



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
E.T.S.I DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FINAL DE GRADO
GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS ESPECÍFICAS
DE TELECOMUNICACIÓN

Análisis comparativo de patrones de
amplitud acústica en una cavidad
resonante empleando distintos sistemas
de medida

Autor: Inmaculada Gómez Portillo

Tutor: Juan Blas Prieto

29 de agosto de 2019

TÍTULO:	Análisis comparativo de patrones de amplitud acústica en una cavidad resonante empleando distintos sistemas de medida
AUTOR:	Inmaculada Gómez Portillo
TUTOR:	Juan Blas Prieto
DEPARTAMENTO:	Teoría de la Señal y Comunicaciones e Ingeniería Telemática

TRIBUNAL

PRESIDENTE:	D. Evaristo José Abril Domingo
VOCAL:	D. Carlos Aguado Manzano
SECRETARIO:	D. Juan Blas Prieto
SUPLENTE:	D. Jaime Gómez Gil
SUPLENTE:	D. Ignacio de Miguel Jiménez
FECHA:	6 de Septiembre de 2019
CALIFICACIÓN:	

Resumen

En este Trabajo Fin de Grado se intenta realizar un análisis comparativo de patrones de amplitud acústica empleando distintos sistemas de medida en función de diversos factores ambientales que varían el patrón de onda estacionaria hallado en el interior de una cavidad resonante.

El experimento preexistente se basa en una cavidad resonante aislada en forma de cubo irregular, con paredes de fibrocemento, situada en una habitación cerrada sometida a variaciones en diversos factores ambientales tales como la humedad y la temperatura. En una de las caras de dicho cubo hay una apertura a través de la cual inciden ondas acústicas desde distintas direcciones hacia el interior de la cavidad, muestreándose la amplitud de la onda estacionaria en diversos puntos utilizando dos micrófonos ECM8000 (peores características) y M23 (mejores características) montados sobre un robot móvil.

Partiendo de los experimentos realizados con el micrófono ECM8000 anteriormente, el objetivo de esta investigación es realizar un estudio sobre la influencia de dichos factores ambientales en la propagación de señales acústicas en el interior de la cavidad resonante con un micrófono de mejores características como lo es el M23 y estudiar si la información tomada por dicho micrófono es fiable y con mejores resultados que la proporcionada por el micrófono ECM8000.

La conclusión final es que el efecto del cambio de temperatura y de humedad resulta determinante en la estabilidad de las medidas y por lo tanto es necesario diseñar un método de medida para tratar de subsanar esos problemas de estabilidad, tratando de mantener constante dentro de lo posible la longitud de onda de la señal. En este

trabajo se fundamenta ese método de medida y se comprueba que funciona adecuadamente. Por otra parte se ratifica que el micrófono M23, que tiene electrónica específica para estabilizar las medidas frente a las variaciones de temperatura también es un aliado para solucionar el problema, si bien con el uso de dicho micrófono no se soluciona el problema directamente.

PALABRAS CLAVE: humedad, temperatura, cavidad resonante, onda estacionaria.

Abstract

This Final Degree Project tries to perform a comparative analysis of acoustic amplitude patterns, using different measurement systems depending on different environmental factors that vary the stationary wave pattern found inside a resonant cavity.

The preexisting experiment is based on an isolated resonant cavity in the form of an irregular cube shape, with walls made of cement and metallic mesh, located in a closed room subject to variations in various environmental factors such as humidity and temperature. In one of the faces of this cube there is an opening through which the acoustic waves strike from different directions into the interior of the cavity, sampling the amplitude of the stationary wave in various points using two ECM8000 microphones (worse features) and M23 (best features) mounted on a mobile robot.

Based on the experiments carried out with the ECM8000 microphone previously, the objective of this research is to make a study on the influence of these environmental factors in the acoustic signals propagation inside the resonant cavity with a microphone of better characteristics which is the M23 and study if the information taken by this microphone is reliable and with better results than the one provided by the ECM8000 microphone.

The final conclusion is that the effect of temperature change and humidity is decisive in the stability of the measures and therefore, it is necessary to design a measurement method to deal with these stability problems, trying to maintain constant as much as possible the wavelength of the signal. This work is based on this measurement method and it is verified that works properly. On the other hand, it is

confirmed that the microphone M23, which has specific electronics to stabilize the measures against temperature variations, it is also an ally for solving the problem, although with the use of this microphone it is not possible to solve the problem directly.

KEYWORDS:humidity, temperature, resonant cavity, stationary wave.

Agradecimientos

Después de todos estos años de aprendizaje y esfuerzo quiero agradecer a todas esas personas que me han apoyado y ayudado durante este período.

Quiero agradecer a mi tutor Juan Blas Prieto por toda la ayuda proporcionada para la realización del Trabajo Final de Grado.

A mi familia por todo el apoyo y cariño que me han dado siempre, sobre todo en los momentos difíciles.

A mis amigos de toda la vida y a los que han aparecido recientemente en mi vida por todo el ánimo que me habéis dado durante este proceso.

A mis compañeros por toda la ayuda que nos hemos proporcionado cuando lo necesitábamos.

Y cómo no agradecerte a Adelino Font Ballester por toda la ayuda, ánimo y cariño que me has dado para este empujón final.

Muchas gracias a todos de corazón.

Índice general

1	Introducción	1
1.1	Ámbito del tfg	1
1.2	Medios	3
1.2.1	Cavidad resonante	3
1.2.2	Generador de funciones	3
1.2.3	Amplificador	4
1.2.4	Analizador	5
1.2.5	Alimentación fantasma para los micrófonos	6
1.2.6	GPIB-LAN bridge	6
1.2.7	Arduinos	7
1.2.8	Micrófono de medida ECM8000	10
1.2.9	Micrófono de medida M23	10
1.2.10	Desplazamiento del micrófono en el interior de la cavidad	11
1.2.11	Fuente de ondas acústicas	13
1.2.12	Ordenador central	14
1.2.13	Sistema de desplazamiento del emisor externo a la cavidad	16
1.2.14	Medios software	17
1.3	Objetivos	17
1.4	Fases de desarrollo	18
2	Análisis del problema	21
2.1	Velocidad del sonido	22
2.1.1	Influencia de humedad	26
2.1.2	Influencia de la temperatura	26
2.1.3	Influencia de la presión	28
2.1.4	Función para calcular la velocidad del sonido	28
2.2	Atenuación del sonido	30
2.2.1	Influencia de humedad	30

2.2.2	Influencia de la temperatura	31
2.2.3	Influencia de la presión	32
2.2.4	Función para calcular la atenuación del sonido	32
2.3	Refracción del sonido en la atmósfera	33
2.4	Inestabilidad temporal en los patrones de interferencia	33
2.5	Propuesta para estabilizar los patrones de interferencia	36
2.6	Teoría sobre la influencia de la humedad y de la temperatura	38
2.7	Influencia del número de rayos recibido por los micrófonos en la estabilidad de las medidas	38
3	Resultados	41
3.1	Ensayos usando frecuencia constante	41
3.2	Ensayos usando λ constante	56
4	Conclusiones y líneas futuras	73
	Índice de figuras	75
	Índice de cuadros	79
	Bibliografía	81

Capítulo 1

Introducción

Este trabajo consiste en determinar la manera en que influyen factores ambientales en la propagación de señales acústicas en el interior de la cavidad resonante con un micrófono de mejores características que el estudiado anteriormente, es decir, estudiando la información proporcionada por el micrófono M23 en comparación con el micrófono ECM8000.

Hay que comparar las medidas de amplitud del micrófono M23 (con electrónica para compensar las variaciones de temperatura) con las del micrófono ECM8000 en diferentes condiciones de temperatura y de humedad, utilizando sistemas de alimentación y variando el emisor de señal acústica.

Se pretende conseguir mejores resultados con este nuevo micrófono M23 que con el ECM8000.

Contenido

1.1	Ámbito del tfg	1
1.2	Medios	3
1.3	Objetivos	17
1.4	Fases de desarrollo	18

1.1. Ámbito del tfg

El experimento es llevado a cabo en una habitación cerrada sometida a variaciones de humedad y temperatura debidas fundamentalmente a las variaciones en las con-

diciones atmosféricas del exterior del edificio. Consideramos despreciable el efecto de las variaciones de presión en la propagación del sonido frente al efecto que tienen las variaciones de humedad y temperatura. Como podemos ver en la figura 1.1, el experimento cuenta con una cavidad resonante aislada, con forma de cubo irregular y con una apertura cuadrada en el centro de una de sus caras.



Figura 1.1: Experimento desarrollado

En el interior de dicha cavidad hay un robot móvil. A través de la apertura cuadrada que se observa en la parte frontal de la cavidad, inciden ondas acústicas desde distintas direcciones hacia el interior de la cavidad. Dentro de la cavidad se muestrea la amplitud de la onda estacionaria en una malla de muestreo bidimensional plana. Se pueden utilizar dos micrófonos distintos (M23 y ECM8000) montados sobre ese robot móvil. El sistema de motores permite situar con libertad los micrófonos dentro de la cavidad, midiendo el valor eficaz de la perturbación sonora.

1.2. Medios

Para el protocolo de toma de medidas de nuestro experimento y debido a la complejidad que éste presenta, vamos a describir de forma detallada los dispositivos utilizados en dicho experimento con el objetivo de comprender cada una de las partes que han dado lugar a nuestro sistema.

Además de los dispositivos empleados, vamos a explicar también los medios software que hemos utilizado.

1.2.1. Cavidad resonante

La cavidad resonante de nuestro experimento es la mostrada en la figura 1.2 , la cual tiene forma de cubo irregular, mide 1 metro de lado, presenta paredes de fibrocemento y aristas realizadas mediante perfiles de aluminio. Las paredes opuestas no son exactamente paralelas entre sí, con el objeto de enriquecer los patrones de interferencia en el interior de la cavidad. La cavidad presenta una apertura cuadrada en una de sus caras, concretamente en el alzado de la cavidad, a través de la cual inciden ondas acústicas en su interior desde distintas direcciones. La fuente externa cuenta con un sistema de motores para realizar movimientos automatizados y así controlar el ángulo de incidencia de las ondas acústicas hacia el interior de la cavidad.

La cavidad está recubierta en su cara frontal, salvo en la apertura, por una capa de material absorbente de ondas acústicas, con el fin de reducir las reflexiones dentro de la habitación y aumentar la prevalencia de la apertura como fuente de ondas acústicas hacia el interior de la cavidad.

En las figuras 1.3, 1.4, 1.5 y 1.6 mostramos el resto de caras que componen la cavidad resonante.

1.2.2. Generador de funciones

En la figura 1.7 aparece el generador de funciones. Dicho dispositivo es empleado como generador de tonos, es decir, señales de banda lo más estrecha posible centradas en la frecuencia del tono. Este generador de tonos es conectado a un amplificador, que a su vez proporciona la señal de entrada a un altavoz, con la impedancia de salida apropiada.



Figura 1.2: Alzado de la cavidad resonante con apertura.



Figura 1.3: Perfil izquierdo que presenta la cavidad resonante.

1.2.3. Amplificador

El amplificador de la figura 1.8 magnifica la amplitud de las señales eléctricas que produce el generador de funciones, proporcionando adaptación de impedancia al altavoz. Se trata de un amplificador Denon PMA-520AE.

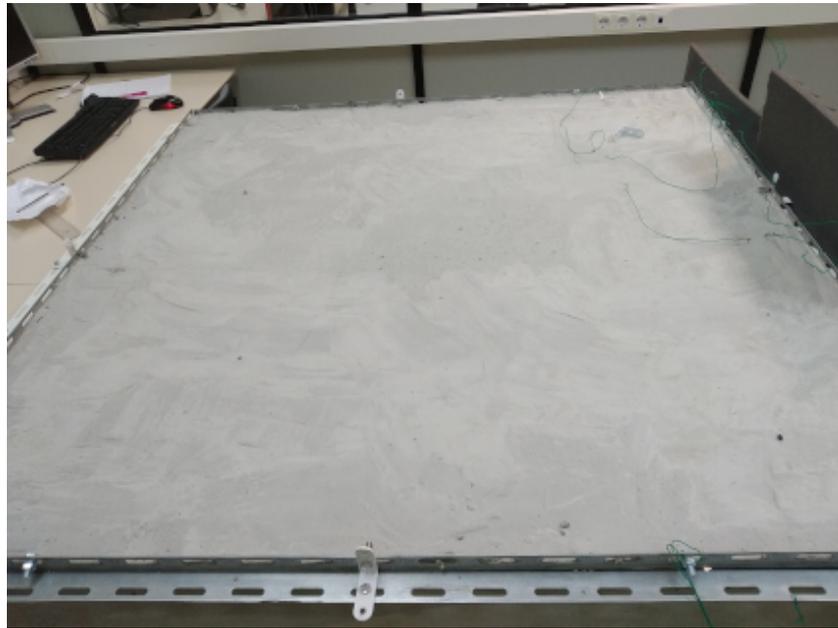


Figura 1.4: Techo de la cavidad resonante.



Figura 1.5: Perfil derecho que presenta la cavidad resonante.

1.2.4. Analizador

Para analizar las medidas tomadas por los micrófonos se utiliza el analizador de señal de la figura 1.9.



Figura 1.6: Alzado posterior de la cavidad resonante.

1.2.5. Alimentación fantasma para los micrófonos

El Phantom power micros de la figura 1.10 proporciona alimentación a los dos micrófonos de nuestro experimento. Se trata de suministrar una tensión continua de 48 voltios conocida como P48, que se emplea para alimentar los micrófonos. El modelo empleado, True Phantom de la empresa Tritonaudio, tiene una fuente de corriente interna de diseño especial con el objeto de reducir la distorsión producida por los armónicos.

1.2.6. GPIB-LAN bridge

En la figura 1.11 aparece un dispositivo de interconexión denominado GPIB-LAN bridge. Como indica su nombre, se encarga de hacer de puente entre el protocolo GPIB y el protocolo ethernet de las redes de área local. De modo que se pueden enviar

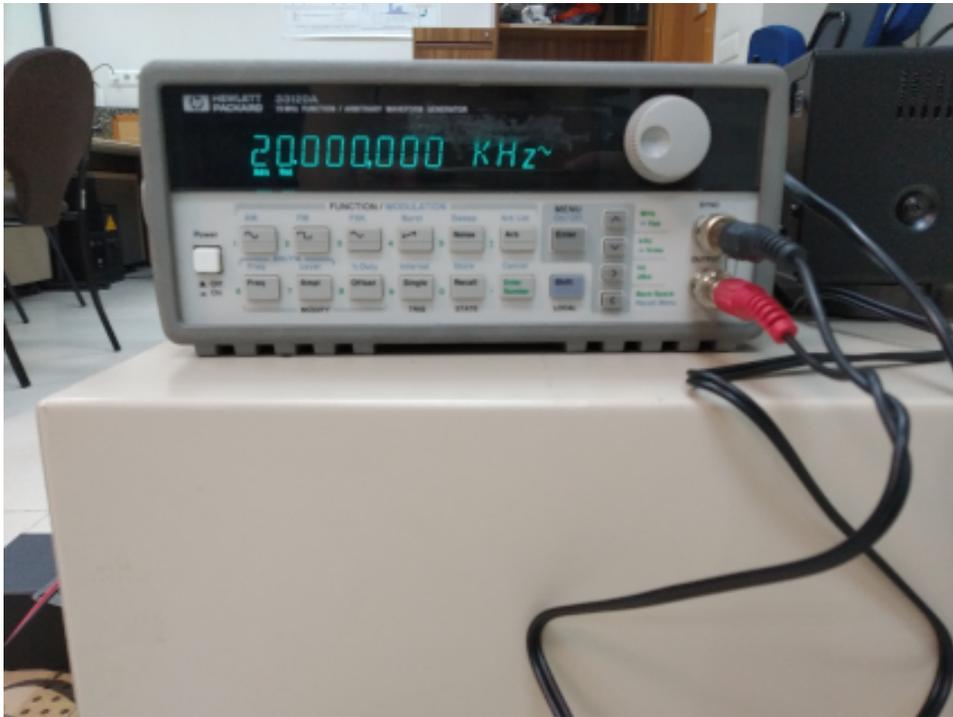


Figura 1.7: Generador de funciones.



Figura 1.8: Amplificador de señal PMA-520AE.

órdenes tanto al generador de funciones como al analizador de señal a través de una conexión ip entre el ordenador de control y este dispositivo.

1.2.7. Arduinos

En las figuras 1.12 y 1.13 se presentan los arduinos. Los arduinos del experimento son controlados desde el ordenador de control. En primer lugar, el arduino 1.12 es el encargado de controlar los tres motores paso a paso que mueven el micrófono en el



Figura 1.9: Analizador de señal.



Figura 1.10: Phantom power micros.

interior de la cavidad. Se puede observar en la figura tres integrados de color rojo en el bloque de madera principal. Son los controladores de los motores paso a paso. Por

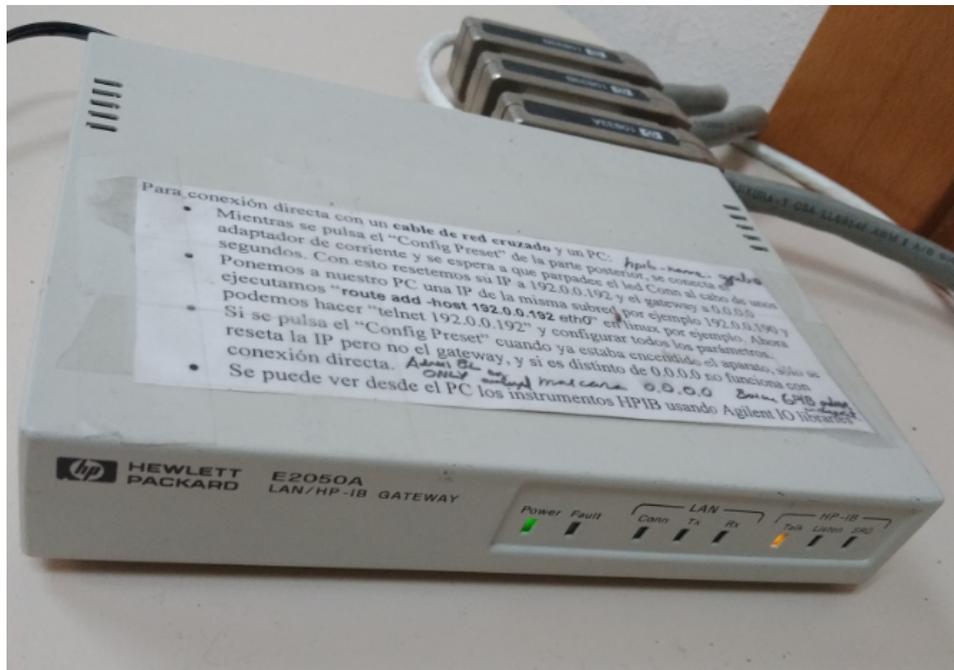


Figura 1.11: GPIB-LAN bridge.

un lado están alimentados por una fuente de tensión que aporta la corriente necesaria para mover los motores.

Por otro lado se pueden apreciar también las interconexiones con el arduino. El arduino envía las señales digitales que codifican el sentido de giro del motor y el número de pasos que cada uno de ellos debe dar. Se aprecia también que dos de los circuitos de control de los motores están más próximos entre sí. Esto es debido a que hay dos motores que se encargan de uno de los dos ejes de desplazamiento. Ambos motores deben funcionar de manera idéntica. Al final de cada ciclo de desplazamiento desde el comienzo hasta el final del eje, se comprueba que el número de pasos hasta la posición de partida es el mismo para los dos motores. En caso de que haya una discordancia se aborta el proceso de medida. Este arduino también tiene como entradas los finales de carrera que detectan si el micrófono se ha desplazado hasta la posición límite final o inicial en cada uno de los dos ejes de desplazamiento en el interior de la cavidad. Se aprecia un cuarto controlador que está sobre un bloque de madera adyacente al principal. Este cuarto controlador se utiliza para realizar los desplazamientos de la fuente externa de ondas acústicas.

En segundo lugar, el arduino 1.13 se encarga de girar la fuente de ondas acústicas, es decir el altavoz, situado en el exterior de la cavidad, de modo que este apunte en todo

momento hacia el centro de la apertura. Debemos tener en cuenta que a medida que el altavoz se desplaza por el exterior de la cavidad es necesario ir rotando el altavoz para que mantenga el apuntamiento al centro de la cavidad. El objetivo es evitar que el diagrama de radiación del micrófono influya en el patrón de interferencias generado en el interior de la cavidad. El programa de control se encarga de calcular el ángulo de giro a partir de las coordenadas cartesianas del altavoz.

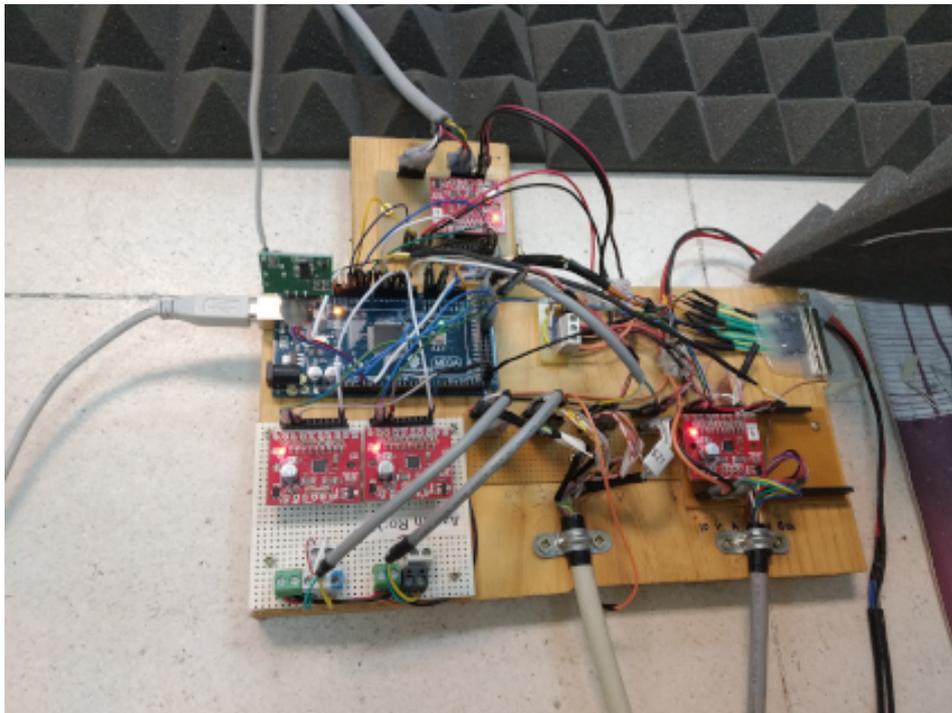


Figura 1.12: Arduino que mueve el micrófono dentro de la cavidad resonante.

1.2.8. Micrófono de medida ECM8000

En la figura 1.14 aparece el micro ECM8000 de Behringer. De los dos micros que disponemos es el micrófono de medida con menos prestaciones en teoría. A diferencia del micrófono M23, este micro no dispone de electrónica para compensar las variaciones de temperatura.

