

AudiA: laboratorio (en el) móvil para el aprendizaje práctico de la Física Audia: mobile laboratory for learning physics

Juan Carlos Cañedo

Universidad de Valladolid, España

juancar.canedo@yahoo.es

Saida Ibnyaich

Faculté des Sciences, Semlalia, Université Cadi-Ayyad Marrakech, Marruecos

s.ibnyaich@uca.ac.ma

Manuel. A. González

Escuela de Ingeniería Informática, Universidad de Valladolid, España

manuelgd@fmc.uva.es

Miguel. A. González

Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid, España

mrebollo@eii.uva.es

Resumen

El grupo de innovación docente TIA (Tecnología, Innovación y Aprendizaje) trabaja tanto en el desarrollo de aplicaciones que permitan usar los móviles en la docencia práctica de la física, así como en el diseño de experimentos que se puedan realizar con ellas. De esta manera los estudiantes pueden usar sus propios teléfonos para confrontar por sí mismos sus conocimientos o creencias con los resultados de sus propias medidas y aprender Física con la observación del entorno que les rodea. En esta comunicación presentamos una aplicación AudiA que permite el estudio de las características más relevantes de las ondas sonoras, así como la utilización de éstas para realizar experimentos de otras áreas de la física. Los resultados muestran que el uso de los propios dispositivos móviles de los estudiantes incrementa su interés por la física, facilita su comprensión conceptual y aumenta el trabajo autónomo.

Palabras-clave: *Smartphones, física, experiencias, sonido, aplicaciones, BYOD.*

Abstract

The group of teaching innovation TIA (Tecnología, Innovación y Aprendizaje) works both in the development of applications that allow mobile use in practical teaching of physics, as well as experience design that can be done with them. In this way, students can use their own phones to confront themselves their knowledge with the results of their own measurements and learn physics with observing the environment around them. In this paper we present an application, Audia, that allows the study of the most important characteristics of sound waves and using them for experiments in other areas of physics. The results show that the use of mobile devices increases students' own interest in physics, facilitates conceptual understanding and increases their autonomous work.

Keywords: *Smartphones, physics, experiments, sound waves, apps, BYOD*

Introducción

El término física proviene de los vocablos griegos “φυσικῆς physis” - realidad o naturaleza - e “ἰκός iko” -pertenciente a- (Barnhart, 1988). La Física se puede definir como la ciencia que estudia las propiedades de la materia y de la energía y la interacción entre ellas (dictionary.cambridge.org, 2016). Para comprender estas propiedades los físicos siempre han realizado experiencias. Además los experimentos juegan un papel esencial en el aprendizaje de la física. Experimentar permite a los estudiantes observar los fenómenos, verificar las hipótesis

y aplicar sus conocimientos para comprender la naturaleza del universo (Chiaverina & Vollmer, 2005). La experimentación resulta pues indispensable en el aprendizaje de la física. Sin embargo no siempre resulta sencillo disponer de lo necesario para llevar a cabo esta experimentación. Laboratorios para hacerlo, materiales necesarios, tiempo disponible, estos factores resultan imprescindibles, aunque no siempre pueden reunirse, para la realización de experimentos en los laboratorios docentes tradicionales. Sin embargo los smartphones permiten obviar cualquiera de los tres factores señalados facilitando la realización de prácticas que además tendrán un coste muy razonable. En efecto, estos dispositivos disponen de una gran variedad de sensores, tales como acelerómetros, giróscopos, magnetómetros, micrófonos, ..., que permiten su empleo para el diseño y montaje de prácticas docentes. Con ellos se hace innecesario disponer de laboratorios, aunque puedan también ser utilizados en ellos, siendo posible realizar experiencias en cualquier lugar, en cualquier momento y con un material que los estudiantes llevan habitualmente en sus bolsillos, “Bring Your Own Device – BYOD” (The NMC Horizon Report: 2016 Higher Education Edition, 2016) (Johnson, Adams, Estrada, & Freeman, 2015). Además al no estar constreñidos para la realización de prácticas al laboratorio tradicional, se pueden plantear actividades formativas fuera del aula que conectan la ciencia que se aprende en el aula con los fenómenos que se observan en su entorno, disminuyendo la barrera que existe entre el aprendizaje formal y el informal (Johnson, Adams, Estrada, & Freeman, 2015). De esa manera se consiguen generar entornos de aprendizaje más sutiles y motivadores (Telefónica, 2013), entornos denominados 4P: Placed (ubicados), purposeful (con sentido), passion-led (motivadores), pervasive (distribuida y ampliada) (Futures, 2012). Es decir las actividades se sitúan en un mundo que el estudiante conoce y quiere entender, son auténticas y tienen sentido, captan las pasiones de los estudiantes y profesores aumentando su implicación y por lo tanto el aprendizaje irá más allá del tiempo y del aula.

