generación de ruido enmascarador, filtrado digital y reproducción del ruido filtrado.

3.3.1 Identificación de la frecuencia del tinnitus

El primer paso consistió en **determinar la frecuencia aproximada del tinnitus** de la paciente, mediante una prueba subjetiva. Para ello se utilizó una aplicación móvil de generación de tonos puros, que permitía reproducir distintas frecuencias controladas desde el teléfono.

Durante la prueba, la paciente fue comparando los sonidos emitidos con el pitido que percibía internamente, ajustando manualmente hasta encontrar el tono más similar. Inicialmente, la coincidencia se estimó en torno a 970 Hz, pero en sesiones posteriores se refinó la búsqueda y se estableció con más precisión en torno a **3700 Hz**, una frecuencia más aguda y cercana a la percepción descrita. Esta información fue crucial para el diseño posterior del filtro notch.

3.3.2 Generación del ruido enmascarador

Una vez identificada la frecuencia objetivo, se generaron diversas señales de ruido que servirían como base para el proceso de enmascaramiento. Se seleccionaron varias variantes con propiedades espectrales distintas, con el objetivo de comparar su tolerancia, capacidad de enmascaramiento y posibles efectos subjetivos. Las señales utilizadas fueron:

- **Ruido blanco**: contiene todas las frecuencias con igual energía espectral. Es uno de los ruidos más utilizados en terapias sonoras por su capacidad para enmascarar tonos agudos.

- **Ruido rosa**: presenta una caída de energía de -3 dB por octava, resultando más suave y natural al oído humano. Puede ser más tolerable en exposiciones prolongadas.

- **Ruido marrón**: posee una pendiente de -6 dB por octava, lo que genera un sonido más grave y denso. Su efecto en el enmascaramiento fue explorado debido a su perfil más cálido y envolvente.

- **Ruido blanco modulado en amplitud**: se trata de una variante del ruido blanco cuya amplitud fluctúa suavemente con el tiempo (simulando un efecto de olas), lo que le da un carácter más relajante. Este tipo de señal fue generado experimentalmente en MATLAB para evaluar si una presentación más dinámica podría resultar más cómoda para el oyente.

Todas estas señales fueron posteriormente filtradas mediante un filtro notch centrado en la frecuencia del tinnitus objetivo, con el fin de eliminar esa componente específica del espectro.

3.3.3 Aplicación del filtro notch

Se diseñaron varios filtros digitales para suprimir la frecuencia del tinnitus con precisión. Se utilizaron filtros **IIR (Infinite Impulse Response)**:

- En **MATLAB**, se emplearon funciones como iirnotch [12] y designfilt [13] para construir filtros personalizados ajustando la frecuencia central y el ancho de banda). Esto permitió simular con facilidad distintos niveles de supresión espectral.

- En **Python**, se replicó el filtro utilizando scipy.signal.iirnotch [14], adaptado al procesamiento en tiempo real. Se prestó especial atención al diseño del filtro para mantener la estabilidad y minimizar la distorsión, a la vez que se aseguraba una atenuación eficaz en la frecuencia deseada.

También se ajustó el volumen del audio para garantizar una experiencia auditva cómoda y evitar efectos secundarios como fatiga o dolor de cabeza.

3.3.4 Reproducción del ruido filtrado

Una vez generadas y filtradas las señales, estas fueron reproducidas mediante auriculares en sesiones de prueba controladas. Se utilizaron tanto auriculares convencionales como de conducción ósea, permitiendo evaluar diferentes modos de transmisión del sonido. El volumen

fue ajustado manualmente en cada sesión para asegurar comodidad auditiva y evitar molestias durante la exposición prolongada.

3.4 Procedimiento experimental

Para evaluar la efectividad del sistema diseñado, se llevaron a cabo diferentes tipos de pruebas agrupadas en tres bloques: simulaciones en MATLAB, procesamiento en tiempo real con Python y pruebas prácticas con un sujeto real. Estas fases permitieron analizar el comportamiento del sistema desde distintos enfoques: técnico, perceptual y funcional.

3.4.1 Pruebas de simulación (MATLAB)

En la implementación realizada en MATLAB se generaron distintos tipos de ruido sobre los que se aplicó el filtrado digital. Inicialmente, se utilizó ruido blanco sin modificar para comprobar que su efecto de enmascaramiento era efectivo incluso a bajos volúmenes. Posteriormente, se aplicaron filtros notch centrados en la frecuencia del tinnitus estimada para obtener versiones filtradas de ruido blanco, rosa, marrón y modulado. Estos sonidos fueron utilizados en pruebas reales con el objetivo de analizar tanto la calidad perceptiva del ruido como su capacidad para inducir enmascaramiento efectivo y posible inhibición residual. En la figura siguiente, el diagrama de bloques del sistema en MATLAB:

Figura 3.2: Diagrama de bloques del sistema de enmascaramiento implementado en MATLAB

Este entorno de simulación permitió:

- Evaluar la capacidad del filtro para eliminar selectivamente la frecuencia objetivo.
- Visualizar la energía residual del tono antes y después del filtrado.
- Comprobar el impacto perceptual al escuchar los audios con y sin filtrado.
- Probar distintos tipos de ruido para ver la efectivad de cada uno.

Gracias a la versatilidad de MATLAB, estas pruebas facilitaron una primera validación del sistema en condiciones controladas, sirviendo como base para avanzar hacia entornos más realistas.

3.4.2 Pruebas en tiempo real (Python)

Adicionalmente, se desarrolló un sistema en Python capaz de funcionar en tiempo real. Este sistema capturaba el sonido ambiente a través del micrófono del ordenador, le aplicaba un filtro

notch y lo reproducía instantáneamente por los auriculares del usuario. A continuación, se puede observar la figura del sistema en Python:

Figura 3.3: Diagrama de bloques del sistema en tiempo real desarrollado en Python

Durante el desarrollo, se enfrentaron varios desafíos técnicos:

- **Latencia**: el retardo entre la señal capturada y reproducida debía ser mínimo para evitar un efecto molesto o artificial.
- **Estabilidad del filtro**: los filtros IIR requieren cuidado para evitar inestabilidades al procesar señales en directo.
- **Buffering**: se realizaron ajustes en el tamaño de los bloques de audio (chunks) para optimizar la relación entre latencia y rendimiento.

Estas pruebas permitieron confirmar que el sistema era capaz de funcionar de forma continua, con una latencia aceptable y una calidad de sonido razonable, lo que abre la puerta a implementaciones en dispositivos portátiles o aplicaciones móviles en el futuro.

3.4.3 Pruebas con sujeto de estudio

Finalmente, se realizaron pruebas prácticas con un sujeto afectado por tinnitus, colaboró voluntariamente en el proceso. Estas pruebas se estructuraron en sesiones de varias series, cada una de las cuales incluía:

- **Selección del tipo de sonido**: ruido blanco, rosa, marrón, modulado.
- **Ajuste del volumen y duración**: series de entre 60 y 300 segundos.
- **Uso de diferentes auriculares**: se compararon auriculares convencionales y de conducción ósea.
- **Valoración subjetiva**: tras cada sesión, en la medida de lo posible, se recogía la opinión de la paciente sobre el efecto del sonido en su percepción del tinnitus.

A lo largo de las sesiones se observó que:

- El ruido filtrado (con notch en la frecuencia del acúfeno) ofrecía un enmascaramiento más cómodo y específico.

- La percepción del tinnitus variaba según el día, la colocación de los auriculares y el tipo de sonido empleado.

- No siempre se obtenía una inhibición residual (reducción del tinnitus tras cesar el sonido), aunque en algunas sesiones sí se observó una atenuación temporal.

- La paciente expresó preferencia por los auriculares de conducción ósea, al no aislarla completamente del entorno y resultar más tolerables en sesiones largas.

Estas pruebas permitieron validar el enfoque del proyecto en condiciones reales, así como recoger observaciones subjetivas de gran valor para el análisis final.

3.5 Dificultades técnicas y soluciones adoptadas

Durante el desarrollo del proyecto surgieron diversos desafíos que exigieron ajustes en el diseño, la implementación y el enfoque metodológico. A continuación, se describen las principales dificultades encontradas y las soluciones aplicadas:

Variabilidad subjetiva del tinnitus

Problema:
La frecuencia del tinnitus no es siempre constante. Puede variar con el paso del tiempo, el nivel de cansancio, el estrés o incluso entre sesiones consecutivas. Esta variabilidad complica la selección de una única frecuencia para aplicar el filtrado.

Solución:
Se optó por realizar una sintonización manual utilizando una aplicación móvil de tonos puros, permitiendo que el sujeto ajustara la frecuencia hasta encontrar la más similar a su percepción. Además, se dejó planteada la posibilidad de implementar una futura app que permita **ajustar dinámicamente la frecuencia del filtro**, lo que aportaría mayor personalización y flexibilidad.

Latencia en el procesamiento en tiempo real (Python)

Problema:
Al capturar y procesar audio en tiempo real, incluso pequeños retardos pueden resultar molestos, especialmente si se trabaja con sonido ambiental o voz.

Solución:
Se optimizaron los parámetros de la librería sounddevice, ajustando el tamaño de los buffers y el número de muestras por bloque (blocksize) para **minimizar la latencia**. También se redujo al mínimo el procesamiento por bloque para garantizar fluidez en la reproducción.

Limitaciones en el hardware

Problema:
El tipo de auriculares influía notablemente en la experiencia. Por ejemplo, los auriculares intrauditivos aislaban demasiado y resultaban incómodos para sesiones prolongadas.

Solución:
Se probaron distintos dispositivos, incluyendo auriculares de **conducción ósea**, que demostraron una mejor tolerancia para la paciente al no bloquear el canal auditivo ni aislarla completamente del entorno.

Evaluación subjetiva del tratamiento

Problema:
La efectividad del sistema dependía de la percepción del paciente, que es subjetiva y variable. Esto dificulta la validación científica de los resultados.

Solución:
Se recogieron **valoraciones subjetivas detalladas** durante y después de las sesiones, anotando los cambios en la percepción del tinnitus, la comodidad del sonido y posibles efectos residuales. Estas observaciones permiten extraer conclusiones prácticas, aunque no cuantificables con precisión.

En conjunto, estas dificultades reflejan los retos inherentes al tratamiento del tinnitus desde un enfoque técnico, y al mismo tiempo, han permitido afinar el sistema y dejar planteadas líneas de mejora realistas para su futura evolución.

3.6 Conclusión del capítulo

En este capítulo se ha descrito detalladamente la metodología empleada para el desarrollo de un sistema de enmascaramiento sonoro orientado al tratamiento del tinnitus tonal. A través de un enfoque basado en procesamiento digital de señales, se ha diseñado un sistema que permite eliminar de forma selectiva la frecuencia del acúfeno mediante un filtro notch aplicado sobre el ruido (blanco, rosa…).

El trabajo ha incluido tanto una fase de simulación con señales sintéticas en MATLAB como una implementación adicional en tiempo real con Python. Asimismo, se han realizado pruebas prácticas con un sujeto real, lo que ha permitido validar el sistema en condiciones reales y detectar tanto sus fortalezas como sus limitaciones.

Las herramientas utilizadas han demostrado ser adecuadas para un entorno académico y experimental, y el sistema ha sido suficientemente flexible como para adaptarse a distintas configuraciones, frecuencias y tipos de auriculares. Pese a los desafíos técnicos, como la latencia o la variabilidad subjetiva del tinnitus, se han encontrado soluciones prácticas que permiten plantear este enfoque como una alternativa prometedora.

Este trabajo sienta las bases para futuras mejoras que podrían incluir sistemas más adaptativos, interfaces personalizadas o aplicaciones móviles que faciliten el uso continuo y autónomo por parte de los pacientes.

4 Implementación

4.1 Introducción a la implementación

La fase de implementación representa el núcleo técnico del proyecto, en el que se pasa del diseño conceptual a la ejecución práctica del sistema de enmascaramiento del tinnitus. En este capítulo se detallan los distintos bloques que conforman el sistema, el proceso de programación en MATLAB y Python, las decisiones de diseño adoptadas, y los criterios empleados para realizar las pruebas experimentales.

El desarrollo se ha dividido en dos entornos complementarios:

- **MATLAB**, como entorno principal para la simulación, análisis espectral y generación de señales de prueba.

- **Python**, para la implementación del sistema en tiempo real, permitiendo captar sonido ambiental, filtrarlo y reproducirlo al instante.

Ambos entornos han sido fundamentales para contrastar enfoques: mientras que MATLAB ha ofrecido una plataforma robusta para validar el filtrado sobre señales sintéticas, Python ha sido una prueba experimental para evaluar la viabilidad de una solución funcional y adaptable para uso cotidiano.

Además del desarrollo de software, esta etapa incluyó pruebas auditivas con una paciente real, lo cual permitió obtener datos subjetivos relevantes sobre el impacto del tratamiento y guiar las decisiones técnicas según la respuesta percibida.

4.2 Implementación en MATLAB

El desarrollo técnico del proyecto se ha realizado principalmente en el entorno MATLAB, una herramienta ampliamente utilizada en el ámbito del procesamiento digital de señales. Su elección se justifica por la disponibilidad de funciones específicas para el diseño de filtros digitales, la facilidad para generar diferentes tipos de ruido y las capacidades de análisis espectral mediante la Transformada de Fourier.

4.2.1 Diseño del filtro notch

El sistema de enmascaramiento desarrollado en MATLAB se basa en la aplicación de un filtro notch, diseñado para atenuar una frecuencia específica del espectro sonoro. En este caso, se centra en los 3700 Hz, frecuencia aproximada del tinnitus de la paciente. Este tipo de filtro resulta útil en aplicaciones auditivas, ya que permite suprimir un tono sin alterar significativamente el resto del contenido espectral.

Elección del tipo de filtro

Se optó por implementar un filtro **IIR (Infinite Impulse Response)** frente a otras alternativas como los FIR (Finite Impulse Response), debido a su eficiencia computacional y a que, con menos coeficientes, permite lograr un estrecho rango de supresión. Esto es especialmente importante cuando se necesita eliminar una frecuencia muy concreta, como ocurre en el tinnitus tonal.

Los filtros IIR, aunque pueden presentar fase no lineal y riesgos de inestabilidad si no se diseñan correctamente, son más adecuados para eliminar una frecuencia específica utilizando pocos recursos. En este caso, se utilizó la función fdesign.bandstop de MATLAB con diseño tipo Butterworth, que proporciona una transición suave y sin ondulaciones.

Ajuste del ancho de banda

La anchura del filtro se definió fijando dos frecuencias de corte (3650 Hz y 3750 Hz). Con esto se buscó obtener un ancho de banda de **100 Hz** centrado en 3700 Hz, de modo que la frecuencia del tinnitus quedara completamente cubierta sin afectar de forma notable al resto del ruido.

Aunque en otros entornos como Python el filtro notch se define mediante el **factor Q**, en MATLAB se especifica directamente el ancho de banda, por lo que no fue necesario ajustar Q manualmente. No obstante, la lógica es la misma: cuanto mayor sea Q, más estrecha será la banda de supresión ($Q = \frac{f_o}{Bw}$).

Para comprobar visualmente el comportamiento del filtro diseñado, se ha utilizado la herramienta fvtool de MATLAB, que permite obtener la respuesta en frecuencia del sistema. Como se puede observar a continuación en la figura 4.1.

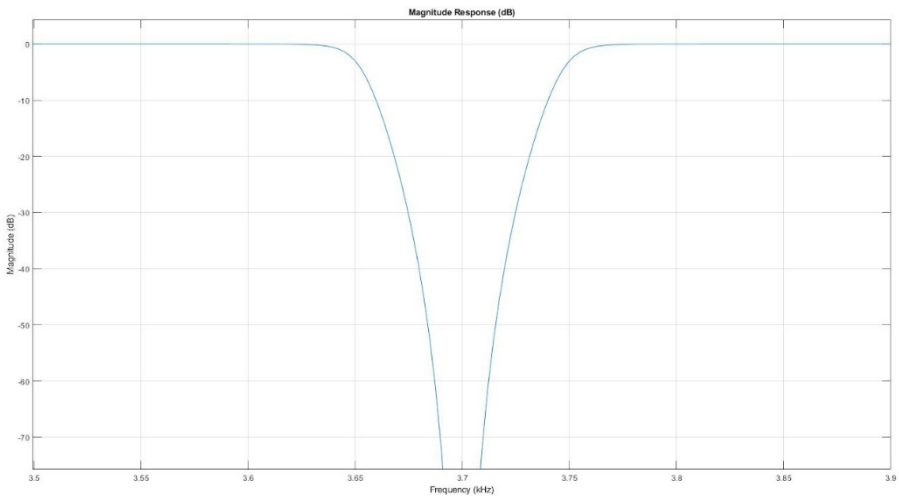

Figura 4.1: Respuesta en frecuencia del filtro notch tipo Butterworth centrado en 3700 Hz. La gráfica muestra la caída de ganancia en la banda de 3650–3750 Hz, con el resto del espectro conservado.