1.2.9. Micrófono de medida M23

En la figura 1.15 aparece el micro M23 del fabricante Earthworks. Este micrófono se emplea como transductor para convertir la señal acústica en señal eléctrica. Cuenta

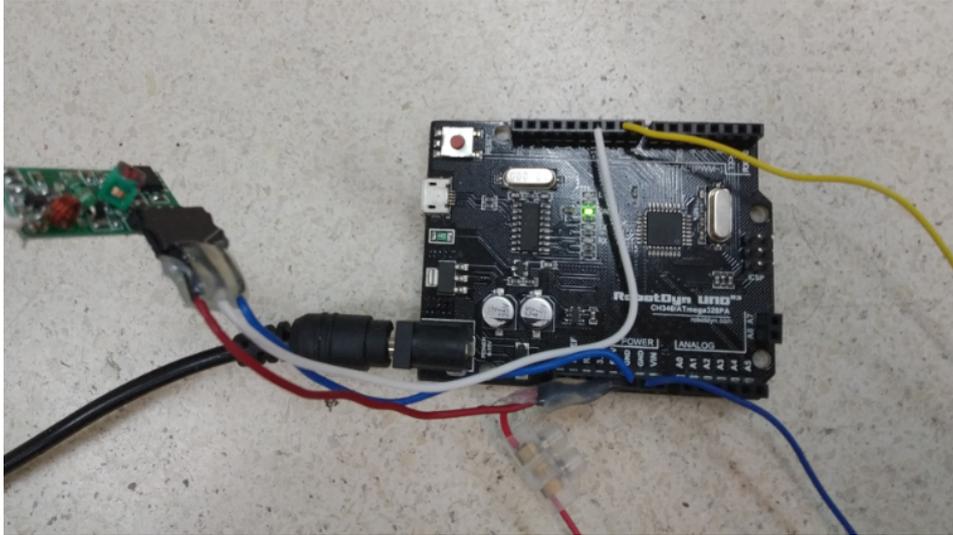


Figura 1.13: Arduino que apunta el altavoz exterior para que emita hacia el centro de la apertura.

con un diseño específico para compensar las variaciones de temperatura. Presenta las siguientes características:

- Patrón polar omnidireccional
- Respuesta en frecuencia: 9Hz – 23kHz
- Requiere alimentación phantom de 48V
- Ruido equivalente: 22dB SPL (ponderación A)
- Entrada acústica de pico: 124dB SPL
- Dimensiones: 165 x 22mm

Este micrófono ha sido el último en ser adquirido para tratar de mejorar la precisión de las medidas y será comparado en este trabajo al micrófono ECM8000 de Behringer.

1.2.10. Desplazamiento del micrófono en el interior de la cavidad

En la figura 1.16 se muestra el sistema de raíles ortogonales que sirve de guía para desplazar el micrófono por el interior de la cavidad, manteniendo constante la altura del micrófono y permitiendo por tanto un muestreo de una superficie plana paralela al suelo que abarca la mayor parte de la cavidad. Se aprecian al fondo los dos motores



Figura 1.14: Micrófono ECM8000.

que realizan el desplazamiento hacia delante y hacia atrás del raíl principal que está colocado ortogonalmente para permitir el desplazamiento derecha-izquierda. Este dispositivo mueve el micrófono de muestreo por el interior de la cavidad para realizar la toma de medidas. Claramente la malla de muestreo automático está contenida en un plano bidimensional paralelo al suelo.



Figura 1.15: Micrófono M23.

1.2.11. Fuente de ondas acústicas

La figura 1.17 es una foto del altavoz que actúa como fuente de ondas acústicas. Como apreciamos en la foto está situado en el exterior de la cavidad. Transforma la señal eléctrica que recibe desde el amplificador en una onda acústica y la envía hacia la apertura de la cavidad resonante. Se trata de un altavoz de medios de un equipo de sonido de alta fidelidad de la empresa Saba, modelo VS2080. También se observa en la

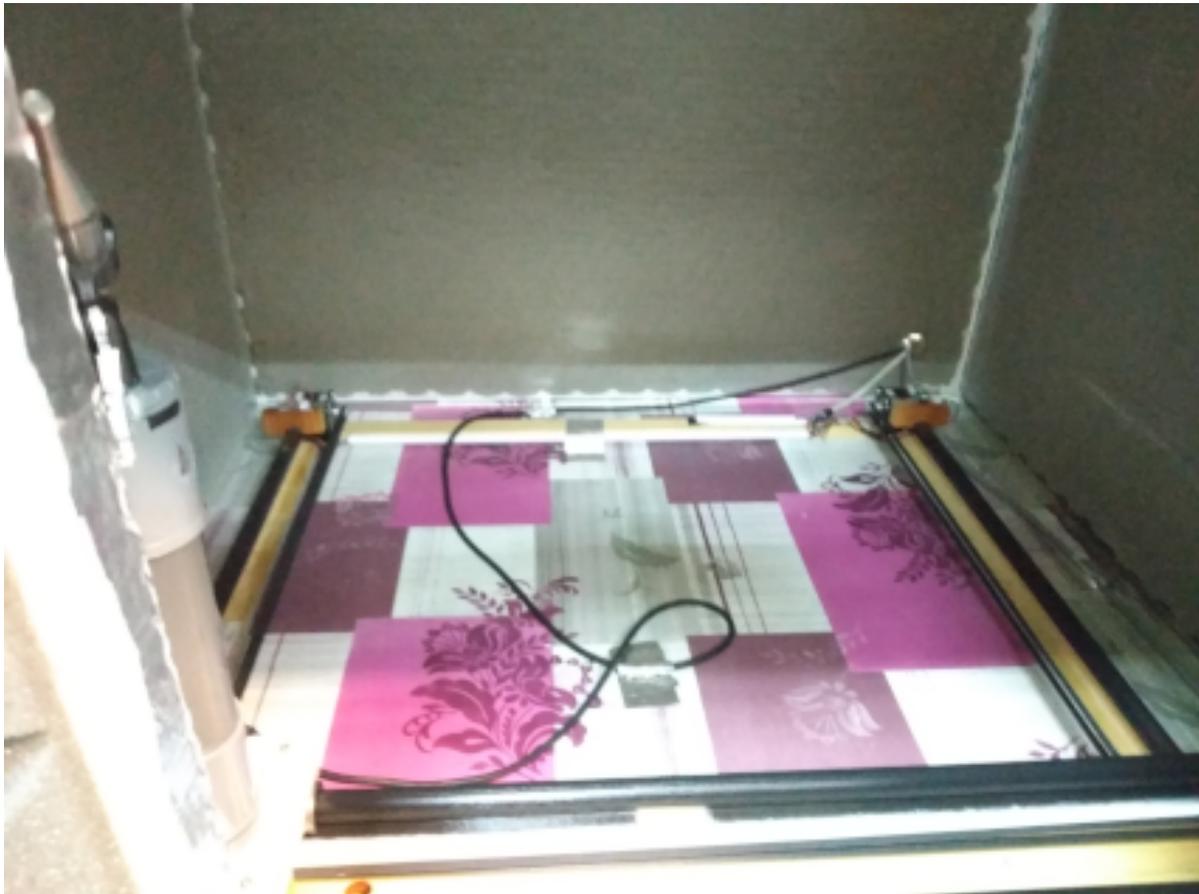


Figura 1.16: Guías en el interior de la cavidad para desplazar el micrófono.

foto que el altavoz está sustentando con un eje que permite la rotación mediante un motor servo, controlado mediante el arduino de la figura 1.13

1.2.12. Ordenador central

En la figura 1.18 aparece el ordenador central. En él se ejecuta el programa python que controla todos los demás equipos. Por una parte se encarga de fijar la frecuencia de la señal del generador de funciones, así como su amplitud utilizando el protocolo GPIB sobre ethernet a través del bridge explicado anteriormente. Por otra parte es capaz de enviar comandos modo texto a los arduinos a través de un protocolo de diseño propio para que se activen los motores que realizan el desplazamiento del micrófono de medida y de la fuente de ondas acústicas en el exterior de la cavidad. Además también se realizan las lecturas de los dos sensores de final de carrera que limitan las posiciones extremas correspondientes a cada motor. Así como los sensores de humedad y temperatura que resultan vitales en los experimentos de este trabajo.

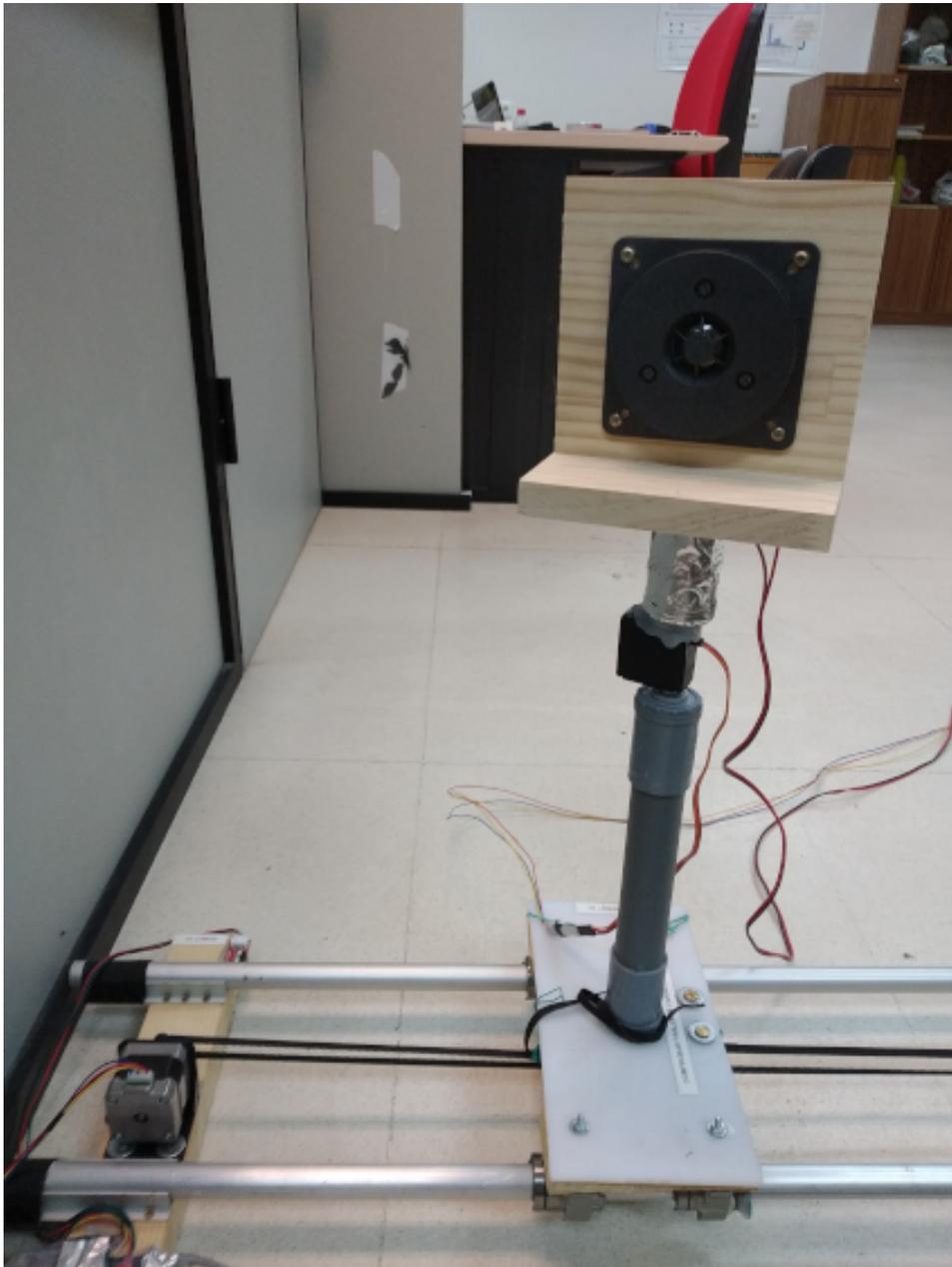


Figura 1.17: Emisor de ondas acústicas.

Por último, desde este ordenador también se envían los comandos GPIB sobre ethernet que van a disparar el proceso de medida en el analizador de señal. Finalmente se lleva a cabo la recogida de los datos de medida en el ordenador para su almacenamiento en conjunto con las lecturas de humedad, temperatura y posición proporcionadas por el resto del sistema.



Figura 1.18: Ordenador central.

1.2.13. Sistema de desplazamiento del emisor externo a la cavidad

En la figura 1.19 se presenta el sistema de guías paralelas sobre las que se desliza la plataforma que sostiene el eje que sujeta el altavoz. Como se aprecia en la fotografía dicha plataforma se desliza sobre las guías usando rodamientos que minimizan el rozamiento. Se utiliza grasa de litio para conseguir un deslizamiento aún más suave sobre los ejes de aluminio.

El motor paso a paso que mueve la correa de transmisión se aprecia a la izquierda de la fotografía. También podemos ver uno de los finales de carrera, que indica el comienzo del camino guiado. Se aprecia también material antireflectante en el suelo, situado entre el sistema de guiado del altavoz y la cavidad.

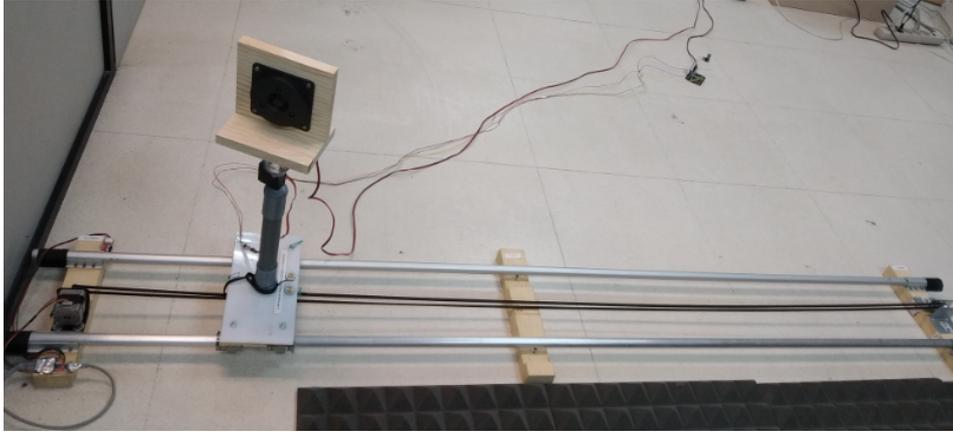


Figura 1.19: Sistema de guías en el exterior de la cavidad para desplazar el altavoz que excita las ondas acústicas que penetrarán en la cavidad a través de la apertura.

1.2.14. Medios software

Los medios software utilizados son Python y Arduino. El programa de control del sistema de medida ya estaba desarrollado al comienzo de este trabajo final de grado. Está escrito en Python y ha sido necesario familiarizarse con él para poder realizar los experimentos que forman parte del presente trabajo. Parte del código fuente está escrito con el lenguaje de programación de Arduino que es bastante similar al C. Se ha empleado la consola serie de Arduino para poder enviar comandos directos por el puerto serie con el fin de realizar el ajuste inicial de la posición tanto de la fuente como del micrófono. La recolección de los datos y su representación gráfica se ha realizado mediante scripts en Python.

1.3. Objetivos

Se parte de un sistema de medida experimental preexistente en el que las variaciones de humedad y de temperatura creaban bastante inestabilidad. Por otra parte las características del micrófono ECM8000, que no cuenta con ningún tipo de electrónica para paliar dichos efectos, también tenía como resultado un grado de incertidumbre adicional. El objetivo de este proyecto es tratar de estabilizar las medidas, haciéndolas independientes de las condiciones particulares de humedad y temperatura. Esto es necesario porque el muestreo en el interior de la cavidad requiere una hora más o menos y dentro de ese rango temporal es imposible mantener constante la humedad y la temperatura. De modo que el micrófono acaba convirtiéndose en un sensor

involuntario de temperatura y humedad. Dichas variaciones debidas a las variaciones de temperatura y humedad se superponen con las variaciones debidas a los cambios de posición de la fuente y el receptor que son el objeto de las medidas.

Por una parte está claro que el micrófono ECM8000, dado su precio reducido no cuenta con mecanismos de compensación debidos a los efectos de la temperatura. Por otra parte, aún teniendo un micrófono cuya sensibilidad no dependa de la temperatura, nos encontramos con el hecho de que las variaciones de humedad y temperatura influyen inevitablemente en la propagación de las señales acústicas, de modo que aún teniendo un micrófono perfecto, sus efectos se harían sentir de todos modos.

En esta investigación emplearemos un micrófono de mayor calidad y mejores características que el ECM8000, como es el M23. Se pretende realizar un análisis comparativo entre ambos micrófonos empleando distintas formas de medir con el objetivo común de mitigar la influencia de factores ambientales como la humedad y la temperatura en la propagación de señales acústicas en el interior de la cavidad resonante. Dichas alteraciones en la propagación del sonido van a afectar al patrón de onda estacionaria que hay en el interior de la cavidad resonante y es precisamente esta distorsión la que queremos minimizar o evitar si es posible. En conclusión, se desea caracterizar la influencia de las especificaciones del micrófono M23 y de las fuentes e intentar aislar la influencia de las variaciones de la señal causadas por la variación de la longitud de onda acústica con la temperatura y la humedad.

1.4. Fases de desarrollo

Las fases del desarrollo de este trabajo fin de grado han sido:

1. Comprender el experimento realizado anteriormente del que se parte y conocer el objetivo de este nuevo proyecto de investigación para poder mejorar los resultados obtenidos en el proyecto anterior.
2. Calibración del robot, es decir, modificar su posición en función de distintos sistemas de medida.
3. Lanzamiento de varias series de medidas empleando distintos sistemas de medidas.

4. Recogida de todas las series de medidas.
5. Análisis de resultados.
6. Conclusiones de los resultados obtenidos.

Capítulo 2

Análisis del problema

Vamos a analizar de forma detallada los principios que dan lugar al problema planteado en nuestro experimento partiendo del sistema de medida experimental preexistente y la propuesta para estabilizar los patrones de interferencia dentro de nuestra cavidad resonante.

Determinaremos la forma en la que factores ambientales como la humedad y la temperatura influyen en el patrón de vibración de las ondas en el interior de la cavidad resonante.

También utilizaremos como metáfora de la propagación de un faser de campo acústico el giro de una rueda para comprender mejor la física que subyace en el fondo del problema.

Contenido

2.1	Velocidad del sonido	22
2.2	Atenuación del sonido	30
2.3	Refracción del sonido en la atmósfera	33
2.4	Inestabilidad temporal en los patrones de interferencia	33
2.5	Propuesta para estabilizar los patrones de interferencia	36
2.6	Teoría sobre la influencia de la humedad y de la temperatura	38
2.7	Influencia del número de rayos recibido por los micrófonos en la estabilidad de las medidas	38

2.1. Velocidad del sonido

La velocidad del sonido es la propagación de las ondas acústicas por un medio determinado, en nuestro caso en una cavidad resonante, y en unas determinadas condiciones de presión, humedad y temperatura.

Si analizamos la expresión de la velocidad de una onda plana acústica mediante la expresión:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f, \quad (2.1.1)$$

observamos que es posible obtener v , la velocidad de propagación, como el cociente del periodo espacial λ y el periodo temporal T de la señal armónica. Dado que la frecuencia temporal f es el inverso del periodo temporal T podemos calcular la velocidad como el producto de la longitud de onda por la frecuencia.

A continuación vamos a analizar detalladamente la influencia de las condiciones ambientales en la velocidad de propagación. Para ello, nos ayudaremos de una metáfora, para que sea más sencillo entender dichos efectos.

En la figura 2.1 disponemos de la siguiente rueda [ASH, 2019a]:

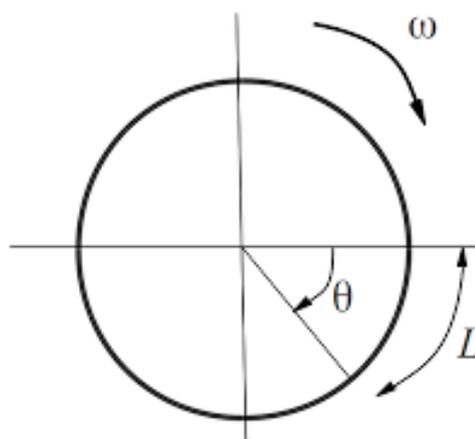


Figura 2.1: Giro de una rueda.

donde θ es el ángulo del arco de circunferencia, ω es la velocidad angular y L la distancia recorrida por la rueda. Podemos conocer la velocidad lineal de la rueda tras un cierto tiempo gracias a la expresión:

$$v=L/t$$

Una longitud de onda λ es la distancia recorrida por un frente de onda durante un periodo temporal T . Podemos comparar esta forma de avanzar periódica con el funcionamiento de una rueda. La longitud de onda representará la longitud de la rueda. Está claro que la rueda al rodar marca un periodo espacial igual a la longitud de su circunferencia exterior. En nuestro experimento, las ondas recorren una cierta distancia desde la fuente hasta el interior de la cavidad resonante, que puede ser comparada con rueda que gira desplazándose por la misma trayectoria que siguen los rayos. Al igual que los frentes de onda, la rueda tardaría un cierto intervalo de tiempo en alcanzar su posición final. Sin embargo hay un intervalo de tiempo especial, que es el necesario para que una rueda de una vuelta completa. Este será el periodo temporal T . Análogamente, la frecuencia de la rueda será el número de vueltas que da la rueda en un segundo.

La distancia recorrida por cada una de los rayos hasta llegar a nuestra cavidad resonante es diferente, dado que cada rayo sigue una trayectoria distinta y no coinciden ni el espacio recorrido ni el tiempo de llegada. Del mismo modo, si las mismas trayectorias son recorridas por la rueda de nuestra comparación, tanto el número de vueltas que da la rueda como el tiempo que tarda en llegar dependerán del trayecto seguido. Podemos hablar de que cada rayo utiliza un camino distinto con una distancia que podemos medir en términos de λ o dicho de otra manera, podemos medir en términos de cuántas vueltas da la rueda para recorrer dicha distancia.

Para medir los caminos trazados por cada rayo es útil normalizar la distancia recorrida utilizando λ como referencia. Esto es importante, porque tal como representan los fasores, la superposición de los distintos rayos, va a depender de dicha distancia normalizada. Los fasores representan como números complejos la fase y magnitud de la onda en un proceso de interferencia, de modo que la superposición de ondas se puede realizar mediante la suma de fasores. Está claro que la suma de fasores depende de la fase, es decir el ángulo del fador respecto al eje real. En nuestro caso identificamos el giro del fador con el giro de nuestra rueda.

La suma resultante de varios fasores nos informa si se produce una interferencia constructiva o destructiva en cada localización en el espacio tridimensional.

Sea la onda: [ASH, 2012]

$$E_1 = E_{01} \cos(\omega t \pm kz + \varepsilon_1) \quad (2.1.2)$$

o lo que es lo mismo:

$$E_1 = E_{01} \cos(\omega t \pm \alpha_1) \quad (2.1.3)$$

El signo positivo representaría una onda regresiva en el eje z , mientras que el signo negativo representaría una onda progresiva en el eje z . Según la fórmula de Euler, escribiendo nuestra onda armónica en forma compleja:

$$\widetilde{E}_1 = E_{01} e^{i(\omega t \pm \alpha_1)} \quad (2.1.4)$$

Superponer N ondas con la misma frecuencia y progresivas en el eje z :

$$\widetilde{E} = \left[\sum_{j=1}^N E_{0j} e^{-i\alpha_j} \right] e^{i\omega t} \quad (2.1.5)$$

Finalmente, sumando vectores en el plano complejo, al hacer implícita la dependencia con el tiempo, nuestra ecuación resultante quedaría como:

$$E_0 e^{-i\alpha} = \sum_{j=1}^N E_{0j} e^{-i\alpha_j} \quad (2.1.6)$$

Utilizando la ecuación 2.1.6, la figura 2.2 muestra la suma vectorial de dos ondas en el plano complejo [ASH, 2012]. En esa figura donde tenemos una onda descrita por $A_{01} = A_1 \cos(\omega t + \alpha_1)$ y otra onda descrita por $A_{02} = A_2 \cos(\omega t + \alpha_2)$. Donde A_1, A_2 son las amplitudes pertenecientes a las ondas 1, 2. Mientras que A es la resultante de ambas amplitudes. Por otro lado, α_1, α_2 y α son las fases pertenecientes a las ondas 1, 2 y resultante respectivamente.