Por otro lado, la conversión de la telefonía inalámbrica en una tecnología de masas ha provocado una continua bajada del precio tanto del acceso a la red como el de los teléfonos móviles, junto con un aumento de sus prestaciones. Acceso a redes sociales y a la información, capacidad de captura de datos físicos y biométricos relevantes, potencia de cálculo, captura de imágenes y video, etc., se integran de manera más intensa en los comportamientos sociales, especialmente entre los segmentos más jóvenes de la población que, por otra parte, se encuentran en su etapa de aprendizaje. En este contexto y sin total unanimidad e incluso con importantes controversias, la utilización sistemática de los teléfonos móviles como herramienta que favorece el aprendizaje parece que puede tener un gran potencial. De hecho hay estudios que señalan que el empleo de estos dispositivos en el aula favorece el aprendizaje, aumentando

tanto la motivación como la cantidad y calidad del trabajo de los estudiantes (Martin & Ertzberger, 2013).

Objetivos

En este contexto se plantea utilizar los smartphones como dispositivos de captura, visualización y pretratamiento de datos para diseñar experiencias de Física que puedan ser realizadas tanto en ambientes formales como informales. Para ello es preciso utilizar aplicaciones (apps) que puedan acceder a los datos almacenados por los sensores disponibles en estos dispositivos. Aunque ya existen numerosas aplicaciones de este tipo asociadas con los Sistemas Operativos (SO) más comunes, sin embargo al no haber sido la mayoría de ellas desarrolladas con fines docentes a menudo adolecen de errores conceptuales importantes. Obviamente esto no impide que los datos adquiridos sean válidos y puedan ser utilizados con fines docentes con las necesarias precauciones. Y de hecho hay cada vez más artículos que describen experiencias realizadas a menudo con aplicaciones específicas y no específicas (Gómez-Tejedor, Castro-Palacio, & Monsoriu, 2014), (Wei, Huang, Li, Yang, & Wang, 2014), (Briggle, 2013), (Pendril, 2013) (Monteiro, Cabeza, & Martí), (Vieyra, Vieyra, Jeanjacquot, Martí, & Monteiro, 2015) (Parolin & Pezzi, 2015). La detección de ciertos problemas conceptuales con este tipo de aplicaciones (González M. A., y otros, 2015) impulsó la necesidad de desarrollar aplicaciones específicas diseñadas con fines docentes, cuidando escrupulosamente las informaciones que se dan y cómo se dan. Es decir, con las explicaciones y ayudas pertinentes, límites de validez, unidades, magnitudes, representaciones gráficas, etc., detalles que se tienen en cuenta en las actividades prácticas tradicionales de los estudiantes.

Se han desarrollado con esta filosofía diferentes aplicaciones en entorno Android, estando algunas de ellas a disposición de todo el mundo en la tienda de aplicaciones de google (Huete , Esteban, González, & González, 2015). Las interesantes posibilidades de desarrollo en este campo llevaron a plantearse trabajos colaborativos colegas de otras y a introducir el multilingüismo en algunas de las apps desarrolladas (Huete , y otros, 2015).

AudiA, la app objeto de esta comunicación, ha sido desarrollada en el marco de un Proyecto Fin de Carrera (Cañedo, 2014). AudiA es una aplicación destinada al estudio de las principales características de las Ondas Sonoras. Para ello utiliza el micrófono y los altavoces de los smartphones o tabletas.

La app está disponible en Google Play para su descarga gratuita (Cañedo, 2015). Actualmente se está diseñando una nueva versión de la misma.

Características de la Aplicación

Software

La aplicación se ha desarrollado en entorno Android al ser éste el SO más extendido entre los estudiantes. La gran fragmentación de este SO (socialcompare.com, 2016), con un número importante de distintas versiones funcionales, además de los diferentes tamaños de pantalla y de resolución de los dispositivos que las soportan o la amplia diversidad de fabricantes que añaden una capa propia al sistema operativo original, son aspectos que complican considerablemente el desarrollo de la app. Sin embargo este aspecto es importante si se pretende que los estudiantes utilicen su propio dispositivo (BYOD), por lo que es necesario conseguir que funcione en el mayor número posible de ellos. Para conseguirlo durante el desarrollo se ha probado en una amplia gama de dispositivos introduciendo las modificaciones necesarias para dar cobertura a la mayor cantidad de éstos.