En la Figura 4.1 se observa la respuesta en frecuencia del filtro notch implementado, con una caída pronunciada de ganancia en la banda objetivo y una conservación adecuada del resto del

espectro. Este comportamiento confirma su utilidad para eliminar la componente del tinnitus sin comprometer la riqueza espectral del sonido enmascarador.

4.2.2 Visualización espectral de los diferentes ruidos

Con el objetivo de validar el correcto funcionamiento del filtro notch implementado en MATLAB, se realizó un análisis espectral de las señales generadas. Para ello, se representaron los espectros de magnitud (mediante transformada de Fourier) de los principales tipos de ruido utilizados: ruido blanco, ruido rosa, ruido marrón y ruido blanco modulado, tanto en su forma original como tras aplicar el filtrado en la banda de 3700 Hz ± 50 Hz.

En las siguientes figuras puede observarse cómo el filtro notch elimina eficazmente la energía en la frecuencia objetivo, generando un “vacío” en el espectro que coincide con la banda del tinnitus. Este comportamiento se aprecia con mayor claridad en los casos de ruido blanco y rosa, dado que presentan un contenido más uniforme en la banda media-alta del espectro.

En el caso del ruido marrón, la energía ya era muy baja en las frecuencias medias-altas incluso antes del filtrado, lo que explica su limitada utilidad como enmascarador en bandas superiores. Tras aplicar el filtro, la energía en la zona de 3700 Hz es prácticamente nula.

Respecto al ruido blanco modulado, se trata de una variante del ruido blanco en la que se aplica una modulación suave de la amplitud para generar una sensación más “natural” o relajante. Esta modulación no altera el contenido espectral, por lo que su espectro coincide con el del ruido blanco filtrado, y no se representa de forma independiente.

Ruido blanco

El ruido blanco es una señal aleatoria que contiene todas las frecuencias audibles con igual potencia, distribuidas uniformemente en el dominio espectral. Esta característica le otorga un perfil sonoro "plano", sin predominancia de bandas específicas, lo que lo convierte en uno de los sonidos más utilizados en terapias de enmascaramiento del tinnitus.

Desde el punto de vista del procesamiento digital de señales, el ruido blanco puede generarse en MATLAB mediante funciones como randn, que produce una secuencia de valores con distribución gaussiana de media cero. Esta señal presenta una densidad espectral de potencia constante a lo largo del espectro, lo que garantiza una cobertura eficaz en todo el rango de audición humana (aproximadamente de 20 Hz a 20 kHz).

En el contexto de este Trabajo de Fin de Grado, el ruido blanco se ha empleado como **sonido base** para implementar el filtrado notch centrado en la frecuencia del tinnitus.

Además de su solidez técnica, el ruido blanco resultó ser, durante las pruebas experimentales con la paciente, el tipo de sonido **mejor tolerado** y **más eficaz** en cuanto a la reducción perceptual del tinnitus. Su perfil sonoro fue descrito como relajante y no invasivo, en contraste con otras señales como el ruido rosa o marrón, que presentaban características más agresivas o difíciles de soportar en exposiciones prolongadas.

Esta preferencia subjetiva se correlaciona con la capacidad del ruido blanco para distribuir su energía de forma **homogénea**, facilitando un enmascaramiento auditivo efectivo sin necesidad de volúmenes elevados. Además, su contenido frecuencial completo asegura que cualquier componente tonal del tinnitus quede cubierto, especialmente cuando se le aplica un filtro de banda eliminada bien calibrado.

En resumen, el ruido blanco no solo ha sido la señal más sencilla de generar y analizar desde un punto de vista digital, sino también la más relevante en términos de aplicación práctica,

posicionándose como la opción más prometedora en este proyecto para el desarrollo de terapias de enmascaramiento adaptadas.

En la siguiente figura se muestra el espectro del ruido blanco original y filtrado:

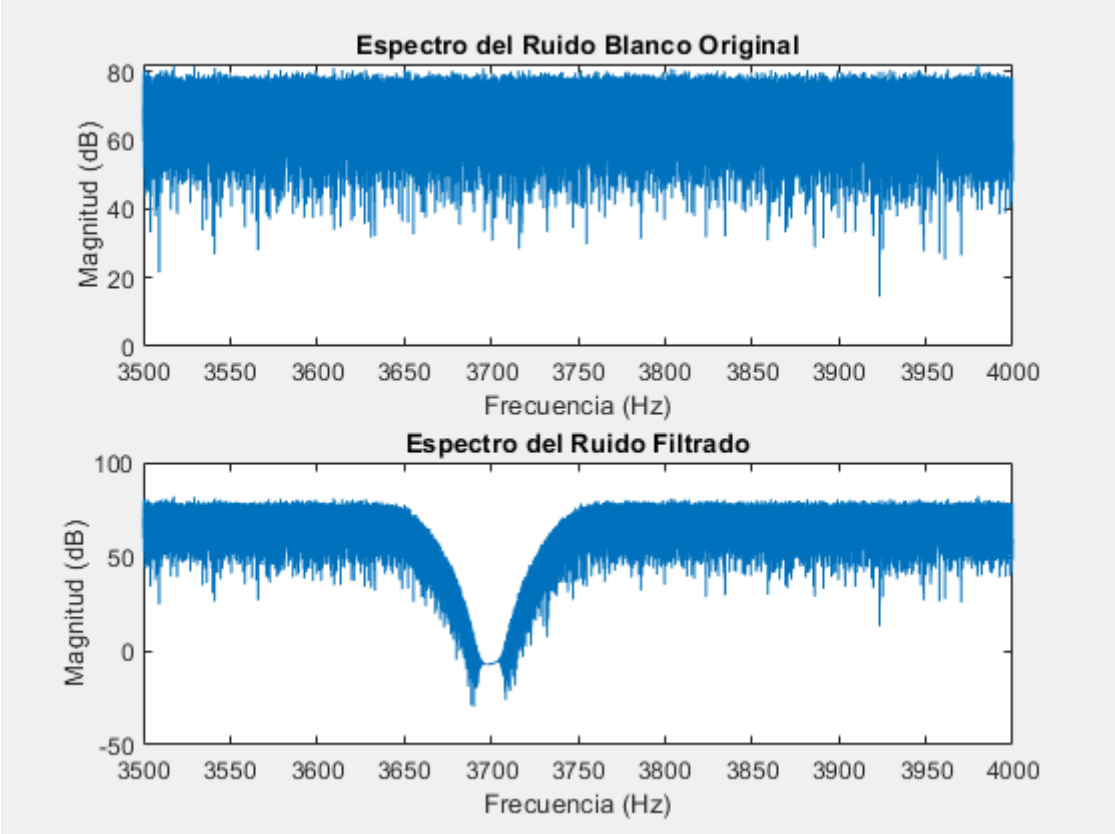

Figura 4.2: Espectro de magnitud del ruido blanco antes y después del filtrado notch centrado en 3700 Hz. Se aprecia una supresión clara de energía en la banda del tinnitus, mientras el resto del espectro se mantiene plano.

Ruido rosa

El ruido rosa es una señal aleatoria cuya densidad espectral de potencia disminuye progresivamente a medida que aumenta la frecuencia, concretamente con una pendiente de –3 dB por octava. Esto implica que cada octava tiene la misma energía total, lo que da lugar a una percepción auditiva más equilibrada y menos aguda en comparación con el ruido blanco.

En este proyecto, el ruido rosa se generó en MATLAB a partir de una señal de ruido blanco aplicando un filtro digital específico. Se utilizó una implementación sencilla basada en el filtro:

$$H(z) = \frac{1+0.5z^{-1}}{1-0.7z^{-1}}$$

En MATLAB: pink_noise = filter([1 0.5], [1 -0.7], white_noise);

Este filtro atenúa progresivamente las componentes de alta frecuencia, transformando el perfil plano del ruido blanco en la caída característica del ruido rosa. A nivel auditivo, el resultado es una señal más suave, menos brillante, y con un timbre más natural que puede asemejarse al sonido de la lluvia o del viento.

Al igual que con el resto de señales, se aplicó un filtro notch centrado en 3700 Hz para eliminar la frecuencia del tinnitus, generando así una variante de ruido rosa filtrado que fue evaluada durante las pruebas.

En ruido rosa presenta una mayor concentración de energía en las frecuencias bajas y medias, lo que lo convierte en una alternativa válida cuando el tinnitus se encuentra en esas bandas. En nuestro caso, al tratarse de un tinnitus tonal agudo (3700 Hz), la eficacia del ruido rosa fue limitada, ya que su contenido en esa región del espectro es menor.

En definitiva, el ruido rosa constituye una herramienta útil en terapias sonoras, especialmente por su perfil sonoro más natural y menos artificial que el ruido blanco. Sin embargo, su aplicación debe valorarse en función del perfil frecuencial del tinnitus de cada paciente y de su tolerancia subjetiva a distintos tipos de estimulación sonora.

A continuación, en las Figuras 4.3 y 4.4, se muestran los espectros de magnitud del ruido rosa, tanto en su versión original como tras aplicar el filtro notch. En la primera figura se presenta el espectro completo, mientras que en la segunda se incluye un zoom en la banda de 3500–4000 Hz para apreciar con mayor detalle la atenuación introducida por el filtrado.

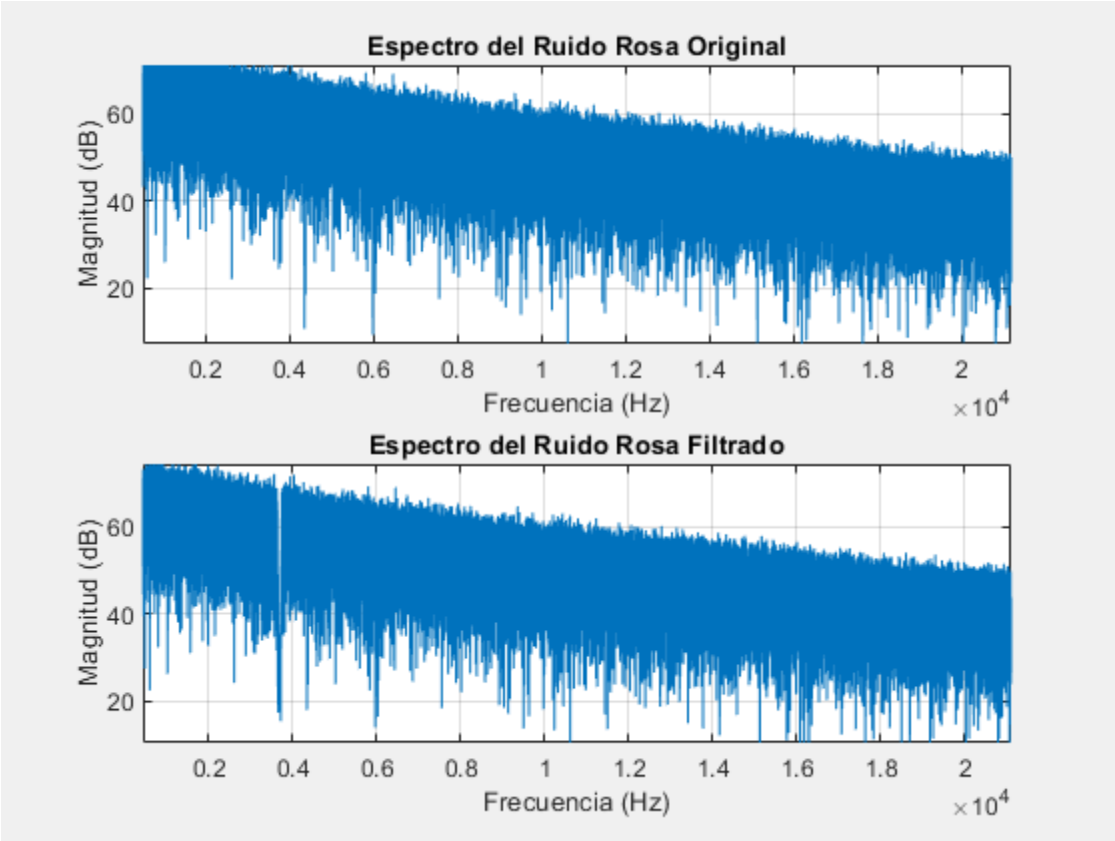

Figura 4.3: Espectro de magnitud del ruido rosa con y sin filtrado notch. Se mantiene la pendiente natural de –3 dB por octava, con una caída visible en la banda notch.

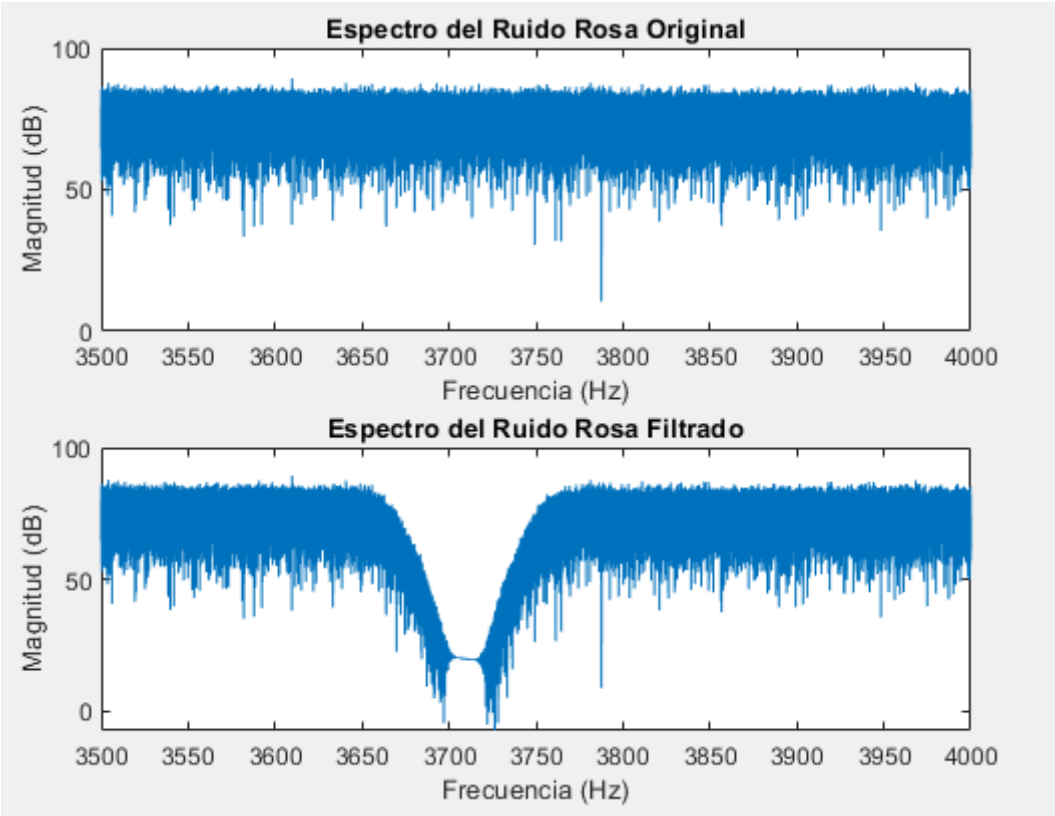

Figura 4.4: Espectro del ruido rosa (ampliado) para apreciar con más claridad la caída espectral característica del ruido rosa y la zona afectada por el filtro notch.

Ruido marrón

El ruido marrón, también conocido como brown noise, se caracteriza por una caída espectral de –6 dB por octava, lo que significa que concentra la mayor parte de su energía en las frecuencias más bajas. Su generación se basa en un proceso de caminata aleatoria o Brownian motion[15] (brown_noise = cumsum(white_noise);), que consiste en integrar acumulativamente una señal de ruido blanco. Esta operación amplifica las componentes de baja frecuencia y atenúa progresivamente las más altas, dando lugar a un sonido mucho más grave y profundo que el del ruido blanco o rosa.