Cuando dos ondas se encuentran en fase se suman las amplitudes de ambas ondas para obtener la amplitud resultante $A = A_1 + A_2$. Sin embargo, si las ondas están en oposición de fase ocurre lo contrario y se restan las amplitudes $A = A_1 - A_2$.

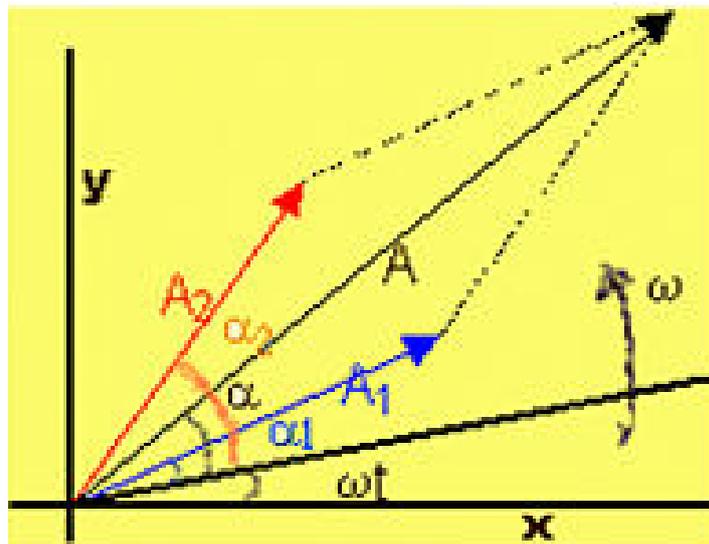


Figura 2.2: Suma vectorial de dos ondas.

Si una rueda recorre un camino A de 2λ y un camino B de 3λ de longitud, según la figura 2.3 podemos ver que los fasores de los dos caminos normalizados se encuentran en fase dando lugar a una interferencia constructiva que veremos más adelante en qué consiste.

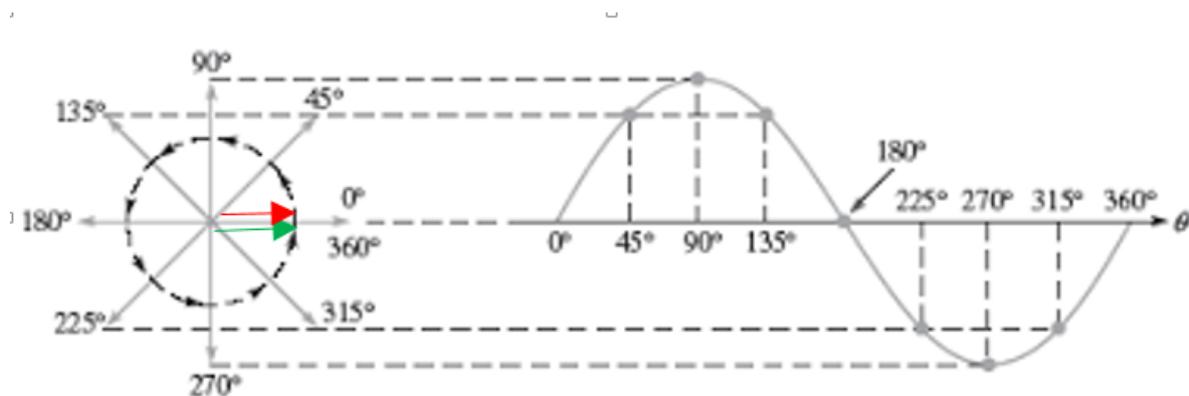


Figura 2.3: Fasores en fase.

Si cambiamos los caminos normalizados por λ , reduciendo el camino A a λ y el camino B a $1,5\lambda$, según la figura 2.4 podemos ver que los fasores se encuentran en oposición de fase dando lugar a una interferencia destructiva donde al sumar los fasores obtenemos una situación de silencio total ya que las ondas se encuentran desfasadas 180° .

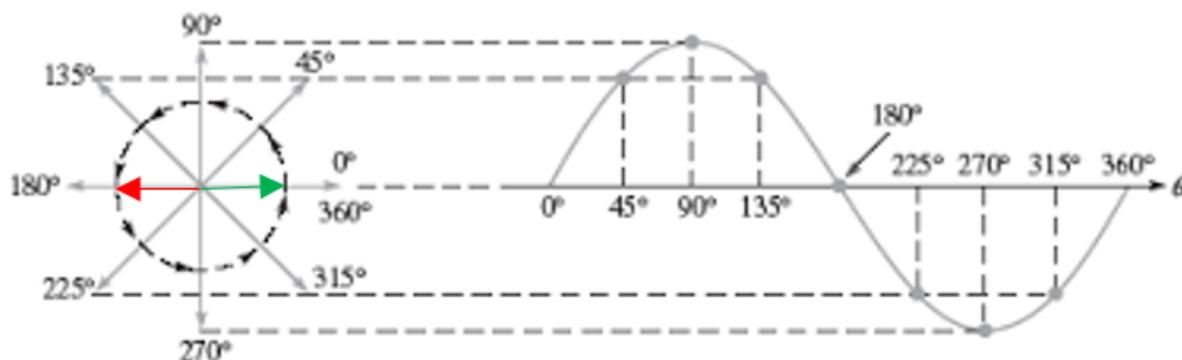


Figura 2.4: Fasores en oposición de fase.

2.1.1. Influencia de humedad

Según Harris (The journal of the Acoustical Society of America, 49, 890, 1971), a medida que aumenta la humedad en el aire seco, la velocidad de sonido decrece. A una humedad del 14 por ciento, la velocidad es mínima, sin embargo, a una humedad del 30 por ciento, al aumentar el valor por encima de éste, la velocidad aumenta.

En nuestro caso concreto, la humedad no influye mucho en la velocidad del sonido. Posteriormente veremos que donde realmente influye la humedad es en la atenuación del sonido.

Sin embargo, la humedad afecta a los micrófonos cuando la humedad relativa es alta. Esto lo notaremos principalmente en el micrófono ECM8000 como veremos de forma detallada en el capítulo 3. Hay que señalar que dicho micrófono no dispone de electrónica para compensar las variaciones de humedad.

2.1.2. Influencia de la temperatura

La velocidad del sonido depende principalmente de la temperatura en nuestro experimento. La temperatura no es homogénea, existe un gradiente de temperatura que produce efectos en la propagación del sonido dentro de la cavidad. Por cada grado centígrado, la velocidad del sonido varía en 0.6 m/s, de manera que a través de la expresión: [Ramon, 2015]

$$c(m/s) = 331 + (T(^{\circ}C) * 0,6)$$

donde c es la velocidad del sonido en m/s y T es la temperatura en grados centígrados, obtenemos la velocidad en función de la temperatura de forma aproximada.

De acuerdo con la expresión citada anteriormente deducimos que en el aire caliente la velocidad del sonido es mayor y de forma contraria en el aire frío la velocidad de sonido es menor ya que la velocidad del sonido crece al aumentar la temperatura y decrece al disminuir ésta.

Por lo tanto, como podemos ver en la figura 2.5, la variación de temperatura genera en la propagación del sonido una curvatura debido a que el sonido se desplaza más lento en el aire frío que en el caliente. De modo que como se observa en la parte izquierda de la figura, un camino curvado con mayor número de metros de recorrido puede significar el mismo avance en términos de longitudes de onda para la perturbación dado que la longitud de onda aumenta en las capas de aire caliente. Esto es así porque la frecuencia temporal de la onda se mantiene constante y por tanto la única forma de que aumente la velocidad es que aumente la longitud de onda. En el gráfico de la derecha sucede lo contrario, las capas superiores están más frías y los rayos se curvan hacia arriba.

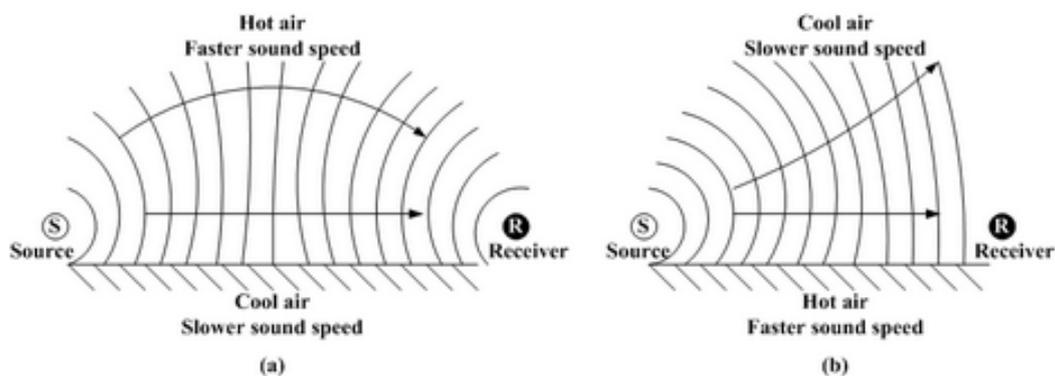


Figura 2.5: Curvatura en la propagación del sonido debida a la variación de temperatura

Por otro lado, al comparar nuestro experimento con el ejemplo de una rueda para comprender mejor nuestro sistema hay que destacar que: al aumentar la temperatura, podemos decir que aumenta la longitud de onda, por tanto en nuestra comparación aumenta el perímetro de la rueda. En otras palabras la rueda se dilata con el calor. Análogamente, al disminuir la temperatura la rueda encoge igual que lo hace la longitud de onda. En resumen, al aumentar la temperatura, la longitud de onda de la rueda se dilata, y al disminuir la temperatura la longitud de onda encoge. Esto es necesario

porque el período temporal se mantiene constante, es decir, la frecuencia temporal es constante y por tanto las variaciones de velocidad se corresponden directamente con variaciones de longitud de onda y no con el número de longitudes de onda recorridas por segundo, que está fijado.

Nuestro razonamiento se basaría en la siguiente expresión:

$$v = \frac{\lambda}{T} \quad (2.1.7)$$

al cambiar la temperatura y mantener constante el período T , es decir, frecuencia constante, la longitud de onda λ debe cambiar para que cambie la velocidad. Al aumentar la temperatura y consigo la velocidad de sonido, la λ aumenta y viceversa, si decrecen la temperatura y la velocidad del sonido, la λ decrece.

Por tanto la temperatura es un factor ambiental que afecta mucho a nuestro experimento.

2.1.3. Influencia de la presión

La apertura de nuestra cavidad mantiene dentro de ella la misma presión que la presión atmosférica. Los micrófonos utilizados en nuestro experimento tienen un diafragma que oscila acoplado a la reverberación dentro de la cavidad. La deformación del diafragma de éstos depende de los sonidos procedentes en cualquier dirección, por lo que la velocidad del sonido depende de variaciones de presión del medio.[ASH, 2019f]

Sin embargo, en nuestro caso hemos considerado una presión constante ya que al no utilizar altas frecuencias, consideramos que las variaciones de presión habituales apenas influyen en la sensibilidad de los micrófonos sea cual sea la orientación de éstos, y por tanto, la influencia es limitada en las medidas del experimento.

Podría ser interesante de cara a líneas futuras medir realmente la presión con un barómetro y ver si realmente no influye en las medidas tomadas.

2.1.4. Función para calcular la velocidad del sonido

En este proyecto hemos utilizado una función matemática preexistente para calcular la velocidad del sonido en función de la temperatura, la humedad y la presión tal

y como aparece en la figura 2.6. Los parámetros se calculan utilizando relaciones termodinámicas.

"Dicha función calcula la velocidad de sonido de frecuencia cero en el aire húmedo, según Cramer (J. Acoust. Soc. Am., 93, p2510, 1993), con presión de vapor de saturación tomado de Davis (Metrologia, 29, p67, 1992), y una fracción molar de dióxido de carbono de 0.0004.

Siendo el rango de validez para la temperatura de 0 a 30 grados centígrados y para la presión de 75 a 102 kilopascales, utilizando una presión de aire de 101.325 kilopascales." [Laboratory, 2018]

Aunque utilicemos esa presión, este valor no es significativo para calcular la velocidad de sonido ya que depende principalmente de la temperatura. El cambio de la presión de la atmósfera no produce cambios apreciables en la velocidad de sonido como primera aproximación.

```
def get_sound_speed(T,Rh,P=101325):
    T_kel = T+273.15 # TMP kelvin
    e = 2.71828182845904523536;
    # Molecular concentration of water vapour calculated from Rh:
    ENH = 3.14 * pow(10,-8) * P + 1.00062 + pow(T,2) * 5.6 * pow(10,-7)
    PSV1 = pow(T_kel,2) * 1.2378847 * pow(10,-5) - 1.9121316 * pow(10,-2) * T_kel
    PSV2 = 33.93711047 - 6.3431645 * pow(10,3) / T_kel
    PSV = pow(e, PSV1) * pow(e,PSV2)
    H = Rh * ENH * PSV / P
    Xw = H / 100.0
    Xc = 400.0 * pow(10,-6)
    #Speed calculated using the method of Cramer / JASA vol 93 pg 2510
    C1 = 0.603055 * T + 331.5024 - pow(T,2) * 5.28 * pow(10,-4) + (0.1495874 * T + 51.471935 - pow(T,2) * 7.82 *
    pow(10,-4)) * Xw
    C2 = (-1.82 * pow(10,-7) + 3.73 * pow(10,-8) * T - pow(T,2) * 2.93 * pow(10,-10)) * P + (-85.20931-0.228525 *
    T + pow(T,2) *5.91 * pow(10,-5)) * Xc
    C3 = pow(Xw,2) * 2.835149 + pow(P,2) * 2.15 * pow(10,-13) - pow(Xc,2) * 29.179762 - 4.86 * pow(10,-4) * Xw * P * Xc
    speed = C1 + C2 - C3
    return speed

print(float(get_sound_speed(22.85,24))/5000)
print(float(get_sound_speed(23.1,20))/5000)
print(float(get_sound_speed(22.6,24))/5000)
```

Figura 2.6: Función para calcular la velocidad del sonido

2.2. Atenuación del sonido

La atenuación del sonido es la transformación de energía de las ondas acústicas en un volumen de aire que causa una pérdida de amplitud en la señal. Esta disminución de amplitud tiene naturaleza distinta de aquella debida al aumento de la superficie del frente de onda, que viene dictada por el principio de conservación de la energía. La atenuación depende de la humedad y de la temperatura por lo que es importante analizar esta influencia.

2.2.1. Influencia de humedad

En el apartado 2.1.1 hemos visto que la humedad no influye mucho en la velocidad del sonido, sin embargo, no ocurre lo mismo con la atenuación del sonido.

La ley de la inversa del cuadrado, nos dice que cada vez que duplicamos la distancia perdemos 6dB de amplitud en forma de atenuación, estableciendo que la intensidad del sonido es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia a la fuente de emisión.

La figura 2.7 nos muestra las líneas que representan el flujo que procede de una fuente principal y el modo en que la densidad de estas líneas disminuye cuando aumentamos la distancia. [ASH, 2018]

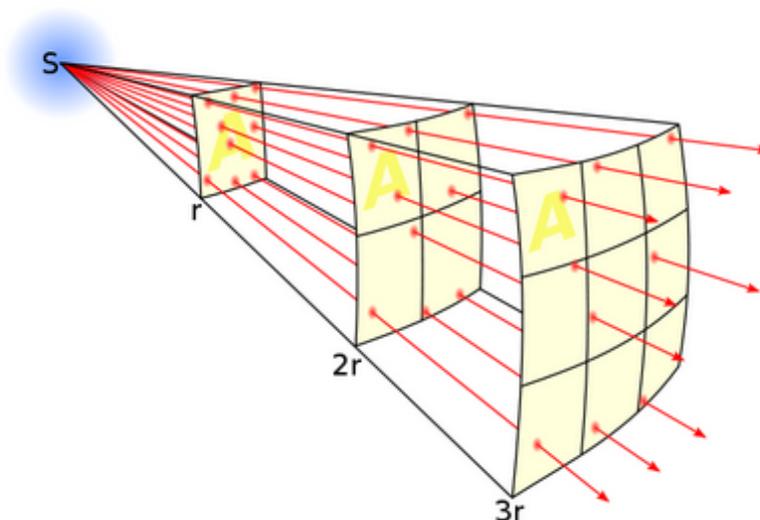


Figura 2.7: Ilustración de la ley de la inversa del cuadrado

Además de la Ley de la inversa del cuadrado, otro de los factores que genera atenuación es el aire.

En la figura 2.8 podemos analizar la influencia de la humedad en la atenuación del sonido. Las distintas líneas de la gráfica implementan un barrido discreto de frecuencias (desde 10kHz hasta 2kHz). Se puede observar que la atenuación del sonido depende de la humedad y de la frecuencia.

A medida que disminuye la frecuencia, la atenuación también disminuye. También se observa que la atenuación aumenta a medida que se reduce la humedad. Cuanto más seco es el ambiente (menor humedad), mayor es la atenuación con la distancia y el sonido es más absorbido que en un ambiente húmedo. Por tanto, la absorción del sonido en el aire, decrece cuando tiende a aumentar la humedad. [Ramon, 2015]

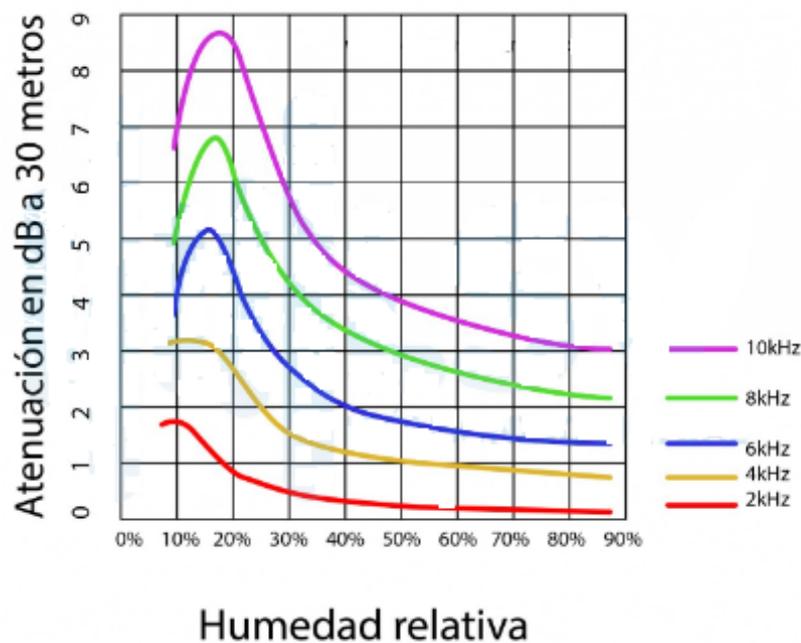


Figura 2.8: Influencia de la humedad en la atenuación del sonido

2.2.2. Influencia de la temperatura

Al igual que ocurría con la humedad, en el capítulo 3 analizaremos de forma específica las mediciones de amplitud del micrófono ECM8000 que no dispone de electrónica

para compensar las variaciones de temperatura en comparación con el micrófono M23 que incluye dicha electrónica.

Como hemos visto en el apartado 2.2.1, la atenuación del sonido depende de la humedad del aire y de la frecuencia del sonido pero también depende de la temperatura. La temperatura influye en la densidad del aire, y puede decrecer con la altura donde provoca que los rayos del sonido se curven con una pendiente creciente, creando alrededor de nuestra fuente una zona de sombra o en el caso contrario puede eliminar la zona de sombra provocando un aumento de 6 dB con relación a la situación normal al invertir las temperaturas.[ASH, 2019b] La creación de zonas de sombra en el suelo se produce cuando el sonido se difracta hacia arriba, al desviarse las ondas por el calentamiento del suelo.

2.2.3. Influencia de la presión

La presión es uno de los factores que más influye sobre la atenuación del sonido. A medida que aumenta la presión, la atenuación sonora se incrementa.

Sin embargo, como hemos citado anteriormente, hemos considerado una presión aproximadamente constante en nuestro experimento, por lo que en nuestro caso suponemos que las variaciones de presión durante el experimento no afectan a nuestro sistema.

2.2.4. Función para calcular la atenuación del sonido

Hemos empleado una función preexistente para calcular la atenuación del sonido en función de la presión, temperatura, humedad relativa y la frecuencia como se muestra en la figura 2.9. Dicha función proporciona el coeficiente de atenuación de acuerdo con el ISO 9613-1 dadas cuatro variables: humedad relativa, presión, temperatura y frecuencia. El modelo asume condiciones atmosféricas uniformes, con una presión atmosférica de referencia de 101,325 kilopascales y una temperatura de referencia del aire de 20 grados centígrados. [sengpielaudio Sengpiel Berlin, 2019] y [Laboratory, 2018]

```

from math import exp, sqrt
def absortion(relh,freq_hum,pres=101325, temp=20):
    temp+=273.15; # convert to kelvin
    pres/=101325; # convert to relative pressure
    C_humid=4.6151-6.8346*pow((273.15/temp),1.261)
    hum=relh*pow(10,C_humid)*pres
    tempr=temp/293.15 # convert to relative air temp (re 20 deg C)
    frO=pres*(24+4.04e4*hum*(0.02+hum)/(0.391+hum))
    frN=pres*pow(tempr,-0.5)*(9+280*hum*exp(-4.17*(pow(tempr,-1/3)-1)))
    alpha=8.686*freq_hum*freq_hum*(1.84e-11*(1/pres)*sqrt(tempr)+pow(tempr,-2.5)*
    (0.01275*(exp(-2239.1/temp)*1/(frO+freq_hum*freq_hum/frO))+0.1068*(exp(-3352/temp)*1/(frN+freq_hum*freq_hum/frN))))
    db_humid=alpha
    db_humid_ft=0.3048*db_humid
    db_humi=db_humid #round(10000*db_humid)/10000
    return db_humi
float(absortion(relh=20,freq_hum=5000,pres=101325,temp=20))

```

Figura 2.9: Función para calcular la atenuación del sonido

2.3. Refracción del sonido en la atmósfera

La refracción del sonido junto con un modelo laminar de la atmósfera, puede producir la curvatura de los rayos de ondas acústicas. En la figura 2.10 aparece una ilustración del cambio de dirección de un rayo al incidir sobre la interfaz de separación entre dos medios en los que el sonido tiene distinta velocidad [ASH, 2019c].

En consecuencia, en el caso de que hubiera variaciones en la velocidad de propagación entre el interior y el exterior de la cavidad, podrían desviarse los rayos cuando inciden en la cavidad resonante.

2.4. Inestabilidad temporal en los patrones de interferencia

Es muy importante analizar la inestabilidad temporal en los patrones de interferencia que se generan en la cavidad resonante, para tratar de identificar la posición de la fuente.

