



***Facultad
de
Ciencias***

**EXPERIMENTOS DE FÍSICA CON
SMARTPHONES**
(Physics experiments with smartphones)

Trabajo de Fin de Grado
para acceder al

GRADO EN FÍSICA

Autor: Rubén Gómez González

Director: Francisco Matorras Weinig

Febrero - 2023

Índice

Resumen.....	2
Abstract	3
1. introducción	4
1.1. Motivación del trabajo	4
1.2. Objetivos.	5
1.3. Los sensores del smartphone.....	6
1.3.1. Los sensores en un smartphone.....	6
1.3.2. Los sensores acústicos de un smartphone.....	8
1.4. Aplicaciones para el acceso a los sensores	9
2. Dispositivo experimental.....	12
2.1. Descripción de los dispositivos.....	12
2.2. Rango de respuesta del micrófono mediante barrido de frecuencias.....	18
3. Experimentos.	21
3.1. Propiedades ondulatorias del sonido: estudio de los armónicos de sonidos comunes y medición de su frecuencia fundamental.....	22
3.2. Relación de intensidad medida con la distancia a la señal	25
3.3. Superposición de ondas: batido.....	29
3.4. Ondas estacionarias: resonancia.....	32
3.5. Interferencias sonoras.....	37
3.6. Reflexión del sonido para el cálculo de distancias: sonar.....	41
3.7. Otros posibles experimentos	45
4. Conclusiones.....	47
5. Bibliografía	48

Resumen

El avance de la tecnología móvil ha llevado a que, en la actualidad, tengamos a nuestra disposición dispositivos que cuentan con avanzados sensores que no solo sirven para que el teléfono tome obtenga datos para su funcionamiento, sino que también hace que los usuarios podamos acceder a ellos y, por lo tanto, usarlos a modo de herramienta experimental. Esta situación abre la posibilidad al uso de smartphones como una alternativa en la divulgación y en la enseñanza. Así mismo, puede suponer una alternativa en el ámbito académico de bachillerato o de los grados universitarios en situaciones donde, bien por necesidad u obligación, la enseñanza sea a distancia.

A lo largo de este trabajo se exploran una serie de experimentos sencillos que ilustran algunas de las principales propiedades de las ondas, centrándose en las ondas sonoras. Así mismo, se ha realizado un estudio sobre la respuesta de diferentes dispositivos (en cuanto a gama y sistema operativo) ante ondas sonoras y una prospectiva en torno a las aplicaciones gratuitas, que permiten el acceso a los datos obtenidos por los diferentes sensores del teléfono y proporcionan un primer nivel de análisis de las señales.

Mediante estas herramientas se han realizado experimentos como la relación entre la intensidad de la onda respecto de la distancia, el fenómeno del batido sonoro, interferencias, resonancias en tubos, etc. Se evalúan los resultados obtenidos, los problemas encontrados en el diseño y la realización de cada experimento y se muestra cómo se ilustran los correspondientes fenómenos ondulatorios.

Como resultado de todo ello, el teléfono móvil demuestra ser una herramienta útil tanto en la docencia como en la divulgación, al permitir llevar a cabo muchos de estos experimentos de una forma relativamente sencilla.

Abstract

The advancement of mobile technology has led to that, at present, we have at our disposal devices that have advanced sensors that not only serve for the phone to take data for its operation, but also makes users can access them and, therefore, use them as an experimental tool. This situation opens the possibility of using smartphones as an alternative in dissemination and teaching. Likewise, it can be an alternative in the academic field of baccalaureate or university degrees in situations where, either by necessity or obligation, teaching is at a distance.

Throughout this work, a series of simple experiments are explored that illustrate some of the main properties of waves, focusing on sound waves. Likewise, a study has been carried out on the response of different devices (in terms of range and operating system) to sound waves and a prospective around free applications, which allow access to the data obtained by the different sensors of the phone and provide a first level of analysis of the signals.

Through these tools, experiments have been carried out such as the relationship between the intensity of the wave with respect to distance, the phenomenon of sound beating, interference, resonances in tubes, etc. The results obtained are evaluated, the problems encountered in the design and realization of each experiment and how the corresponding wave phenomena are illustrated.

As a result, the mobile phone proves to be a useful tool in both teaching and dissemination, allowing many of these experiments to be carried out in a relatively simple way.

Palabras Clave/Keywords

- Smartphones, sensores, acústica, sonido, ondas, interferencias, resonancia, batido
- Smartphones, sensors, acoustic, sound, waves, interference, resonance, beat

1. introducción

1.1. Motivación del trabajo

Desde hace años la formación *online* o a distancia adquiere mayor peso en la sociedad actual. El avance de las nuevas tecnologías ha establecido un nuevo paradigma en la forma de comunicarnos, de realizar nuestras compras o, por supuesto, en la manera de informarnos y de aprender.

La demanda de este tipo de aprendizaje es cada vez mayor y desde hace años tanto grandes empresas como universidades de todo el mundo han puesto en marcha, en ocasiones conjuntamente, plataformas que ofrecen esta posibilidad. El ahorro de tiempo o de costes, la mayor facilidad para compaginar la actividad laboral con la formación o la simple necesidad, como se ha comprobado debido a la reciente crisis de la COVID – 19, son algunas de las razones que explican el crecimiento de estas metodologías.

Sin embargo, aplicar un sistema de aprendizaje a distancia a la enseñanza científica puede generar problemas al abordar la parte práctica o experimental que la acompaña. Esta potencial problemática, tanto desde el punto de vista logístico, de costes o de acceso e igualdad de oportunidades, se podría solucionar mediante la aplicación de los medios tecnológicos más extendidos en la actualidad: los teléfonos móviles inteligentes o smartphones [1]. En cualquier parte del mundo, indistintamente de su poder adquisitivo, una persona puede disponer de este tipo de dispositivos. Estos teléfonos reúnen una variedad de sensores de diferente uso que permiten, por ejemplo, medir su geolocalización en cada momento o la presión atmosférica. Es decir, se trata de tecnología avanzada y con cada vez mayor capacidad de cálculo.

Es por ello por lo que cabe preguntarse ¿es posible utilizar un smartphone como alternativa o complemento al uso de un laboratorio? Y en ese caso ¿hasta qué punto esta tecnología ofrece el suficiente rigor en los resultados?

Emplear esta tecnología como alternativa ofrece posibilidades tanto dentro del ámbito universitario como fuera de él [2] [3]. Las virtudes de incorporar esta posibilidad al sistema educativo son múltiples, como herramienta motivacional para reforzar la participación de los jóvenes en las aulas, hasta el ahorro de costes que puede suponer para un centro docente tanto a nivel de material como de reducción de costes energéticos.

El uso de smartphones para realizar experimentos científicos despierta, cada vez, más interés como puede comprobarse en el portal especializado *sciencedirect* [4], donde una búsqueda

general (con palabras clave “smartphones”, “physics” y “experiments”) arroja un total de 1.812 resultados, entre artículos publicados y en revisión, desde el año 2009. El mayor interés en este tipo de estudios se comprueba al ver el crecimiento anual del número de resultados, desde los 108 en 2016 a los 402 en 2022, siendo a fecha de enero un total de 99 en el 2023.

Los avances en la tecnología de los teléfonos inteligentes han hecho que vayan incorporando, a pesar de su tamaño, gran diversidad de sensores que ofrecen un mayor número de posibilidades. Estos dispositivos, además, permiten acceder a los datos que toman los mencionados sensores e incluso poder hacer un tratamiento de estos, lo cual justifica el interés por comprobar su posible uso como una herramienta experimental [2] [5]. Sin embargo, no todos los smartphones disponen de los mismos sensores integrados, esto varía en función de su gama, su fabricante o el destino para el que esté pensado el modelo. En este sentido, el mercado de los accesorios para los teléfonos inteligentes también es creciente y sirve como complemento al dispositivo o para mejorar, si así fuera necesario, la calidad de los resultados de alguno de los sensores.

Para este trabajo se ha elegido reproducir experimentos que ilustran el carácter ondulatorio del sonido, útiles a nivel de bachillerato o primeros cursos de física, lo cual ofrece la ventaja de trabajar con dos herramientas básicas de cualquier tipo de dispositivo móvil: el micrófono y el altavoz. Si bien este tipo de componentes se encuentra en todos los teléfonos desde el origen de estos dispositivos, el valor diferencial que ofrece un smartphone es la posibilidad de adquirir datos de ellos mediante el uso del software adecuado (las aplicaciones o apps) y poder hacer un tratamiento posterior de los mismos.

1.2. Objetivos.

A lo largo del presente trabajo se diseñan y realizan diferentes experimentos de sonido, empleando un smartphone. El objetivo general de este trabajo es comprobar que un teléfono inteligente es una alternativa viable para demostrar leyes o fenómenos fundamentales de las ondas sin la necesidad de recurrir a un laboratorio y por lo tanto presentarlo como una alternativa para alumnos de instituto o de los primeros cursos del grado de Física que, sin necesidad de tener profundos conocimientos puedan aprender y demostrar fenómenos y leyes de la Física.

Los objetivos específicos consistirán en el detalle de los experimentos que se desarrollarán en el trabajo:

- Evaluar la sensibilidad del micrófono y el altavoz de varios smartphones para su adecuado uso en experimentos de acústica y si el uso de modelos de diferente gama y sistema operativo influye.
- Estudiar la relación entre la intensidad del sonido con la distancia, así como las propiedades ondulatorias del sonido a través de fenómenos como la superposición, la interferencia o la resonancia y comprobar que son medibles con un smartphone.
- Evaluar el uso de un smartphone calcular distancias mediante la reflexión del sonido.
- Discutir acerca del rigor, ventajas e inconvenientes del uso de smartphones para la realización de experimentos de acústica.

1.3. Los sensores del smartphone

1.3.1. Los sensores en un smartphone

Lo que permite establecer el smartphone como una herramienta en el desarrollo de experimentos es la riqueza de sus sensores [1] [6] y la capacidad del dispositivo para obtener datos de ellos. Indistintamente de cómo se diseñen o su funcionalidad estos componentes tienen por finalidad común convertir estímulos físicos externos en respuestas eléctricas, que serán las que, posteriormente, interprete el smartphone.

En función del fabricante, la gama del teléfono o el uso específico para el que se diseñe el dispositivo, el número de sensores puede variar. Si bien existen esas variaciones hay algunos tipos que son comunes y extendidos a todos los smartphones en la actualidad, aunque dependiendo del modelo y la compañía pueda variar la calidad del componente y su complejidad. Un ejemplo de ello es la cámara fotográfica, de las más sencillas formadas por un conjunto de lentes que amplifican y dirigen la luz al componente que las registra a aquellas que incorporan sensores ToF (Time of Flight o Tiempo de vuelo), que a través de luz infrarroja miden la distancia entre las lentes del dispositivo y el objeto a fotografiar para mejorar el enfoque y la calidad de la fotografía.

Uno de los sensores por excelencia de los actuales smartphones es el de la pantalla táctil, que se engloba dentro de los denominados sensores capacitivos. Las pantallas táctiles están formadas por varias capas, el cristal superficial de la pantalla ejerce de capa aislante mientras que por debajo hay un conductor transparente por el que circula, de forma constante, una

corriente eléctrica. Al hacer presión en algún punto de la pantalla la corriente varía y el sensor detecta dicha variación y el punto exacto en el que se produce. Esta estructura favorece que el sensor reaccione solamente ante determinados materiales. Por esta razón estas pantallas actúan cuando sobre ellas entra en contacto un material conductor, como el dedo de una mano, pero no si el material no lo es, como un plástico, por ejemplo.

En la actualidad también son habituales los sensores biométricos [7], que varían en función de los modelos: como el lector de huella digital o el de reconocimiento facial. En ambos casos un dispositivo óptico capta una imagen y la procesa para compararla con otra tomada previamente. Su uso principal es reconocer al propietario del dispositivo y desbloquear su uso.

También son comunes a los dispositivos los sensores destinados a medir los movimientos del smartphone [8]: el acelerómetro y el giroscopio. Son dos componentes complementarios, siendo el primero de ellos el más extendido de los dos y en ambos casos se trata de pequeños chips integrados mediante sistemas microelectromecánicos (MEMS). Mientras el acelerómetro se basa en una pequeña masa inercial sujeta por un muelle a una base en cada una de las coordenadas en las que mide (x, y, z) y calcula la aceleración a través de la deformación que sufre el muelle en cada momento, el giroscopio tiene un funcionamiento algo más complejo. El giroscopio consta de un estátor fijo donde se conectan varios brazos, uno de detección y uno o varios más, los cuales se encuentran en constante vibración. Cuando el giroscopio rota, las fuerzas de Coriolis actúan sobre los brazos en vibración haciendo que esta última cambie, lo cual se traslada al estátor que provoca el movimiento de los brazos de detección. Todo este proceso provoca una diferencia de potencial mediante el que se calcula la velocidad angular.

El sensor Hall o magnetómetro detecta y mide el campo magnético terrestre de forma electrónica. Su nombre se debe a que su funcionamiento se basa en el efecto Hall, el cual se produce cuando por un conductor o semiconductor circula una corriente eléctrica y, al mismo tiempo, se aplica un campo magnético. Cuando esto ocurre, debido a la acumulación de cargas opuestas en los lados del material conductor se genera una diferencia de potencial. La combinación de acelerómetro, giroscopio y magnetómetro puede suplir la necesidad de un sensor GPS que se conecte a satélites de geoposición (no necesariamente de la red GPS, aunque el nombre esté extendido como tal e incluso los fabricantes del dispositivo móvil le den esa nomenclatura), por lo que no todos los terminales disponen de este último tipo de sensor necesariamente.

El sensor de luz ambiental, que ajusta el brillo del dispositivo en función de la luz ambiental recogida por un fotodiodo, el de proximidad, que calcula el tiempo de reflexión de un haz de luz infrarroja emitida y recibida por dos componentes LED para apagar la pantalla cuando un elemento se acerca a ella, o el sensor de humedad, que detecta la variación interna del teléfono (dependiendo del modelo a través de medir la variación de la capacidad de un condensador provocada por el cambio de humedad, o de la conductividad de un material ante el mismo proceso), son otros de los posibles sensores a encontrar dentro de un teléfono inteligente.

1.3.2. Los sensores acústicos de un smartphone

Cada smartphone dispone de una variedad diferente de sensores, sin embargo, los que son propios de todos y cada uno de los teléfonos inteligentes, e incluso de aquellos que no entran en esta categoría son los relacionados con la acústica: el micrófono y el altavoz.

Para reproducir el sonido deseado, este se convierte en una señal eléctrica que provoca el movimiento de un electroimán que, a su vez, actúa sobre una membrana. Mediante este proceso la señal eléctrica se transforma en ondas de presión que se emiten en forma de sonido.

Los altavoces llevan unos componentes asociados a ellos que son necesarios para su funcionamiento. El primero es un convertor digital/analógico, que transforma la señal de audio de digital a analógica. La resolución y la frecuencia de muestreo de este dispositivo tienen mucho que ver con la calidad de sonido que podamos conseguir. También es necesario un amplificador, que será el encargado de amplificar la señal eléctrica a niveles con los que pueda excitar el altavoz para producir el sonido.