Al analizar el espectro del ruido marrón original, se observa que la energía en la banda del tinnitus ya es muy baja. Esto implica que, incluso sin aplicar filtrado, su capacidad de enmascarar esa frecuencia es limitada. Sin embargo, al aplicar el filtro, se verifica que la energía en dicha banda se reduce aún más, alcanzando valores próximos a –∞ dB, como se aprecia a continuación en las figuras 4.5 y 4.6.

Esto demuestra que, aunque el filtro actúa correctamente, el resultado práctico es una señal prácticamente inaudible en la zona crítica, lo que limita su utilidad como enmascarador. Este comportamiento es coherente con la naturaleza matemática del ruido marrón, que no ha sido procesado ni ecualizado para su reproducción comercial.

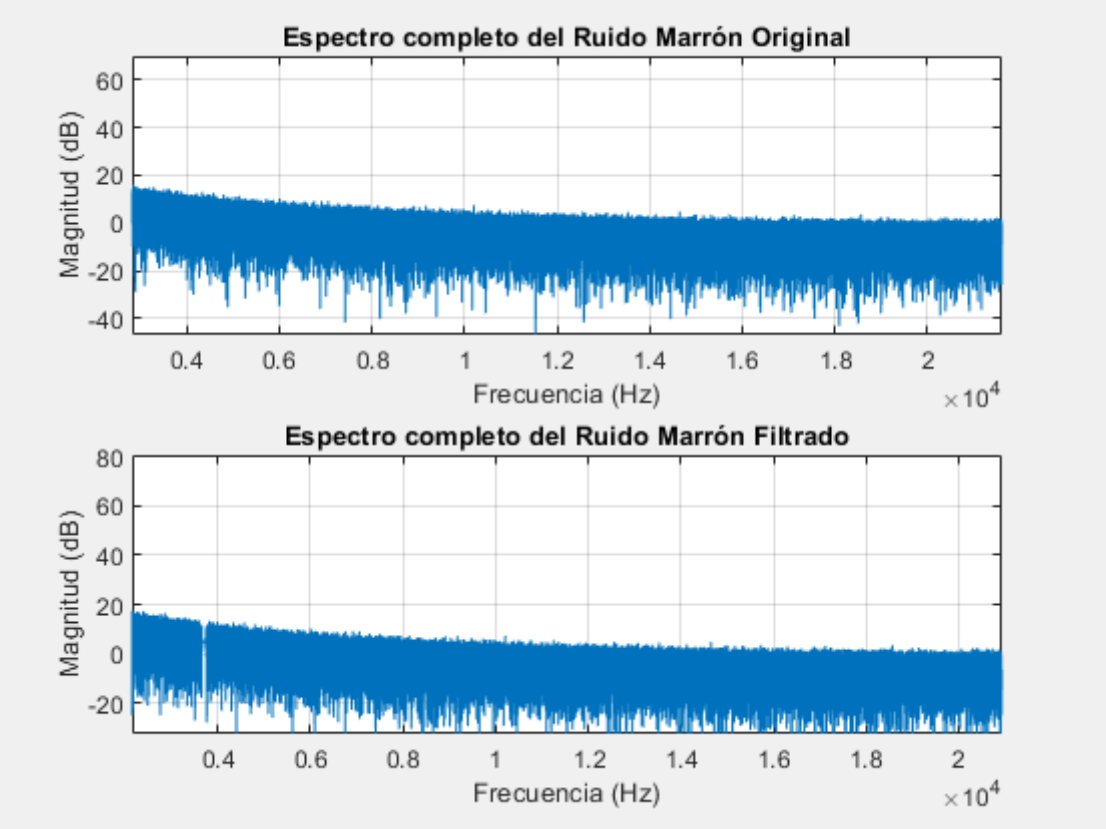

Figura 4.5: Comparación del espectro completo del ruido marrón antes y después del filtrado notch. Se observa una alta concentración de energía en bajas frecuencias y una atenuación progresiva hacia frecuencias medias y altas. La diferencia entre ambas curvas es prácticamente imperceptible debido a la escasa energía original en la banda

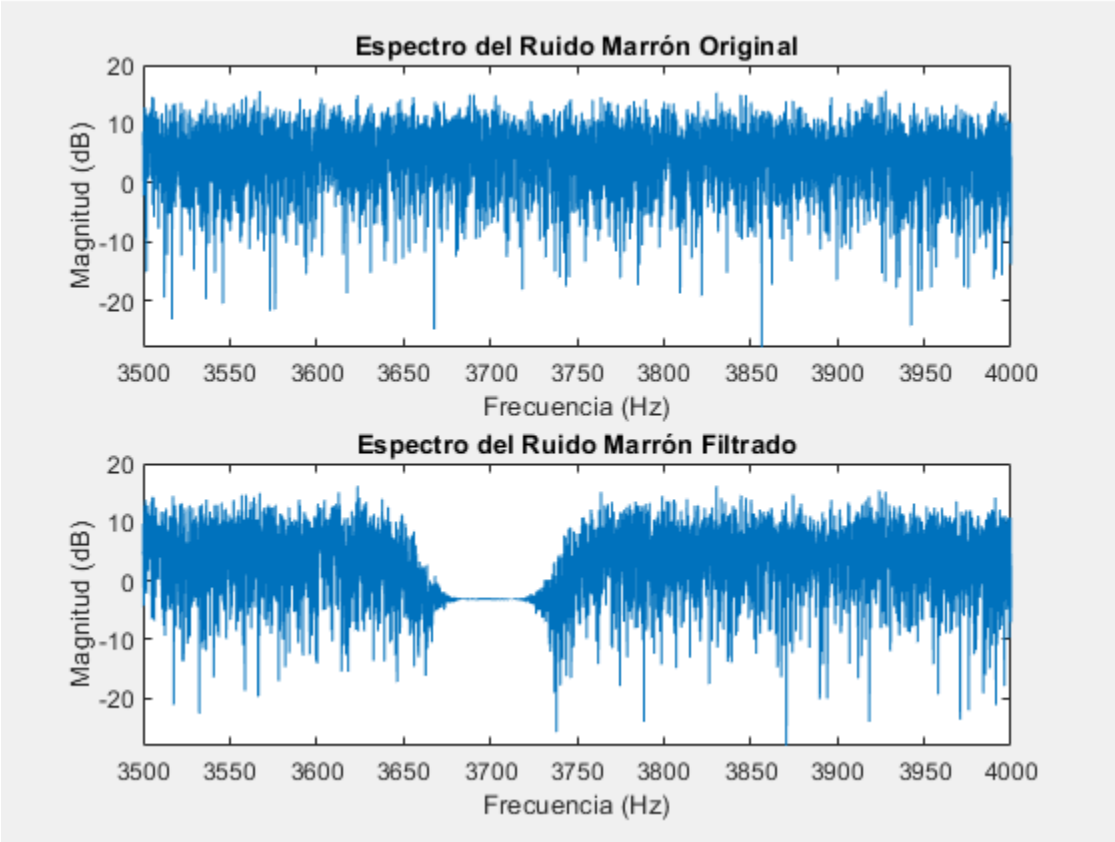

Figura 4.6: Zoom del espectro del ruido marrón entre 3500 y 4000 Hz, mostrando el efecto del filtro notch. Se aprecia cómo el contenido energético, ya de por sí muy bajo, es eliminado casi por completo tras el filtrado, con una caída en magnitud que alcanza valores cercanos a $-\infty$ dB.

Ruido blanco modulado

El ruido blanco modulado fue una de las variantes desarrolladas en este proyecto con el objetivo de explorar nuevas formas de enmascaramiento sonoro que pudieran resultar más agradables o eficaces para el paciente. A diferencia del ruido blanco estándar, cuya amplitud permanece constante en el tiempo, esta señal fue modificada aplicando una modulación de baja frecuencia sobre su envolvente.

Concretamente, se generó una señal de ruido blanco y se multiplicó por una onda sinusoidal de baja frecuencia (entre 0.2 y 0.4 Hz), de modo que la amplitud del sonido fluctuaba lentamente, simulando un patrón sonoro ondulante similar al de las olas del mar. Esta modulación buscaba no sólo variar el estímulo auditivo para evitar la fatiga del oyente, sino también analizar si los cambios dinámicos en la energía sonora influyen en la percepción del tinnitus.

Tras su generación, el ruido blanco modulado fue sometido al mismo proceso de filtrado notch que las demás señales, eliminando el componente tonal centrado en 3700 Hz.

Desde el punto de vista espectral, esta señal mantiene el mismo perfil que el ruido blanco clásico, ya que la modulación en amplitud no altera el contenido frecuencial de la señal (salvo por una ligera aparición de sidebands que, en este caso, no son relevantes debido al ancho espectral del ruido). Por tanto, no se ha considerado necesario incluir una nueva figura de espectro para esta variante.

4.2.3 Reproducción del sonido filtrado

Una vez generadas las señales de ruido blanco, rosa y marrón, y aplicado el filtrado notch correspondiente, se procedió a su reproducción directa en MATLAB con el fin de comprobar auditivamente el resultado del procesamiento.

Para ello, se utilizó la función soundsc, que permite reproducir señales normalizadas ajustando automáticamente el rango dinámico. Esta función fue especialmente útil para realizar una verificación preliminar de la calidad del sonido, la correcta aplicación del filtro y la claridad del resultado auditivo.

La reproducción se realizaba en el mismo entorno de desarrollo tras cada ejecución del script, permitiendo iterar rápidamente entre distintas configuraciones del filtro y del tipo de ruido.

4.2.4 Exportación del audio

Con el objetivo de facilitar la reproducción de las señales filtradas fuera del entorno de MATLAB y poder utilizarlas en pruebas reales con sujetos, se procedió a exportar los audios generados en formato .wav. Este formato es ampliamente compatible con y permite conservar la calidad original sin compresión.

Para la exportación, se utilizó la función audiowrite, especificando la señal filtrada, la frecuencia de muestreo (Fs) y el nombre del archivo de salida.

De esta forma, se generaron archivos individuales para cada tipo de ruido, lo que permitió su reproducción repetida en distintas plataformas durante las fases de prueba y validación. Los archivos resultantes se utilizaron posteriormente en pruebas auditivas con la paciente, como se describe en los capítulos siguientes.

4.3 Implementación en Python

Tras validar el funcionamiento del sistema en MATLAB mediante señales sintéticas y análisis espectrales, se procedió a implementar una versión funcional en Python que permitiera el procesamiento de audio en tiempo real. El objetivo era comprobar la viabilidad de utilizar este sistema como herramienta activa de enmascaramiento en el día a día del paciente.

4.3.1 Captura y reproducción en tiempo real

Para lograr el procesamiento en tiempo real se utilizó la librería sounddevice [16], que permite capturar el audio desde el micrófono y reproducirlo por los altavoces o auriculares sin necesidad de almacenamiento intermedio. Se implementó un **callback** de audio que lee, filtra y reproduce bloques de sonido en ciclos muy cortos.

Se ajustaron parámetros como el tamaño del bloque (blocksize) para minimizar la latencia sin comprometer la estabilidad.

4.3.2 Diseño del filtro notch

El filtro se diseñó con scipy.signal.iirnotch, equivalente al utilizado en MATLAB. Se parametrizó en función de la frecuencia objetivo f0 y el factor de calidad Q. Este diseño demostró ser eficaz en tiempo real, siempre que se controlara el tamaño del buffer y el rendimiento del sistema.

4.3.3 Pruebas de latencia y estabilidad

Durante el desarrollo se realizaron pruebas iterativas centradas en tres aspectos:

- **Latencia total del sistema.** La evaluación se realizó hablando mientras el sistema estaba activo con el fin de detectar el eco/desfase. Para reducirla se ajustó el tamaño de bloque (blocksize/CHUNK), pasando por varias configuraciones y adoptando finalmente CHUNK = 512 como compromiso entre respuesta y estabilidad. En sounddevice se empleó además el parámetro latency='low'.

- **Artefactos del filtrado.** El filtro notch se diseñó con scipy.signal.iirnotch y Q = 30 (fijo), buscando un notch estrecho que no degradara el resto de la señal. Se compararon implementaciones con filtfilt (fase compensada, mayor coste) y lfilter (secuencial, menor coste), la versión final utilizó lfilter por su mejor estabilidad en tiempo real. La verificación se hizo auditivamente y mediante inspecciones espectrales puntuales en MATLAB/Python.

- **Estabilidad/consumo.** Se priorizó que no aparecieran cortes ni desbordamientos de búfer. Para ello se monitorizaron los mensajes del backend de audio y se evitó la aparición de “input overflow / output underflow”. No se recogieron métricas numéricas de CPU, pero se comprobó en el monitor del sistema que la carga se mantenía estable durante sesiones prolongadas.

Parámetros finales adoptados: Fs = 44,1 kHz, mono, CHUNK = 512, notch con f0 ≈ 3,7 kHz y Q = 30, lfilter en el callback de sounddevice.

(Los scripts intermedios con otras configuraciones y pruebas se documentan en el Anexo 3. Entorno Python.)

4.4 Pruebas auditivas con paciente

Una parte esencial del proyecto consistió en validar el sistema con un sujeto real, permitiendo observar no solo su funcionamiento técnico, sino también su efecto práctico sobre la percepción del tinnitus. Para ello, se realizaron numerosas sesiones de prueba con la madre del autor como paciente voluntaria, quien presenta tinnitus tonal en un oído.

Estas pruebas permitieron analizar cómo influye el tipo de ruido, el filtrado aplicado, el tipo de auriculares y la duración de la exposición en la percepción del acúfeno antes, durante y después del tratamiento.

4.4.1 Diseño de las sesiones de prueba

Cada sesión se estructuró siguiendo una misma metodología:

- **Elección del tipo de ruido**: blanco, rosa, marrón o blanco modulado.
- **Duración fija**: series de entre 60 y 300 segundos según tolerancia.
- **Volumen ajustado**: se buscó un volumen cómodo que no generara fatiga ni molestia.
- **Valoración subjetiva**: la paciente describía la percepción del tinnitus antes, durante y después de cada sesión.

4.4.2 Equipos utilizados

Se probaron dos tipos de auriculares:

- **Auriculares convencionales**: con cancelación de ruido pasiva y buena respuesta en frecuencia. Ofrecían un sonido claro, pero producían cierta sensación de aislamiento.
- **Auriculares de conducción ósea**: permitían percibir el entorno y resultaban más cómodos para sesiones largas. Además, su modo de transmisión permitía evaluar un canal alternativo de estimulación auditiva.

En muchas sesiones se utilizaron **tapones** para ocluir el canal auditivo, con el fin de comprobar si el sonido percibido provenía principalmente por vía ósea.

4.4.3 Resultados observados

Los resultados fueron anotados sesión por sesión, dando lugar a observaciones como las siguientes:

- El **enmascaramiento** durante la reproducción fue efectivo en casi todas las sesiones, especialmente con ruido blanco filtrado.
- La **inhibición residual** (reducción del tinnitus tras finalizar el sonido) fue variable:
    - En algunas sesiones no se observó ningún cambio.
    - En otras, se reportó una leve disminución durante algunos segundos o minutos.
    - En una sesión concreta (26/06), la paciente afirmó **haber dejado de percibir el pitido durante varias horas**, lo que supuso el mayor éxito terapéutico registrado hasta el momento.

- El **tipo de auriculares influía notablemente**. La paciente mostró una clara preferencia por los de conducción ósea por su comodidad y percepción más natural.

- El **volumen excesivo** podía provocar fatiga auditiva o dolor de cabeza, incluso si mejoraba el enmascaramiento, por lo que se optó por mantener niveles suaves y tolerables.

4.4.4 Limitaciones de las pruebas

- La percepción del tinnitus **varía a lo largo del día** y está influida por factores externos como el estrés, el sueño o el cansancio.

- Las valoraciones son **subjetivas** y no pueden ser cuantificadas con precisión.

- El experimento se realizó con **una sola paciente**, por lo que no se pueden extraer conclusiones generalizables.

A pesar de ello, las pruebas permitieron confirmar la viabilidad técnica del sistema y proporcionaron datos muy valiosos para su análisis y mejora.

4.5 Comparativa entre métodos

Con el objetivo de determinar cuál de los métodos implementados ofrecía mejores resultados en términos de confort auditivo, efectividad del enmascaramiento y posibilidad de inhibición residual, se realizó una comparativa entre las distintas estrategias aplicadas durante las sesiones de prueba.

