



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

**Diseño de un kit docente para el estudio
experimental de las ondas sonoras**

Autor:

Manso Gil, Javier

Tutores:

**Martínez Sacristán, Oscar
González Rebollo, Miguel Ángel
(Física de la Materia Condensada)**

Valladolid, Septiembre de 2015

Agradecimientos

Me gustaría agradecer fundamentalmente a mis padres el esfuerzo, el trabajo y la dedicación que han tenido para darnos, tanto a mí como a mi hermano, unos estudios universitarios que nos permitan forjarnos un futuro y una educación basada en el trabajo, la humildad y el respeto. Gracias a ellos y a su apoyo incondicional en todas las etapas de mi vida, pero sobre todo en esta última, estoy a día de hoy presentando este proyecto como culmen a este periodo universitario.

Quiero acordarme también de mis amigos, tanto de los que ya tenía como de los que he ido conociendo estos años, que en esta etapa de mi vida me han hecho desconectar del trabajo y esfuerzo universitario, pasando inolvidables momentos juntos.

Por último y no menos importante, agradecer, como no, el valioso tiempo, ayuda y ánimos prestados por mis tutores (Oscar Martínez Sacristán y Miguel Ángel González Rebollo), así como a todos los profesores que he tenido en estos años que han intentado inculcarme algunos de los conocimientos que me pueden ser útiles en mi vida profesional.

Resumen

Los laboratorios de prácticas resultan imprescindibles para una enseñanza de calidad en el ámbito de las ingenierías. No obstante, su coste y la obsolescencia de los equipos dificultan disponer de laboratorios de prácticas actualizados y bien equipados. Sin embargo las TICs resultan una herramienta muy útil para desarrollar un laboratorio de prácticas bien equipadas y de bajo coste. La utilización de sensores como acelerómetros, termómetros, giróscopos, magnetómetros, micrófonos, etc., con los que vienen equipados los smartphones, permiten su empleo para el diseño y montaje de diferentes prácticas docentes. En este proyecto se pretende desarrollar un kit docente de bajo coste que contenga todos los elementos necesarios para el estudio de las propiedades más importantes de las ondas sonoras. El kit contendrá el material necesario, así como el software y el hardware para la captura de los datos y los guiones de las diferentes experiencias.

Palabras clave: kit docente, prácticas, bajo coste, sonido, Audia.

Abstract

The laboratories of practices turn out to be indispensable for a quality education in the area of the engineering. However, cost and obsolescence of equipment difficult laboratory of practices have updated and well-equipped. But ICTs are a useful tool for developing a well-equipped laboratory practices and low cost. The use of sensors such as accelerometers, thermometers, gyroscopes, magnetometers, microphones, etc., with that the smartphones come equipped, allowing its use for the design and assembly of different teaching practices. In this project we try to develop an educational low-cost kit of that contains all the necessary elements for the study of the most important properties of sound waves. The kit will contain the necessary material, as well as the software and the hardware for data capture and the scripts of the different experiences.

Keywords: educational kit, practises, low-cost, sound, Audia.

ÍNDICE

Capítulo 1: Introducción y objetivos	9
1.1 Uso de smartphones para la realización de experiencias de física...	11
1.2 Objetivos	15
Capítulo 2: Nociones sobre acústica	17
2.1 Cualidades del sonido.....	19
2.2 Fenómenos de propagación	21
Capítulo 3: Herramienta Audia	23
3.1 Grabadora de sonido	28
3.2 Interferencias y difracción	30
3.3 Calibración de la intensidad sonora.....	31
Capítulo 4: Diseño de las prácticas y del kit docente de bajo coste.....	33
4.1 Objetivos	34
4.2 Vibraciones transversales de una varilla metálica flexible	35
4.2.1 Objetivos de la experiencia	35
4.2.2 Descripción teórica: modos de vibración transversales de una varilla flexible	35
4.2.3 Material a utilizar en el desarrollo de la práctica.....	38
4.2.4 Descripción del montaje experimental	40
4.2.5 Resultados: comparativa teoría - experiencia.....	42
4.2.6 Conclusiones.....	54
4.3 Absorción del sonido por los materiales: coeficiente de absorción .	56
4.3.1 Objetivos de la experiencia	56
4.3.2 Descripción teórica: atenuación del sonido por materiales	56
4.3.3 Material a utilizar en el desarrollo de la práctica.....	60

4.3.4 Descripción del montaje experimental	63
4.3.5 Resultados experimentales obtenidos	66
4.3.6 Conclusiones.....	72
4.4 Cálculo del coeficiente de restitución entre diferentes pelotas y el suelo	74
4.4.1 Objetivos de la experiencia	74
4.4.2 Descripción teórica	74
4.4.2.1 Coeficiente de restitución en choques	74
4.4.2.2 Caída libre de una pelota y choques sucesivos con el suelo	75
4.4.2.3 Determinación del valor de la gravedad	80
4.4.3 Material a utilizar en el desarrollo de la práctica.....	81
4.4.4 Descripción del montaje experimental	82
4.4.5 Resultados experimentales obtenidos	84
4.4.6 Conclusiones.....	90
 Capítulo 5: Estudio económico de los elementos que componen el kit de bajo coste	 93
5.1 Composición del kit	94
5.2 Análisis del coste en materiales.....	97
 Capítulo 6: Conclusiones.....	 99
 Capítulo 7: Posibles líneas futuras	 103
 Capítulo 8: Bibliografía	 107
 Anexo I: Guiones de las prácticas	 111
 Anexo II: Publicación docente: “Doing Physics Experiments and Learning with Smartphones”	 141

Capítulo 1

Introducción y objetivos

En este trabajo Fin de Grado se pretende diseñar un kit docente de bajo coste mediante el uso de dispositivos smartphones, de fácil acceso para la mayoría de los estudiantes en la actualidad. En concreto, se hará uso de una aplicación (app) ya existente, desarrollada en un TFG previo de la Universidad de Valladolid [1], denominada Audia, que permite realizar distintos experimentos de Física en el campo de las ondas sonoras.

Si bien la aplicación Audia permite la realización de experimentos en el campo de la acústica, se trata más bien de una herramienta que de una propuesta concreta de prácticas de física. Este TFG pretende justamente hacer uso de esta herramienta proponiendo experimentos sencillos y bien detallados en el campo de las ondas sonoras. Más en concreto, nos hemos decidido finalmente por experiencias que permitan obtener y estén relacionadas con algunas características interesantes en el campo de las propiedades de los materiales.

En concreto, se proponen tres experiencias: i) vibración de varillas; ii) absorción del sonido por los materiales; iii) determinación del coeficiente de restitución en choque de una pelota con el suelo. En los tres casos, las propiedades del material (módulo de Young, densidad volúmica, coeficiente de absorción y coeficiente de restitución) juegan un papel fundamental y determinan los resultados de las experiencias.

Para la elaboración y comprensión de este trabajo es necesario tener una serie de conocimientos básicos sobre el sonido y sobre la aplicación Audia, que se explicarán más adelante, dedicándolos un capítulo a cada uno debido a la importancia de éstos, capítulos 2 y 3 respectivamente, pero también es necesario comprender las consecuencias que tiene, en la realización de experiencias prácticas, el uso del material que ya tienen en posesión los propios alumnos, incluidos los dispositivos móviles y que se explica a continuación en el apartado 1.1.

Antes de tratar de comprender el contenido de un proyecto de investigación, hay que tener muy en cuenta que objetivos se persiguen para, posteriormente en las conclusiones finales del proyecto poder hacer una valoración objetiva acerca de la consecución o no de estos objetivos razonando tanto en casos positivos como en negativos. Los objetivos iniciales relativos a este Trabajo Fin de Grado quedan expuestos en el apartado 1.2.

1.1 Uso de smartphones para la realización de experiencias de física

La rápida y constante evolución de la tecnología está creando nuevas oportunidades y retos en el ámbito educativo. Para muchos jóvenes, los dispositivos móviles ya forman una parte integral de sus vidas diarias, lo cual podemos aprovechar para beneficiarnos del potencial que nos puede proporcionar con el objetivo de mejorar la experiencia de aprendizaje de los alumnos, sirviéndonos de la tecnología como apoyo.

La situación actual de la cantidad de estudiantes que disponen de móvil nos indica que existen amplias posibilidades para su aprovechamiento. Según el Instituto Nacional de Estadística, la disponibilidad de teléfonos móviles en España durante el año 2014 se incrementa significativamente en edades jóvenes, pasando del 64.3% a los 12 años al 90.3% a los 15 años (INE, 2015), que son edades muy representativas de la educación secundaria. Además, el uso del móvil se ve potenciado con disponibilidad de internet para poder acceder a recursos online o descargar aplicaciones. De acuerdo con los datos oficiales del Ministerio, en el curso 2012-2013, el 97.1% de los centros de Educación Secundaria y Formación Profesional contaban con banda ancha de conexión a internet, lo cual supone un considerable aumento desde el 88.1% en el curso 2007-2008 (MECD, 2014). Por lo tanto, podemos afirmar que el uso del móvil con acceso a internet en el aula es una posibilidad real en la vasta mayoría de los centros en este país en la actualidad.

Según el Horizon Repot de 2015, que analiza el panorama de las tecnologías emergentes para la enseñanza, aprendizaje y creatividad en una iniciativa de ámbito mundial, los dos desarrollos que se prevé que van a tener un mayor impacto en la innovación educativa a corto plazo son conocidos como Bring Your Own Device (BYOD, trae tu propio dispositivo), en ocasiones conocido como Bring Your Own Technology (BYOT, trae tu propia tecnología). Nuestro trabajo se contextualiza dentro de ambos conceptos.

BYOD, término acuñado por Intel en 2009 que hace referencia a la práctica de que la gente decida llevar sus propios dispositivos (generalmente portátil, tablet o móvil) a su lugar de trabajo. En el caso de la educación, hemos visto cómo gran parte de estudiantes llevan su propio dispositivo móvil y puede conectarlo a la red del centro. Al tratarse de dispositivos móviles personales, existen ciertas ventajas en un contexto educativo, como son las siguientes [2]:

- Aumento de la productividad personal. Al usar dispositivos personales, cada estudiante ha invertido cierto tiempo en configurarlo según sus gustos personales de la forma en la que le resulta más eficiente acceder a la información, por lo que la fase de aprendizaje del manejo del

dispositivo se reduce al mínimo, haciendo su manejo mucho más fluido que si se tratase de otro dispositivo.

- Difumina las barreras entre el aprendizaje formal e informal. Los estudiantes generalmente pueden acceder a los recursos educativos desde cualquier lugar y en cualquier momento, permitiéndoles mezclar sus intereses personales con elementos de ese aprendizaje cuando surja alguna relación. De esta forma, el aprendizaje mediante el móvil se adentra por igual en dos dimensiones fundamentales como son la intencionalidad (con o sin intención previa) y el contexto (formal e informal), al permitir la comunicación con compañeros y poder ser usados en toda clase de situaciones y lugares (Berth, 2006).
- Fomenta el aprendizaje social. El uso de móviles personales puede promover la construcción colaborativa de conocimiento mediante estructuras interactivas y participativas que sirvan como apoyo al aprendizaje (Lewis et al., 2010). Para esto existen multitud de sistemas de comunicación y herramientas de edición colaborativa y compartición de contenidos digitales que permiten a los compañeros de trabajo interactuar sin necesidad de presencia física, al igual que con el profesor.
- Fomenta el “aprender haciendo”. Las posibilidades que ofrecen las aplicaciones móviles de visualizar y crear contenidos sumadas a las características inherentemente participativas de la Web 2.0, fomenta en gran medida la creación práctica mediante la cual los estudiantes pueden experimentar el objeto de aprendizaje de un modo interactivo y generar así conocimiento significativo (Bareiss et al., 2011).
- Reduce costes de una manera sostenible. Frente a alternativas en las que los centros proporcionan dispositivos a los estudiantes, la posibilidad de usar modelo BYOD supone un coste mucho más reducido, ya que aprovecha los propios móviles que los alumnos ya llevan a clase. Además, en el caso de asignaturas de la rama científico-tecnológica, donde se trabaja con experiencias físicas, la posibilidad de utilizar los sensores del móvil para llevar a cabo actividades hace innecesario el uso de cierto material de laboratorio, abaratando costes al sustituir a equipación tradicional más cara.
- Además, aumenta la atención y la motivación, facilita la comprensión, aumenta el acceso a recursos para comentar y compartir entre el alumnado y/o el profesorado, facilita la enseñanza, el aprendizaje y el logro de los objetivos, aumenta la participación y la implicación del

alumnado, facilita la contextualización de las actividades y la gestión de la diversidad.

- También, se recogen valoraciones positivas sobre actividades que se realizan con un rol más activo del estudiante. Las actividades más destacadas son: investigar, desarrollar la creatividad, efectuar correcciones colectivas, realizar actividades colaborativas.
- Además, el profesorado valora ciertas ventajas que inciden directamente sobre el mismo profesorado: facilita su renovación metodológica, aumenta su satisfacción, su motivación y su autoestima. En menor medida, con porcentajes de valoración baja, el profesorado manifiesta que facilita la evaluación continua y la realización de las exposiciones. En cambio, no se posiciona sobre si se aprovecha más el tiempo en clase ni sobre si potencia la reflexión y el razonamiento [3].

Desde un punto de vista tecnológico, BYOD también trae nuevos retos que han de ser afrontados. Debido a los rápidos cambios de hardware y software, no siempre es fácil disponer de entornos de aprendizaje que se puedan usar en cualquier dispositivo (Alberta Government, 2014). Esto requiere cierta actualización constante por parte del profesorado para estar al tanto de las nuevas aplicaciones y entornos que surjan, y su posibilidad de uso con la diversidad de dispositivos que pueden tener sus alumnos (en la actualidad las dos plataformas predominantes son Android e iOS, con una cuota de mercado en España del 88.6% y 8.9% respectivamente, dejando un 3.7% para otras plataformas encabezadas por Windows, según datos de abril de 2015 proporcionados por Kantar Worldpanel). Éste es el motivo por el que las aplicaciones que mencionamos en este trabajo representan el estado actual de las principales posibilidades existentes, pero es recomendable analizar en cada momento las aplicaciones más apropiadas que se puedan encontrar y que ofrezcan la funcionalidad deseada.

Tradicionalmente, sería necesario equipo de laboratorio, contando con un número de dispositivos reducido para toda la clase y no existía la posibilidad de experimentar fuera del aula. Sin embargo, los móviles permiten que se puedan realizar experiencias individuales o colaborativamente en grupos del tamaño que el profesor considere oportuno, y que los alumnos puedan continuar la experimentación donde prefieran. Esto les proporciona una forma de observar y medir el mundo que les rodea de una forma mucho más intuitiva y constructivista,

además de percibir el móvil como una herramienta de trabajo y aprendizaje, y promover una desmitificación del funcionamiento de la tecnología.

En este trabajo vamos a proponer actividades basadas en BYOD, donde los diferentes aspectos que hemos comentado se ven reflejado. Las actividades parten de la rama científico-tecnológica, concretamente del estudio del sonido, e involucramos otras ramas de forma multidisciplinar. Estas actividades utilizan las herramientas que posee cualquier Smartphone, de forma que les resulte cómodo desenvolverse en un entorno familiar, puedan llevarlas a cabo donde y cuando quieran, aprendan haciendo y experimentando a su propio ritmo, y lo puedan hacer con una componente social utilizando las herramientas disponibles para ello sin necesidad de usar otra máquina más que su dispositivo móvil personal. Las actividades que proponemos están diseñadas para ser utilizadas en centros de educación de diferentes niveles españoles, donde tanto el currículo como las circunstancias económicas han sido tenidos en cuenta. Cada actividad involucra un móvil y una pequeña adquisición de material que en muchos casos suele ser material común fácilmente disponible para cualquier persona, que se ha ajustado a un presupuesto muy razonable, utilizando las TICs de una manera sostenible.

En las siguientes secciones detallamos tales actividades. La primera actividad (capítulo 4.2) consiste en el estudio de vibraciones transversales en una varilla metálica flexible. En la segunda actividad (capítulo 4.3) estudiamos la absorción de sonido por diferentes materiales, basándonos en la determinación del coeficiente de absorción. En la última experiencia (capítulo 4.4) se desarrolla un procedimiento para el cálculo del coeficiente de restitución en choques de diferentes pelotas contra el suelo, incluyendo un cambio de superficie de choque, variación en las temperaturas de las pelotas de impacto y un procedimiento para el cálculo de la aceleración de la gravedad a partir de los tres primeros botes de una pelota. Antes de ello, vamos a detallar los objetivos que pretendemos alcanzar con este trabajo.

1.2 Objetivos

El principal objetivo de este trabajo consiste en la elaboración de un kit docente de bajo coste y de fácil acceso basado en la aplicación Audia para el estudio de las ondas sonoras, así como de una serie de experiencias susceptibles de ser realizadas con este material. Para ello se ha llevado a cabo una ardua labor de investigación centrada en la búsqueda de experiencias que se puedan realizar con herramientas “BYOT y BYOD” o con un bajo coste del material que no se posea.

En este contexto se plantea diseñar actividades prácticas que puedan ser realizadas dentro y fuera de un laboratorio clásico de prácticas, utilizando Smartphones como dispositivo de captura, visualización y pretratamiento de datos. Para ello es preciso utilizar la aplicación Audia, fruto de un proyecto fin de carrera de la Universidad de Valladolid.

Objetivos secundarios:

- Explorar las posibilidades de la aplicación Audia para así poder seleccionar una serie de experiencias que siendo ergonómicamente realizables tengan el mayor valor didáctico posible.
- Orientar cada una de las experiencias hacia el uso de materiales que sean de fácil acceso para cualquier persona evitando el uso de laboratorios con herramientas especializadas de elevado costo.
- Fomentar el aprendizaje elaborando los propios montajes de cada experiencia. Las posibilidades que ofrecen las aplicaciones móviles de visualizar y crear contenidos fomenta en gran medida la creación práctica mediante la cual los estudiantes pueden experimentar el objeto de aprendizaje de un modo interactivo y generar así conocimiento significativo.
- Reducir costes de una manera considerable. Frente a alternativas en las que los centros proporcionan dispositivos a los estudiantes, la elaboración de experiencias usando los propios Smartphone de los alumnos supone un coste mucho más reducido, ya que aprovecha los propios móviles que los alumnos ya llevan a clase. La posibilidad de utilizar las características del móvil para llevar a cabo actividades hace innecesario el uso de cierto material de laboratorio, abaratando costes al sustituir a equipación tradicional más cara.

- Fomento de la formación práctica (visual) necesaria para complementar en muchos casos a la formación teórica llegando a una mayor comprensión de los contenidos por parte del alumnado.
- No se puede dar por hecho que todos los alumnos disponen de internet móvil y van a tener acceso a recursos online en todo momento. Por este motivo resulta conveniente que los contenidos sean descargables e intentar que no sea obligatorio el acceso a internet con mucha frecuencia. En nuestro caso, proponemos actividades en las que no es necesario internet más que para enviar la información recopilada para un posterior tratamiento de datos

Capítulo 2

Nociones sobre acústica

Con este apartado se pretende dejar claros ciertos conceptos básicos sobre acústica que nos ayuden a comprender mejor este trabajo.

La física del sonido es estudiada por la acústica, que trata tanto de la propagación de las ondas sonoras en los diferentes tipos de medios continuos como de la interacción de estas ondas con los cuerpos físicos.

La acústica es la parte de la física que estudia los fenómenos asociados con las ondas sonoras. Las ondas sonoras son ondas elásticas longitudinales que se propagan en los medios materiales sólidos, líquidos o gases y que producen la sensación sonora cuando son recibidas por el oído. Esto es, aunque el intervalo de frecuencias dentro del cual se pueden producir las ondas elásticas longitudinales en los medios materiales muy amplio, las ondas sonoras están restringidas a la gama de frecuencias que pueden excitar el oído y el cerebro para originar la sensación sonora. Estos límites son aproximadamente de 20 Hz a 20 KHz y constituyen los límites de la audibilidad (si se cumplen ciertas condiciones de intensidad). Las ondas sonoras cuyas frecuencias sean inferiores a 20 Hz o superiores a 20 KHz no son audibles y se denominan ondas infrasónicas y ultrasónicas, respectivamente [4]. El Hertz (Hz) es una unidad de frecuencia que corresponde a un ciclo por segundo. Las ondas sonoras más sencillas son las senoidales, las cuales tienen la frecuencia f , la amplitud de desplazamiento A y la longitud de onda λ completamente especificadas.

La frecuencia de una onda sonora es el factor primordial que determina el tono de un sonido, la cualidad que nos permite clasificarlo como agudo o grave. La frecuencia de una onda sonora se define como el número de pulsaciones (ciclos) que tiene por unidad de tiempo (segundo) [5]. La unidad correspondiente a un ciclo por segundo es el hertzio (Hz). Cuánto más alta sea la frecuencia de un sonido (dentro de la gama audible), más agudo será el tono percibido. La amplitud de presión también ayuda a determinar el tono. Cuando un receptor compara dos ondas sonoras senoidales con la misma frecuencia pero diferente amplitud de presión, aquella con mayor amplitud suele percibirse como más fuerte pero también un poco más grave.

2.1 Cualidades del sonido

El sonido, al ser inmaterial, no se puede describir con los adjetivos comúnmente usados para definir objetos materiales, por lo que se usan los siguientes: intensidad, altura o tono, duración y timbre [6].

La intensidad es la cualidad del sonido que nos permite identificar los sonidos como fuertes o suaves, es pues la fuerza o volumen del sonido. Depende del cuadrado de la amplitud de la onda (vibración), a mayor amplitud, más fuerte suena el sonido [7].

La intensidad sonora es el flujo de energía sonora que atraviesa la superficie en la unidad de tiempo. Subjetivamente es la que nos hace distinguir sonidos fuertes y débiles (sonoridad). La intensidad máxima para el oído humano es de 100 w/m^2 y la mínima de 10^{-12} w/m^2 . Sus unidades son w/m^2 , db, pascal.

Nivel de intensidad sonora: Nuestra percepción de la intensidad del sonido es, aproximadamente logarítmica; es decir, un sonido nos parece el doble de fuerte que otro cuando su intensidad es el cuadrado de la del primero. Así, el nivel de intensidad acústica, B, también llamado intensidad fisiológica o sonoridad se define como [7]:

$$B = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

Donde:

I: Intensidad (W/m^2).

I_0 : Intensidad de referencia = 10^{-12} (W/m^2).

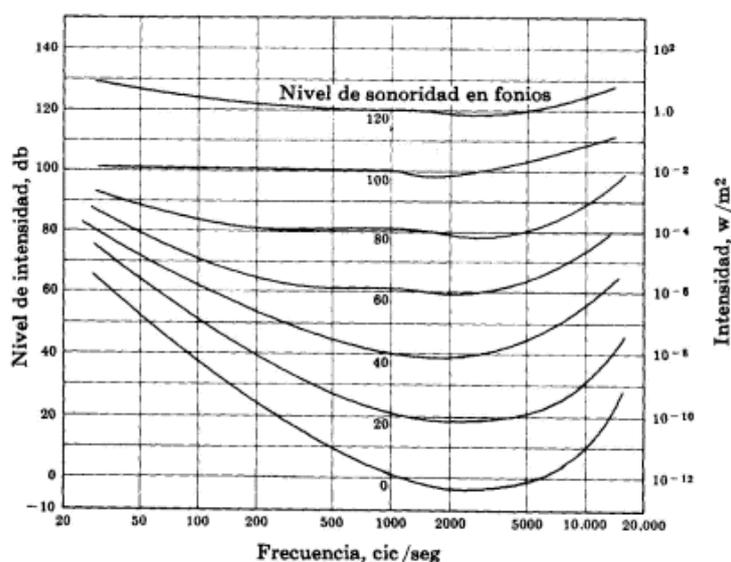


Fig. 2.1: Nivel de intensidad acústica en función de la frecuencia. La curva inferior corresponde al nivel umbral y la superior al nivel de dolor.

El decibelio es una unidad logarítmica de medida utilizada en diferentes disciplinas de la ciencia. En todos los casos se usa para comparar una cantidad con otra llamada de referencia. Normalmente el valor tomado como referencia es siempre el menor valor de la cantidad. En algunos casos puede ser un valor promediado aproximado.

Como su nombre indica el decibelio es la décima parte del Bel. El Bel es el logaritmo en base 10 de la relación de dos potencias o intensidades. No obstante esta unidad resulta demasiado grande por lo que se ha normalizado el uso de la décima parte del Bel, siendo el decibel o decibelio [5].

La duración es la cualidad del sonido que nos permite identificar los sonidos como largos o breves. El sonido será tan largo como sea la onda. El sonido prolongado del gong tendrá una onda más larga que el breve y seco sonido de las claves.

La altura o tono es la cualidad del sonido que nos permite identificar los sonidos como graves o agudos. Depende de la frecuencia o número de vibraciones por segundo, a mayor frecuencia, más agudo suena el sonido.

El timbre es la cualidad del sonido que nos permite diferenciar dos sonidos de igual frecuencia e intensidad emitidos por dos focos sonoros diferentes. Por ejemplo, cada instrumento tiene un sonido característico, igual que cada uno de nosotros tiene una voz personal y distinta a la de los demás. Ese rasgo es el timbre o color característico. Por eso diferenciamos una trompeta de un xilófono aunque toquen la misma melodía.

A través del timbre somos capaces de diferenciar, dos sonidos de igual frecuencia fundamental o (tono). Un la de 440 Hz emitido por una flauta es distinto de la que emite una trompeta aunque estén tocando la misma nota, porque tienen distintos armónicos.

Los principales factores que influyen en la determinación del timbre son:

- La envolvente espectral, es decir, la intensidad relativa de los parciales.
- La envolvente dinámica, en particular la conjunción de las envolventes dinámicas de cada uno de los parciales.
- Los transitorios, que son parciales de muy corta duración que se generan en el ataque, pero también en la caída de un sonido. Ello hace que todos los sonidos tengan siempre una componente de ruido.

2.2 Fenómenos de propagación

Las ondas sonoras son ondas mecánicas. En los fluidos, por carecer de elasticidad de forma y sólo presentar elasticidad de volumen, las ondas sonoras sólo pueden propagarse como ondas longitudinales. Por el contrario, en los sólidos pueden propagarse como ondas longitudinales y transversales.

- Velocidad de propagación: la velocidad de propagación de las ondas longitudinales en un fluido viene determinada por el módulo de compresibilidad (K) y por la densidad (ρ) del fluido, de modo que: $c = \sqrt{K/\rho}$. En los sólidos, la velocidad del sonido varía según se trate de una varilla o de un medio indefinidamente extenso. En el primer caso que es el que nos interesa la velocidad es $c = \sqrt{E/\rho}$. La velocidad de propagación del sonido en un gas ideal viene dada por $c = \sqrt{\gamma \cdot P/\rho}$, siendo $\gamma \cdot P$ el módulo de compresibilidad adiabático, ρ la densidad.
- Reflexión: las ondas sonoras se reflejan al tropezar con un obstáculo. En la reflexión de las ondas sonora parte de la energía se refleja y parte penetra en el segundo medio; la relación entre una y otra depende de las propiedades del medio y del ángulo de incidencia. Cuando la onda incidente llega formando con la superficie límite un ángulo cualquiera, la onda transmitida modifica su dirección original acercándose o alejándose de la normal. A esta desviación del rayo transmitido se le denomina refracción.
- Absorción: podemos considerar la absorción de las ondas sonoras como la transformación de la energía mecánicas que transportan en otras formas de energía. Cuando las ondas sonoras se propagan en un medio material, las moléculas de este medio oscilan en la dirección de propagación; pero, como consecuencia del rozamiento, de la viscosidad, etc., esas oscilaciones forzadas transfieren energía al medio, por lo que la intensidad de la onda disminuye conforme penetra en el medio.
- Interferencias: las interferencias sonoras se producen cuando dos o más ondas sonoras cuyas fases están en una relación fija coinciden en un punto del espacio.
- Difracción: Los fenómenos de difracción tienen gran importancia en la propagación de las ondas sonoras. Puesto que el rango de longitudes de onda correspondientes a las ondas audibles en el aire es de 17 m a 17

mm, aproximadamente, los obstáculos y orificios que corrientemente encontrarán las ondas sonoras en su recorrido producirán notables efectos de difracción. Así pues las ondas sonoras bordean los obstáculos para llegar al observador, de modo que, en estas condiciones, la propagación no será rectilínea.

- Reverberación: es un fenómeno derivado de la reflexión del sonido dentro de un espacio cerrado. Consiste en una ligera prolongación del sonido una vez que se ha extinguido el de la fuente original. Esta prolongación es debida a las ondas reflejadas por las diferentes superficies del espacio. Con lo que podemos entender que si modificamos las superficies del local, la reverberación se verá afectada. Todos hemos experimentado que poner un mueble o colgar una cortina en una habitación hace que esta sea menos ruidosa. Notamos que el sonido queda apagado, en realidad, queda absorbido por estos nuevos materiales [4].

Capítulo 3

Herramienta Audia

Audia es una aplicación en entorno Android que permite la utilización de una tablet o de un smartphone para el estudio de las ondas sonoras, fruto de un proyecto fin de carrera de un alumno de la escuela de ingeniería informática de la Universidad de Valladolid.

Con esta aplicación se consigue disponer de un laboratorio móvil y de bajo coste para la realización de una serie de experimentos relacionados con las propiedades más importantes del sonido.

La aplicación permite la realización de audiometrías, el estudio de diferentes propiedades del sonido, superposición de ondas de igual frecuencia en tubos acústicos, tanto abiertos como cerrados, batidos, efecto Doppler, interferencia y difracción de ondas, medida de la velocidad del sonido, etc., y servirá de apoyo a los alumnos de la Universidad de Valladolid.

Además lleva integrado una serie de herramientas de gran interés como son un sonómetro, grabadora de sonido, la posibilidad de visualizar el espectro de frecuencias de la señal percibida así como la de generar las diferentes ondas sonoras (sinusoidal, cuadrada, triangular, diente de sierra, ruido blanco, ruido rosa y ruido marrón).

Esta aplicación también lleva implementado un proceso de calibración del dispositivo móvil para poder tener medidas absolutas en caso de que el usuario tuviera acceso a un dispositivo calibrado de referencia.

A modo de ejemplo, algunos dispositivos profesionales que nos podemos encontrar en el mercado son [1]:

- Sonómetro Brüel & Kjaer modelo 2260 Investigator: en torno a unos 10.000 euros.
- Sonómetro Pasco modelo PS-2168: 132 euros+iva, a lo que hay que sumar el sensor. que sin él no se puede utilizar (78 euros+iva) y la licencia del programa para poder ver las medidas.

En cuanto a los test de audiometría, dejar claro que en ningún caso se pretende sustituir la labor de los profesionales en esta materia ni por supuesto dar un diagnóstico de la pérdida de audición, sino que servirá como referencia a la hora de detectar posibles problemas auditivos y una vez detectados acudir a un profesional. Tampoco se pretende competir con un audímetro profesional.

- Audímetro con cascos insonorizados: 950 euros.
Rango de frecuencia: de 125 a 8KHz.
Nivel de salida: de 10 a 100 dBHL.

- Audímetro 600M conexión PC: sobre unos 1.400 euros
Rango de frecuencia: 125, 250, 500, 750, 1000, 1500, 2000, 3000, 4000, 6000, 8000 Hz (+/-2 %)
Auriculares: estándar
Nivel de salida: desde -10 dB hasta 100 dBHL
- Audímetro SibelSound 400-AOM: sobre unos 2.400 euros
Frecuencia estándar: 125, 250, 500, 750, 1000, 1500, 2000, 3000, 4000, 6000, 8000 Hz.
Alta frecuencia: 8000, 9000, 10000, 11200, 12500, 14000, 16000, 18000, 20000 Hz.
Incrementos de nivel: entre 1 y 5 dB.
Calibraciones: dispone de calibraciones según ISO y según ANSI.

A modo de ejemplo otra vez, alguno de los dispositivos que suple la aplicación Audia los podemos encontrar en la figura 3.1, sonómetro, una grabadora de sonido, etc.



Fig. 3.1: algunos de los elementos tradicionales que se pueden sustituir con la aplicación Audia. Izq.: sonómetro. Dcha.: grabadora de sonido.

A continuación se desarrolla un breve manual de Audia centrándonos en los módulos que se van a utilizar para el desarrollo de las prácticas objeto de este Trabajo Fin de Grado [1]. Con este manual se pretende dar las pautas para la correcta utilización de la app Audia.

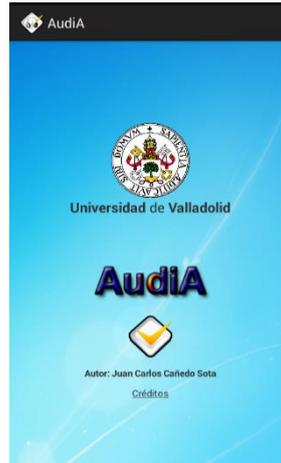


Fig. 3.2: pantalla inicial de Audia.

En cada pantalla se dispone de una ayuda () para podernos guiar por toda la aplicación. Un ejemplo de ayuda lo podemos ver en la figura 3.3.

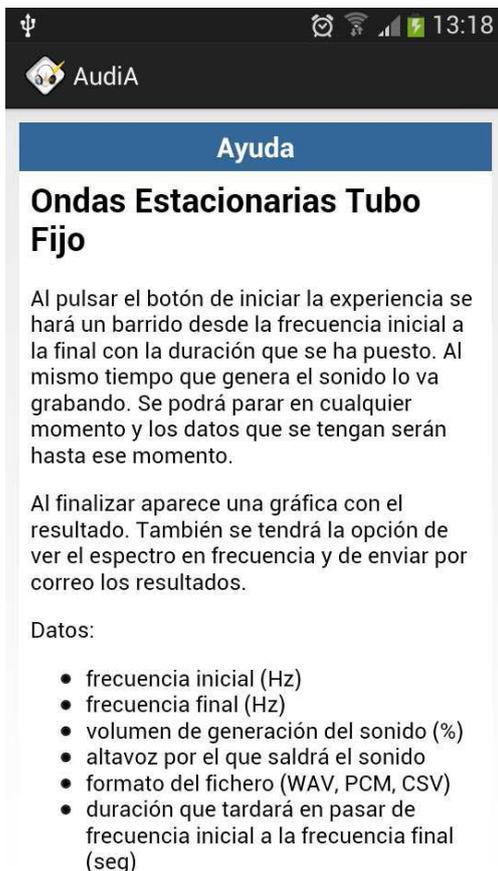


Fig. 3.3: pantalla de ayuda de la aplicación Audia.



Fig. 3.4: menú principal de Audia.

Desde el menú principal, Fig. 3.4, se puede acceder a las audiometrías, herramientas, experiencias, calibración tanto del micrófono como de los altavoces y configuración.

En este Trabajo Fin de Grado solo se van a usar dos módulos de la aplicación Audia: el módulo herramientas – grabadora de sonido y el módulo experiencias – interferencias y difracción. A continuación se pasa a explicar en qué consisten estos módulos. Para información acerca del resto de módulos, consultar el proyecto fin de carrera “Audia: estudio de ondas sonoras y audiometrías en entorno Android”, desarrollado por Juan Carlos Cañedo Sota.

3.1 Grabadora de sonido

Ruta: Herramientas _ Grabadora Sonido



Fig. 3.5: grabadora de sonido.

Los datos que se solicitan son:

Formato del fichero (WAV, PCM, CSV)

Se guardará un fichero con el sonido grabado en el formato seleccionado.

Cuando se para la grabación aparece una gráfica con los valores de la señal capturada. También se tendrá la opción de ver el espectro de frecuencias (), así como poder enviar por correo los resultados.