Por su parte, el funcionamiento del micrófono es el inverso al del altavoz, en este caso el diafragma vibra al captar un sonido y al hacerlo atrae a un electroimán. Esto provoca que la corriente que circula por el circuito varíe, mandando una señal eléctrica relacionada con la onda sonora recibida. La mayoría de los teléfonos modernos incluyen más de un micrófono, lo que permite al dispositivo reducir ruidos no deseados al realizar una llamada. Esta característica, aunque útil, puede generar problemas si lo que se desea medir es el nivel del propio ruido, lo cual será una de las cuestiones a evaluar en el presente estudio.

Los micrófonos presentes en los smartphones están compuestos por un sistema microelectromecánico (MEMS) que ofrece una gran calidad de respuesta a pesar de su reducido

tamaño. El diafragma es sensible a la presión acústica y está grabado en un circuito electrónico, siendo, por lo general, acompañado de un preamplificador integrado. Todo ello se integra en circuitos convertidores Analógico/Digital en el mismo chip, haciendo de este un micrófono digital completo. El uso de micrófonos MEMS ofrece una mayor calidad aunque reduce el rango dinámico que pueden medir. En los micrófonos actuales ese rango es aproximadamente de entre 30 y 130 dB [9]. Todo sonido que supere esa magnitud no será captado adecuadamente por el sensor. Es por ello por lo que existen todo tipo de sensores externos, que se pueden conectar al dispositivo, para mejorar el rendimiento del micrófono.

1.4. Aplicaciones para el acceso a los sensores

La presencia de los sensores acústicos no es exclusiva de los smartphones, puesto que en los teléfonos de generaciones anteriores también se encuentran estos dos componentes. Sin embargo, la particularidad de un dispositivo inteligente es la posibilidad de acceder a los datos que proporcionan los sensores que poseen. Todo esto se consiguen a través del software destinado a ello: las aplicaciones o apps.

Existen multitud de aplicaciones para los teléfonos inteligentes, con ellas podemos obtener los valores que registran el acelerómetro y el giroscopio, la presión atmosférica detectada por el barómetro, el efecto del campo magnético terrestre sobre el magnetómetro o la ubicación del teléfono mediante los satélites GPS. Algunas de estas aplicaciones están especializadas en el tratamiento de algún fenómeno físico en particular, también, como no puede ser de otra manera, para mediciones relacionadas con la acústica [10]. Todo esto hace que para reproducir diferentes experimentos no es preciso utilizar una única aplicación, si no que se pueden obtener resultados de aquello que se desea medir a través de múltiples aplicaciones. Existen aplicaciones centradas en medir la intensidad de una señal, otras muestran el espectro de la onda sonora (calculando la transformada de Fourier frente al tiempo) o su forma para poder medir su frecuencia o longitud. Existen, también, aplicaciones que generan tonos de diferente frecuencia, amplitud y forma de onda que permiten convertir el smartphone en un generador de funciones. Otras aplicaciones ofrecen facilidad para realizar mediciones cuantitativas mientras que otras ofrecen solo estimaciones cualitativas de la magnitud deseada. Es por todo ello que resulta indispensable evaluar previamente las necesidades para poder tomar las medidas adecuadas y qué aplicación, o aplicaciones, utilizar antes de comenzar el experimento. No solo resulta importante considerar qué aplicación es la más adecuada, sino también lo es conocer de qué

sistema operativo dispone el smartphone, puesto que no todas las aplicaciones se encuentran disponibles para los dos grandes sistemas operativos del mercado: Android™ e IOs™.

Habida cuenta de que una aplicación de estas características es un software que obtiene los datos de los sensores del teléfono y realiza cálculos a partir de ellos conviene, también, evaluar el grado de precisión o de rigor de estas a la hora de mostrar resultados. Las posibles desviaciones con respecto a una medida estimada no tienen, necesariamente, que provenir de un error en la sensibilidad del sensor, puesto que el tratamiento posterior de los datos puede provocar pérdida de calidad en las medidas. Es por ello por lo que se han evaluado diferentes aplicaciones, tanto de Android™ como de IOs™. Todas ellas habituales en las publicaciones científicas, en mayor o menor grado, y que tienen en común que su descarga es gratuita. Se ha evitado, por tanto, hacer uso de aplicaciones profesionales que puedan suponer un coste económico.

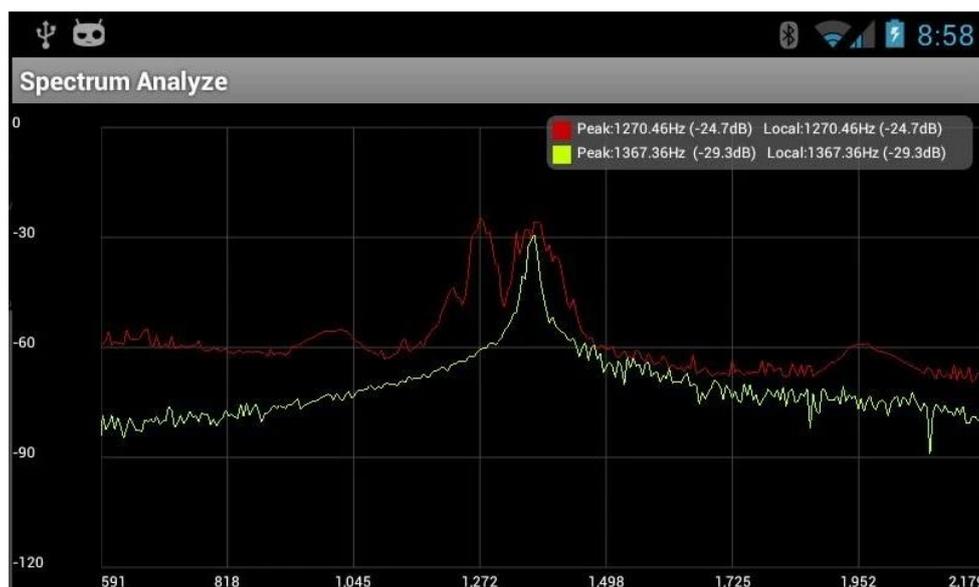


Imagen 1. Captura de pantalla de la aplicación Spectrum Analyzer

Las dos más utilizadas en las publicaciones científicas consultadas son **Spectrum Analyzer (Imagen 1)** [11] y **Audio Kit** [12] [13]. Resultan muy parecidas y completas, sin embargo, la primera es exclusiva de Android y la segunda de IOs. La interfaz, es sencilla y visual, aunque presentan dificultades para tomar medidas de manera precisa. En cuanto a aquellas centradas en el espectro de la onda y para ambos sistemas operativos se encuentran **DecibelX** [14] que mide el nivel de presión sonora o **SpectrumView** [15] que analiza sonidos desde el punto de vista de su frecuencia e intensidad.



Imagen 2. Captura de pantalla de la aplicación DecibelX, que muestra el espectro de la onda y mide el Nivel de Presión Sonora en dB

Entre las aplicaciones más completas y que, en la medida de lo posible, permitan realizar diferentes experimentos sin cambiar de app se encuentra la opción de **Sonic Tools SVM** [16] que combina un analizador de sonido, vibración y campo magnético. Igualmente, permite medir la forma de la onda y su espectro, pero no da acceso a los datos sin procesar de los sensores. Dos aplicaciones que sí ofrecen esa posibilidad son **PhysicsToolbox** [17] y **Phyphox** [18], que además incorporan herramientas analíticas que permiten la realización de experimentos asociados a fenómenos físicos como son la acústica o la mecánica. Siendo la última de ellas la más completa y la que más versatilidad y utilidad presenta. En el caso de Phyphox es una aplicación diseñada expresamente para, de un modo accesible, facilitar la práctica de experimentos de física con un smartphone y su principal ventaja radica en permitir exportar los datos obtenidos en diferentes formatos para poder tratarlos posteriormente dentro del mismo dispositivo, con el software adecuado, o en un ordenador, lo cual resulta de gran utilidad a la hora de plantear el smartphone como una herramienta alternativa en la práctica de experimentos científicos.

En resumen, se dispone de la posibilidad de elegir entre aplicaciones de diferentes características. Se han evaluado las más utilizadas en las publicaciones científicas, pero en las librerías de aplicaciones se puede encontrar una amplia variedad de estas, tanto las que se centran exclusivamente en un aspecto concreto como las que son más genéricas, tanto gratuitas como de pago. La principal ventaja es la versatilidad que ofrecen permitiendo poder elegir la que mejor se adapte tanto a las necesidades del trabajo como a las del usuario. Sin embargo, la gran mayoría son de código cerrado y los ajustes en las mediciones se restringen a aquellos que permita la programación de la aplicación. Esto puede suponer un problema en aquellas que

aplican fórmulas a los datos obtenidos por los sensores, como las que realizan el cálculo de la Transformada Rápida de Fourier, puesto que hasta que no se toma una medida no es posible comprobar si la aplicación hace el cálculo correcto y en caso de no hacerlo la única solución es encontrar otra mejor, o en aquellas que no ofrecen la sensibilidad deseada o no permiten tomar con el rigor necesario una medida de los resultados que muestran. Es por lo anterior que resulta conveniente evaluar si la aplicación a utilizar se adapta a las necesidades del experimento, si fuera preciso utilizar varias o buscar una alternativa que resulte más idónea.

2. Dispositivo experimental

El presente trabajo consistirá en la realización de una serie de experimentos y cada uno requerirá un diseño específico para poder realizarse. Los dispositivos (**Imagen 3**) que se utilizarán serán un iPhone 12 y un Lenovo B (A2016b40), utilizando como aplicación Phyphox para la obtención de los datos. Para los casos en los que sea necesario generar tonos se utilizará mediante la aplicación web Online Tone Generator¹ [19]. En función de las necesidades de cada experimento se utilizarán diferentes opciones para reproducirlos, bien desde los propios smartphones bien mediante el uso de unos altavoces conectados a un ordenador.

2.1. Descripción de los dispositivos

En cuanto a los smartphones, la mayoría de los teléfonos modernos incluyen más de un micrófono. Esto permite al dispositivo ser direccional en el sentido de que ayuda a reducir ruidos no deseados cuando se está realizando una llamada. Aunque esta estrategia de reducción de ruido es muy útil puede ser problemática si lo que se desea medir es el nivel del propio ruido. El uso de micrófonos MEMS ofrece una mayor calidad para este tipo de sensores en los teléfonos inteligentes, sin embargo, reduce el rango dinámico que pueden medir.

¹ La página ofrece múltiples alternativas, desde generar un tono sencillo eligiendo la frecuencia y forma de onda de la señal, hasta un barrido de frecuencias en el rango de 1Hz a 24000HZ, así como la forma de la onda que se desea generar, el tiempo que durará el barrido y el volumen de la señal tanto al inicio como al final del barrido (en caso de desear que este sea diferente). También cuenta con la posibilidad de reproducir diferentes tonos de voz o instrumentos musicales con diferentes notas.

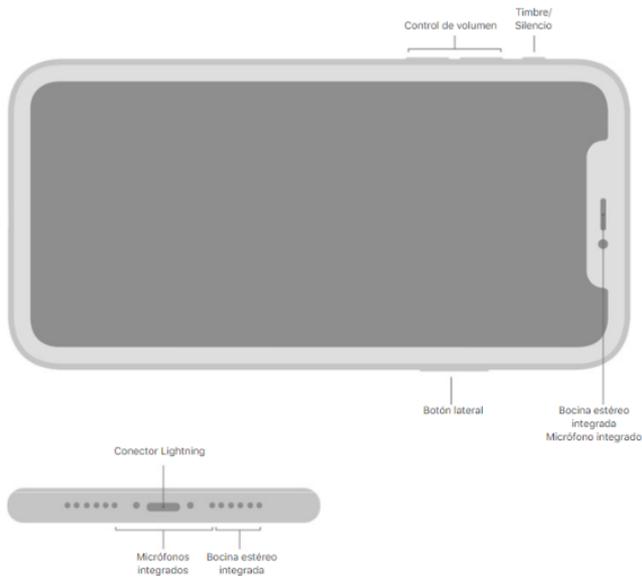


Imagen 3. El dispositivo experimental consta de dos smartphones (Iphone y Android) y unos altavoces conectados a un PC

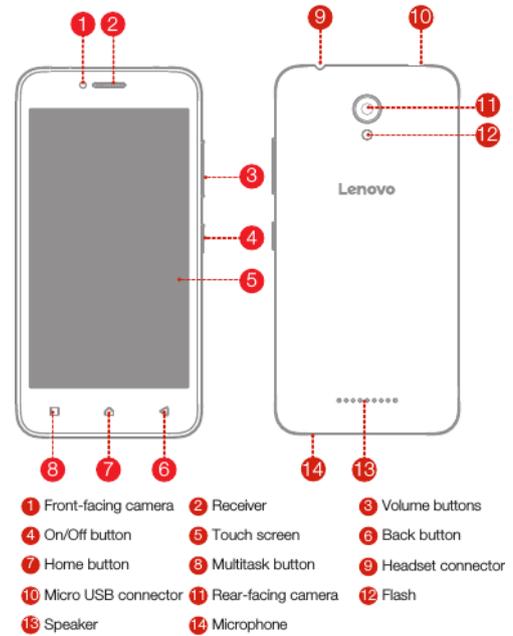
En el caso del Iphone 12 (**Imagen 4**) el dispositivo cuenta con 3 micrófonos (parte superior frontal, parte inferior y parte superior trasera) que además incorporan tecnología de cancelación de ruido, mientras que, por su parte, el Lenovo (**Imagen 5**) dispone de un único micrófono.

La elección de Phyphox se debe a su versatilidad (permite realizar diferentes experimentos sin necesidad de apoyarse en otra aplicación), se encuentra disponible tanto para Android™ como iOS™ y porque permite extraer los datos medidos en diferentes formatos, entre ellos Excel, para su posterior uso en un ordenador. Esta aplicación dispone de una gran variedad de opciones en función de qué dispositivo se desea utilizar y de qué magnitud es la que se va a medir. Así mismo, alguna de los apartados de la aplicación está programado para coincidir con un experimento concreto, como el ejemplo el sonar, lo cual permite poder realizar la experiencia con un montaje sencillo y obteniendo las medidas necesarias para el mismo de forma directa.

En cualquier caso, las principales funciones de la *app* que resultan de interés para la realización de experimentos de acústica están relacionadas con el espectro de la onda, poder medir la forma de la misma, así como su frecuencia y longitud de onda y la intensidad de la señal recibida. Para estas cuestiones Phyphox dispone de tres opciones dentro del menú “Acústica”.



First glance



1

Imagen 4. Características Iphone 12 [20]

Imagen 5. Características Lenovo B (A2016a40) [21]

Para los casos que requieran medir la frecuencia se utilizará la opción “Espectro de audio” de Phyphox (Imagen 6) y en ella se dispone de diferentes pestañas.