4.5.1 Ruido blanco vs. ruido rosa

- **Ruido blanco filtrado** fue el método que ofreció mejores resultados generales.
    - **Ventajas:** buena capacidad de enmascaramiento, sonido suave y tolerable, sensación de limpieza auditiva.
    - **Inconvenientes:** puede ser algo monótono tras largos periodos.
- **Ruido rosa filtrado** fue percibido como más agresivo o molesto por la paciente.
    - **Ventajas:** espectro más equilibrado a nivel perceptivo para algunos usuarios.
    - **Inconvenientes:** mayor incomodidad, menor efectividad subjetiva en la paciente utilizada.

4.5.2 Sonido modulado

Se probó una versión de ruido blanco modulado en amplitud para simular el efecto de "olas del mar".

- **Ventajas:** mayor dinamismo, sonido relajante.
- **Inconvenientes:** durante los momentos en que el volumen bajaba, el tinnitus volvía a notarse, rompiendo el efecto de enmascaramiento. Por este motivo, se descartó como método principal.

4.5.3 Auriculares convencionales vs. conducción ósea

- **Auriculares de conducción ósea** resultaron ser la opción preferida por la paciente:
    - No aíslan completamente del entorno.
    - Son cómodos durante sesiones prolongadas.
    - Permiten el uso de tapones, lo que ayudó a comprobar la vía de transmisión real del sonido.
- **Auriculares convencionales**:
    - Proporcionaban una mejor calidad sonora, pero generaban una sensación de encierro auditivo.
    - El aislamiento a veces potenciaba la percepción del tinnitus tras la sesión.

4.5.4 Filtrado vs. sonido sin filtrar

- En todas las comparativas, el uso de filtro notch se mostró más efectivo que el uso de ruido sin filtrar.
    - La paciente indicó que con el sonido filtrado el pitido se "fundía" con el ruido.
    - Sin el filtro, el tinnitus se seguía oyendo por encima del ruido o en paralelo a este.

Conclusión de la comparativa

El ruido blanco filtrado, reproducido mediante auriculares de conducción ósea, fue el método más tolerado y efectivo en este caso particular. Aunque la efectividad del sistema puede variar entre pacientes, esta combinación demostró ser la más prometedora para continuar con investigaciones futuras.

4.6 Conclusión del capítulo

A lo largo de este capítulo se ha presentado la implementación práctica del sistema de enmascaramiento del tinnitus, tanto en entorno de simulación (MATLAB) como en tiempo real (Python). Se han detallado los distintos bloques funcionales del sistema, el diseño y aplicación de filtros notch, la generación de ruido personalizado y los mecanismos de análisis espectral y evaluación subjetiva.

Las pruebas realizadas, tanto en condiciones simuladas como con una paciente real, han permitido validar el funcionamiento del sistema, identificar sus fortalezas y evidenciar los principales desafíos técnicos. La incorporación del filtrado específico en la frecuencia del tinnitus demostró ser más eficaz que el uso de ruido genérico, y el uso de auriculares de conducción ósea se consolidó como la opción más cómoda y efectiva.

A pesar de las limitaciones propias de la subjetividad del tinnitus y al reducido número de sujetos de prueba, los resultados obtenidos respaldan la viabilidad de este enfoque. El sistema desarrollado no solo funciona, sino que abre la puerta a posibles mejoras y aplicaciones reales en el ámbito clínico o doméstico.

5 Resultados y discusión

5.1 Introducción al análisis de resultados

Una vez completadas las fases de diseño e implementación del sistema de enmascaramiento, se procedió a realizar un conjunto de pruebas auditivas con una paciente real. El objetivo de estas pruebas fue evaluar, de forma cualitativa y subjetiva, el efecto de los distintos sonidos generados mediante filtrado digital sobre la percepción del tinnitus.

A través de múltiples sesiones distribuidas a lo largo de varias semanas, se recopilaron observaciones sobre el grado de enmascaramiento durante la reproducción, la posible aparición de inhibición residual una vez cesado el sonido, y la tolerancia general a cada tipo de estímulo auditivo. Esta sección resume los resultados obtenidos y analiza sus implicaciones.

5.2 Metodología de evaluación y sesiones realizadas

Para evaluar la efectividad del sistema propuesto, se diseñó una serie de sesiones de prueba estructuradas, realizadas con una paciente real. Las pruebas se llevaron a cabo en un entorno controlado doméstico y con condiciones auditivas estables (mínimo ruido ambiente, auriculares de calidad, volumen constante).

Objetivos de las sesiones

Cada prueba perseguía uno o varios de los siguientes objetivos:

- Evaluar el efecto de **enmascaramiento** durante la reproducción del sonido.
- Detectar si existía **inhibición residual** una vez finalizado el estímulo sonoro.
- Medir la **tolerancia auditiva** al tipo de ruido empleado y al volumen de exposición.
- Comparar la eficacia de diferentes **tipos de ruido** y **auriculares**.

Elementos comunes en todas las pruebas

- **Duración**: entre 60 y 300 segundos.
- **Frecuencia del notch**: 3700 Hz (identificada previamente con la paciente).
- **Tipos de ruido probados**: ruido blanco, ruido rosa, marrón, ruido blanco modulado.
- **Auriculares utilizados**: auriculares convencionales y de conducción ósea.
- **Condiciones auditivas**: en algunas pruebas se añadieron tapones para ocluir el canal auditivo y confirmar la propagación ósea.

Valoración subjetiva

La evaluación se realizó a través de una entrevista cualitativa justo antes, durante y después de cada sesión, con preguntas como:

- ¿Cómo percibes tu tinnitus antes de comenzar? (frecuencia, intensidad, presencia de fondo)?
- ¿Sigues oyendo el pitido durante el sonido?
- ¿Ha cambiado tu percepción del tinnitus después de la prueba?
- ¿Te ha resultado cómodo o molesto el ruido?
- ¿Qué diferencias notas respecto a la última sesión?

Se anotaron observaciones clave, incluyendo comentarios verbales de la paciente y variaciones perceptivas relevantes.

5.3 Resultados por tipo de ruido y configuración

A lo largo de las pruebas se analizaron distintos tipos de ruido y configuraciones, con el objetivo de identificar cuál ofrecía una mejor experiencia en cuanto a reducción de la percepción del tinnitus y comodidad auditiva. A continuación, se exponen los resultados obtenidos agrupados por tipo de sonido y configuración utilizada.

5.3.1 Ruido blanco filtrado

- **Auriculares convencionales**:
  - **Durante la reproducción**: la paciente indicó que el tinnitus desaparecía prácticamente por completo mientras se reproducía el sonido.
  - **Tras la prueba**: en general, el pitido volvía a escucharse con la misma intensidad que antes.
  - **Observaciones**: en algunas sesiones largas (300 s), comentó una ligera sensación de alivio, pero sin efecto sostenido.
- **Auriculares de conducción ósea** (con y sin tapones):
  - **Durante la reproducción**: el enmascaramiento fue efectivo incluso a volúmenes bajos.
  - **Tras la prueba**: se observó una **leve inhibición residual** en algunas sesiones (tinnitus más débil durante unos minutos).

- **Caso especial (26/06)**: la paciente manifestó que **había dejado de escuchar el pitido durante varias horas** tras una sesión con este método, siendo este el resultado más positivo del experimento.

5.3.2 Ruido rosa filtrado

- **Auriculares convencionales y óseos**:
  - **Durante la reproducción**: el enmascaramiento fue parcial, el tinnitus no se eliminaba del todo.
  - **Percepción del sonido**: la paciente describió este ruido como más “agobiante” o “incómodo” en comparación con el blanco.
  - **Tras la prueba**: no se detectaron cambios significativos en la percepción del acúfeno.

5.3.3 Ruido blanco modulado filtrado (tipo “olas”)

Auriculares de conducción ósea:

- **Durante la reproducción**: la modulación resultaba agradable al oído, pero en los momentos en los que el volumen descendía, la paciente volvía a percibir el pitido.
- **Tras la prueba**: no se observó inhibición residual. De hecho, en una sesión, la paciente indicó que percibía **un nuevo pitido dentro del propio sonido**, lo que llevó a descartar este método para pruebas futuras.

5.3.4 Ruido marrón filtrado

En la única sesión realizada con ruido marrón filtrado, la paciente reportó que el sonido resultaba prácticamente inaudible, incluso a volúmenes elevados. Esta experiencia subjetiva confirma lo observado en el análisis espectral: la falta de contenido energético en la zona afectada por el tinnitus lo convierte en un estímulo poco útil para el enmascaramiento.

Por este motivo, se decidió no continuar evaluando este tipo de ruido en las siguientes sesiones experimentales.

5.3.5 Sin filtrado (ruido blanco puro)

- **Comparación**: aunque el ruido blanco puro también generaba cierta sensación de alivio, la paciente comentó que seguía oyendo el pitido por encima o junto al ruido.

- **Conclusión**: el filtrado mediante notch fue más efectivo para enmascarar el tinnitus tonal.

Resumen general:

- **Mejor combinación:** Ruido blanco filtrado + auriculares de conducción ósea.
- **Menor efectividad:** Ruido rosa filtrado y sonido modulado (el marrón ni se alcanzaba a escuchar).
- **Importante:** El volumen debe mantenerse no muy alto para evitar fatiga auditiva.
- **Notable variabilidad:** Algunos días el tinnitus parecía más intenso de por sí, lo que influía en el resultado.

5.4 Observaciones relevantes y casos atípicos

Durante las numerosas sesiones de prueba realizadas, se recogieron una serie de observaciones cualitativas que aportan información útil más allá de los resultados generales. Estos comentarios, aunque subjetivos, ofrecen pistas sobre cómo podría optimizarse el sistema en el futuro y reflejan la complejidad inherente al tratamiento del tinnitus.

Variabilidad interdiaria

Uno de los factores más relevantes fue la **variabilidad del tinnitus a lo largo del tiempo**. En algunas sesiones, la paciente comentaba que el pitido ya era muy leve incluso antes de empezar. En otras, lo percibía especialmente molesto, sin una causa evidente.

"Hoy el pitido está como más fuerte desde esta mañana"
"Ayer apenas lo notaba, pero hoy vuelve a molestarme más"

Esta variación sugiere que la percepción del tinnitus parece estar influida por factores como el **estado de ánimo**, el **cansancio,** el **nivel de estrés**, el **sueño** o incluso la **alimentación**.

Colocación de los auriculares

Con los **auriculares de conducción ósea**, la paciente indicó en varias ocasiones que dependiendo de cómo se los colocaba, **percibía sonidos distintos**:

- En algunas posiciones, oía una combinación de dos sonidos: uno más agudo (como un silbido) y otro más grave (similar al sonido de una cascada).
- En otras, solo uno de esos componentes era perceptible.

Esta observación plantea que la forma de transmisión (ósea + aérea) puede generar fenómenos acústicos complejos que influyen en la experiencia final. Además, cabe destacar que la calidad de los auriculares empleados puede haber intensificado estas diferencias. En este caso se utilizaron unos auriculares de conducción ósea de gama baja (aprox. 30 €), adquiridos específicamente para el desarrollo del TFG, lo que probablemente limitó su fidelidad acústica y pudo contribuir a la percepción de variaciones según la colocación.

Efectos secundarios

- A volúmenes altos, incluso con sonidos agradables, la paciente llegó a **experimentar dolor de cabeza** tras sesiones prolongadas.

- Tras algunas pruebas, mencionó la necesidad de "**volver a reconocer su pitido original**", lo que sugiere un **efecto de adaptación auditiva temporal**.

Caso destacable del 26 de junio

En esta sesión la paciente relató que, al cabo de unas horas tras la prueba, **había dejado de escuchar el pitido tonal**, manteniéndose únicamente un ruido de fondo (similar al sonido reproducido). Es la **primera vez que se observó una inhibición residual clara y sostenida**.

"Fue anoche en silencio cuando me di cuenta. El pitido había desaparecido, solo quedaba el ruido de fondo. Me volvió más tarde, pero era como si una parte del acúfeno se hubiera apagado durante horas"

Este resultado refuerza la hipótesis de que, aunque los efectos no siempre son inmediatos ni duraderos, en ciertos momentos el sistema puede inducir una **disminución real y significativa del tinnitus**, al menos parcialmente.

5.5 Conclusión del capítulo

Las pruebas realizadas con el sistema desarrollado han permitido obtener resultados valiosos sobre la eficacia del enmascaramiento del tinnitus mediante procesamiento digital de señales. Aunque la naturaleza subjetiva del tinnitus y la participación de un único sujeto limitan el alcance de las conclusiones, los datos recogidos ofrecen varios puntos destacables:

- El **ruido blanco filtrado** con un notch centrado en la frecuencia del tinnitus fue el método más efectivo para reducir la percepción del acúfeno durante la reproducción del sonido.

- En ciertas sesiones, especialmente con **auriculares de conducción ósea**, se observó una **inhibición residual leve** tras la prueba. En un caso concreto, la paciente dejó de percibir el pitido durante varias horas, lo cual representa un hito en el proyecto.

- Otros métodos, como el **ruido rosa** o el **sonido modulado**, resultaron menos eficaces o tolerables.

- La variabilidad en la percepción del tinnitus a lo largo del tiempo, así como la **respuesta subjetiva a los estímulos auditivos**, reafirma la necesidad de desarrollar soluciones **personalizadas y ajustables**.

- La elección del tipo de auricular también tuvo un impacto notable, siendo los de **conducción ósea** mejor valorados por la paciente.

En conjunto, los resultados respaldan la viabilidad técnica del sistema y demuestran que el enfoque basado en DSP puede ser una herramienta útil para el tratamiento no invasivo del tinnitus. Aunque no se puede hablar de una cura, sí se ha logrado una **mejora temporal y subjetiva en la calidad de vida de la paciente**, lo cual valida la dirección del proyecto.

6 Estudio de sostenibilidad

Este capítulo analiza el proyecto desde una perspectiva de sostenibilidad, evaluando su impacto a nivel **social**, **económico** y **medioambiental**, así como su viabilidad futura. Aunque el sistema desarrollado no ha sido comercializado, su planteamiento técnico puede escalarse o adaptarse para crear soluciones accesibles y responsables.

6.1 Sostenibilidad social

El tinnitus afecta a un porcentaje creciente de la población, especialmente en contextos urbanos y entre personas expuestas a ruido prolongado. La falta de tratamientos definitivos o asequibles convierte esta condición en una fuente de frustración, estrés y sufrimiento para muchos pacientes.

Este proyecto propone una alternativa terapéutica basada en el uso de tecnología digital de bajo coste, con el objetivo de mejorar la calidad de vida de los afectados. En este sentido, su impacto social es muy positivo, ya que:

- Promueve el acceso a tratamientos no invasivos y personalizados.
- Se adapta a perfiles diversos sin necesidad de equipamiento clínico costoso.
- Puede aplicarse tanto en entornos médicos como domésticos.
- Fomenta el autocuidado y la autonomía del paciente.

Además, el sistema puede utilizarse tanto con auriculares de conducción ósea como con auriculares convencionales, lo que permite adaptarlo a las necesidades de cada usuario. Al ser una solución domiciliaria, no requiere desplazamientos a centros especializados, lo que resulta especialmente ventajoso para personas con movilidad reducida, problemas visuales o dificultades de acceso a la atención clínica presencial.

6.2 Sostenibilidad económica

Una de las ventajas clave del sistema propuesto es que **no requiere una gran inversión en hardware o licencias**. Los elementos necesarios para su funcionamiento (un ordenador, unos auriculares y software como MATLAB o Python) están al alcance de la mayoría de usuarios o instituciones educativas.

Desde un punto de vista económico:

- Puede implementarse como software libre o de código abierto.
- Es fácilmente integrable en apps móviles u otros dispositivos inteligentes.
- No implica gastos recurrentes, lo que reduce barreras de entrada.
- Podría convertirse en un producto escalable, adaptable a mercados con diferentes niveles de renta.

A largo plazo, este tipo de soluciones podrían reducir los costes derivados del tratamiento farmacológico, consultas médicas y bajas laborales asociadas al tinnitus crónico.

6.3 Sostenibilidad medioambiental

En comparación con otros tratamientos que requieren equipos médicos específicos, medicamentos o dispositivos electrónicos de un solo uso, esta solución presenta un impacto ambiental muy bajo. Se basa en recursos digitales reutilizables y evita el consumo de materiales no reciclables o contaminantes.