AudiA está testada desde la versión 2.2 (Froyo), hasta la 5.1 (Lollipop). Como pantalla de referencia se ha utilizado una de 4,3 pulgadas y 720x1280 píxeles de resolución, con una densidad de 342 píxeles por pulgada. No hay una versión diferenciada para tabletas con mayor tamaño de pantalla. El entorno de trabajo ha sido Eclipse 4.2.1, y el lenguaje de programación Java.

Diseño

AudiA se ha diseñado para usos específicamente didácticos, por lo que tiene algunas características propias que la diferencian de las más usuales que se encuentran en la tienda de aplicaciones. Los aspectos más destacados son:

- Se ha diseñado una app gráficamente sencilla, procurando que el tiempo de aprendizaje sea muy reducido para que pueda ser utilizada rápidamente.
- Dispone de una ayuda en todas las diferentes secciones donde además de explicar el funcionamiento de la aplicación se hace hincapié en los conceptos físicos relativos a dicha sección.
- Se ha tenido un cuidado especial en aspectos como en las representaciones gráficas con las unidades y abreviaturas que se emplean, la conversión en diferentes unidades, se pone claramente de manifiesto cómo se efectúan y cuáles son los límites de las medidas que se pueden tomar. En general se ha pretendido introducir el rigor necesario propio de una aplicación docente.
- Los sonidos que registra se pueden almacenar en diferentes formatos, wav, csv para facilitar su tratamiento y posterior explotación.
- Se la ha dotado de un sistema de calibrado para la medida de la intensidad del sonido.

De manera que es posible realizar medidas absolutas de intensidad del sonido si se dispone de

los medios necesarios. En caso de no ser así se explicita claramente que las medidas serán únicamente relativas.

- Dispone de un menú de configuración con diferentes opciones que facilitan su adecuación a los diferentes tipos de medidas.
- Se ha diseñado un apartado para la realización de una serie de prácticas específicas de física.



Figura 1- Capturas de pantalla de dos de los menús de AudiA. Izq-Menú principal; Der- Menú Experiencias

Herramientas y utilidades de AudiA

La aplicación se ha estructurado en cuatro apartados relativos a sus utilidades figura 1 (izquierda):

1. Audiometrías. AudiA permite la obtención de los umbrales de audición del oído mediante la utilización de los auriculares del smartphone, con la posibilidad de almacenar los datos de diferentes usuarios.
2. Herramientas. La aplicación se puede utilizar como sonómetro, permite también el cálculo de la transformada de Fourier en tiempo real del sonido y también la de los ficheros previamente grabados. Además genera ondas sonoras de diferentes tipos, sinusoidales, cuadradas, triangulares, permitiendo variar su frecuencia y duración, también genera ruido rosa, blanco, marrón. Se puede utilizar también como grabadora de sonido permitiendo su almacenamiento en distintos formatos, wav, csv. Como veremos posteriormente este apartado facilita la utilización de AudiA para la realización de medidas que comprenden otros campos de la física.

3. Experiencias. Aquí se accede a menú de experimentos prediseñados relativos a las ondas sonoras: ondas estacionarias en tubos, efecto Doppler, batidos, interferencias y difracción, figura 1 (derecha). En cada uno de ellos en la ayuda se explica detalladamente la realización de estas experiencias.
4. Calibrado. En el caso de disponer del material adecuado se puede realizar el calibrado del smartphone donde se haya instalado la aplicación. En este caso se podrán realizar medidas absolutas de la intensidad del sonido, figura 2 (González M. A., y otros, 2015). La aplicación permite la utilización de micrófonos y altavoces externos de mayor calidad que los del propio dispositivo, esta característica junto con el calibrado permite que se pueda disponer de un instrumento de medida de características profesionales con un coste bastante reducido.