Las diferentes pantallas que nos muestra el módulo de la grabadora de sonido una vez terminada la grabación, quedan reflejadas en la figura 3.6

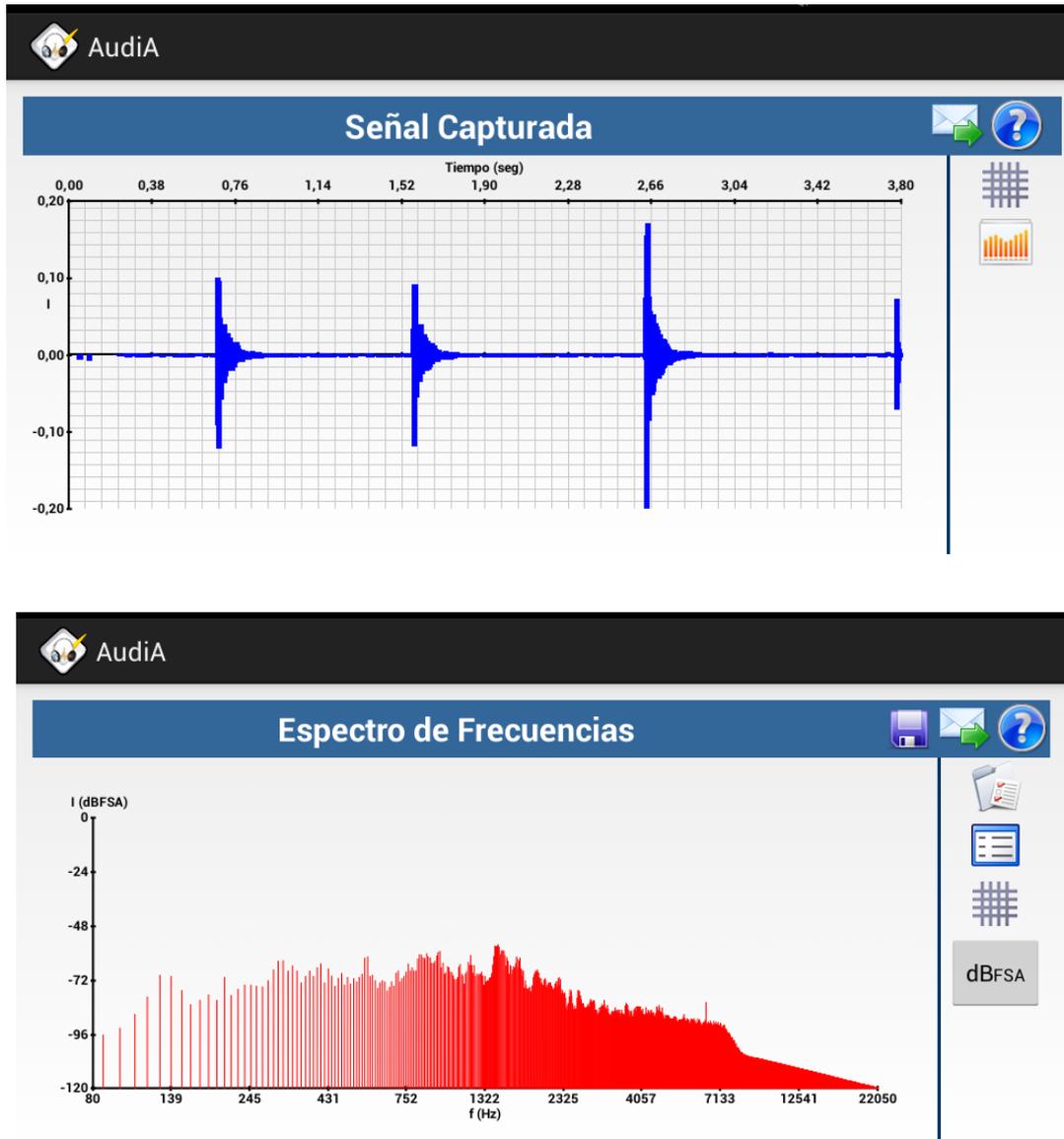


Fig.3.6: pantallas de visualización de la grabadora de sonido.

Entre las opciones () que se pueden modificar en el espectro de frecuencias: intervalo de muestreo intervalos (35 ms, 125 ms, 1 seg o 5 seg), el tamaño de la ventana, el tipo de ventana, la escala de la gráfica (logarítmica o lineal), tipo de visualización (líneas o rectángulos), los dB mínimo a partir de los cuales se va a mostrar y el tipo de decibelios que se están mostrando.

Se puede hacer zoom en la gráfica y si se pulsa sobre la gráfica aparece una línea vertical que indica los dB para esa frecuencia.

También se pueden mostrar, al igual que en el espectro de frecuencias, los valores del espectro y de los picos en una tabla ().

3.2 Interferencias y difracción

Ruta: Experiencias _ Interferencias y Difracción

Los datos que se solicitan son:

- Intervalo muestreo (mseg)
- Frecuencia (Hz)
- Volumen de generación del sonido (%)
- Altavoz por el que saldrá el sonido

En la figura 3.7 se puede observar a la izquierda el panel de variación de parámetros del módulo Interferencias y difracción y a la derecha la información que nos proporciona al darle al icono generar sonido ().

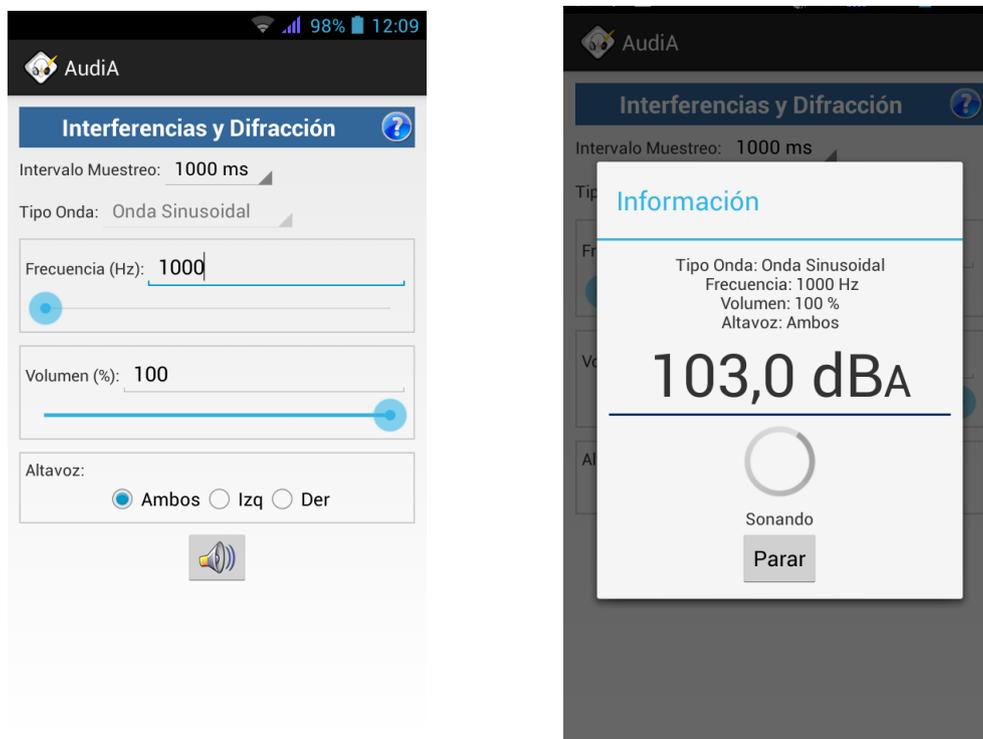


Fig. 3.7: capturas de pantalla del módulo interferencias y difracción. Izq.: panel de variación de parámetros. Dcha.: información que nos proporciona al darle al icono generar sonido.

Si se pretenden estudiar las interferencias habrá que seleccionar los dos altavoces. En el caso de la difracción sólo habrá que seleccionar uno, el izquierdo o el derecho.

Cuando se pulsa el botón de generar () empieza a emitirse el sonido y se mostrará los decibelios que está capturando. Se irá tomando nota de la distancia a la que está el smartphone y los decibelios que está midiendo.

3.3 Calibración de la intensidad sonora

Una característica importante de esta app y que diferencia con el resto de app de este tipo es que, si se tiene la posibilidad de acceder a un sistema de calibración, se podrá calibrar la intensidad sonora del micrófono del smartphone y los altavoces de los auriculares. Si el micrófono no estuviera calibrado no se podrán calibrar los altavoces.

Cuando el micrófono o los altavoces están calibrados aparece con el símbolo



como podemos observar en la figura 3.8.



Fig. 3.8: Captura de pantalla del calibrador de Audia.

Una vez que se haya calibrado las medidas que se obtengan serán medidas absolutas.

Capítulo 4

Diseño de las prácticas y del kit docente de bajo coste

4.1 Objetivos

Con este apartado se pretende desarrollar una serie de tres experiencias, escogidas tras un estudio previo entre una gran cartera de diferentes experiencias posibles, que sean susceptibles de ser desarrolladas por cualquier alumno en un ámbito exterior a un laboratorio profesional mediante el uso de nuestros propios smartphones y el material que se tenga a nuestra disposición, o en caso de que haya que adquirir algún componente, que éste sea de bajo coste.

Todas las experiencias escogidas tienen en común el uso de dispositivos móviles con sistema operativo Android, el uso de la aplicación Audia y de material que tengamos a nuestra disposición o que su adquisición suponga un bajo coste.

Las experiencias elegidas han sido las que se detallan a continuación:

- Vibraciones transversales de una varilla metálica flexible.
- Absorción de sonido por diferentes materiales: coeficiente de absorción.
- Cálculo del coeficiente de restitución en choques entre diferentes pelotas y el suelo.

4.2 Vibraciones transversales de una varilla metálica flexible

4.2.1 Objetivos de la experiencia

El objetivo de esta práctica consiste en experimentar con varillas flexibles de distintas características (dimensiones, forma, material, modo de sujeción, etc.), observando las frecuencias de las vibraciones transversales en cada situación, corroborando la coincidencia entre los valores experimentales obtenidos y los valores teóricos esperados, poniendo especial énfasis en la repetitividad de las medidas obtenidas con la aplicación Audia.

Como en todas las experiencias que se proponen en el presente TFG, se persigue fundamentalmente el objetivo de utilizar material de valor reducido y fácilmente accesible para cualquier persona para completar el kit de bajo coste que se propone.

Se analizará una situación concreta de ondas transversales en varillas flexibles: varilla sujeta por un extremo y libre por otro. Teniendo en cuenta que las posibilidades que ofrece toda experiencia son múltiples, se han seleccionado aquí tan sólo algunas situaciones concretas, pretendiendo poner de manifiesto la potencialidad de Audia para el estudio de las vibraciones en varillas flexibles. En particular se analizan los cambios observados entre varillas de sección circular o rectangular, al variar las dimensiones (radio de las varillas circulares, longitud de las varillas, etc.) y el material de las mismas. Adicionalmente, al final de la exposición se sugieren también otras posibles experiencias o situaciones físicas que se podrían desarrollar con este kit.

4.2.2 Descripción teórica: modos de vibración transversales de una varilla flexible

Las varillas son cuerpos rígidos cuya longitud es notablemente mayor que las dimensiones restantes. Pueden vibrar con vibraciones longitudinales, transversales o de torsión. En realidad, y considerando sólo las vibraciones longitudinales y transversales, el acoplamiento interno entre las deformaciones hace difícil producir un movimiento sin el otro [7].

En esta experiencia se pretenden estudiar los modos de vibración transversales que se producen en una varilla (o barra) flexible al hacerla vibrar considerando la siguiente situación de contorno: varilla sujeta por un extremo y libre en el otro, Fig. 4.2.1. En términos de las diferentes situaciones de vibración, las varillas se clasifican en simétricas, cuando poseen un punto de apoyo único situado en su

centro o puntos equidistantes de éste, y asimétricas, cuando están apoyadas sobre puntos dispuestos asimétricamente o fijas en un punto único distinto del centro, como es el caso de estar sujeta por un extremo y libre por el otro.

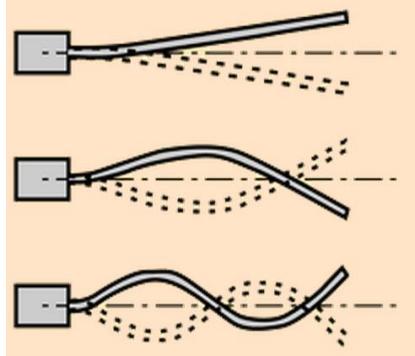


Fig. 4.2.1: Vibraciones transversales de una varilla flexible sujeta por un extremo y libre por otro.

Cuando una varilla es flexionada, sus partes externa e interna experimentan tensiones contrarias, de compresión en un caso y de tracción en el otro. Entre ellas existe un eje neutral, cuya longitud permanece invariante, Fig. 4.2.2 [8].

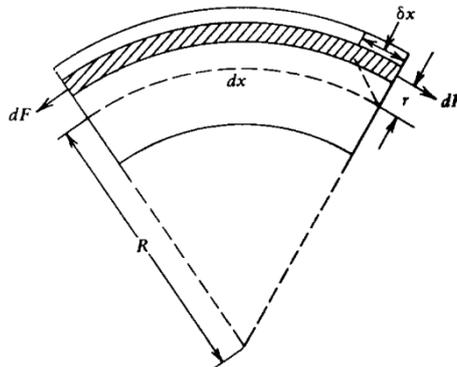


Fig. 4.2.2: Situación de flexión de una varilla

Consideremos una varilla de longitud L , densidad volumétrica ρ y módulo (elástico) de Young E . Consideremos tanto varillas de base circular y radio r como varillas de base rectangular y lados a y b , Fig. 4.2.3.

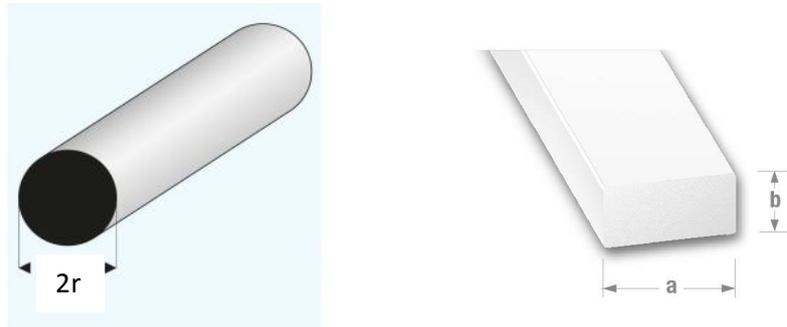


Fig. 4.2.3: Varillas de sección circular y de sección rectangular consideradas en esta experiencia

La ecuación diferencial del movimiento para ondas transversales en una varilla viene dada por (4.2.1).

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -k^2 C^2 \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} \quad (4.2.1)$$

Al ser ondas estacionarias en un medio limitado, las soluciones son de la forma:

$$\psi(x,t) = y(x) \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (4.2.2)$$

Cada punto “x” de la barra vibra con una amplitud $y(x)$ y con frecuencia angular $\omega (= 2 \cdot \pi \cdot \nu)$.

Condiciones de frontera

Vamos a considerar una varilla sujeta por un extremo ($x=0$) y libre por el otro extremo ($x=L$). Así, el movimiento en la dirección “y” en $x=0$ está impedido y $\frac{\partial y}{\partial x} = 0$. Llevando estas condiciones a la ecuación de onda transversal y aplicando adicionalmente las condiciones de que $\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0$ y que $\frac{\partial^3 y}{\partial x^3} = 0$ en $x=L$, se llega a la solución que aporta las frecuencias correspondientes a los modos de vibración permitidos [8]:

$$v_n = \frac{v k}{L^2} C_n \quad (4.2.3)$$

siendo:

$$v \equiv \text{velocidad del sonido en el medio: } v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (4.2.4)$$

$k \equiv$ radio de giro del área de la sección transversal:

- para sección rectangular $k = \frac{b}{\sqrt{12}}$; $b \equiv$ alto de la varilla.
- para sección circular $k = \frac{r}{2}$.

$C_n \equiv$ número que corresponde al modo de vibración “n”:

$$C_n = \frac{r_n^2}{2\pi}; \quad r_n = (2n - 1) \frac{\pi}{2} \quad \text{con } n = \text{número } natural$$

Como se detalla en la bibliografía, estas soluciones son aproximadas [3]. Para los dos primeros armónicos, en vez de usar $n=1$ y $n=2$ se deben usar los valores $n=1.097$ y $n=1.995$, respectivamente.

La aplicación de las condiciones de frontera limita, como en el caso de una cuerda sujeta por ambos extremos, los modos de vibración permitidos de una varilla a un conjunto discreto de frecuencias. Sin embargo, en contraste con la cuerda, las frecuencias de los modos de vibración de una barra no son múltiplos (armónicos) de su fundamental; de hecho, se suele hablar de modos inarmónicos en este caso.

4.2.3 Material a utilizar en el desarrollo de la práctica

El material a utilizar para el montaje de esta experiencia es de fácil acceso, por ejemplo en cualquier ferretería, de una forma económica. El material aquí indicado puede ser sustituido o reemplazado por material similar.

- Varillas lisas de sección circular y rectangular

En concreto, para esta experiencia se han usado una varilla de acero de sección circular de 4 mm de diámetro y longitud de un metro y una varilla de aluminio de sección rectangular de 10 mm x 1.8 mm y longitud de 0.5 m, Fig. 4.2.4. La longitud desde el extremo libre al extremo fijo de las

varillas en los experimentos ha sido: para varillas de sección circular: 355, 555, 750 y 950 mm, y para varillas de sección rectangular: 205, 300 y 401 mm.



Fig. 4.2.4: Varillas de sección circular y rectangular utilizadas en esta experiencia

Obviamente las dimensiones escogidas para la experiencia no tienen por qué ser las que se indican aquí, pudiendo elegir otros diámetros, longitudes y materiales de las varillas si ello nos facilita la obtención del material para esta práctica.

- Al igual que para el resto de experiencias, móvil Android y aplicación Audia para Android, Fig. 4.2.5.

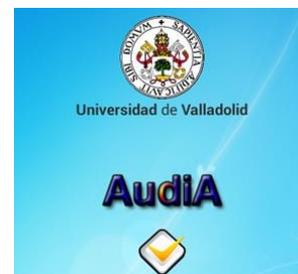


Fig. 4.2.5: Smartphone utilizado y aplicación Audia.

- Sistema de fijación de las varillas. En concreto, se han utilizado dos tacos de madera y una sargenta para sujetar las varillas, Fig. 4.2.6. Tales elementos de fijación pueden variar, siempre y cuando se mantenga bien sujeto uno de los extremos de las varillas.



Fig. 4.2.6: Tacos de madera y sargenta para sujeción de las varillas

4.2.4 Descripción del montaje experimental

El montaje de los elementos se muestra en la Fig. 4.2.7. La varilla se coloca entre los dos tacos de madera, prensándolos con la sargenta. La longitud (L) de la varilla a considerar en las ecuaciones es la que existe desde el punto de fijación hasta el extremo libre, de forma que se debe medir, una vez realizado el montaje indicado, utilizando una regla de longitud adecuada. Este montaje permite, de hecho, usar una única varilla y considerar diferentes longitudes de la misma, analizando de esta forma cómo varían las frecuencias de vibración con la longitud. El micrófono del Smartphone se colocará a una distancia fija de la varilla ya que la intensidad captada puede variar en función de la posición del smartphone.



Fig. 4.2.7: Disposición del montaje para la toma de datos

El experimento consiste en ir colocando las diferentes varillas entre los tacos de madera y hacerlas vibrar, captando a continuación mediante el Smartphone el sonido emitido. La forma de hacer vibrar las varillas será empujando con el dedo el extremo libre de la varilla y soltar repentinamente, obteniendo la vibración que se puede observar en la figura 4.2.8. El sonido resultante se grabará con la aplicación Audia con el módulo Herramientas-Grabadora de sonido. Es aconsejable repetir las experiencias las veces que sea necesario hasta tener unos datos concluyentes (con tres o cuatro repeticiones bastará para comprobar la repetitividad de los resultados obtenidos).



Fig. 4.2.8: Varilla vibrando en el proceso de captación de datos experimentales

Los datos obtenidos con la aplicación Audia son una imagen con el espectro de frecuencias a partir de la FFT (transformada rápida de Fourier) con decibelios a escala completa, y un Excel con la intensidad para cada frecuencia. De los datos que nos aporta Excel nos vamos a fijar en los primeros armónicos, los que aparecen antes de los 2000 o 3000 Hz de frecuencia, ya que los armónicos de mayor intensidad se producen a frecuencias bajas y los de frecuencias altas son de menor intensidad, lo que hace que falle la repetitividad.

Una característica importante de los resultados obtenidos a destacar aquí es la dificultad de medir las frecuencias más bajas. Este hecho se debe a la imposibilidad de los micrófonos de los Smartphone de captar frecuencias muy bajas. Como veremos a continuación, esto va a suponer perder la información de los primeros modos de vibración, los que se encuentran por debajo de un valor de frecuencia, dependiendo del dispositivo.

Pese a estas dificultades, nos bastará, en realidad, con un conjunto de frecuencias (unas 8 o 10) para caracterizar las vibraciones de cada barra, por lo que tenemos datos suficientes con el rango de frecuencias considerado.

4.2.5 Resultados: comparativa teoría – experiencia

A partir de la expresión de las frecuencias de los modos de vibración, los valores teóricos de las frecuencias de vibración esperadas para cada varilla se calculan a continuación.

• Varillas de aluminio de sección rectangular

El módulo de Young y la densidad del aluminio son:

$$E = 66 \text{ GPa.}$$

$$\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$$

De esta forma, la velocidad de propagación de las ondas, dada por la ec. (4.2.4), es:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{66000000000}{2700}} = 4944 \text{ m/s}$$

$$\text{Para las varillas consideradas, } k = \frac{b}{\sqrt{12}} = \frac{0.0018}{\sqrt{12}} = 0.00052 \text{ m}$$

La tabla 4.2.1 muestra los valores de las distintas frecuencias de vibración esperadas para experiencias con las varillas de aluminio de sección rectangular (10 mm x 1.8 mm), sujetas por un extremo y libres por el otro, con longitudes de 205, 300 y 401 mm.

Tabla 4.2.1: Valores teóricos de los modos de vibración para varillas de sección rectangular de 10 mm x 1.8 mm

L=0,205m	n	r _n	C _n	L ² (m ²)	U _n (Hz)
	1	0,3925	1,57	0,042025	24,0111933
	2	3,5325	4,71	0,042025	216,10074
	3	9,8125	7,85	0,042025	600,279833
	4	19,2325	10,99	0,042025	1176,54847
	5	31,7925	14,13	0,042025	1944,90666
	6	47,4925	17,27	0,042025	2905,35439
	7	66,3325	20,41	0,042025	4057,89167
L=0,3m	1	0,3925	1,57	0,09	11,2118933
	2	3,5325	4,71	0,09	100,90704
	3	9,8125	7,85	0,09	280,297333
	4	19,2325	10,99	0,09	549,382773
	5	31,7925	14,13	0,09	908,16336
	6	47,4925	17,27	0,09	1356,63909
	7	66,3325	20,41	0,09	1894,80997
	8	88,3125	23,55	0,09	2522,676
L=0,401m	1	0,3925	1,57	0,160801	6,27527441
	2	3,5325	4,71	0,160801	56,4774697
	3	9,8125	7,85	0,160801	156,88186
	4	19,2325	10,99	0,160801	307,488446
	5	31,7925	14,13	0,160801	508,297227
	6	47,4925	17,27	0,160801	759,308203
	7	66,3325	20,41	0,160801	1060,52137
	8	88,3125	23,55	0,160801	1411,93674
	9	113,4325	26,69	0,160801	1813,5543

● Varillas de acero de sección circular

El módulo de Young y la densidad del acero son:

$$E = 200 \text{ GPa}$$

$$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$$

De esta forma, la velocidad de propagación de las ondas, dada por la ec. 4.2.4, es:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{200000000000}{7850}} = 5047 \text{ m/s}$$

Para estas varillas de sección circular, $k = \frac{r}{2} = 0.001 \text{ m}$

La tabla 4.2.2 muestra los valores de las distintas frecuencias de vibración esperadas para experiencias con las varillas de acero de sección circular ($r = 2 \text{ mm}$), sujetas por un extremo y libres por el otro, con longitudes de 355, 555, 750 y 950 mm.

Tabla 4.2.2: Valor teórico de los modos de vibración para varillas de sección circular de 2 mm de radio

L=0,355m	n	r _n	C _n	L ² (m ²)	U _n (Hz)
	1	0,3925	1,57	0,126025	15,71868677
	2	3,5325	4,71	0,126025	141,4681809
	3	9,8125	7,85	0,126025	392,9671692
	4	19,2325	10,99	0,126025	770,2156517
	5	31,7925	14,13	0,126025	1273,213628
	6	47,4925	17,27	0,126025	1901,961099
	7	66,3325	20,41	0,126025	2656,458064
L=0,555m	1	0,3925	1,57	0,308025	6,43112572
	2	3,5325	4,71	0,308025	57,88013148
	3	9,8125	7,85	0,308025	160,778143
	4	19,2325	10,99	0,308025	315,1251603
	5	31,7925	14,13	0,308025	520,9211833
	6	47,4925	17,27	0,308025	778,1662122
	7	66,3325	20,41	0,308025	1086,860247
	8	88,3125	23,55	0,308025	1447,003287
	9	113,4325	26,69	0,308025	1858,595333
	10	141,6925	29,83	0,308025	2321,636385
	11	173,0925	32,97	0,308025	2836,126443
	12	207,6325	36,11	0,308025	3402,065506
L=0,75m	1	0,3925	1,57	0,5625	3,521684444
	2	3,5325	4,71	0,5625	31,69516
	3	9,8125	7,85	0,5625	88,04211111
	4	19,2325	10,99	0,5625	172,5625378
	5	31,7925	14,13	0,5625	285,25644
	6	47,4925	17,27	0,5625	426,1238178
	7	66,3325	20,41	0,5625	595,1646711
	8	88,3125	23,55	0,5625	792,379
	9	113,4325	26,69	0,5625	1017,766804
	10	141,6925	29,83	0,5625	1271,328084
	11	173,0925	32,97	0,5625	1553,06284
	12	207,6325	36,11	0,5625	1862,971071
	13	245,3125	39,25	0,5625	2201,052778
	14	286,1325	42,39	0,5625	2567,30796

L=0,950m	n	r _n	C _n	L ² (m ²)	v _n (Hz)
	1	0,3925	1,57	0,9025	2,194955679
	2	3,5325	4,71	0,9025	19,75460111
	3	9,8125	7,85	0,9025	54,87389197
	4	19,2325	10,99	0,9025	107,5528283
	5	31,7925	14,13	0,9025	177,79141
	6	47,4925	17,27	0,9025	265,5896371
	7	66,3325	20,41	0,9025	370,9475097
	8	88,3125	23,55	0,9025	493,8650277
	9	113,4325	26,69	0,9025	634,3421911
	10	141,6925	29,83	0,9025	792,379
	11	173,0925	32,97	0,9025	967,9754543
	12	207,6325	36,11	0,9025	1161,131554
	13	245,3125	39,25	0,9025	1371,847299
	14	286,1325	42,39	0,9025	1600,12269
	15	330,0925	45,53	0,9025	1845,957726
	16	377,1925	48,67	0,9025	2109,352407
	17	427,4325	51,81	0,9025	2390,306734
	18	480,8125	54,95	0,9025	2688,820706
	19	537,3325	58,09	0,9025	3004,894324
	20	596,9925	61,23	0,9025	3338,527587

Resultados experimentales

Se muestran a continuación los resultados experimentales obtenidos con cada una de las varillas utilizadas en esta experiencia. Se ha repetido cada ensayo hasta cuatro veces, comprobando así la repetitividad de los resultados.

Varillas lisas de aluminio de sección rectangular de 10 mm x 1.8 mm

La Fig. 4.2.9 muestra, a modo ilustrativo, una de las gráficas que proporciona Audia. La Fig. 4.2.10 muestra, de forma comparativa, la representación gráfica intensidad vs frecuencia para cada varilla (sólo se muestra una de las medidas realizadas).

Las tablas 4.2.3, 4.2.4 y 4.2.5 muestran los resultados obtenidos a partir de la aplicación Audia de las frecuencias a las que se producen los máximos de intensidad (para tres repeticiones), para varillas de longitudes 205, 300 y 401 mm, respectivamente.

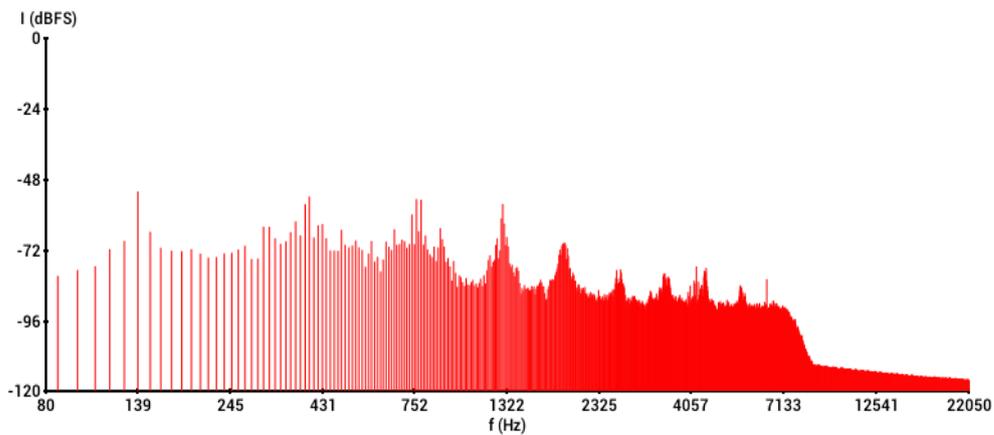


Fig. 4.2.9: Grafica de intensidad vs frecuencia obtenida en la medida nº1 realizada con una varilla de aluminio de sección rectangular (10 mm x 1.8 mm) de longitud L=205 mm.

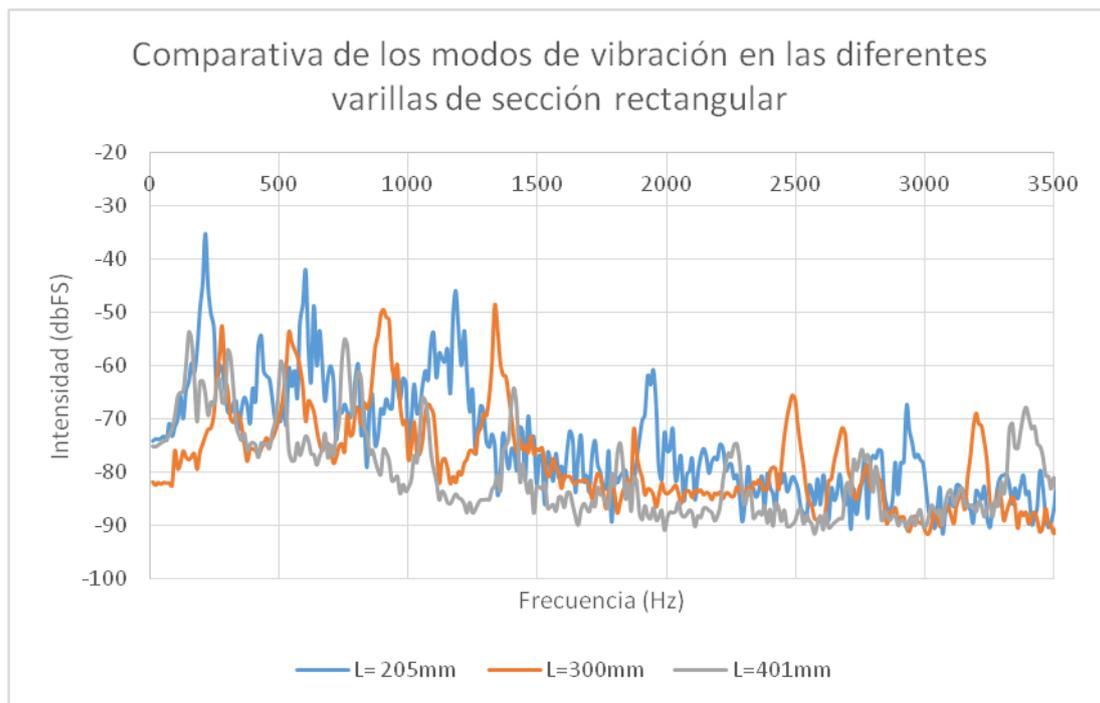


Fig. 4.2.10: Grafica de intensidad vs frecuencia obtenida con las varillas de aluminio de sección rectangular (10 mm x 1.8 mm) de longitudes L=205 mm, L=300 mm y L=401 mm

Tabla 4.2.3: Datos obtenidos a partir de la aplicación Audia de las frecuencias a las que se producen los máximos de intensidad (para tres repeticiones) para una varilla de aluminio de sección rectangular (10 mm x 1.8 mm) de longitud L=205 mm

Primera repetición		Segunda repetición		Tercera repetición	
Frecuencia (Hz)	Intensidad (dBFS)	Frecuencia (Hz)	Intensidad (dBFS)	Frecuencia (Hz)	Intensidad (dBFS)
215	-33,6	215	-35,2	215	-33
603	-47	603	-42,1	603	-45,2
1184	-40,3	1184	-45,9	1174	-47
1949	-58,5	1949	-60,8	1949	-59,5
2929	-58,3	2929	-67,4	2939	-59,8

Tabla 4.2.4: Datos obtenidos a partir de la aplicación Audia de las frecuencias a las que se producen los máximos de intensidad (para tres repeticiones) para una varilla de aluminio de sección rectangular (10 mm x 1.8 mm) de longitud L=300 mm

Primera repetición		Segunda repetición		Tercera repetición	
Frecuencia (Hz)	Intensidad (dBFS)	Frecuencia (Hz)	Intensidad (dBFS)	Frecuencia (Hz)	Intensidad (dBFS)
97	-72	97	-75,9	97	-69,6
280	-46,8	280	-52,5	280	-43,2
549	-52,4	538	-53,6		
915	-51,4	904	-49,4	894	-49,1
1335	-52,3	1335	-48,6	1335	-52,6
1873	-68,2	1873	-71,9	1873	-73,1

Tabla 4.2.5: Datos obtenidos a partir de la aplicación Audia de las frecuencias a las que se producen los máximos de intensidad (para tres repeticiones) para una varilla de aluminio de sección rectangular (10 mm x 1.8 mm) de longitud L=405 mm

Primera repetición		Segunda repetición		Tercera repetición	
Frecuencia (Hz)	Intensidad (dBFS)	Frecuencia (Hz)	Intensidad (dBFS)	Frecuencia (Hz)	Intensidad (dBFS)
151	-52,4	151	-56	151	-53,7
301	-47,5	301	-57,9	301	-57,1
506	-59	506	-65	506	-59,2
754	-58,3	754	-55,9	754	-55
1055	-54,6	1066	-60	1055	-66
1410	-60	1410	-58,7	1410	-64,2

Varillas lisas de acero de sección circular de radio 2 mm

De nuevo, la Fig. 4.2.11 muestra, a modo ilustrativo, una de las gráficas que proporciona Audia. La Fig. 4.2.12 muestra, de forma comparativa, la representación gráfica intensidad vs frecuencia para cada varilla (sólo se muestra una de las medidas realizadas)

Las tablas 4.2.6, 4.2.7, 4.2.8 y 4.2.9 muestran los resultados obtenidos a partir de la aplicación Audia de las frecuencias a las que se producen los máximos de intensidad (para tres repeticiones), para varillas circulares de 2 mm de radio de longitudes 355, 555, 750 y 950 mm, respectivamente.