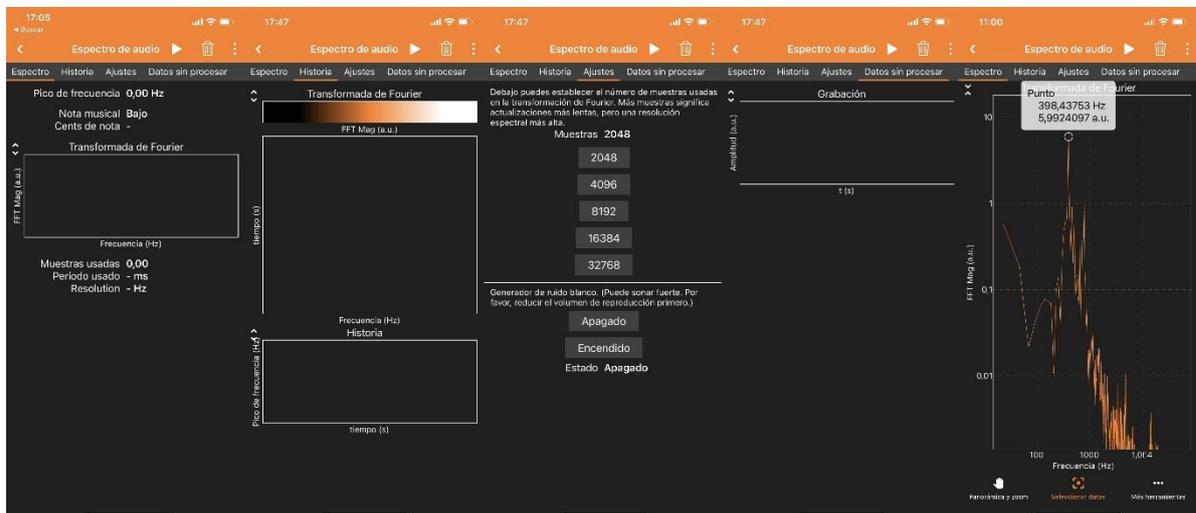


Imagen 6. Captura de pantalla de la opción “Espectro de audio” de Phyphox y de las diferentes pestañas que incluye.

La pestaña de “espectro” muestra el espectro de frecuencia del audio captado por el micrófono y calcula la transformada de Fourier (FFT), la cual se refiere a un algoritmo capaz de calcular tanto la Transformada Discreta como su inversa de forma de forma eficiente [22]. Este apartado permite, también, tomar medidas de la señal desde la propia aplicación al pulsar sobre la gráfica, esta se abre y amplía, mostrando la evolución de las medidas del teléfono en tiempo real. En

este punto, tal y como se ve en la parte derecha de la **Imagen 6** la aplicación permite hacer zoom sobre la gráfica con la opción “Panorámica y zoom” y seleccionar cualquier punto de la misma con “seleccionar datos”, lo cual ofrece el valor de la frecuencia y la amplitud (en Hz y a.u. respectivamente). Este recurso será utilizado para la medición de los armónicos de sonidos comunes en el apartado **3.1** y para medir picos de frecuencia para la resonancia en tubos **3.3** e interferencias **3.5**.

“Historia” representa la relación de la frecuencia y el tiempo en dos gráficas distintas, tiempo frente a frecuencia en un diagrama de colores escalado según la transformada de Fourier y los picos de frecuencia frente al tiempo. La pestaña de “Datos sin procesar” muestra la representación de la amplitud frente al tiempo, lo cual permite observar la forma de la onda del audio que recibe el micrófono.

Dentro del apartado “ajustes” la aplicación ofrece varias opciones para definir el número de muestras utilizadas para realizar los cálculos, así como un generador de ruido blanco para aquellos casos en los que se desee eliminar el posible ruido indeseado. En el caso del número de muestras para el cálculo de la transformada de Fourier a mayor número de muestras aumenta la resolución espectral pero la actualización de los resultados es más lenta, por lo que es importante considerar la capacidad de cálculo del dispositivo a la hora de elegir una opción u otra, dado que en caso contrario puede dificultar la toma de datos. Encender el generador de ruido blanco provocará que el dispositivo emita ese sonido de forma constante durante el tiempo que se realice el experimento con la opción activada, resulta importante considerar que la intensidad de dicho sonido dependerá del volumen al que se encuentre el dispositivo, pudiendo llegar a ser molesto o demasiado elevado para el interés del experimento y debiendo ajustarse de manera manual, debido a lo cual es necesario valorar adecuadamente si su uso merece la pena.

A la hora de medir la intensidad de la señal se utilizará la opción “Amplitud de audio” de Phyphox. En la **Imagen 7** se puede ver la imagen de las dos principales pestañas de la “Amplitud de audio”, siendo la tercera meramente informativa acerca de las limitaciones que ofrece esta opción. La primera de ellas “Amplitud” es donde se representa, en tiempo real, la gráfica del Nivel de Presión Sonora (NPS) frente al tiempo, mientras que en la parte superior muestra el valor instantáneo del NPS, calculado cada 100 ms. Por otro lado, la siguiente pestaña corresponde a la “calibración”, en este apartado la aplicación permite establecer un valor de referencia de NPS como un valor de compensación que ha de introducirse manualmente. En caso de no calibrar el experimento las medidas que ofrece son de un nivel de presión sonora

negativo, lo cual carece de total sentido. Si se desea calibrar con exactitud el nivel de referencia del NPS se debe de hacer uso de un sonómetro especializado para ello, en caso contrario se puede estimar un valor aleatorio, lo cual provocará que los valores concretos de cada medida de la aplicación no puedan considerarse válidos, aunque sí puedan utilizarse para estudiar su comportamiento relativo en función de la distancia a la fuente, tal y como se hará en el apartado **3.2.**



Imagen 7. Capturas de pantalla de la opción de "Amplitud de audio" de Phyphox y sus pestañas.

En el caso de que se deseen estudiar fenómenos de superposición de ondas la función "Espectro de Audio" (**Imagen 6**) presenta limitaciones a pesar de ser la más adecuada. El tiempo de grabación de los datos exportables es del entorno de 42 ms, lo cual para estudiar fenómenos como el batido acústico (**3.3. Superposición de ondas: batido.**) resulta insuficiente para algunos casos. En este tipo de situaciones resulta más funcional emplear la opción de "Autocorrelación de Audio", que, a pesar de estar diseñada para representar una única frecuencia, midiendo tanto esta como el periodo de la onda, la grabación de los datos exportables aumenta hasta 100 ms, y por lo tanto permite observar este tipo de fenómeno, así como realizar los cálculos de su periodo. Si bien en su pestaña principal ofrece resultados de la frecuencia y el periodo de la onda (**Imagen 8**) estos no son fiables por lo explicado anteriormente cuando se traten de ondas de distinta frecuencia y los cálculos han de hacerse con los datos extraídos de la grabación.



Imagen 8. Capturas de pantalla de la opción "Autocorrelación de Audio" de Phypnox y sus pestañas

Cuando en cualquiera de las opciones de Phypnox se extraen los datos en formato Excel el resultado se muestra en un archivo con varias hojas de cálculo, cada una de las cuales coincide con las pestañas que presentan resultados en las ilustraciones correspondientes (**Imagen 6**, **Imagen 7** e **Imagen 8**).

Como paso previo a la realización de los experimentos se comprobará la sensibilidad de los dos smartphones, con el objetivo de comprobar si existe alguna diferencia o limitación en los resultados debido a las diferencias en su sistema operativo o la gama del teléfono. Igualmente se comprobará si la aplicación web designada para la generación de tonos presenta, igualmente, alguna limitación que deba ser considerada de manera previa a la realización de los experimentos.

Una vez comprobado el rango de frecuencias medidas por el smartphone se estudiará la respuesta del dispositivo a frecuencias conocidas para conocer la precisión de las medidas que ofrece tanto el dispositivo como la aplicación. Para ello, medirá con la opción "espectro de audio" (**Imagen 6**) la frecuencia de sonidos conocidos. Estos sonidos serán emitidos por diapasones de frecuencia conocida. Los diapasones (**Imagen 9**) son elementos de carácter metálico, la forma de su diseño, en forma de horquilla, favorece que al ser accionados la vibración se centre de forma mayoritaria en la frecuencia fundamental de la vibración, lo cual les otorga un papel ventajoso en la afinación instrumental.



Imagen 9. Fotografía de un diapasón diseñado para que su frecuencia fundamental sea 440 Hz

2.2. Rango de respuesta del micrófono mediante barrido de frecuencias

En primer lugar, se comprobará el rango de frecuencias dentro del que se puede trabajar tanto con el generador de tono como de los teléfonos para comprobar si encaja dentro del necesario para la realización de los experimentos y la respuesta de los dispositivos dentro de dicho rango. Para ello, haciendo uso del generador de tonos, a través de los altavoces conectados a un PC, se genera un barrido lineal de frecuencias durante un tiempo definido. La forma de la onda elegida será sinusoidal y los resultados esperados son los de un crecimiento lineal de la frecuencia frente al tiempo, teniendo en cuenta que los límites tanto inferior² como superior³ de las frecuencias medidas dependerán de la sensibilidad del dispositivo. Las muestras (**Imagen 6**) tomadas en el experimento se ajustan a “8192” que permiten una mejor resolución sin que la realización de los cálculos interfiera con la correcta toma de datos en los dispositivos utilizados.

Inicialmente se emite un barrido de frecuencias del rango permitido por el generador: 1 Hz – 24000Hz; durante un tiempo de 30 s.

Tal y como se ve en **Imagen 10** a partir de 9 KHz se producen caídas de la frecuencia que no coinciden con los resultados esperados. Esta cuestión puede deberse a un fallo en la toma de datos del micrófono, en los cálculos de la app o en el barrido de frecuencias del generador.

² Esto se comprueba midiendo con la App el sonido ambiente de la zona en la que se vaya a realizar el experimento. Este valor se puede reducir ampliando las muestras de cada medición en la pestaña de “ajustes” (**Imagen 6**)

³ El valor del límite superior viene dado por los resultados de la aplicación al medir el barrido de frecuencias.

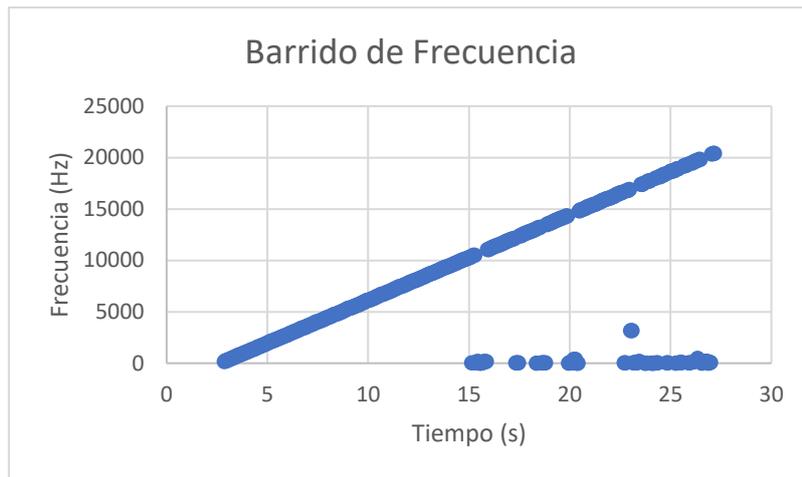


Imagen 10. Evolución de la frecuencia frente al tiempo para un barrido comprendido entre 1Hz y 2400 Hz durante un tiempo de 30 s.

Para comprobar si se debe a haber escogido un periodo de tiempo demasiado pequeño para la realización del barrido se repite la operación para 60 s (**Imagen 11**), sin embargo, aunque la tendencia mejora, nuevamente se observan caídas de frecuencia a partir de 9 KHz, aunque en menor cuantía. Al repetir en varias ocasiones los barridos, tanto para 30 s como para 60 s se observa que las caídas de frecuencia se dan en los mismos intervalos, pero no necesariamente para las mismas frecuencias.

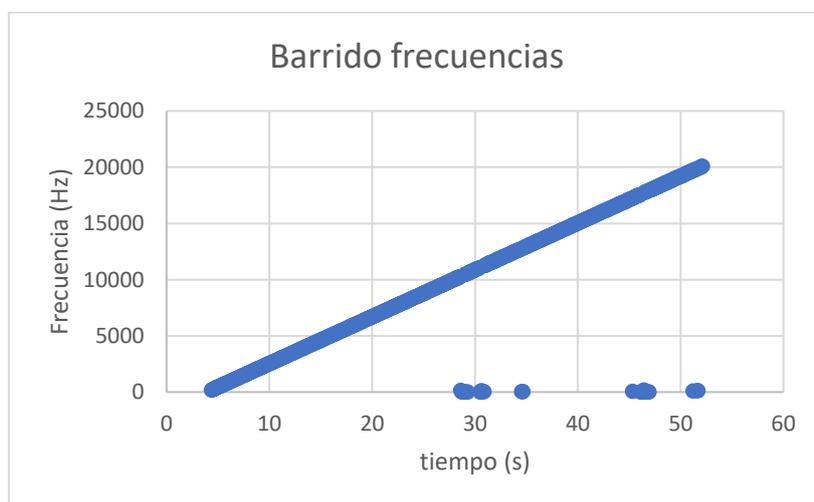


Imagen 11. Evolución de la frecuencia frente al tiempo para un barrido comprendido entre 1 Hz y 2400 Hz durante un tiempo de 60 s

Se realiza el barrido de frecuencias para uno de los intervalos en los que se producen las caídas de frecuencia (9KHz - 13KHz) durante 30 s, para comprobar si es cuestión del tiempo destinado

al barrido o las caídas se deben a las frecuencias. En la **Imagen 12** se observa como en dicho intervalo se interrumpe el barrido de frecuencias, estando muy alejado de lo deseado.

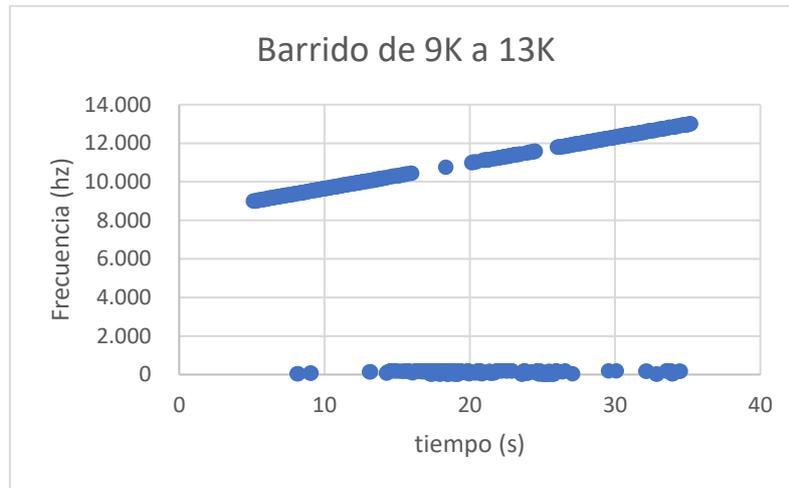


Imagen 12. Evolución de la frecuencia frente al tiempo para un barrido de frecuencias entre 9 KHz - 13KHz durante 30 s. Su línea de tendencia mediante el ajuste por mínimos cuadrados resulta

Con el fin de corroborar si el problema reside en el generador de tonos o en las mediciones del dispositivo se utilizan ambos teléfonos, uno de los smartphones como generador y otro como receptor. En primer lugar, se empleará el Lenovo como emisor de la señal mediante la app “Function Generator” [23], una aplicación destinada a la generación de tonos semejante a la web Online Tone Generator aunque exclusiva para Android, en sustitución del ordenador. El resultado de la **Imagen 13** coincide con el esperado, el dispositivo móvil presenta la respuesta esperada para frecuencias entre 140 hz y 21000Hz.

A continuación, se comprueba la respuesta del dispositivo Android a un barrido de frecuencias. Para ello, se hace uso del dispositivo Iphone como generador del barrido mediante la aplicación Audio Function Generator [24], una app destinada a la generación de tonos análoga a Online Tone Generator pero exclusiva de Apple, la cual permite realizar barridos comprendidos entre 20 Hz y 20000 Hz, en un tiempo máximo de 10 segundos.