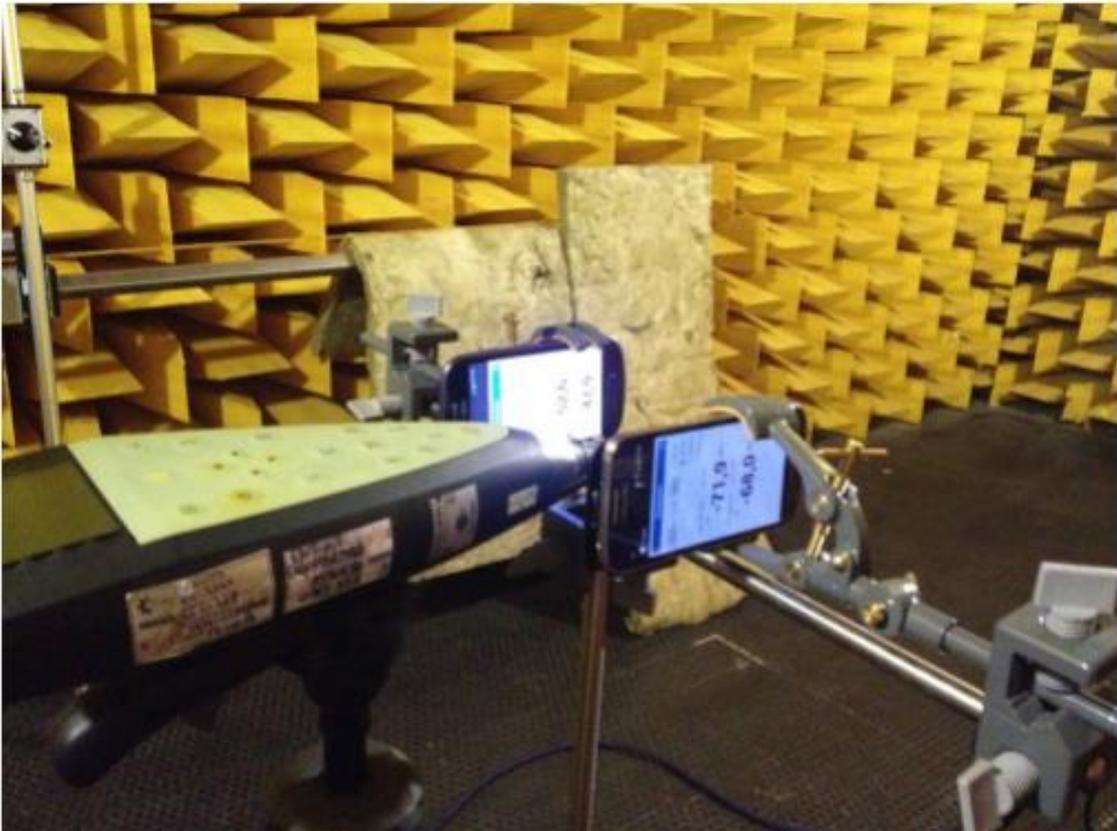


Figura 2-Proceso de calibrado con AudiA de dos Smartphones Samsung SIII mini y SIV mini en la sala anecoica de la Escuela de Ingenierías Industriales de Valladolid

Resultados

Sonido

A continuación se presentan algunas de las experiencias relacionadas con el estudio de las propiedades de las ondas sonoras que se pueden llevar a cabo con AudiA.

Ondas estacionarias en tubos

Una de las experiencias clásicas de sonido consiste en la determinación de las frecuencias de resonancia de tubos, abiertos o cerrados de diferentes longitudes y diámetros. Se puede además determinar la velocidad del sonido y su dependencia con la temperatura del medio. Uno de los montajes más habituales suele ser el denominado tubo de Kundt. Para realizar esta práctica se necesita un generador de ondas, un altavoz, un micrófono y un osciloscopio, además, obviamente del tubo. Con AudiA es posible prescindir de todos esos equipos y utilizar solamente el smartphone y un tubo que puede ser un sencillo tubo de cartón como los utilizados para enviar documentación por correo. En la figura 3 se pueden ver varios montajes con un tubo abierto y utilizando un altavoz bluetooth o mediante un globo que se hace estallar para generar un ruido blanco. En el montaje de la derecha se utiliza un tubo cerrado, una probeta, que permite además variar su longitud sin más que llenarlo más o menos de agua. Como se puede constatar el montaje es muy sencillo y no necesita instrumentos especializados, pudiéndose realizar incluso fuera del laboratorio.