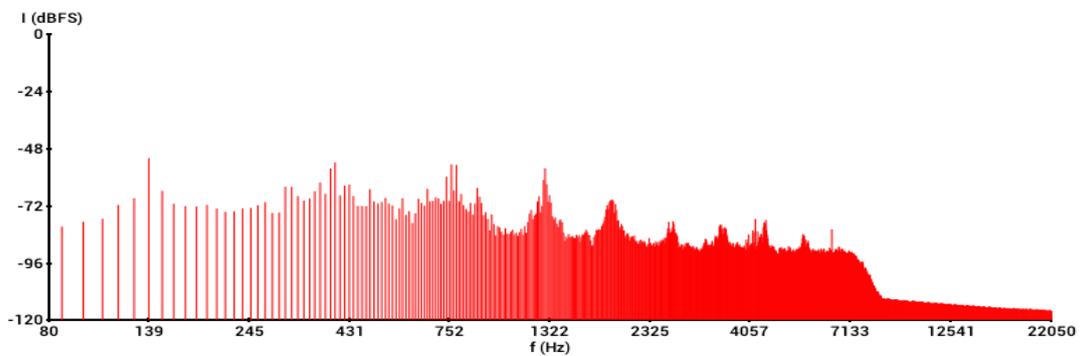


Fig. 4.2.11: Grafica de intensidad vs frecuencia obtenida en la medida nº1 realizada con una varilla de acero de sección circular (4 mm de diámetro) de longitud L=355 mm.

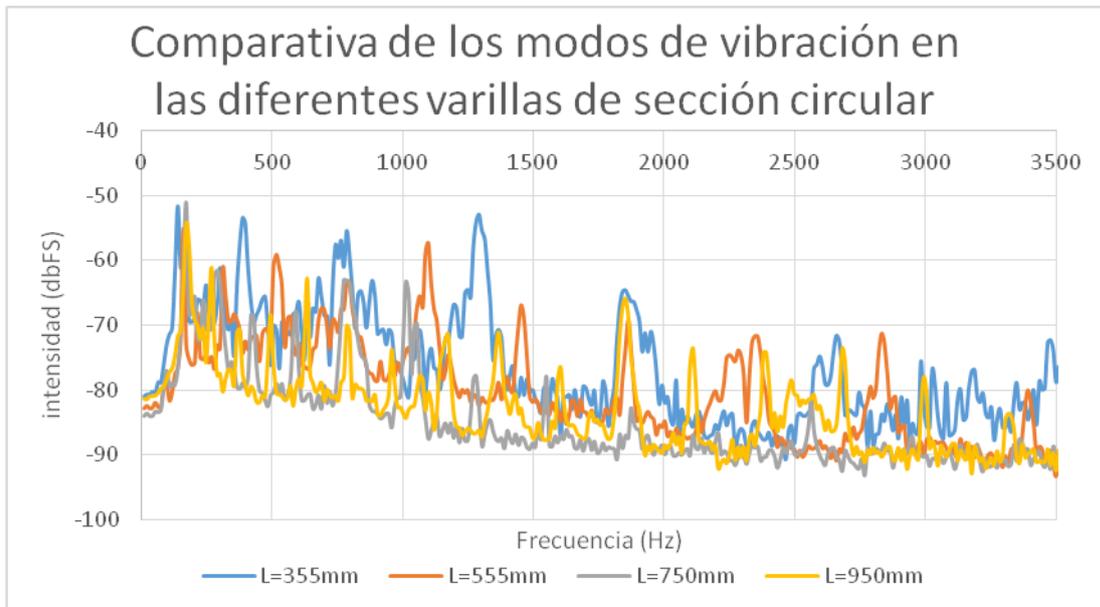


Fig. 4.2.12: Grafica de intensidad vs frecuencia obtenida con las varillas de acero de sección circular (4 mm de diámetro) de longitudes L=355 mm, L=555 mm, L=750 y L=950 mm

Tabla 4.2.6: Datos obtenidos a partir de la aplicación Audia de las frecuencias a las que se producen los máximos de intensidad (para cuatro repeticiones) para una varilla de acero de sección circular ($r=2$ mm) de longitud $L=355$ mm

Primera repetición		Segunda repetición		Tercera repetición		Cuarta repetición	
Frecuencia	Intensidad	Frecuencia	Intensidad	Frecuencia	Intensidad	Frecuencia	Intensidad
(Hz)	(dBFS)	(Hz)	(dBFS)	(Hz)	(dBFS)	(Hz)	(dBFS)
140	-52,1	140	-51,6	140	-50,2	140	-50,8
398	-53,8	388	-53,4	388	-53,2	388	-53,1
764	-54,7	786	-55,4	786	-54,5	786	-56,5
1292	-56,4	1292	-52,9	1292	-53,5	1292	-52,7
1884	-69,5	1852	-64,6	1863	-76,3	1852	-70,5
2649	-78,6	2659	-71,6	2649	-74,3	2584	-75,6

Tabla 4.2.7: Datos obtenidos a partir de la aplicación Audia de las frecuencias a las que se producen los máximos de intensidad (para cuatro repeticiones) para una varilla de acero de sección circular ($r=2$ mm) de longitud $L=555$ mm

Primera repetición		Segunda repetición		Tercera repetición		Cuarta repetición	
Frecuencia	Intensidad	Frecuencia	Intensidad	Frecuencia	Intensidad	Frecuencia	Intensidad
(Hz)	(dBFS)	(Hz)	(dBFS)	(Hz)	(dBFS)	(Hz)	(dBFS)
161	-55,1	161	-56,2	161	-53,6	161	-56,8
312	-61,2	312	-64,8	312	-62,9	312	-61,2
517	-59,1	528	-63,4	517	-60,6	528	-64,8
786	-63,3	775	-77,4	786	-67,2	797	-71,4
1098	-57,3	1087	-70,4	1087	-64,3	1098	-76
1453	-66,9	1453	-71,8	1453	-66,6	1453	-62
1863	-69,2	1863	-73	1863	-67,9	1863	-78,1
2347	-71,7	2293	-78,7	2272	-72,7	2326	-76,3
2832	-71,3	2842	-76,1	2832	-81,5	2842	-69,9

Tabla 4.2.8: Datos obtenidos a partir de la aplicación Audia de las frecuencias a las que se producen los máximos de intensidad (para cuatro repeticiones) para una varilla de acero de sección circular ($r=2$ mm) de longitud $L=750$ mm

Primera repetición		Segunda repetición		Tercera repetición		Cuarta repetición	
Frecuencia	Intensidad	Frecuencia	Intensidad	Frecuencia	Intensidad	Frecuencia	Intensidad
(Hz)	(dBFS)	(Hz)	(dBFS)	(Hz)	(dBFS)	(Hz)	(dBFS)
172	-50	172	-51,1	172	-55,6	172	-53,2
280	-58	291	-61,5	291	-63,5	291	-64,5
431	-65,9	420	-68,4	431	-62,1	431	-75,4
592	-68	592	-68	592	-70,4	592	-69,5
775	-64,3	775	-63	797	-62,3	786	-65,7
1023	-75,8	1012	-63,3	1044	-66,1	1044	-74,9
1281	-79,6	1281	-77,8	1270	-68,9	1270	-74,2
1550	-83,2	1550	-78	1550	-69,2	1550	-85,1
1873	-83,3	1873	-82,8	1873	-76,5	1938	-84,6
		2207	-86,6	2196	-74,4	2207	-85,2

Tabla 4.2.9: Datos obtenidos a partir de la aplicación Audia de las frecuencias a las que se producen los máximos de intensidad (para cuatro repeticiones) para una varilla de acero de sección circular ($r=2$ mm) de longitud $L=950$ mm

Primera repetición		Segunda repetición		Tercera repetición		Cuarta repetición	
Frecuencia	Intensidad	Frecuencia	Intensidad	Frecuencia	Intensidad	Frecuencia	Intensidad
(Hz)	(dBFS)	(Hz)	(dBFS)	(Hz)	(dBFS)	(Hz)	(dBFS)
		108	-72	108	-70,6	108	-74,6
172	-54,3	172	-56	172	-53,8	172	-56,3
269	-61,1	269	-52,5	269	-54,9	269	-62,2
377	-70,7	377	-78,6	366	-73	377	-72
495	-68,4	495	-57	495	-65,3	495	-48,4
635	-62,8	635	-65,3	635	-58,9	635	-72,7
786	-70,1	797	-64,9	797	-58,9	797	-64,1
958	-73,8	958	-58,5	958	-58,1	958	-58,1
1174	-71,4	1130	-71,6	1098	-68,4	1130	-62,5
1367	-71,1	1357	-63	1357	-59,1	1357	-65,3
1604	-76,5	1604	-82,3	1593	-77,6	1593	-81,4
1841	-67,2	1852	-61,4	1852	-66,8	1852	-64,7
2110	-73,6	2110	-72,3	2110	-69,5	2110	-77
2390	-74,2	2379	-73,8	2379	-76,9	2379	-81,6
2681	-73,6	2681	-77,3	2681	-76,2	2681	-72,5

Las tablas 4.2.10 y 4.2.11 muestran los valores medios de las frecuencias obtenidas experimentalmente para las varillas rectangulares y circulares, respectivamente, comparándolos con los valores teóricos calculados

anteriormente. Las figuras 4.2.13 y 4.2.14 muestran la comparativa teoría-experiencia de forma gráfica para varillas rectangulares y circulares, respectivamente. Como puede observarse en las tablas 4.2.3, 4.2.4, 4.2.5, 4.2.6, 4.2.7, 4.2.8 y 4.2.9, y de forma gráfica en la Fig. 4.2.15, la repetitividad de los valores es muy alta.

Tabla 4.2.10: Valores medios de las frecuencias experimentales de los distintos modos de vibración (tres repeticiones) y teóricos para varillas de aluminio de sección rectangular (10 mm x 1.8 mm) y longitudes 205, 300 y 401 mm

n	Media de las frecuencias obtenidas en la práctica		
	L=205mm	L=300mm	L=401mm
1			
2	215	97	
3	603	280	151
4	1180,666667	543,5	301
5	1949	904,3333333	506
6	2932,333333	1335	754
7	4070	1873	1058,666667
8		2487	1410
9			1812,666667
10			2272

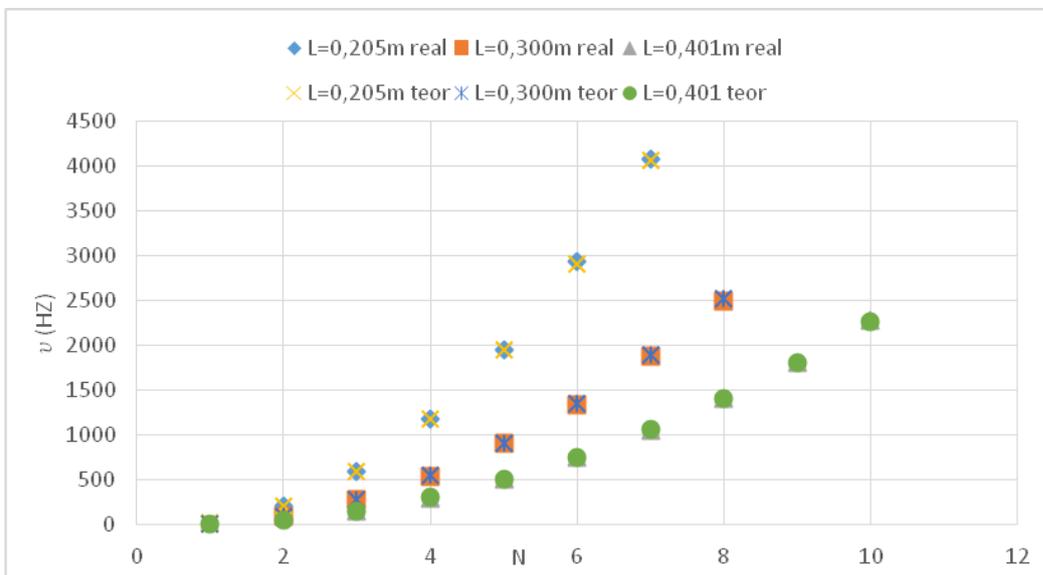


Fig. 4.2.13: Grafica comparativa de las frecuencias de los distintos modos de vibración teóricas y experimentales (media de tres repeticiones) obtenidas para varillas de aluminio de sección rectangular (10 mm x 1.8 mm) y longitudes 205, 300 y 405 mm

Tabla 4.2.11: Valores medios de las frecuencias experimentales de los distintos modos de vibración (cuatro repeticiones) y teóricos para varillas de acero de sección circular ($r=2$ mm) y longitudes 355, 555, 750 y 950 mm

n	MEDIA DE LAS FRECUENCIAS EN LA PRÁCTICA			
	L=0,355m	L=0,555m	L=0,75m	L=0,95m
1				
2	140			
3	390,5	161		
4	780,5	312	172	108
5	1292	522,5	288,25	172
6	1862,75	786	428,25	269
7	2635,25	1092,5	592	374,25
8		1453	783,25	495
9		1863	1030,75	635
10		2309,5	1275,5	794,25
11		2837	1550	958
12		3391	1889,25	1133
13			2203,33333	1359,5
14			2562	1598,5
15				1849,25
16				2110
17				2381,75
18				2681
19				2993
20				3321,5

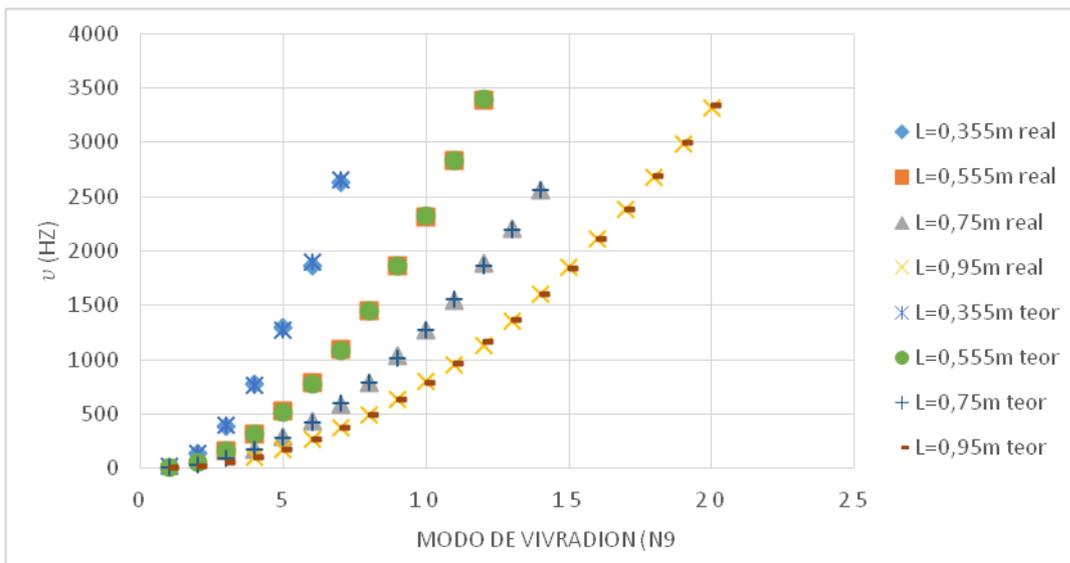


Fig. 4.2.14: Grafica comparativa de las frecuencias de los distintos modos de vibración teóricas y experimentales (media de cuatro repeticiones) obtenidas para varillas de acero de sección circular ($r=2$ mm) y longitudes 355, 555, 750 y 950 mm

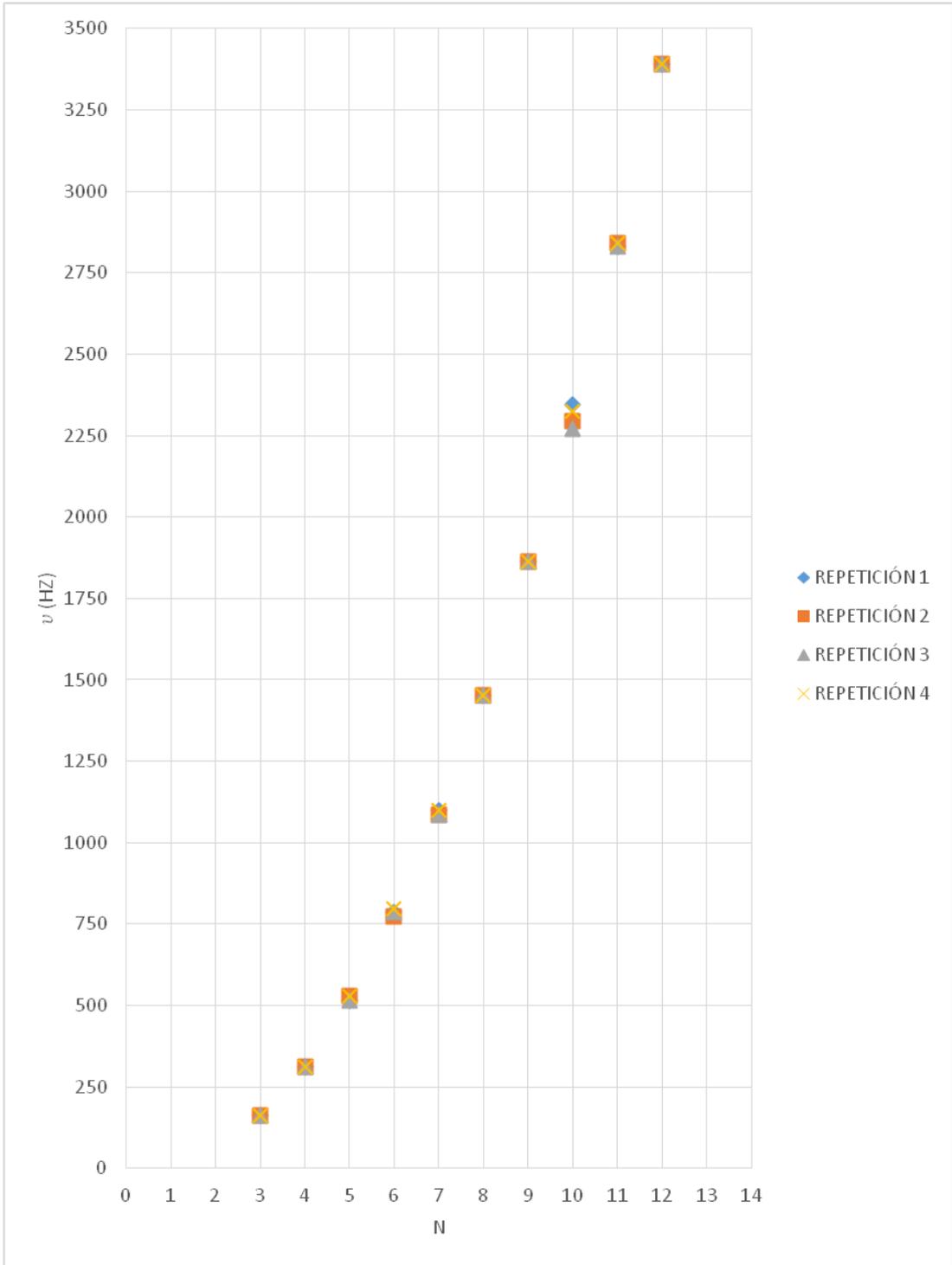


Fig. 4.2.15: Grafica comparativa de las frecuencias experimentales obtenidas para cuatro repeticiones en el caso de una varilla de acero de sección circular ($r=2$ mm) y longitud 555 mm

La comparativa teoría-experiencia nos muestra que los valores más bajos de las frecuencias no se captan con el Smartphone y la aplicación Audia. En todo caso, como podemos observar, la comparativa teoría-experiencia es muy buena,

pudiendo afirmar que el sonido característico de cada varilla queda identificado por una serie de frecuencias de intensidad elevada que se repiten en sucesivos experimentos, poseyendo cada varilla un timbre determinado que las diferenciará unas de otras.

4.2.6 Conclusiones

En base a los resultados obtenidos podemos sacar las siguientes conclusiones:

- Podemos observar que la repetitividad es muy buena, ya que los resultados de las frecuencias obtenidos en cada una de las repeticiones coinciden, con un pequeño margen, encontrando así un patrón que define el sonido de cada varilla.
- El acuerdo entre los resultados experimentales y teóricos es muy bueno, corroborando así el modelo utilizado para la determinación de las vibraciones transversales en barras flexibles sujetas por un extremo.
- Podemos observar que cuanto más larga es la varilla, mayor es el número de armónicos situados en el rango de frecuencias medido.
- Comparando los datos teóricos con los experimentales podemos observar que los valores muy bajos de frecuencias no se captan, lo que es debido a las limitaciones del micrófono del Smartphone, ya que la mayoría de los micrófonos están preparados para recibir frecuencias entre los 80 Hz y 18 kHz.
- Los resultados experimentales obtenidos con Audia, junto con la comparativa teórica, muestran claramente que los modos de vibración de varillas sujetas por un extremo y libres por el otro dependen de las características físicas del material y de las dimensiones de las varillas (longitud, forma y dimensiones de la sección transversal).
- La aplicación Audia es pues una herramienta potente para el análisis de las vibraciones de varillas transversales, pudiendo analizar el sonido característico que estas producen al vibrar, caracterizado por una serie de armónicos muy determinados.

- Con esta misma metodología se pueden estudiar varillas con otras características tanto morfológicas como físicas. Es importante tener en cuenta que las varillas han de ser lisas, ya que se ha experimentado con varillas roscadas sin llegar a conclusiones coherentes.

4.3 Absorción del sonido por los materiales: coeficiente de absorción

4.3.1 Objetivos de la experiencia

El objetivo de esta práctica consiste en estudiar la absorción (atenuación) del sonido por diferentes materiales, para lo que se propone comparar la intensidad del sonido captado cuando el sonido viaja sin ningún obstáculo y cuando el sonido debe atravesar diferentes materiales con espesores variables. La experiencia se realizará para diferentes valores de la frecuencia emitida, de forma que podamos obtener información acerca de la capacidad de los distintos materiales a la hora de absorber el sonido a diferentes frecuencias.

Los materiales analizados han sido en concreto un poliestireno extruido y dos poliuretanos, uno de menor densidad que otro, realizando las experiencias utilizando diferentes espesores de los mismos.

Teniendo en cuenta que las posibilidades que ofrece toda experiencia son múltiples, se han seleccionado aquí tan sólo algunas situaciones concretas, pretendiendo poner de manifiesto la potencialidad de Audia para el estudio de la intensidad absorbida por diferentes materiales. Al final de la exposición se sugieren también otras posibles experiencias o situaciones físicas que se podrían desarrollar con este kit.

4.3.2 Descripción teórica: atenuación del sonido por materiales

Como se comentó en el capítulo 2, el sonido, como toda onda mecánica, representa la propagación de una perturbación por el espacio. En el movimiento ondulatorio no se propaga la materia, sino el estado de perturbación, o dicho de otra forma, la energía. Podemos entender esta propagación de la siguiente forma: cada partícula, al ser alcanzada por la perturbación, oscila en torno a su posición de equilibrio, con una cierta amplitud y frecuencia. Esta oscilación provoca a su vez (transmite) la vibración de los átomos o moléculas de la materia contiguos, que a su vez transmiten la vibración a los siguientes átomos o moléculas del material [9]. En el caso concreto de las ondas sonoras, la perturbación supone cambiar el estado de presión de una determinada masa de aire, perturbación que se propaga por el espacio, Fig. 4.3.1.

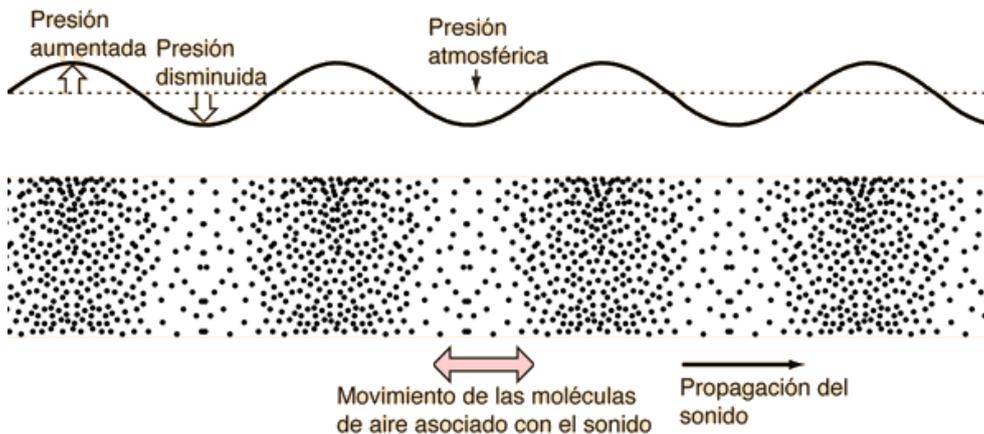


Fig. 4.3.1. Ondas sonoras (ondas de presión)

La propagación de la perturbación o de la energía va a estar afectada por fenómenos típicos de absorción debidos al material por el que se propaga la onda. Dicho de otra forma, la amplitud de vibración de los átomos o moléculas del material no se mantiene constante, sino que va a ir disminuyendo a medida que la onda avanza, debido a la propia viscosidad del medio material. Esto supone que la energía de la onda va a ir disminuyendo, y por tanto la intensidad de la misma.

Si consideramos ondas planas, donde la intensidad de onda en un medio no absorbente sería constante en la propagación por el espacio, al considerar un medio absorbente la energía, y por tanto la intensidad, van a disminuir como consecuencia de la absorción de parte de la energía por el material.

Por sencillez, supongamos una onda que se propaga en la dirección $+X$. Experimentalmente se observa que la intensidad de la onda decae como consecuencia de la propagación por el medio material, Fig. 4.3.2:

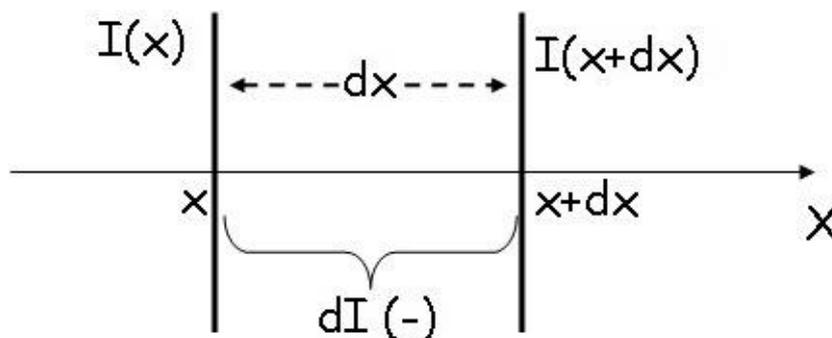


Fig. 4.3.2: Absorción de una onda plana por un medio material

La absorción de energía (intensidad) por el medio material supone que si la onda en un determinado punto x del medio tiene una intensidad $I(x)$, tras recorrer un espacio dx tiene una intensidad diferente (menor) $I(x+dx)$. Experimentalmente se observa que la disminución de intensidad ($-dI$) es proporcional a la intensidad inicial $I(x)$, al espacio recorrido (dx) y a las propiedades absorbentes del material, representadas por un parámetro que denotaremos por β , o **coeficiente de absorción** de la onda en el medio material [4]. Así, podemos escribir:

$$-dI = \beta(x)dx \qquad \frac{dI}{I} = -\beta dx \qquad (4.3.1)$$

Integrando:

$$\ln I = -\beta \cdot x + \text{cte} \qquad (4.3.2)$$

Tomando $I = I_0$ en $x = 0$:

$$\begin{aligned} \text{cte} = \ln I_0 & \quad \longrightarrow \quad \ln \frac{I}{I_0} = -\beta \cdot x \\ \longrightarrow \quad I & = I_0 \cdot e^{-\beta \cdot x} \qquad (4.3.3) \end{aligned}$$

donde:

I : intensidad del sonido tras recorrer un espesor x de material.

I_0 : intensidad inicial.

β : coeficiente de absorción del material (en unidades de inversa de longitud).

x : espesor del medio absorbente.

Como vemos, esta expresión nos indica que la intensidad decae exponencialmente con el espacio recorrido por la onda (x) a medida que esta avanza por el medio material

Notemos pues que en una situación real (con absorción), la intensidad de las ondas planas no será constante, sino que disminuye debido a la absorción. De la misma forma, para ondas esféricas, la intensidad va a disminuir debido a la expansión de la onda por el espacio y a la absorción del medio material.

Adicionalmente a los fenómenos de absorción (atenuación) de las ondas debidas a los medios materiales, en la propagación de las ondas se deben tener en cuenta otros fenómenos tales como los fenómenos de reflexión que suceden cuando la onda pasa de un medio material a otro diferente. Así, si consideramos

una onda propagándose por el espacio pasando desde el aire a un medio material de un determinado espesor y de nuevo volviendo al aire, Fig. 4.3.3, los fenómenos de propagación de la onda (y de su energía) van a ser más complejos, donde debemos considerar los fenómenos de reflexión en cada una de las caras y la propia atenuación debido a los medios materiales.

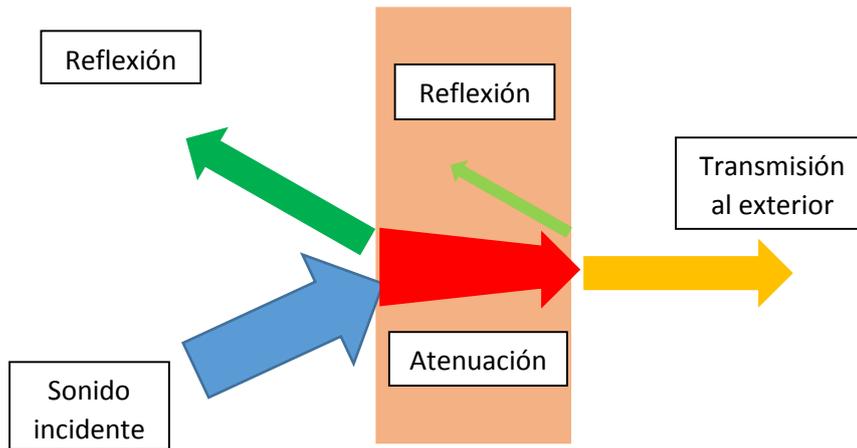


Fig.4.3.3: Propagación del sonido al atravesar un determinado material.

En el proceso de reflexión en la intercara entre dos materiales, parte de la energía se refleja al primer medio y parte se trasmite al segundo medio, hablándose en este caso de un coeficiente que da cuenta de la energía transmitida respecto a la energía incidente, al que en muchos libros se le denomina también coeficiente de absorción (α) [10], [11]. No es este coeficiente α en el que estamos interesados en esta experiencia (este coeficiente tiene más interés en el ámbito del aislamiento acústico de locales); para una mayor claridad y distinción, y siguiendo la notación de M.R. Ortega [4], a este otro coeficiente α se le suele denotar como coeficiente de absorción en la reflexión. La absorción (atenuación) de las ondas sonoras debido a los medios materiales es un tema de enorme interés, en concreto para conseguir mejores aislamientos acústicos en las viviendas, etc. Como se ha mencionado, β depende del material, por lo que resulta de gran interés conocer las propiedades absorbentes de los materiales, que es el objetivo de la experiencia que aquí se propone.

Un aspecto de gran importancia es que la absorción (atenuación) de las ondas sonoras depende de la frecuencia de la onda, como también se tratará de poner de manifiesto en la experiencia presentada.

Para llevar a cabo esta experiencia se van a medir intensidades sonoras (denotadas por la letra B) en decibelios (dB), mientras que en la ecuación 4.3.3 las intensidades (I) están medidas en unidades de energía por unidad de

superficie (W/m^2 en el S.I.). El nivel de intensidad sonora, medido en dB en el S.I., está definido como

$$B = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{I}{10^{-12}} \quad (4.3.4)$$

Es decir, se trata de una escala logarítmica, donde se toma I_0 como umbral de intensidad sonora para el oído humano, con un valor de $10^{-12} W/m^2$.

La transformación del nivel de intensidad (B) a intensidad sonora (I) es por tanto:

$$10^{\frac{B}{10}} = \frac{I}{10^{-12}} \quad I = 10^{[(B/10)-12]} \quad (4.3.5)$$

4.3.3 Material a utilizar en el desarrollo de la práctica

En el montaje experimental (detallado en el punto siguiente de esta memoria) se va a construir una caja, sobre la que apoyarán tapas de diferentes materiales, de los que se va a determinar el coeficiente de atenuación. Todo el material a utilizar para el montaje de esta experiencia es de fácil acceso, por ejemplo en cualquier ferretería, de una forma económica. El material aquí indicado puede ser sustituido o reemplazado por material similar.

- Para la fabricación de la caja se han usado láminas de poliestireno extruido. En concreto, para esta experiencia, se ha construido una caja de dimensiones interiores 250 x 200 x 110 mm con uno de sus lados de mayor superficie (250 x 200 mm) abierto, Fig. 4.3.4.



Fig. 4.3.4: caja de poliestireno 250 x 200 x 110.

Obviamente las dimensiones escogidas para la experiencia no tienen por qué ser las que se indican aquí, pudiendo elegir otras dimensiones y otros materiales de las láminas si ello nos facilita la obtención del material para esta práctica.

- Diferentes materiales a estudiar, que colocaremos como tapas en el lateral de la caja de poliestireno anteriormente mencionada. Las láminas (tapas) empleadas en este caso han sido:
 - o Tres láminas de poliestireno extruido, con espesores de 40 mm cada una, de forma que al colocarlas unas junto a las otras vamos a ir obteniendo espesores totales de 40, 80 y 120 mm, figura 4.3.5.



Fig. 4.3.5: tapas de poliestireno extruido.

- o Tres láminas de poliuretano de baja densidad, dos de espesores de 30 mm y una de espesor 100 mm, consiguiendo de esta forma, al ir las poniendo juntas, los espesores totales usados para la experiencia de 60, 100 y 160 mm, figura. 4.3.6. Estos espesores se consiguen: el de 60 mm son dos lamina de 30 mm, el de 100 mm es una lámina de 100 mm y le espesor de 160 mm son dos láminas de 30 mm y una de 100 mm.



Fig. 4.3.6: tapas de poliuretano de baja densidad.

- o Dos láminas de poliuretano de alta densidad, con espesores ambos de 50 mm, consiguiendo así espesores totales de 50 y 100 mm, figura. 4.3.7.



Fig. 4.3.7: tapas de poliuretano de alta densidad.

- Al igual que para el resto de experiencias, se va a usar un móvil Android y la aplicación Audia para Android.

- Altavoz bluetooth. Este altavoz posee unas dimensiones reducidas (60 mm de diámetro y 70 mm de altura) por lo que es posible meterlo en la caja construida para tal fin, figura 4.3.8.



Fig. 4.3.8: altavoz bluetooth utilizado.

4.3.4 Descripción del montaje experimental

El montaje de los elementos se muestra en las figuras 4.3.9. y 4.3.10. El altavoz bluetooth se coloca en el interior de la caja, a una distancia prefijada del micrófono del Smartphone, realizando todas las medidas a la misma distancia relativa entre micrófono y altavoz. En este caso la distancia elegida ha sido de 250 mm.



Fig. 4.3.9: posición de los diferentes elementos en la toma de datos sin láminas (tapas) de por medio.



Fig. 4.3.10: montaje de los elementos con las láminas (tapas) de por medio.

El experimento realizado ha consistido en emitir un sonido de una frecuencia determinada y anotar el nivel de intensidad sonora (en dB) captada por el Smartphone, realizando la experiencia en primer lugar sin láminas (tapas) y en segundo lugar con las láminas en estudio. Para obtener diferentes tomas de datos para diferentes espesores de un mismo material, se han ido añadiendo las láminas del mismo material.