En el interior de nuestra cavidad se producen interferencias debido a la superposición de ondas en el interior de la cavidad. No debemos olvidar que las paredes son reflectantes, provocando gran cantidad de ondas que quedan atrapadas en su interior. Hemos colocado material antireflectante en la pared frontal de la cavidad y en el suelo para tratar de conseguir que las ondas entren principalmente por la apertura a través del rayo directo y a la vez tratar de reducir las reflexiones hacia otros puntos de la habitación.

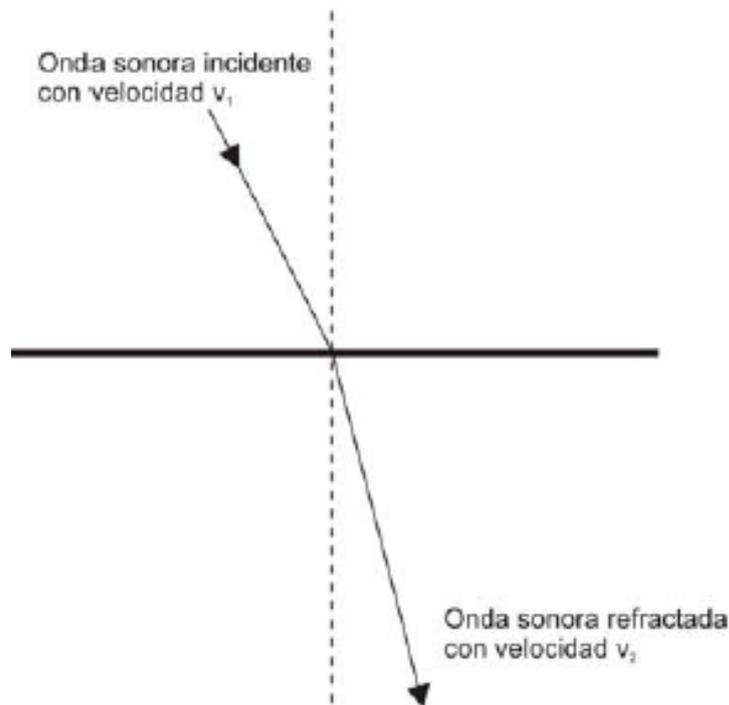


Figura 2.10: Refracción de una onda sonora.

Dependiendo de la distancia que recorren las ondas desde la fuente en términos de la longitud de onda, pueden generarse puntos con distintos grados de interferencia constructiva y destructiva.

Se produce una interferencia constructiva en un punto cuando la amplitud de la vibración (compresión y expansión de los gases atmosféricos) en ese punto es máxima. Esto ocurre cuando los movimientos armónicos simples (M.A.S) están en fase, es decir, cuando la diferencia entre las distancias recorridas por la perturbación es un número entero de longitudes de onda como podemos ver en la expresión [ASH, 2019e]:

$$x_2 - x_1 = \lambda n \quad (2.4.8)$$

siendo:

- n : un número entero $n=0,1,2\dots$
- λ : la longitud de onda.
- $x_2 - x_1$: diferencia de distancia recorrida por la misma onda al viajar por dos caminos distintos antes de interferir consigo misma

Por otro lado, la interferencia destructiva ocurre cuando dos movimientos armónicos simples (M.A.S) están en oposición de fase y por tanto la amplitud con la que vibra un punto es mínima. A diferencia de la interferencia constructiva, en este tipo de interferencia la diferencia entre las distancias recorridas es un número impar de semilongitudes de onda según la expresión: [ASH, 2019e]

$$x_2 - x_1 = (2n + 1) * \lambda / 2 \quad (2.4.9)$$

siendo:

- n : un número entero $n=0,1,2\dots$
- λ : la longitud de onda.
- $x_2 - x_1$: diferencia de distancia recorrida por la misma onda al viajar por dos caminos distintos antes de interferir consigo misma

Como hemos visto anteriormente, al aumentar la temperatura, se produce una dilatación en la longitud de onda o del perímetro de la rueda que usamos a modo de ilustración. De manera contraria, al reducirse la temperatura, la longitud de onda disminuye, y entonces de forma análoga la rueda encoge. Esto ocurre cuando el período T es constante, es decir, mantenemos la frecuencia temporal de la oscilación constante.

Para representar la fase de las ondas de nuestro experimento y determinar los tipos de interferencia utilizamos fasores. Un fesor es un número complejo que representa una oscilación. En un proceso de interferencia, el vector suma de varios fasores, determina la fase resultante de la superposición de varias oscilaciones. [ASH, 2019d]

Si tenemos una onda que recorre un camino A de 2λ , y otra onda que recorre un camino B de 3λ , con fasores en fase en el origen de cada camino, interferirán constructivamente al encontrarse al finalizar los caminos A y B.

Pero si hay cambios en las longitudes de esos caminos, cambiará la interferencia. Si por ejemplo, cambian a 1λ el camino A y $1,5\lambda$ el camino B, la interferencia pasará de interferencia constructiva a destructiva, es decir, pasamos de tener fasores en fase a tener fasores en oposición de fase.

Este cambio de interferencia constructiva a destructiva podría no deberse a la posición, sino sólo a la temperatura. Si cambia la temperatura y mantengo constante el período

T, es decir, la frecuencia constante, λ cambia y por tanto las distancias normalizadas recorridas por los rayos. Finalmente este cambio en las distancias normalizadas produce una interferencia distinta que cambia el patrón de amplitud en el interior de la cavidad resonante.

En nuestro experimento se han usado distintos sistemas de medida empleando un micrófono (M23), porque dicho micrófono tiene mejores características que el micrófono de partida (ECM8000) como veremos en el capítulo 3. Al principio se pensaba que el gran problema que existía era que el micrófono ECM8000 no poseía la calidad y las condiciones adecuadas para nuestro sistema, por eso se pensó que al sustituir este micrófono por uno de mejores características como es el micro M23 se solucionaría nuestro problema pero esto no es así. El gran problema que tenemos es el efecto de la temperatura en la propagación del sonido, no única y exclusivamente en la sensibilidad del micrófono, por lo que hay que buscar otra propuesta para estabilizar los patrones de interferencia.

2.5. Propuesta para estabilizar los patrones de interferencia

Los patrones de interferencia pueden cambiar por dos tipos de causas completamente distintas. Por un lado, si se desplaza el receptor respecto al emisor, las distancias de los caminos entre emisor y receptor cambian, por lo que cambia también el carácter constructivo o destructivo de la interferencia en el interior de la cavidad en la que se encuentra el receptor. Por otro lado, aunque no haya desplazamientos relativos entre los elementos materiales del sistema, en particular entre el emisor y receptor, en el caso de que cambie la temperatura, también cambiará la longitud de onda (al mantener constante la frecuencia temporal) y por tanto las distancias normalizadas aunque los trayectos sean los mismos, dado que λ es empleada para realizar la normalización.

Nuestro objetivo es que el patrón de interferencia solamente cambie debido a desplazamientos del emisor y el receptor y que dichas variaciones no se solapen con otras debidas a los cambios de temperatura. Está claro que para conseguir esto las distancias normalizadas para cada posición del emisor y de la fuente no pueden cambiar. Un método sería dejar la temperatura constante. Sin embargo, no controlamos la tempera-

tura del ambiente, muy influenciada por los cambios entre el día y la noche y eventos ajenos a nosotros como es el encendido de la calefacción central del edificio.

La idea clave es variar la frecuencia temporal para cancelar el efecto de cambio de temperatura y mantener una λ constante. Como hemos visto anteriormente, la velocidad del sonido cambia con la temperatura y si mantenemos la frecuencia del tono constante, entonces lo que tiene que cambiar es en la λ . Nosotros lo que necesitamos es un generador que proporcione una λ constante a base de dejar libre la frecuencia temporal para que se adapte al valor que sea necesario para obtener la velocidad del sonido que viene forzada por las condiciones atmosféricas. En el capítulo 3 veremos los efectos de este intento de estabilizar los patrones de interferencia mediante un generador de λ constante.

Si conocemos la velocidad del sonido, que como hemos visto en secciones anteriores, se puede calcular dadas unas condiciones atmosféricas, entonces es posible averiguar qué frecuencia hace falta para mantener la λ constante a lo largo del tiempo mediante las expresiones:

$$f = v/\lambda \quad (2.5.10)$$

y

$$\lambda = v/f \quad (2.5.11)$$

Hasta ahora las medidas realizadas han sido manteniendo un período T constante, es decir, mediante la expresión:

$$v = \lambda/T \quad (2.5.12)$$

Al mantener T constante, una velocidad mayor obligaba a que λ fuera mayor.

Sin embargo, se comprueba que el mejor resultado se obtiene manteniendo una λ constante ya que resuelve el gran problema de la temperatura que ensuciaba nuestras medidas con variaciones no deseadas que no pueden ser despreciadas. Sin embargo la velocidad depende también del período. A menor período se obtiene una mayor velocidad si λ es constante.

En el capítulo 3 también veremos cómo se estabilizan los patrones de interferencia frente a un período constante realizando dos tandas de medidas:

- Medidas realizadas por la noche empleando tweeter hifi con micrófonos cerca de la fuente y sin ecos.
- Medidas realizadas por el día empleando tweeter hifi con micrófonos cerca de la fuente y sin ecos.

2.6. Teoría sobre la influencia de la humedad y de la temperatura

Dependiendo del lugar y del país, el contexto es distinto ya que hay diferentes condiciones meteorológicas. Las medidas realizadas durante el invierno o el verano también difieren, y el encendido de calefacción en unas determinadas condiciones de temperatura hace que aparezcan inestabilidades en la toma de medidas.

En nuestro experimento, la influencia de la humedad y de la temperatura en las medidas es elevada. La temperatura influye mucho en la velocidad del sonido, mientras que la humedad influye bastante en la atenuación del sonido. Además, el encender la calefacción a partir de las 6:00 AM en nuestra toma de medidas realizada desde las 10:00 PM hasta las 7:00 AM crea bastante inestabilidad en las medidas, por lo que hemos tenido que realizar tandas de medidas desde las 10:00 PM hasta las 6:00 AM para que la calefacción no influya en nuestros valores.

En el capítulo 3 mostraremos un caso muy representativo de la influencia de la humedad y de la temperatura cuando comparamos las medidas realizadas por la noche y por el día empleando λ constante donde veremos que para una misma posición de fuente y donde se espera que las medidas obtenidas guarden una gran relación entre sí, se observa que esta hipótesis es falsa y se comprueba que hay grandes variaciones.

2.7. Influencia del número de rayos recibido por los micrófonos en la estabilidad de las medidas

Los micrófonos ECM8000 y M23 son dispositivos capaces de captar señales sonoras, amplificarlas y transferirlas. Si se encuentran aislados y sin ecos, la variabilidad de la potencia recibida debida al fenómeno de interferencia será menor. Al reducir el

número de rayos que inciden en el micrófono procedentes de distintas partes de la habitación se espera que la potencia medida en el micrófono sea más estable a lo largo del tiempo. Aunque los dos micrófonos sean nuevos pueden tener desviaciones en la respuesta en frecuencia. La idea es reducir el número de rayos para poner el foco en las prestaciones de los micrófonos, que pueden quedar enmascaradas por la variación debida a las interferencias variables con el tiempo.

En las medidas del micrófono ECM8000, se espera que las imperfecciones del micrófono sean mayores que en el micrófono M23 debido a que el primero de los dos modelos es notablemente más barato, sin embargo en determinadas ocasiones una pequeña mejora requiere un gran aumento de precio que no hace razonable la adquisición. En teoría el micro M23 presenta una mayor calidad de materiales y una sensibilidad que no se ve tan afectada por los factores ambientales, por lo que eliminando la variabilidad inherente al fenómeno de las interferencias variables causadas por la temperatura, debería funcionar bastante mejor.

Es muy importante analizar la estabilidad de las medidas, es decir, hasta qué punto es posible volver a repetir las mismas medidas si volvemos a colocar todas las cosas igual. Los rayos que influyen en los micrófonos dan como resultado una potencia total que depende de la longitud de onda ya que cuantas más variaciones se produzcan de longitud de onda debido a la temperatura, más variará la potencia y por tanto habrá más variación en el grado de interferencias, provocando que el sistema sea menos estable. En función de esta situación de estabilidad, serán o no consistentes los patrones de onda medidos durante el experimento por los micrófonos, dado que el proceso de medida se prolonga en el tiempo lo suficiente para que no existan las mismas condiciones atmosféricas al empezar y al acabar.

Capítulo 3

Resultados

En este capítulo se van a presentar los resultados obtenidos con cada uno de los sistemas de medida utilizados en el experimento.

Estas medidas han sido procesadas mediante el lenguaje de programación Python y la mayoría de estas se han realizado durante la noche, donde veremos que se obtienen mejores resultados que por el día.

La frecuencia de trabajo empleada es de 5000Hz y la amplitud de la fuente externa es de 0,300V.

Contenido

3.1 Ensayos usando frecuencia constante	41
3.2 Ensayos usando λ constante	56

3.1. Ensayos usando frecuencia constante

A lo largo de la toma de medidas, hemos comprobado que la temperatura y la humedad influyen en nuestro sistema.

Al realizar medidas sin cambiar la posición de los elementos del experimento, en particular las posiciones del emisor y el receptor, se espera que los resultados obtenidos guarden entre sí una gran relación ya que aparentemente estamos repitiendo la misma medida sucesivas veces. Sin embargo, hemos comprobado que esto no es así y que mientras algunas medidas guardan una relación bastante alta otras no lo cumplen. Esto

es debido a que la temperatura y la humedad varían con el tiempo. Principalmente la temperatura es el factor que más afecta en el laboratorio como veremos posteriormente.

Los primeros ensayos se han realizado comparando seis sistemas de medida y utilizando una frecuencia constante ya que pensábamos que el gran problema de nuestro experimento preexistente era el micrófono que poseíamos y que si lo cambiábamos por otro de mejores características como lo es el M23 nuestro problema mejoraría mucho. Por lo que hemos empleado 6 sistemas de medida donde uno de ellos ha sido repetido durante 3 días diferentes y donde hemos empleado un período constante.

Para cada uno de los seis sistemas de medida tomados en diferentes condiciones de temperatura y humedad, se han analizado la relación entre la potencia registrada en los micrófonos y la temperatura como podemos ver en las figuras 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7 y 3.8.

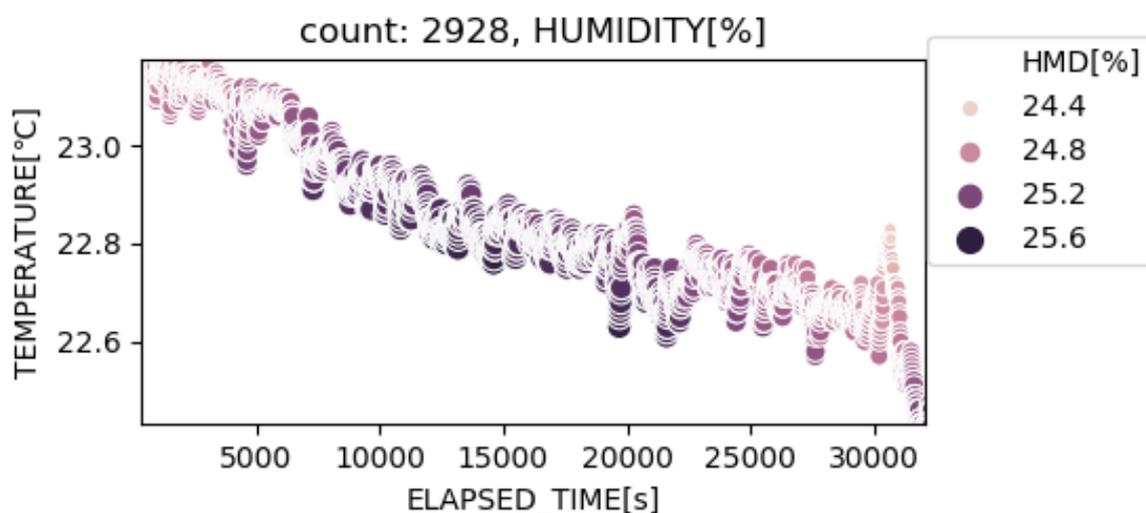


Figura 3.1: Medidas realizadas la primera noche a partir de las 22:00 el día 20 de febrero de 2019, miércoles, empleando el tweeter optibt38.

En la figura 3.1 podemos observar las variaciones de temperatura y humedad a lo largo de la primera noche. Hay que tener en cuenta que el experimento comienza a las 22:00 del miércoles 20 de febrero de 2019. En general se observa cómo la temperatura cae a lo largo de la noche. Comienza en torno a los 23,2° y termina en torno a los 22,4° con lo que la variación a lo largo de la noche es más o menos un grado. En cuanto a la humedad relativa, podemos ver que aumenta en las horas centrales de la noche. Cuando el tiempo transcurrido desde el inicio son 28800 segundos, habían pasado

8 horas, así que se correspondería con las 6 de la mañana se puede observar que se produce el periodo más inestable a lo largo de toda la noche.

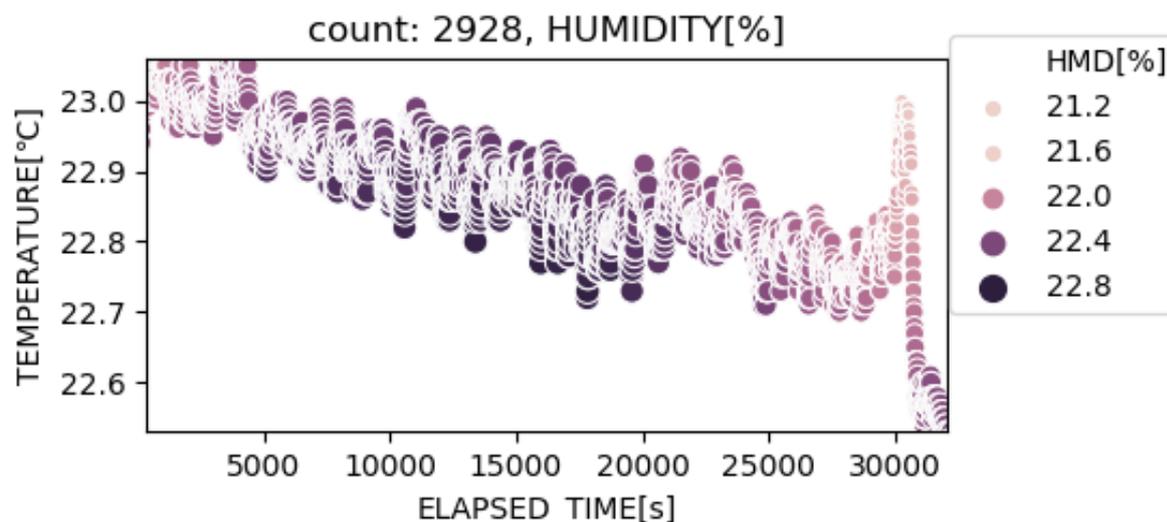


Figura 3.2: Medidas realizadas la segunda noche a partir de las 22:00 del 21 de febrero de 2019, jueves, empleando el tweeter optibt38.

En la segunda noche se obtienen las medidas representadas en la figura 3.2. Se puede observar en esta figura que el comportamiento a lo largo de la noche sigue aproximadamente la misma tendencia descendente para la temperatura. Sin embargo, se aprecia que la temperatura es un poco inferior al comienzo de la noche pero sin embargo desciende algo más lentamente. La nube de puntos parece más gruesa, pero hay que tener en cuenta el cambio de zoom en el eje vertical. En esta segunda gráfica el rango de temperaturas visualizado es menor, por lo que da la sensación de que la nube es una línea más gruesa. La mayor diferencia con la gráfica de la noche anterior aparece en el momento de inestabilidad en torno a las 6 de la mañana que ya habíamos observado la noche anterior. Sin embargo, en este caso el pico de temperatura es bastante más acentuado, generando localmente en unos minutos una variación comparable a la que habíamos medido a lo largo de toda la noche.

En la figura 3.3, tenemos un cambio fundamental respecto a las anteriores medidas. El tiempo total de duración del experimento son unos 200000 segundos, es decir unas 55,5 horas: dos días y medio aproximadamente. El objetivo de esta gráfica es poder comparar claramente las variaciones entre varios días consecutivos sin tener problemas con el factor de escala vertical de la señal. En este caso los grosores de

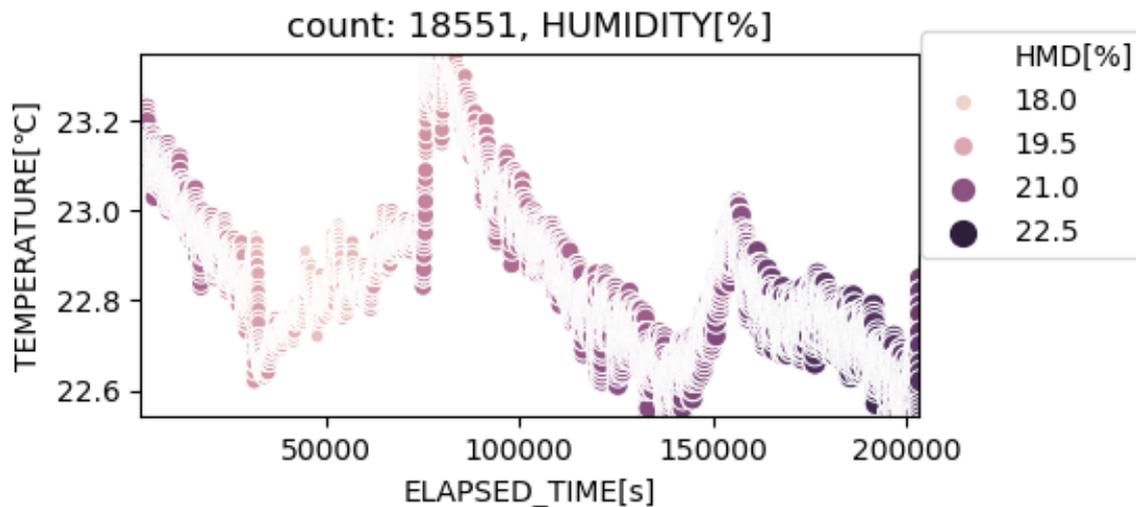


Figura 3.3: Medidas realizadas la tercera noche a partir de las 22:00 el día 22 de febrero de 2019, viernes empleando tweeter optibt38. La campaña de medidas se prolongó durante todo el fin de semana hasta la mañana del lunes 25.

las nubes de puntos son claramente comparables. Además podemos comparar si la temperatura es más o menos estable durante la noche que durante el día.

Se aprecia claramente que durante la noche en líneas generales la temperatura baja y que durante el día la temperatura sube. Por tanto corroboramos la gran influencia que tiene en la temperatura interior del edificio las variaciones externas de temperatura. Si bien claramente dichas variaciones se encuentran bastante amortiguadas por el aislamiento térmico del edificio y la calefacción, que consiguen estabilizar relativamente bien la temperatura en torno a los 23°.

Por ejemplo si analizamos las tres grandes zonas de pendiente negativa, que se corresponden con los descensos de temperatura nocturnos se distingue claramente que no son iguales. En particular la última noche presenta notables diferencias. Durante esa última noche la variación de temperatura total es de unas 3 décimas de grado centígrado, mientras que la noche anterior la variación fue más del doble. Otra cosa que llama la atención es que la humedad relativa fue bastante superior durante esa noche en que la variación de temperatura fue más suave. Este fenómeno tiene correspondencia con el hecho de que el tiempo húmedo y lluvioso suele atenuar las oscilaciones térmicas.