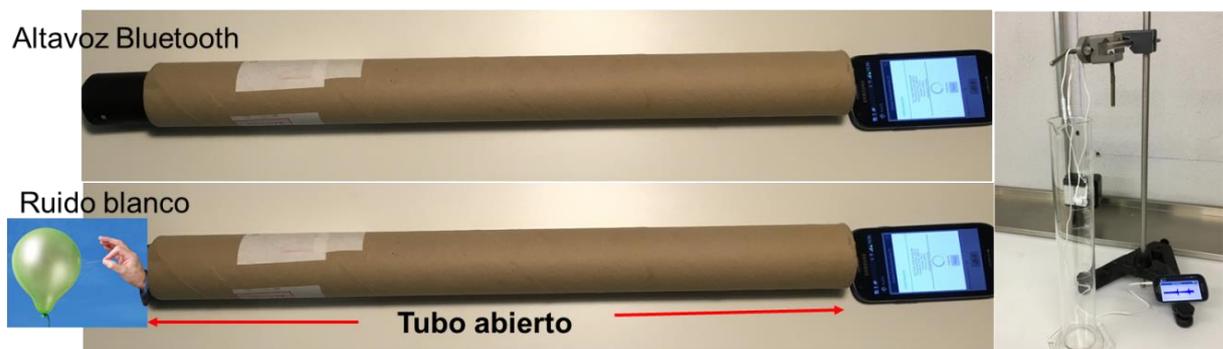


Figura 3 - Diferentes montajes para el estudio de ondas estacionarias en tubos con AudiA

Los resultados obtenidos con los diferentes montajes son satisfactorios, aproximándose notablemente a los que predice un sencillo modelo teórico del sistema, figura 4.

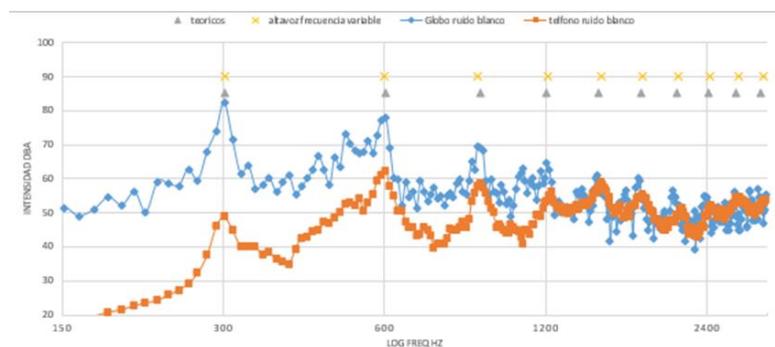


Figura 4 - Frecuencias de resonancia de un tubo abierto, obtenidas con diferentes métodos experimentales. En gris los valores teóricos, amarillo frecuencia variable emitida con un altavoz bluetooth, azul ruido blanco haciendo estallar un globo, naranja ruido blanco generado por el Smartphone.

Interferencias originadas por dos fuentes sonoras

En la figura 5 podemos observar el montaje y los resultados para la realización de una experiencia de interferencia de dos ondas sonoras generadas por dos fuentes idénticas, en este caso los altavoces. Como dispositivo de grabación se utiliza el propio teléfono. En el cuadro interior se ve una de las medidas de intensidad. El montaje está realizado fuera del laboratorio para demostrar que a pesar de ser relativamente precario los resultados son bastante aceptables. Obviamente en el laboratorio con un montaje que permita medir con mayor precisión las distancias y que conserve siempre la colocación relativa entre los altavoces y el teléfono en las distintas posiciones de medida los resultados serán mucho más precisos.

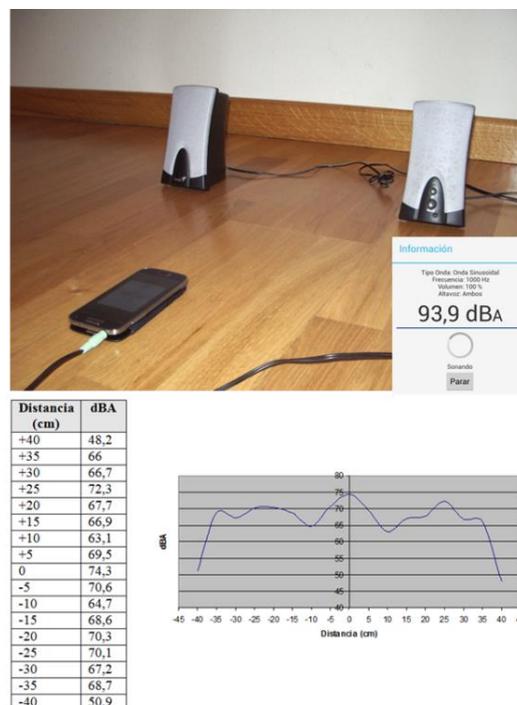


Figura 5 - Montaje y resultados en una experiencia de interferencias de ondas sonoras producidas por dos fuentes.

En este experimento se puede modificar la frecuencia emitida para ver como influye en las medidas. También se puede trabajar con una única fuente y algún obstáculo para realizar estudios de difracción.