Imagen 13. Evolución de la frecuencia frente al tiempo en un barrido de frecuencia con el dispositivo Android como emisor y el iPhone como receptor, siendo su línea de tendencia por ajuste de mínimos cuadrados de: $y = 33,335x - 64,973$ y $R^2 = 1$.

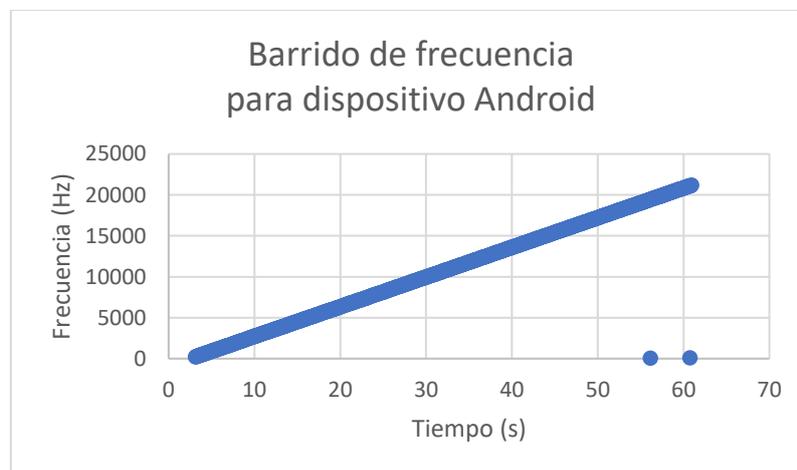


Imagen 14. Evolución de la frecuencia frente al tiempo para un barrido comprendido entre 1Hz a 20 kHz, siendo su línea de tendencia por ajuste de mínimos cuadrados de: $y = 358,38x - 846,32$ y $R^2 = 0,9756$

Todo esto indica que la aplicación web generadora de tonos presenta errores al emitir un barrido de frecuencias a partir de 9KHz y, por lo tanto, es recomendable no utilizarla para los casos en que esto sea necesario, funcionando sin problema para tonos puntuales. De igual manera la respuesta de los dos smartphones es la esperada para el rango de frecuencias con las que se va a trabajar.

3. Experimentos.

A continuación, se llevarán a cabo una serie de experimentos que ilustran las propiedades ondulatorias del sonido y que permitirán comprobar las mismas mediante un dispositivo móvil haciendo uso de la aplicación Phyphox. El primero de los casos (3.1) también servirá para

comparar las posibles diferencias entre ambos smartphones a la hora de medir frecuencias y poder concluir si el uso de uno u otro afecta a la fiabilidad de los resultados. Posteriormente se estudiará el comportamiento de la intensidad del sonido respecto de la distancia o fenómenos como la superposición de ondas, la resonancia en un tubo o las interferencias, para finalizar con un experimento relacionado con el uso práctico de las propiedades ondulatorias del sonido como es el sónar. Todos estos experimentos se han planteado para que el material usado pueda estar al alcance de cualquier alumno, tanto de bachiller como de primeros cursos de física, pueda reproducirlos en su casa sin necesidad de contar con el apoyo de un laboratorio o de herramientas avanzadas.

3.1. Propiedades ondulatorias del sonido: estudio de los armónicos de sonidos comunes y medición de su frecuencia fundamental.

Cada diapasón generará una onda con una frecuencia que corresponderá al armónico fundamental, f_0 , por lo que la frecuencia medida debe de coincidir con esta. En el experimento se comprueba, para ambos dispositivos, la precisión de la medida de la frecuencia fundamental, así como la posible presencia de los armónicos. A la hora de escoger la opción del número de muestras a tomar para el cálculo del espectro de frecuencias, tal y como se ve en la **Imagen 6**, se ha optado por “16384” dado que es la más alta que permite tomar medidas en el dispositivo Android de manera fluida, escogiendo la misma opción en el iPhone para comparar ambos resultados en igualdad de condiciones.

Tabla 1. Datos de la frecuencia fundamental teórica y las medidas experimentalmente con los dos dispositivos

f_{0t}/Hz	f_{expIP}/Hz	f_{expAN}/Hz
256	254.88	254.88
288	287.10	287.10
341.3	339.84	339.84
384	383.78	383.78
440	439.45	439.45
480	480.46	480.46
512	509.76	509.76
1700	1699.22	1699.21

Los datos obtenidos en la **Tabla 1** muestran que los valores medidos en ambos dispositivos, siendo f_{expIP} la frecuencia medida con el dispositivo iPhone y f_{expAN} con el Android, no presentan casi diferencias y son independientes de la gama del smartphone. Los resultados presentan una desviación de ± 2.2 Hz, que se puede tomar como una estimación del error sistemático cometido y presenta una alta fiabilidad a la hora de tomar los datos de las frecuencias. A excepción del diapason de frecuencia $f_{0t} = 440\text{Hz}$, del resto de diapasones se disponía de una grabación previa del sonido emitido de los mismos, por lo que de cara a realizar este tipo de medidas en remoto se comprueba la validez de utilizar grabaciones previas como alternativa a no disponer de la fuente original del sonido.

Se comprueba que ambos dispositivos arrojan los mismos resultados a la hora de hacer las mediciones y que, por lo tanto, no hay diferencia, dentro de los rangos y las condiciones en las que se está trabajando, entre los resultados de uno y otro. Por esa razón, en adelante se hará uso de uno de ellos.

Al contrario que los diapasones, diseñados para que el sonido emitido se concentre en la frecuencia fundamental, los sonidos comunes, como los emitidos por instrumentos musicales o por la voz humana, los sonidos emitidos, corresponden a una superposición de modos de oscilación determinados, llamados armónicos, con frecuencias determinadas. Estas frecuencias tienen una relación con la más baja, frecuencia fundamental, correspondiente al modo de vibración más sencillo. Como ejemplo para el estudio de sonidos comunes y comprobar que se pueden observar y medir los armónicos, se hará uso de una guitarra española. Para este caso, en una cuerda tensa fija por ambos extremos, la superposición de los modos de oscilación cumplirá con:

$$f_n = nf_0 \text{ donde } n = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

Para ello, se hará vibrar la primera cuerda de una guitarra, que en la afinación estándar (a una frecuencia de 440Hz) corresponde con la nota Mi ($E_4=329,63$ Hz) [25]. Estudiando el espectro de frecuencia del sonido emitido por la cuerda al vibrar se podrá observar si aparecen los armónicos y medirlos. Dado que en el espectro de frecuencia la amplitud de los armónicos será considerablemente más baja que la de la frecuencia fundamental, al extraer los datos de la grabación en un Excel, Phypox no los reconocerá como picos de frecuencia y, por lo tanto, no los incluirá en los resultados (de hecho, la pestaña “peak history” del archivo. Excel no será muy distinta entre un diapason y un sonido natural), sin embargo, en la propia pantalla de la

aplicación, **Imagen 6**, se podrá comprobar la aparición de los armónicos y medir los valores de los picos de frecuencia en la gráfica de la “Transformada de Fourier”.



Imagen 15. Captura de pantalla del espectro de audio obtenido al hacer vibrar la primera cuerda de una guitarra, donde se observa el pico correspondiente a la frecuencia fundamental y los armónicos.

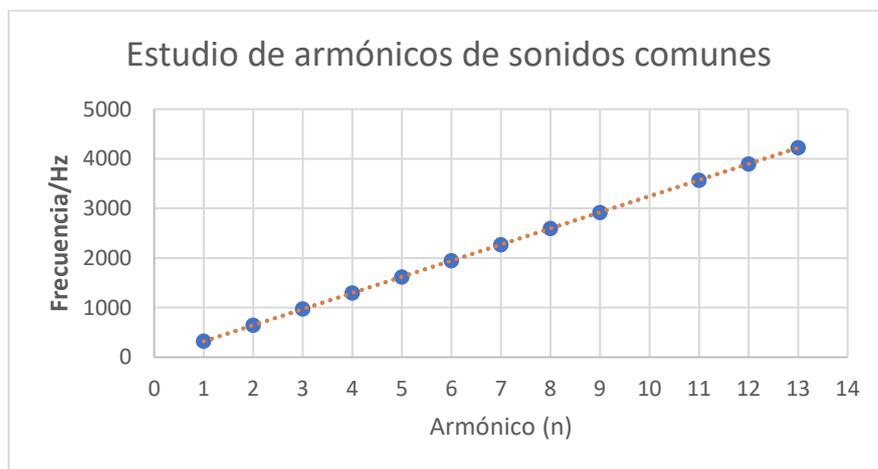


Imagen 16. Representación gráfica de los valores obtenidos de la frecuencia fundamental y de los armónicos medidos en la gráfica de la **Imagen 15**, con un ajuste por mínimos cuadrados con: $y = 325,05x - 5,1611$ y $R^2 = 1$

En la **Imagen 15** se observa la presencia de los picos de frecuencia pertenecientes a los armónicos, de la señal. Se ha reducido el número total de muestras a la opción “8192”, lo cual reduce la resolución, pero al reducir la latencia de refresco de la gráfica permite que este fenómeno se vea con más claridad. La frecuencia fundamental obtenida $f_0 = 322.27 \pm 5.86 \text{ Hz}$

y, como se observa en la gráfica de la **Imagen 16**, se han medido los armónicos hasta el número 13, faltando solamente el décimo armónico de la serie. Los resultados obtenidos concuerdan con lo esperado y demuestran la presencia de armónicos en sonidos comunes, así como la posibilidad de demostrar esta existencia de forma sencilla haciendo uso de un dispositivo móvil y de la aplicación Phyphox.

Con todo lo anterior se ha comprobado que se pueden tomar medidas fiables de las frecuencias de una señal con la ayuda de un smartphone, así como comprobar las características de los sonidos comunes, concretamente de la presencia de armónicos múltiplos de su frecuencia fundamental.

3.2. Relación de intensidad medida con la distancia a la señal

El siguiente experimento consiste en comprobar el comportamiento de la intensidad del sonido respecto a la distancia entre la fuente y el receptor. Se comprobará si la variación responde a la esperada en el caso de una fuente puntual e isótropa, en la cual la intensidad será proporcional a $1/r^2$, por lo tanto, decaerá con la inversa del cuadrado de la distancia, dado que en realidad la aplicación proporciona el nivel de presión sonora, la medida en cada punto responderá a:

$$L_I = 10 \cdot \log \frac{I_1}{I_0} \quad (2)$$

Donde I_1 es la intensidad en el punto de medida e $I_0=10^{-12} \text{ W/m}^2$ es la intensidad de referencia. Por tanto, la medida no es una relación lineal sino logarítmica de la relación entre la intensidad medida, I_1 , y la que es tomada como referencia, I_0 . Entonces lo que esperamos observar es que $L_p = 20 \cdot \log(r)$, siendo r la distancia a la fuente.



Imagen 17. Disposición de los smartphones para la medida de la intensidad y su variación con la distancia.

Se hará uso del generador de tonos online y de los altavoces conectados un ordenador. En esta ocasión se generará un único tono a frecuencia constante $f=440$ Hz (1) y se irá desplazando el foco emisor (el altavoz) del dispositivo para comprar la reacción de la medida (**Imagen 17**). La medida del desplazamiento vendrá dada por un metro de precisión ± 0.5 cm, y se realizará tanto en sentido horizontal como vertical al micrófono del dispositivo, repitiendo este proceso para cada uno de ellos e invirtiendo el uso de cada smartphone (emisor y receptor de la señal). Haciendo uso de la opción “Amplitud de audio” (**Imagen 7**) de Phyphox, que calcula el nivel de presión sonora del sonido (L_p) recibido por el micrófono. Este nivel de presión sonora determina la intensidad de un sonido en decibelios:

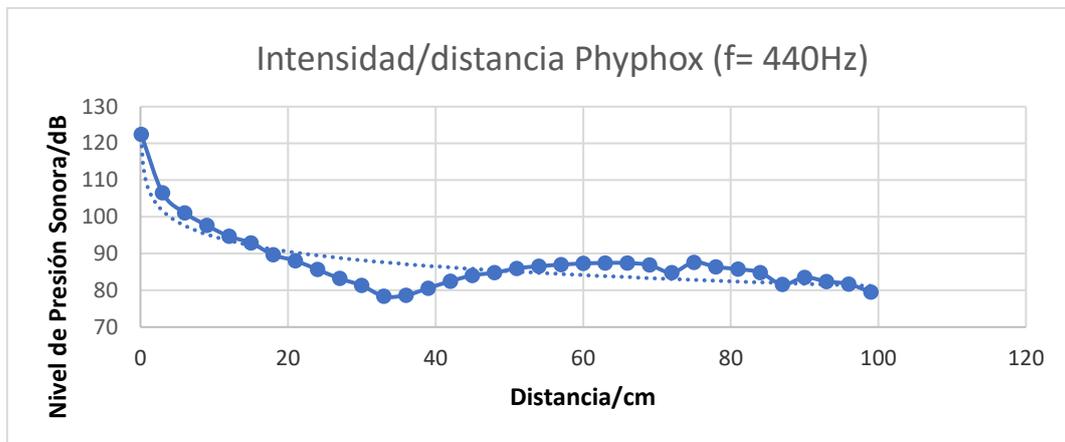


Imagen 18. Variación del nivel de presión sonora con la distancia al dispositivo iPhone, ajustada a una línea de tendencia en escala logarítmica $y = -5,833\ln(x) + 108,03$ y $R^2 = 0,8037$.

Dado que la emisión del sonido se produce en todas direcciones y de forma esférica llegará habrá una distancia para la cual las interferencias con el entorno provoquen que se pierda la tendencia logarítmica con la que debe disminuir la señal y se mantenga una cierta estabilidad en el nivel de presión sonora recibido por el dispositivo.

Como se observa en la **Imagen 18** la tendencia general sigue el comportamiento esperado, aunque se observan algunas anomalías que deben estudiarse. Las anomalías pueden deberse tanto a ecos de la propia señal como ruidos del entorno, en cualquier caso, este hecho reduce considerablemente la fiabilidad de las medidas de la aplicación, a lo que hay que añadir las limitaciones ya descritas en cuanto a la exactitud de las medidas en el apartado de Dispositivo experimental. Para comprobar si el problema se debe a la aplicación o a la utilización del micrófono para medir el Nivel de Presión sonora sin un hardware y software adecuados se hará uso de la aplicación alternativa DecibelX (**Imagen 2**) a fin de comprobar si se repite el fallo en las medidas.

Como se observa en la **Imagen 19** nuevamente se obtienen valores incongruentes, en este caso con varias subidas y bajadas del Nivel de Presión sonora, lo cual es totalmente contrario a lo que se espera obtener.