En la figura 3.4 , al igual que en las figuras 3.1 y 3.2 vemos la caída de la temperatura a lo largo de la noche. El experimento comienza a las 22:00 del martes 26 de Febrero de 2019 y termina a las 7:00 del miércoles 27 de Febrero de 2019. Comienza con

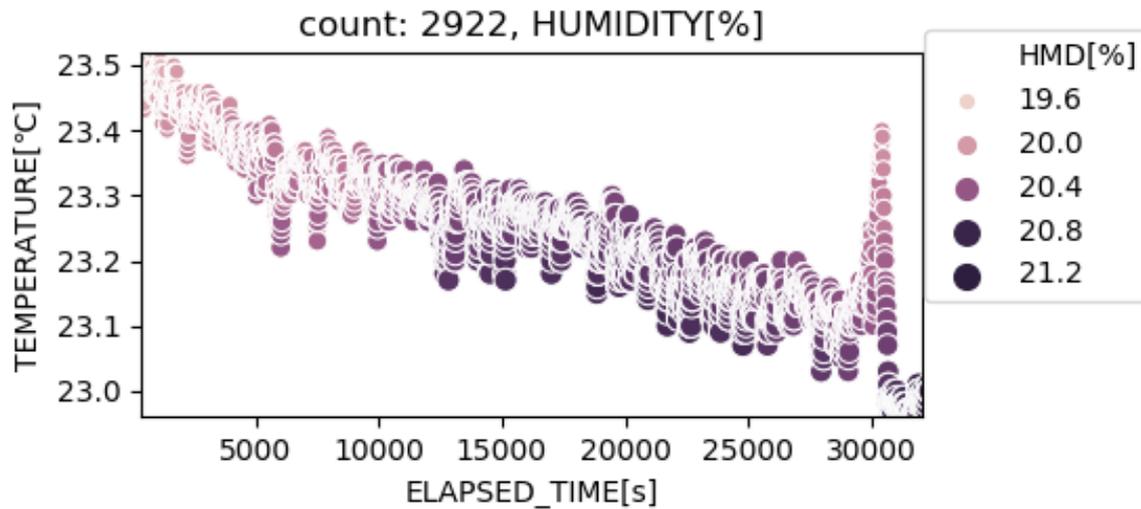


Figura 3.4: Medidas realizadas a partir de las 22:00 el día 26 de febrero de 2019, martes, probando PSU nueva con tweeter hifi a medio camino del motor y con phantom nuevo.

unos 23.5° y termina en torno a los 23°, es decir, a lo largo de toda la noche presenta temperaturas mayores que en los casos de las medidas realizadas la primera y segunda noche empleando el tweeter optibt38. En cuanto a la humedad relativa, aumenta a partir de las 2:00 de la noche y presenta menores valores de humedad que en los dos casos anteriores. En torno a las 6 de la mañana, aparece muy acentuado un pico de temperatura que presenta un gran momento de inestabilidad. Es aquí cuando nos damos cuenta de que no solo empleando el tweeter optibt38 sino que también con este tweeter hifi, se produce un momento de inestabilidad debido al encendido de calefacción que perjudica a nuestro sistema de medidas.

En la figura 3.5, se observa un descenso de la temperatura a lo largo de la noche. El experimento comienza a las 22:00 del miércoles 27 de Febrero de 2019. Comienza con unos 24.2° y termina en torno a los 23.3° con una diferencia de un grado desde el comienzo hasta el fin de la noche. En comparación con el caso anterior, donde la fuente se encuentra desplazada más cerca del origen que en el caso anterior, podemos ver que en esta figura los valores de temperatura son mayores pero sin embargo descienden de forma más rápida. En cuanto a la humedad relativa, podemos ver que es mayor en las horas centrales de la noche, sobre todo sobre las 3:30 de la noche. Al igual que en las figuras anteriores, en torno a las 6 de la mañana, aparece un momento de inestabilidad que es menos acentuado que en el caso de la figura 3.4.

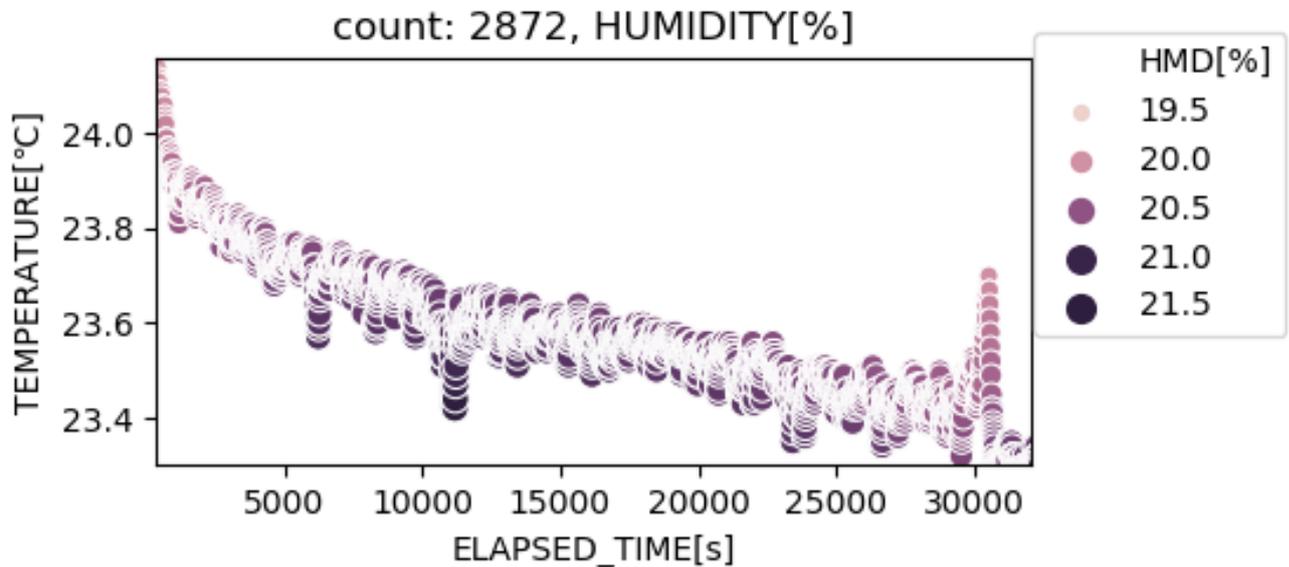


Figura 3.5: Medidas realizadas a partir de las 22:00 el día 27 de febrero de 2019, miércoles, probando PSU nueva con tweeter hifi, sin transformador de impedancias entre phantom y DSA y fuente desplazada más cerca del origen que el caso anterior.

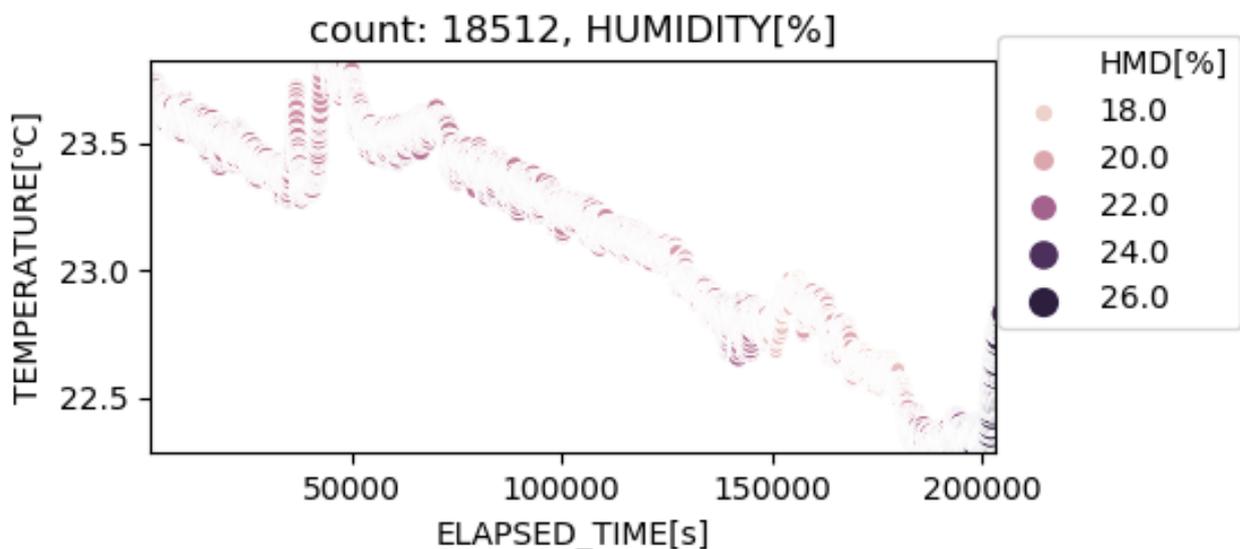


Figura 3.6: Medidas realizadas a partir de las 22:00 el día 1 de marzo de 2019, viernes, probando PSU nueva con tweeter hifi, con transformador y fuente desplazada cerca del origen. La campaña de medidas se prolongó durante todo el fin de semana hasta la mañana del lunes 4.

En la figura 3.6, se pueden ver ciertos cambios con respecto al caso anterior donde no se emplea transformador. El tiempo total de duración del experimento son unos 200000

segundos, es decir, unas 55,5 horas: dos días y medio aproximadamente. El objetivo de esta gráfica es poder comparar las variaciones entre varios días consecutivos sin tener problemas con el factor de escala vertical de la señal.

Aunque no se ve tan claro como en el caso de la figura 3.3, podemos ver que durante la noche la temperatura baja y que durante el día la temperatura sube. Hay cuatro zonas de pendiente negativa y tres zonas de pendiente positiva. Además, podemos ver que no se alcanzan grandes valores de humedad relativa y que éstos son muy parecidos a lo largo de toda la noche.

Si analizamos la figura, se puede ver que la penúltima noche la variación de temperatura total es de un grado, mientras que durante la primera y la última noche hay variaciones de unas 5 décimas de grado. En dicha figura también vemos que se adquieren valores de temperatura inferiores que a los del caso anterior cuando realizábamos las medidas sin transformador.

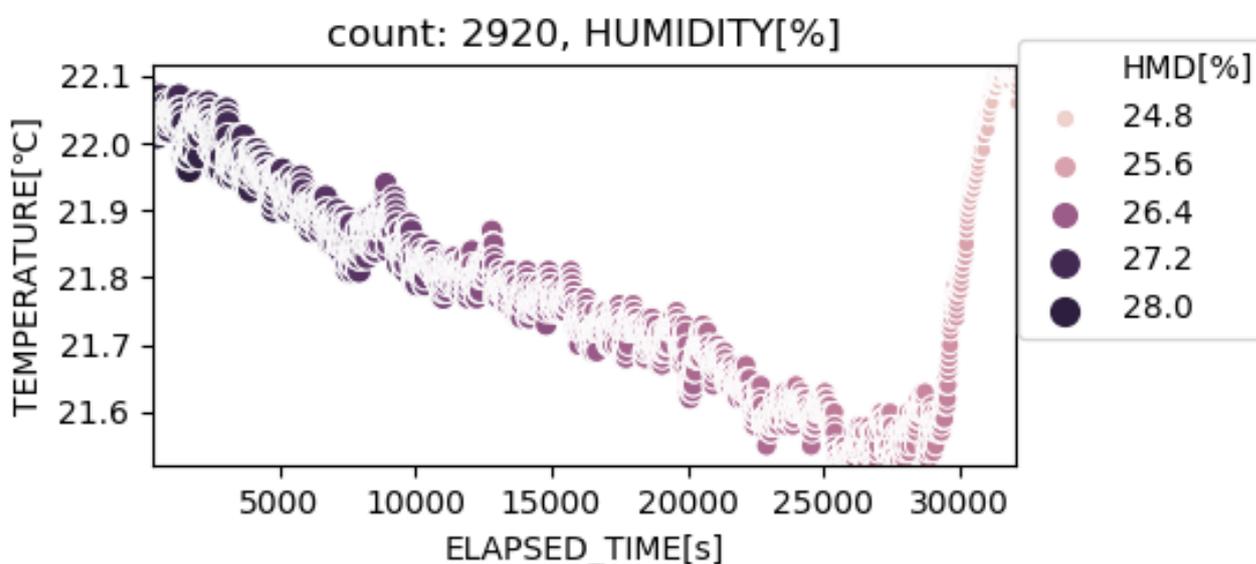


Figura 3.7: Medidas realizadas a partir de las 22:00 el día 6 de marzo de 2019, miércoles, probando PSU nueva con tweeter hifi, con transformador, fuente desplazada cerca del origen y malas condiciones meteorológicas.

En la figura 3.7, se observa un descenso de la temperatura a lo largo de la noche. El experimento comienza a las 22:00 del miércoles 6 de marzo de 2019 y finaliza a las 7:00 del día 7 de marzo de 2019. Comienza con unos 22.1° y termina en torno a los 21.5° con una diferencia de 1.5° desde el comienzo hasta el fin de la noche. Se alcanzan valores de temperatura inferiores respecto a la figura anterior donde no se producían

malas condiciones meteorológicas con una diferencia de 1° al comienzo y al final de la noche. En cuanto a la humedad relativa, podemos ver claramente que se adquieren valores mayores al principio de la noche y menores al final. Al igual que en las figuras anteriores pero siendo éste el caso en el que mejor podemos apreciarlo, en torno a las 6 de la mañana, aparece un gran pico de inestabilidad perjudicial para nuestro sistema de medidas.

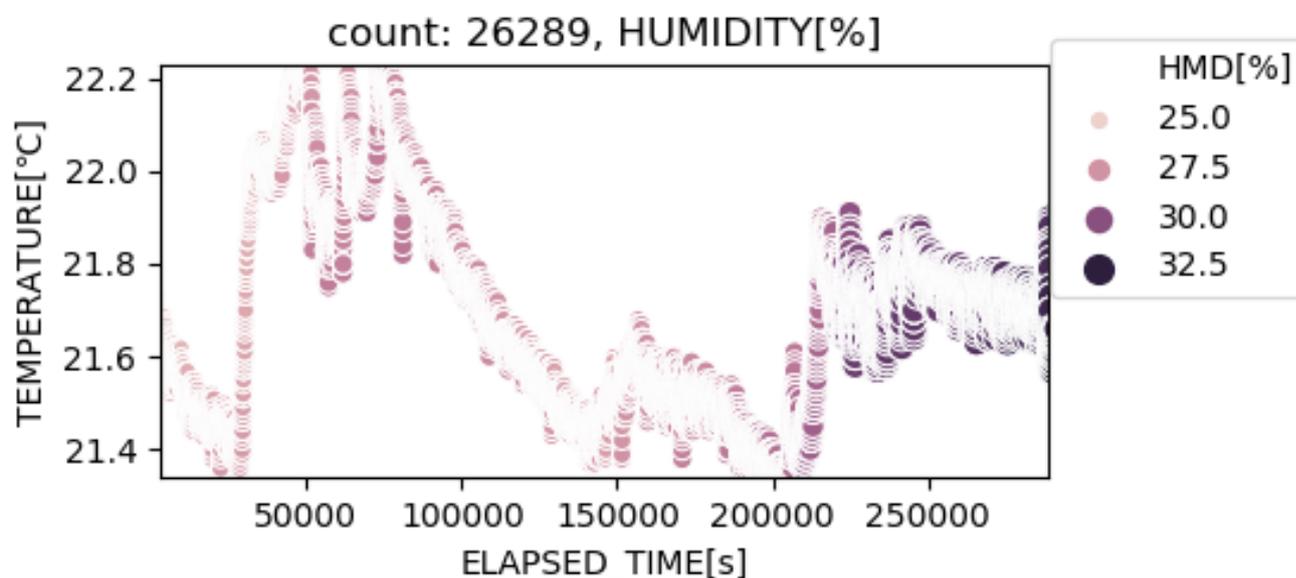


Figura 3.8: Medidas realizadas a partir de las 22:00 el día 7 de marzo de 2019, jueves, probando PSU nueva con tweeter hifi, con los micrófonos cerca de la fuente y sin ecos. La campaña de medidas se prolongó durante todo el fin de semana hasta la mañana del lunes 11.

Podemos ver que la figura 3.8 es la que mayor sentido tiene de las medidas realizadas hasta ahora, esto quizá es debido al aislar los micrófonos con el objetivo de intentar evitar inestabilidades. El tiempo total de duración del experimento son unos 280000 segundos, es decir unas 77,7 horas: algo más de tres días. El objetivo de esta gráfica es poder comparar claramente las variaciones entre varios días consecutivos sin tener problemas con el factor de escala vertical de la señal. En este caso los grosores de las nubes de puntos son finos y comparables. Además podemos comparar si la temperatura es más o menos estable durante la noche que durante el día.

Se aprecia claramente que durante la noche en líneas generales la temperatura baja y que durante el día la temperatura sube. Por tanto corroboramos la gran influencia que

tiene en la temperatura interior del edificio las variaciones externas de temperatura. Si bien claramente dichas variaciones se encuentran bastante amortiguadas por el aislamiento térmico del edificio y la calefacción, que consiguen estabilizar relativamente bien la temperatura en torno a los 22°.

Si analizamos las zonas de pendiente negativa, que se corresponden con los descensos de temperatura nocturnos, se distingue claramente que no son iguales. En particular, la pendiente que vemos entorno a los 100000 segundos donde presenta notables diferencias con respecto al resto. Al comienzo de esta segunda noche la variación de temperatura total es de unas 8 décimas de grado centígrado, mientras que en el resto de pendientes negativas no se producen variaciones tan marcadas. Otra cosa que llama la atención es que la humedad relativa es bastante similar obteniendo bajos valores de humedad a lo largo de los dos primeros días y medio, y a partir de este período hasta completar los 3 días los valores de humedad aumentan.

Se puede ver en las figuras mencionadas anteriormente que a las 6 de la mañana la temperatura empieza a subir rápidamente. En la figura 3.7, se puede ver el cambio de tendencia con más claridad en la línea 28472, si añadimos 15 segundos de retardo en arrancar las medias, hacia unas 8 horas de comenzar la medida se produce este cambio de tendencia. Se entiende que a esa hora se enciende la calefacción por lo que no se debería medir a partir de las 6:00 AM ya que perjudica a nuestro análisis de medidas.

La mayoría de las gráficas tienen un comportamiento muy parecido, donde parecen seguir aproximadamente una recta con una pendiente negativa y con una relación lineal inversa donde a medida que aumenta el tiempo desde las 22:00 de la noche hasta las 7:00 de la mañana, disminuye la temperatura consiguiendo temperaturas más frías.

En el cuadro 3.1, se muestra una comparativa de las 8 figuras representadas anteriormente, donde obtenemos la temperatura media, el recuento de humedad, y las desviaciones típicas de humedad y de temperatura de nuestras medidas.

Según dicha comparativa, en las gráficas que obtenemos un mayor recuento de humedad son en las figuras 3.3 y 3.8 con un porcentaje de 18551 y 26284 de humedad, especialmente en la última figura donde aumenta considerablemente el porcentaje de humedad respecto a todos los sistemas de medida empleados anteriormente.

	count	tmp std	tmp mean	hmd std
0	2928	0.173381	22.8444	0.224746
1	2928	0.107418	22.8641	0.206378
2	18551	0.179173	22.8605	0.843263
3	2922	0.121122	23.2521	0.236624
4	2872	0.164149	23.5888	0.182352
5	18508	0.425539	23.1378	0.96846
6	2919	0.160554	21.7886	0.543544
7	26284	0.220372	21.6967	1.59887

Cuadro 3.1: Resultados con período constante.

Además, la temperatura media más alta obtenida se produce en la figura 3.5 con un valor de 23.5888, siendo este el caso en el que es menor la desviación típica de humedad (0.182352). De manera contraria, la figura 3.8 presenta la temperatura media más baja y la desviación típica de humedad más alta (1.59887) por lo que a temperaturas más frías, la humedad es mayor.

Una vez analizada la situación en la que la humedad y la temperatura influyen en nuestros sistemas de medidas empleando un período constante, es decir, una frecuencia temporal constante, según la expresión vista en el capítulo 2:

$$v = \lambda/T \quad (3.1.1)$$

nos hemos dado cuenta comparando nuestro sistema con el ejemplo de una rueda, de que si cambiamos la temperatura, λ cambia al cambiar los caminos normalizados por λ . Como hemos mencionado en el capítulo 2, esto produce cambios de interferencia constructiva a destructiva originados al aumentar y disminuir la temperatura y no debidos a la posición, por lo que esta ha sido la gran pista para buscar posteriormente una propuesta para estabilizar los patrones de interferencia. También nos hemos dado cuenta de que al disminuir la frecuencia de la fuente de 5000Hz a frecuencias inferiores como por ejemplo 1000Hz, se lograba reducir la dependencia con la temperatura y por tanto se lograba una mayor estabilidad.

También es interesante ver la relación de la potencia registrada en los micrófonos con la longitud de onda para analizar la influencia de los rayos en los micrófonos cuando estos no están lo suficientemente aislados produciendo interferencias.

Al analizar la relación de la potencia registrada en los micrófonos con la longitud de onda, la temperatura y la humedad, vemos que las gráficas que más sentido tienen son las de las medidas realizadas a partir de las 22:00 el día 7 de marzo de 2019, jueves, y que se prolongan hasta el día 11 probando PSU nueva con tweeter hifi, con los micrófonos cerca de la fuente y sin ecos que aparecen en las figuras 3.9, 3.10, 3.11 y 3.12:

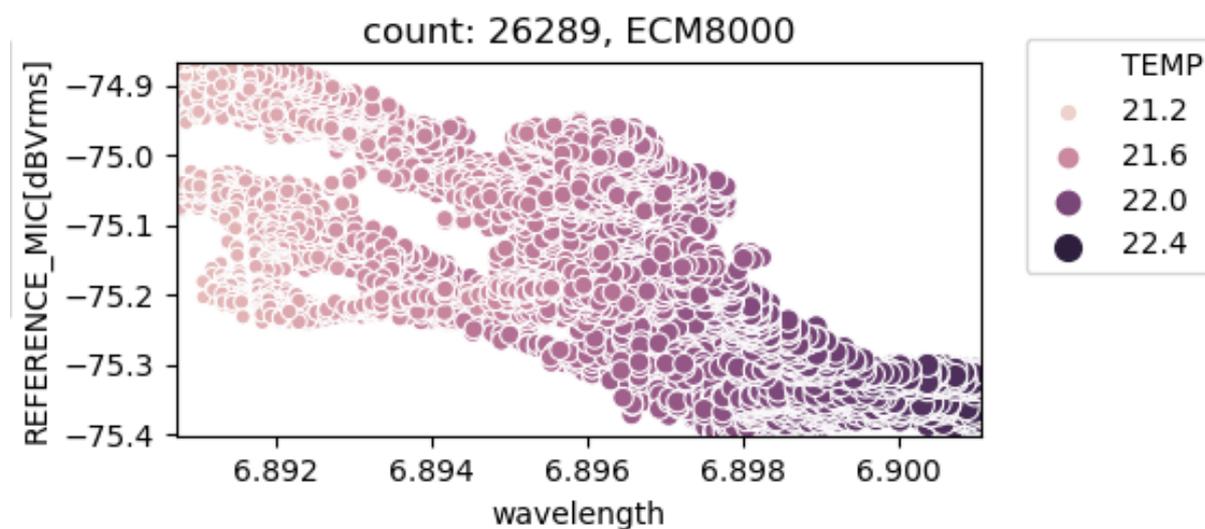


Figura 3.9: Relación de la potencia con la longitud de onda y la temperatura empleando el micrófono ECM8000.