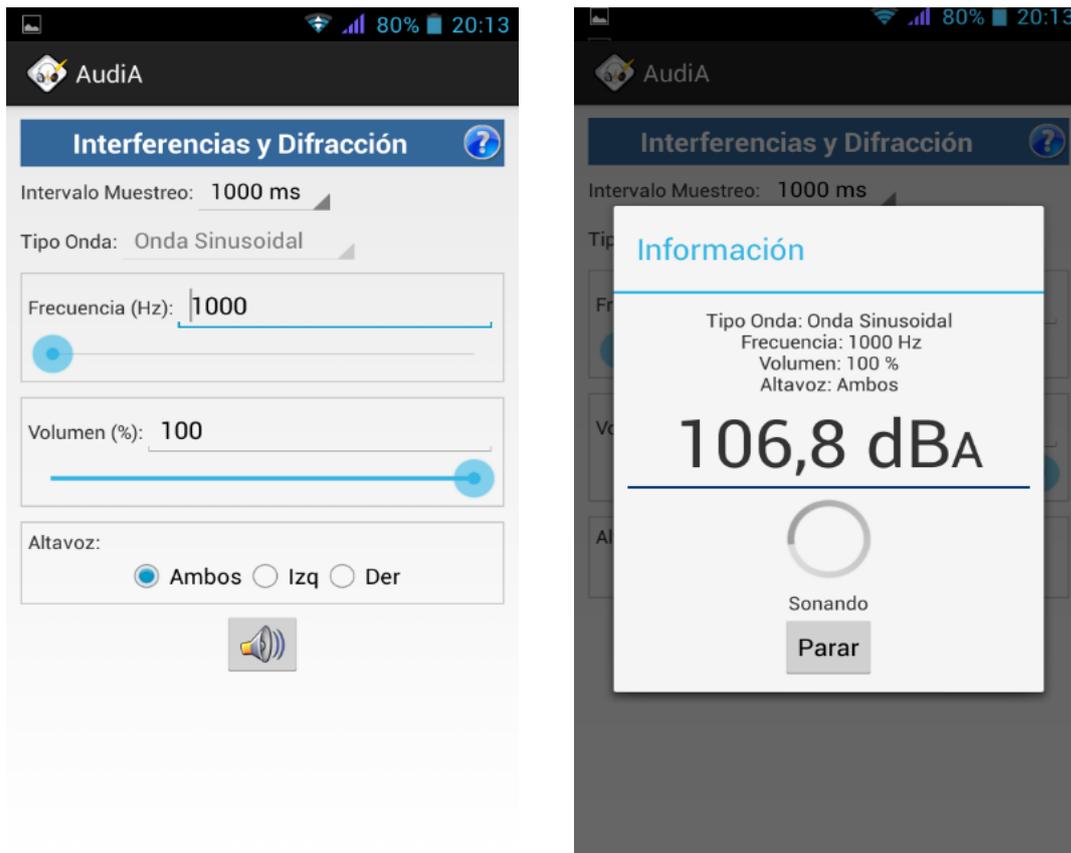
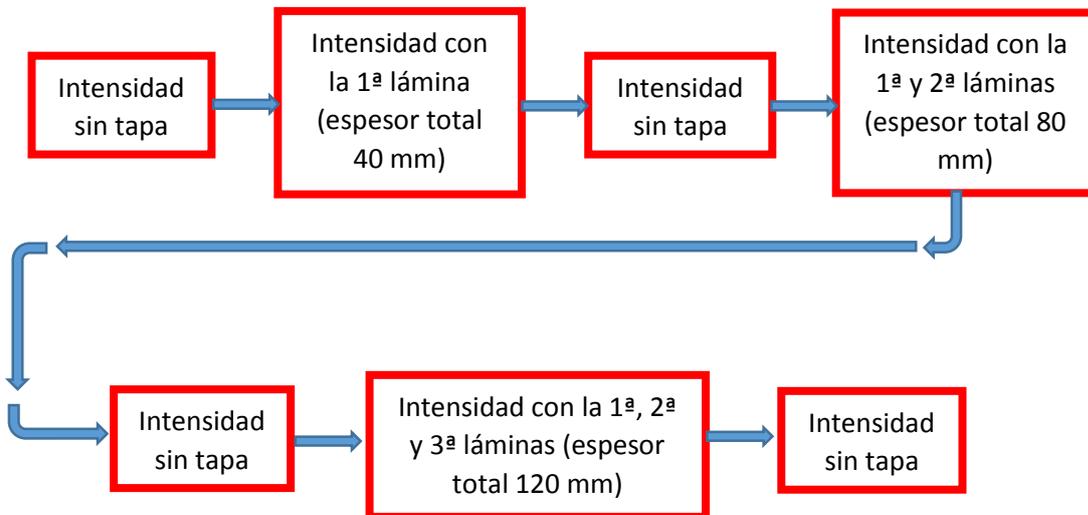


Fig.4.3.11: Izq: módulo de la aplicación Audia usado para esta experiencia. Dcha: medida del nivel de intensidad sonora. (Capturas de pantalla).

La toma de datos se ha realizado con la aplicación Audia para Android usando el módulo “Experiencias” > “Interferencias y difracción”, ya que este módulo nos permite generar una onda para una determinada frecuencia (habiendo realizado el estudio para cuatro valores de frecuencias diferentes). Este módulo permite generar una onda en uno o dos altavoces conectados por bluetooth al Smartphone, permitiéndonos variar el volumen (es decir, el nivel de intensidad sonora) y el altavoz por el que queremos que suene. El módulo nos ofrece prácticamente en tiempo real la intensidad en decibelios percibida por el micrófono del Smartphone, como se puede observar en la figura 4.3.11.

Fijado el volumen del sonido, la posición del altavoz dentro de la caja de poliestireno y la distancia entre altavoz y micrófono (250 mm) se han emitido sonidos de diferentes frecuencias, habiendo utilizado para esta experiencia valores de 500, 1000, 2000, y 4000 Hz.

Tratando de tener fiabilidad en las medidas, el procedimiento seguido ha consistido en emitir un sonido de una frecuencia y anotar el valor del nivel de intensidad sonora proporcionado por la aplicación Audia sin tapa de por medio. Posteriormente se pone la tapa de menor espesor y se vuelve a medir la intensidad. A continuación se repite la experiencia sin ninguna tapa, para comprobar la repetitividad de la medida con respecto a la situación inicial. Luego se añade una segunda lámina del mismo material, con lo que se realiza la experiencia para un espesor mayor (suma de los dos espesores individuales) y así sucesivamente. A modo de ejemplo, la figura 4.3.12 muestra el esquema seguido para la toma de datos en las láminas de poliestireno extruido.



4.3.12: esquema de la toma de datos seguido en el caso de las láminas de poliestireno extruido.

Para el resto de los materiales (láminas) se ha seguido el mismo esquema.

4.3.5 Resultados experimentales obtenidos

De la toma de datos de esta experiencia se han obtenido los valores mostrados en las tablas 4.3.1, 4.3.2 y 4.3.3, donde están reflejados los niveles de intensidad sonora para cada caso en estudio y para cada frecuencia.

Tabla 4.3.1: valor del nivel de intensidad sonora para cada frecuencia y para cada caso en estudio usando las láminas de poliestireno extruido.

Fre- cuen- cia (Hz)	B (Sin lámina) (dB)	B (con lámina) (40 mm) (dB)	B (Sin lámina) (dB)	B (con lámina) (80 mm) (dB)	B (Sin lámina) (dB)	B (con lámina) (120 mm) (dB)	B (Sin lámina) (dB)
500	70.9	63.4	62.6	59.2	71.3	63.4	71
1000	63.8	60.3	59.1	55.5	60.7	47.7	62.3
2000	70.7	66.9	72.4	59	71.3	54.9	69.3
4000	80.2	70.3	79.1	62.5	78.3	64	79.9

Podemos observar que las sucesivas medidas de la intensidad sin tapa de por medio dan valores algo dispersos, lo que en esta experiencia fue muy significativo en la toma de datos con la frecuencia de 500 Hz. Esto nos lleva a pensar que la toma de datos carece, en esos casos, de la repetitividad y exactitud necesaria, pudiendo llevarnos a errores en la toma de datos cuando interponemos las láminas de por medio. Las causas de estas variaciones pueden ser deficiencias en la repetitividad del micrófono del Smartphone, del altavoz utilizado, pequeñas variaciones del montaje, etc.

Como se puede observar también, en algún caso obtenemos valores de intensidad más elevados al interponer de por medio láminas de mayor espesor. Vista la falta de repetitividad en algunas de las medidas sin tapas de por medio, esto se puede deber a que la aplicación no emita siempre el mismo nivel de intensidad, variaciones mínimas en el montaje, etc.

Tabla 4.3.2: valor del nivel de intensidad sonora para cada frecuencia y para cada caso en estudio usando las láminas de poliuretano de baja densidad.

Fre- cuen- cia (Hz)	B (Sin lámina) (dB)	B (con lámina) (60 mm) (dB)	B (Sin lámina) (dB)	B (con lámina) (100 mm) (dB)	B (Sin lámina) (dB)	B (con lámina) (160 mm) (dB)	B (Sin lámina) (dB)
500	70.2	67.5	70.3	65.1	70.5	64	70.4
1000	60.3	54.1	58.9	49	61	48.1	61.3
2000	71.8	66.3	71.9	61.5	73.2	57.1	73
4000	77	64.8	77.2	67.9	73	57.2	75.5

Tabla 4.3.3: valor del nivel de intensidad sonora para cada frecuencia y para cada caso en estudio usando las láminas de poliuretano de alta densidad.

Frecuencia (Hz)	B (Sin lámina) (dB)	B (con lámina) (50 mm) (dB)	B (Sin lámina) (dB)	B (con lámina) (100 mm) (dB)	B (Sin lámina) (dB)
500	69.9	66	70.7	65	70.5
1000	62.9	60.7	62.8	54.8	63
2000	72.2	65.2	72.6	61	72.7
4000	77.2	64.2	79.2	50.7	77.7

Como se puede observar, en el caso del poliuretano la toma de datos parece más adecuada, con una mejor repetitividad de las medidas sin lámina y observando prácticamente siempre una disminución de la intensidad al aumentar el espesor del material, como es de esperar.

Para determinar los coeficientes de atenuación calculamos las intensidades correspondientes a los niveles de intensidad sonora, aplicando la expresión (4.3.5), obteniendo los datos mostrados en las tablas 4.3.4, 4.3.5 y 4.3.6.

Tabla 4.3.4: valor del nivel de intensidad sonora para cada frecuencia y para cada caso en estudio usando las láminas de poliestireno extruido.

Frecuencia (Hz)	I (Sin lámina) (W/m ²)	I (con lámina) (40 mm) (W/m ²)	I (Sin lámina) (W/m ²)	I (con lámina) (100 mm) (W/m ²)
500	1,23027E-05	2,18776E-06	1,41254E-05	1,8197E-06
1000	2,39883E-06	1,07152E-06	8,12831E-07	3,54813E-07
2000	1,1749E-05	4,89779E-06	1,7378E-05	7,94328E-07
4000	0,000104713	1,07152E-05	8,12831E-05	1,77828E-06

Frecuencia (Hz)	I (Sin lámina) (W/m ²)	I (con lámina) (120 mm) (W/m ²)	I (Sin lámina) (W/m ²)
500	1,34896E-05	2,18776E-06	1,25893E-05
1000	1,1749E-06	5,88844E-08	1,69824E-06
2000	1,34896E-05	3,0903E-07	8,51138E-06
4000	6,76083E-05	2,51189E-06	9,77237E-05

Tabla 4.3.5: valor de la intensidad para cada frecuencia y para cada caso de estudio usando tapas de poliuretano de reducida densidad.

Frecuencia (Hz)	I (Sin lámina) (W/m ²)	I (con lámina) (60 mm) (W/m ²)	I (Sin lámina) (W/m ²)	I (con lámina) (100 mm) (W/m ²)
500	1,04713E-05	5,62341E-06	1,07152E-05	3,23594E-06
1000	1,07152E-06	2,5704E-07	7,76247E-07	7,94328E-08
2000	1,51356E-05	4,2658E-06	1,54882E-05	1,41254E-06
4000	5,01187E-05	3,01995E-06	5,24807E-05	6,16595E-06

Frecuencia (Hz)	I (Sin lámina) (W/m ²)	I (con lámina) (160 mm) (W/m ²)	I (Sin lámina) (W/m ²)
500	1,12202E-05	2,51189E-06	1,09648E-05
1000	1,25893E-06	6,45654E-08	1,34896E-06
2000	2,0893E-05	5,7544E-07	1,99526E-05
4000	1,99526E-05	5,24807E-07	3,54813E-05

Tabla 4.3.6: valor de la intensidad medido para cada frecuencia y para cada caso de estudio usando tapas de poliuretano de mayor densidad.

Frecuencia (Hz)	I (Sin lámina) (W/m ²)	I (con lámina) (50 mm) (W/m ²)	I (Sin lámina) (W/m ²)	I (con lámina) (100 mm) (W/m ²)	I (Sin lámina) (W/m ²)
500	9,7723E-06	3,9810E-06	1,1749E-05	3,16228E-06	1,12202E-05
1000	1,9498E-06	1,1749E-06	1,9054E-06	3,01995E-07	1,99526E-06
2000	1,6595E-05	3,3113E-06	1,8197E-05	1,25893E-06	1,86209E-05
4000	5,2480E-05	2,6302E-06	8,3176E-05	1,1749E-07	5,88844E-05

Una vez obtenidos los datos experimentales, podemos pasar a determinar los coeficientes de absorción en función de la frecuencia emitida para cada caso en estudio, usando la ecuación (4.2.3). Los coeficientes obtenidos se muestran en las tablas 4.3.7, 4.3.8 y 4.3.9.

Tabla 4.3.7: coeficiente de atenuación del sonido para cada caso de estudio usando láminas de poliestireno extruido

Frecuencia (Hz)	$\beta_{40 \text{ mm}} (\text{m}^{-1})$	$\beta_{80 \text{ mm}} (\text{m}^{-1})$	$\beta_{120 \text{ mm}} (\text{m}^{-1})$	$\underline{\beta} (\text{m}^{-1})$
500	43,17347	25,61625916	15,1586852	27,98280495
1000	20,14762	10,36163292	24,94467184	18,48464144
2000	21,874558	38,56830031	31,46866294	30,63717388
4000	56,988981	47,77864068	27,43913902	44,06892025

En el caso del poliestireno extruido, podemos observar que los valores del coeficiente de absorción del sonido resultan muy diferentes para las diferentes medidas (diferentes espesores). Esto es debido a la falta de repetitividad de las medidas y los problemas mencionados anteriormente. En este caso, por tanto, las medidas no son fiables.

Tabla 4.3.8: coeficientes de atenuación de sonidos para cada caso de estudio usando láminas de poliuretano de reducida densidad.

Frecuencia (Hz)	$\beta_{60 \text{ mm}} (\text{m}^{-1})$	$\beta_{100 \text{ mm}} (\text{m}^{-1})$	$\beta_{160 \text{ mm}} (\text{m}^{-1})$	$\underline{\beta} (\text{m}^{-1})$
500	10,361633	11,97344248	9,35425194	10,56310911
1000	23,793379	22,79559242	18,56459231	21,71785468
2000	21,10703	23,94688497	22,45020466	22,50137321
4000	46,81923	21,41404136	22,73802779	30,32376646

Tabla 4.3.9: coeficientes de atenuación de sonidos para cada caso de estudio usando láminas de poliuretano de mayor densidad.

Frecuencia (Hz)	$\beta_{50 \text{ mm}} (\text{m}^{-1})$	$\beta_{100 \text{ mm}} (\text{m}^{-1})$	$\beta_{\text{medio}} (\text{m}^{-1})$
500	17,960164	13,12473503	15,54244938
1000	10,131374	18,42068074	14,27602758
2000	32,236191	26,70998708	29,47308919
4000	59,867212	65,62367515	62,74544378

Como podemos observar, en el caso de las láminas de poliuretano, se obtienen coeficientes de absorción más repetitivos, aunque sigue existiendo algo de dispersión. Al igual que en casos anteriores, esta falta de repetitividad puede ser debida a las deficiencias en la repetitividad del micrófono del Smartphone, del altavoz utilizado, pequeñas variaciones del montaje, etc. También debemos tener en cuenta que no estamos considerando la posible influencia de los procesos de reflexión en las intercaras, lo que no será del todo despreciable.

Los valores obtenidos del coeficiente de absorción son, en general, mayores para el poliuretano de alta densidad respecto al de baja densidad, lo que indica que absorbe más el sonido, como en principio cabría esperar. Sin embargo, se observa un comportamiento diferente para la frecuencia de 1000 Hz.

En la figura 4.3.13 se representan de forma gráfica los valores de los coeficientes de atenuación obtenidos para las diferentes frecuencias de estudio y para los diferentes materiales. Podemos observar de forma general que el coeficiente de absorción β , según estos datos, aumenta en función de la frecuencia de la onda sonora.

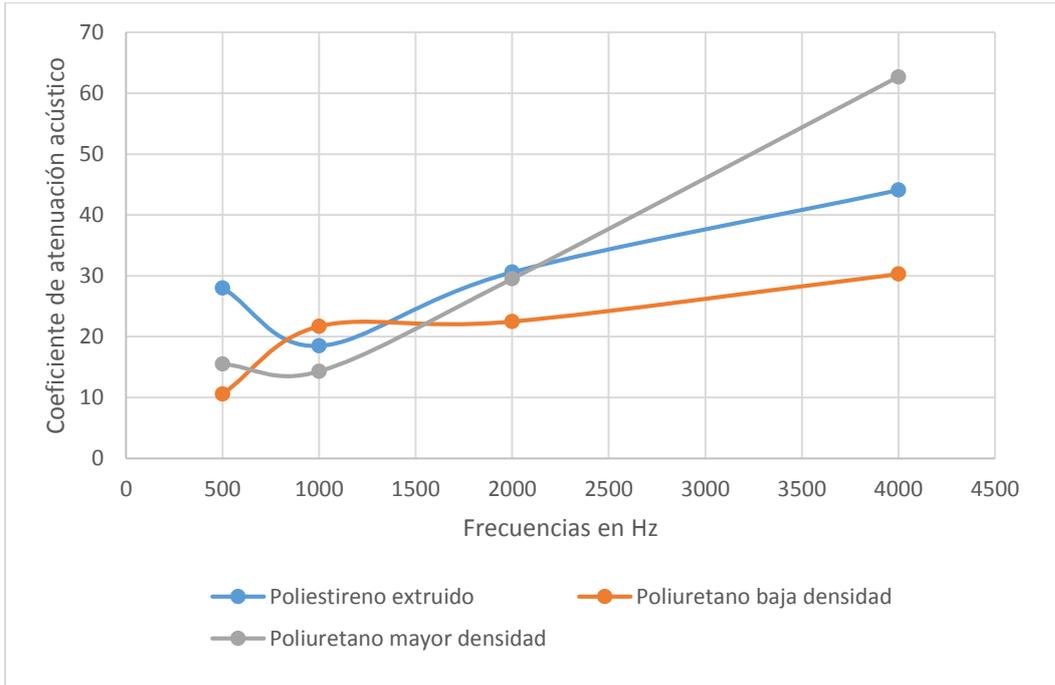


Fig. 4.3.13: Coeficientes de atenuación obtenidos para las diferentes frecuencias de estudio y para los diferentes materiales

4.3.6 Conclusiones

En base a los resultados obtenidos podemos sacar las siguientes conclusiones:

- Hemos observado problemas en la repetitividad de las medidas, lo que indica que en algunos casos la toma de datos carece de la exactitud necesaria para este estudio. De hecho, en algunos casos se observan aumentos de intensidad sonora a pesar de poner más espesor del material. Las causas de estas variaciones y errores pueden ser deficiencias en la repetitividad del micrófono del Smartphone, del altavoz utilizado, pequeñas variaciones del montaje, etc.
- Debido a estos problemas, los coeficientes de absorción obtenidos para el poliestireno extruido no son repetitivos y no son, por tanto, fiables.
- Los valores del coeficiente de absorción obtenidos para las láminas de poliuretano (tanto de baja como alta densidad) son bastante repetitivos (independientes del espesor de las láminas), por lo que la toma de datos en este caso parece adecuada.
- Los datos indican un mayor coeficiente de absorción para el poliuretano de alta densidad respecto al de baja densidad, resultado que va en consonancia con lo que cabe esperar.

- No se han considerado, en todo caso, los procesos de reflexión en las intercaras de las láminas, lo que puede tener cierta importancia y explicar parte de las variaciones observadas en las experiencias realizadas con los distintos espesores
- Los resultados muestran que el coeficiente de absorción aumenta con la frecuencia en líneas generales.
- En todo caso, debido a las deficiencias observadas, sería preciso un mejor montaje y garantizar una mayor repetitividad de las medidas. En concreto, con el montaje realizado, no tenemos distancia suficiente entre altavoz y smartphone para poder considerar las ondas como ondas planas, lo que puede dar lugar también a más errores al comparar los resultados con la teoría expuesta.
- Esta experiencia puede ser realizada modificando la caja, que en este caso ha sido de poliestireno extruido, pero se pueden probar otros materiales para comprobar cómo afectan éstos a los resultados obtenidos, eligiendo otros materiales para las sucesivas tapas, etc.

4.4 Cálculo del coeficiente de restitución en choques entre diferentes pelotas y el suelo

4.4.1 Objetivos de la experiencia

El objetivo de esta práctica consiste en estudiar las propiedades elásticas de pelotas de diferentes materiales midiendo para ello el coeficiente de restitución al chocar éstas contra el suelo. Para ello, se utilizará el módulo de grabación de sonido de la aplicación Audia. También se pretende comprobar cómo varía dicho coeficiente en pelotas del mismo tipo al variar la calidad de éstas. Además, se realizarán medidas a diferentes temperaturas para observar su influencia en las propiedades elásticas de los materiales empleados.

Se analizarán las situaciones concretas de choques de pelotas empleadas en tres deportes distintos, ping-pong, frontenis y tenis, usando dos pelotas de distintas calidades en el caso de pelotas de frontenis. Teniendo en cuenta que las posibilidades que ofrece cada experiencia son múltiples, se han seleccionado aquí tan sólo algunas situaciones concretas, pretendiendo poner de manifiesto la potencialidad de Audia para el estudio del coeficiente de restitución en choques. En particular se analizan las variaciones observadas con el tipo de pelota, con la calidad de éstas y con la temperatura del choque. Adicionalmente, al final de la exposición se sugieren también otras posibles experiencias o situaciones físicas que se podrían desarrollar con este kit.

4.4.2 Descripción teórica

4.4.2.1 Coeficiente de restitución en choques

Se define **colisión o impacto** como la interacción entre dos cuerpos en un intervalo muy corto de tiempo en el que se ejercen fuerzas internas muy grandes, considerando despreciables las fuerzas externas [12]. Como tal no es preciso que exista contacto físico entre las partículas (por ejemplo en el caso de cargas eléctricas), aunque nosotros nos referiremos aquí al choque frontal de dos cuerpos que se aproximan entre sí y finalmente se golpean uno contra el otro. En esta interacción, las fuerzas entre las dos partículas (internas al sistema si consideramos éste al formado por las dos partículas) alteran sus movimientos, produciéndose un intercambio de cantidad de movimiento y energía.

Debido a que solo actúan fuerzas internas al sistema, la cantidad de movimiento del sistema se mantiene constante durante el choque. En cuanto a las energías, la diferencia de energías cinéticas antes y después del choque se invierte en la deformación de los cuerpos. Los choques se pueden clasificar en términos del denominado **coeficiente de restitución del choque**, relacionado con la energía absorbida en la deformación [13]:

- o Choques completamente elásticos: se conserva la energía cinética durante el choque, de forma que no existe pérdida de energía por deformación o variación de temperaturas ni por rozamiento. Esto significa que los cuerpos no quedan deformados como consecuencia del choque, recuperando por completo su forma original. El coeficiente de restitución es igual a la unidad.
- o Choques inelásticos (o parcialmente elásticos): en estos choques existe una pérdida de energía cinética. Como consecuencia, los cuerpos que colisionan pueden sufrir deformaciones y/o aumento de su temperatura. Dependiendo del grado de elasticidad del choque el coeficiente de restitución varía entre uno y cero.
- o Choques completamente inelásticos: los cuerpos quedan completamente deformados tras el choque, de forma que los dos cuerpos permanecen unidos entre sí tras la colisión. En este caso el coeficiente de restitución es cero.

El coeficiente de restitución (con un valor comprendido entre cero y uno) está pues relacionado con el grado de elasticidad de las dos partículas que chocan, y es función de la pérdida de energía cinética en el choque. En el caso en estudio, de choque frontal, el coeficiente de restitución se puede determinar en función de las velocidades de las partículas antes y después del choque [13]:

$$e = - \frac{(V_2)_f - (V_1)_f}{(V_2)_i - (V_1)_i} \quad (4.4.1)$$

donde:

$(V_1)_i$ = velocidad de la primera partícula antes del choque.

$(V_1)_f$ = velocidad de la primera partícula después del choque.

$(V_2)_i$ = velocidad de la segunda partícula antes del choque.

$(V_2)_f$ = velocidad de la segunda partícula tras el choque

4.4.2.2 Caída libre de una pelota y choques sucesivos con el suelo

Si dejamos caer una pelota desde una cierta altura, partiendo del reposo, los sucesivos choques van a suponer que la pelota se eleve de nuevo una cierta altura y vuelva a caer. Sólo si los choques fuesen perfectamente elásticos, la altura sería siempre la misma e igual a la inicial. Para choques parcialmente elásticos, como va a ocurrir siempre en la realidad, la pelota sube a una altura menor cada vez, figura 4.4.1. Podemos determinar el coeficiente de restitución en cada choque si conocemos las velocidades de la pelota antes y después del mismo [14].

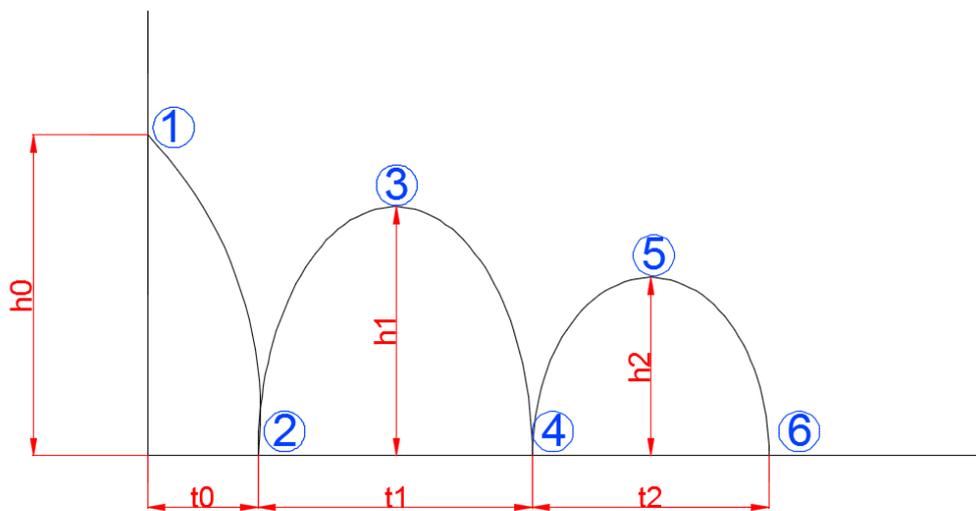


Fig.4.4.1: Esquema del suceso

Consideremos el primero de los choques, punto 2 de la fig. 4.4.1. Necesitamos determinar la velocidad de la pelota antes y después de dicho choque.

En esta situación física, la pelota que cae o que rebota tras cada choque, sufre un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado (MRUA), de forma que debemos aplicar las ecuaciones correspondientes a dicho movimiento [15]:

$$x(t) = x_0 + v_0 \cdot t + \frac{a \cdot t^2}{2} \quad (4.4.2)$$

$$v(t) = v_0 + a \cdot t \quad (4.4.3)$$

donde:

$x(t)$: posición en función del tiempo.

$v(t)$: velocidad en función del tiempo.

x_0 : posición inicial.

v_0 : velocidad inicial.

a : aceleración.

El movimiento concreto que estamos analizando está influenciado únicamente por la acción de la gravedad, sufriendo por tanto una aceleración orientada hacia el centro de la Tierra, que a nivel local del plano del suelo apunta hacia abajo, cuyo valor depende del lugar en el que nos encontremos. En la Tierra y para alturas pequeñas este valor es de aproximadamente $9,81 \text{ m/s}^2$ (que se denota por "g") (aunque hay pequeñas variaciones dependiendo del lugar concreto de la Tierra), lo que significa que los cuerpos que se mueven bajo la acción de la gravedad aumentan o disminuyen su velocidad a razón constante de $9,81 \text{ m/s}$ cada segundo.

Vamos a considerar despreciable la resistencia del aire, lo cual no es completamente cierto, aunque en principio es una buena suposición para recorridos pequeños, como vamos a considerar en esta experiencia.

En la determinación concreta de la velocidad antes y después del choque en el punto 2, aplicando las ecuaciones de MRUA, procederemos de la siguiente forma:

- La velocidad de la pelota antes del choque (v_{ac2}) va a ser la velocidad con la que llega la pelota al suelo partiendo del reposo ($v_0 = 0$), considerando la situación de caída libre (donde solo actúa g). Aplicamos las ecuaciones del MRUA, donde necesitamos únicamente la altura de lanzamiento (h_0), que en la realización práctica va a ser la misma en todos los casos. Tomemos como origen de movimientos el punto más alto, y como sentido de movimiento hacia abajo. Así:
 - x : posición final de la pelota = h_0 .
 - x_0 : posición de partida de las pelotas = 0
 - a : aceleración de la gravedad = g
 - v_{ac2} : velocidad al llegar al suelo (va a ser la velocidad antes del choque)
 - v_0 : velocidad inicial de las pelotas = 0

Despejando el tiempo de la primera ecuación y sustituyendo en la segunda, tendremos:

$$t_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot h_0}{g}} \quad (4.4.4)$$

$$v_{ac2} = g \cdot t_0 \quad (4.4.5)$$

Como vemos en las ecuaciones la velocidad con la que llega la pelota al suelo solo depende de la altura de lanzamiento y del valor de g . De esta forma, la velocidad va a ser igual para todas las pelotas y para todas las situaciones de estudio ya que la altura de lanzamiento la vamos a mantener invariable, como ya se ha comentado.

- Debemos determinar también la velocidad de salida de la pelota tras el choque (v_{dc2}). Para ello consideremos el movimiento ulterior de la pelota tras dicho choque, en el que la pelota se mueve hacia arriba partiendo con una velocidad inicial (v_{dc2}) bajo la acción de la gravedad, decelerándose por tanto, hasta que alcanza el punto más alto, punto 3, momento en que la velocidad se vuelve a hacer cero. A partir de este instante, la pelota se moverá de nuevo hacia abajo bajo la acción de la gravedad partiendo del reposo. Es muy sencillo demostrar que el tiempo que tarda la pelota en subir del punto 2 al 3 es el mismo que tarda la pelota en volver a bajar del punto 3 al suelo. Justamente nos vamos a servir en la realización práctica de la medida del tiempo entre dos choques sucesivos (puntos 2 y 3) para determinar la velocidad de la pelota tras el choque (v_{dc2}). Llamemos t_1 a este tiempo, que es pues el doble del tiempo que tarda la pelota en subir del punto 2 al punto 3, y apliquemos de nuevo la ecuación de la velocidad del MRUA, ec. (4.4.3), con:

$v_0 = v_{dc2}$: velocidad después del choque (en el punto 2)

v = velocidad final (en el punto 3) = 0

$a = -g$

donde estamos tomando origen de movimientos en el punto 2 y sentido positivo hacia arriba. Despejando:

$$v_{dc2} = v - a \cdot t = g \cdot t_1/2 \quad (4.4.6)$$

Una vez calculadas las velocidades de la pelota antes y después del primer choque (punto 2), determinamos el coeficiente de restitución en el choque entre

la pelota y el suelo usando la expresión (4.4.1), donde en este caso el objeto 2 es el suelo, que permanece en reposo en todo momento, de forma que:

$(V_2)_f=(V_2)_i=0$ = velocidad del suelo antes y después del choque.

$(V_1)_i$ = velocidad de la pelota antes del choque = v_{ac2}

$(V_1)_f$ = velocidad de la pelota después del choque = v_{dc2}

De las ecuaciones (4.4.4), (4.4.5) y (4.4.6):

$$e = -\frac{(V_{dc2})}{(V_{ac2})} = \frac{g \cdot t_1}{2 \cdot g \cdot t_0} = \frac{t_1}{2 \cdot t_0} = \frac{t_1}{2 \sqrt{\frac{2 \cdot h_0}{g}}} \quad (4.4.7)$$

Como vemos, para la determinación del coeficiente de restitución solo necesitamos la altura inicial de lanzamiento (h_0) y el tiempo transcurrido entre los dos primeros choques (t_1) (además del valor de g).

Conviene destacar que estamos suponiendo que la pelota se mantiene en todo momento en la vertical de lanzamiento y que no sufre desviaciones respecto de dicha vertical, lo cual será en realidad difícil de conseguir en la experiencia, lo que introducirá pequeños errores en los cálculos.

De la misma forma que podemos calcular el coeficiente de restitución del choque entre la pelota y el suelo a partir del tiempo transcurrido entre el primer y el segundo choque con el suelo (t_1), podemos determinar dicho coeficiente de restitución a partir de los sucesivos choques, conociendo los tiempos entre los mismos. Por ejemplo, podemos determinar e a partir del segundo choque, es decir, si somos capaces de determinar la velocidad de la pelota antes y después de dicho choque (punto 4). Para ello necesitamos v_{ac4} y v_{dc4} , donde es inmediato demostrar que v_{ac4} tiene el mismo valor que la velocidad tras del choque en el punto 2, v_{dc2} , que hemos calculamos a partir de $t_1/2$, ec. (4.4.6), y v_{dc4} lo podemos calcular igual que hemos hecho para el punto 2, utilizando la mitad del tiempo entre el 2º y 3º choque (puntos 4 y 6), $t_2/2$.

$$v_{dc4} = g \cdot \frac{t_2}{2} \quad (4.4.8)$$

Así:

$$e = -\frac{v_{dc4}}{v_{ac4}} = \frac{g \cdot t_2 \cdot 2}{2 \cdot g \cdot t_1} = \frac{t_2}{t_1} \quad (4.3.9)$$

En este caso, como vemos, podemos determinar el coeficiente de restitución a partir de los tiempos transcurridos entre el primer y segundo choque (t_1) y entre el segundo y tercer choque (t_2), sin necesidad siquiera de conocer la altura inicial de lanzamiento de la pelota (h_0). De la misma forma, se puede determinar el coeficiente de restitución a partir de los tiempos sucesivos entre choques, simplemente como el cociente t_{n+1} / t_n .

En el caso de que la pelota se desvíe de la vertical, a medida que avanza el movimiento la desviación se irá haciendo mayor, por lo que cabe suponer que la determinación de e a partir de choques más avanzados puede dar lugar a valores algo más erróneos.

4.4.2.3 Determinación del valor de la gravedad

Con esta misma experiencia de dejar caer una pelota partiendo del reposo desde una altura conocida y midiendo los tiempos sucesivos entre choques podemos determinar también la aceleración de la gravedad [16].

Apliquemos la ecuación (4.4.2), correspondiente a las posiciones en el MRUA, al tramo 2-3 de la figura 4.4.1, en el punto más alto (punto 3), donde en este caso:

$$x=h_1$$

$$x_0=0$$

$$v_0 = v_{dc2} = \text{velocidad después del choque en el punto 2.}$$

Así, tenemos:

$$h_1 = v_{dc2} \cdot \frac{t_1}{2} - 0.5 \cdot g \cdot \left(\frac{t_1}{2}\right)^2 \quad (4.4.10)$$

donde v_{dc2} viene dado por la ecuación [4.3.6].