Además:

- Puede aprovechar dispositivos ya existentes (ordenador, móvil, auriculares).
- No requiere desplazamientos físicos, lo que reduce la huella de carbono.
- Promueve el uso racional de la tecnología y el desarrollo de soluciones sostenibles.

6.4 Perspectiva ética

El desarrollo y prueba de este sistema se realizó respetando los principios éticos fundamentales, incluyendo:

- Consentimiento informado de la paciente voluntaria.
- No invasividad del tratamiento.
- Transparencia en la recogida de resultados.

Además, el sistema está concebido como una **herramienta de ayuda**, no como un sustituto de una consulta médica profesional. En este sentido, se defiende un uso responsable de la tecnología, complementando la medicina tradicional.

7 Conclusiones y líneas futuras de mejora

7.1 Conclusiones

Este Trabajo de Fin de Grado ha abordado el problema del tinnitus tonal desde una perspectiva técnica, aplicando conocimientos de procesamiento digital de señales (DSP) para diseñar un sistema de enmascaramiento adaptado a las características individuales del paciente.

Entre los logros alcanzados destacan:

- **Desarrollo de un sistema completo en MATLAB** que permite generar ruido blanco, rosa, etc. con un filtro notch personalizado en la frecuencia del tinnitus.

- **Implementación en tiempo real con Python**, capaz de captar sonido ambiental, aplicarle el filtrado correspondiente y reproducirlo al instante.

- **Diseño y validación del sistema mediante pruebas reales** con una paciente afectada por tinnitus, obteniendo en algunos casos efectos de enmascaramiento efectivos e incluso inhibición residual temporal.

- **Comparación entre distintos tipos de ruido, filtros y dispositivos**, identificando configuraciones más tolerables y eficaces.

- **Planteamiento de una solución accesible, personalizable y basada en tecnología existente**, con bajo coste y potencial de impacto social.

Este trabajo demuestra que el filtrado selectivo de frecuencias es una vía prometedora en el tratamiento no invasivo del tinnitus, especialmente cuando se adapta a las necesidades específicas de cada paciente. Aunque no se plantea como una cura, el sistema ha demostrado **mejorar de forma subjetiva la percepción del tinnitus**, lo que puede traducirse en un aumento de la calidad de vida.

7.2 Líneas futuras de mejora

A pesar de los resultados obtenidos, este proyecto presenta ciertas limitaciones que abren la puerta a futuras mejoras:

- **Evaluación con más pacientes**, idealmente con diferentes perfiles de tinnitus (tonal, pulsátil, bilateral...), para obtener resultados más generalizables.

- **Adaptación automática del notch** mediante algoritmos de aprendizaje o calibración auditiva que analicen el sonido del entorno y ajusten el filtrado en tiempo real.

- **Integración en dispositivos portátiles o audífonos**, permitiendo un uso diario sin necesidad de equipos voluminosos.

- **Ampliación del repertorio sonoro**, explorando sonidos naturales, ambientes relajantes u otras variantes que puedan resultar más agradables para el usuario.

7.2.1 Posible desarrollo como aplicación móvil

Uno de los principales retos del sistema actual es su accesibilidad para el usuario final. Aunque los resultados obtenidos con las implementaciones en MATLAB y Python han sido satisfactorios a nivel experimental, su uso requiere ciertos conocimientos técnicos: comprensión básica de programación, manejo de interfaces como MATLAB o entornos de desarrollo en Python, y nociones sobre filtrado digital. Estas barreras dificultan su uso por parte de pacientes sin formación técnica.

Por ello, se propone como línea futura de mejora el desarrollo de una aplicación móvil que integre el sistema de enmascaramiento auditivo de forma intuitiva y accesible para cualquier usuario. Esta app permitiría:

- Ajustar de forma manual la frecuencia del tinnitus percibido por el paciente.

- Elegir entre distintos tipos de ruido (blanco, rosa, modulado, etc.)

- Regular el volumen según la tolerancia auditiva individual.

- Activar el filtrado específico para eliminar la frecuencia objetivo.

Una solución de este tipo eliminaría las barreras técnicas actuales, permitiendo que el sistema pueda ser utilizado de forma autónoma y personalizada, sin necesidad de conocimientos avanzados ni intervención profesional. Su portabilidad y facilidad de uso lo convierten en una alternativa prometedora para extender el alcance del tratamiento a un público más amplio.

Estas propuestas no solo enriquecerían el sistema desde el punto de vista técnico, sino que podrían acercarlo más a una solución viable y funcional en entornos reales.

Referencias

[1] Mayo Clinic, “Tinnitus, Symptoms & causes” url: https://www.mayoclinic.org/diseases-conditions/tinnitus/symptoms-causes/syc-20350156

[2] D. M. Baguley, D. J. McFerran, and D. A. Hall, “Tinnitus,” The Lancet, vol. 382, no. 9904, pp. 1600–1607, 2013, url: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23827090/

[3] L. E. Roberts, J. J. Eggermont, D. M. Caspary, S. E. Shore, J. R. Melcher, and J. A. Kaltenbach, “Ringing ears: The neuroscience of tinnitus,” *The Journal of Neuroscience*, vol. 30, no. 45, pp. 14972–14979, Nov. 2010. [Online]. url: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3073522/

[4] Cleveland Clinic, “Tinnitus (Ringing in the Ears),” url: https://my.clevelandclinic.org/health/symptoms/14164-tinnitus.

[5] National Institute on Deafness and Other Communication Disorders (NIDCD), “Tinnitus,” url: https://www.nidcd.nih.gov/health/tinnitus.

[6] Mayo Clinic, “Tinnitus, Diagnosis & treatment” url: https://www.mayoclinic.org/diseases-conditions/tinnitus/diagnosis-treatment/drc-20350162.

[7] Rauschecker, J.P., Leaver, A.M., & Mühlau, M. (2010). Tuning out the noise: limbic-auditory interactions in tinnitus. *Neuron*, 66(6), 819–826. url: https://www.cell.com/neuron/fulltext/S0896-6273(10)00325-9

[8] J. S. Phillips and D. McFerran, *“Tinnitus retraining therapy (TRT) for tinnitus,”* Cochrane Database of Systematic Reviews, no. 3, Art. no. CD007330, Mar. 2010, url: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7209976/

[9] Tinnitracks, “Treat Tinnitus with Your Own Music,” url: https://www.tinnitracks.com/en

[10] Signia, “Tinnitus Therapy,” url: https://www.signia.net/es-es/tinnitus/therapy/

[11] AudioNotch, “Terapia sonora para tinnitus,” url: https://audionotch.com/es/app/tune/

[12] MathWorks, “iirnotch,” MATLAB Signal Processing Toolbox. url: https://www.mathworks.com/help/dsp/ref/iirnotch.html

[13] MathWorks, "designfilt", Signal Processing Toolbox,. url: https://es.mathworks.com/help/signal/ref/designfilt.html

[14] SciPy, “scipy.signal.iirnotch,” SciPy v1.10.0 Reference Guide. url: https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.signal.iirnotch.html

[15] Encyclopaedia Britannica, “Brownian motion,” url: https://www.britannica.com/science/Brownian-motion

[16] Python Sounddevice, “sounddevice – Python module for cross-platform audio,” url: https://python-sounddevice.readthedocs.io/en/0.5.1/

[17] J. A. Vernon, Tinnitus: Experimental Findings and Prospects for Treatment. Academic Press, 1977.

[18] P. J. Jastreboff and J. W. P. Hazell, Tinnitus Retraining Therapy: Implementing the Neurophysiological Model. Cambridge Univ. Press, 1993.

[19] J. A. Henry, M. Jastreboff, and P. J. Jastreboff, “Assessment of patient preferences for different tinnitus management strategies,” J. Am. Acad. Audiol., vol. 13, no. 10, pp. 556–565, 2002.

[20] P. J. Jastreboff and M. M. Jastreboff, “Tinnitus retraining therapy (TRT) as a method for treatment of tinnitus and hyperacusis patients,” J. Am. Acad. Audiol., vol. 11, no. 3, pp. 162–177, 2000.

[21] H. Flor, D. Hoffmann, M. Struve, and E. Diesch, “Auditory discrimination training for the treatment of tinnitus,” Appl. Psychophysiol. Biofeedback, vol. 29, no. 2, pp. 113–120, 2004, url: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15208974/

[22] C. Herráiz, I. Diges, and P. Cobo, “Auditory discrimination therapy (ADT) for tinnitus management,” Prog. Brain Res., vol. 166, pp. 467–471, 2007, url: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17956811/

[23] E. Martinez-Devesa, R. Perera, P. Theodoulou, and A. P. Waddell, “Cognitive behavioural therapy for tinnitus,” Cochrane Database Syst. Rev., no. 9, Art. no. CD005233, Sep. 2010, url: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20824844/

[24] R. F. Cima et al., “Specialised treatment based on cognitive behaviour therapy versus usual care for tinnitus: A randomised controlled trial,” Lancet, vol. 379, no. 9830, pp. 1951–1959, May 2012, url: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22633033/

[25] P. Baldo, C. Doree, S. Molin, V. McFerran, and P. A. Cecco, “Antidepressants for patients with tinnitus,” Cochrane Database Syst. Rev., no. 9, Art. no. CD003853, 2012, url: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22972065/

[26] E. S. Elgoyhen and B. Langguth, “Pharmacological approaches to the treatment of tinnitus,” Drug Discov. Today, vol. 24, no. 8, pp. 1637–1645, Aug. 2019, url: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19931642/

Anexo

En este anexo se presentan los contenidos técnicos y experimentales que complementan el desarrollo del Trabajo de Fin de Grado. Su objetivo es proporcionar una visión más detallada de los recursos empleados, los códigos implementados y las pruebas realizadas, de manera que el lector pueda comprender en profundidad el procedimiento seguido y disponer de la información completa que sustenta los resultados expuestos en la memoria principal.

En primer lugar, se ofrece una descripción ampliada de las **terapias actuales contra el tinnitus**, analizando las principales aproximaciones empleadas en el ámbito clínico, sus ventajas y limitaciones, así como el nivel de evidencia científica disponible.

A continuación, se documentan los entornos de trabajo utilizados en la parte técnica del proyecto. Por un lado, se presentan los desarrollos en **MATLAB**, con fragmentos de código ilustrados y comentados, así como gráficas espectrales que comparan las señales antes y después del filtrado notch. Por otro lado, se incluye el **entorno Python**, donde se implementó un sistema en tiempo real capaz de captar audio, aplicar el filtrado y reproducir la señal procesada.

Finalmente, se recogen los **detalles de las pruebas experimentales** llevadas a cabo con sujetos de estudio. Se presentan tablas resumen de las sesiones realizadas, testimonios y observaciones sobre la tolerancia auditiva y la percepción del pitido, lo que permite evaluar de manera práctica la eficacia de los métodos propuestos.

De esta manera, el presente anexo reúne tanto la información técnica como los resultados prácticos, ofreciendo un soporte adicional para la validación del trabajo y facilitando su posible replicación o mejora futura.

Anexo 1. Terapias actuales contra el tinnitus

El tinnitus constituye un desafío clínico y científico debido a la ausencia de una cura definitiva y a la gran variabilidad en la percepción de los pacientes. A lo largo de las últimas décadas se han desarrollado diversas **terapias orientadas a aliviar los síntomas** y mejorar la calidad de vida de quienes lo padecen. Estas aproximaciones incluyen tanto métodos **sonoros** como estrategias **psicológicas, farmacológicas y experimentales**.

En esta sección se presentan las principales terapias actualmente empleadas o investigadas, agrupadas en diferentes categorías:

- **Terapia sonora**, basada en el uso de ruido blanco, rosa, marrón o sonidos naturales para enmascarar el pitido.

- **Tinnitus Retraining Therapy (TRT)**, fundamentada en el modelo neurofisiológico de Jastreboff y orientada a la habituación del paciente.

- **Auditory Discrimination Training (ADT)**, que utiliza tareas auditivas para promover cambios de plasticidad cerebral.

- **Terapia cognitivo-conductual (TCC)**, enfocada en el control de la ansiedad y la reducción del impacto psicológico del tinnitus.

- **Estimulación magnética transcraneal repetitiva (rTMS)**, técnica experimental que actúa directamente sobre áreas corticales relacionadas con la percepción auditiva.

- **Terapia farmacológica**, que emplea fármacos ansiolíticos, antidepresivos u otros moduladores, aunque con eficacia limitada y no uniforme entre pacientes.

Cada una de estas terapias se describe a continuación, analizando sus **principios de funcionamiento, ventajas, limitaciones y evidencias clínicas** disponibles.

Anexo 1.1. Terapia sonora

La **terapia sonora** es una de las aproximaciones más empleadas en el tratamiento del tinnitus. Su objetivo principal es **reducir la percepción del pitido mediante la introducción de un estímulo auditivo externo**, que puede ser ruido blanco, rosa, marrón u otros sonidos naturales (como el mar o la lluvia). La idea es enmascarar el tinnitus, disminuyendo el contraste entre el silencio y el pitido interno, y en algunos casos inducir fenómenos de inhibición residual, donde la percepción del acúfeno se atenúa incluso después de que cese el estímulo.

Existen diferentes variantes de terapia sonora:

- **Ruido blanco**: presenta un espectro plano en todas las frecuencias audibles, por lo que puede cubrir gran parte del rango auditivo. Es uno de los más utilizados por su capacidad de enmascarar tonos agudos.

- **Ruido rosa**: su densidad espectral disminuye a medida que aumenta la frecuencia (1/f). Se percibe como más natural y menos estridente que el blanco.

- **Ruido marrón**: con mayor energía en las frecuencias bajas ($1/f^2$), es más grave y puede resultar más relajante para algunos pacientes.

- **Sonidos naturales**: incluyen grabaciones de olas, lluvia o viento, que además del enmascaramiento ofrecen un componente psicológico positivo asociado a la relajación.

Ventajas

- Fácil de aplicar y ampliamente disponible (a través de aplicaciones, dispositivos médicos o audífonos enmascaradores).

- Puede reducir de forma inmediata la percepción del pitido.

- Bajo coste comparado con otras terapias.

- Puede adaptarse en intensidad y tipo de ruido según las preferencias del paciente.

Limitaciones

- El alivio es principalmente temporal: al cesar el sonido, el tinnitus suele reaparecer.
- No todos los pacientes lo toleran bien, especialmente a volúmenes elevados.
- No genera por sí mismo un proceso de habituación sostenida (a diferencia de TRT).
- La eficacia depende de la intensidad, duración y tipo de ruido empleado.

Evidencias clínicas

Diversos estudios han demostrado que el enmascaramiento sonoro puede reducir significativamente la percepción del tinnitus durante su aplicación, aunque los efectos a largo plazo son variables [17][18][19]. La American Tinnitus Association también lo reconoce como un enfoque útil para mejorar la calidad de vida, especialmente cuando se combina con otras terapias.

Anexo 1.2. Tinnitus Retraining Therapy (TRT)

La **Tinnitus Retraining Therapy (TRT)** es una terapia desarrollada por Jastreboff en la década de los noventa y se fundamenta en el modelo neurofisiológico del tinnitus. Según este modelo, el acúfeno no solo es una percepción auditiva, sino también un fenómeno con una fuerte carga emocional y psicológica, debido a la implicación de los sistemas límbico y autónomo.

El objetivo de la TRT no es eliminar el tinnitus, sino lograr que el paciente se habitúe a él, de manera que deje de ser una señal molesta o angustiante. Para ello, la terapia combina dos componentes principales:

1. **Consejería psicológica**: se proporciona al paciente información sobre el tinnitus, su origen y su funcionamiento. Esta fase busca reducir la ansiedad, el miedo y la percepción negativa asociada al síntoma.

2. **Terapia sonora de bajo nivel**: se utiliza un estímulo auditivo, habitualmente ruido blanco o modulaciones suaves, presentado a una intensidad inferior a la del tinnitus. La finalidad es disminuir el contraste entre el acúfeno y el ambiente sonoro, facilitando así la habituación.

Ventajas

- Tiene un enfoque integral, considerando tanto los aspectos fisiológicos como los psicológicos del tinnitus.
- Presenta resultados clínicos positivos en numerosos estudios, con una reducción significativa del impacto del acúfeno en la vida del paciente.
- Puede adaptarse a distintos perfiles de pacientes.