Figura 6 - Esquema de la experiencia para la observación del eco y la determinación de la velocidad del sonido con AudiA. El montaje ha sido realizado por la Dra.Sara Parolin ((Parolin, 2015))

Eco y velocidad del sonido

Con la herramienta grabadora de sonido, es posible estudiar el fenómeno del eco y determinar la velocidad del sonido. La experiencia fue descrita por la profesora Sara Parolin en un Workshop celebrado en Nápoles sobre la utilización de estos dispositivos (Parolin, 2015). Tal y como se puede ver en la figura el montaje es muy sencillo, basta con un tubo cerrado un clic y AudiA, siendo los resultados enteramente satisfactorios.

Otras experiencias

Las denominadas herramientas que se han incluido en AudiA han resultado de gran interés y han permitido ampliar el tipo de experiencias a otros campos de la física tal y como se puede comprobar a continuación.

Determinación del coeficiente de restitución de diferentes cuerpos

Se ha determinado el valor del coeficiente de restitución (COR) de pelotas de distintos materiales: dos pelotas de ping pong de diferente calidad, una pelota de golf y una pelota maciza de plástico blando. Además se ha observado la dependencia del COR en función de la temperatura para los diferentes materiales.

Para la realización de la experiencia se ha utilizado la grabadora de sonido de AudiA. El procedimiento experimental resultaba muy sencillo figura 7, y consistía simplemente en dejar caer las pelotas desde diferentes alturas iniciales conocidas grabando el sonido de los tres primeros botes. Conocida la altura inicial y midiendo el tiempo transcurrido entre los botes se

puede determinar de una manera muy sencilla el coeficiente de restitución. También es posible determinar el valor de la aceleración de la gravedad (González & González, 2015).

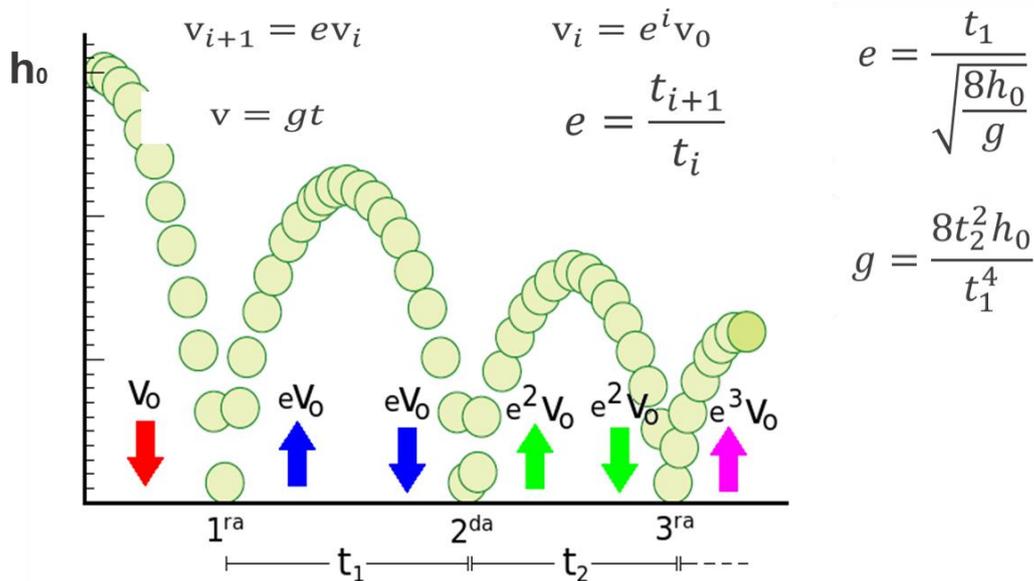


Figura 7 - Esquema del procedimiento experimental para la determinación del coeficiente de restitución “e” con Audia

Determinación del módulo de Young de varillas de diferentes materiales

En este caso se estudian las vibraciones de varillas de diferentes materiales obteniéndose las frecuencias de resonancia, el módulo de Young y la velocidad de propagación del sonido. El montaje de nuevo es muy sencillo y barato pero se obtienen resultados de excelente calidad.

El procedimiento experimental consiste en grabar el sonido originado por la vibración de las varillas y a continuación mediante un análisis de Fourier del archivo grabado obtener las frecuencias fundamentales. Todo el proceso es llevado a cabo por Audia. En la figura 8 se presenta una imagen compuesta por la fotografía del montaje, la representación de la intensidad del sonido generado en función del tiempo, el análisis de Fourier del mismo y la gráfica con resultados de la dependencia de las frecuencias de vibración con la longitud y el material de las varillas (González & González, 2016 (To be published)).