Así:

$$h_1 = \frac{g \cdot t_1 \cdot t_1}{4} - 0.5 \cdot g \cdot \frac{t_1^2}{4} \quad (4.4.11)$$

Despejando obtenemos el valor de la gravedad:

$$g = \frac{8 \cdot h_1}{t_1^2} \quad (4.4.12)$$

expresión que nos da g en función de t_1 y h_1 , con el inconveniente de que no conocemos h_1 . Sin embargo, de la misma forma que hemos procedido, si aplicamos la ecuación (4.3.2), correspondiente a las posiciones en el MRUA, al tramo 4-5 de la figura 4.4.1, en el punto más alto (punto 5), podemos relacionar la altura h_2 con el tiempo t_2 :

$$g = \frac{8 \cdot h_2}{t_2^2} \quad (4.4.13)$$

Puesto que los tiempos t_1 y t_2 están relacionados mediante el coeficiente de restitución, ec. (4.4.9), al igual que los tiempos t_0 y t_1 , ec (4.4.7). tendremos que:

$$e = \frac{t_1/2}{t_0} = \frac{t_2}{t_1} \quad (4.4.14)$$

Sustituyendo en la ec. (4.4.14) el tiempo t_0 determinado en la ec. (4.4.4):

$$g = \frac{8 \cdot t_2^2 \cdot h_0}{t_1^4} \quad (4.4.15)$$

4.4.3 Material a utilizar en el desarrollo de la práctica

El material a utilizar para el montaje de esta experiencia es de fácil acceso, por ejemplo en cualquier tienda de deporte, de una forma económica. El material aquí indicado puede ser sustituido o reemplazado por material similar.

- Cuatro pelotas cuyo coeficiente de restitución vamos a calcular:
 - Dos pelotas de frontenis, una de buena y otra de mala calidad:

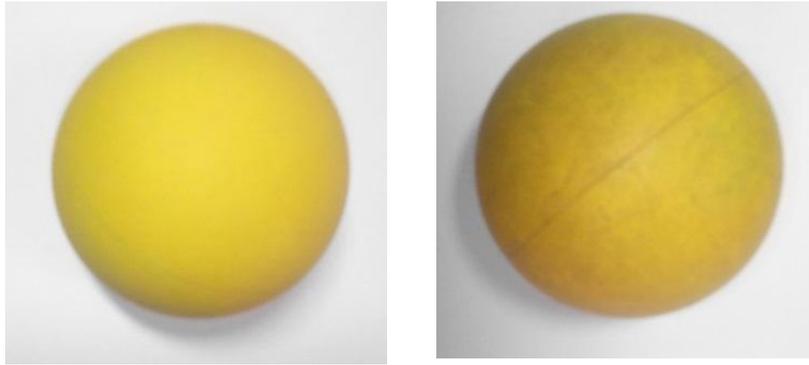


Fig. 4.4.2: pelotas de frontenis de diferente marca, una (izq.) de mejor calidad que otra (dcha.)

- o Una pelota de tenis y otra de ping-pong:



Fig. 4.4.3: Pelota de tenis (izq.) y pelota de ping-pong (dcha.)

- Al igual que para el resto de experiencias, se va a usar un móvil Android y aplicación Audia para Android.

4.4.4 Descripción del montaje experimental

El montaje de los elementos para esta práctica es bastante sencillo, tal y como se puede observar en la figura. 4.4.4. Las pelotas se situarán en una superficie elevada a una distancia conocida del suelo, contra el que chocarán posteriormente. Las pelotas se deben dejar caer contra el suelo, partiendo del reposo. El montaje puede ser cualquier otro que nos garantice que la velocidad de partida en dirección vertical de las pelotas es cero, y que por tanto se produzca el choque frontalmente contra el suelo tal y como hemos descrito en las ecuaciones anteriores.

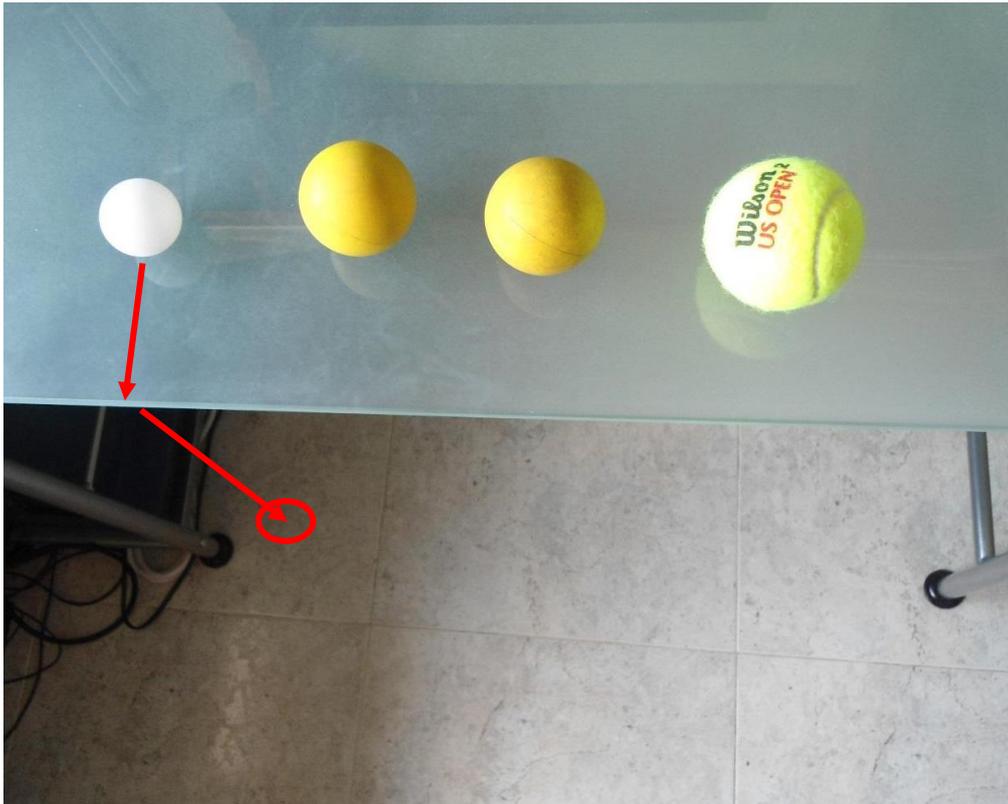


Fig. 4.4.4: Disposición del montaje para la toma de datos

En el montaje experimental utilizado se han dejado caer las cuatro pelotas desde la misma mesa, a una altura de 753 mm (h_0), dejándolas dar dos botes, grabando con la aplicación Audia estos dos primeros golpes que da la pelota al chocar contra el suelo. Para ello hay que entrar en la aplicación, ir a herramientas y elegir la opción grabadora de sonido. Para el caso de la determinación de la aceleración de la gravedad, se grabarán los tres primeros botes.

El programa entregará una gráfica con la intensidad del sonido y con el tiempo transcurrido entre los dos botes, así como un archivo Excel con todos los datos recogidos. Se repetirá varias veces el experimento para poder sacar una media más adecuada del coeficiente de restitución del choque. En este caso se ha repetido cuatro veces.

En la práctica se han hecho medidas a tres temperaturas diferentes: -20, 25 y 90 °C. Estas temperaturas se han conseguido de la siguiente forma:

-20°C: congelador doméstico convencional.

25°C: temperatura ambiente.

90°C: horno eléctrico doméstico.

4.4.5 Resultados experimentales obtenidos

La experiencia se basa en determinar el coeficiente de restitución en choques para las pelotas en estudio y para las temperaturas de -20°C , 25°C y 90°C y así poder sacar conclusiones de forma comparativa. La toma de datos consiste en medir el tiempo entre los dos primeros botes de las pelotas, repitiendo las experiencias cuatro veces y determinando la media.

Los archivos que nos ofrece Audia son una imagen que representa la intensidad del sonido captado en función del tiempo, fig. 4.4.5, y un fichero Excel con estos mismos datos, del que podremos extraer la información de los tiempos con gran precisión, cuya gráfica se muestra en la fig. 4.4.6.

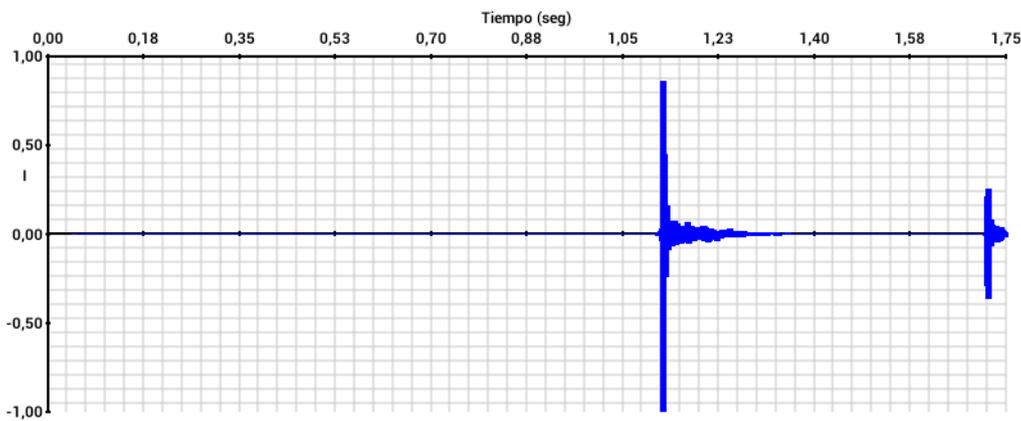


Fig. 4.4.5: Imagen de la intensidad en función del tiempo aportada por la aplicación Audia.

En realidad, en el archivo Excel, Audia nos ofrece la intensidad para cada número de muestra tomado por la aplicación. La misma aplicación Audia nos proporciona también la fórmula para convertir los números de muestra a tiempo:

$$\text{Tiempo} = \frac{(n-1) \cdot 1000}{44100} \quad (4.4.16)$$

La visualización gráfica de dichos datos nos permite determinar mejor dónde se encuentran los picos de máxima intensidad, que se corresponden con los instantes de choque de las pelotas, fig. 4.4.6.

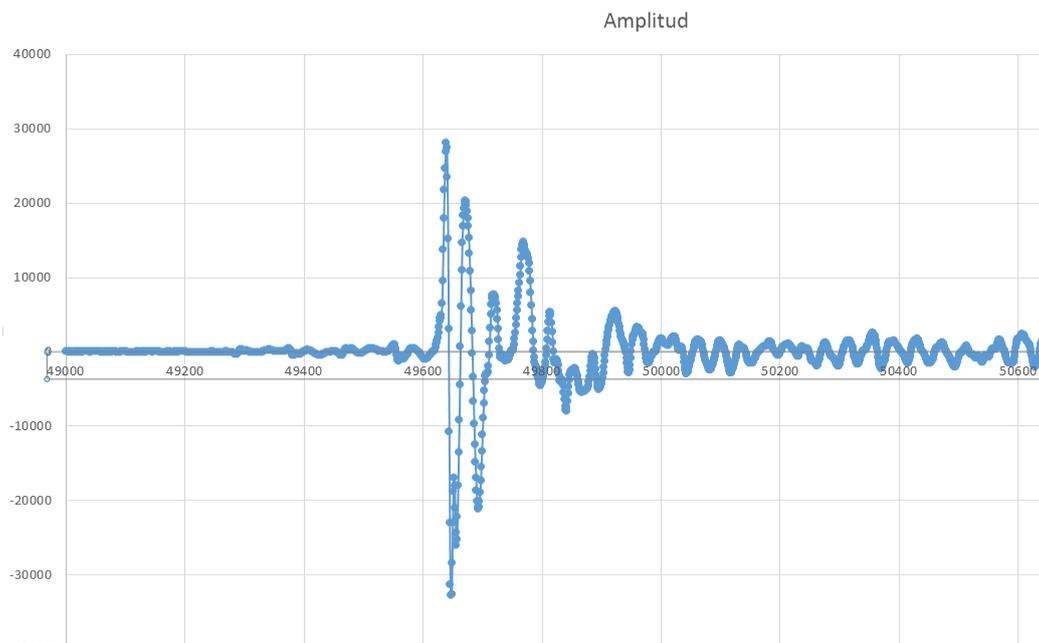


Fig. 4.4.6: gráfica obtenida a partir del fichero Excel que nos aporta Audia, en la que se representa la amplitud en función del número de muestra tomado. (Esta grafica se corresponde con una ampliación del primer bote de la fig. 4.4.5)

Los tiempos entre los dos primeros botes obtenidos de las cuatro repeticiones realizadas para cada pelota y cada temperatura se muestran en la tabla 4.4.1.

Tabla 4.4.1: valores de los tiempos (en milisegundos) entre los dos primeros botes para caso de estudio.

Pelota	Temperatura (°C)	(t ₁) ¹	(t ₁) ²	(t ₁) ³	(t ₁) ⁴
Ping-pong	-20	668	672	669	661
	25	601	602	596	602
	90	643	641	642	641
Frontenis mala	-20	315	365	379	403
	25	663	661	657	657
	90	722	722	723	725
Frontenis buena	-20	316	363	403	416
	25	676	677	679	676
	90	722	717	722	720
Tenis	-20	332	356	369	367
	25	594	587	592	586
	90	644	649	651	650

Como podemos observar la repetitividad de los datos es muy grande. Por ejemplo, para la pelota de ping-pong a -20°C obtenemos 3.25 ms de desviación media y para la pelota de frontenis a 90°C obtenemos una desviación media de 1 ms.

En la tabla 4.4.2 quedan recogidos las medias de los tiempos (en milisegundos) entre los dos primeros botes para las diferentes situaciones de estudio.

Tabla 4.4.2: medias de los tiempos (en milisegundos) entre los dos primeros botes de cada pelota para las tres temperaturas de estudio.

	-20°C	$+25^{\circ}\text{C}$	$+90^{\circ}\text{C}$
Pelota de ping-pong	668	601	642
Pelota de frontenis de mala calidad	366	660	723
Pelota de frontenis de buena calidad	375	677	720
Pelota de tenis	356	590	648

A partir del valor de h_0 y del tiempo transcurrido entre los dos primeros botes, calculamos el valor del coeficiente de restitución del choque para cada pelota y para cada temperatura de estudio, aplicando para ello la ec. (4.4.7).

En la tabla 4.4.3 y en la figura 4.4.8 quedan reflejados los diferentes coeficientes de restitución obtenidos para las cuatro pelotas objeto de estudio y para las tres temperaturas de estudio.

Tabla 4.4.3: coeficientes de restitución en choque obtenidos para las cuatro pelotas y para las tres temperaturas de estudio

	-20°C	$+25^{\circ}\text{C}$	$+90^{\circ}\text{C}$
Pelota de ping-pong	0,853	0,768	0,819
Pelota de frontenis de mala calidad	0,467	0,842	0,924
Pelota de frontenis de buena calidad	0,48	0,865	0,919
Pelota de tenis	0,454	0,753	0,827

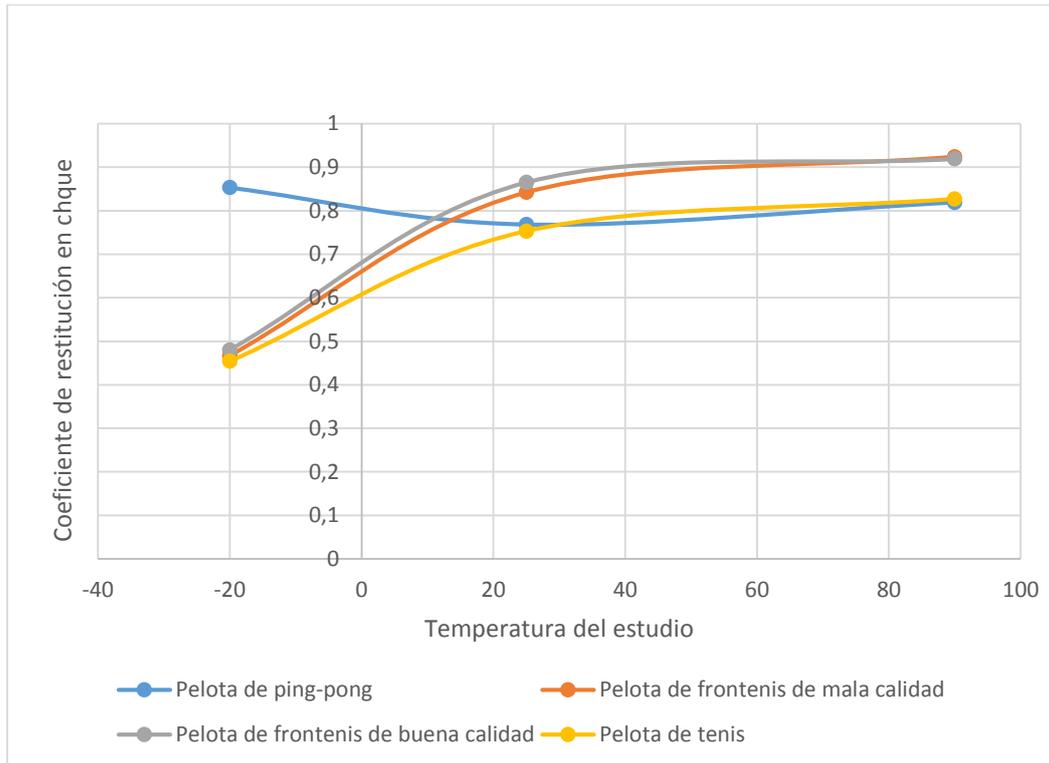


Fig. 4.3.7: coeficientes de restitución en choque obtenidos para las cuatro pelotas y para las tres temperaturas de estudio

Analizando los datos a temperatura ambiente, podemos observar que el coeficiente de restitución en el choque con el suelo de las pelotas de tenis y de ping-pong es similar, y menor que el de las pelotas de frontenis, lo que muestra propiedades elásticas diferentes entre los diferentes materiales de las pelotas en estudio. En concreto, obtenemos un coeficiente de restitución en el choque con el suelo ligeramente mayor para la pelota de frontenis de mejor calidad, respecto a la de peor calidad, lo que corrobora sus calidades y propiedades. Estas mismas observaciones entre las diferentes pelotas se mantienen para las diferentes temperaturas en estudio, a excepción de la pelota de ping-pong a la temperatura de -20°C , que muestra un elevado coeficiente de restitución, muy superior al resto de pelotas.

Las diferencias en el coeficiente de restitución de las diferentes pelotas se deben atribuir a los diferentes materiales con los que están fabricadas: las pelotas de frontenis son de caucho presurizado, las de tenis son de caucho presurizado recubiertas de fieltro, hecho normalmente de nailon, y las de ping-pong son de celuloide (nitrato de celulosa).

En cuanto al comportamiento con la temperatura, a excepción de la pelota de ping-pong, observamos por lo general que el coeficiente de restitución aumenta

con la temperatura, siendo el aumento mucho más pronunciado en el cambio de -20°C a 25°C . Este comportamiento se puede entender considerando que a menor temperatura las pelotas son más rígidas y muestran menor elasticidad.

También se ha realizado una experiencia en la que se ha dejado caer la pelota de tenis (a 25°C) y dar tres botes, captando el sonido con Audia, midiendo de esta forma los tiempos entre el primer y segundo bote (t_1) y entre el segundo y el tercer bote (t_2). Tras realizar cuatro repeticiones, las medias de tiempo son las siguientes:

$$t_1 = 587,3 \text{ ms} \qquad t_2 = 454 \text{ ms}$$

Aplicando la ecuación (4.4.13) obtenemos el coeficiente de restitución en el choque usando los datos del primer y segundo bote, obteniendo un valor de 0,773. Si lo comparamos con el obtenido para el primer bote (0,753) observamos una cierta variación, que como ya se ha mencionado cabe asignar principalmente a una desviación de la pelota respecto de la vertical, aunque existen algunos otros factores no considerados que también pueden influir (rozamiento con el aire, etc.).

Cambio de superficie de choque

Para la pelota de tenis se ha probado a cambiar la superficie del suelo y en vez de utilizar baldosas de cerámica se ha utilizado aglomerado de madera contrachapado de 40 mm de espesor, para observar así también como varía el coeficiente de restitución. La altura desde donde se ha soltado la pelota se ha mantenido (753 mm), habiendo realizado la experiencia solo para temperatura ambiente (25°C).

Los tiempos obtenidos entre los dos primeros botes de la pelota han sido:

$$(t_1)^1 = 584 \text{ ms} / (t_1)^2 = 583 \text{ ms} / (t_1)^3 = 592 \text{ ms} / (t_1)^4 = 585 \text{ ms}$$

Media de tiempos obtenida: $\overline{t_1} = 586 \text{ ms}$

Con este valor, el coeficiente de restitución obtenido es 0,748.

En la tabla 4.4.4 se puede ver la comparativa de los resultados obtenidos para la pelota de tenis, a 25°C , para cada tipo de suelo, baldosa cerámica y tabla de aglomerado de madera.

Tabla 4.4.4: comparativa de los resultados obtenidos para pelota de tenis (a 25°C) para suelo de baldosa cerámica y para suelo de aglomerado de madera

	Media de tiempo (ms)	Coefficiente de restitución del choque
Suelo de baldosa cerámica	590	0,753
Suelo de aglomerado de madera	586	0,748

Como se puede observar, la variación en el coeficiente de restitución en este caso no es muy grande. Aun así, se obtiene un valor más pequeño de e para el choque con el aglomerado de madera respecto al choque con baldosa cerámica, llegando a la conclusión de que se absorbe mayor energía en el choque con el contrachapado que con la baldosa cerámica. Este resultado se puede interpretar entendiendo que la madera es algo más deformable que la baldosa. Si quisiéramos observar mayores diferencias del coeficiente de restitución, sería conveniente elegir superficies muy diferentes, como por ejemplo superficies de goma o cualquier otra con características elásticas totalmente distintas.

Comparando los resultados obtenidos de los coeficientes de restitución con otros estudios, como es el caso de un estudio con una pelota de ping-pong [19] vemos que se obtienen valores similares, por lo que podemos considerar que los resultados obtenidos con Audia son adecuados.

Determinación de la aceleración de la gravedad

Como en el resto de las experiencias, se va a usar la aplicación Audia (módulo de grabación), grabando en este caso los tres primeros botes de una pelota contra el suelo. De nuevo, a partir del Excel que nos proporciona la aplicación, obtenemos con precisión los tiempos entre los botes.

Esta experiencia se ha llevado a cabo con la pelota de tenis a una temperatura de 25°C y se han hecho cuatro repeticiones. Los resultados obtenidos de tiempos entre el primer y el segundo bote y entre el segundo y el tercer bote se pueden observar en la tabla 4.4.5.

Tabla 4.4.5: tiempos entre el primer y el segundo bote y entre el segundo y el tercer bote para pelota de tenis a 25°C en milisegundos.

	t_1	t_2
Primera repetición	591	456
Segunda repetición	594	459
Tercera repetición	581	451
Cuarta repetición	583	450

Con estos datos, y sustituyendo en la ecuación (4.4.15), obtenemos el valor de la gravedad para las cuatro repeticiones, tabla 4.4.6.

Tabla 4.4.6: valor de la aceleración de la gravedad para las cuatro repeticiones del experimento.

	Aceleración de la gravedad (m/s ²)
Primera repetición	10,26
Segunda repetición	10,19
Tercera repetición	10,75
Cuarta repetición	10,56

La media de estos valores es 10.44 (m/s²), obteniendo así un error relativo frente al valor teórico de 6.42%. Este error es asumible considerando de nuevo que cabe esperar que el bote de la pelota nos es perfectamente vertical, etc.

Como complemento a esta experiencia se propone hacer ensayos variando la humedad para observar el efecto de éste parámetro sobre el coeficiente de restitución en choques con estos u otros tipos de pelotas.

Se propone como complemento probar con superficies que posean características muy distintas y así observar mayores diferencias en los coeficientes de restitución.

4.4.6 Conclusiones

En base a los resultados obtenidos podemos sacar las siguientes conclusiones:

- La aplicación Audia, a través del módulo “grabadora del sonido”, nos permite captar los sucesivos botes de una pelota al chocar con el suelo, permitiéndonos determinar el valor del coeficiente de restitución del choque a partir de los tiempos sucesivos de choque, obteniendo así información de las propiedades elásticas de las pelotas en estudio.
- La dispersión en las medidas de tiempo entre los dos primeros botes en diferentes repeticiones de los experimentos es muy pequeña, lo que da garantía en la precisión de los resultados.
- Se observan diferencias en el coeficiente de restitución entre las diferentes pelotas en estudio, consecuencia de los diferentes materiales con las que están fabricadas.

El análisis efectuado sobre pelotas de un mismo deporte pero de diferentes calidades ha mostrado coeficientes de restitución ligeramente diferentes, con un coeficiente de restitución ligeramente superior para la pelota de mejor calidad.

- En general observamos que el coeficiente de restitución en choques aumenta con la temperatura, aunque no lo hace de forma lineal, observando un mayor aumento desde -20°C a 25°C respecto al aumento de 25°C a 90°C .
- La experiencia nos permite, de forma muy sencilla, hacer medidas cambiando también el tipo de suelo, lo que obviamente va a influir también en el coeficiente de restitución del choque entre la pelota y el suelo.
- La determinación del coeficiente de restitución se puede realizar utilizando botes sucesivos de las pelotas, obteniendo datos similares. Sin embargo, cabe esperar que los botes sucesivos den más error debido a las desviaciones de la vertical, que se irán acumulando.
- La práctica nos permite también determinar, de forma sencilla, el valor de la aceleración de la gravedad, habiendo obtenido valores con errores pequeños respecto al valor teórico ($9,81 \text{ m/s}^2$). Los errores se deben asociar también principalmente a las desviaciones de la pelota respecto a la vertical.
- Esta experiencia se puede ampliar con el uso de más pelotas de varias calidades, tomando muestras en un mayor número de temperaturas, calculando la gravedad con más tipos de pelotas, etc.

Capítulo 5

Estudio económico de los elementos que componen el kit de bajo coste

5.1 Composición del kit

El principal objetivo de este trabajo fin de grado consiste en la elaboración de un kit de bajo coste que nos permita el desarrollo de una serie de prácticas sobre acústica usando la aplicación Audia para dispositivos móviles.

La lista del material usado se detalla a continuación:

- Para todas las prácticas se ha usado un móvil Android y la aplicación Audia para Android.
- Varillas lisas de sección circular y rectangular. En concreto, para esta experiencia se han usado una varilla de acero de sección circular de 4 mm de diámetro y longitud de un metro y una varilla de aluminio de sección rectangular de 10 mm x 1.8 mm y longitud de medio metro. La longitud desde el extremo libre al extremo fijo de las varillas en los experimentos ha sido: para varillas de sección circular 355, 555, 750 y 950 mm y para varillas de sección rectangular 205, 300 y 401 mm.
- Sistema de fijación de las varillas. En concreto, se han utilizado dos tacos de madera y una sargenta para sujetar las varillas. Tales elementos de fijación pueden variar, siempre y cuando se mantenga bien sujeto uno de los extremos de las varillas.
- Caja de poliestireno extruido. Para la fabricación de la caja se han usado láminas de poliestireno extruido. En concreto, para esta experiencia, se ha construido una caja de dimensiones interiores: 250 x 200 x 110 milímetros con uno de sus lados de mayor superficie (250 x 200 mm) abierto.
- Tres láminas de poliestireno extruido, con espesores de 40 mm cada una, de forma que al colocarlas unas junto a las otras vamos a ir obteniendo espesores totales de 40, 80 y 120 mm.
- Tres láminas de poliuretano de baja densidad, dos de espesores de 30 mm y una de espesor 100 mm, consiguiendo de esta forma, al ir las poniendo juntas, espesores totales de 60, 100 y 160 mm.
- Dos láminas de poliuretano de alta densidad, con espesores ambos de 50 mm, consiguiendo así espesores totales de 50 y 100 mm.

- Altavoz bluetooth. Este altavoz posee unas dimensiones reducidas por lo que es susceptible de meterlo en las cajas que se van a usar en esta experiencia: 60mm de diámetro y 70 mm de altura.
- Cuatro pelotas cuyo coeficiente de restitución se ha calculado:
 - Dos pelotas de frontenis, una de buena y otra de mala calidad.
 - Una pelota de tenis.
 - Una pelota de ping pong.

Todo el material usado en estas experiencias queda recogido de forma conjunta en la figura 5.1.



Fig. 5.1: elementos que componen el kit de bajo coste usado para el desarrollo de las prácticas presentadas en éste Trabajo Fin de Grado.

5.2 Análisis del coste en materiales

Todo el material descrito es de bajo coste y de fácil adquisición, siendo bastante probable que parte de este material ya se tenga en posesión y no sea necesario comprarlo, haciendo una clara referencia a los términos usados en la introducción “BYOD y BYOT” relativos al uso de nuestros propios dispositivos y nuestra propia tecnología.

En la mayoría de los casos no es necesario usar exactamente el material que se ha descrito, pudiendo sustituirlo por otros que se tengan más a mano. Se puede cambiar el material y las dimensiones de las varillas, el material y las dimensiones de las cajas, los tipos y calidades de las pelotas, el teléfono utilizado puede ser cualquiera, el altavoz también se puede sustituir por otro, el sistema de fijación de las varillas puede ser distinto, etc.

Como ejemplo del coste que puede tener la adquisición de un kit de estas características se ha analizado los costes que se han tenido en este presente Trabajo Fin de Grado:

- Caja de poliestireno extruido: se ha comprado una plancha de este material de dimensiones 1250 x 600 x 40 milímetros con un coste de 3.34 €.
- Pelotas de frontón y de tenis: coste total de 5.35 €.
- Pelotas de ping-pong: pack de seis pelotas con un coste de 1.95 €.
- Smartphone con sistema operativo Android: en posesión.
- Altavoz bluetooth con un coste de 17.90 €.
- Sargentas y tacos de sujeción: en posesión.
- Dos varillas con un coste de 2.5 €.
- Tres láminas de poliestireno extruido: obtenidas de la plancha anteriormente citada
- Tres láminas de poliuretano de baja densidad: proporcionadas por el departamento de física de la materia condensada obtenidas de cajas de embalaje de equipos.

- Dos láminas de poliuretano de alta densidad: proporcionadas por el departamento de física de la materia condensada obtenida de cajas de embalaje de equipos.

Sumando estos costes individuales obtenemos un coste total de 31.04 €, coste muy económico y que variará en función de los materiales que tengamos a nuestra disposición.

Capítulo 6

Conclusiones

Después del estudio realizado durante la elaboración de este trabajo, podemos afirmar que se han alcanzado los objetivos que se propusieron en un inicio. Se han ampliado los conocimientos en el área de la acústica y de la elaboración de material docente, y a su vez el trabajo ha sido una labor de investigación y aprendizaje constante, desde el uso de la aplicación Audia hasta el análisis de todos los datos obtenidos con esta aplicación y su exposición en el trabajo, asimilando una metodología de trabajo dentro del campo de la investigación, y dentro de esta metodología:

- Entender que puede haber más de una solución y planteamientos posibles cuando se trata de resolver un problema.
- En un estudio de investigación, todo resultado obtenido, ya sea satisfactorio o no, así como el proceso realizado y la forma de plantear el estudio han de quedar reflejado y comentados para continuar después con el resultado obtenido como base para otros estudios o para no volver a repetir los mismos errores con la consecuente pérdida de tiempo.

En este trabajo hemos investigado el uso de la aplicación Audia y de los smartphones como recurso de apoyo en la educación, centrándonos en uno de los desarrollos tecnológicos que se espera que sean más prometedores en los próximos años, como es el hecho de aprovechar los propios dispositivos que todos llevamos encima de continuo o aprovechar el material que tengamos a nuestra disposición en nuestro entorno. En España, al igual que en otros países, existen grandes oportunidades para aprovechar esta situación ya que el porcentaje de alumnos que usan smartphones es muy elevado. Estos datos sustentan la conclusión de que realizar actividades utilizando los propios dispositivos de los alumnos es una posibilidad al alcance del profesorado en la actualidad. En nuestro caso se han planteado tres actividades, una relativa a las vibraciones transversales en una verilla metálica flexible, otra que consiste en la determinación de la absorción de sonido por distintos materiales y la última basada en el cálculo del coeficiente de restitución en choque de diferentes pelotas contra el suelo.

Las ventajas del uso de los propios dispositivos de los alumnos son grandes respecto a otras alternativas: aumenta la productividad personal de los alumnos, difumina las barreras entre el aprendizaje formal e informal, fomenta el aprendizaje social y el “aprender haciendo”, y reduce costes de una manera sostenible. Sin embargo, no hay que olvidar que también plantea nuevos retos como la constante actualización del profesorado para estar al tanto de las aplicaciones, que han de estar disponibles para cierta variedad de dispositivos, principalmente los basados en iOS y Android. También han de tener en cuenta en el planteamiento de sus actividades los momentos en los que sus alumnos

van a necesitar internet, ya que no se puede dar por sentada la conexión en todos los casos.

Como conclusiones concretas relativas a la elaboración de un kit docente de bajo coste y de fácil acceso basado en la aplicación Audia para Android para la realización de una serie de experiencias podemos decir que los resultados han sido, en general satisfactorios en términos de precisión y repetitividad en los sucesivos experimentos realizados llegando a la conclusión de que si es posible la elaboración de kits docentes con sus correspondientes prácticas que cumplan estos requisitos.

No obstante, nos hemos encontrado con numerosas dificultades a la hora de intentar llevar a cabo otras experiencias, por lo que las limitaciones de la metodología son evidentes y existe una dificultad fehaciente a la hora de seleccionar las experiencias que se pueden incluir en la línea de este proyecto. Todo esto es debido a las limitaciones de los dispositivos móviles así como al uso de un material de bajo coste o preferiblemente que se disponga ya de él.

Uno de los objetivos del proyecto se basas en la reducción de costes en la enseñanza práctica en comparativa con los caros laboratorios tradicionales. Como se observa en el apartado de valoración del kit usado para la realización de las experiencias descritas en este Trabajo Fin de Grado, se han conseguido unos costes ligeramente superiores a los treinta euros, coste muy reducido teniendo en cuenta las posibilidades que brinda el kit conseguido.

Como conclusión final de este Trabajo Fin de Grado, estamos en disposición de afirmar que si es posible el diseño de un kit docente para el estudio experimental de las ondas sonoras partiendo de las condiciones inicialmente establecidas: inclusión del uso de smartphones, uso de la aplicación Audia y uso de material que se tenga ya en posesión o cuya adquisición no suponga un elevado coste económico, estando la verdadera dificultad en encontrar cuáles son las experiencias que se pueden desarrollar cumpliendo estos requisitos.

Capítulo 7

Posibles líneas futuras

Es bien conocido el dicho de “las investigaciones no se acaban, se abandonan.” Aquí hemos realizado un trabajo sólido que cumple con los objetivos del Trabajo Fin de Grado. El campo en el que nos hemos adentrado se asienta sobre grandes investigaciones y artículos y del mismo modo creemos que tiene un gran futuro por delante. Tras exponer nuestra aportación a este campo, creemos conveniente indicar cuales serían las líneas de trabajo más inmediatas que seguiríamos para mejorar las actividades.

Ciertos estudios han demostrado que el brindar la oportunidad a los estudiantes del uso de tecnologías de la información y la comunicación van en pro del aprendizaje del alumnado, como se ha detallado en la introducción de este trabajo [2], [3]. Este Trabajo Fin de Grado persigue la línea de brindar a los estudiantes la oportunidad de realizar ciertas experiencias con sus propios dispositivos móviles y con su propio material o en el peor de los casos con material de bajo coste y fácil acceso, proponiendo una recopilación de tres experiencias para que sean realizadas con un kit determinado.

En este sentido las posibilidades de continuar elaborando kits y prácticas realizables con estos kits de bajo coste y fácil acceso son infinitas, por lo que a continuación se propone y solo a modo de ejemplo posibles experiencias que se podrían tratar de realizar con kits fácilmente accesibles para cualquier alumnos y con un coste reducido en las líneas que se han seguido en este trabajo, es decir, incluyendo el uso de Smartphone y de la aplicación Audia:

- Cálculo de la velocidad del sonido en diferentes medios. Transmisión del sonido por cables de diferentes materiales.
- Análisis de las ondas sonoras armónicas.
- Estudio del nivel de intensidad.
- Superposición de ondas de la misma frecuencia.
- Superposición de ondas de distinta frecuencia.
- Estudio de ondas estacionarias en tubos acústicos.
- Efecto Doppler.
- Estudio de las diferencias entre la misma nota emitida por diferentes instrumentos (timbre, frecuencia fundamental y armónicos).