Limitaciones

- Requiere un proceso prolongado (entre 12 y 24 meses), lo que implica constancia y compromiso por parte del paciente.
- Su eficacia depende en gran medida de la correcta aplicación por parte de profesionales especializados.
- No elimina el tinnitus, sino que busca que el paciente conviva con él sin que tenga un impacto negativo.

Evidencias clínicas

Estudios publicados [20] y posteriores revisiones han mostrado tasas de éxito que superan el 70 % en la mejora de la calidad de vida de los pacientes. La TRT es actualmente una de las terapias más reconocidas y empleadas en entornos clínicos de referencia, especialmente en combinación con otras intervenciones.

Anexo 1.3. Terapia de Discriminación Auditiva (ADT)

La **Auditory Discrimination Training (ADT)** es una terapia relativamente reciente que busca aprovechar la plasticidad cerebral mediante la exposición del paciente a tareas de discriminación auditiva. A diferencia de otras terapias pasivas, la ADT requiere la participación activa del sujeto, que debe diferenciar estímulos sonoros en función de características como la frecuencia, la duración o la intensidad.

El fundamento de esta terapia es que el tinnitus está asociado a una reorganización anómala de la corteza auditiva. Mediante ejercicios repetidos de discriminación, se intenta inducir una reorganización funcional que reduzca la percepción del acúfeno.

En la práctica, la ADT suele aplicarse con paradigmas de tipo *oddball*: se presentan secuencias de sonidos estándar intercalados con estímulos diferentes (desviantes). El paciente debe identificar los sonidos distintos, entrenando así la precisión auditiva en torno a las frecuencias relacionadas con su tinnitus.

Ventajas

- Estimula la plasticidad cerebral de forma activa y dirigida.
- Ha mostrado eficacia en la reducción de la percepción del tinnitus en determinados grupos de pacientes.
- Puede adaptarse en complejidad según el nivel auditivo del paciente.

Limitaciones

- Requiere la implicación constante del paciente y sesiones frecuentes para ser eficaz.
- Los resultados pueden variar notablemente entre individuos.
- Es una técnica aún en fase de investigación, sin estandarización clara en los protocolos.

Evidencias clínicas

Estudios [21][22] han reportado mejoras en un porcentaje de pacientes tratados con ADT, especialmente en aquellos sometidos a programas intensivos de varias semanas. Sin embargo, los resultados no son homogéneos y se necesitan más investigaciones para establecer su eficacia a largo plazo.

Anexo 1.4. Terapia Cognitivo-Conductual (TCC)

La **Terapia Cognitivo-Conductual (TCC)** es una de las intervenciones psicológicas más utilizadas en el manejo del tinnitus. A diferencia de las terapias sonoras, su propósito no es reducir la intensidad del acúfeno, sino **modificar la forma en que el paciente lo percibe y reacciona emocionalmente ante él**.

El enfoque parte de la idea de que el sufrimiento asociado al tinnitus no se debe únicamente al sonido percibido, sino a la interpretación negativa, la ansiedad y la falta de control que este genera. La TCC ayuda a identificar pensamientos disfuncionales, creencias irracionales y patrones de conducta que intensifican la molestia, sustituyéndolos por estrategias más adaptativas.

Los programas de TCC para tinnitus suelen incluir componentes de reestructuración cognitiva, entrenamiento en técnicas de relajación, exposición gradual al sonido y aprendizaje de habilidades para reducir la ansiedad y el estrés asociados.

Ventajas

- Cuenta con un elevado nivel de evidencia clínica que respalda su eficacia en la mejora de la calidad de vida de los pacientes con tinnitus.
- No requiere equipamiento especializado, lo que la hace ampliamente accesible.

- Reduce síntomas asociados como el insomnio, la ansiedad y la depresión.

Limitaciones

- No reduce directamente la percepción del tinnitus, sino su impacto psicológico.
- Requiere un proceso terapéutico guiado por profesionales especializados en salud mental.
- La efectividad depende de la motivación y la adherencia del paciente al tratamiento.

Evidencias clínicas

Diversos estudios y metaanálisis han demostrado que la TCC es una de las intervenciones más efectivas para disminuir la angustia y el malestar provocado por el tinnitus [23][24]. Se recomienda especialmente en casos donde el tinnitus se acompaña de ansiedad o depresión, o cuando la percepción subjetiva de la molestia es elevada.

Anexo 1.5. Terapia farmacológica

La **terapia farmacológica** no constituye una cura específica para el tinnitus, pero se utiliza como un recurso complementario para aliviar síntomas asociados, como la ansiedad, el insomnio o la depresión. El fundamento de este enfoque es que el tinnitus no solo se percibe como un fenómeno auditivo, sino que su impacto está estrechamente relacionado con el estado emocional y psicológico del paciente.

Entre los fármacos más utilizados se encuentran:

- **Ansiolíticos y benzodiacepinas**: pueden reducir la ansiedad y mejorar la tolerancia al tinnitus, aunque con riesgo de dependencia.
- **Antidepresivos tricíclicos e inhibidores selectivos de la recaptación de serotonina (ISRS)**: empleados para disminuir síntomas depresivos y mejorar la calidad de vida.
- **Hipnóticos y melatonina**: ayudan a combatir los trastornos del sueño asociados al tinnitus.
- **Otros compuestos investigados**: como anticonvulsivantes o suplementos (zinc, ginkgo biloba), aunque con eficacia clínica controvertida y limitada.

Ventajas

- Puede mejorar significativamente síntomas secundarios como ansiedad, depresión o insomnio.

- Es de fácil aplicación y se adapta a distintos perfiles clínicos.
- Útil como tratamiento combinado junto con terapias sonoras o psicológicas.

Limitaciones

- No actúa directamente sobre la percepción del tinnitus, sino sobre sus efectos colaterales.
- Riesgo de efectos secundarios y, en algunos casos, de dependencia.
- La evidencia científica sobre su eficacia específica frente al tinnitus es limitada y contradictoria.

Evidencias clínicas

Revisiones sistemáticas indican que, aunque ciertos fármacos pueden mejorar el bienestar general de los pacientes, no existe un medicamento aprobado como tratamiento específico del tinnitus [25][26]. La terapia farmacológica se considera, por tanto, un apoyo sintomático más que un tratamiento causal.

Análisis crítico global de las terapias actuales

El conjunto de terapias disponibles para el tratamiento del tinnitus refleja la complejidad de esta condición y la ausencia de una cura definitiva. Todas las estrategias analizadas tienen en común el objetivo de **reducir el impacto del acúfeno en la vida del paciente**, ya sea a través del enmascaramiento sonoro, la habituación, la modulación cortical o la mejora del estado psicológico asociado.

La **terapia sonora** se destaca por su accesibilidad y sencillez, con resultados inmediatos pero generalmente transitorios. La **Tinnitus Retraining Therapy (TRT)** constituye una de las aproximaciones con mayor respaldo clínico, aunque exige un proceso prolongado y supervisión profesional. La **Terapia de Discriminación Auditiva (ADT)** y la **estimulación magnética transcraneal (rTMS)** representan líneas innovadoras que aprovechan la plasticidad cerebral, pero aún se encuentran en fases de investigación y con resultados heterogéneos. Por otro lado, la **Terapia Cognitivo-Conductual (TCC)** ofrece una sólida base de evidencia en la reducción del malestar emocional, aunque no actúa directamente sobre la percepción del tinnitus. Finalmente, la **terapia farmacológica** puede ser útil como apoyo sintomático, pero carece de eficacia específica frente al acúfeno y presenta limitaciones asociadas a los efectos secundarios y la variabilidad de respuesta.

En síntesis, las terapias actuales muestran un **enfoque paliativo más que curativo**, centrado en la mitigación de los síntomas y la mejora de la calidad de vida. La elección de una u otra

estrategia suele depender del perfil clínico del paciente y de la disponibilidad de recursos. A pesar de los avances, la evidencia clínica es desigual y en muchos casos limitada, lo que justifica la búsqueda de nuevas soluciones basadas en tecnologías emergentes como el procesamiento digital de señales.

Anexo 2. Entorno MATLAB

El desarrollo técnico del proyecto se ha realizado principalmente en el entorno **MATLAB**, una herramienta ampliamente utilizada en el ámbito del procesamiento digital de señales. Su elección se justifica por la disponibilidad de funciones específicas para el diseño de filtros digitales, la facilidad para generar diferentes tipos de ruido (blanco, rosa, marrón o fractal) y las capacidades de análisis espectral mediante la Transformada de Fourier.

En esta sección se documentan los principales fragmentos de código empleados, acompañados de explicaciones que permiten comprender su funcionamiento y finalidad dentro del proyecto.

Anexo 2.1. Filtro notch en MATLAB (filtronotch.m)

El elemento central del sistema de enmascaramiento implementado en MATLAB es el **filtro notch** o filtro de banda eliminada, diseñado específicamente para atenuar de manera selectiva la frecuencia del tinnitus sin alterar de forma significativa el resto del espectro sonoro. En este caso, el filtro se configuró para suprimir la banda en torno a 3,7 kHz, correspondiente al acúfeno identificado en el sujeto de prueba.

El diseño se realizó mediante un filtro digital de tipo **IIR Butterworth**, que ofrece una respuesta en frecuencia suave y plana en la banda pasante, evitando distorsiones en las frecuencias adyacentes. El filtro se definió con un orden de 10 y unos márgenes de corte ajustados a ±50 Hz alrededor de la frecuencia central, permitiendo así un enmascaramiento efectivo y natural.

La función filtronotch.m devuelve un objeto de filtro reutilizable que puede aplicarse posteriormente a cualquier señal de entrada (ruido blanco, rosa, marrón o fractal). Este diseño modular permite mantener una estructura clara en los diferentes scripts del proyecto, garantizando la coherencia en el proceso de filtrado y la posibilidad de ajustar fácilmente la banda eliminada si la frecuencia del tinnitus variase.

```
function Hd = filtronotch
%FILTRONOTCH Returns a discrete-time filter object.

% MATLAB Code
% Generated by MATLAB(R) 9.9 and Signal Processing Toolbox 8.5.
% Generated on: 02-Mar-2025 21:16:15

% Butterworth Bandstop filter designed using FDESIGN.BANDSTOP.

% All frequency values are in Hz.
Fs = 44100;  % Sampling Frequency

N   = 10;   % Order
```

```
Fc1 = 3650;  % First Cutoff Frequency
Fc2 = 3750;  % Second Cutoff Frequency

% Construct an FDESIGN object and call its BUTTER method.
h  = fdesign.bandstop('N,F3dB1,F3dB2', N, Fc1, Fc2, Fs);
Hd = design(h, 'butter');

% [EOF]
```

Anexo 2.2. Ruido rosa con filtrado notch (sin zoom) (sinzoom_mainROSA.m)

```
% Llamada a la función para crear el filtro notch y guardarlo en la workspace
notch_filter = filtronotch;  % Llama a la función para crear el filtro notch

fs = 44100; % Frecuencia de muestreo (Hz)
duration = 5; % Duración en segundos

% Generar ruido blanco
white_noise = randn(fs*duration, 1);

% Generar ruido rosa utilizando filtrado del ruido blanco
pink_noise = filter([1 0.5], [1 -0.7], white_noise);  % Filtro simple para ruido rosa

% Aplicar el filtro notch al ruido rosa
filtered_pink_noise = filter(notch_filter, pink_noise);

% Número de puntos para la FFT
N = length(pink_noise);
f = (0:floor(N/2)-1)*(fs/N);  % Solo hasta fs/2
spectrum_pink_noise = abs(fft(pink_noise));
spectrum_filtered_pink_noise = abs(fft(filtered_pink_noise));

% Recortar espectro a la mitad útil
spectrum_pink_noise = spectrum_pink_noise(1:floor(N/2));
spectrum_filtered_pink_noise = spectrum_filtered_pink_noise(1:floor(N/2));
% Visualizar espectros completos (sin limitar rango)
figure;

subplot(2,1,1);
plot(f, 20*log10(spectrum_pink_noise + eps));
title('Espectro del Ruido Rosa Original');
xlabel('Frecuencia (Hz)');
ylabel('Magnitud (dB)');
grid on;

subplot(2,1,2);
plot(f, 20*log10(spectrum_filtered_pink_noise + eps));
title('Espectro del Ruido Rosa Filtrado');
xlabel('Frecuencia (Hz)');
ylabel('Magnitud (dB)');
grid on;

% Reproducir el sonido original (ruido rosa)
disp('Reproduciendo sonido original (Ruido Rosa)...');
sound(pink_noise, fs);
pause(duration + 1);
```

```
% Reproducir el sonido filtrado
disp('Reproduciendo sonido filtrado...');
sound(filtered_pink_noise, fs);
```

Anexo 2.3. Ruido rosa con filtrado notch (análisis con zoom) (mainROSA.m)

```
% Llamada a la función para crear el filtro notch y guardarlo en la workspace
notch_filter = filtronotch;  % Llama a la función para crear el filtro notch

fs = 44100; % Frecuencia de muestreo (Hz)
duration = 180; % Duración en segundos

% Generar ruido blanco
white_noise = randn(fs*duration, 1);

% Generar ruido rosa utilizando filtrado del ruido blanco
% Este filtro emula la caída de 3dB por octava del ruido rosa
pink_noise = filter([1 0.5], [1 -0.7], white_noise);  % Filtro simple para ruido rosa



% Aplicar el filtro notch al ruido rosa
filtered_pink_noise = filter(notch_filter, pink_noise);

% Número de puntos para la FFT
N = length(pink_noise);
f = (0:N-1)*(fs/N); % Frecuencias en Hz

% Calcular el espectro de la señal original y filtrada con FFT
spectrum_pink_noise = abs(fft(pink_noise));
spectrum_filtered_pink_noise = abs(fft(filtered_pink_noise));



% Visualizar los espectros con FFT en el rango deseado
figure;

% Espectro del ruido rosa original



% Reproducir el sonido filtrado
disp('Reproduciendo sonido filtrado...');
sound(filtered_pink_noise, fs);  % Reproduce el ruido rosa filtrado
```

Anexo 2.4. Ruido marrón con filtrado notch (main_marron.m)

```
% main_marron.m
% Generación de ruido marrón filtrado con notch centrado en 3700 Hz

clear; close all; clc;  % Limpia todo

% Crear el filtro notch
notch_filter = filtronotch;  % Asegúrate de que filtronotch.m esté en la carpeta

fs = 44100;   % Frecuencia de muestreo (Hz)
duration = 10;   % Duración en segundos

% Generar ruido marrón (brownian noise)
N = fs * duration;
white_noise = randn(N,1);  % Ruido blanco
brown_noise = cumsum(white_noise);  % Integrar el ruido blanco (sumatorio acumulativo)
brown_noise = brown_noise / max(abs(brown_noise));  % Normalizar

% Aplicar el filtro notch al ruido marrón
filtered_brown_noise = filter(notch_filter, brown_noise);

% Reproducir el ruido filtrado
soundsc(filtered_brown_noise, fs);
disp('Reproduciendo ruido marrón filtrado...');

% Análisis espectral
Nfft = length(brown_noise);
f = (0:Nfft-1)*(fs/Nfft);

spectrum_brown = abs(fft(brown_noise));
spectrum_filtered_brown = abs(fft(filtered_brown_noise));

% Limitar el rango de visualización entre 3500 Hz y 4000 Hz
f_limit_min = 3500;
f_limit_max = 4000;

figure;

% Espectro del ruido marrón original
subplot(2,1,1);
plot(f(f >= f_limit_min & f <= f_limit_max), 20*log10(spectrum_brown(f >= f_limit_min & f <=
f_limit_max)));
title('Espectro del Ruido Marrón Original');
xlabel('Frecuencia (Hz)');
ylabel('Magnitud (dB)');
xlim([f_limit_min f_limit_max]);

% Espectro del ruido marrón filtrado
subplot(2,1,2);
plot(f(f >= f_limit_min & f <= f_limit_max), 20*log10(spectrum_filtered_brown(f >= f_limit_min & f
<= f_limit_max)));
title('Espectro del Ruido Marrón Filtrado');
xlabel('Frecuencia (Hz)');
ylabel('Magnitud (dB)');
xlim([f_limit_min f_limit_max]);
```