En la figura 3.9 se observa como se sigue una tendencia descendente donde a medida que aumenta la λ , la potencia registrada en el micrófono ECM8000 disminuye. La potencia comienza con unos -74.9 dBVrms cuando tenemos una longitud de onda de 6.891 llegando hasta un valor de -75.4 dBVrms al alcanzar una longitud de onda de 6.902. En cuanto a la temperatura, se puede ver claramente como a medida que vamos aumentando la λ vamos aumentando la temperatura, partiendo de un valor de 21,2° y terminando en torno a los 22,4°. Por lo que podemos ver que hay una variación de unas 8 décimas de grado y que es cierta nuestra teoría ya que a medida que aumenta la λ aumenta la temperatura.

La figura 3.10 es idéntica a la de la gráfica anterior. Se sigue la misma tendencia descendente donde a medida que aumenta la λ , la potencia registrada en el micrófono M23 disminuye. La potencia comienza también con -74.9 dBVrms cuando tenemos una longitud de onda de 6.891 llegando hasta un valor de -75.4 dBVrms al alcanzar una longitud de onda de 6.902. En cuanto a la temperatura, se puede ver claramente

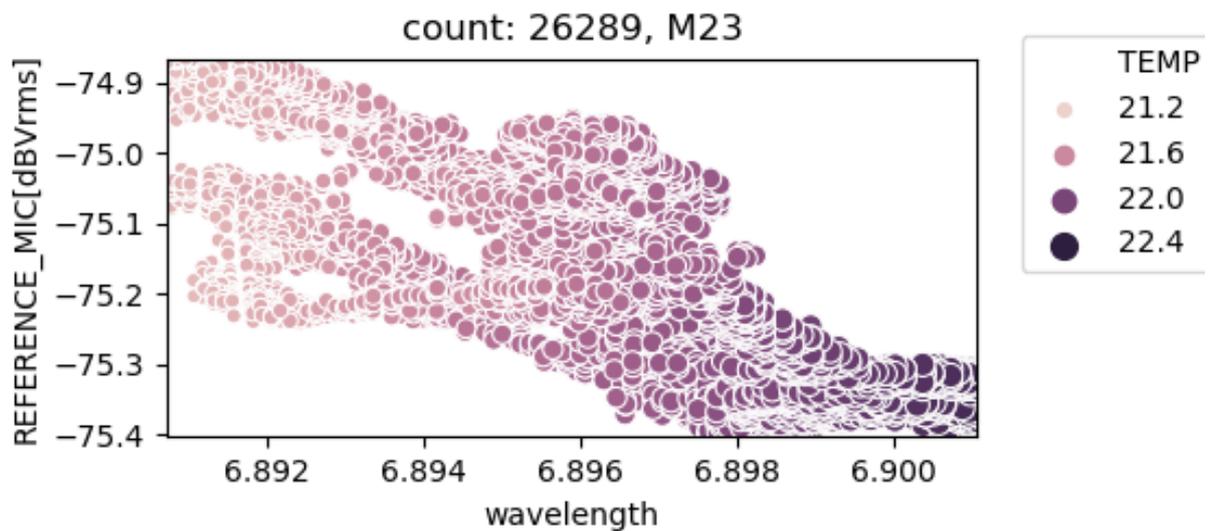


Figura 3.10: Relación de la potencia con la longitud de onda y la temperatura empleando el micrófono M23.

como a medida que vamos aumentando la λ vamos aumentando la temperatura, partiendo de un valor de $21,2^\circ$ y terminando en torno a los $22,4^\circ$. Al igual que en el caso anterior, aparecen dos ramas paralelas con nubes de puntos muy próximas que se juntan cuando llegan a un valor de longitud de onda de 6.896 dando lugar a una rama única con una nube de puntos bastante gruesa.

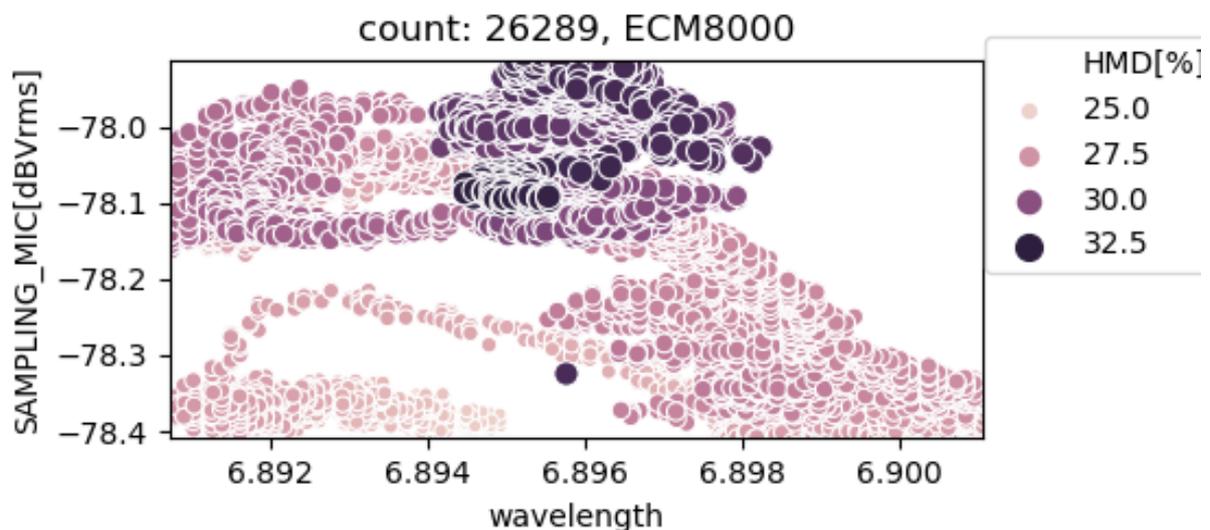


Figura 3.11: Relación de la potencia con la longitud de onda y la humedad empleando el micrófono ECM8000.

La figura 3.11 no sigue una tendencia descendente clara como ocurre en los casos anteriores. En esta gráfica aparentemente aparece una rama que sigue una trayectoria horizontal entre valores de potencia de -78 dBVrms y -78.15 dBVrms y que posee una nube de puntos bastante gruesa hasta alcanzar una longitud de onda de 6.896 . En esta rama vemos claramente que en torno a ese valor de λ se alcanzan los mayores puntos de humedad relativa con un valor del 32.5 por ciento de humedad.

Por otro lado, vemos que cuando alcanza unos 6.897 de longitud de onda la rama comienza a descender con una pendiente negativa donde la potencia cae a medida que aumentamos la longitud de onda hasta alcanzar un valor de -78.4 dBVrms. Esta rama, al igual que la rama que sigue una trayectoria horizontal, posee una nube de puntos con un gran grosor debido principalmente al zoom del eje vertical, sin embargo, presenta una bifurcación con una nube de puntos bastante fina que hace confundirnos un poco a la hora de explicar esta tendencia descendente.

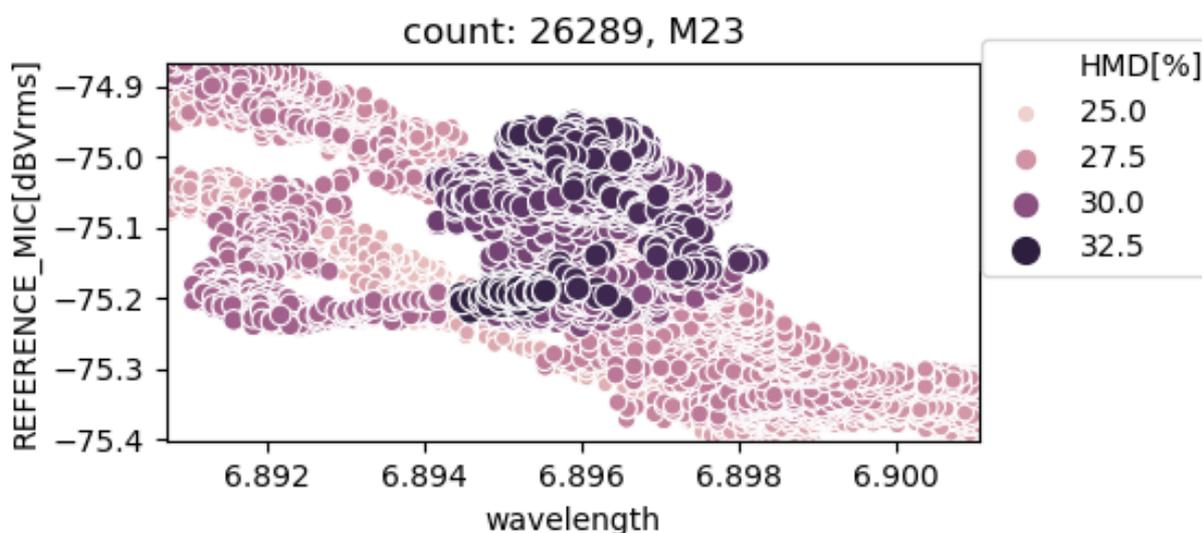


Figura 3.12: Relación de la potencia con la longitud de onda y la humedad empleando el micrófono M23.

La figura 3.12, sigue una tendencia descendente más clara que la de la figura 3.11. En esta gráfica la potencia comienza con unos -74.9 dBVrms cuando tenemos una longitud de onda de 6.891 llegando hasta un valor de -75.4 dBVrms al alcanzar una longitud de onda de 6.902 . Por lo que presenta valores de potencia mayores que los registrados en el micrófono ECM8000 y por tanto una mayor estabilidad respecto a éste.

En cuanto a la humedad relativa, vemos claramente que cuando llegamos a un valor de 6.896 de longitud de onda, se obtienen los mayores valores de humedad con un porcentaje del 32.5 por ciento de humedad.

Según el cuadro 3.2, donde al igual que en el cuadro 3.1 se muestra una comparativa de las figuras 3.1 a la 3.8 pero esta vez representando las medias y desviaciones típicas del micro 1 (M23) y del micro 2 (ECM8000), las gráficas 3.9, 3.10, 3.11 y 3.12 presentan medidas que son más estables que el resto de sistemas de medidas debido a que presentan una menor desviación típica, con un valor de 0.15457 en el caso del micrófono nuevo M23, y un valor de 0.169688 en el caso del micrófono ECM8000.

	mean1	mean2	std1	std2
0	-76.3813	-76.4191	0.838586	0.272042
1	-76.0003	-76.8362	0.53664	0.374162
2	-74.5841	-76.3078	0.913119	0.415012
3	-69.694	-76.5737	0.205242	0.256608
4	-122.385	-73.9563	1.47082	0.367982
5	-77.8252	-74.3844	2.09161	0.329157
6	-75.0995	-72.9644	0.290896	0.277748
7	-75.0791	-78.1345	0.15457	0.169688

Cuadro 3.2: Comparativa de medias y desviaciones típicas empleando el micrófono M23 y el micrófono ECM8000 y empleando frecuencia constante.

En dichas gráficas también vemos que a medida que aumenta la temperatura, la longitud de onda también aumenta por lo que a frecuencia constante y según la expresión:

$$\lambda = v/f \quad (3.1.2)$$

la velocidad de sonido también aumenta. La humedad no influye mucho en la velocidad, ya que en las gráficas vemos que no existe una relación directa con la longitud de onda y la velocidad del sonido. Sin embargo, al presentar este sistema de medida una humedad relativa alta (1.59887), afecta bastante a los micrófonos, especialmente al micrófono ECM8000 ya que no dispone de mecanismos de compensación y por eso vemos que obtiene valores de media, desviación, mínimos y máximos mayores que el micrófono M23.

Además, vemos que a mayor cambio de longitud de onda, mayor cambio de potencia lo que produce más interferencias y por tanto una mayor inestabilidad del sistema. Sino hubiera apenas diferencia de longitud de onda, la potencia sería prácticamente la misma.

En cuanto a la relación de la potencia registrada en los micrófonos con la absorción y la humedad, podemos ver que la gráfica con mejores resultados y que mayor sentido tiene es la mostrada en la figura 3.13, es decir, las medidas probando PSU nueva con tweeter hifi, con los micrófonos cerca de la fuente, sin ecos y empleando el micrófono M23.

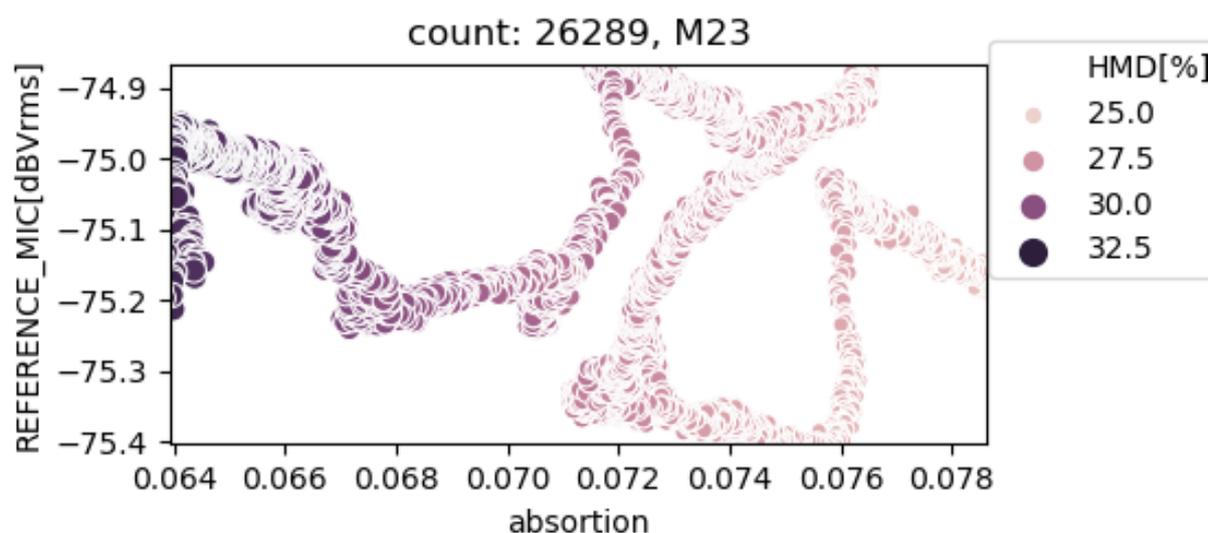


Figura 3.13: Relación de la potencia con la absorción y la humedad empleando el micrófono M23.

En la figura 3.13 se puede observar que se sigue una trayectoria curvilínea donde claramente se comienza con altos valores de humedad y donde a medida que aumentamos la absorción, el porcentaje de humedad disminuye. Pasamos de tener valores del 32,5 por ciento de humedad a valores del 25 por ciento de humedad. Por lo que cuanto más seco es el ambiente y por tanto hay una menor humedad, mayor es el sonido absorbido y por tanto mayor es la atenuación con la distancia.

Esta gráfica presenta una nube de puntos fina que distingue muy bien los porcentajes de humedad.

3.2. Ensayos usando λ constante

Como vemos que el sistema de medida más eficaz de los 8 realizados anteriormente es el de las medidas probando PSU nueva con tweeter hifi, con los micrófonos cerca de la fuente y sin ecos, y que a pesar de estar los micrófonos aislados presentan interferencias debido a que varía la potencia por los cambios de longitud de onda debidos a la temperatura, vamos a buscar una propuesta para estabilizar los patrones de interferencia como hemos mencionado anteriormente.

Con el objetivo de que la interferencia cambie sólo al mover el emisor y no por variaciones de temperatura, los caminos normalizados de los rayos para cada posición del emisor no puedan cambiar. Por tanto la propuesta es utilizar una λ constante y anular de este modo el efecto del cambio de temperatura controlando la posición de la fuente. Pretendemos conseguir que la potencia recibida sea prácticamente la misma mientras el emisor no cambie de posición.

Para ello, vamos a emplear el sistema más eficaz que hemos visto anteriormente, es decir, el de las medidas por la noche probando PSU nueva con tweeter hifi, micrófonos cerca de la fuente, sin ecos pero con λ constante. Además, vamos a realizar otra tanda de medidas empleando el mismo sistema de medida pero por el día para ver si obtenemos los mismos o mejores resultados que durante la noche.

Para los dos sistemas de medida realizados con λ constante, se ha analizado la relación entre la potencia registrada en los micrófonos y la temperatura.

En la figura 3.14 se muestran las medidas realizadas el día 13 de marzo de 2019, miércoles, por la noche a las 22:00 hasta las 6:00 del día 14 de marzo de 2019, con tweeter hifi como fuente puntual, con micrófonos cerca de la fuente, sin ecos y con λ constante. Hemos empleado una λ constante de 0,07 metros con una frecuencia temporal f que depende de la velocidad del sonido.

Podemos ver en dicha figura como la temperatura cae a lo largo de la noche. Comienza en torno a los 23,2° y termina en torno a los 22,4° con lo que la variación a lo largo de la noche es más o menos un grado. En cuanto a la humedad relativa, podemos ver que aumenta en las horas iniciales de la noche, es decir, de 22:00 a 24:00, y decrece al final de la noche, en torno a las 6:00 de la mañana. La nube de puntos es fina y distingue bastante bien los porcentajes de humedad.

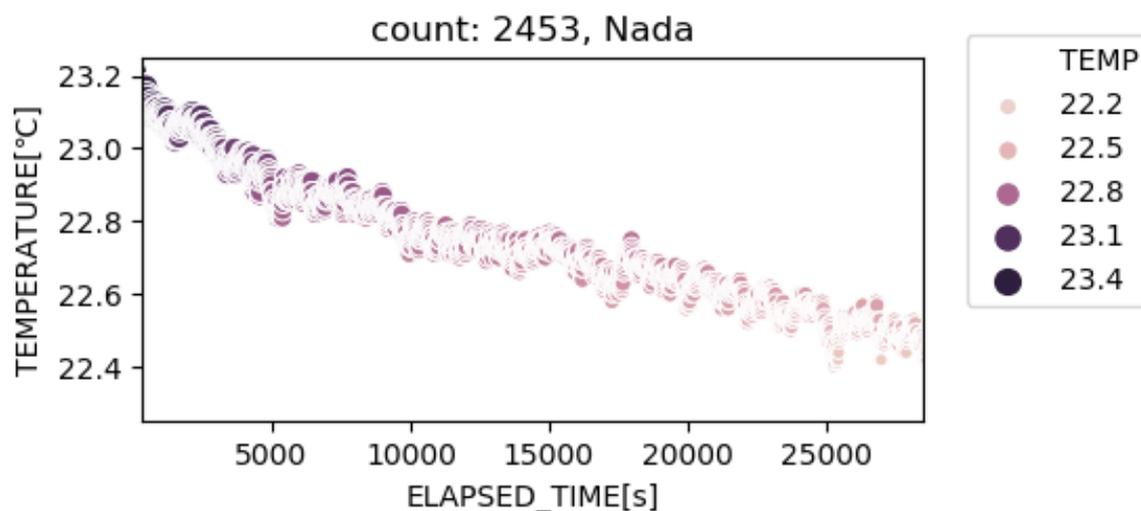


Figura 3.14: Medidas realizadas por la noche a partir de las 22:00 el día 13 de marzo de 2019, miércoles, hasta el 14 de marzo de 2019 con tweeter hifi, con micrófonos cerca de la fuente, sin ecos y con λ constante.

En la figura 3.15 se muestran las medidas realizadas el día 13 de marzo de 2019, miércoles, por el día a las 10:00 hasta las 16:00 con tweeter hifi, con micrófonos cerca de la fuente, sin ecos y con λ constante. En dicha figura hemos empleado el mismo valor de λ constante que en la figura anterior para la toma de medidas. Comienza en torno a los 22,6° creciendo hasta alcanzar los 22,95° a las 12:00 de la mañana. A esa hora la temperatura cae hasta alcanzar los 22,58° a las 15:00 de la tarde, donde a partir de esa hora hasta las 16:00, es decir, entorno a los 18000 segundos, aparece una situación de inestabilidad debido al encendido de la calefacción.

Esta figura en cambio no guarda una relación lineal como en el caso anterior debido a fenómenos de falta de homogeneidad como por ejemplo el sol en las ventanas o la calefacción lo que produce una situación de inestabilidad. Por lo que vemos claramente que las medidas realizadas por la noche son bastante mejores que las obtenidas durante el día.

Analizando este sistema de medida vemos que empleando una lambda constante se obtienen mejores resultados que utilizando un período constante, por lo que la velocidad de sonido dependerá del período y de la frecuencia ya que según la expresión:

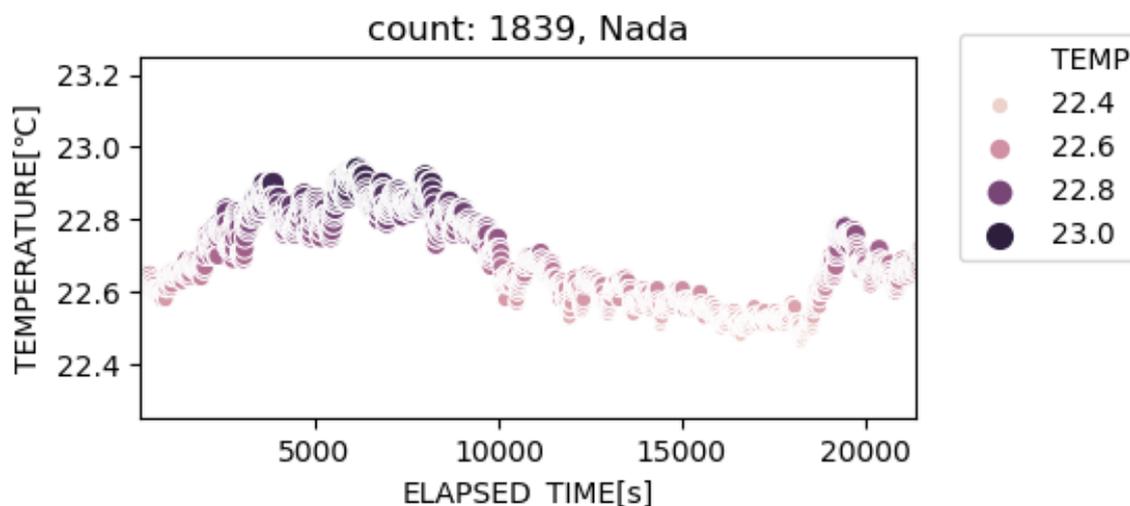


Figura 3.15: Medidas realizadas por el día a partir de las 10:00 el día 13 de marzo de 2019, miércoles, hasta las 16:00 de ese mismo día con tweeter hifi, con micrófonos cerca de la fuente, sin ecos y con λ constante.

$$T = 1/f$$

el período T mostrado en segundos (s) es recíproco a la frecuencia.

Según el cuadro 3.3 donde se muestra una comparativa de las figuras 3.14 y 3.15 y donde se representa la temperatura media, recuento de humedad y desviaciones típicas de humedad y temperatura de nuestras medidas, podemos observar que en la figura 3.14 obtenemos un mayor recuento de humedad con respecto a la figura 3.15, con un valor de 2453 por la noche y de 1839 por el día. Sin embargo, obtenemos valores de porcentajes de humedad mucho más inferiores que los que obteníamos en los sistemas de medida empleando frecuencia constante. Además, por la noche obtenemos una temperatura media más alta (22,7398) que por el día (22,6852), y una desviación típica de humedad menor por la noche (0,289832) que por el día (0,667105), por lo que por el día presenta mayor humedad.