- Estudio de la acústica de diferentes entornos mediante los rebotes (reverberación) de las ondas sonoras. Eco múltiple.
- Medida del tiempo de reverberación al variar materiales.
- Amplitud del sonido en diferentes puntos de un tubo: determinación de las crestas y los valles (nodos y antinodos).
- Medida del coeficiente de absorción del sonido por diferentes gases.

Todas estas posibles experiencias que se citan habría que orientarlas, claro está, a su desarrollo con materiales de bajo coste, con el uso de smartphones y de la aplicación Audia. Obviamente no todas las experiencias que se han citado se podrán llevar a cabo de esta forma y, por supuesto habrá muchas otras experiencias que no se han listado y que reúnan las características necesarias siguiendo la línea de las experiencias realizadas en este trabajo.

Capítulo 8

Bibliografía

[1] Trabajo Fin de Grado: AUDIA: estudio de ondas sonoras y audiometrías en entorno Android. Autor: Juan Carlos Cañedo Sota. Universidad de Valladolid. Año 2014.

[2] Trabajo Fin de Máster. Actividades de aprendizaje utilizando sensores de dispositivos móviles personales. Universidad de Valladolid. Autor: Santiago González Gancedo. Año 2015

[3] Aulas 2.0 y uso de las TIC en la práctica docente. Ventajas uso tics.
<http://www.revistacomunicar.com/indice/articulo.php?numero=37-2011-20>

[4] Libro: Lecciones de física (Mecánica 4). Autor: M.R. Ortega. Departamento de Física Aplicada. Universidad de Córdoba. Segunda edición: Octubre 1996.

[5] Acústica básica.
<http://html.rincondelvago.com/acustica-basica.html> nociones de acústica.

[6] Cualidades del sonido.
http://www.ite.educacion.es/formacion/materiales/60/cd/02_elsonido/2_cualidades_del_sonido.html

[7] Libro: Física. Autores: M^a Isabel Píñar Gallardo, Ángel de Andrea González y Ana Gómez Martín. Editorial: Edelvives. Año 2003.

[8] Libro: Fundamentos de acústica. Autores: Lawrence E Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppens, James V. Sanders, Ed. Limusa. México 1990.

[9] Libro: Sonido y audición, capítulo 2, : Constantino Pérez Vega, Universidad de Cantabria (Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones).

[10] Teoría de absorción en la reflexión.
<http://www.redalyc.org/pdf/120/12021450002.pdf>

[11] Publicación: cálculo del coeficiente de reducción de ruido (NRC), de materiales, utilizando una cámara de insonorización. Autores: M.sc. Héctor Álvaro González B. Edwin Giovanni Salazar Narváez. Christian Hemerson Cabrera Castaño (Escuela de Tecnología Mecánica. Universidad Tecnológica de Pereira).

[12] Colisión de dos partículas. Departamento de física aplicada. Universidad de Sevilla.
http://laplace.us.es/wiki/index.php/Colisiones_de_dos_part%C3%ADculas

[13] Libro de física I: Fundamentos de física. Mecánica. Electromagnetismo. Universidad de Valladolid. Autor: M^a Ángeles Martín Bravo Parte de teoría de choques. Año 1993.

[14] Caída libre influenciada exclusivamente por la gravedad.
https://es.wikipedia.org/wiki/Ca%C3%ADda_libre

[15] Movimiento rectilíneo uniformemente acelerado (MRUA)
https://es.wikipedia.org/wiki/Movimiento_rectil%C3%ADneo_uniformemente_acelerado

[16] Artículo publicado en “The Physics Teacher, 51, 312 (2013);” Acoustic measurements of bouncing balls and the determination of gravitational acceleration. Autores: Oliver Schwarz, Patrik Vogt, and Jochen Kuhn.

[17] Modos normales de vibración de una barra elástica.
http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/ondas/vibracion_barra/vibracion_barra.htm

[18] Ondas transversales en barras.
http://fisica.medellin.unal.edu.co/recursos/lecciones/leccion_ondas_mecanicas_universidad/concepto/index33.htm

[19] Libro: Física de las ondas. Autor: Hector Alzate Lopez. Febrero de 2007. (Ondas transversales) <https://es.scribd.com/doc/52558759/12/Ondas-transversales>

[20] Vibraciones de una varilla
<http://www.ehu.eus/acustica/espanol/musica/inpees/inpees.html>

[21] Parámetros del sonido: altura, duración, intensidad, timbre.
http://maralboran.org/wikipedia/index.php/%C2%ADPar%C3%A1metros_del_sonido:_altura,_duraci%C3%B3n,_intensidad_y_timbre Practica 1

[22] Artículo publicado en “IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 36 (2012);”: Coefficient of restitution of sports balls A normal drop test. Autores: Adli Haron* y K A Ismail (School of Manufacturing Engineering, University Malaysia Perlis, 02600 Arau, Perlis, Malaysia.) Valores de varios coef. De restitución.

[23] Artículo: The Effect of Temperature and Humidity on the Performance of Baseballs and Softballs. Autores: Lloyd Smitha, Warren Faber.

[24] Artículo publicado en “The Physics Teacher, 45, 175 (2007)” :A Measurement of g Listening to Falling Balls. Autores: J. A. White, A. Medina, F. L. Román y S. Velasco.

[25] Choque inelástico.

http://es.wikipedia.org/wiki/Choque_inel%C3%A1stico

[26] Coeficiente de restitución en choques.

<http://www.fisicapractica.com/coeficiente-restitucion.php>

[27] Libro: Master Handbook of Acoustics. Quinta edición. Autores: F. Alton Everest Ken C. Pohlmann. Editorial: Mc Graw Hill.

[28] Percepción de altura, introducción a la acústica.

<http://www.eumus.edu.uy/docentes/maggiolo/acuapu/alt.html>

[29] Propagación del sonido.

https://es.wikipedia.org/wiki/Propagaci%C3%B3n_del_sonido

[30] Introducción a la acústica: Armónicos.

[https://es.wikipedia.org/wiki/Arm%C3%B3nico_intro_acustica_\(armonicos\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Arm%C3%B3nico_intro_acustica_(armonicos))

[31] Nociones básicas sobre los sonidos.

<http://help.apple.com/logicpro/mac/9.1.6/es/logicpro/instruments/index.html#chapter=A%26section=1%26tasks=true>

Anexo I

Guiones de las prácticas



OBJETIVO

Experimentar con varillas flexibles de distintas características (dimensiones, forma, material, modo de sujeción, etc.), observando las frecuencias de las vibraciones transversales en cada situación, corroborando la coincidencia entre los valores experimentales obtenidos y los valores teóricos esperados, poniendo especial énfasis en la repetitividad de las medidas obtenidas con la aplicación Audia.

MATERIAL A USAR

El material a utilizar para el montaje de esta experiencia es de fácil acceso, por ejemplo en cualquier ferretería, de una forma económica. El material aquí indicado puede ser sustituido o reemplazado por material similar.

- Varillas lisas de sección circular y rectangular.
En concreto, para esta experiencia se han usado una varilla de acero de sección circular de 4 mm de diámetro y longitud de un metro y una varilla de aluminio de sección rectangular de 10 mm x 1.8 mm y longitud de medio metro.
- Móvil Android y aplicación Audia para Android.
- Sistema de fijación de las varillas. En concreto, se han utilizado dos tacos de madera y una sargenta para sujetar las varillas. Tales elementos de fijación pueden variar, siempre y cuando se mantenga bien sujeto uno de los extremos de las varillas.

PROCEDIMIENTO: TOMA DE DATOS

La varilla se coloca entre los dos tacos de madera, prensándolos con la sargenta. La longitud (L) de la varilla a considerar en las ecuaciones es la que existe desde el punto de fijación hasta el extremo libre, de forma que se debe medir, una vez realizado el montaje indicado, utilizando una regla de longitud adecuada.

Este montaje permite, de hecho, usar una única varilla y considerar diferentes longitudes de la misma, analizando de esta forma cómo varían las frecuencias de vibración con la longitud. El micrófono del Smartphone se colocará a una distancia fija de la varilla.

El experimento consiste en ir colocando las diferentes varillas entre los tacos de madera y hacerlas vibrar, captando a continuación mediante el smartphone el



sonido emitido. La forma de hacer vibrar las varillas será empujando con el dedo el extremo libre de la varilla y soltar repentinamente obteniendo la vibración que se pueda observar en la Fig. 1.1. El sonido resultante se grabará con la aplicación Audia con el módulo Herramientas-Grabadora de sonido. Es aconsejable repetir las experiencias las veces que sea necesario hasta tener unos datos concluyentes (con tres o cuatro repeticiones bastará para comprobar la repetitividad de los resultados obtenidos).



Fig. 1.1: Varilla vibrando en el proceso de captación de datos experimentales.

Los datos obtenidos con la aplicación Audia son una imagen con el espectro de frecuencias a partir de la FFT (transformada rápida de Fourier) con decibelios a escala completa, y un Excel con la intensidad para cada frecuencia.

Una característica importante a destacar aquí de los resultados obtenidos es la dificultad de medir las frecuencias más bajas. Este hecho se debe a la imposibilidad de los micrófonos de los smartphones de captar frecuencias muy bajas.

Pese a estas dificultades, nos bastará, en realidad, con un conjunto de frecuencias (unas 8 o 10) para caracterizar las vibraciones de cada barra, por lo que tenemos datos suficientes con el rango de frecuencias considerado.

TEORÍA RELACIONADA

En esta experiencia se pretenden estudiar los modos de vibración transversales que se producen en una varilla (o barra) flexible al hacerla vibrar considerando



la siguiente situación de contorno: varilla sujeta por un extremo y libre en el otro (Fig. 1.2).

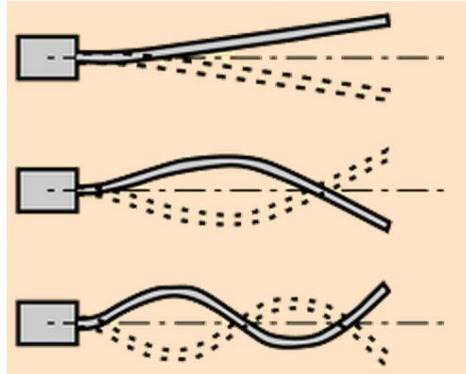


Fig. 1.2: Vibraciones transversales de una varilla flexible sujeta por un extremo y libre por otro.

Consideremos una varilla de longitud L , densidad volumétrica ρ y módulo (elástico) de Young E . Consideremos tanto varillas de sección circular y radio r como varillas de base rectangular y lados a y b , Fig. 1.3.

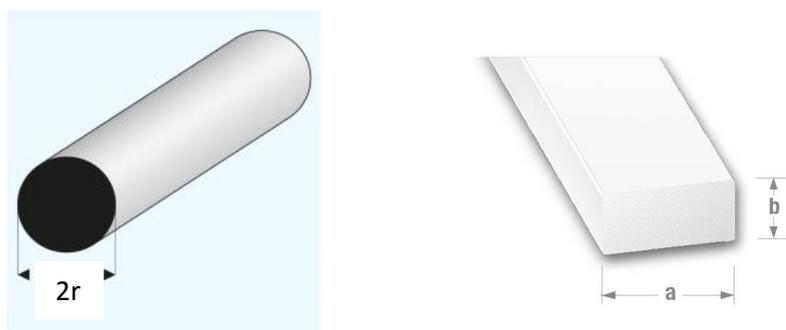


Fig. 1.3: Varillas de sección circular y de sección rectangular consideradas en esta experiencia

La ecuación diferencial del movimiento para ondas transversales en una varilla viene dada por:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -k^2 C^2 \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} \quad (1.1)$$

Al ser ondas estacionarias en un medio limitado, las soluciones son de la forma:

$$\psi(x,t)=y(x) \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (1.2)$$



Cada punto x de la barra vibra con una amplitud $y(x)$ y con frecuencia angular ω ($= 2\pi \cdot \nu$).

Condiciones de frontera.

Varilla sujeta por un extremo ($x=0$) y libre por el otro extremo ($x=L$), con las siguientes condiciones de contorno: está rígidamente empotrada por un extremo en $x=0$ y libre en $x=L$, el movimiento en la dirección “ y ” en $x=0$ está impedido y $\frac{\partial y}{\partial x} = 0$. Llevando estas condiciones a la ecuación de onda transversal y aplicando adicionalmente las condiciones de que $\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0$ y que $\frac{\partial^3 y}{\partial x^3} = 0$ en $x=L$, se llega a la solución que aporta las frecuencias correspondientes a los modos de vibración permitidos:

$$\nu_n = \frac{v k}{L^2} C_n \quad (1.3)$$

Siendo:

$$v \equiv \text{velocidad del sonido en el medio: } v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

$k \equiv$ radio de giro del área de la sección transversal:

$$\text{para sección rectangular } k = \frac{b}{\sqrt{12}}; \quad b \equiv \text{grueso de la varilla.}$$

$$\text{para sección circular } k = \frac{r}{2}.$$

$C_n \equiv$ número que corresponde al modo de vibración “ n ”:

$$C_n = \frac{r_n^2}{2\pi}; \quad r_n = (2n - 1) \frac{\pi}{2} \quad \text{con } n = \text{número natural}$$

Para los dos primeros armónicos, en vez de usar $n=1$ y $n=2$ se deben usar los valores $n=1.097$ y $n=1.995$, respectivamente.

La aplicación de las condiciones de frontera limita, como en el caso de una cuerda sujeta por ambos extremos, los modos de vibración permitidos de una varilla a un conjunto discreto de frecuencias. Sin embargo, en contraste con la cuerda, las frecuencias de los modos de vibración de una barra no son múltiplos (armónicos) de su fundamental; de hecho, se suele hablar de modos inarmónicos en este caso.



RESULTADOS

Se muestra la representación gráfica intensidad vs frecuencia en una de las medidas realizadas para cada varilla, en la misma gráfica (Fig. 1.4 y 1.5) de forma comparativa.

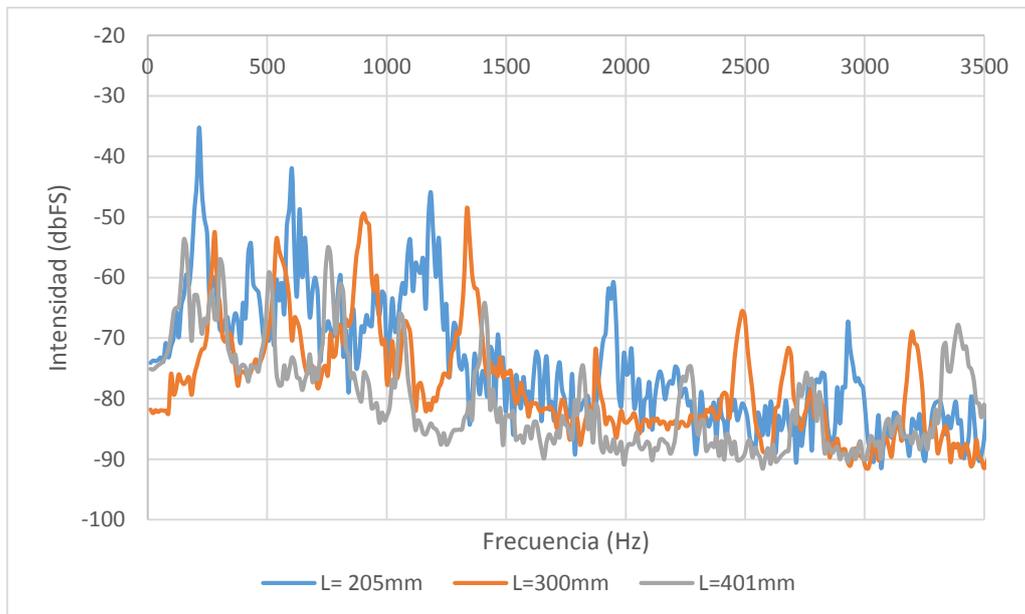


Fig. 1.4: Grafica de intensidad vs frecuencia obtenida con unas varillas de aluminio de sección rectangular (10 mm x 1.8 mm) de longitudes L=205 mm, L=300 mm y L=401 mm realizada en las medidas nº 2, nº 2 y nº 3 respectivamente.

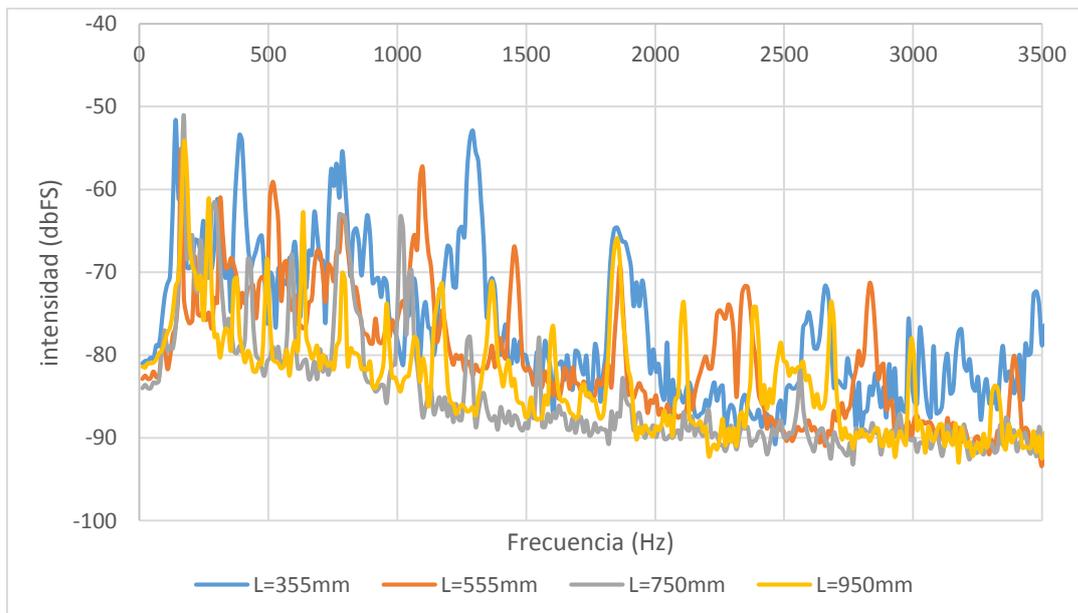


Fig. 1.5: Grafica de intensidad vs frecuencia obtenida con unas varillas de acero de sección circular (4 mm de diámetro) de longitudes L=355 mm, L=555 mm, L=750 y L=950 mm realizada en las medidas nº 2, nº 1, nº 2 y nº1 respectivamente.



Las tablas 1.1 y 1.2 muestran los valores medios de las frecuencias obtenidas experimentalmente para las varillas rectangulares y circulares, respectivamente, comparándolos con los valores teóricos calculados anteriormente. Las figuras 1.6 y 1.7 muestran la comparativa teoría-experiencia de forma gráfica para varillas rectangulares y circulares, respectivamente. Como puede observarse forma gráfica en la Fig. 1.8, la repetitividad de los valores es muy alta.

Tabla 1.1: Valores medios de las frecuencias experimentales de los distintos modos de vibración (tres repeticiones) y teóricos para varillas de aluminio de sección rectangular (10 mm x 1.8 mm) y longitudes 205, 300 y 401 mm

n	Media de las frecuencias obtenidas en la práctica		
	L=205mm	L=300mm	L=401mm
1			
2	215	97	
3	603	280	151
4	1180,666667	543,5	301
5	1949	904,3333333	506
6	2932,333333	1335	754
7	4070	1873	1058,666667
8		2487	1410
9			1812,666667
10			2272

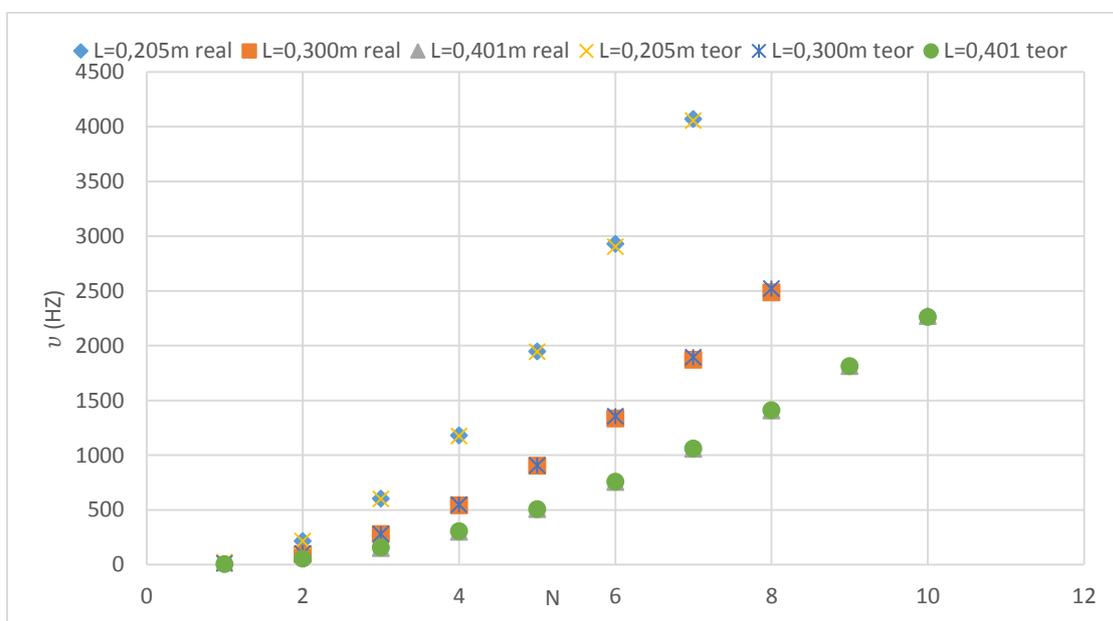


Fig. 1.6: Grafica comparativa de las frecuencias de los distintos modos de vibración teóricas y experimentales (media de tres repeticiones) obtenidas para varillas de aluminio de sección rectangular (10 mm x 1.8 mm) y longitudes 205, 300 y 405 mm



Tabla 1.2: Valores medios de las frecuencias experimentales de los distintos modos de vibración (cuatro repeticiones) y teóricos para varillas de acero de sección circular ($r=2$ mm) y longitudes 355, 555, 750 y 950 mm

n	MEDIA DE LAS FRECUENCIAS EN LA PRÁCTICA			
	L=0,355m	L=0,555m	L=0,75m	L=0,95m
1				
2	140			
3	390,5	161		
4	780,5	312	172	108
5	1292	522,5	288,25	172
6	1862,75	786	428,25	269
7	2635,25	1092,5	592	374,25
8		1453	783,25	495
9		1863	1030,75	635
10		2309,5	1275,5	794,25
11		2837	1550	958
12		3391	1889,25	1133
13			2203,33333	1359,5
14			2562	1598,5
15				1849,25
16				2110
17				2381,75
18				2681
19				2993
20				3321,5

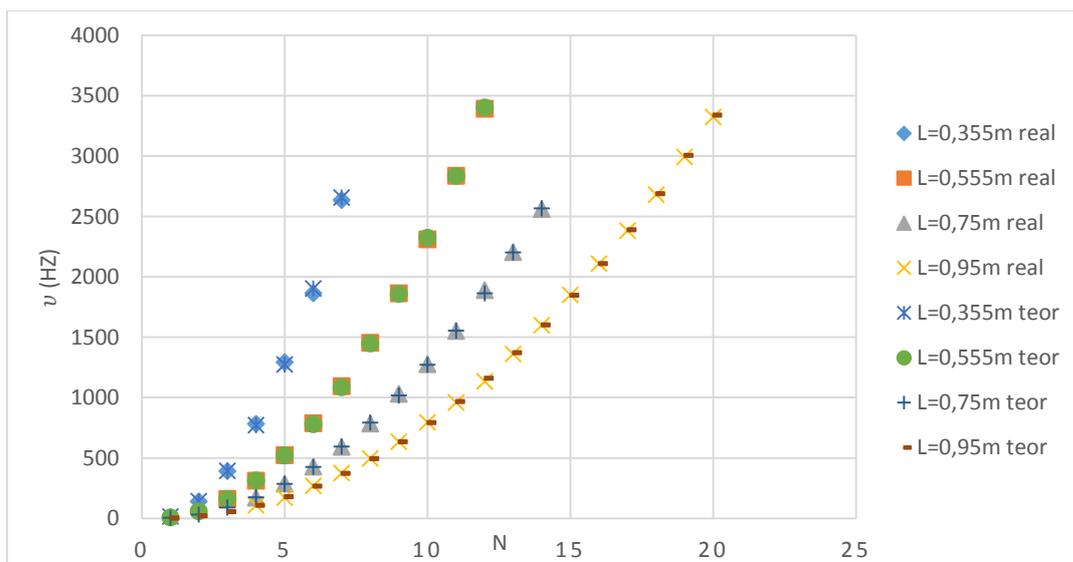


Fig. 1.7: Grafica comparativa de las frecuencias de los distintos modos de vibración teóricas y experimentales (media de cuatro repeticiones) obtenidas para varillas de acero de sección circular ($r=2$ mm) y longitudes 355, 555, 750 y 950 mm

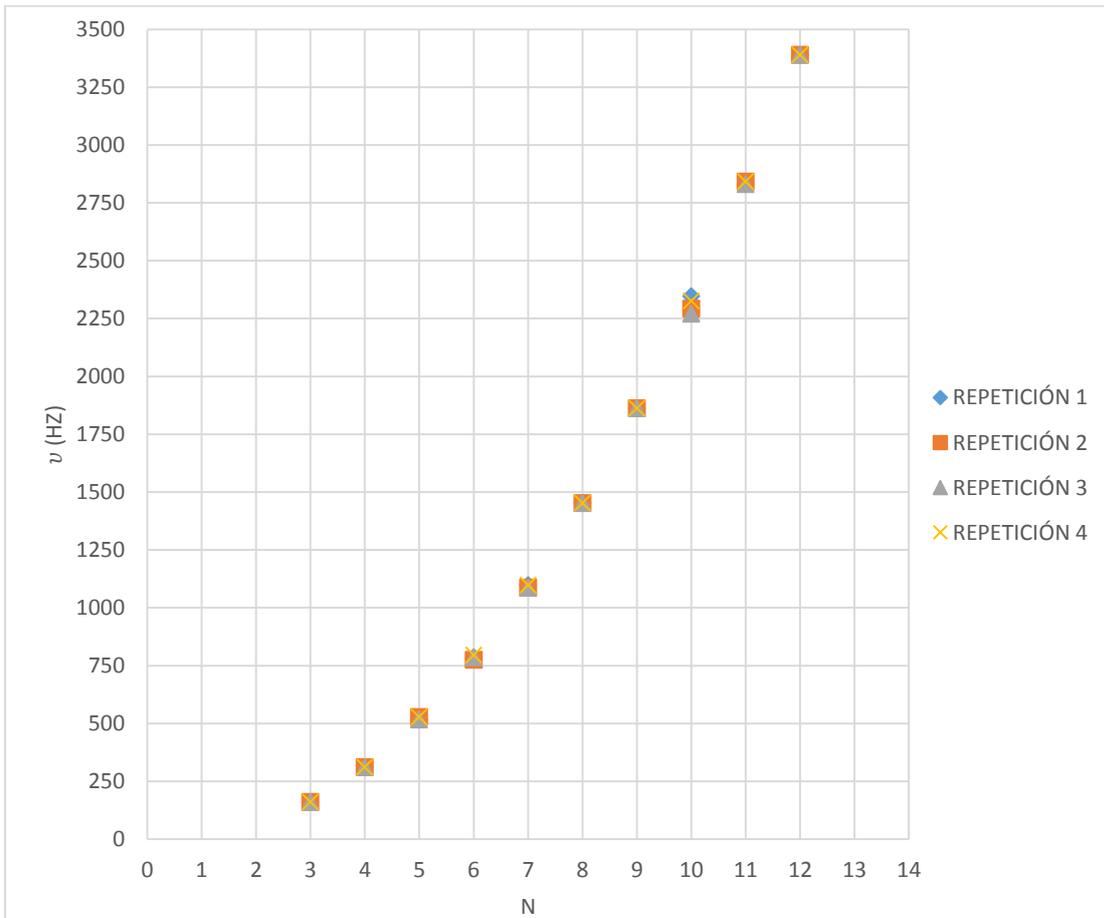


Fig. 1.8: Grafica comparativa de las frecuencias experimentales obtenidas para cuatro repeticiones en el caso de una varilla de acero de sección circular ($r=2$ mm) y longitud 555 mm



OBJETIVO

Estudiar la absorción (atenuación) del sonido por diferentes materiales, para lo que se propone comparar la intensidad del sonido captado cuando el sonido viaja sin ningún obstáculo y cuando el sonido debe atravesar diferentes materiales con espesores variables. La experiencia se realizará para diferentes valores de la frecuencia emitida, de forma que podamos obtener información acerca de la capacidad de los distintos materiales a la hora de absorber el sonido a diferentes frecuencias.

MATERIAL A USAR

En el montaje experimental (detallado en el punto siguiente de esta memoria) se va a construir una caja, sobre la que apoyarán tapas de diferentes materiales, que son de los que se va a determinar el coeficiente de atenuación. Todo el material a utilizar para el montaje de esta experiencia es de fácil acceso, por ejemplo en cualquier ferretería, de una forma económica. El material aquí indicado puede ser sustituido o reemplazado por material similar.

- Para la fabricación de la caja se han usado láminas de poliestireno extruido. En concreto, para esta experiencia, se ha construido una caja de dimensiones interiores 250 x 200 x 110 mm con uno de sus lados de mayor superficie (250 x 200 mm) abierto.
Obviamente las dimensiones escogidas para la experiencia no tienen por qué ser las que se indican aquí, pudiendo elegir otras dimensiones y otros materiales de las láminas si ello nos facilita la obtención del material para esta práctica.
- Diferentes materiales a estudiar, que colocaremos como tapas en el lateral de la caja de poliestireno anteriormente mencionada. Las láminas (tapas) empleadas en este caso han sido:
 - Tres láminas de poliestireno extruido, con espesores de 40 mm cada una, de forma que al colocarlas unas junto a las otras vamos a ir obteniendo espesores totales de 40, 80 y 120 mm.
 - Tres láminas de poliuretano de baja densidad, dos de espesores de 30 mm y una de espesor 100 mm, consiguiendo de esta forma, al ir las poniendo juntas, los espesores totales usados para la experiencia de 60, 100 y 160 mm.
 - Dos láminas de poliuretano de alta densidad, con espesores ambos de 50 mm, consiguiendo así espesores totales de 50 y 100 mm.



- Al igual que para el resto de experiencias, se va a usar un móvil Android y la aplicación Audia para Android.
- Altavoz bluetooth. Este altavoz posee unas dimensiones reducidas (60 mm de diámetro y 70 mm de altura) por lo que es posible meterlo en la caja construida para tal fin.

PROCEDIMIENTO: TOMA DE DATOS

El montaje de los elementos se muestra en las figuras 2.1. El altavoz bluetooth se coloca en el interior de la caja, a una distancia prefijada del micrófono del Smartphone, realizando todas las medidas a la misma distancia relativa entre micrófono y altavoz. En este caso la distancia elegida ha sido 250 mm.

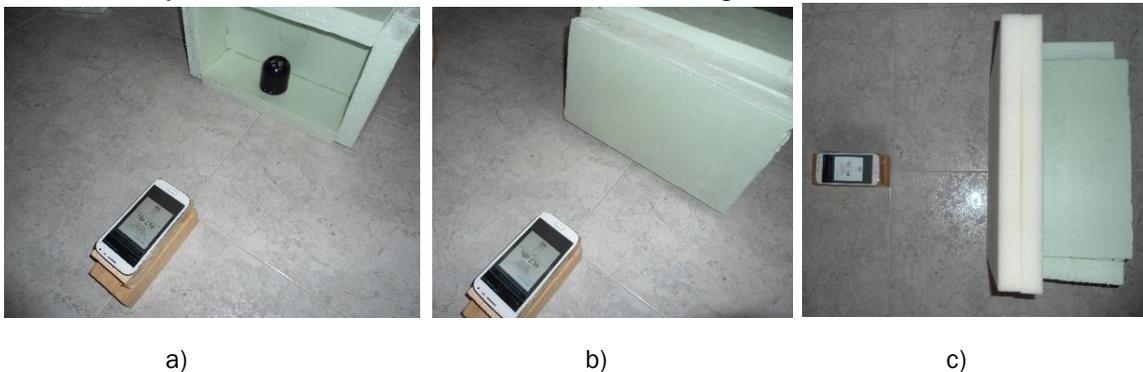


Fig. 2.1: posición de los diferentes elementos en la toma de datos: a) sin láminas (tapas) de por medio y b) y c) con láminas (tapas) de por medio.

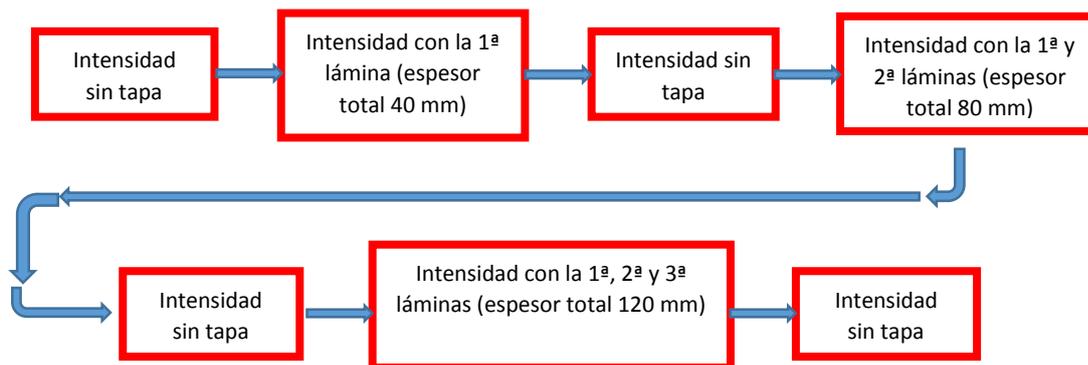
El experimento realizado ha consistido en emitir un sonido de una frecuencia determinada y anotar el nivel de intensidad sonora (en dB) captada por el Smartphone realizando la experiencia en primer lugar sin láminas (tapas) y en segundo lugar con las láminas en estudio. Para obtener diferentes tomas de datos para diferentes espesores de un mismo material, se han ido añadiendo las láminas del mismo material.

La toma de datos se ha realizado con la aplicación Audia para Android usando el módulo “Experiencias” > “Interferencias y difracción”, ya que este módulo nos permite generar una onda para una determinada frecuencia (habiendo realizado el estudio para cuatro valores de frecuencias diferentes). Este módulo permite generar una onda en uno dos altavoces conectados por bluetooth al Smartphone, permitiéndonos variar el volumen (es decir, el nivel de intensidad sonora) y el altavoz por el que queremos que suene. El módulo nos ofrece prácticamente en tiempo real la intensidad en decibelios percibida por el micrófono del Smartphone.



Fijado el volumen del sonido, la posición del altavoz dentro de la caja de poliestireno y la distancia entre altavoz y micrófono (250 mm) se han emitido sonidos de diferentes frecuencias, habiendo utilizado para esta experiencia valores de 500, 1000, 2000, y 4000 Hz.

Tratando de tener fiabilidad en las medidas, el procedimiento seguido ha consistido en emitir un sonido de una frecuencia y anotar el valor del nivel de intensidad sonora proporcionado por la aplicación Audia sin tapa de por medio. Posteriormente se pone la tapa de menor espesor y se vuelve a medir la intensidad. A continuación se repite la experiencia sin ninguna tapa, para comprobar la repetitividad de la medida con respecto a la situación inicial. Luego se añade una segunda lámina del mismo material, con lo que se realiza la experiencia para un espesor mayor (suma de los dos espesores individuales) y así sucesivamente. A modo de ejemplo, la figura 2.2 muestra el esquema seguido para la toma de datos en las láminas de poliestireno extruido.