Anexo 2.5. Ruido blanco modulado con filtrado notch (main_blanco_modulado.m)

```
% main_blanco_modulado.m
% Ruido blanco filtrado + modulado en amplitud

clear; close all; clc;  % Limpia todo

% Crear el filtro notch
notch_filter = filtronotch;  % Asegúrate de que filtronotch.m esté en la carpeta

fs = 44100;   % Frecuencia de muestreo (Hz)
duration = 300;   % Duración en segundos
t = (0:1/fs:duration-1/fs)';  % Vector de tiempo

% Generar ruido blanco
white_noise = randn(length(t), 1);

% Crear una envolvente de volumen (onda sinusoidal lenta)
mod_freq = 0.25;  % Frecuencia de modulación en Hz (1 ciclo cada 4 segundos)
envelope = 0.5 * (1 + sin(2*pi*mod_freq*t));  % Varía entre 0 y 1

% Aplicar la modulación
modulated_white_noise = white_noise .* envelope;

% Aplicar el filtro notch al ruido blanco modulado
filtered_modulated_noise = filter(notch_filter, modulated_white_noise);

% Normalizar para evitar saturación
filtered_modulated_noise = filtered_modulated_noise / max(abs(filtered_modulated_noise));

% Reproducir el ruido filtrado modulado
sound(filtered_modulated_noise, fs);
disp('Reproduciendo ruido blanco filtrado y modulado...');

% Análisis espectral
Nfft = length(filtered_modulated_noise);
f = (0:Nfft-1)*(fs/Nfft);

spectrum_modulated = abs(fft(modulated_white_noise));
spectrum_filtered_modulated = abs(fft(filtered_modulated_noise));

% Limitar el rango de visualización entre 3500 Hz y 4000 Hz
f_limit_min = 3500;
f_limit_max = 4000;

figure;

% Espectro del ruido blanco modulado original
subplot(2,1,1);
plot(f(f >= f_limit_min & f <= f_limit_max), 20*log10(spectrum_modulated(f >= f_limit_min & f <=
f_limit_max)));
title('Espectro del Ruido Blanco Modulado (sin filtrar)');
xlabel('Frecuencia (Hz)');
ylabel('Magnitud (dB)');
xlim([f_limit_min f_limit_max]);
```

```
% Espectro del ruido blanco modulado filtrado
subplot(2,1,2);
plot(f(f >= f_limit_min & f <= f_limit_max), 20*log10(spectrum_filtered_modulated(f >= f_limit_min
& f <= f_limit_max)));
title('Espectro del Ruido Blanco Modulado Filtrado');
xlabel('Frecuencia (Hz)');
ylabel('Magnitud (dB)');
xlim([f_limit_min f_limit_max]);
```

Anexo 2.6. Script principal (MAINSCRIPT.m) del ruido blanco filtrado

```
% Llamada a la función para crear el filtro notch y guardarlo en la workspace
notch_filter = filtronotch;  % Llama a la función para crear el filtro notch

fs = 44100; % Frecuencia de muestreo (Hz)
duration = 300; % Duración en segundos

% Generar ruido blanco
white_noise = randn(fs*duration, 1);

% Aplicar el filtro notch al ruido blanco
filtered_noise = filter(notch_filter, white_noise);

% Reproducir el ruido filtrado
sound(filtered_noise, fs);

% Número de puntos para la FFT
N = length(white_noise);
f = (0:N-1)*(fs/N); % Frecuencias en Hz

% Calcular el espectro de la señal original y filtrada con FFT
spectrum_white_noise = abs(fft(white_noise));
spectrum_filtered_noise = abs(fft(filtered_noise));

% Limitar el rango de frecuencias entre 3500 Hz y 4000 Hz
f_limit_min = 3500;
f_limit_max = 4000;

% Visualizar los espectros con FFT en el rango deseado
figure;

% Espectro del ruido blanco original
subplot(2,1,1);
plot(f(f >= f_limit_min & f <= f_limit_max), 20*log10(spectrum_white_noise(f >= f_limit_min & f <=
f_limit_max)));
title('Espectro del Ruido Blanco Original');
xlabel('Frecuencia (Hz)');
ylabel('Magnitud (dB)');
xlim([f_limit_min f_limit_max]); % Limita el eje X entre 3500 Hz y 4000 Hz

% Espectro del ruido filtrado
subplot(2,1,2);
plot(f(f >= f_limit_min & f <= f_limit_max), 20*log10(spectrum_filtered_noise(f >= f_limit_min & f
<= f_limit_max)));
title('Espectro del Ruido Filtrado');
```

```
xlabel('Frecuencia (Hz)');
ylabel('Magnitud (dB)');
xlim([f_limit_min f_limit_max]); % Limita el eje X entre 3500 Hz y 4000 Hz

% Nombre del archivo de salida (puede ser .wav, que es muy compatible)
filename = 'ruido_blanco_filtrado.wav';

% Exportar el audio
audiowrite(filename, filtered_noise, fs);

disp('Archivo exportado correctamente como ruido_blanco_filtrado.wav');
```

Anexo 3. Entorno Python

Además de las simulaciones realizadas en MATLAB, el proyecto incluyó el desarrollo de un prototipo en Python para evaluar la viabilidad del procesamiento en tiempo real. Mientras que en MATLAB se generaron señales de prueba de forma offline, Python ofrecía la posibilidad de captar el sonido del entorno mediante un micrófono, aplicar un filtro notch centrado en la frecuencia del tinnitus (~3,7 kHz) y reproducir inmediatamente el audio procesado. De este modo se buscaba acercar el sistema a un escenario de aplicación práctica, en el que el usuario pudiera experimentar el enmascaramiento de su acúfeno de manera dinámica.

El diseño en Python requirió varias iteraciones de código, cada una con pruebas y mejoras específicas. El primer prototipo validó el flujo básico de entrada, filtrado y salida, pero presentaba limitaciones en cuanto a la latencia y estabilidad. Posteriormente se ajustaron parámetros como el tamaño de los buffers (CHUNK) y el método de aplicación del filtro (lfilter frente a filtfilt) para reducir retardos y artefactos. En una versión intermedia se incorporó incluso un módulo experimental de cancelación de ruido ambiente, con el fin de explorar funcionalidades adicionales. Finalmente, se alcanzó una configuración estable y ligera, basada en un bloque de tamaño medio y filtrado con lfilter, que permitió realizar sesiones prolongadas de escucha sin interrupciones perceptibles.

Este recorrido refleja las dificultades prácticas de trasladar un algoritmo de filtrado a un entorno de ejecución en tiempo real, y la importancia de los ajustes finos para equilibrar latencia, estabilidad y calidad perceptual. En las subsecciones siguientes se presentan los diferentes scripts implementados, acompañados de una explicación de sus características y de las motivaciones detrás de cada modificación introducida.

Anexo 3.1. Procesamiento en tiempo real con notch básico (filtrado_tinnitus1.py)

Este primer prototipo implementa el flujo mínimo de captura-procesado-reproducción en tiempo real. La señal del micrófono se adquiere a 44,1 kHz y se procesa en bloques mediante un filtro notch IIR centrado en la frecuencia del acúfeno (≈ 3,7 kHz), diseñado con iirnotch. El filtrado se aplica con lfilter dentro del callback del flujo de audio y el resultado se envía de inmediato a la salida. Se utiliza un único canal, tipo de dato en coma flotante y un tamaño de bloque por defecto del backend de sounddevice (al fijarse blocksize=0). Este diseño privilegia la simplicidad y

permitió validar que el pipeline en tiempo real funcionaba de extremo a extremo, a costa de una latencia y una estabilidad dependientes de la configuración por defecto del dispositivo.

Puntos a destacar: factor de calidad del notch ajustado a Q=30 (compromiso entre atenuación selectiva y estabilidad), manejo monofónico y uso de identificadores explícitos de dispositivo de entrada y salida para asegurar una ruta de audio conocida durante las pruebas.

```
import pyaudio

import numpy as np

import scipy.signal as signal

import sounddevice as sd


# Parámetros de audio

RATE = 44100  # Frecuencia de muestreo (Hz)

CHUNK = 1024  # Aumentar el tamaño del buffer para mayor estabilidad

TINITUS_FREQ = 3700  # Frecuencia del tinnitus a eliminar (Hz)

Q_FACTOR = 30  # Factor de calidad del filtro notch


# Diseño del filtro Notch

def notch_filter(data, fs, freq, q):

    b, a = signal.iirnotch(freq, q, fs)

return signal.filtfilt(b, a, data)  # Aplicar filtfilt para reducir latencia y evitar retraso de fase


# Callback para procesar audio en tiempo real

def callback(indata, outdata, frames, time, status):

    if status:

        print(status)

audio_data = indata[:, 0]  # Convertir entrada a un array 1D

filtered_audio = notch_filter(audio_data, RATE, TINITUS_FREQ, Q_FACTOR)

outdata[:, 0] = filtered_audio  # Enviar audio filtrado a la salida


# Configurar y abrir flujo de audio

def main():

    with sd.Stream(samplerate=RATE, blocksize=0, channels=1,
```

```
            dtype=np.float32, callback=callback, device=(2, 4), latency='high'):
print("Procesamiento de audio en tiempo real... Presiona Ctrl+C para detener.")
    while True:
pass  # Mantener el script en ejecución


if __name__ == "__main__":
main()
```

Anexo 3.2. Reducción de latencia y suavizado del filtrado (f_t1.py)

En esta segunda iteración se optimiza la interacción tiempo real introduciendo dos cambios principales. En primer lugar, se fija el tamaño de bloque a CHUNK=512, lo que reduce la latencia de búfer y hace el sistema más reactivo sin comprometer en exceso la estabilidad. En segundo lugar, se sustituye lfilter por filtfilt para aplicar el notch con filtrado hacia delante y hacia atrás. Esta técnica compensa la fase del filtro IIR y entrega una señal con fase prácticamente nula respecto al contenido que atraviesa el filtro, mejorando la calidad perceptual. El precio es que filtfilt requiere trabajar con el bloque completo y tiene un coste computacional superior, por lo que resulta clave encontrar un tamaño de bloque que no provoque subprocesamiento.

La configuración del flujo de sounddevice incorpora latency='low' y se mantiene Q=30 en el diseño del filtro. El resultado es un pipeline más estable y con menor retardo percibido, adecuado para sesiones de escucha continuada.

```
import pyaudio
import numpy as np
import scipy.signal as signal
import sounddevice as sd


# Parámetros de audio
RATE = 44100  # Frecuencia de muestreo (Hz)
CHUNK = 512  # Reducir tamaño del buffer para menor latencia
TINITUS_FREQ = 3700  # Frecuencia del tinnitus a eliminar (Hz)
Q_FACTOR = 30  # Factor de calidad del filtro notch


# Diseño del filtro Notch
def notch_filter(data, fs, freq, q):
```

```
    b, a = signal.iirnotch(freq, q, fs)
return signal.filtfilt(b, a, data)  # Aplicar filtro notch para reducir latencia

# Callback para procesar audio en tiempo real
def callback(indata, outdata, frames, time, status):
    if status:
        print(status)
audio_data = indata[:, 0]  # Convertir entrada a un array 1D
filtered_audio = notch_filter(audio_data, RATE, TINITUS_FREQ, Q_FACTOR)
outdata[:, 0] = filtered_audio  # Enviar audio filtrado a la salida

# Configurar y abrir flujo de audio
def main():
    with sd.Stream(samplerate=RATE, blocksize=CHUNK, channels=1,
                   dtype=np.float32, callback=callback, device=(1, 6), latency='low'):
print("Procesamiento de audio en tiempo real... Presiona Ctrl+C para detener.")
        while True:
pass  # Mantener el script en ejecución

if __name__ == "__main__":
main()
```

Anexo 3.3. Filtrado notch con cancelación parcial de ruido ambiente (f_t_anti.py)

En esta versión se mantuvo el filtrado notch en 3,7 kHz, pero además se exploró experimentalmente un bloque adicional destinado a reducir ruido ambiente de baja frecuencia. Para ello se implementó un filtro pasabajos con corte en 250 Hz y una inversión de fase, buscando comprobar si el sistema era capaz de atenuar componentes graves del entorno (como zumbidos de ventiladores o tráfico) sin comprometer la estabilidad.

Es importante señalar que este módulo no estaba orientado al enmascaramiento del tinnitus, ya que al limitar el espectro a 0–250 Hz elimina de por sí la frecuencia del acúfeno (~3,7 kHz). Su utilidad fue únicamente experimental, como prueba de estabilidad y confort subjetivo en entornos no silenciosos.

Observaciones: la cancelación por inversión de fase resultó sensible a la posición del micrófono y del transductor, y su efecto fue modesto y dependiente del entorno. Aun así, la combinación de notch selectivo y reducción parcial de bajas frecuencias mostró que el sistema podía adaptarse a diferentes escenarios de prueba, si bien la parte útil para el tinnitus seguía siendo exclusivamente el filtrado notch.

```
import pyaudio

import numpy as np

import scipy.signal as signal

import sounddevice as sd


# Parámetros de audio

RATE = 44100  # Frecuencia de muestreo (Hz)

CHUNK = 2048  # Aumentar el buffer para mayor estabilidad

TINITUS_FREQ = 3700  # Frecuencia del tinnitus a eliminar (Hz)

Q_FACTOR = 30  # Factor de calidad del filtro notch

NOISE_REDUCTION_FACTOR = 0.2  # Ajuste fino de la intensidad del antirruido

LOWPASS_CUTOFF = 250  # Ajuste de la frecuencia de corte para ruido ambiente


# Diseño del filtro Notch

def notch_filter(data, fs, freq, q):

    b, a = signal.iirnotch(freq, q, fs)

return signal.filtfilt(b, a, data)  # Aplicar filtro notch para reducir latencia


# Filtro pasa bajos optimizado para capturar solo el ruido de baja frecuencia

def lowpass_filter(data, fs, cutoff=LOWPASS_CUTOFF, order=2):  # Reducir el orden para mejor
rendimiento

    nyquist = 0.5 * fs

    normal_cutoff = cutoff / nyquist

b, a = signal.butter(order, normal_cutoff, btype='low', analog=False)

    return signal.filtfilt(b, a, data)
```

```
# Función de cancelación de ruido externo (inversión de fase ajustada)
def noise_cancellation(data):
    low_freq_noise = lowpass_filter(data, RATE)  # Filtrar solo el ruido ambiente
    return -low_freq_noise * NOISE_REDUCTION_FACTOR  # Aplicar inversión con ajuste de intensidad

# Callback para procesar audio en tiempo real
def callback(indata, outdata, frames, time, status):
    if status:
        print(status)
audio_data = indata[:, 0]  # Convertir entrada a un array 1D
filtered_audio = notch_filter(audio_data, RATE, TINITUS_FREQ, Q_FACTOR)
anti_noise = noise_cancellation(audio_data)  # Generar antirruido ajustado
    outdata[:, 0] = filtered_audio + anti_noise  # Mezclar filtrado con antirruido controlado

# Configurar y abrir flujo de audio
def main():
    with sd.Stream(samplerate=RATE, blocksize=CHUNK, channels=1,
                   dtype=np.float32, callback=callback, device=(1, 6), latency='low'):
print("Procesamiento de audio en tiempo real con cancelación de ruido optimizada... Presiona Ctrl+C para detener.")
        while True:
pass  # Mantener el script en ejecución

if __name__ == "__main__":
main()
```

Anexo 3.4. Procesamiento en tiempo real con notch estable (f_t.py)

El script f_t.py representa una versión consolidada y estable del sistema de procesamiento en tiempo real. Al igual que los prototipos anteriores, utiliza la librería sounddevice para capturar y reproducir audio, y SciPy para diseñar y aplicar el filtro notch centrado en la frecuencia del tinnitus (~3,7 kHz).

En este caso se define un tamaño de bloque intermedio (CHUNK=512), lo que ofrece un compromiso adecuado entre latencia perceptible y estabilidad de ejecución. El filtrado se implementa con la función lfilter, que aplica el filtro de manera secuencial sobre cada bloque de datos, garantizando un rendimiento ligero y suficiente para pruebas prolongadas.

El flujo general es el siguiente: la señal captada por el micrófono se convierte en un vector monofónico, se filtra con el notch diseñado (Q=30), y la salida resultante se envía de inmediato a los altavoces o auriculares. De esta forma, el usuario percibe el entorno sonoro en tiempo real, con la frecuencia del acúfeno atenuada.