Una vez analizadas las condiciones de humedad y temperatura, es interesante analizar la relación de la potencia registrada en los micrófonos con el tiempo y la temperatura para obtener la forma en la que dichos factores influyen en nuestros micrófonos y ver si logramos nuestro objetivo caracterizando la influencia de las especificaciones del

	count	tmp std	tmp mean	hmd std
0	2453	0.177183	22.7398	0.289832
1	1839	0.116722	22.6852	0.667105

Cuadro 3.3: Resultados con λ constante .

micrófono M23 y aislando en lo posible dicha influencia de las variaciones de señal causadas por los factores ambientales.

En las figuras 3.16, 3.17, 3.18 y 3.19 se muestra la relación de la potencia registrada en los micrófonos con el tiempo y la temperatura de las medidas realizadas por la noche y por el día empleando el micrófono ECM8000 y el M23.

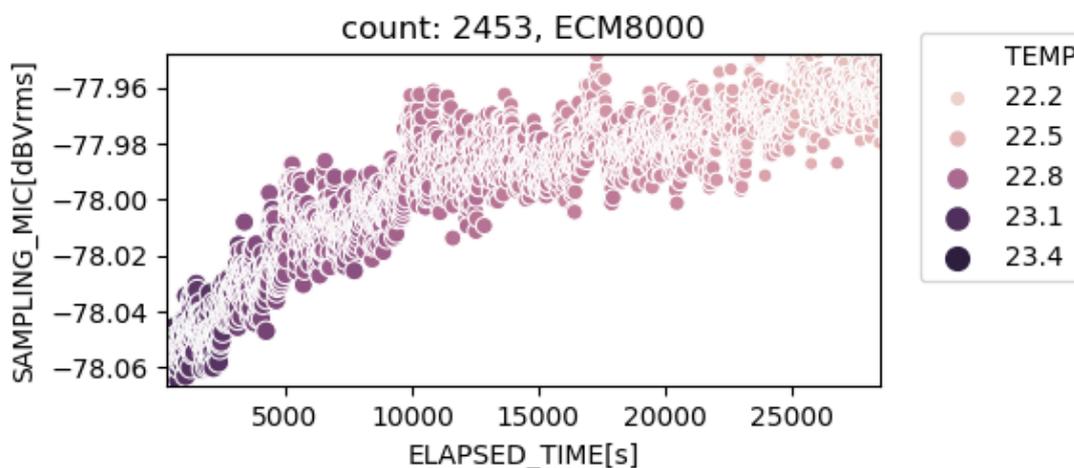


Figura 3.16: Medidas realizadas por la noche a partir de las 22:00 el día 13 de marzo de 2019, miércoles, con tweeter hifi, micrófonos cerca de la fuente, sin ecos, λ constante y empleando el micrófono ECM8000.

La figura 3.16 sigue una tendencia ascendente donde a medida que aumenta el tiempo a lo largo de la noche, la potencia registrada en el micrófono ECM8000 aumenta. Comienza con -78,06 dBVrms hasta alcanzar los -77,96 dBVrms a los 28000 segundos, en torno a las 6:00. En cuanto a la temperatura, se puede ver claramente como a medida que van pasando las horas a lo largo de la noche, la temperatura decrece pasando de 23,4° hasta alcanzar un valor de 22,2° con una variación de más o menos un grado a lo

largo de la noche. En cuanto a la nube de puntos, es bastante gruesa debido al zoom del eje vertical.

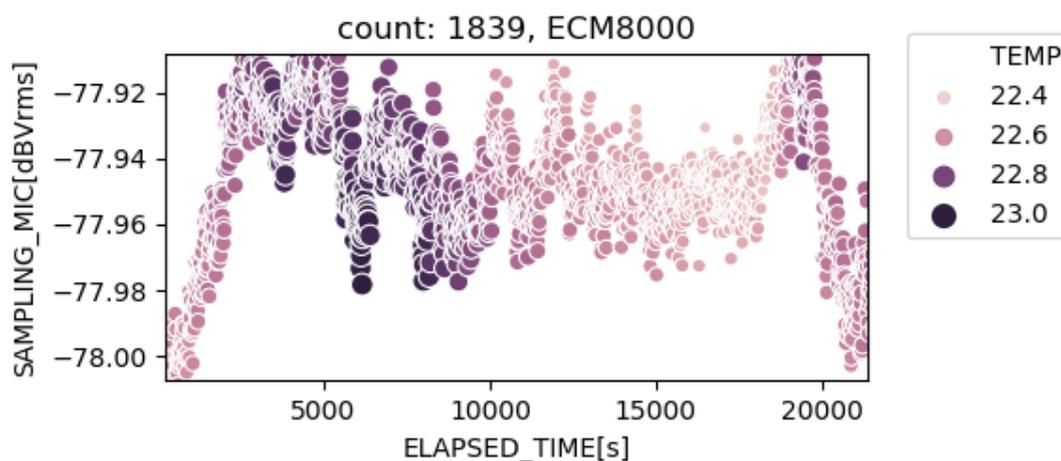


Figura 3.17: Medidas realizadas por el día a partir de las 10:00 el día 13 de marzo de 2019, miércoles, con tweeter hifi, micrófonos cerca de la fuente, sin ecos, λ constante y empleando el micrófono ECM8000.

La figura 3.17 sigue una tendencia ascendente comenzando con una potencia de -78 dBVrms y terminando con un valor de -77,92 hasta los 3000 segundos. A partir de ese momento, aunque no se distingue claramente, aparentemente la potencia registrada en el micrófono ECM8000 cae hasta alcanzar un valor de -77,96 dBVrms a los 15000 segundos. A partir de ese momento llega un momento de inestabilidad, en torno a las 15:00 debido al encendido de la calefacción. En cuanto a la temperatura, se puede observar que los mayores valores de temperatura se alcanzan a los 6000 segundos, en torno a las 12:00.

La figura 3.18 sigue una tendencia ascendente donde a medida que aumenta el tiempo a lo largo de la noche, la potencia registrada en el micrófono M23 aumenta. Comienza con -75,29 dBVrms hasta alcanzar los -75,26 dBVrms a los 28000 segundos, en torno a las 6:00. Por lo que vemos que presenta mayores valores de potencia que los registrados con el micrófono ECM8000. En cuanto a la temperatura, se puede ver claramente como a medida que van pasando las horas a lo largo de la noche, la temperatura decrece pasando de 23,4° hasta alcanzar un valor de 22,2° con una variación de más o menos un grado a lo largo de la noche. En cuanto a la nube de puntos, es bastante más gruesa

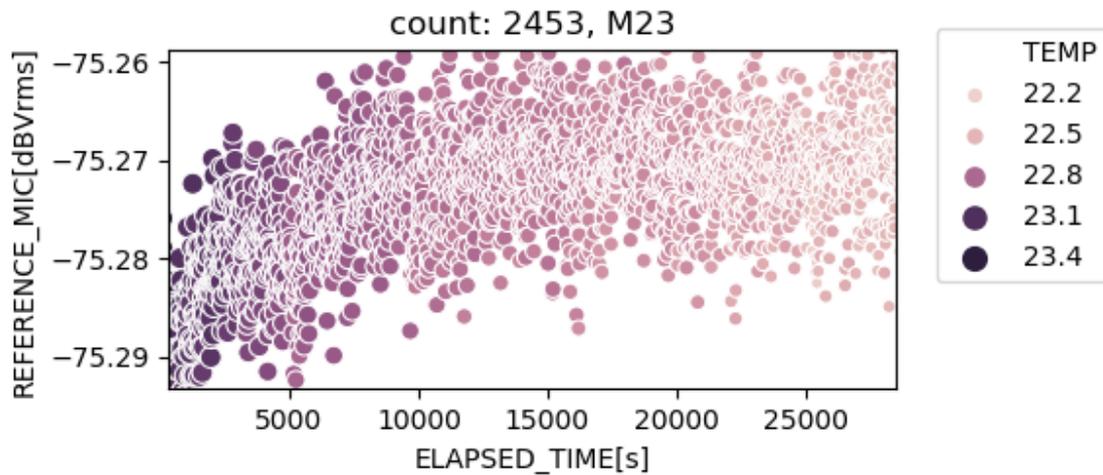


Figura 3.18: Medidas realizadas por la noche a partir de las 22:00 el día 13 de marzo de 2019, miércoles, con tweeter hifi, micrófonos cerca de la fuente, sin ecos, λ constante y empleando el micrófono M23.

que la de la figura 3.17 debido a que aumentamos el zoom del eje vertical con respecto a dicha gráfica.

La figura 3.19 sigue una tendencia ascendente donde a medida que aumenta el tiempo a lo largo del día, la potencia registrada en el micrófono M23 aumenta. Comienza con -75,350 dBVrms hasta alcanzar los -75,250 dBVrms a los 28000 segundos, en torno a las 6:00. Por lo que vemos que presenta mayores valores de potencia que los registrados con el micrófono ECM8000. En cuanto a la temperatura, se puede observar que los mayores valores de temperatura se alcanzan a los 6000 segundos, en torno a las 12:00 al igual que con el micrófono ECM8000. En cuanto a la nube de puntos, es bastante fina debido al aumento del zoom del eje vertical.

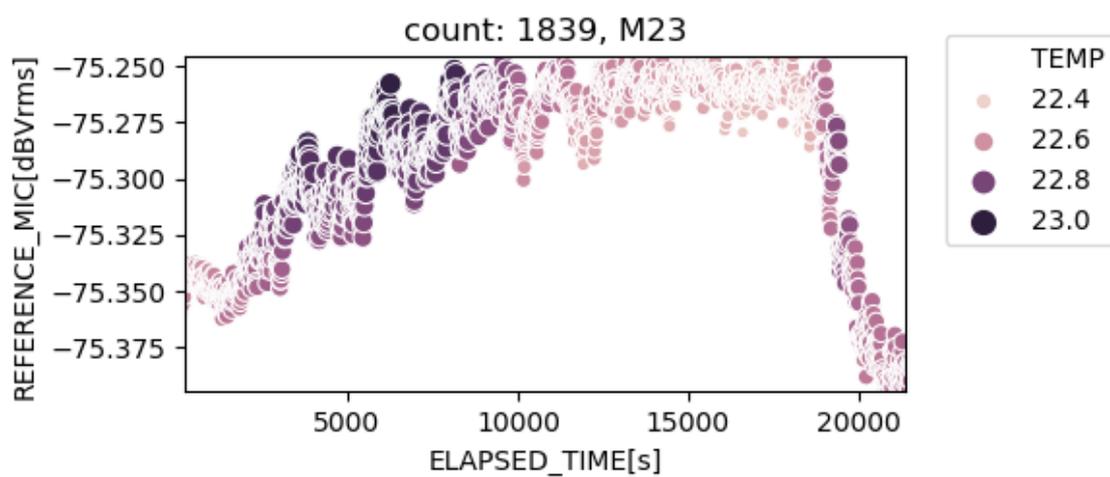


Figura 3.19: Medidas realizadas por el día a partir de las 10:00 el día 13 de marzo de 2019, miércoles con tweeter hifi, micrófonos cerca de la fuente, sin ecos, λ constante y empleando el micrófono M23.

Por otro lado, en las figuras 3.20, 3.21, 3.22 y 3.23 se muestra la relación de la potencia registrada en los micrófonos con la temperatura de las medidas realizadas por el día y por la noche empleando el micrófono ECM8000 y el M23.

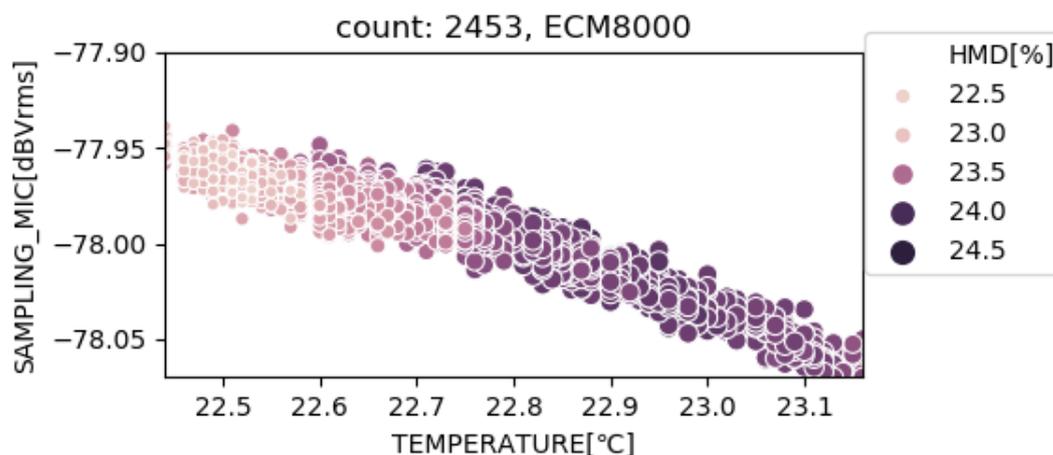


Figura 3.20: Medidas realizadas por la noche a partir de las 22:00 el día 13 de marzo de 2019, miércoles, con tweeter hifi, micrófonos cerca de la fuente, sin ecos, λ constante y empleando el micrófono ECM8000.

En la figura 3.20 se puede observar que a lo largo de la noche, se sigue una tendencia descendente donde a medida que aumenta la temperatura, la potencia registrada en el micrófono ECM8000 decrece. Comienza con $-77,95$ dBVrms hasta alcanzar los $-78,05$ dBVrms al final de la noche. En cuanto a la temperatura, se puede observar claramente como pasamos de tener un valor de $22,4^\circ$ hasta alcanzar un valor de $23,2^\circ$ con una variación de más o menos un grado a lo largo de la noche.

En cuanto a la humedad relativa, vemos claramente que también aumenta a lo largo de la noche pasando de un valor del 22,5 por ciento de humedad hasta alcanzar un valor del 24 por ciento. Además, vemos que la nube de puntos es bastante fina debido al aumento del zoom del eje vertical.

En la figura 3.21 se puede observar que a lo largo del día, se sigue una tendencia aproximadamente constante. Se mantiene aproximadamente un valor de potencia constante de unos $-77,95$ dBVrms a medida que aumenta la temperatura. Se puede observar como pasamos de tener un valor de $22,5^\circ$ a un valor de $22,9^\circ$ con una variación de 4 décimas de grado a lo largo del día.

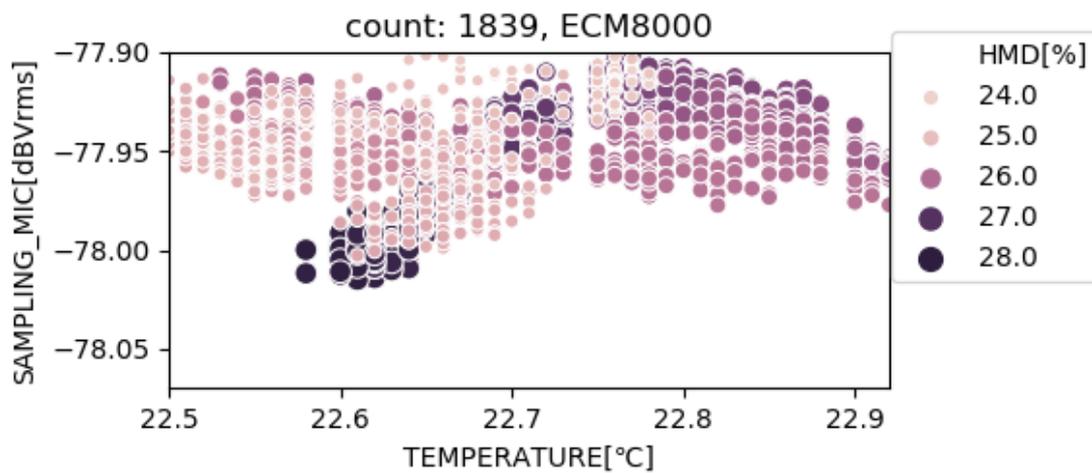


Figura 3.21: Medidas realizadas por el día a partir de las 10:00 el día 13 de marzo de 2019, miércoles, con tweeter hifi, micrófonos cerca de la fuente, sin ecos, λ constante y empleando el micrófono ECM8000.

En cuanto a la humedad relativa, vemos claramente que los mayores valores de humedad se obtienen al alcanzar una temperatura de $22,6^{\circ}$. Además, vemos que la nube de puntos es gruesa y muy diferente a la obtenida durante la noche.

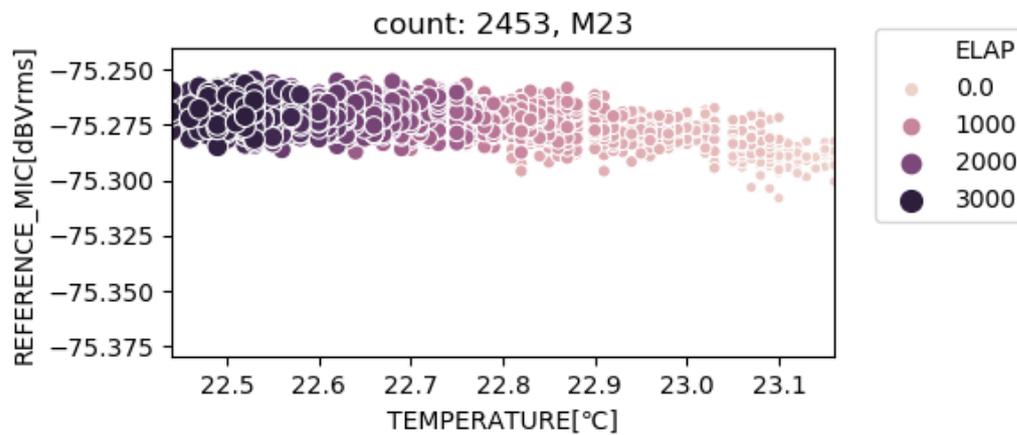


Figura 3.22: Medidas realizadas por la noche a partir de las 22:00 el día 13 de marzo de 2019, miércoles, con tweeter hifi, micrófonos cerca de la fuente, sin ecos, λ constante y empleando el micrófono M23.

En la figura 3.22 se puede observar que claramente es el mejor resultado obtenido hasta ahora y que es un resultado muy bueno. A diferencia de como ocurría con el micrófono ECM8000, se sigue una trayectoria constante a lo largo de la noche. Además, se mantiene un valor de potencia constante de aproximadamente unos -75,275 dBVrms durante toda la noche. Por lo que el empleo de este nuevo micrófono mejora nuestras medidas con respecto al ECM8000 ya que cuenta con mecanismos de compensación de la temperatura en la propagación de señales acústicas en el interior de la cavidad resonante.

La nube de puntos es fina, no se encuentran esparcidos a lo ancho por lo que no han existido grandes variaciones de temperatura y por lo tanto se produce una gran estabilidad al no producirse cambios bruscos de temperatura.

En la figura 3.23 se puede observar que no se sigue una tendencia constante clara como la obtenida durante la noche empleando el micrófono M23. Parece seguir una trayectoria constante a lo largo del día en torno a los -75,275 dBVrms a medida que aumenta la temperatura pero a diferencia del caso anterior, aparece una bifurcación donde la potencia se reduce hasta los -75,375 dBVrms.

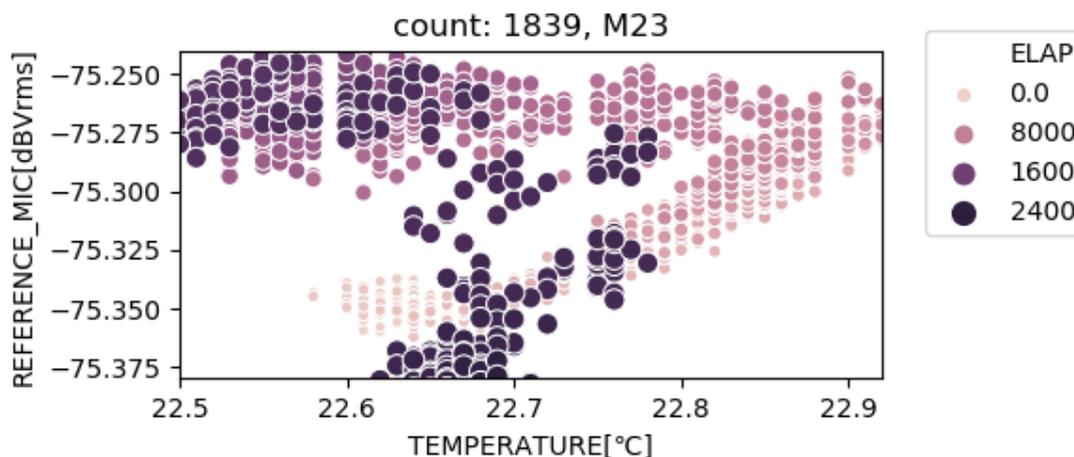


Figura 3.23: Medidas realizadas por el día a partir de las 10:00 el día 13 de marzo de 2019, miércoles, con tweeter hifi, micrófonos cerca de la fuente, sin ecos, λ constante y empleando el micrófono M23.

La nube de puntos del mismo color están esparcidos a lo ancho y no se definen tan claros como el caso anterior. Al producirse más variaciones de temperatura que en la figura 3.22 no se produce una situación de gran estabilidad.

De estas cuatro medidas realizadas se ve claramente en las gráficas que el mejor resultado se obtiene por la noche empleando el micrófono M23. Por la noche, las medidas se encuentran unas 4 veces menos desparramadas en el eje Y con una desviación típica de 0.00722815, por lo que son más estables.

Esto es debido a los gradientes de temperatura, donde por el día la variación total es más pequeña pero sin embargo localmente las pendientes son mayores. Es posible que en la habitación tengamos fenómenos de falta de homogeneidad asociados a los gradientes de temperatura generando perturbaciones en la amplitud como por ejemplo el sol en las ventanas o el arranque de la calefacción. Por lo tanto, obtenemos una λ constante más precisa cuanto más homogéneo es el ambiente.

Por otro lado vemos en la gráfica del día que los puntos del mismo color están más esparcidos a lo ancho, lo que indica que en un intervalo similar o más pequeño que en la gráfica nocturna, ha existido una variación más fuerte de temperatura y eso ha creado mayores oscilaciones en amplitud.

Dicha explicación también la podemos comprobar en el cuadro 3.4, el cual muestra una comparativa de las figuras 3.14 y 3.15 pero esta vez representando las medias y desviaciones típicas del micro 1 (M23) y del micro 2 (ECM8000).

	mean1	mean2	std1	std2
0	-75.2732	-77.9927	0.00722815	0.0275643
1	-75.2931	-77.9524	0.0399682	0.104629

Cuadro 3.4: Comparativa de medias y desviaciones típicas empleando el micrófono M23 y el micrófono ECM8000 y empleando λ constante.

Por otro lado, en las figuras 3.24,3.25,3.26 y3.27 se muestra la relación de la potencia registrada en los micrófonos con la absorción y la humedad de las medidas realizadas por el día y por la noche empleando el micrófono ECM8000 y el M23.