2.2: esquema de la toma de datos seguido en el caso de las láminas de poliestireno extruido.

Para el resto de los materiales (láminas) se ha seguido el mismo esquema.

TEORÍA RELACIONADA

Si consideramos ondas planas, donde la intensidad de onda en un medio no absorbente sería constante en la propagación por el espacio, al considerar un medio absorbente la energía, y por tanto la intensidad, van a disminuir como consecuencia de la absorción de parte de la energía por el material.



Por sencillez, supongamos una onda que se propaga en la dirección +X. Se observa que la intensidad de la onda decae como consecuencia de la propagación por el medio material, Fig. 2.3.

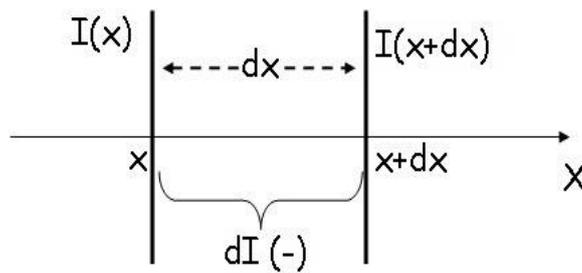


Fig. 2.3: absorción de una onda plana por un medio material.

La absorción de energía (intensidad) por el medio material supone que si la onda en un determinado punto x del medio tiene una intensidad $I(x)$, tras recorrer un espacio dx tiene una intensidad diferente (menor) $I(x+dx)$. Experimentalmente se observa que la disminución de intensidad ($-dI$) es proporcional a la intensidad inicial $I(x)$, al espacio recorrido (dx) y a las propiedades absorbentes del material, representadas por un parámetro que denotaremos por β , o coeficiente de absorción de la onda en el medio material. Así, podemos escribir:

$$-dI = \beta(x)dx \quad \Rightarrow \quad \frac{dI}{I} = -\beta dx \quad (2.1)$$

Integrando:

$$\ln I = -\beta \cdot x + \text{cte} \quad (2.2)$$

Tomando $I = I_0$ en $x = 0$:

$$\text{cte} = \ln I_0 \quad \Rightarrow \quad \ln \frac{I}{I_0} = -\beta \cdot x$$

$$\Rightarrow \quad I = I_0 \cdot e^{-\beta \cdot x} \quad (2.3)$$

donde:

I : intensidad del sonido tras recorrer un espesor x de material.

I_0 : intensidad inicial.

β : coeficiente de absorción del material (en unidades de inversa de longitud).

x : espesor del medio absorbente.

Como vemos, esta expresión nos indica que la intensidad decae exponencialmente con el espacio recorrido por la onda (x) a medida que esta avanza por el medio material



Notemos pues que en una situación real (con absorción), la intensidad de las ondas planas no será constante, sino que disminuye debido a la absorción. De la misma forma, para ondas esféricas, la intensidad va a disminuir debido a la expansión de la onda por el espacio y a la absorción del medio material.

Adicionalmente a los fenómenos de absorción (atenuación) de las ondas debidas a los medios materiales, en la propagación de las ondas se deben tener en cuenta otros fenómenos tales como los fenómenos de reflexión que suceden cuando la onda pasa de un medio material a otro diferente. Así, si consideramos una onda propagándose por el espacio pasando desde el aire a un medio material de un determinado espesor y de nuevo volviendo al aire, los fenómenos de propagación de la onda (y de su energía) van a ser más complejos, donde debemos considerar los fenómenos de reflexión en cada una de las caras y la propia atenuación debido a los medios materiales, Fig. 2.4.

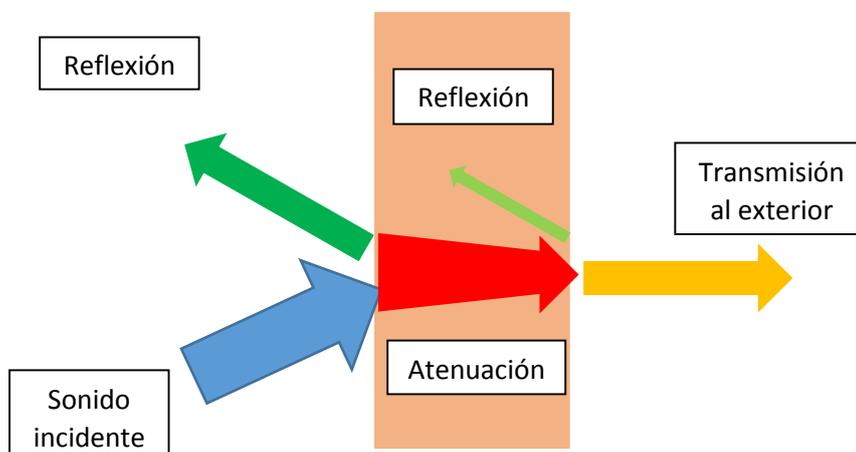


Fig.2.4: propagación del sonido al atravesar un determinado material.

En el proceso de reflexión en la intercara entre dos materiales, parte de la energía se refleja al primer medio y parte se trasmite al segundo medio, hablándose en este caso de un coeficiente que da cuenta de la energía transmitida partido por la energía incidente, al que en muchos libros se le denomina también coeficiente de absorción (α). No es este coeficiente α en el que estamos interesados en esta experiencia; para una mayor claridad y distinción, y siguiendo la notación de M.R. Ortega a este otro coeficiente α se le suele denotar como coeficiente de absorción en la reflexión.

Un aspecto de gran importancia es que la absorción (atenuación) de las ondas sonoras depende de la frecuencia de la onda, como también se tratará de poner de manifiesto en la experiencia presentada.



Para llevar a cabo esta experiencia se van a medir intensidades sonora (B) en decibelios (dB), mientras que en la ecuación 2.3 las intensidades (I) están medidas en unidades de energía por unidad de superficie (W/m² en el S.I.). El nivel de intensidad sonora, medido en dB en el S.I., está definido como

$$B = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{I}{10^{-12}} \quad (2.4)$$

Es decir, se trata de una escala logarítmica, donde se toma I_0 como umbral de intensidad sonora para el oído humano, con un valor de 10^{-12} W/m².

La transformación del nivel de intensidad (B) a intensidad sonora (I) es por tanto:

$$10^{\frac{B}{10}} = \frac{I}{10^{-12}} \Rightarrow I = 10^{[(B/10)-12]} \quad (2.5)$$

Conviene destacar que en esta experiencia se está calculando la absorción acústica y no la absorción acústica en la reflexión que relaciona el sonido incidente sobre una superficie con el sónico reflejado. Ésta última absorción tiene más interés en el ámbito del aislamiento acústico de locales.

RESULTADOS

De la toma de datos de esta experiencia se han obtenido los valores mostrados en las tablas 2.1, 2.2 y 2.3, donde están reflejados los niveles de intensidad sonora para cada caso en estudio y para cada frecuencia.

Tabla 2.1: valor del nivel de intensidad sonora para cada frecuencia y para cada caso en estudio usando las láminas de poliestireno extruido.

Frecuencia (Hz)	B (Sin lámina) (dB)	B (con lámina) (40 mm) (dB)	B (Sin lámina) (dB)	B (con lámina) (80 mm) (dB)	B (Sin lámina) (dB)	B (con lámina) (120 mm) (dB)	B (Sin lámina) (dB)
500	70.9	63.4	62.6	59.2	71.3	63.4	71
1000	63.8	60.3	59.1	55.5	60.7	47.7	62.3
2000	70.7	66.9	72.4	59	71.3	54.9	69.3
4000	80.2	70.3	79.1	62.5	78.3	64	79.9

Podemos observar que las sucesivas medidas de la intensidad sin tapa de por medio dan valores algo dispersos, lo que en esta experiencia fue muy



significativo en la toma de datos con la frecuencia de 500 Hz. Esto nos lleva a pensar que la toma de datos carece, en esos casos, de la repetitividad y exactitud necesaria, pudiendo llevarnos a errores en la toma de datos cuando interponemos las láminas de por medio. Las causas de estas variaciones pueden ser deficiencias en la repetitividad del micrófono del Smartphone, del altavoz utilizado, pequeñas variaciones del montaje, etc.

Como se puede observar también, en algún caso obtenemos valores de intensidad más elevados al interponer de por medio láminas de mayor espesor. Vista la falta de repetitividad en algunas de las medidas sin tapas de por medio, esto se puede deber a que la aplicación no emita siempre el mismo nivel de intensidad, variaciones mínimas en el montaje, etc.

Tabla 2.2: valor del nivel de intensidad sonora para cada frecuencia y para cada caso en estudio usando las láminas de poliuretano de baja densidad.

Frecuencia (Hz)	B (Sin lámina) (dB)	B (con lámina) (60 mm) (dB)	B (Sin lámina) (dB)	B (con lámina) (100 mm) (dB)	B (Sin lámina) (dB)	B (con lámina) (160 mm) (dB)	B (Sin lámina) (dB)
500	70.2	67.5	70.3	65.1	70.5	64	70.4
1000	60.3	54.1	58.9	49	61	48.1	61.3
2000	71.8	66.3	71.9	61.5	73.2	57.1	73
4000	77	64.8	77.2	67.9	73	57.2	75.5

Tabla 2.3: valor del nivel de intensidad sonora para cada frecuencia y para cada caso en estudio usando las láminas de poliuretano de alta densidad.

Frecuencia (Hz)	B (Sin lámina) (dB)	B (con lámina) (50 mm) (dB)	B (Sin lámina) (dB)	B (con lámina) (100 mm) (dB)	B (Sin lámina) (dB)
500	69.9	66	70.7	65	70.5
1000	62.9	60.7	62.8	54.8	63
2000	72.2	65.2	72.6	61	72.7
4000	77.2	64.2	79.2	50.7	77.7

Como se puede observar, en el caso del poliuretano la toma de datos parece más adecuada, con una mejor repetitividad de las medidas sin lámina y observando prácticamente siempre una disminución de la intensidad al aumentar el espesor del material, como es de esperar.



Para determinar los coeficientes de atenuación calculamos las intensidades correspondientes a los niveles de intensidad sonora, aplicando la expresión (2.5). Como el procedimiento es el mismo para todos los casos, se muestran los datos para el caso de láminas de poliuretano de baja densidad en la tabla 2.4.

Tabla 2.4: valor de la intensidad para cada frecuencia y para cada caso de estudio usando tapas de poliuretano de baja densidad.

Frecuencia (Hz)	I (Sin lámina) (W/m ²)	I (con lámina) (60 mm) (W/m ²)	I (Sin lámina) (W/m ²)	I (con lámina) (100 mm) (W/m ²)
500	1,04713E-05	5,62341E-06	1,07152E-05	3,23594E-06
1000	1,07152E-06	2,5704E-07	7,76247E-07	7,94328E-08
2000	1,51356E-05	4,2658E-06	1,54882E-05	1,41254E-06
4000	5,01187E-05	3,01995E-06	5,24807E-05	6,16595E-06

Frecuencia (Hz)	I (Sin lámina) (W/m ²)	I (con lámina) (160 mm) (W/m ²)	I (Sin lámina) (W/m ²)
500	1,12202E-05	2,51189E-06	1,09648E-05
1000	1,25893E-06	6,45654E-08	1,34896E-06
2000	2,0893E-05	5,7544E-07	1,99526E-05
4000	1,99526E-05	5,24807E-07	3,54813E-05

Una vez obtenidos los datos experimentales, podemos pasar a determinar los coeficientes de absorción en función de la frecuencia emitida para cada caso en estudio, usando la ecuación (2.3). Los coeficientes obtenidos se muestran a modo de ejemplo para el caso de láminas de poliuretano de baja densidad en la tabla 2.5



Tabla 2.5: coeficientes de atenuación de sonidos para cada caso de estudio usando láminas de poliuretano de baja densidad.

Frecuencia (Hz)	$\beta_{60 \text{ mm}} (\text{m}^{-1})$	$\beta_{100 \text{ mm}} (\text{m}^{-1})$	$\beta_{160 \text{ mm}} (\text{m}^{-1})$	$\underline{\beta} (\text{m}^{-1})$
500	10,361633	11,97344248	9,35425194	10,56310911
1000	23,793379	22,79559242	18,56459231	21,71785468
2000	21,10703	23,94688497	22,45020466	22,50137321
4000	46,81923	21,41404136	22,73802779	30,32376646

En la figura 2.5 se representan de forma gráfica los valores de los coeficientes de atenuación obtenidos para las diferentes frecuencias de estudio y para los diferentes materiales. Podemos observar de forma general que el coeficiente de absorción β , según estos datos, aumenta en función de la frecuencia de la onda sonora.

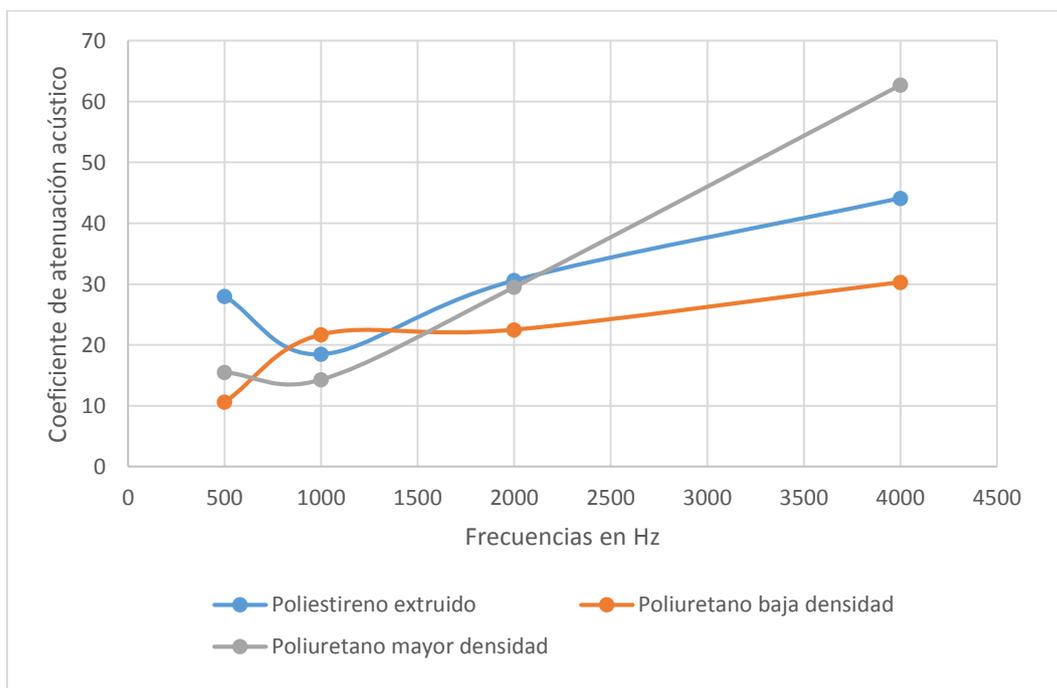


Fig. 2.5: Coeficientes de atenuación obtenidos para las diferentes frecuencias de estudio y para los diferentes materiales



OBJETIVO

El objetivo de esta práctica consiste en estudiar las propiedades elásticas de pelotas de diferentes materiales midiendo para ello el coeficiente de restitución al chocar éstas contra el suelo. Para ello, se utilizará el módulo de grabación de sonido de la aplicación Audia. También se pretende comprobar cómo varía dicho coeficiente en pelotas del mismo tipo al variar la calidad de éstas. Además, se realizarán medidas a diferentes temperaturas para observar su influencia en las propiedades elásticas de los materiales empleados.

Por último se pretende desarrollar una metodología fiable para el cálculo de la aceleración de la gravedad usando pelotas.

MATERIAL A USAR

El material a utilizar para el montaje de esta experiencia es de fácil acceso, por ejemplo en cualquier tienda de deporte, de una forma económica. El material aquí indicado puede ser sustituido o reemplazado por material similar.

- Cuatro pelotas cuyo coeficiente de restitución vamos a calcular:
 - Dos pelotas de frontenis, una de buena y otra de mala calidad:
 - Una pelota de tenis y otra de ping-pong:
- Al igual que para el resto de experiencias, se va a usar un móvil Android y aplicación Audia para Android.

PROCEDIMIENTO: TOMA DE DATOS

El montaje de los elementos para esta práctica se puede observar en la figura. 3.1. Las pelotas se situarán en una superficie elevada a una distancia conocida del suelo, contra el que chocarán posteriormente. Las pelotas se deben dejar caer contra el suelo, partiendo del reposo. El montaje puede ser cualquier otro que nos garantice que la velocidad de partida en dirección vertical de las pelotas es cero, y que por tanto se produzca el choque frontalmente contra el suelo tal y como hemos descrito en las ecuaciones anteriores.

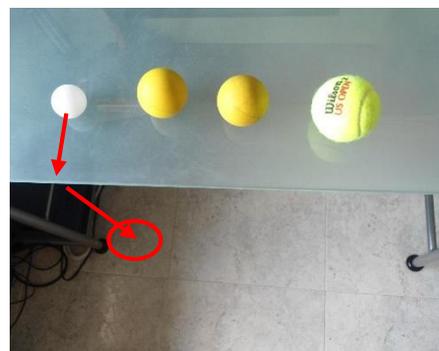


Fig. 3.1: Disposición del montaje para la toma de datos



En el montaje experimental utilizado se han dejado caer las cuatro pelotas desde la misma mesa, a una altura de 753 mm (h_0), dejándolas dar dos botes, grabando con la aplicación Audia estos dos primeros golpes que da la pelota al chocar contra el suelo. Para ello hay que entrar en la aplicación, ir a herramientas y elegir la opción grabadora de sonido. Para el caso de la determinación de la aceleración de la gravedad, se grabarán los tres primeros botes.

El programa entregará una gráfica con la intensidad del sonido y con el tiempo transcurrido entre los dos botes, así como un archivo Excel con todos los datos recogidos. Se repetirá varias veces el experimento para poder sacar una media más adecuada del coeficiente de restitución del choque. En este caso se ha repetido cuatro veces.

En la práctica se han hecho medidas a tres temperaturas diferentes: -20, 25 y 90 °C.

TEORÍA RELACIONADA

Coeficiente de restitución en choques

En esta experiencia se van a dar choques inelásticos (o parcialmente elásticos): en estos choques existe una pérdida de energía cinética. Como consecuencia, los cuerpos que colisionan pueden sufrir deformaciones y/o aumento de su temperatura. Dependiendo del grado de elasticidad del choque el coeficiente de restitución varía entre uno y cero.

El coeficiente de restitución (con un valor comprendido entre cero y uno) está pues relacionado con el grado de elasticidad de las dos partículas que chocan, y es función de la pérdida de energía cinética en el choque. En el caso en estudio, de choque frontal, el coeficiente de restitución se puede determinar en función de las velocidades de las partículas antes y después del choque:

$$e = - \frac{(V_2)_f - (V_1)_f}{(V_2)_i - (V_1)_i} \quad (3.1)$$

donde:

$(V_2)_f$ = velocidad de la primera partícula antes del choque.

$(V_1)_f$ = velocidad de la primera partícula después del choque.

$(V_2)_i$ = velocidad de la segunda partícula antes del choque.

$(V_1)_i$ = velocidad de la segunda partícula tras el choque

Caída libre de una pelota y choques sucesivos con el suelo

Si dejamos caer una pelota desde una cierta altura, partiendo del reposo, los sucesivos choques van a suponer que la pelota se eleve de nuevo una cierta



altura y vuelva a caer. Sólo si los choques fuesen perfectamente elásticos, la altura sería siempre la misma e igual a la inicial. Para choques parcialmente elásticos, como va a ocurrir siempre en la realidad, la pelota sube a una altura menor cada vez, figura 3.2. Podemos determinar el coeficiente de restitución en cada choque si conocemos las velocidades de la pelota antes y después del mismo.

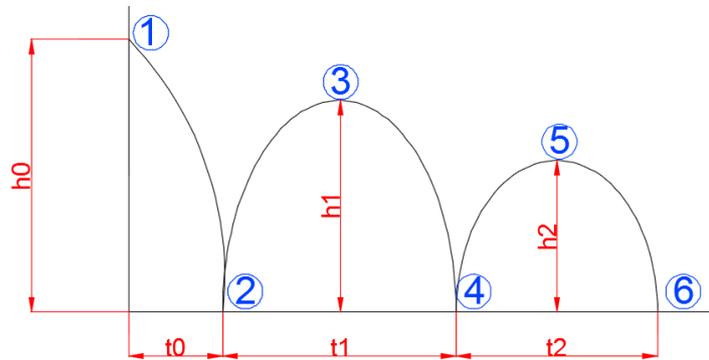


Fig.3.2: Esquema del suceso

Consideremos el primero de los choques, punto 2 de la fig. 3.2. Necesitamos determinar la velocidad de la pelota antes y después de dicho choque.

En esta situación física, la pelota que cae o que rebota tras cada choque, sufre un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado (MRUA), de forma que debemos aplicar las ecuaciones correspondientes a dicho movimiento:

$$x(t) = x_0 + v_0 \cdot t + \frac{a \cdot t^2}{2} \quad (3.2)$$

$$v(t) = v_0 + a \cdot t \quad (3.3)$$

donde:

$x(t)$: posición en función del tiempo.

$v(t)$: velocidad en función del tiempo.

x_0 : posición inicial.

v_0 : velocidad inicial.

a : aceleración.

En la determinación concreta de la velocidad antes y después del choque en el punto 2, aplicando las ecuaciones de MRUA. Condiciones antes de choque en el punto 2:

x : posición final de la pelota = h_0 .

x_0 : posición de partida de las pelotas = 0

a : aceleración de la gravedad = g

v_{ac2} : velocidad al llegar al suelo (va a ser la velocidad antes del choque)

v_0 : velocidad inicial de las pelotas = 0

Despejando el tiempo de la ec. (3.2) y sustituyendo en la ec (3.3), tendremos:

$$t_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot h_0}{g}} \quad (3.4)$$

$$v_{ac2} = g \cdot t_0 \quad (3.5)$$



La velocidad con la que llega la pelota al suelo solo depende de la altura de lanzamiento y del valor de g . De esta forma, la velocidad va a ser igual para todas las pelotas y para todas las situaciones de estudio.

Debemos determinar también la velocidad de salida de la pelota tras el choque (v_{dc2}). Para ello consideremos el movimiento ulterior de la pelota tras dicho choque, en el que la pelota se mueve hacia arriba partiendo con una velocidad inicial (v_{dc2}) bajo la acción de la gravedad, decelerándose por tanto, hasta que alcanza el punto más alto, punto 3, momento en que la velocidad se vuelve a hacer cero. A partir de este instante, la pelota se moverá de nuevo hacia abajo bajo la acción de la gravedad partiendo del reposo. Es muy sencillo demostrar que el tiempo que tarda la pelota en subir del punto 2 al 3 es el mismo que tarda la pelota en volver a bajar del punto 3 al suelo. Justamente nos vamos a servir en la realización práctica de la medida del tiempo entre dos choques sucesivos (puntos 2 y 3) para determinar la velocidad de la pelota tras el choque (v_{dc2}). Llamemos t_1 a este tiempo, que es pues el doble del tiempo que tarda la pelota en subir del punto 2 al punto 3, y apliquemos de nuevo la ecuación de la velocidad del MRUA, ec. (3.3), con:

$v_0 = v_{dc2}$: velocidad después del choque (en el punto 2)

v = velocidad final (en el punto 3) = 0

$a = -g$

tomando origen de movimientos en el punto 2 y sentido positivo hacia arriba. Despejando:

$$v_{dc2} = v - a \cdot t = g \cdot \frac{t_1}{2} \quad (3.6)$$

Coeficiente de restitución en el choque entre la pelota y el suelo. Usamos la expresión (4.4.1), donde en este caso el objeto 2 es el suelo, que permanece en reposo en todo momento, de forma que:

$(V_2)_f = (V_2)_i = 0$ = velocidad del suelo antes y después del choque.

$(V_1)_i$ = velocidad de la pelota antes del choque = v_{ac2}

$(V_1)_f$ = velocidad de la pelota después del choque = v_{dc2}

De las ecuaciones (3.4), (3.5) y (3.6):

$$e = -\frac{(V_{dc2})}{(V_{ac2})} = \frac{g \cdot t_1}{2 \cdot g \cdot t_0} = \frac{t_1}{2 \cdot t_0} = \frac{t_1}{2 \sqrt{\frac{2 \cdot h_0}{g}}} \quad (3.7)$$

De la misma forma que podemos calcular el coeficiente de restitución del choque entre la pelota y el suelo a partir del tiempo transcurrido entre el primer y el segundo choque con el suelo (t_1), podemos determinar dicho coeficiente de restitución a partir de los sucesivos choques, conociendo los tiempos entre los mismos. Por ejemplo, podemos determinar e a partir del segundo choque, determinando primero v_{dc4} :



$$v_{dc4} = g \cdot \frac{t_2}{2} \quad (3.8)$$

Así:

$$e = -\frac{v_{dc4}}{v_{ac4}} = \frac{g \cdot t_2 \cdot 2}{2 \cdot g \cdot t_1} = \frac{t_2}{t_1} \quad (3.9)$$

Determinación del valor de la gravedad

Apliquemos la ecuación (3.2), correspondiente a las posiciones en el MRUA, al tramo 2-3 de la figura 3.2, en el punto más alto (punto 3), donde en este caso:

$$x=h_1$$

$$x_0=0$$

$$v_0 = v_{dc2} = \text{velocidad después del choque en el punto 2.}$$

Así, tenemos:

$$h_1 = v_{dc2} \cdot \frac{t_1}{2} - 0.5 \cdot g \cdot \left(\frac{t_1}{2}\right)^2 \quad (3.10)$$

donde v_{dc2} viene dado por la ecuación [4.3.6].

Así:

$$h_1 = \frac{g \cdot t_1 \cdot t_1}{4} - 0.5 \cdot g \cdot \frac{t_1^2}{4} \quad (3.11)$$

Despejando obtenemos el valor de la gravedad:

$$g = \frac{8 \cdot h_1}{t_1^2} \quad (3.12)$$

expresión que nos da g en función de t_1 y h_1 , con el inconveniente de que no conocemos h_1 . Sin embargo, de la misma forma que hemos procedido, si aplicamos la 3.2, en el punto más alto (punto 5), podemos relacionar la altura h_2 con el tiempo t_2 :

$$g = \frac{8 \cdot h_2}{t_2^2} \quad (3.13)$$

Puesto que los tiempos t_1 y t_2 están relacionados mediante el coeficiente de restitución, ec. (3.9), al igual que los tiempos t_0 y t_1 , ec (3.7). tendremos que:

$$e = \frac{t_1/2}{t_0} = \frac{t_2}{t_1} \quad (3.14)$$

Sustituyendo en la ec. (3.14) el tiempo t_0 determinado en la ec. (3.4):

$$g = \frac{8 \cdot t_2^2 \cdot h_0}{t_1^4} \quad (3.15)$$



RESULTADOS

La toma de datos consiste en medir el tiempo entre los dos primeros botes de las pelotas, repitiendo las experiencias cuatro veces y determinando la media.

Los archivos que nos ofrece Audia son una imagen que representa la intensidad del sonido captado en función del tiempo, fig. 3.3, y un fichero Excel con estos mismos datos, del que podremos extraer la información de los tiempos con gran precisión, cuya gráfica se muestra en la fig. 3.4.

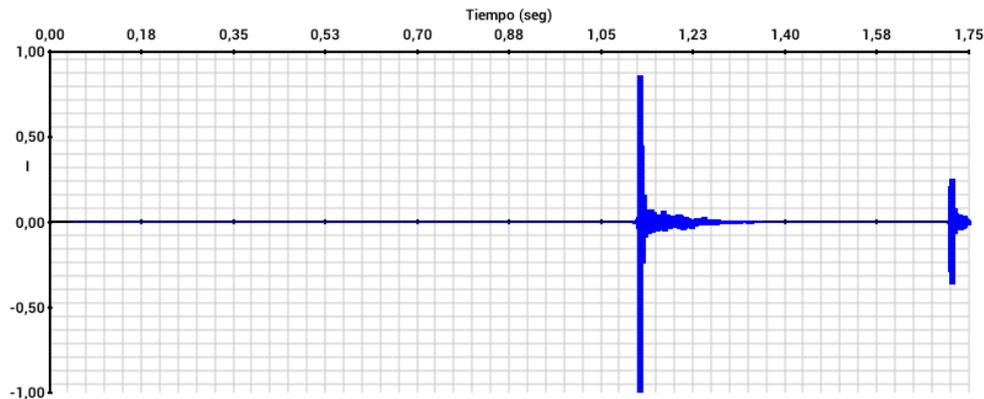


Fig. 3.3: Imagen de la intensidad en función del tiempo aportada por la aplicación Audia.

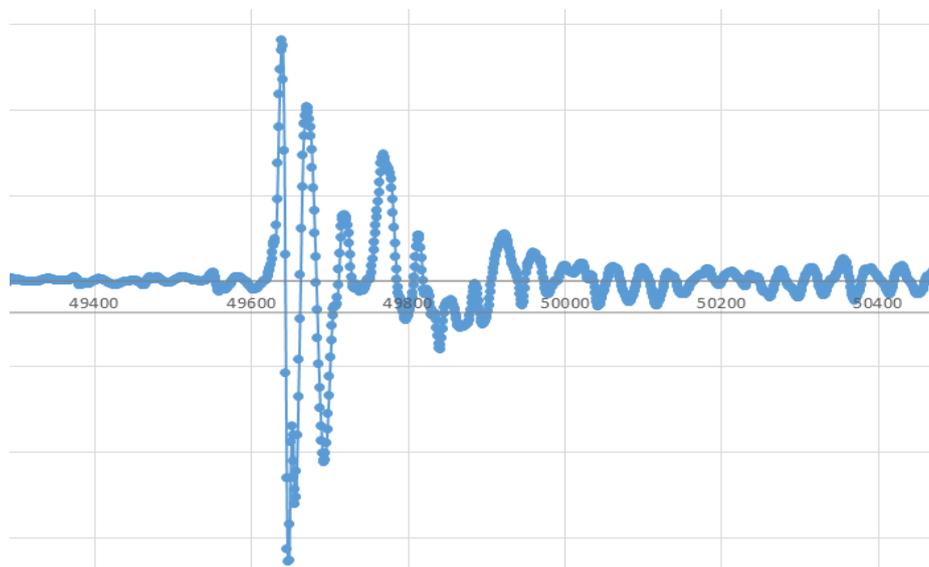


Fig. 3.4: gráfica obtenida a partir del fichero Excel que nos aporta Audia, en la que se representa la amplitud en función del número de muestra tomado. (Esta grafica se corresponde con una ampliación del primer bote de la fig. 3.3)

En el archivo Excel, Audia nos ofrece la intensidad para cada número de muestra tomado por la aplicación. La misma aplicación Audia nos proporciona también la fórmula para convertir los números de muestra a tiempo:

$$\text{Tiempo} = \frac{(n-1) \cdot 1000}{44100} \quad (3.16)$$



La visualización gráfica de dichos datos nos permite determinar mejor dónde se encuentran los picos de máxima intensidad, fig 3.4.

Los tiempos entre los dos primeros botes obtenidos de las cuatro repeticiones realizadas para cada pelota y cada temperatura se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: valores de los tiempos (en milisegundos) entre los dos primeros botes para caso de estudio.

Pelota	Temperatura (°C)	$(t_1)^1$	$(t_1)^2$	$(t_1)^3$	$(t_1)^4$
Ping-pong	-20	668	672	669	661
	25	601	602	596	602
	90	643	641	642	641
Frontenis mala	-20	315	365	379	403
	25	663	661	657	657
	90	722	722	723	725
Frontenis buena	-20	316	363	403	416
	25	676	677	679	676
	90	722	717	722	720
Tenis	-20	332	356	369	367
	25	594	587	592	586
	90	644	649	651	650

En la tabla 3.2 quedan recogidos las medias de los tiempos (en milisegundos) entre los dos primeros botes (t_1) para las diferentes situaciones de estudio.

Tabla 3.2: medias de los tiempos (en milisegundos) entre los dos primeros botes (t_1) de cada pelota para las tres temperaturas de estudio.

	-20°C	+25°C	+90°C
Pelota de ping-pong	668	601	642
Pelota de frontenis de mala calidad	366	660	723
Pelota de frontenis de buena calidad	375	677	720
Pelota de tenis	356	590	648

A partir del valor de h_0 y del tiempo transcurrido entre los dos primeros botes, calculamos el valor del coeficiente de restitución del choque para cada pelota y para cada temperatura de estudio, aplicando para ello la ec. (3.7).



En la tabla 3.3 y en la figura 3.5 quedan reflejados los diferentes coeficientes de restitución obtenidos para las cuatro pelotas objeto de estudio y para las tres temperaturas de estudio.

Tabla 3.3: coeficientes de restitución en choque obtenidos para las cuatro pelotas y para las tres temperaturas de estudio

	-20°C	+25°C	+90°C
Pelota de ping-pong	0,853	0,768	0,819
Pelota de frontenis de mala calidad	0,467	0,842	0,924
Pelota de frontenis de buena calidad	0,48	0,865	0,919
Pelota de tenis	0,454	0,753	0,827

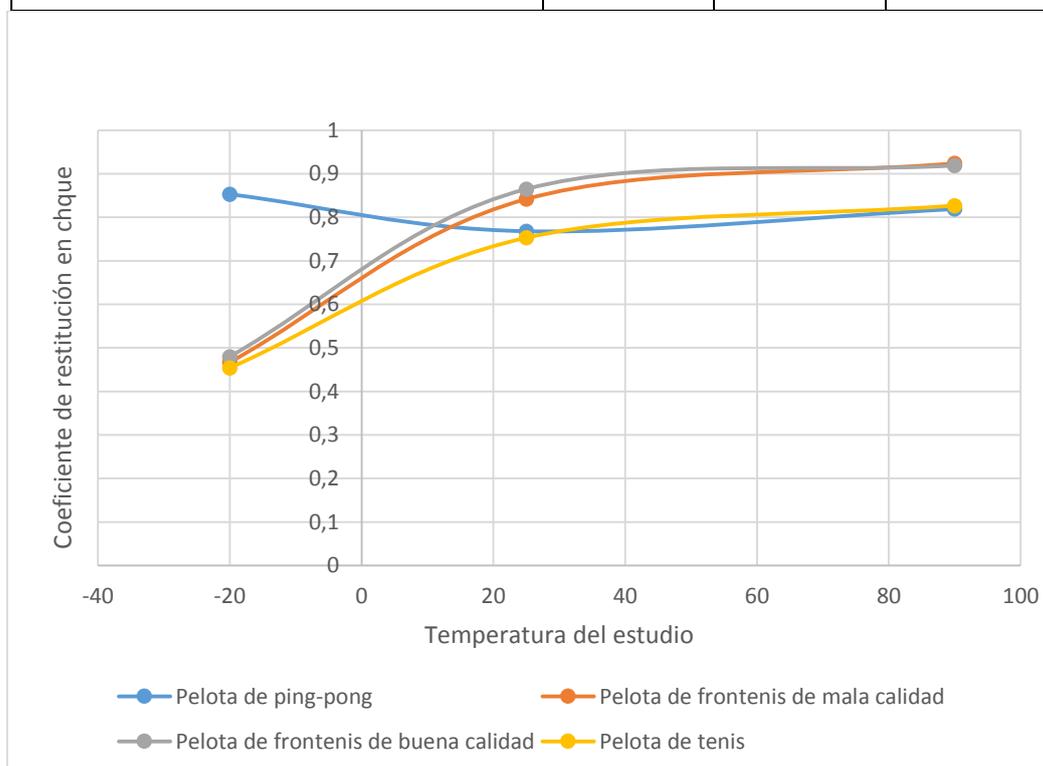


Fig. 3.5: coeficientes de restitución en choque obtenidos para las cuatro pelotas y para las tres temperaturas de estudio

También se ha realizado una experiencia en la que se ha dejado caer la pelota de tenis (a 25°C) y dar tres botes, captando el sonido con Audia, midiendo de esta forma los tiempos entre el primer y segundo bote (t_1) y entre el segundo y el tercer bote (t_2). Tras realizar cuatro repeticiones, las medias de tiempo son las siguientes:



$$t_1 = 587,3 \text{ ms}$$

$$t_2 = 454 \text{ ms}$$

Aplicando la ecuación (3.13) obtenemos el coeficiente de restitución en el choque usando los datos del primer y segundo bote, obteniendo un valor de 0,773. Si lo comparamos con el obtenido para el primer bote (0,753) observamos una cierta variación, que como ya se ha mencionado cabe asignar principalmente a una desviación de la pelota respecto de la vertical, aunque existen algunos otros factores no considerados que también pueden influir (rozamiento con el aire, etc.).