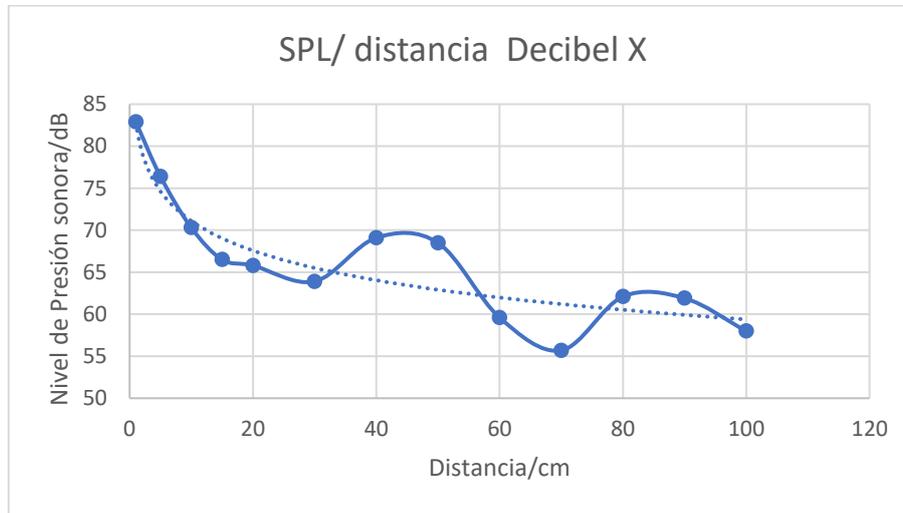


Imagen 19. Variación del nivel de presión sonora con la distancia al dispositivo Iphone con la aplicación DecibelX, ajustada a una línea de tendencia en escala logarítmica $y = -6,609\ln(x) + 102,23$ y $R^2 = 0,7077$

En la **Imagen 19** se vuelve a observar el mismo comportamiento, si bien la tendencia es, a grandes rasgos, la esperada en esta ocasión se observa con más claridad la presencia de una oscilación que coincide con lo esperado en fenómenos de interferencia, que se estudiarán de forma concreta en el apartado **3.5**. Si este fuera el caso los puntos correspondientes a la interferencia constructiva están separados por una distancia aproximada de 40.0 ± 0.5 cm, lo cual según (15) y (16) permitiría calcular la frecuencia correspondiente a la interferencia, siendo esta de $f = 425 \pm 140$ Hz, la cual coincide con la frecuencia elegida para la realización del experimento. Para confirmar que estas oscilaciones se deben a una interferencia con el entorno se procede a repetir el experimento para una nueva frecuencia y a fin de evitar posibles interferencias con alguno de los objetos del montaje se desplaza el dispositivo experimental a una zona más despejada y lo más alejada posible de las paredes. La nueva frecuencia escogida es de $f = 900$ Hz, lo que conllevaría, en caso de tratarse de una interferencia, aparecieran picos de frecuencia separados unos 20 cm cada uno, y nuevamente se hace uso de Phyphox para la toma de medidas.

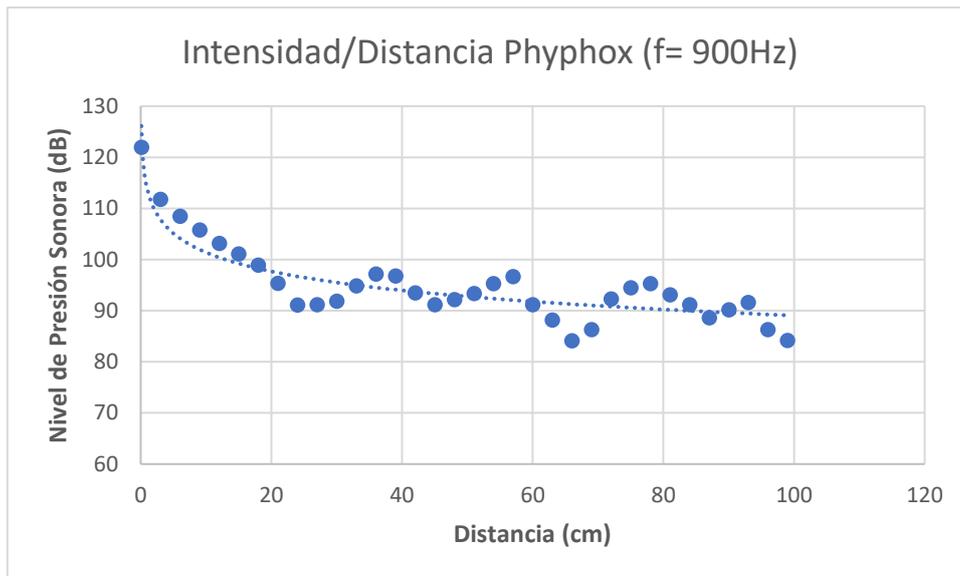


Imagen 20. Variación del nivel de presión sonora con la distancia al dispositivo iPhone con la aplicación Phyphox para una frecuencia de la señal de $f=900\text{Hz}$, ajustada a una línea de tendencia en escala logarítmica $y = -5,368\ln(x) + 113,77$ y $R^2 = 0,8168$

Para la nueva frecuencia se vuelve a observar que la tendencia esperada se ve alterada por la presencia de oscilaciones. Las nuevas oscilaciones son diferentes a los casos anteriores y nuevamente se comprueba si se trata del fenómeno de la interferencia. En este nuevo caso aparecen más puntos de separación de la onda constructiva y calculando la distancia entre ellos resulta ser de 21.0 ± 0.5 cm, que coincide con lo esperado en el caso de una interferencia en la señal recogida por el dispositivo. La presencia de esta interferencia se cree debida a la superposición del sonido emitido con el eco de las paredes o algunos objetos del montaje (a pesar de haber intentado minimizar la presencia de estos últimos no se puede descartar esta posibilidad) y no se ha podido eliminar. El cambio de frecuencia, como posibilidad de reducir el efecto, no ha dado resultados satisfactorios y ha confirmado la presencia de la interferencia. Esto es, por lo tanto, una limitación a la hora de poner en práctica, de forma casera, el experimento dado que los requisitos experimentales indican que resulta demasiado exigente plantearlo con los materiales disponibles. De todo lo anterior, se puede concluir que la reproducción de este experimento, por parte de un alumno en su casa, presentará dificultades a la hora de comprobar de manera fiable el comportamiento de la reducción del nivel de intensidad de una onda sonora frente a la distancia, aunque puede servir de ejemplo para la presencia del fenómeno de la interferencia (que se desarrollará en el apartado 3.5) así como una medida para comprobar la acción del entorno en este tipo de experiencias prácticas.

3.3. Superposición de ondas: batido.

Continuando con el estudio de las propiedades ondulatorias del sonido, se plantea un nuevo experimento consistente en la superposición de ondas sonoras, y concretamente del caso del batido sonoro [26] [27]. El fenómeno de batido o pulso en ondas sonoras armónicas aparece debido a la interferencia de ondas armónicas de frecuencia y longitud de onda ligeramente distintas. Como consecuencia, las dos ondas están periódicamente en fase y fuera de fase, de manera que en un punto en el espacio existe una alternancia temporal entre interferencia constructiva y destructiva. La onda resultante en ese punto es una onda sinusoidal de amplitud variable. Siendo las dos ondas, ψ_1 y ψ_2 , de igual amplitud A , frecuencias próximas f_1 y f_2 , de modo que:

$$\begin{aligned}\psi_1 &= A \sin \left[2\pi \left(\frac{x}{\lambda_1} - f_1 t \right) \right] \\ \psi_2 &= A \sin \left[2\pi \left(\frac{x}{\lambda_2} - f_2 t \right) \right]\end{aligned}\tag{3}$$

Al sumar las dos ondas individuales la resultante de la superposición de estas tendrá la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\psi &= \psi_1 + \psi_2 = A \left[\sin 2\pi \left(\frac{x}{\lambda_1} - f_1 t \right) + \sin 2\pi \left(\frac{x}{\lambda_2} - f_2 t \right) \right] = \\ &2A \cos 2\pi \left[\frac{1}{2} \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) x - \frac{1}{2} (f_1 - f_2) t \right] \cdot \sin 2\pi \left[\frac{1}{2} \left(\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} \right) x - \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{2} (f_1 + f_2) t \right]\end{aligned}\tag{4}$$

Por lo tanto, la onda superpuesta tendrá una amplitud que variará también sinusoidalmente y dará lugar a variaciones en el volumen (intensidad) del sonido llamados pulsos. Esta intensidad que percibe el oído corresponde con el cuadrado de la amplitud y en cada periodo para por 2 máximos y 2 mínimos, tal y como se ve en la siguiente imagen:

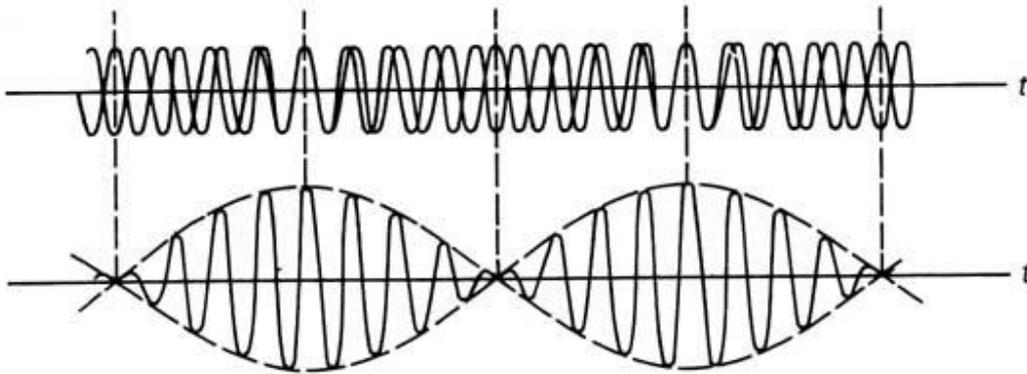


Imagen 21. Representación del batido generado por la superposición de dos ondas [28]

La frecuencia de batido o de pulso, f_p , es:

$$f_p = |f_1 - f_2| \quad (5)$$

Para realizar la experiencia las ondas se generarán con la ayuda de la aplicación web onlinetonegenerator.com, en un pc con dos altavoces conectados. La aplicación permite generar tonos distintos en cada canal de salida de audio. Las medidas se tomarán haciendo uso de del apartado “Autocorrelación de audio” (**Imagen 8**) de Phypbox, en concreto de la sección de datos “Raw data” que recoge los valores de la FFT frente al tiempo, resultados análogos a los que mostraría la opción “Espectro de Audio” pero con un mayor tiempo de grabación, lo cual favorece la visualización del comportamiento de la superposición de las ondas. Se tomarán muestras de diferentes frecuencias tomando como referencia una f_1 y variando f_2 , en primer lugar, se tomarán ejemplos próximos entre sí y finalmente dos valores de frecuencia alejados para comprobar el comportamiento (**Tabla 2**).

Tabla 2 Frecuencia de las ondas generadas en cada altavoz para medir su superposición y su frecuencia de batido.

f_1/Hz	f_2/Hz
440	445
	450
	460
	880

A través de los datos obtenidos se podrá calcular la distancia entre dos máximos cercanos (periodo de la onda) o entre un máximo y un mínimo (semiperiodo de la onda) y así calcular la frecuencia de batido experimental según:

$$f = \frac{1}{T} \quad (6)$$

Para que se produzca la pulsación la diferencia entre las frecuencias no debe de ser muy grande, por tanto, lo esperado es que no sea posible ver la pulsación y, por lo tanto, medir la frecuencia de batido en el caso de $f_2 = 880 \text{ Hz}$, pero sí en los otros.

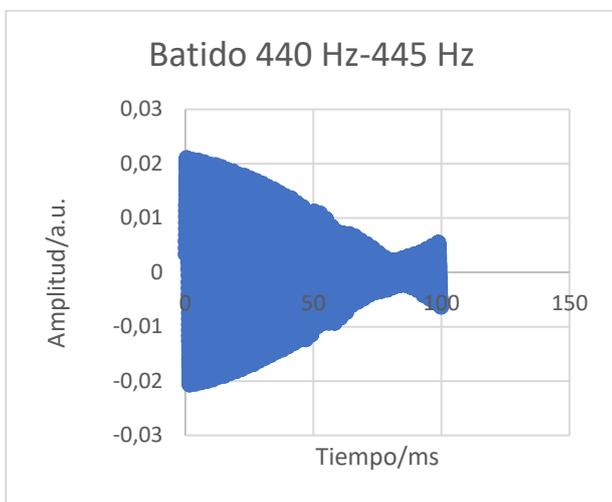


Imagen 22. Forma de la onda resultante de la superposición de dos tonos de 440 y 445 Hz

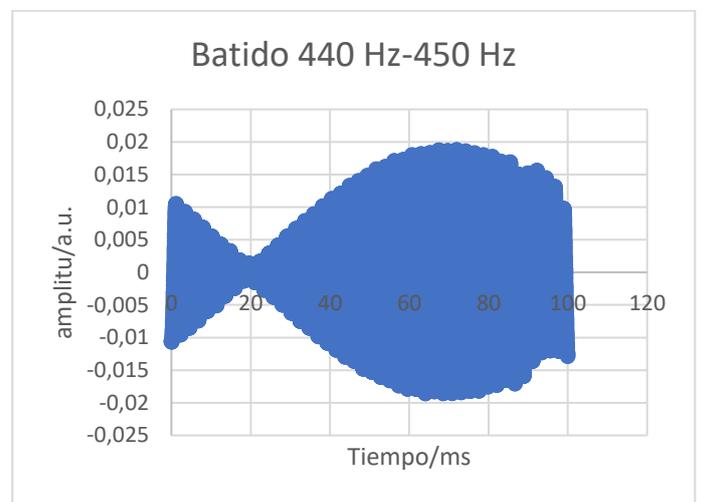


Imagen 23. Forma de la onda resultante de la superposición de dos tonos de 440 y 450 Hz

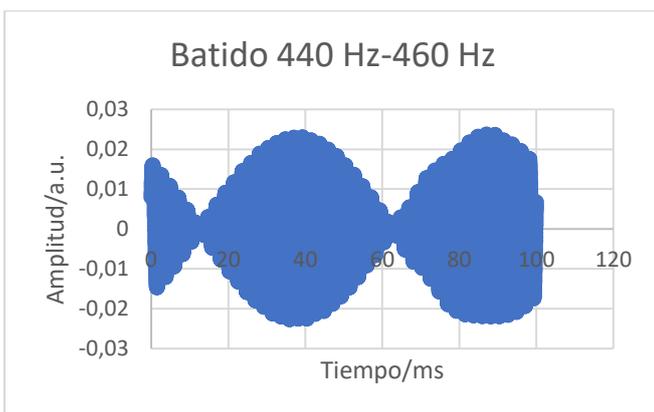


Imagen 24. Forma de la onda resultante de la superposición de dos tonos de 440 y 460 Hz

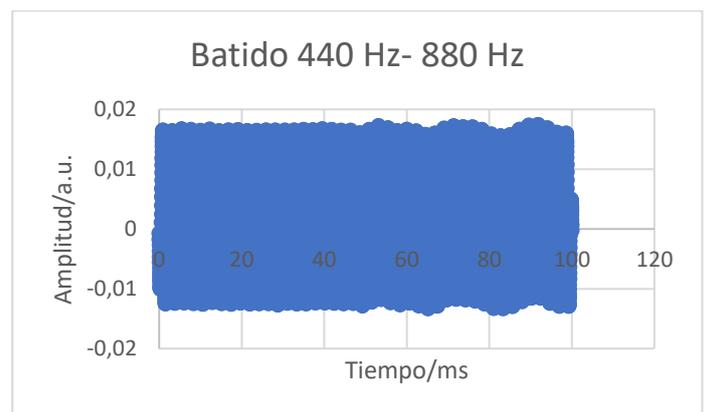


Imagen 25. Forma de la onda resultante de la superposición de dos tonos de 440 y 880 Hz

Tabla 3. Resultados de las frecuencias de batido tanto teórica como las experimentales.

f_{pexp}/Hz	f_{pT}/Hz
6	5
10	10
21	20
----	440

En la **Tabla 3** se recogen los valores obtenidos a través del cálculo del periodo de batido mostrado en: **Imagen 22**, **Imagen 23**, **Imagen 24** e **Imagen 25**. En el último caso, la superposición de las ondas no genera el efecto de batido y por lo tanto no es posible calcular su frecuencia. El error de la frecuencia es $\Delta f = \pm 2$ Hz. El experimento de la superposición de ondas para comprobar el fenómeno del batido se consigue con un montaje muy sencillo y no requiere cumplir grandes requisitos técnicos o experimentales, así mismo, la comprobación se puede hacer tanto de forma visualmente clara como a través de las mediciones. Este fenómeno, además, es perfectamente audible al realizar el experimento, con lo que el alumno podrá escuchar perfectamente el batido y permite que la práctica resulte más llamativa.