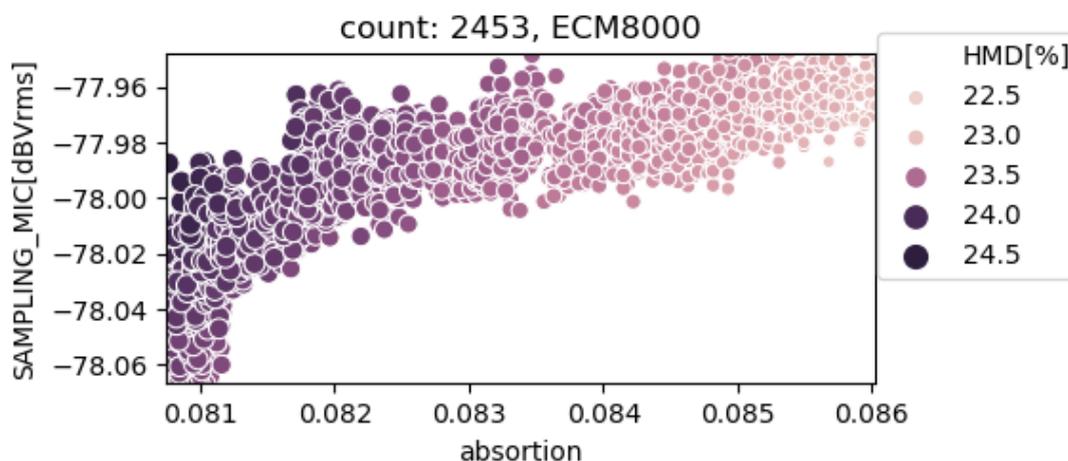


Figura 3.24: Medidas realizadas por la noche a partir de las 22:00 el día 13 de marzo de 2019, miércoles, con tweeter hifi, micrófonos cerca de la fuente, sin ecos, λ constante y empleando el micrófono ECM8000.

En la figura 3.24 se puede observar que a medida que aumenta la absorción a lo largo de la noche, la potencia aumenta. Comienza con un valor de -78,06 dBVrms y termina con un valor de -77,96 dBVrms al finalizar la noche. En cuanto a la humedad relativa, pasamos de tener valores del 24 por ciento de humedad a valores del 22,5 por ciento al finalizar la noche. A medida que aumentamos la absorción, el porcentaje de humedad disminuye, por lo que cuanto más seco es el ambiente y por tanto hay una menor

humedad, mayor es el sonido absorbido y por tanto mayor es la atenuación con la distancia.

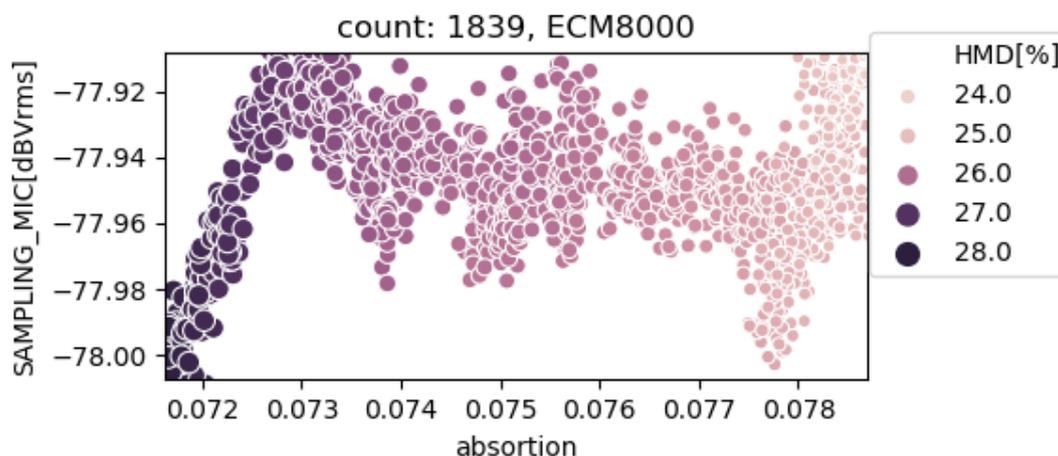


Figura 3.25: Medidas realizadas por el día a partir de las 10:00 el día 13 de marzo de 2019, miércoles, con tweeter hifi, micrófonos cerca de la fuente, sin ecos, λ constante y empleando el micrófono ECM8000

En la figura 3.25 se puede observar que no hay una relación lineal clara entre la potencia y la absorción a diferencia de como ocurre con las medidas realizadas durante la noche con el micrófono ECM8000. Sin embargo, se alcanzan mayores valores de potencia que en el caso anterior, alcanzando valores mínimos de -78 dBVrms de potencia y máximos de -77.91 dBVrms.

En cuanto a la humedad relativa, pasamos de tener valores del 28 por ciento de humedad a valores del 24 por ciento al finalizar la toma de medidas realizadas durante el día. Al igual que en la gráfica anterior, a medida que aumentamos la absorción, el porcentaje de humedad disminuye, por lo que cuanto más seco es el ambiente y por tanto hay una menor humedad, mayor es el sonido absorbido y por tanto mayor es la atenuación con la distancia.

En la figura 3.26 se puede observar que hay una relación lineal clara entre la potencia y la absorción donde a medida que aumentamos la absorción, la potencia aumenta. Comienza con un valor de -75,29 dBVrms y termina con un valor de -75,26 al finalizar la noche.

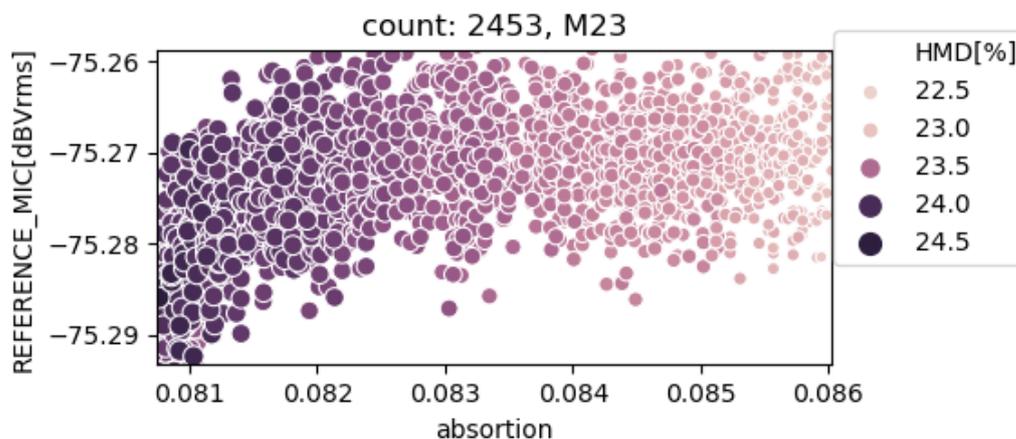


Figura 3.26: Medidas realizadas por la noche a partir de las 22:00 el día 13 de marzo de 2019, miércoles, con tweeter hifi, micrófonos cerca de la fuente, sin ecos, λ constante y empleando el micrófono M23.

En cuanto a la humedad relativa, pasamos de tener valores del 24,5 por ciento de humedad a valores del 22,5 por ciento al finalizar la noche. Al aumentar la absorción, al igual que en las gráficas anteriores empleando el micrófono ECM8000 la humedad disminuye. Sin embargo, en esta gráfica se ve claramente que con el micrófono M23 se obtienen mejores resultados que con el anterior ya que dicha gráfica guarda una mayor estabilidad. La nube de puntos es gruesa debido al aumento de zoom en el eje vertical.

En la figura 3.27 se puede observar como a medida que aumenta la absorción, la potencia aumenta a lo largo de la tanda de medidas realizadas durante el día. Comienza con un valor de -75,350 dBVrms y termina con un valor de -75,250.

En cuanto a la humedad relativa, pasamos de tener valores del 28 por ciento de humedad a valores del 24 por ciento al finalizar la tanda. Alcalzándose por lo tanto mayores valores de porcentaje de humedad durante el día que durante por la noche. Sin embargo, dicha gráfica no tiene una gran estabilidad como en el caso anterior ya que al final de la tanda, la nube de puntos del mismo color se encuentra más esparcidos a lo ancho, creando mayores oscilaciones en amplitud y por tanto más inestabilidades.

Podemos ver que la gráfica con mejores resultados es la de la figura 3.26, con las medidas tomadas por la noche con el micrófono M23, donde podemos ver que a medida que aumenta la absorción, la potencia aumenta.

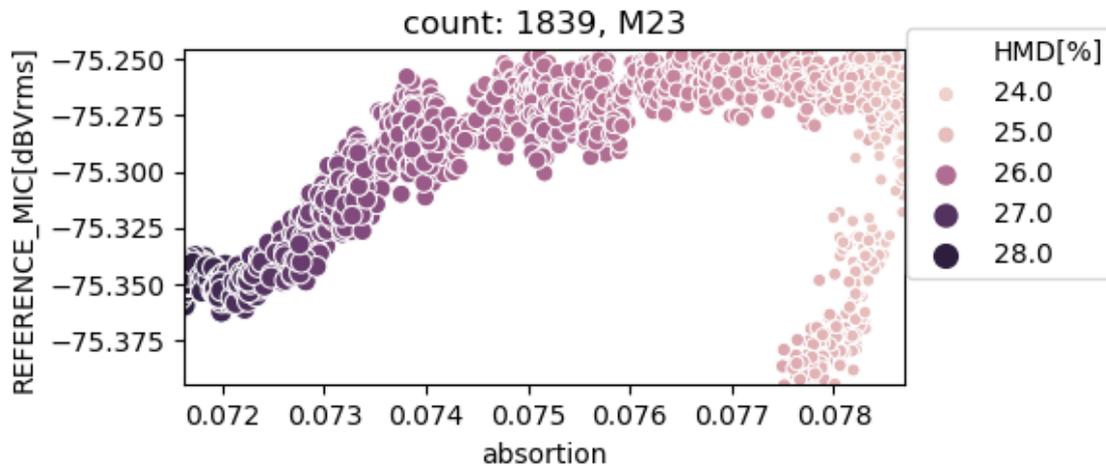


Figura 3.27: Medidas realizadas por el día a partir de las 10:00 el día 13 de marzo de 2019, miércoles, con tweeter hifi, micrófonos cerca de la fuente, sin ecos, λ constante y empleando el micrófono M23.

Después de todas las medidas realizadas, hemos podido comprobar que el micrófono M23 si que favorece nuestro sistema de medidas en comparación con el micrófono ECM8000 debido a su electrónica para compensar variaciones que ocurrían en el experimento preexistente.

El micrófono ECM8000 es perfecto a la hora de emplearlo con cualquier analizador en tiempo real, posee una entrada fet de ruido ultra bajo sin transformador que elimina distorsiones en baja frecuencia y una respuesta de frecuencia plana de 20Hz-20KHz.

Sin embargo, dicho micrófono no posee gran capacidad de medición del nivel de ruido de interferencia.

El micrófono M23 dispone de una sensibilidad que no se ve tan afectada por los factores ambientales como ocurría con el micrófono ECM8000 y de una mejor respuesta en frecuencia. Una de las características clave es que es inmune a gran parte de las fluctuaciones atmosféricas y de la temperatura por lo que su uso favorece nuestro sistema de medidas.

La mejora de las características de dicho micrófono se ve reflejado en el precio siendo este uno de sus inconvenientes ya que presenta un coste bastante mayor que el micrófono ECM8000.

Capítulo 4

Conclusiones y líneas futuras

Con los resultados mostrados en el capítulo anterior la conclusión directa que se debe de sacar es que las especificaciones del micrófono M23 influyen favorablemente en nuestro sistema de medida experimental, donde muchas variaciones que ocurrían en la toma de medidas realizadas con el micrófono ECM8000 en el sistema preexistente ahora desaparecen.

Esto es debido a que el micrófono nuevo dispone de electrónica que compensa las variaciones de temperatura y de humedad que creaban inestabilidad.

Aunque esto mejora nuestro experimento, la conclusión clara que debemos de sacar es que el gran problema que presenta nuestro sistema es el efecto de la temperatura, donde los caminos normalizados por λ y la interferencia cambian al aumentar y disminuir la temperatura, al mantener una frecuencia temporal constante. Este cambio de interferencia sólo es debido a la temperatura y no a la posición.

Para resolver este problema de la temperatura hemos empleado un generador a λ constante y variando la frecuencia temporal del generador de señal para compensar el cambio en la λ debido al cambio de temperatura. De este modo la información obtenida a lo largo de toda la noche acerca de la posición del emisor mediante las interferencias es consistente y nos permite controlar la posición de la fuente que es lo que nos interesa.

En cuanto a la variación de la potencia recibida en una noche antes de usar λ constante, es decir, al emplear una frecuencia constante y el micro M23 vemos que se obtiene una desviación estándar en la potencia de 0,15457 dBVrms, mientras que con el micro ECM8000 un valor de 0,169688 dBVrms. Por otro lado, una noche después de usar λ

constante, vemos que obtenemos una desviación típica de 0.00722815 dBVrms con el micro M23, mientras que con el micro ECM8000 una desviación de 0,0275643 dBVrms. Por lo que al referirnos a la cuantificación de la mejora vemos claramente que se produce una mayor estabilidad en la noche después de usar una λ constante y emplear el micro M23 en comparación con la potencia recibida una noche antes de usar una λ constante produciéndose unas medidas con una desviación típica 21 veces menor.

Hay que destacar también que para obtener las gráficas mostradas en el anterior capítulo y poder analizar de esta forma unos mejores resultados hemos tenido que realizar una gran cantidad de medidas. Concretamente, para los ensayos usando frecuencia constante hemos realizado una cantidad de 77.930 medidas con todos los sistemas de medida empleados, mientras que para los ensayos usando λ constante hemos realizado una cantidad de 4.294 medidas de la suma de las medidas realizadas por la noche y por el día, por lo que en total hemos realizado 82.224 medidas para nuestro experimento.

Al conseguir que las medidas dentro de la cavidad sean mucho más estables sin cambiar la posición de la fuente externa, se garantiza que la información que se obtiene al cambiar la posición de la fuente externa es debida al propio cambio de posición, por lo que gracias a este trabajo se puede profundizar en esa relación. De cara a líneas futuras, sería interesante estudiar algoritmos para procesar las medidas tomadas dentro de la cavidad con el objeto de caracterizar el emisor en el exterior de la cavidad con la mayor precisión posible. Para ello se pueden usar cavidades con otras formas o un mayor número de aperturas por ejemplo. Otra línea interesante sería utilizar técnicas de reversibilidad para enfocar ultrasonidos fuera de la cavidad, por ejemplo con el fin último de crear imágenes médicas. En fin, este trabajo sirve de base para muchos posibles avances.

Índice de figuras

1.1	Experimento desarrollado	2
1.2	Alzado de la cavidad resonante con apertura.	4
1.3	Perfil izquierdo que presenta la cavidad resonante.	4
1.4	Techo de la cavidad resonante.	5
1.5	Perfil derecho que presenta la cavidad resonante.	5
1.6	Alzado posterior de la cavidad resonante.	6
1.7	Generador de funciones.	7
1.8	Amplificador de señal PMA-520AE.	7
1.9	Analizador de señal.	8
1.10	Phantom power micros.	8
1.11	GPIB-LAN bridge.	9
1.12	Arduino que mueve el micrófono dentro de la cavidad resonante. . . .	10
1.13	Arduino que apunta el altavoz exterior para que emita hacia el centro de la apertura.	11
1.14	Micrófono ECM8000.	12
1.15	Micrófono M23.	13
1.16	Guías en el interior de la cavidad para desplazar el micrófono.	14
1.17	Emisor de ondas acústicas.	15
1.18	Ordenador central.	16
1.19	Sistema de guías en el exterior de la cavidad para desplazar el altavoz que excita las ondas acústicas que penetrarán en la cavidad a través de la apertura.	17
2.1	Giro de una rueda.	22
2.2	Suma vectorial de dos ondas.	25
2.3	Fasores en fase.	25
2.4	Fasores en oposición de fase.	26

2.5	Curvatura en la propagación del sonido debida a la variación de temperatura	27
2.6	Función para calcular la velocidad del sonido	29
2.7	Ilustración de la ley de la inversa del cuadrado	30
2.8	Influencia de la humedad en la atenuación del sonido	31
2.9	Función para calcular la atenuación del sonido	33
2.10	Refracción de una onda sonora.	34
3.1	Medidas realizadas la primera noche a partir de las 22:00 el día 20 de febrero de 2019, miércoles, empleando el tweeter optibt38.	42
3.2	Medidas realizadas la segunda noche a partir de las 22:00 del 21 de febrero de 2019, jueves, empleando el tweeter optibt38.	43
3.3	Medidas realizadas la tercera noche a partir de las 22:00 el día 22 de febrero de 2019, viernes empleando tweeter optibt38. La campaña de medidas se prolongó durante todo el fin de semana hasta la mañana del lunes 25.	44
3.4	Medidas realizadas a partir de las 22:00 el día 26 de febrero de 2019, martes, probando PSU nueva con tweeter hifi a medio camino del motor y con phantom nuevo.	45
3.5	Medidas realizadas a partir de las 22:00 el día 27 de febrero de 2019, miércoles, probando PSU nueva con tweeter hifi, sin transformador de impedancias entre phantom y DSA y fuente desplazada más cerca del origen que el caso anterior.	46
3.6	Medidas realizadas a partir de las 22:00 el día 1 de marzo de 2019, viernes, probando PSU nueva con tweeter hifi, con transformador y fuente desplazada cerca del origen. La campaña de medidas se prolongó durante todo el fin de semana hasta la mañana del lunes 4.	46
3.7	Medidas realizadas a partir de las 22:00 el día 6 de marzo de 2019, miércoles, probando PSU nueva con tweeter hifi, con transformador, fuente desplazada cerca del origen y malas condiciones meteorológicas.	47
3.8	Medidas realizadas a partir de las 22:00 el día 7 de marzo de 2019, jueves, probando PSU nueva con tweeter hifi, con los micrófonos cerca de la fuente y sin ecos. La campaña de medidas se prolongó durante todo el fin de semana hasta la mañana del lunes 11.	48
3.9	Relación de la potencia con la longitud de onda y la temperatura empleando el micrófono ECM8000.	51

3.10	Relación de la potencia con la longitud de onda y la temperatura empleando el micrófono M23.	52
3.11	Relación de la potencia con la longitud de onda y la humedad empleando el micrófono ECM8000.	52
3.12	Relación de la potencia con la longitud de onda y la humedad empleando el micrófono M23.	53
3.13	Relación de la potencia con la absorción y la humedad empleando el micrófono M23.	55
3.14	Medidas realizadas por la noche a partir de las 22:00 el día 13 de marzo de 2019, miércoles, hasta el 14 de marzo de 2019 con tweeter hifi, con micrófonos cerca de la fuente, sin ecos y con λ constante.	57
3.15	Medidas realizadas por el día a partir de las 10:00 el día 13 de marzo de 2019, miércoles, hasta las 16:00 de ese mismo día con tweeter hifi, con micrófonos cerca de la fuente, sin ecos y con λ constante.	58
3.16	Medidas realizadas por la noche a partir de las 22:00 el día 13 de marzo de 2019, miércoles, con tweeter hifi, micrófonos cerca de la fuente, sin ecos, λ constante y empleando el micrófono ECM8000.	59
3.17	Medidas realizadas por el día a partir de las 10:00 el día 13 de marzo de 2019, miércoles, con tweeter hifi, micrófonos cerca de la fuente, sin ecos, λ constante y empleando el micrófono ECM8000.	60
3.18	Medidas realizadas por la noche a partir de las 22:00 el día 13 de marzo de 2019, miércoles, con tweeter hifi, micrófonos cerca de la fuente, sin ecos, λ constante y empleando el micrófono M23.	61
3.19	Medidas realizadas por el día a partir de las 10:00 el día 13 de marzo de 2019, miércoles con tweeter hifi, micrófonos cerca de la fuente, sin ecos, λ constante y empleando el micrófono M23.	62
3.20	Medidas realizadas por la noche a partir de las 22:00 el día 13 de marzo de 2019, miércoles, con tweeter hifi, micrófonos cerca de la fuente, sin ecos, λ constante y empleando el micrófono ECM8000.	63
3.21	Medidas realizadas por el día a partir de las 10:00 el día 13 de marzo de 2019, miércoles, con tweeter hifi, micrófonos cerca de la fuente, sin ecos, λ constante y empleando el micrófono ECM8000.	64
3.22	Medidas realizadas por la noche a partir de las 22:00 el día 13 de marzo de 2019, miércoles, con tweeter hifi, micrófonos cerca de la fuente, sin ecos, λ constante y empleando el micrófono M23.	65

3.23	Medidas realizadas por el día a partir de las 10:00 el día 13 de marzo de 2019, miércoles, con tweeter hifi, micrófonos cerca de la fuente, sin ecos, λ constante y empleando el micrófono M23.	66
3.24	Medidas realizadas por la noche a partir de las 22:00 el día 13 de marzo de 2019, miércoles, con tweeter hifi, micrófonos cerca de la fuente, sin ecos, λ constante y empleando el micrófono ECM8000.	67
3.25	Medidas realizadas por el día a partir de las 10:00 el día 13 de marzo de 2019, miércoles, con tweeter hifi, micrófonos cerca de la fuente, sin ecos, λ constante y empleando el micrófono ECM8000	68
3.26	Medidas realizadas por la noche a partir de las 22:00 el día 13 de marzo de 2019, miércoles, con tweeter hifi, micrófonos cerca de la fuente, sin ecos, λ constante y empleando el micrófono M23.	69
3.27	Medidas realizadas por el día a partir de las 10:00 el día 13 de marzo de 2019, miércoles, con tweeter hifi, micrófonos cerca de la fuente, sin ecos, λ constante y empleando el micrófono M23.	70

Índice de cuadros

3.1	Resultados con período constante.	50
3.2	Comparativa de medias y desviaciones típicas empleando el micrófono M23 y el micrófono ECM8000 y empleando frecuencia constante. . . .	54
3.3	Resultados con λ constante	59
3.4	Comparativa de medias y desviaciones típicas empleando el micrófono M23 y el micrófono ECM8000 y empleando λ constante.	67

Bibliografía

- [ASH, 2012] (2012). Ondas: superposición. https://luz.izt.uam.mx/wiki/index.php/Ondas:{}_superposicion.
- [ASH, 2018] (2018). Ley de la inversa del cuadrado o ley del cuadrado inverso de la distancia. https://es.wikipedia.org/wiki/Ley{}_de{}_la{}_inversa{}_del{}_cuadrado.
- [ASH, 2019a] (2019a). Ciencia-explicada. <https://www.ciencia-explicada.com/2012/10/una-de-fisica-la-rueda-y-el-suelo.html>.
- [ASH, 2019b] (2019b). Conceptos basicos del ruido ambiental. <http://sicaweb.cedex.es/docs/documentacion/Conceptos-Basicos-del-ruido-ambiental.pdf>.
- [ASH, 2019c] (2019c). Conceptos fundamentales del sonido. www.acdacustics.com/files/conceptos.pdf.
- [ASH, 2019d] (2019d). Fazor. <https://es.wikipedia.org/wiki/Fazor>.
- [ASH, 2019e] (2019e). Interferencias de ondas. <https://www.fisicalab.com/apartado/interferencias-ondas-armonicas>.
- [ASH, 2019f] (2019f). Micrófonos. https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing{}_ond{}_1/trabajos{}_04{}_05/io8/public{}_html/microfonos.htm.
- [Laboratory, 2018] Laboratory, N. P. (2018). Npl. <http://resource.npl.co.uk/acoustics/techguides/absorption/>.
- [Ramon, 2015] Ramon, F. (2015). Sonido, temperatura y humedad. <http://www.equaphon-university.net/sonido-temperatura-y-humedad/>.
- [sengpielaudio Sengpiel Berlin, 2019] sengpielaudio Sengpiel Berlin (2019). Calculation method of absorption of sound by atmosphere air damping dissipation ab-

sorbtion high frequencies attenuation sound during propagation outdoors outdoor.
<http://www.sengpielaudio.com/calculator-air.htm>.