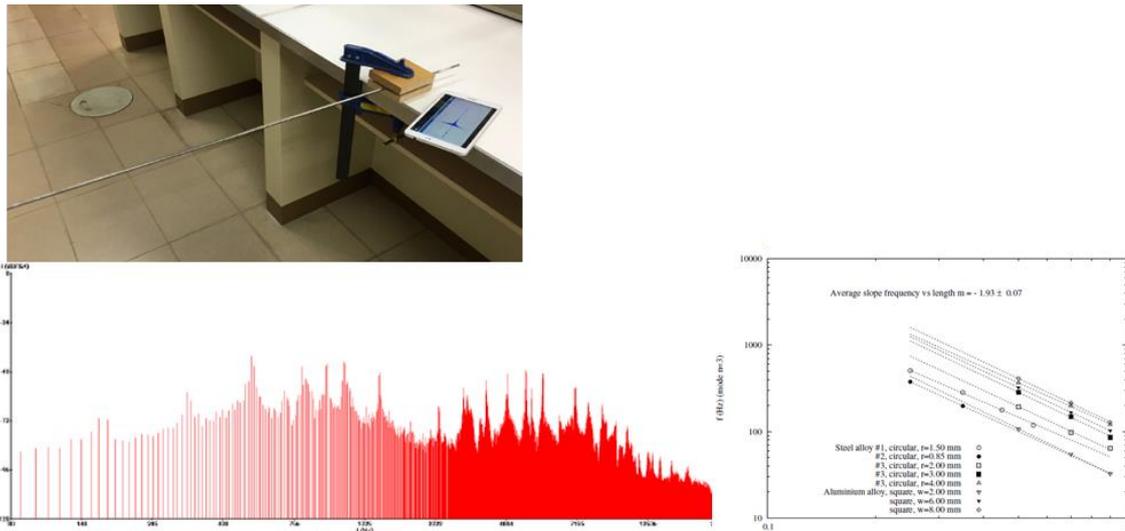


Figura 8 - Montaje experimental y resultados del estudio de vibraciones en diferentes tipos de varillas

AudiA, utilización y perspectivas

La versatilidad de la aplicación permite su empleo para la realización de prácticas de distintas partes de la física y con diferentes niveles de alumnos. Inicialmente se ha utilizado con grupos reducidos de estudiantes de bachillerato y universitarios de primer año. Aunque los resultados, están siendo aún analizados, las primeras conclusiones permiten adelantar que han sido satisfactorios, de manera que se está planteado su utilización más intensiva en el próximo curso académico. Además el interés despertado por parte de colegas de otras Universidades ha llevado a impulsar el desarrollo de una segunda versión de AudiA, que aún está en fase beta, introduciendo una serie de modificaciones y mejoras sugeridas por ellos.

Como novedades más importantes de la próxima versión se pueden señalar:

- Multilinguaje. La aplicación se diseñó inicialmente para un único idioma, el español. Sin embargo, la nueva versión, estará preparada para poder trabajar con diferentes idiomas, inicialmente español, inglés y francés. En un futuro y mediante un trabajo colaborativo se incorporarán el árabe, el italiano y el portugués. El esfuerzo para conseguir esta adaptación ha sido muy importante porque ha sido necesario modificar la introducción de los textos que aparecen en los menús, definiéndoles todos ellos como variables cuyo valor en los diferentes idiomas de la aplicación se encuentra en una tabla de datos. Además ha sido necesario traducir todas las ayudas.
- Introducción de la herramienta de Zoom en todos los gráficos. En la versión actual solamente se podía hacer en el gráfico de la transformada de Fourier.

- Tiempo de reverberación. Se ha introducido una nueva herramienta para la determinación del tiempo de reverberación por diferentes métodos.

Ahondando en los aspectos pedagógicos que se quieren potenciar con las aplicaciones que se desarrollan en el seno del grupo de investigación, en este momento el grupo TIA está trabajando en la elaboración de montajes prácticos con su correspondiente guion, que se han denominado Kits Docentes, y que se publicarán en la Web. De esta manera todos aquellos docentes que quieran utilizar la aplicación se encontrarán con todo lo necesario para poder elaborar ellos mismos sus guiones adaptando los que se les ofrecen a sus necesidades docentes. Este trabajo que también será colaborativo, se publicará en diferentes idiomas.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de Valladolid por el apoyo prestado a través de su programa de Innovación Docente PID2015_128 y PID2015_129.