3.4. Ondas estacionarias: resonancia

A continuación, dentro de la comprobación de las propiedades ondulatorias del sonido, se estudiarán las ondas estacionarias. Para el estudio de la resonancia de ondas estacionarias se estudiará el comportamiento de estas en tubos, tanto abiertos por ambos extremos como cerrados por uno de ellos.

En un tubo abierto por ambos extremos y de longitud L , cuando el aire entra al tubo se produce una onda de sonido que puede ser descrita mediante el desplazamiento de las moléculas del aire o por la variación de la presión. La onda longitudinal producida viaja en el tubo y se refleja en el extremo abierto produciendo una onda estacionaria. Estas ondas estacionarias producen nodos y antinodos de desplazamiento o de presión. Los nodos de desplazamiento son puntos donde las moléculas de aire no se desplazan mientras que los antinodos de desplazamiento son puntos donde las moléculas de aire tienen máximo desplazamiento. Desde la perspectiva de la expresión de ondas de presión, en el punto donde se forma un nodo de desplazamiento se origina un antinodo de presión y en el punto donde se forma un antinodo de desplazamiento se produce un nodo de presión. En el extremo de un tubo abierto se forma un antinodo de desplazamiento o nodo de presión, por cuanto la presión al interior y en el exterior del tubo es la presión atmosférica.

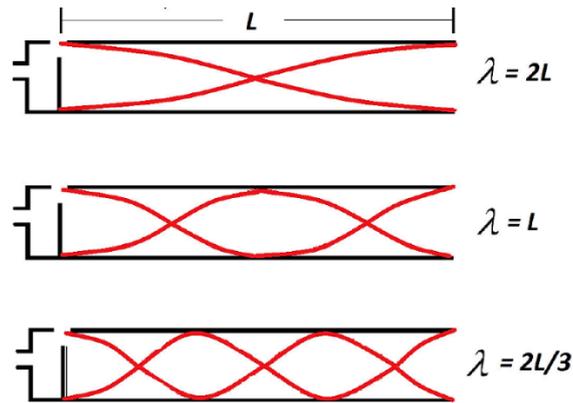


Imagen 26. Representación de las ondas estacionarias en un tubo abierto por ambos extremos [29]

La longitud de la onda en un tubo abierto de longitud L se obtiene según:

$$\lambda = \frac{2L}{n} \quad (7)$$

Donde n es el armónico correspondiente. Partiendo de (16) y (7) se tiene que la frecuencia de estas ondas en un tubo abierto sería:

$$f = \left(\frac{v_s}{2L}\right) n \quad (8)$$

Siendo v_s la velocidad del sonido y $n = 1, 2, 3, \dots$

Cuando se trata de un tubo semi cerrado (abierto en un extremo y cerrado por el otro) por donde circula la columna de aire, en el lado cerrado del tubo se origina un nodo de desplazamiento o antinodo de presión por lo que en virtud del fenómeno de superposición de las ondas incidentes y reflejadas se producen ondas estacionarias.

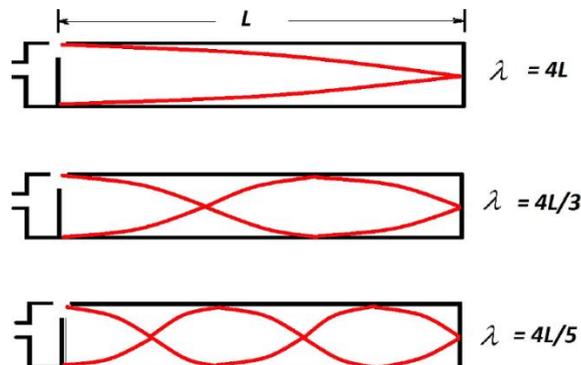


Imagen 27. Representación de las ondas estacionarias generadas en un tubo cerrado por un extremo [29]

En este caso la longitud de onda y la frecuencia de un tubo semi cerrado son:

$$\lambda = \frac{4L}{n} \text{ donde } n = 1, 3, 5 \dots \quad (9)$$

Y, por lo tanto, la frecuencia:

$$f = \left(\frac{v_s}{4L}\right)n \text{ donde } n = 1, 3, 5 \dots \quad (10)$$

Siendo v_s la velocidad del sonido.

Para la realización del experimento se dispondrá de un tubo de pvc de longitud $L=106,0\pm 0,1$ cm abierto. En un extremo se situará el altavoz conectado a un PC y se emitirá el tono mediante la aplicación web, en el otro extremo se ubicará el dispositivo móvil que tomará los datos de la frecuencia con la opción “espectro de audio” de Phyphox.



Imagen 28. Montaje experimental para el caso de un tubo abierto por los dos extremos

Se irá aumentando la frecuencia hasta que la resonancia dentro del tubo provoque que la amplitud de la frecuencia medida alcance un máximo (lo cual provocará que la intensidad del sonido aumente considerablemente), momento en el que la frecuencia coincidirá con la formación de la onda estacionaria dentro del tubo, pudiendo calcular los nodos correspondientes según (9).

En el caso del tubo semi cerrado uno de los extremos se cerrará con una base de poliestireno y la longitud del tubo, hasta la base del cierre, será de $93.1\pm 0,1$ cm.



Imagen 29. Montaje experimental para el caso de un tubo semi cerrado.

El procedimiento inicial será igual que el anterior, midiendo los armónicos para cada frecuencia en el tubo, en este caso cerrado por un extremo calculando los nodos correspondientes mediante (10).

Tabla 4. Valores de las frecuencias de resonancia para un tubo abierto para cada valor de n (n° de nodos)

Frecuencia/Hz	n
161	1
321	2
477	3
641	4
794	5
960	6

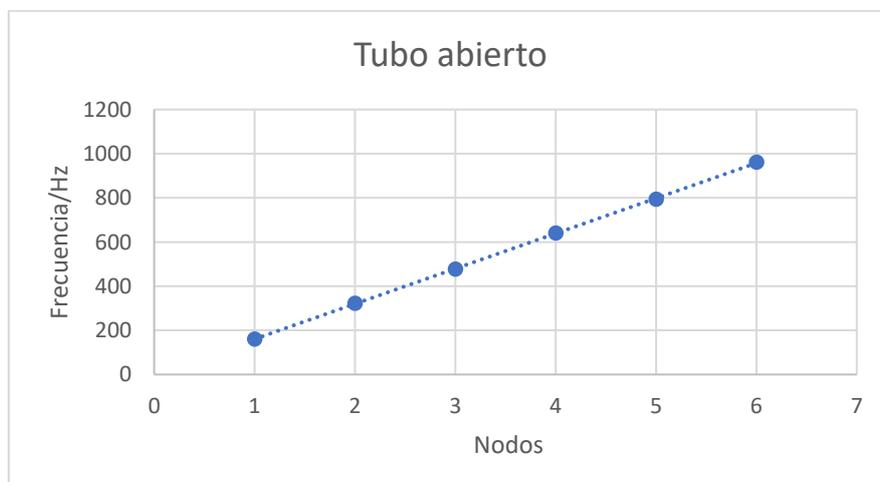


Imagen 30. Representación de la frecuencia para cada valor de n de vibración en un tubo abierto cuya línea de tendencia resulta de un ajuste por mínimos cuadrados con: $y = 159,39x + 1,1333$ y $R^2 = 0,9999$

Tabla 5. Valor de las frecuencias de resonancia para cada valor de n (nº de nodos) de un tubo semi cerrado

Frecuencia/Hz	n
89	1
180	2
263	3
353	4
434	5
532	6

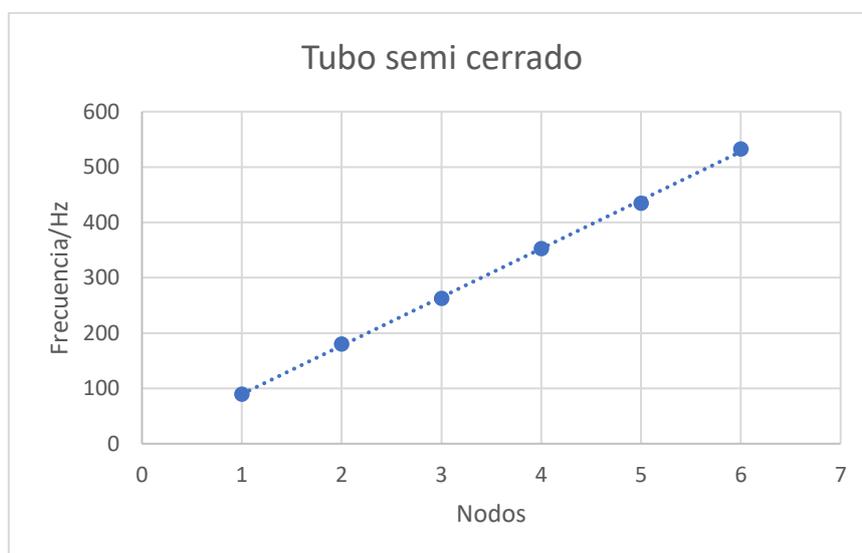


Imagen 31. Representación de la frecuencia en función de n en un tubo semi abierto, con una línea de tendencia que resulta de un ajuste por mínimos cuadrados con: $y = 87,633x + 1,9222$ y $R^2 = 0,9995$

Si bien en el caso del tubo abierto se obtienen los resultados esperados, para el caso del semi cerrado se obtienen no solo los armónicos impares, tal y como se definía en (9) y (10). En este sentido conviene aclarar que los armónicos pares también aparecen, aunque con una intensidad más débil que los impares, esto se debe a que no se consigue la situación de un tubo completamente cerrado por un extremo, sino una situación intermedia, de ahí que los armónicos pares, propios de un tubo abierto, sigan apareciendo, aunque de forma más tenue, como se ve en la **Imagen 32**, la cual compara los picos obtenidos para el caso de un armónico par y uno impar.

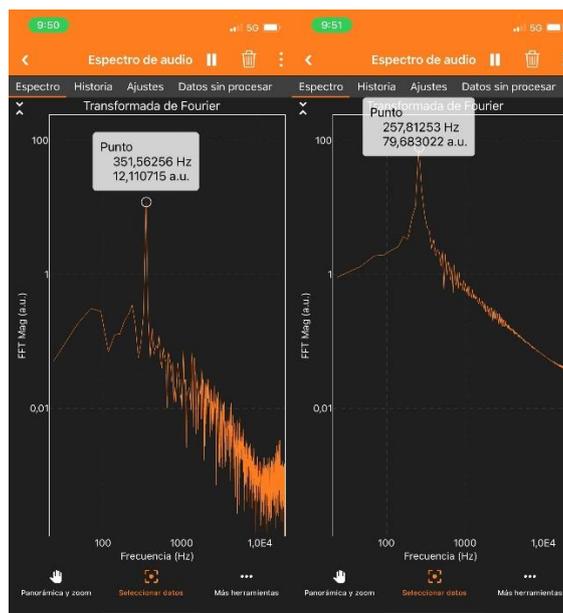


Imagen 32. Captura de pantalla de la medida de dos armónicos de resonancia en un tubo semi cerrado, correspondientes a un armónico par (izquierda) y uno par (derecha)

De los valores obtenidos de las frecuencias de vibración para el caso de un tubo abierto (**Tabla 4**) y su ajuste por mínimos cuadrados (**Imagen 30**) se obtiene una velocidad del sonido $v_s = 338 \pm 6 \text{ m/s}$, mientras que para el caso de un tubo semi cerrado (**Tabla 5**) el valor obtenido del ajuste por mínimos cuadrados (**Imagen 31**) es $v_s = 326 \pm 10 \text{ m/s}$.

De cara a la realización de este experimento por parte de un alumno, el caso de un tubo abierto no presenta mayor impedimento y se puede confirmar el fenómeno de la resonancia tanto a través de las medidas de forma sencilla como auditivamente. Por su parte, el caso de un tubo semi cerrado presenta el inconveniente de asegurar que la situación se da completamente, de lo contrario, como se ha comprobado, no se obtendrán los resultados esperados. En este sentido, el método escogido para cerrar uno de los extremos del tubo no ofrece la fiabilidad esperada y puede resultar complicado disponer, de forma casera, de un montaje adecuado para reproducir la situación de un tubo semi cerrado.

3.5. Interferencias sonoras

En el siguiente experimento se estudiará el caso general de la interferencia de dos ondas, un fenómeno que ha aparecido en un apartado previo (**3.2**) al estudiar la relación de la intensidad de la fuente respecto de la distancia y que ahora se estudiará de forma concreta. Se parte de dos ondas armónicas coherentes (con diferencia de fase constante) de igual amplitud y frecuencia, aunque situadas en distintos puntos:

$$\psi_1 = A \sin(kx_1 - \omega t) \tag{11}$$

$$\psi_2 = A \sin(kx_2 - \omega t)$$

Cuando emiten simultáneamente ψ_1 y ψ_2 los puntos en los que las dos ondas se superponen, lo que llevará a dos casos relevantes, aquellos en los que las ondas se encuentren en fase y en oposición de fase. Los puntos en los que se encuentren en fase generarán una interferencia constructiva, mientras que aquellos en los que se encuentren en oposición de fase se generará una interferencia destructiva.

En el caso de la interferencia constructiva se produce si la distancia que recorren las dos ondas para llegar a un punto concreto es un número entero de veces su longitud de onda, mientras que la destructiva se generará cuando la distancia sea $(\frac{1}{2} + n)$ veces su longitud de onda. En estos casos, para la interferencia constructiva la amplitud alcanza el doble de la amplitud original, se anula cuando se encuentran en oposición de fase. Sin embargo, esta situación ideal, en la cual entre las dos ondas no existe una diferencia inicial de fase no ocurre en la práctica, puesto que, de forma habitual, existe una diferencia de fase inicial que hace que los puntos esperados se desplacen.