Determinación de la aceleración de la gravedad

Se van a grabar los tres primeros botes de una pelota contra el suelo. De nuevo, a partir del Excel que nos proporciona la aplicación, obtenemos con precisión los tiempos entre los botes.

Esta experiencia se ha llevado a cabo con la pelota de tenis a una temperatura de 25°C y se han hecho cuatro repeticiones. Los resultados obtenidos de tiempos entre el primer y el segundo bote y entre el segundo y el tercer bote se pueden observar en la tabla 3.4.

Tabla 3.4: tiempos entre el primer y el segundo bote y entre el segundo y el tercer bote para pelota de tenis a 25°C en milisegundos.

	t_1	t_2
Primera repetición	591	456
Segunda repetición	594	459
Tercera repetición	581	451
Cuarta repetición	583	450

Con estos datos, y sustituyendo en la ecuación (3.15), obtenemos el valor de la gravedad para las cuatro repeticiones, tabla 3.5.

Tabla 3.5: valor de la aceleración de la gravedad para las cuatro repeticiones del experimento.

	Aceleración de la gravedad (m/s ²)
Primera repetición	10,26
Segunda repetición	10,19
Tercera repetición	10,75
Cuarta repetición	10,56

La media de estos valores es 10.44 (m/s²), obteniendo así un error relativo frente al valor teórico de 6.42%.

Anexo II

Publicación docente de la experiencia: “Doing Physics Experiments and Learning with Smartphones”

Doing Physics Experiments and Learning with Smartphones

Manuel Á. González

Dpto. Física Aplicada
El Informática

Universidad de Valladolid, Spain
manuelgd@termo.uva.es

Félix Huete

Dpto. De Física Aplicada
El Informática

Universidad de Valladolid, Spain
huete_1990@hotmail.com

Javier Manso

Dpto. De Física de la Materia
Condensada
El Industriales

Universidad de Valladolid, Spain
javier.manso.gil@alumnos.uva.es

Juarez Bento da Silva

Universidade Federal de Santa
Catarina, Brazil

juarez.b.silva@ieee.org

Óscar Martínez

Dpto. Física de la Materia

Condensada
El Industriales

Universidad de Valladolid, Spain
oscar@fmc.uva.es

Willian Rochadel

Universidade Federal de Santa
Catarina, Brazil

willian.rochadel@ufsc.br

Juan Carlos Cañedo

Dpto. De Física de la Materia
Condensada

El Industriales
Universidad de Valladolid, Spain
juancar.canedo@yahoo.es

Diego Esteban

Dpto. De Física Aplicada
El Informática

Universidad de Valladolid, Spain
diegoesmo_90@hotmail.com

Miguel Á. González

Dpto. de Física de la Materia
Condensada

El Industriales
Universidad de Valladolid, Spain
mrebollo@eii.uva.es

ABSTRACT

Physics is a subject that for a complete teaching and learning requires both theoretical discussions and practical experimentation. In this work we describe how mobile applications can turn smartphones into versatile measurement devices for broad fields of physics. Different physics experiments performed using our own developed applications, both in the teaching laboratory and profiting from everyday activities, are described. The use of smartphones' applications opens the possibility of developing low-cost laboratories as well as international teaching collaborations.

Categories and Subject Descriptors

•Applied computing–Interactive learning environments
•Applied computing–Computer-assisted instruction •Applied

Permission to make digital or hard copies of all or part of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page. Copyrights for components of this work owned by others than ACM must be honored. Abstracting with credit is permitted. To copy otherwise, or republish, to post on servers or to redistribute to lists, requires prior specific permission and/or a fee. Request permissions from Permissions@acm.org.
TEEM '15, October 07-09, 2015, Porto, Portugal
© 2015 ACM. ISBN 978-1-4503-3442-6/15/10...\$15.00
DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/2808580.2808626>

computing–E-learning •Social and professional topics–Informal
education •Social and professional topics–K-12 education

Keywords

mLearning, Physics, Experiment, Teaching/Learning
strategies, smartphones, sensors, applications, Android

1. INTRODUCTION

Technology can play an important role in the way in which we learn and teach. Perhaps more importantly, technology can also play a fundamental role in easing the diffusion of knowledge and culture beyond schools or universities [1]. Along these last years perhaps the two ICT based learning techniques with a highest growth have been the massive open online courses (MOOCs) [2] and the so called mobile learning (mLearning) [3,4]. Among their benefits, these two technologies ease the access to knowledge of less favored communities and empower the students to build their own learning environments [5].

In this work we describe the use of mobile devices as probes in experiments of physics. For this purpose our group develops mobile applications to access the sensors included in current smartphones and tablets. In section 2, we will discuss the use of mobile devices in teaching laboratories as a way to reduce expenses by developing low-cost laboratories. In section 3, the use of mobile devices to measure different physical quantities in

everyday activities, as well as its utility as a way of facilitating physics learning, will be discussed.

2. SMARTPHONES APPS FOR A LOW COST LABORATORY

Many measurement devices designed to be used in a physics teaching laboratory reach cost levels that, for many laboratories, are unaffordable. This may be true even for devices designed for fundamental physics experiments. Furthermore, even for those who can afford to buy those devices, in many cases, budget limitations impede them to have redundant devices to solve (usual) sudden failures that can happen in a teaching laboratory when, along a term, large numbers of students work with the same devices.

In some cases, a solution to these problems has been implemented by using remote laboratories [6-8] that allow the students to access experiments through the Internet. In other cases, teachers figure out and build their own experiments and arrange so called *low-cost* laboratories [9-13]. A third solution, since the advent of the Internet was, of course, the development of virtual (simulated) experiments and laboratories [14] that reproduce, using a computer program and graphics, the behavior of an experiment. The difference between this last solution and the two above is evident: while in the two first the students face real devices behavior with all their difficulties, the last one is only a mimic of the real world in the screen of a computer showing the expected result of the physical laws but not the difficulty inherent to real experimentation.

Nowadays current mobile devices open a new way thanks to their affordable electronics and built-in sensors. In fact, the possibility of using smartphones or tablets in physics experiments goes quite beyond remote laboratories and even classic teaching laboratories reach, as mobile devices allow the students to think and design their own arrangements and experiments. Students can use their smartphones and tablets in a variety of ways to perform experiments on different branches of physics [15-20]. In many cases, besides, data from the mobile devices' sensors are easily accessible through free applications that can be downloaded from the apps stores, what eases anyone, independently of his/her programming skills, to use those devices for measuring. Nevertheless, as teachers, we must advise that sometimes those free apps were not designed or implemented as learning tools, and even in some cases their results are marred by lack of accuracy either in the recorded data or in how data are presented [21]. These are important issues if a teacher wants to use the mobile device to do measurements, but it is more important yet if it is a students who uses that device to measure and learn.

These are reasons why some groups of teachers have been recently started developing apps specially intended to be use in physical measurements by students [22-24]. One of these applications, Audia [22] that even allows calibration of the smartphone before using it for measuring, can easily turn the smartphone in a versatile device for different acoustic measurements. In this way the smartphone can substitute recording systems, sound analyzers and other devices in the laboratory. One example of the use of this app in an experiment is depicted in Figure 1 top. In the example shown in that figure,

the student carried out the experiment at home, what can also be understood as a proof of concept of a Bring Your Own Device (BYOD) [25-26] experiment in the laboratory, if the students use their own smartphones as measurement devices in the teaching laboratory. The bottom part of Figure 1 shows different rods of steel or aluminum used for the measurements of this experiment.

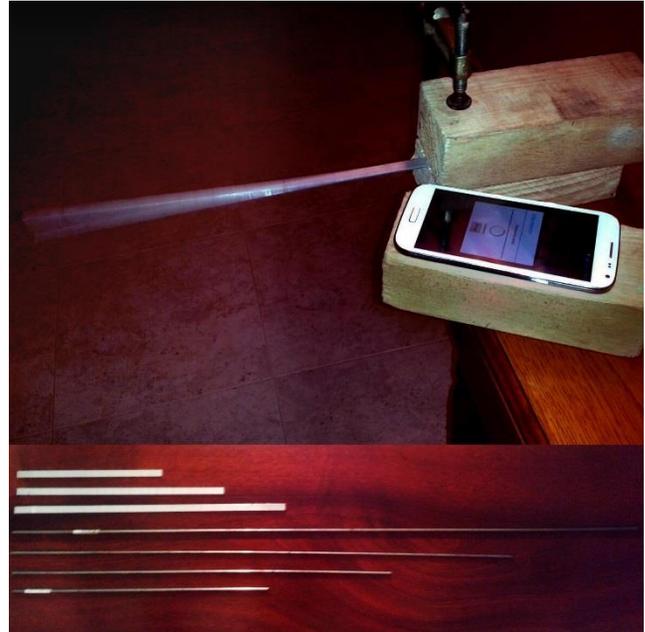


Figure 1. Top: Experimental arrangement for the measurement of vibrations in a metallic rod using the smartphone. Bottom: Metallic rods of different lengths, sections and composition used in the measurements and in the comparison with the analytical calculations.

In this way, by using a simple arrangement and the smartphone, the students can do a simple experiment to analyze how oscillating frequency and its overtones depends on the material and geometry of the rod. Figure 2 shows some results of such an experiment: the oscillating frequencies calculated after the smartphone did a FFT of the sound recorded in the experiment. All this process, sound recording an analysis, was performed using the smartphone and the application Audia. As can be seen in this figure, the vibration frequencies can be easily identified within a range between 100 and 4000 Hz. The table inserted in this figure shows the good agreement between the measurements with the smartphone and the theoretical values [27], which is a proof of the reliability of both the smartphone and the app for scientific measurements. Figure 3 shows a comparison between the theoretical values of the overtones for rods of different lengths and the experimental results obtained with the mobile application. As can be seen in that figure, the application is accurate enough along a large range of frequencies, which is very remarkable considering that these results imply both the sound recording and its analysis by the application. Another advantage of using our own applications is that we know well their range of applicability. For instance Audia, due to the sensitivity of the

microphone, can not detect correctly the fundamental harmonic, which can be, however, be solved by using an external microphone.

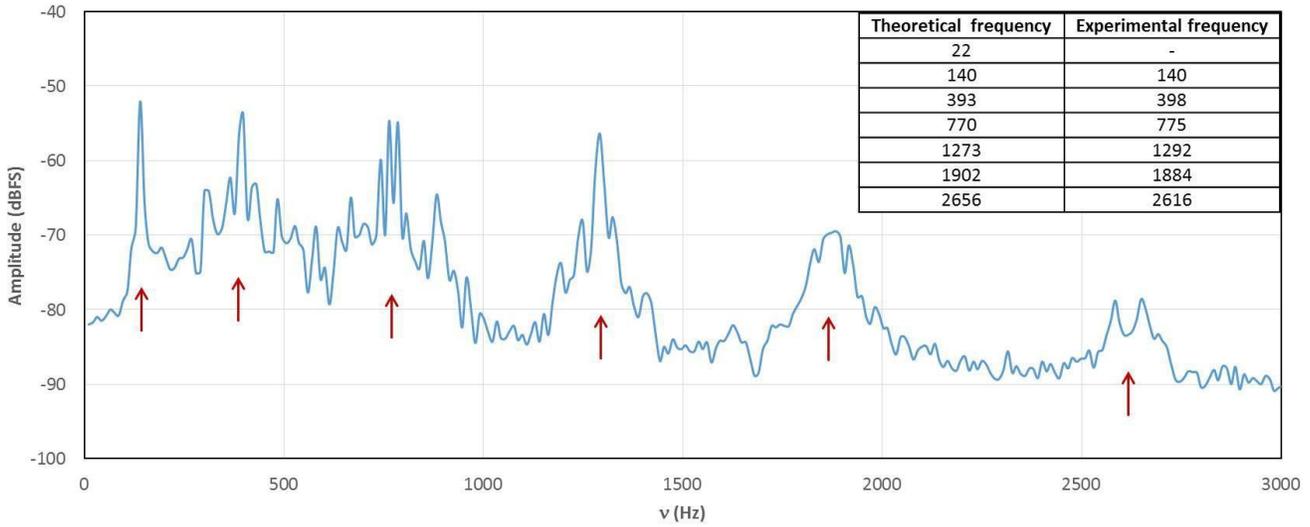


Figure 2. Vibration frequencies recorded by the application used in an experiment with a 355 mm long flat rod of steel. The inserted table shows a comparison of the theoretical frequencies and the recorded values, marked with arrows in the figure.

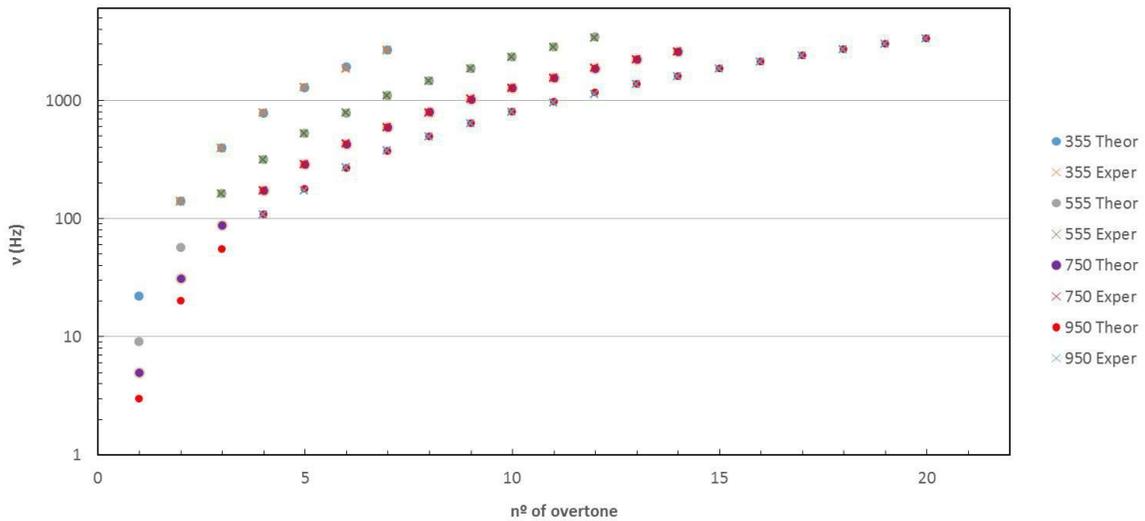


Figure 3. Comparison between the application measurements and theoretical values of frequencies and overtones for vibrating rods of different lengths. The frequency axis is in a logarithmic scale for a better visualization of the data.

3. USING SMARTPHONES TO CARRY OUT PHYSICS EXPERIMENTS ALONG EVERYDAY ACTIVITIES

While using the smartphones to replace some expensive measurement devices in the laboratory has many advantages, the possibility of doing physical observations and measurements along everyday activities facilitates learning in a different way. The students observe nature directly, use their own devices to

measure different magnitudes, confront their experimental results and accuracy with their theoretical concepts, and learn how what they learn in the classroom affects their own lives. And all this can take place anytime and anywhere, so that the use of smartphones and tablets ease physics learning by transforming the whole world in a classroom and laboratory where the students can learn [28].

SensorMobile [23,29], a multilingual app implemented by our group in order to be used as a help for students learning, allows us to access simultaneously to different sensors of the smartphone and to record measurements of different quantities, as acceleration, magnetic field, proximity and light and sound intensity, which can be analyzed jointly. Besides, it also allows GPS positioning so that not only the measurements can be geo tagged, but also positions and velocities can be obtained from the GPS data. Then, this application allows the students to perform many different experiments in their daily activities. Using the SensorMobile app, students can use the data from the accelerometer and the gyroscope to study the movement whilst they commute from home to school, and then analyze the results using GPS data and a map to see the correspondence of their measurements with turns, straight accelerations, etc. They can also measure magnetic fields when they approach wires or transformers. Even at home, they can use the magnetometer to measure the magnetic fields along home wiring when they turn on or off ovens or washing machines. Other home experiences could consist of measuring how sound is absorbed by different materials like the doors wood or the brick or concrete walls, or how some loudspeakers can distort sound depending on the sound intensity. Also the light or sound intensity sensors can be used at home to analyze and check the inverse square law. Outside home, the students can use the gyroscope and accelerometer in the playground to analyze the movement in swings or sliders.

As an example of an experiment using multiple sensors simultaneously we show here results obtained using SensorMobile in a work to home short trip. In this experiment the accelerometer, gyroscope, light intensity sensor, magnetometer and GPS were used simultaneously. The repeatability and noise of the measurements were checked by comparing the results obtained in different trips. Using the data recorded by the different sensors together with the analysis of the trajectory from the GPS data, the students can study different concepts explained in a fundamental physics course, as speed, acceleration, magnetic field, etc. and relate them to their personal experiences. As an example of one of these measurements Figures 4 to 8 show results of one of these experiments using everyday activities. Figure 4 shows the trajectory followed in the experiment from the GPS data recorded by the application and the axis for the smartphone measurements.

An important aspect of physics experimentation is repeatability. This implies that along different runs of the same experiment similar results should be obtained, or that different experimenters should record similar data along the same experiment. Figure 5 shows two series of data obtained in this home to work ride experiment along two different days. As can be seen there, the data agree well in spite of the experimental noise of such an experiment, probing the reliability of the smartphone sensors for these measurements. For clarity only the magnetic field data recorded in the two experiments is represented in Figure 5. In order to enhance the comparison, the two data sets are represented versus the traveled distance, and not the traveled time as this can be affected by conditions, as may be the state of the traffic, that can't be uncontrolled by the experimentalist.

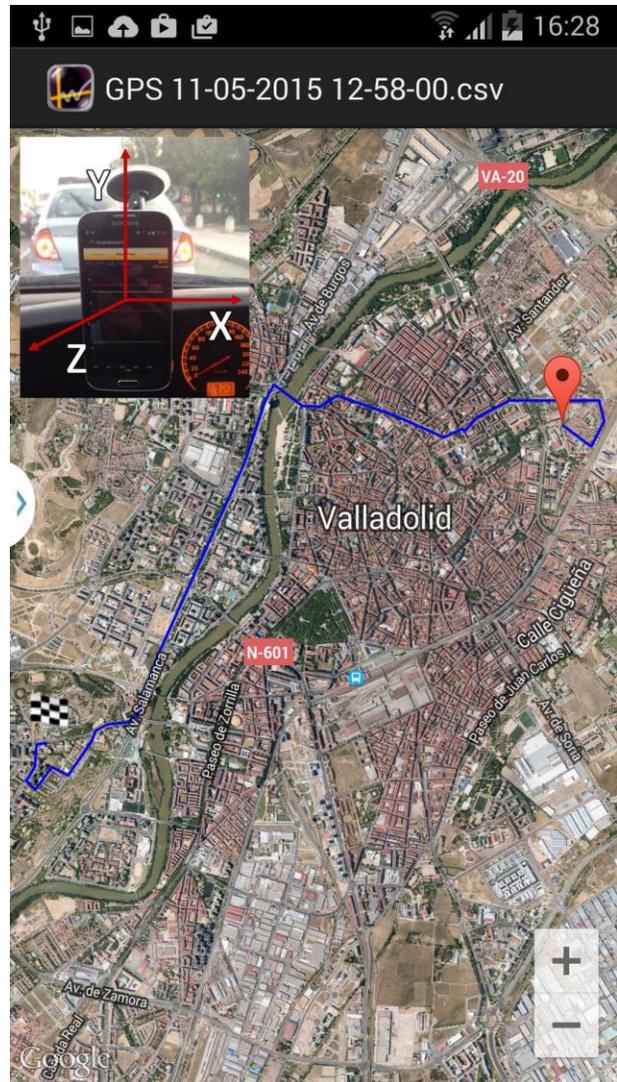


Figure 4. Trajectory followed along a daily trip from home to university used to record data using the smartphone sensors.

An example of the results recorded in different sensors along the experiment is displayed in Figure 6. In this figure the data from two components of the accelerometer (X and Z), the Y component of the gyroscope and the instantaneous value of the speed, obtained from the GPS data, are shown together. See figure 4 for an illustration of the smartphone axis. Analyzing figures like this the students can observe directly the relationship between the acceleration and the change in speed or in direction of the movement. In this experiment the smartphone was placed with its accelerometer Z component, acc z, along the direction of movement, so that while the Z component of the accelerometer is null the speed obtained from the GPS data is constant, but when

acc z is different from 0 the speed changes, depending its

change of the value and of the sign of acc_z . On the other hand, the X component of the accelerometer, acc_x , corresponds to the centripetal acceleration that appears when the car turns. Then, the values of acc_x are correlated with the data from the gyroscope component y , that gives the rotation of the car along that axis and the students can study the relationship between centripetal acceleration, acc_x , and the angular speed that can calculate from the gyroscope. All these are data that can illustrate well, both from a qualitative and from a quantitative point of view, many physical concepts of a basic physics course and show how the students can learn physics simply by using apps like the one described here in many usual activities. Of course, in order to obtain better learning results it would be advisable that the students use for their analysis figures a little less complex than the shown here, with shorter periods of time or comparing only results from two different sensors each time. Following the comment above, Figure 7 shows more clearly another interesting result useful for learning basic concepts of

kinematics. In this figure we have plotted only the dependence of the speed and distance along time obtained by the SensorMobile application from the measured GPS data. From similar figures the students can easily understand the relationship between both concepts, both from a physical and from a mathematical point of view. For example, the students can see that the position remains constant, or nearly constant considering the GPS accuracy, when the speed has a null value, as is seen in the square labeled as A in figure 7. Also, the students can analyze quantitatively the rate of change of the position and how it increases with increasing speed, as in the square B in that figure. In that square the rate of change of the position vs time curve has been averaged with a straight line of constant slope to reduce the experimental noise. The students can then compare that averaged value with the average value of the speed in the same time interval for a quantitative analysis in order to deduce the mathematical relationship between speed and position. In order to make easier comparisons, the students can limit their analysis to short intervals of time for which the speed is nearly constant.

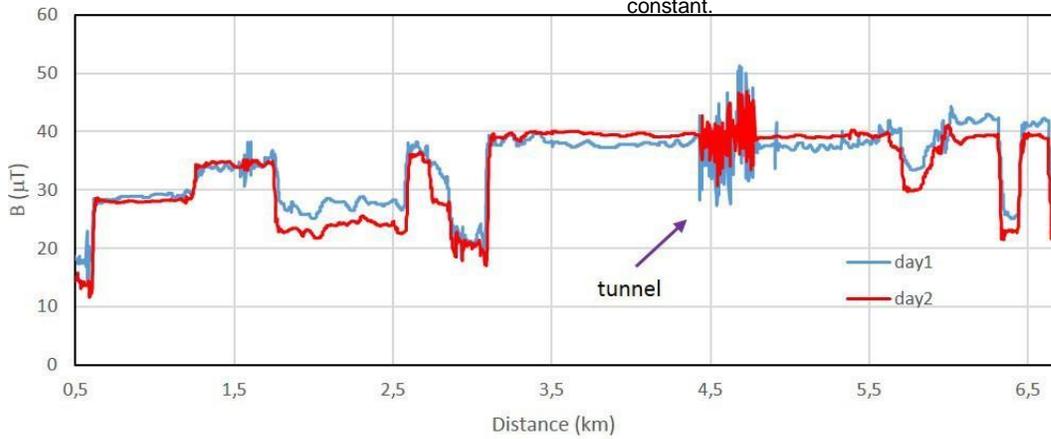


Figure 5. Comparison of the magnetic field recorded using SensorMobile along the same trip in two different days.

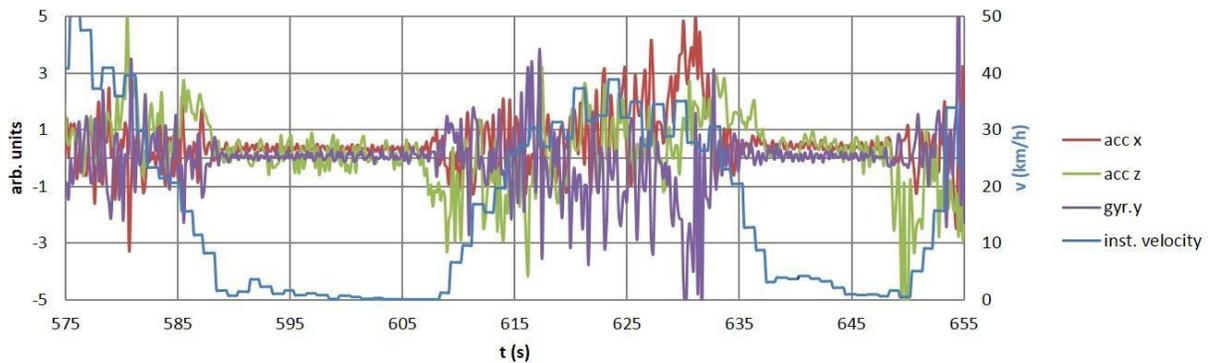


Figure 6. Results obtained using different sensors simultaneously with the SensorMobile app. Here, the results of two components of the accelerometer, X and Z, one component of the gyroscope, Y, and the speed obtained from the GPS are displayed together.

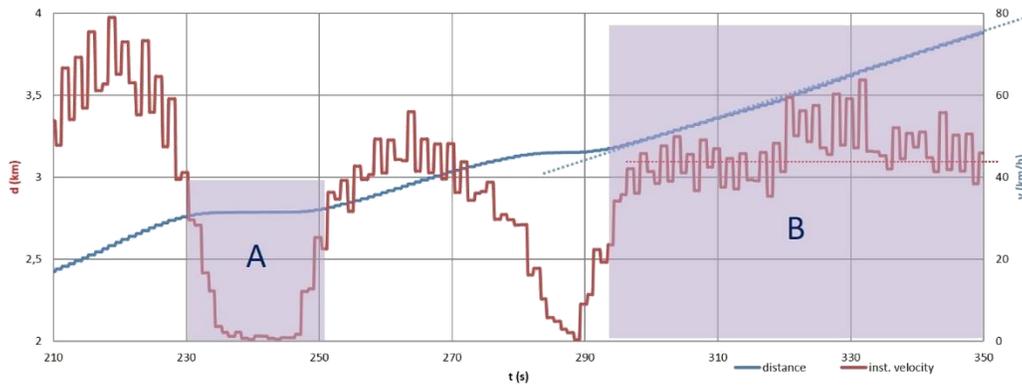


Figure 7. From the GPS data students can analyze the speed and distance along time and compare their relationship.

Finally Figure 8 shows the superposition of the results recorded with the accelerometer over the trajectory coordinates (latitude and longitude) obtained with the GPS. By using these combined graphs students can visualize the dependence of acceleration or velocity on the trajectory characteristics, as slopes, turns, etc.

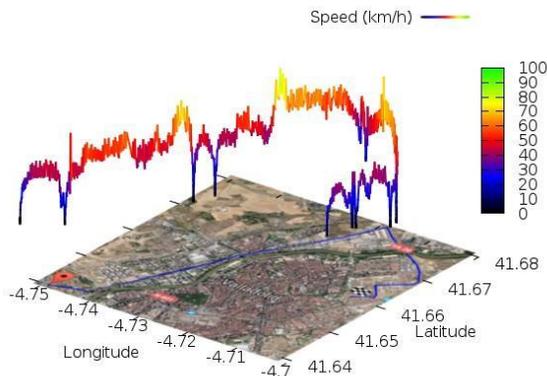


Figure 8. Correlation between the trajectory, using the latitude and longitude obtained with the GPS as in Figure 4, and the speed of the vehicle. The students can compare their measurements of different magnitudes with the trajectory in order to better understand, dependences, changes or singular points.

4. CONCLUSIONS

Mobile learning opens new possibilities for teaching and learning, facilitating the access to knowledge resources anytime and anywhere. At the same time, it eases the access to knowledge of less favored populations. But, beyond the role of knowledge facilitators, mobile devices can also play an active role in physics teaching and learning. We have shown in this

work how mobile sensors can be used to measure a variety of physical magnitudes. For these measurements to have a positive impact in students' learning, it's crucial that at least some characteristics of the mobile applications used to access the devices sensors are designed or checked by teachers. Between these characteristics we must cite the accuracy of the recorded results, the correct use of magnitudes names and units or the correct mathematical treatment of the recorded data. In order to correct some mistakes or conceptual gaps found in some freely available apps, our group designs and implements learning apps to be used in physics measurements. Our experiments with the developed apps have shown their reliability in several fields of physics as well as their utility in both, the laboratory work, substituting more expensive experimental devices, and outside the laboratory, along many everyday activities of the students. Two of the more important consequences of this reliability are, then, the possibility of developing low cost laboratories by using smartphones and tablets instead of more expensive devices, and second, the capability of extending the learning environment beyond the walls of the classrooms or laboratories.

5. ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank the University of Valladolid for partially supporting this work under grants PID2014_91 and PID2014_92.

6. REFERENCES

- [1] Molnar, A. 1997. Computers in education: A brief history. *The journal*, 24(11), 63-68.
- [2] Kellogg, S. 2013. Online learning: How to make a MOOC. *Nature*, 499(7458), 369-371. doi:10.1038/nj7458-369a PMID:23878863
- [3] Traxler, J. 2007. Defining, Discussing and Evaluating Mobile Learning: The moving finger writes and having writ.... *The International Review of Research in Open and Distributed Learning*, 8(2) 1-12.

- [4] Sharples, M., Taylor, J., & Vavoula, G. 2005. Towards a theory of mobile learning. *Proceedings of mLearn 2005*, 1(1), 1-9.
- [5] de la Pena-Bandalaria M. 2007. Impact of ICTs on open and distance learning in a developing country setting: the Philippine experience. *International Review of Research in Open and Distance Learning* 8, 1-15.
- [6] González, M., Adiego, J., Sanz, L., Garcia, R., and Hermo, C. 2006. Can the WWW Help to Reduce the Digital Divide? An Example of Cost Effectiveness in Teaching Laboratory Development. In *proceedings of the Fourth IEEE International Workshop on Technology for Education in Developing Countries*, 7-8 DOI=
<http://doi.ieeeecomputersociety.org/10.1109/TEDC.2006.5>
- [7] Neveu, A., Legendre, A., Martínez, O., Adiego, J., González, M.Á. 2009. An On-line Experiment: Solar Cell Characterization. In *Proceedings of the V International Conference on Multimedia and Information and Communication Technologies in Education (m-ICTE 2009)*, 330-334, ISBN 978-84-692-1788-7
- [8] Rochadel, W., Silva, J. B. D., Simão, J. P., Alves, G. R., Marcelino, R., and Gruber, V. 2013. Extending access to remote labs from mobile devices in educational contexts. *International Journal of Online Engineering* 9 (3) 9-13 DOI=
<http://dx.doi.org/10.3991/ijoe.v9i3.2538>
- [9] White, H. E., Weltin, H., Gould, M., & Rice, R. A. 1966. Quantitative Demonstration Exhibits and a New Low-Cost Physics Laboratory. *American Journal of Physics*, 34(8), 660-664.
- [10] Schreiber, C. L., Wong, E. Y., & Johnston, D. 1971. Low-Cost High-Resolution Ebert Spectrographs for a Teaching Laboratory. *American Journal of Physics*, 39(11), 1333-1336.
- [11] Golden, L. B., Klein, J. R., & Tongson, L. 1988. An introductory low-cost magnetic field experiment. *American Journal of Physics*, 56(9), 846-848.
- [12] Rossing, T. D. 2001. Low cost laboratory experiments in musical acoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 110(5), 2696-2696.
- [13] Polak, R., Cua, A. J., Perez, D. J., Robertson, M. Q., Stuck, J. A., and Thomas, J. M. 2014. Low-cost student experiments in optics. *The Physics Teacher*, 52, 442-443.
- [14] González, M. A., Arranz, G., Portales, R., Tamayo, M., & González, A. 2002. Development of a virtual laboratory on the internet as support for physics laboratory training. *European Journal of Physics*, 23(1), 61.
- [15] Egri, S. and Szabó, L. 2015. Analyzing Oscillations of a Rolling Cart Using Smartphones and Tablets. *The Physics Teacher*, 53(3), 162-164.
- [16] Gröber, S., Molz, A., & Kuhn, J. 2014. Using smartphones and tablet PCs for β -spectroscopy in an educational experimental setup. *European Journal of Physics*, 35(6), 065001.
- [17] Hirth, M., Kuhn, J., & Müller, A. 2015. Measurement of sound velocity made easy using harmonic resonant frequencies with everyday mobile technology. *The Physics Teacher*, 53(2), 120-121.
- [18] Klein, P., Hirth, M., Gröber, S., Kuhn, J., & Müller, A. 2014. Classical experiments revisited: smartphones and tablet PCs as experimental tools in acoustics and optics. *Physics Education*, 49(4), 412.
- [19] Kuhn, J., Molz, A., Gröber, S., & Frübis, J. 2014. iRadioactivity—Possibilities and Limitations for Using Smartphones and Tablet PCs as Radioactive Counters. *The Physics Teacher*, 52(6), 351-356.
- [20] Monteiro, M., Marti, A. C., Vogt, P., Kasper, L., & Quarthal, D. 2015. Measuring the acoustic response of Helmholtz resonators. *The Physics Teacher*, 53(4), 247-249.
- [21] González, Miguel Á., González, Manuel Á., Martín, M. E., Llamas, C., Martínez, O., Vegas, J., Herguedas, M. & Hernández, C. 2015. Teaching and Learning Physics with smartphones, *Journal of Cases in Information Technology* 17(1) 31-50.
- [22] González, Manuel Á., González, Miguel Á., Llamas, C., Martín, M. E., Vegas, J., Martínez, Ó., Hernández, C & Herguedas, M. 2014. Mobile phones for teaching physics: using applications and sensors. In *Proceedings of the Second International Conference on Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality*. ACM, New York, NY., 349-355 DOI=
<http://doi.acm.org/10.1145/2669711.2669923>
- [23] Huete, F., Esteban, D. da Silva, J.B., Skouri, M., González, M.A., Goudjami, D., Rochadel, W., González, M. A., 2015. SensorMobile, aplicación Android multilingüe con fines docentes para el acceso a sensores de smartphones. In *Proceedings of the XIII Jornadas de Redes de Investigación en Docencia Universitaria*, Alicante (Spain).
- [24] Vieyra, R., Wenning, C. Using Technology Effectively. In *Teaching High School Physics*, chapter 11, volume 1.
- [25] Emery, S. 2012. Factors for consideration when developing a bring your own device (BYOD) strategy in higher education. *Doctoral dissertation, California College of the Arts*.
- [26] Song, Y. 2014. "Bring Your Own Device (BYOD)" for seamless science inquiry in a primary school. *Computers & Education*, 74, 50-60.
- [27] Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., & Sanders, J. V. 1999. *Fundamentals of acoustics. Fundamentals of Acoustics, 4th Edition*, by Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppens, James V. Sanders, pp. 560. ISBN 0-471-84789-5. Wiley-VCH, December 1999, 1.
- [28] González, Manuel Á., González, Miguel Á., Martín, E., Santos, R., del Pozo, A., Díez, A., Prieto, V., Martínez, P., Aznar, J., de los Mozos, D., 2015. Física Experimental en Ambientes Informales con Smartphones. In *Proceedings of the XXXV Reunión Bienal de la Real Sociedad Española de Física*, Gijón (Spain).
- [29] <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.sensor.mobile>