Referencias

- Barnhart, R. K. (1988). *Diccionario de Etimología de Barnhart*. H. W. Wilson Co.
- Briggle, J. (2013). *Physics Education*, 48, 285-288.
- Cañedo, J. C. (2014). *Audia: Estudio de Ondas Sonoras y Audiometrías en entorno Android*. Valladolid, España.
- Cañedo, J. C. (2015). *Googleplay*. Recuperado el 20 de 03 de 2016, de <https://play.google.com/store/apps/details?id=es.uva>.
- Chiaverina, C., & Vollmer, M. (2005). *Learning physics from the experiments*. Recuperado el 20 de 03 de 2016, de <http://www.girep2005.fmf.uni-lj.si/dwreport/dwb.pdf>
- dictionary.cambridge.org*. (2016). Recuperado el 20 de 03 de 2016, de <http://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/physics>
- EDUCAUSE Learning Initiative (ELI)*. (2016). Consulté le 03 22, 2016, sur <https://library.educause.edu/~media/files/library/2016/2/hr2016.pdf>
- Fenichel, M., & Schweingruber, H. A. (2010). *Sourrounded by Science: Learning Science in Informal Environments*. Washington DC., EEUU: The National Academic Press.
- Futures, L. (2012). *www.innovationunit.org*. Recuperado el 20 de 03 de 2016, de http://www.innovationunit.org/sites/default/files/Learning%20Futures_Engaging_Schools.pdf

- Gómez-Tejedor, J. A., Castro-Palacio, J. C., & Monsoriu, J. A. (2014). *European Journal of Physics*, 35.
- González, M. A., & González, M. A. (2015). *International Conference on Multimedia in Physics Teaching and Learning*. Munich.
- González, M. A., & González, M. A. (2016 (To be published)). Smartphones as experimental tools to measure acoustical and mechanical properties of vibrating rods. *European Journal Of Physics*.
- González, M. A., González, M. A., Martín, E., Llamas, C., Martínez, O., Vegas, J., . . . Hernández, C. (2015). Teaching and Learning Physics with Smartphones. *Journal of cases on Information Technology (JCIT)*, 17(1), 31-50.
- Huete , F., Esteban, D., Da Silva, J. B., Skouri, M., González, M. A., Goudjami, D., . . . González, M. A. (2015). Sensor Mobile, aplicación Android multilingüe con fines docentes para el acceso a sensores de smartphones. En M. T. Tortosa Ybáñez, *XIII Jornadas de Redes de Investigación en Docencia Universitaria. Nuevas estrategias organizativas y metodológicas en la formación universitaria para responder a la necesidad de adaptación y cambio* (págs. 74-86). Alicante: Universidad de Alicante.
- Huete , F., Esteban, D., González, M. A., & González, M. A. (2015). *GooglePlay*. Recuperado el 20 de 03 de 2016, de Sensor Mobile Application: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.sensor.mobile>
- Johnson, L., Adams, B. S., Estrada, V., & Freeman, A. (2015). *NMC Horizon Report*. Austin, Texas: Higher Education Edition; The New Media Consortium.
- Martin, F., & Ertzberger, J. (2013). Here and now mobile learning: An experimental study on the use of mobile technology. *Computers&Education*, 68, 76-85.
- Monteiro, M., Cabeza, C., & Martí, A. (s.f.). *European Journal Of Physics*, 35.
- Parolin, S. O. (2015). Acustica e Ottica. *Smartphone e tablet per l'insegnamento delle scienze*. Napoles.
- Parolin, S. O., & Pezzi, G. (2015). Kundt's tube experiment using smartphones. *Physics Education*, 50(4), 443-446.
- Pendril, A. M. (2013). *European Journal of Physics*. 34, 1379-1389.
- socialcompare.com*. (2016). Recuperado el 20 de 03 de 2016, de Android versions comparison: <http://socialcompare.com/en/comparison/android-versions-comparison>

Telefónica. (2013). Recuperado el 20 de 03 de 2016, de

<http://laboratorios.fundaciontelefonica.com/wp-content/uploads/2013/10/>

Laboratorio-mLearning_informe-investigacion_def.pdf

Vieyra, R., Vieyra, C., Jeanjacquot, P., Martí, A., & Monteiro, M. (2015). The Science Teacher. 82, 32-40.

Wei, M., Huang, S., Li, H., Yang, H., & Wang, S. (2014). *European Journal of Physics*, 36.