En el caso del montaje experimental con el que se va a realizar el experimento (**Imagen 33**), se hará, nuevamente, uso de los dos altavoces conectados a un pc. Fijando el origen de coordenadas a uno de los altavoces, el otro se situará a una distancia $L = 60$ cm, y a lo largo de la línea que los une se producirán máximos y mínimos de intensidad que corresponderán, respectivamente, a las situaciones de la interferencia constructiva y de la destructiva. El smartphone se irá desplazando sobre esa línea para encontrar esos máximos y mínimos y poder medir la distancia a la que se encuentran. En cualquiera de los puntos de la línea la distancia recorrida por las ondas será:

$$l_1 = x \tag{12}$$

$$l_2 = (L - x)$$

Siendo l_1 la distancia que recorre la onda emitida por el altavoz ubicado en el origen de coordenadas y l_2 la que recorre el altavoz enfrenteado a él y separado una distancia L . Por lo tanto, se podrá calcular tanto la diferencia de caminos como la diferencia de tiempos:

$$l_2 - l_1 = |L - 2x|$$

$$t_2 - t_1 = (L - 2x)/v_s \quad (13)$$

Donde t_1 es el tiempo que tarda en recorrer la primera onda la distancia hasta el punto x , t_2 es el tiempo que tarda la segunda onda en recorrer la distancia hasta el mismo punto y v_s es la velocidad del sonido. Los máximos y los mínimos se encontrarán en los casos en los que la diferencia de estos caminos cumpla la relación con la longitud de onda de las interferencias constructivas y destructivas:

$$\text{Interferencia constructiva: } |L - 2x| = n\lambda$$

$$\text{Interferencia destructiva: } |L - 2x| = (2n + 1)\frac{\lambda}{2} \quad (14)$$

Finalmente se tendrá que entre dos puntos de interferencia constructiva (máximos) o dos de interferencia destructiva (mínimos), habrá una distancia:

$$d = \frac{\lambda}{2} \quad (15)$$

Al medir la distancia entre esos dos puntos se podrá calcular la longitud de onda. De esta forma, a partir del estudio de la interferencia de dos ondas estacionarias de igual amplitud y frecuencia se podrá obtener una medida de la velocidad del sonido, teniendo en cuenta que la frecuencia es conocida, obtener un cálculo de la velocidad del sonido a partir de:

$$v_s = f\lambda \quad (16)$$

Antes de comenzar es necesario tener en cuenta varias limitaciones. La distancia entre altavoces viene limitada por la longitud del cable de conexión, así mismo cuanto más separados estén mayor será la posibilidad de que el entorno interfiera en la toma de medidas. En este sentido, resulta importante ser cuidadoso a la hora de tomar las medidas, pues la propia presencia física de quien desplaza el teléfono puede generar cambios en la interferencia de la onda sonora. Estas limitaciones de distancia influyen en la frecuencia a la que se debe de generar el sonido, dado que resulta imprescindible trabajar en rangos que permitan observar máximos y mínimos de frecuencia dentro del espacio de separación entre altavoces. Debido a lo anterior, que lo recomendable es emplear frecuencias comprendidas entre 1500 -2000 Hz, que corresponderían con longitudes de onda del entorno de los 20 cm.



Imagen 33. Dispositivo experimental para el estudio de las interferencias sonoras.

Para la realización del experimento se ubicarán los altavoces a una distancia de 60 cm, y se hará uso de la opción “Espectro de Audio” de Phyphox (**Imagen 6** **Imagen 6**). Al desplazar el smartphone el pico de frecuencia aumentará o disminuirá su amplitud en función de en qué punto se encuentre. La distancia de los máximos y los mínimos vendrá dada por un metro cuya precisión es ± 0.5 cm y el punto de origen de la medida será uno de los altavoces. Para las medidas se tomarán dos frecuencias $f_1 = 1600$ Hz y $f_2 = 1800$ Hz, para cada caso se tomarán varias medidas de la posición del máximo y del mínimo para calcular posteriormente la longitud de onda correspondiente y, finalmente, obtener una medida de la velocidad del sonido según (16)

Tabla 6. Resultados de la medida de la longitud de onda y la frecuencia experimental de una interferencia sonora, las posiciones del máximo y mínimo se corresponden con el valor promedio de los datos medidos.

f_t/Hz	$\Delta d_{\text{max}}/\text{cm}$	λ/cm	$v_s/\frac{\text{m}}{\text{s}}$
1600	10.6	21.3	340.8
1800	9.7	19.3	347.4

Sabiendo que la velocidad del sonido a 20° es de $v_s = 341$ m/s los resultados de la **Tabla 6** concuerdan con lo esperado y el valor teórico encaja dentro de los resultados, sabiendo que Los errores son: $\Delta d_{\text{max}} = \pm 0.7$ cm, $\Delta \lambda = \pm 1.4$ cm y $\Delta v_s = \pm 30$ m/s . De esta manera se confirma que el montaje experimental permite un cálculo adecuado del valor de la velocidad del sonido y permite el estudio de las interferencias, algo que, en este caso, se añade a lo ocurrido en el apartado **3.2** donde se utilizó este fenómeno para explicar las anomalías presentes en las mediciones, comprobándose también la posibilidad de medir directamente la frecuencia de las ondas generadoras de la interferencia.

3.6. Reflexión del sonido para el cálculo de distancias: sonar.

Previamente se han realizado experimentos para el estudio de las propiedades ondulatorias del sonido, a los cuales pueden añadirse otros muchos en la misma línea o estudiando otros fenómenos que enmarcan las propiedades físicas de las ondas sonoras. Sin embargo, con ayuda del smartphone y de la aplicación Phyphox, también se pueden plantear experimentos que estudian uso práctico de las ondas sonoras y el conocimiento que de ellas se tiene. Un ejemplo sencillo del uso del sonido de forma práctica es el sonar, un mecanismo de detección de objetos y navegación que se utiliza a diario en la náutica que se planteará de forma casera para comprobar su funcionamiento. Cuando una onda sonora sobre un material que impide su propagación se refleja cambiando de dirección y de sentido de propagación.

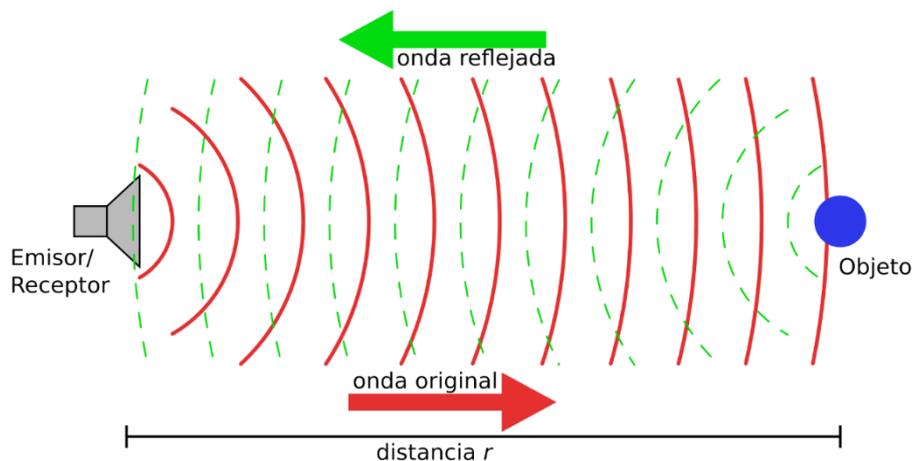


Imagen 34. Representación de la reflexión de las ondas sonoras al incidir sobre un objeto a distancia r [30]

Este principio de reflexión de las ondas es en el que se basan los radares (para ondas de radio) o el sónar (para ondas sonoras). Si el medio de propagación de la onda sonora no cambia, la velocidad de esta vendrá definida por la ecuación (16) y dependerá de la temperatura ambiente. Por lo tanto, se puede calcular la distancia entre el emisor y el objeto que refleja la onda:

$$d = \frac{v_s \cdot t}{2} \quad (17)$$

Donde v_s es la velocidad del sonido en el medio en que se propaga la onda y t el tiempo transcurrido desde que se emite la onda original y se recibe la onda reflejada, d es la distancia total que ha recorrido el sonido, que es el doble de aquella en la que se encuentra el objeto que refleja la onda sonora.



Imagen 35 Montaje experimental para el uso del dispositivo smartphone como s3nar.

Haciendo uso del apartado “S3nar” de Phypox se comprobar3 que el principio de reflexi3n de las ondas permite emplear el smartphone como un s3nar y, por lo tanto, medir distancias a objetos con 3l. Para el montaje del experimento (**Imagen 35**) ser3 necesario proteger al dispositivo de los ecos y reverberaciones del entorno, dado que tanto el sonido emitido como el reflejado viajar3 en todas direcciones interactuando con el entorno, por ello se utilizar3 un material que aten3e el sonido alrededor del smartphone dejando libre en la que se quieren tomar las medidas de distancia. Una vez ubicado el dispositivo que ejercer3 de emisor se dispondr3 un objeto que refleje el sonido que se ir3 ubicando a diferentes distancias, las cuales se medir3n con la ayuda de un metro.

Resulta de gran importancia elegir un objeto que refleje correctamente el sonido dado que en caso contrario no se obtendr3 ning3n resultado 3ptimo ser3 muy dif3cil distinguir la onda reflejada del ruido de fondo que provocan los ecos e interferencias del entorno. En este sentido, la mejor opci3n encontrada es hacer uso de una bandeja met3lica⁴. Una vez dispuesto el montaje es conveniente que quien lo maneje se sit3e de forma que interfiera lo menos posible con las ondas original y reflectada, para ello resulta muy pr3ctico activar la opci3n de “Ejecuci3n cronometrada”, que se encuentra dentro del panel de opciones (los tres puntos situados en vertical de la parte superior derecha de la pantalla de la aplicaci3n), que permiten activar y pausar la grabaci3n sin tener que interponerse en la emisi3n y recepci3n del sonido en ning3n momento.

⁴ La **Imagen 35** corresponde con uno de los materiales de prueba para encontrar el elemento reflector m3s adecuado. En este sentido, una pared o un objeto de madera no ofrecen resultados aceptables, como se comenta el mejor material que se ha encontrado en las pruebas es una bandeja met3lica.

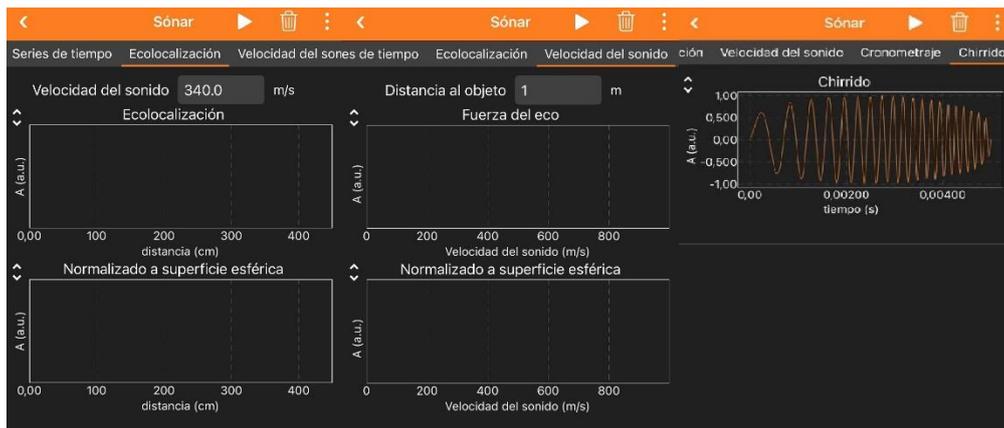
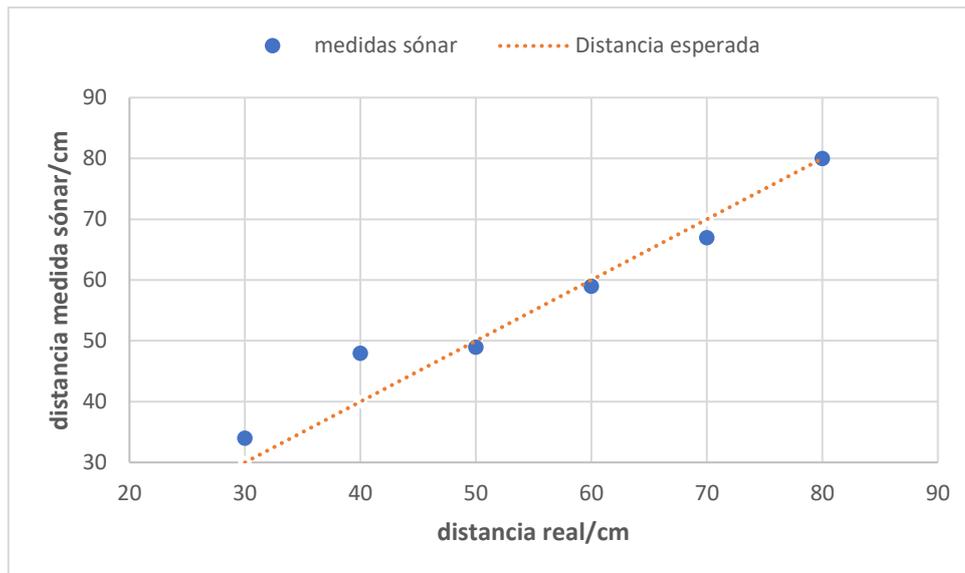


Imagen 36. Captura de pantalla de la aplicación Phyphox que muestra, las opciones del apartado "sonar". A la izquierda la interfaz para medir la ecolocalización, en el centro de la interfaz para medir la velocidad del sonido definiendo la distancia al objeto en la opción "velocidad del sonido", y a la derecha el tipo de sonido emitido "Chirrido"

El sonido emitido, denominado "chirrido" por la aplicación es un pulso emitido durante 5 ms y de frecuencia comprendida entre 1kHz y 4 kHz. La emisión de este pulso se repite 5 veces en un intervalo de 30 ms. Para obtener una medida de la distancia se hará uso de la pestaña "ecolocalización", la cual permite definir la velocidad del sonido, para que la aplicación haga los cálculos pertinentes, y devuelve dos graficas que mostrarán los picos correspondientes a los ecos recibidos. En este sentido, cuanto más se consiga reducir los posibles ecos y reverberaciones del entorno más clara será la medida. La misma aplicación permite, a través de otra pestaña, hacer la medición inversa, es decir, establecer la distancia a la que se encuentra el objeto para medir la velocidad del sonido a través del tiempo que tarda la señal en hacer el recorrido, tal y como se ve en la **Imagen 36**.

Tabla 7. Resultados obtenidos con Phyphox usando el apartado "sónar" donde se compara la distancia real a la que se encontraba el objeto con la distancia medida (d_m), a cada valor le acompaña su error estadístico.

Distancia real/cm	d_m/cm
30	34±2
40	48±9
50	49±9
60	59±5
70	67±4
80	80±4



*Imagen 37. Representación gráfica de los resultados de las distancias medidas por el s3nar de la **Tabla 7** (medidas s3nar) comparadas con los resultados esperados (recta "distancia esperada")*

En cada uno de los casos de los resultados de la **Tabla 7** se ha medido tambi3n la velocidad del sonido, pudiendo obtener un c3lculo final del promedio de los resultados de todas las distancias medidas resultados de $v_s = 353 \pm 18 \frac{m}{s}$.

Como se observa en la **Imagen 37** los resultados obtenidos mantienen la l3gica de la tendencia esperada (distancia esperada), aunque se ve una mejoría respecto a la distancia, cuanto m3s cerca est3 el objeto respecto al que se desea medir la distancia m3s se acerca al resultado real. Esto se debe a la presencia de "ruido" en la zona cercana a los 40 cm de distancia, debido a los ecos o la propia presencia del montaje experimental, dado que los materiales utilizados para reducir el impacto del entorno pueden no ser los mejores para ello. Por otro lado, la medida obtenida de la velocidad del sonido es perfectamente aceptable, aunque para poder tomarla con la aplicaci3n sea fundamental conocer de antemano la distancia con el objeto, dado que en caso contrario los valores obtenidos no tendr3n sentido. A pesar de los inconvenientes en las distancias pr3ximas y las precauciones que es necesario tomar para poder desarrollarlo, se trata de un experimento que es sencillo realizar de forma casera obteniendo resultados aceptables. El mayor inconveniente para poder realizar el experimento radica en la correcta elecci3n del material reflectante y del que se va a tomar medida de la distancia.