Este script fue el más efectivo, por su sencillez, estabilidad y facilidad de configuración, y sirvió para evaluar de manera práctica la viabilidad del procesamiento en tiempo real como estrategia de enmascaramiento dinámico.

```
import pyaudio

import numpy as np

import scipy.signal as signal

import sounddevice as sd


# Parámetros de audio

RATE = 44100  # Frecuencia de muestreo (Hz)

CHUNK = 512  # Tamaño del buffer

TINITUS_FREQ = 3700  # Frecuencia del tinnitus a eliminar (Hz)

Q_FACTOR = 30  # Factor de calidad del filtro notch


# Diseño del filtro Notch

def notch_filter(data, fs, freq, q):

    b, a = signal.iirnotch(freq, q, fs)

    return signal.lfilter(b, a, data)  # Aplicar filtro notch


# Callback para procesar audio en tiempo real

def callback(indata, outdata, frames, time, status):

    if status:

        print(status)

audio_data = indata[:, 0]  # Convertir entrada a un array 1D
```

```
filtered_audio = notch_filter(audio_data, RATE, TINITUS_FREQ, Q_FACTOR)
outdata[:, 0] = filtered_audio  # Enviar audio filtrado a la salida


# Configurar y abrir flujo de audio
def main():
    with sd.Stream(samplerate=RATE, blocksize=CHUNK, channels=1,
                   dtype=np.float32, callback=callback, device=(1, 6)):
print("Procesamiento de audio en tiempo real... Presiona Ctrl+C para detener.")
        while True:
pass  # Mantener el script en ejecución


if __name__ == "__main__":
main()
```

Anexo 3.5. Conclusión del desarrollo en Python

Durante la implementación del sistema de enmascaramiento en tiempo real con Python, uno de los principales retos fue minimizar la latencia entre la captación del sonido ambiente y su reproducción filtrada. Para ello, se experimentó con distintos tamaños de bloque (*chunk*) y tasas de muestreo, buscando el mejor equilibrio entre **retardo perceptible y estabilidad del sistema**.

Se observó que, al reducir demasiado el tamaño del bloque para disminuir la latencia, el sistema comenzaba a mostrar errores como:

input overflow, output underflow

Estos errores indican que el sistema no es capaz de procesar o reproducir la señal a tiempo, provocando fallos audibles. Tras diversas pruebas, se determinó un tamaño de *chunk* óptimo que permitía mantener una latencia mínima viable sin comprometer la calidad del sonido.

No obstante, se identificó una limitación clave en este enfoque cuando se intenta utilizar en situaciones en las que el propio usuario habla mientras utiliza el sistema. Aunque el retardo introducido por el procesamiento no resulta problemático para escuchar el entorno (especialmente si se utilizan auriculares que aíslan bien del ruido exterior), **la propia voz del usuario no puede ser bloqueada de forma natural**, ya que se propaga internamente por vía ósea y también es captada por el micrófono, procesada y reproducida con un ligero retardo. Esta desincronización produce un efecto molesto de eco o “doble voz” que dificulta la comunicación fluida. Por este motivo, se descartó esta solución como opción de uso continuo, salvo que se consiga una **latencia extremadamente baja**, por ejemplo, mediante el uso de **microcontroladores especializados, procesadores embebidos como Raspberry Pi** u otras plataformas optimizadas para audio en tiempo real.

Anexo 4. Detalles de las pruebas realizadas

La última fase del proyecto consistió en la realización de pruebas experimentales con el fin de evaluar de manera práctica la eficacia de las señales generadas y procesadas en MATLAB. Estas sesiones se llevaron a cabo con un sujeto de estudio que presentaba un tinnitus tonal en torno a los 3,7 kHz.

El procedimiento general de las pruebas fue el siguiente: se reproducían los diferentes estímulos diseñados (ruido blanco, rosa, marrón y versiones moduladas en amplitud), todos ellos filtrados con un notch centrado en la frecuencia del acúfeno. La duración de las sesiones se adaptó en función del tipo de estímulo, con intervalos que oscilaron entre 60 segundos y 5 minutos, y en algunos casos se realizaron repeticiones consecutivas para analizar la consistencia del efecto.

Tras cada exposición, se recogieron de forma sistemática las observaciones del sujeto, prestando especial atención a tres aspectos clave:

1. La **eficacia del enmascaramiento** durante la reproducción del estímulo.

2. La posible aparición de **inhibición residual**, es decir, una reducción de la percepción del tinnitus tras cesar el sonido.

3. La **tolerancia subjetiva** a cada tipo de ruido, considerando factores como la comodidad auditiva, la preferencia entre estímulos y la aparición de molestias (p. ej., dolor de cabeza a volúmenes elevados).

El registro de estas sesiones se organizó en tablas resumen, con información sobre la fecha, el tipo de estímulo, la duración de la prueba, los comentarios del sujeto y las conclusiones extraídas. Además, se documentaron observaciones cualitativas adicionales, que aportan contexto a los resultados y permiten comprender la variabilidad en la percepción del tinnitus.

Es importante señalar que **no todas las sesiones experimentales pudieron documentarse en detalle**, ya que en muchos casos el registro se limitó a comentarios inmediatos tras la prueba. Por tanto, en este anexo se recogen únicamente aquellas sesiones de las que se obtuvo información sistemática y que permiten ilustrar el desarrollo del trabajo. La selección se ha realizado atendiendo a su relevancia en la evolución del proyecto, a las observaciones más significativas y a los momentos en que se produjeron avances o incidencias que modificaron el enfoque experimental.

Durante la realización de las pruebas, se mantuvieron conversaciones que resultaron claves para orientar el trabajo. A continuación se sintetizan algunas de las más relevantes:

No todas las sesiones experimentales realizadas pudieron documentarse en detalle, ya que en algunos casos el registro se limitó a comentarios inmediatos tras la prueba. En este apartado se presentan las conversaciones y observaciones más relevantes recogidas durante el proceso experimental, por su importancia en la evolución del trabajo y en la toma de decisiones metodológicas.

Anexo 4.1. Sesiones de abril 2025 (primeras pruebas)

Fecha	Estímulo aplicado	Duración	Condiciones de prueba	Observaciones del sujeto	Resultados
19/04/2025	Ruido blanco filtrado	60 s	Auriculares convencionales, volumen bajo	El pitido desaparece durante la exposición; reaparece al cesar el sonido.	Enmascaramiento efectivo; sin inhibición residual.
21/04/2025	Ruido blanco filtrado	180 s ×2	Auriculares convencionales	Tras la primera prueba, pitido igual; tras la segunda comentó que lo percibía “más lejano”, aunque dudaba si era efecto real o psicológico.	Enmascaramiento efectivo; posible inhibición residual leve.
22/04/2025	Ruido blanco filtrado	180 s ×2	Auriculares convencionales	Tras la primera prueba el pitido sigue igual; tras la segunda consecutiva, también sin cambios.	Enmascaramiento efectivo; sin inhibición residual.
22/04/2025	Ruido rosa filtrado	180 s	Auriculares convencionales	El ruido rosa se percibe agobiante, enmascara parcialmente pero no elimina el pitido. Prefiere ruido blanco.	Enmascaramiento parcial; sin inhibición residual.

24/04/2025	Ruido blanco filtrado	300 s	Auriculares convencionales, volumen inicialmente alto	El volumen alto provocó dolor de cabeza; al reducirlo, comentó que el pitido parecía algo más flojo al terminar, pero dudaba si era efecto real o fatiga auditiva.	Enmascaramiento efectivo; posible efecto de inhibición residual dudoso.

Tabla A.1. Resultados de las pruebas iniciales con auriculares convencionales y distintos tipos de ruido en abril de 2025.

En las primeras pruebas con ruido blanco se constató que el enmascaramiento durante la reproducción era inmediato y efectivo, ya que el pitido desaparecía mientras sonaba el estímulo. Sin embargo, tras detener la señal, el tinnitus regresaba con la misma intensidad. En una de las sesiones del 21 de abril la paciente señaló que el pitido parecía “más lejano”, aunque expresó dudas sobre si se trataba de un efecto real o de una percepción subjetiva, lo que puso de manifiesto la dificultad de confirmar la existencia de inhibición residual en esta fase inicial.

La comparación entre ruido blanco y ruido rosa (22 de abril de 2025) resultó especialmente esclarecedora. El ruido rosa filtrado se percibió como más agobiante y desagradable, además de no enmascarar por completo el tinnitus. Esta diferencia llevó a priorizar el uso del ruido blanco en las pruebas posteriores, dado que ofrecía una mayor comodidad auditiva y mejores resultados de enmascaramiento.

Otro aspecto relevante fue el impacto del volumen en la percepción y tolerancia. En una prueba del 24 de abril de 2025, con ruido blanco filtrado de cinco minutos de duración, un aumento inicial del volumen provocó dolor de cabeza en la paciente, que pidió reducir la intensidad. Posteriormente indicó que el pitido parecía más flojo, aunque no podía asegurar si se trataba de un efecto del estímulo o de la fatiga auditiva tras la exposición. Este episodio subrayó la necesidad de mantener siempre niveles de volumen confortables para garantizar la tolerancia al tratamiento.

Anexo 4.2. Sesiones de mayo 2025 (auriculares de conducción ósea y ruido modulado)

Fecha	Estímulo aplicado	Duración	Condiciones de prueba	Observaciones del sujeto	Resultados
14/05/2025	Ruido blanco filtrado	300 s	Auriculares óseos + tapones	Tras la prueba el pitido seguía igual; al quitar los tapones lo percibió más débil. Prefiere óseos frente a convencionales.	Enmascaramiento efectivo; sin inhibición residual.
14/05/2025	Ruido blanco filtrado	300 s	Auriculares óseos (sin tapones)	Percibió el pitido algo más débil tras la exposición, aunque volvió progresivamente a la intensidad inicial.	Enmascaramiento efectivo; inhibición residual leve y transitoria.
16/05/2025	Ruido blanco filtrado	300 s ×2	Auriculares óseos	Señaló que depende mucho de la colocación: percibe dos sonidos superpuestos (uno agudo tipo silbido y otro grave tipo cascada). Tras algunas pruebas el pitido se notaba más débil, aunque no de manera estable.	Enmascaramiento efectivo; resultados subjetivos variables.

17/05/2025	Ruido blanco modulado	300 s ×3	Auriculares óseos	Describió el estímulo como “más agradable, como olas del mar”. Tras dos pruebas apenas oía el pitido. En la tercera percibió un tono que provenía del propio sonido reproducido, no de su tinnitus.	Enmascaramiento efectivo; buena tolerancia; sin inhibición residual sostenida.
21/05/2025	Ruido blanco modulado	300 s	Comparativa óseos vs. auriculares con cancelación activa	Con cancelación activa percibía un sonido grave “como de cueva”, menos confortable. Prefirió auriculares óseos, con los que apenas percibía el pitido tras la sesión.	Enmascaramiento efectivo; mejor tolerancia con auriculares óseos.

Tabla 9.2. Resultados de las pruebas realizadas en mayo de 2025 utilizando auriculares de conducción ósea y comparativas con auriculares convencionales.

A partir de mayo de 2025 se introdujeron auriculares de conducción ósea, lo que generó observaciones adicionales de interés. La paciente describió la percepción de dos componentes sonoros superpuestos: uno agudo, semejante a un silbido, y otro más grave, similar a una cascada. Además, señaló que en determinadas colocaciones los auriculares podían intensificar uno u otro componente, y que tras algunas pruebas el pitido se percibía más débil, aunque el efecto no se mantenía en el tiempo. Estas observaciones evidenciaron las limitaciones de este tipo de dispositivos de gama básica, en los que coexisten transmisión ósea y aérea.

Las pruebas con ruido blanco modulado en amplitud, realizadas a mediados de mayo de 2025, aportaron información adicional. La paciente describió este estímulo como más agradable y relajante, comparable a “olas del mar”. Tras dos sesiones consecutivas afirmó que apenas percibía el pitido, si bien en una tercera prueba señaló que escuchaba un tono ajeno proveniente de los auriculares, no de su tinnitus. Este hallazgo sugirió que la modulación podía introducir artefactos indeseados, lo que llevó a descartar este estímulo como opción principal para el enmascaramiento.

Anexo 4.3. Sesiones de junio 2025 (hallazgos finales)

Fecha	Estímulo aplicado	Duración	Condiciones de prueba	Observaciones del sujeto	Resultados
22/06/2025	Ruido blanco modulado	300 s	Auriculares óseos	Sonido descrito como agradable, pero durante los mínimos de la modulación reaparecía el pitido. Prefirió el ruido blanco estático.	Enmascaramiento efectivo; menor preferencia.
24/06/2025	Ruido blanco filtrado	300 s	Auriculares óseos	Ese día el tinnitus se percibía más fuerte y el ruido resultó molesto.	Enmascaramiento efectivo; peor tolerancia subjetiva.
25/06/2025	Ruido blanco filtrado	300 s ×3	Auriculares óseos	Ese día el pitido era más flojo de base. Tras la primera prueba apenas lo escuchaba, pero tras pruebas adicionales volvió a percibirlo igual.	Inhibición residual leve y transitoria.
26/06/2025	Ruido blanco filtrado	300 s	Auriculares óseos	La paciente informó que dejó de percibir el componente tonal de su tinnitus, permaneciendo únicamente el ruido de fondo.	Inhibición residual clara y sostenida.

Tabla 9.3. Resultados de las pruebas finales en junio de 2025, donde se observaron los efectos más relevantes de inhibición residual.

En junio de 2025 se llevó a cabo una comparativa entre auriculares de conducción ósea y auriculares con cancelación activa de ruido. La paciente manifestó que con estos últimos percibía un sonido grave “como de cueva”, menos confortable, y reafirmó su preferencia por los auriculares óseos, ya que no aíslan completamente del entorno y resultan más naturales para un uso prolongado.

Finalmente, el 26 de junio de 2025 se registró el hallazgo más significativo de todo el proceso: la primera observación clara de inhibición residual sostenida. En esa ocasión la paciente informó que había dejado de percibir el componente tonal de su tinnitus, permaneciendo únicamente el ruido de fondo característico del mismo. Este resultado constituyó un hito en el trabajo, al demostrar que, bajo ciertas condiciones, era posible obtener un efecto más allá del simple enmascaramiento temporal.

En conjunto, estas observaciones reflejan la evolución del proceso experimental: desde la validación inicial de los estímulos, pasando por la identificación de limitaciones técnicas y perceptivas, hasta la aparición de un resultado clínicamente relevante. El registro de estas conversaciones y percepciones permitió ajustar la metodología y justificar las decisiones tomadas, como la preferencia por el ruido blanco frente al rosa, la exclusión del ruido modulado como estímulo principal o la elección final de auriculares de conducción ósea.

Anexo 4.4. Conclusiones

En conjunto, las pruebas realizadas muestran que el ruido blanco filtrado con notch fue el estímulo más eficaz y mejor tolerado para el enmascaramiento del tinnitus. En prácticamente todas las sesiones se logró la desaparición inmediata del pitido durante la reproducción, confirmando la efectividad del filtrado selectivo. Sin embargo, la inhibición residual tras detener el sonido fue difícil de obtener y, en la mayoría de los casos, se limitó a percepciones leves o transitorias. El ruido rosa no resultó adecuado, al percibirse como más agobiante y ofrecer un enmascaramiento incompleto, mientras que el ruido marrón matemático careció de utilidad práctica por su escasa sonoridad en frecuencias medias y altas. El ruido blanco modulado aportó un estímulo más dinámico y agradable, pero introdujo variaciones perceptivas que disminuían su eficacia en la supresión del pitido.

En relación con los dispositivos empleados, los auriculares de conducción ósea fueron los preferidos frente a los convencionales o los de cancelación activa, al ofrecer una experiencia auditiva más natural y compatible con la percepción del entorno. Las pruebas con este tipo de auriculares revelaron además que la colocación influía significativamente en la percepción, con la aparición de componentes sonoros adicionales (agudos y graves) propios de la propagación mixta ósea y aérea.

El hallazgo más relevante se produjo el 26 de junio de 2025, cuando se registró por primera vez una inhibición residual clara y sostenida del componente tonal del tinnitus, permaneciendo únicamente el ruido de fondo. No obstante, pese a las pruebas realizadas en la semana posterior, no se logró reproducir una inhibición residual de la misma intensidad, lo que sugiere que este fenómeno depende de factores adicionales aún no determinados y destaca la necesidad de investigaciones futuras para comprender mejor sus condiciones de aparición.