3.7. Otros posibles experimentos

Los experimentos anteriores son una muestra de los que se pueden realizar con un smartphone, pero no son los únicos. A lo largo del desarrollo de este trabajo se ha explorado la posibilidad de realizar otros experimentos, también interesantes, pero que descartaron bien por su complejidad en el montaje, bien por obtener resultados de difícil interpretación con el nivel básico de física al que están enfocados. En este sentido destacan tres posibles experimentos: estudio del efecto Doppler, medida de la velocidad del sonido en función de la temperatura y estudio de las propiedades mecánicas y acústicas de una barra.

Estudio del efecto Doppler.

Este experimento parece uno de los más básicos cuando se trata de estudiar los fenómenos acústicos y puede realizarse con ayuda de un smartphone [31]. En este sentido, el montaje consistiría en el uso de dos teléfonos móviles, se plantearía con uno de los teléfonos en reposo sobre un punto fijo (receptor) y otro emitiendo la frecuencia elegida suspendido por una cuerda o una varilla oscilando como un péndulo por encima del primero. La gran problemática en este experimento residiría en la medida de la velocidad angular del emisor, lo cual se soluciona fácilmente haciendo uso de los sensores del teléfono, concretamente del acelerómetro y del giroscopio. En este sentido, la aplicación Phyphox permite la medida de la velocidad angular del dispositivo en tiempo real para cada eje tridimensional de coordenadas. Sin embargo, a la hora de desarrollar el montaje experimental de forma casera resulta complejo encontrar una forma de conseguir un movimiento pendular estable y que se circunscriba a dos dimensiones, dado que tanto los materiales disponibles para sujetar el teléfono como el peso de este hace que se desvíe sobre la vertical, lo cual provoca, en último término, que los cálculos posteriores sean más complejos al disponer de tres componentes distintas de la velocidad angular (en los tres ejes x , y , z). Dado que lo que se pretendía era replicar experimentos de forma casera y sencilla se descartó este al no poder encontrar con las herramientas disponibles un montaje aceptable para cumplir con estas características.

Medida de la velocidad del sonido respecto a la temperatura.

Es experimento puede realizarse teniendo en cuenta el comportamiento de las ondas estacionarias en un tubo cerrado responde al mismo caso que uno abierto por los dos extremos,

cuya explicación se encuentra en el apartado **3.3**, por lo que midiendo las frecuencias de resonancia, que cumplirán la relación mostrada en la ecuación **(8)**, se puede hacer un cálculo de la velocidad del sonido. Este resultado se puede enfrentar al cálculo de la velocidad del sonido respecto de la temperatura [32], la cual podría conocerse mediante un termómetro digital o inversamente, podría compararse la temperatura medida con la obtenida mediante la velocidad calculada en el tubo.

Este experimento se descartó debido dos cuestiones principales: al trabajar con materiales caseros resultaba complicado encontrar un tubo que reuniera las condiciones para llevar adelante el montaje sin que se produjeran grandes pérdidas de temperatura a la hora de hacer las medidas, e igualmente la diferencia de temperaturas que podría alcanzarse con estas herramientas era demasiado pequeña como para poder obtener unos resultados óptimos que permitieran comprobar la variación de la velocidad del sonido respecto a la temperatura de manera clara.

Propiedades acústicas y mecánicas de una barra

Utilizando una varilla de longitud L y anclada por uno de sus extremos, al accionar perpendicularmente el extremo libre de la misma, esta empezará a vibrar. Estas oscilaciones de carácter transversal se trasladarán por toda la barra y midiendo su frecuencia de vibración se puede obtener una medida de la velocidad del sonido [33] y a partir de ella calcular también la densidad de esta. El experimento se puede realizar sujetando una varilla mediante un sargento a una longitud L y haciéndola vibrar. Una vez tomadas las medidas y teniendo en cuenta que el material se conoce, y por lo tanto también el módulo de Young, se puede calcular la velocidad del sonido en la varilla y su densidad.

El experimento no requiere una gran complejidad de materiales y su montaje resulta relativamente sencillo, sin embargo, al ponerlo en práctica el dispositivo móvil no fue capaz de tomar ninguna medida, dado que el sonido emitido por la vibración era prácticamente imperceptible a pesar de probar diferentes montajes para intentar ampliarlo. Probablemente, una barra de un material más duro al utilizado o de mayor grosor (se emplearon barras cilíndricas de aluminio de 1 mm de diámetro) facilitarían que el sonido emitido por la vibración fuera de mayor intensidad y, por tanto, la toma de medidas. Debido lo anteriormente explicado este experimento se descartó.

4. Conclusiones

En el desarrollo del presente trabajo se ha estudiado la posibilidad de utilizar dispositivos smartphones como alternativa para llevar a cabo, de forma casera y sin el uso de un laboratorio y sus herramientas, experimentos relacionados con ondas de sonido. Comprobando que, a través de la realización de sencillos montajes experimentales, alumnos de bachillerato o de primeros cursos del grado de física pueden confirmar las propiedades ondulatorias del sonido e ilustrar conceptos de ondas mediante estos dispositivos completamente extendidos hoy en día.

Se ha comparado el impacto de utilizar dispositivos de diferente gama y sistema operativo, utilizando un iPhone 12, un modelo que podemos catalogar como de alta gama y de sistema operativo iOS™, con un Lenovo B (A2016b40), un móvil de gama baja y de sistema operativo Android™, concluyendo que dentro de los rangos de frecuencias en los que se han desarrollado los experimentos no existe diferencia en la calidad de los resultados entre uno y otro.

De igual manera, se ha hecho un estudio de aplicaciones disponibles para su uso en los diferentes experimentos, comprobando que la que mejor se adaptaba a las necesidades de este trabajo era la aplicación Phyphox, expresamente diseñada para la realización de experimentos de física con smartphones, compatible con ambos sistemas operativos y que permite extraer los resultados en formato Excel para su posterior tratamiento.

Se han realizado diversos experimentos relacionados con la naturaleza ondulatoria del sonido, entre los que destacan el fenómeno del batido en superposición de ondas, las interferencias sonoras, midiendo los puntos en los que estas se encuentra en fase o en oposición de fase, o la resonancia de ondas estacionarias en tubos. Con ellos se pueden ilustrar distintos fenómenos, aunque también se han encontrado diversas limitaciones experimentales para su realización en estas condiciones. Los resultados de los experimentos realizados concuerdan con lo esperado, pudiendo comprobar las propiedades ondulatorias del sonido, aunque habiendo encontrado ciertas limitaciones derivadas de los montajes en el caso de la relación de la intensidad de la señal con la distancia y del estudio del fenómeno de la resonancia en tubos.

En cuanto a la medida de la intensidad frente a la distancia, a pesar de haber realizado el experimento en un espacio amplio, se comprobó una anomalía provocada por una interferencia debida a un eco del entorno, la cual se ha podido medir y determinar como tal, sugiriendo que

la realización de este experimento conlleva, a pesar de las precauciones, inherente este tipo de sucesos.

En el caso de la resonancia en tubos se ha comprobado que el experimento se puede reproducir sencillamente para el caso de un tubo abierto por ambos extremos, mientras que en el caso de uno semi cerrado puede detectarse la presencia de armónicos pertenecientes al caso abierto, pero de menor intensidad, lo cual lleva a considerar que no se consigue reproducir, de forma completamente satisfactoria, la situación de un tubo cerrado por un extremo.

Se ha desarrollado también el experimento de comprobar la reflexión de las ondas como medio para medir distancias utilizando el smartphone a modo de sónar, algo que se prueba mediante la aplicación Phyphox y el fenómeno del eco, siendo un experimento altamente dependiente de la superficie escogida para reflejar el sonido.

También se ha probado a realizar otros experimentos como la demostración del efecto Doppler, medir la variación de la velocidad del sonido frente a la temperatura o el estudio de las propiedades acústicas y mecánicas de una barra.

Con todo, se comprueba que este tipo de herramientas pueden ser una alternativa accesible para la realización de experimentos sencillos que demuestren conceptos básicos de la física sin la necesidad de utilizar un laboratorio, desempeñando un papel en la formación de alumnos de bachiller y primeros cursos del grado de física y siendo un complemento para su formación.

5. Bibliografía

- [1] S. Fraile Lobato, «Uso de los teléfonos inteligentes para la realización de prácticas de laboratorio fuera del centro educativo [TFM, Máster en profesor de Educación Secundaria Obligatoria y Bachillerato, Formación Profesional y Enseñanzas de Idiomas, Universidad de Valladolid]».
- [2] S. Gil, J. Luis, y D. Laccio, «Smartphone una herramienta de laboratorio y aprendizaje: laboratorios de bajo costo para el aprendizaje de las ciencias», 2017. [En línea]. Disponible en: <http://www.lajpe.org>
- [3] M. Á. González y M. Á. González, «El laboratorio en el bolsillo: Aprendiendo física con tu smartphone».
- [4] Elsevier B.V., «ScienceDirect ». <https://www.sciencedirect.com/> (accedido 2 de febrero de 2023).

- [5] P. Klein, M. Hirth, S. GrÖber, J. Kuhn, y A. Müller, «Classical experiments revisited: Smartphones and tablet PCs as experimental tools in acoustics and optics», *Phys Educ*, vol. 49, n.º 4, pp. 412-418, 2014, doi: 10.1088/0031-9120/49/4/412.
- [6] J. Lorenzo Ramírez, «Experimentación en Física con dispositivos móviles». Accedido: 2 de febrero de 2023. Licencia bajo BY CC 3.0 [En línea]. Disponible en: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://experimentacioliure.files.wordpress.com/2020/05/exfidismo-2019-3.pdf>
- [7] G. M. S. Ross *et al.*, «Best practices and current implementation of emerging smartphone-based (bio)sensors – Part 1: Data handling and ethics», *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, vol. 158. Elsevier B.V., 1 de enero de 2023. doi: 10.1016/j.trac.2022.116863.
- [8] P. Vogt y J. Kuhn, «Analyzing radial acceleration with a smartphone acceleration sensor», *Phys Teach*, vol. 51, n.º 3, pp. 182-183, mar. 2013, doi: 10.1119/1.4792021.
- [9] B. M. Faber, «Acoustical Measurements with Smartphones: Possibilities and Limitations», 2017.
- [10] L. Sahara, «Studies The Use Of Smartphone Sensor For Physics Learning Suritno Fayanto SMA TQ-Mu'adz Bin Jabal Kendari», 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/336760410>
- [11] RaspberryWood LLC, «Spectrum Analyzer», *Google Play*, 8 de noviembre de 2012. <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.raspw.SpectrumAnalyze> (accedido 22 de enero de 2023).
- [12] Sinusoid Pty Ltd, «Audio Kit», *App Store (Apple Inc.)*, 6 de abril de 2020. <https://apps.apple.com/us/app/audio-kit/id376965050> (accedido 2 de febrero de 2023).
- [13] J. Kuhn y P. Vogt, «Analyzing acoustic phenomena with a smartphone microphone», *Phys Teach*, vol. 51, n.º 2, pp. 118-119, feb. 2013, doi: 10.1119/1.4775539.
- [14] L. SkyPaw Co., «Decibel X: dBa Sonómetro Pro», *Google Play*, 26 de junio de 2014. <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.skypaw.decibel&hl=es&gl=US> (accedido 22 de enero de 2023).
- [15] Oxford Wave Research Ltd., «SpectrumView», *App Store (Apple Inc)*, 2011. <https://apps.apple.com/us/app/spectrumview/id472662922> (accedido 2 de febrero de 2023).
- [16] Rikki Systems Inc., «Sonic Tools SVM », *App Store (Apple Inc.)*, 2018. <https://apps.apple.com/us/app/sonic-tools-svm/id1245046029> (accedido 2 de febrero de 2023).
- [17] Vieyra Software, «Physics Toolbox Sensor Suite», *Google Play*, 2014. <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.chrystianvieyra.physicstoolboxsuite&hl=en&gl=US> (accedido 2 de febrero de 2023).
- [18] Institute of Physics of the RWTH Aachen University, «Phyphox», 2016. <https://phyphox.org/> (accedido 22 de enero de 2023).

- [19] onlinetonegenerator.com, «Online Tone Generator», 2011.
<https://onlinetonegenerator.com/> (accedido 2 de febrero de 2023).
- [20] Apple Inc., «Iphone 12 [Manual de usuario]». <https://support.apple.com/es-us/guide/iphone/iphae3a2eb71/ios> (accedido 27 de enero de 2023).
- [21] Lenovo, «Guía de inicio rápido».
- [22] Wolfram Research Inc, «Wolfram MathWorld - Fast Fourier Transform». <https://mathworld.wolfram.com/FastFourierTransform.html> (accedido 4 de febrero de 2023).
- [23] Keuwlsoft, «Function Generator», *Google Play*, 2014.
<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.keuwl.functiongenerator&hl=en&gl=US> (accedido 4 de febrero de 2023).
- [24] Thomas Gruber, «Audio Function Generator», *App Store (Apple Inc.)*, 2020.
<https://apps.apple.com/us/app/audio-function-generator/id768229610> (accedido 4 de febrero de 2023).
- [25] P. Perov, W. Johnson, y N. Perova-Mello, «The physics of guitar string vibrations», *Am J Phys*, vol. 84, n.º 1, pp. 38-43, ene. 2016, doi: 10.1119/1.4935088.
- [26] J. Kuhn, P. Vogt, y M. Hirth, «Analyzing the acoustic beat with mobile devices», *Phys Teach*, vol. 52, n.º 4, pp. 248-249, abr. 2014, doi: 10.1119/1.4868948.
- [27] M. H. Giménez, I. Salinas, J. C. Castro-Palacio, J. A. Gómez-Tejedor, y J. A. Monsoriu, «Visualizing acoustical beats with a smartphones», may 2016, [En línea]. Disponible en: <http://arxiv.org/abs/1605.01370>
- [28] I. M. Ramírez, M. I. Maximiliano, L. de Arriaga, y P. México, «INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA “DISEÑO DE CAJAS ACÚSTICAS” ALEJANDRO ANGEL VELARDE VALENCIA».
- [29] J. Molina-Coronell, W. Celin Mancera, y C. Solano Mazo, «Analizando ondas estacionarias en tubos abiertos y cerrados con el uso de smartphone», 2017.
- [30] G. Wiora y I. Icke, «Principle of a sonar or radar distance measurement», *Wikipedia, La enciclopedia libre.*, 3 de octubre de 2005.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sonar_Principle_ES.svg (accedido 27 de enero de 2023).
- [31] J. L. di Laccio, G. Vitale, R. Alonso-Suárez, N. Pérez, y S. Gil, «Estudio del efecto Doppler utilizando teléfonos inteligentes», *Revista Eureka*, vol. 14, n.º 3, pp. 637-646, sep. 2017, doi: 10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2017.v14.i3.09.
- [32] S. O. Parolin y G. Pezzi, «Smartphone-aided measurements of the speed of sound in different gaseous mixtures», *Phys Teach*, vol. 51, n.º 8, pp. 508-509, nov. 2013, doi: 10.1119/1.4824957.
- [33] M. González y M. González, «Smartphones as experimental tools to measure acoustical and mechanical properties of vibrating rods», *Eur J Phys*, vol. 37, n.º 4, abr. 2016, doi: 10.1088/0143-0807/37/4/045701.