



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Didáctica de la Física Experimental con Smartphones

TESIS DOCTORAL

Memoria presentada por:
Isabel Salinas Marín

Directores:
Juan Antonio Monsoriu Serra
Juan Ángel Sans Tresserras

Junio 2019

Resumen

El objetivo de las prácticas de laboratorio de Física es doble: por un lado, reforzar los conocimientos adquiridos previamente en las clases de teoría y problemas, y por otro, habituarse a las técnicas experimentales propias del método científico. Sin embargo, los estudiantes no siempre lo perciben así. Como elemento motivador, se propone que los estudiantes utilicen su propio teléfono móvil (*smartphone*) como instrumento de medida, controlando los sensores mediante aplicaciones (*Apps*) gratuitas. La ventaja de utilizar el móvil es múltiple: por una parte, se fomenta el interés del alumnado; por otra parte, la gama de ensayos existente es muy amplia y variada.

El objetivo fundamental de esta Tesis es explorar nuevas vías de aplicación de los sensores de los *smartphones* a la didáctica de la Física. Al mismo tiempo que se introduce un elemento innovador, como es el uso de un dispositivo móvil como herramienta de medida, se ha optado por ensayos sencillos que se puedan adaptar tanto a las enseñanzas a nivel de educación secundaria como universitaria. En este documento se recopila, en formato de compendio de publicaciones, una serie de experiencias que aportan una perspectiva diferente al trabajo realizado en un laboratorio.

Se utiliza el sensor de aceleración para el estudio del movimiento rectilíneo vibratorio forzado con amortiguamiento débil, en un carril cinemático, y del movimiento oscilatorio armónico, en un aparato de torsión; el sensor de presión para el análisis de las oscilaciones amortiguadas en un medio viscoso; el giroscopio para estudiar la dinámica de un yoyó; y, finalmente, el sensor de luz ambiente para el análisis de la dependencia de la iluminancia con la distancia.

Resum

L'objectiu de les pràctiques de laboratori de Física és doble: d'una banda, que els estudiants reforcen els coneixements adquirits prèviament en les classes de teoria i problemes; per una altra, que s'habituen a les tècniques experimentals pròpies del mètode científic. No obstant això, els estudiants no sempre ho perceben així. Com a element motivador, es proposa que els estudiants utilitzin el seu propi telèfon mòbil (*smartphone*) com a instrument de mesura, controlant els sensors mitjançant aplicacions (*Apps*) gratuïtes. L'avantatge d'utilitzar el mòbil és múltiple: d'una banda, es fomenta l'interès de l'alumnat; d'altra banda, la gamma d'assajos existent és molt àmplia i variada.

L'objectiu fonamental d'aquesta Tesi és explorar noves vies d'aplicació dels sensors dels *smartphones* a la didàctica de la Física. Al mateix temps que s'introdueix un element innovador, com és l'ús d'un dispositiu mòbil com a eina de mesura, s'ha optat per assajos senzills que es puguin adaptar tant als ensenyaments a nivell d'educació secundària com a universitària. En aquest document es recopila, en format de compendi de publicacions, una sèrie d'experiències que aporten una perspectiva diferent al treball realitzat en un laboratori.

S'utilitza el sensor d'acceleració per a l'estudi del moviment rectilini vibratori forçat amb esmorteïment dèbil, en un carril cinemàtic, i del moviment oscil·latori harmònic en un aparell de torsió; el sensor de pressió per a l'anàlisi de les oscil·lacions esmorteïdes en un mitjà viscos; el giroscopi per a estudiar la dinàmica d'un io-io; i, finalment, el sensor de llum ambient per a l'anàlisi de la dependència de la il·luminància amb la distància.

Abstract

The objective of the laboratory practices of Physics is twofold: on the one hand, to reinforce the knowledge previously acquired in theory and problem classes, and on the other hand, to get used to the experimental techniques of the scientific method. However, students do not always perceive it that way. As a motivating element, it is proposed that students use their own mobile phone (smartphone) as a measuring device, controlling its sensors through free applications (*Apps*). The advantage of using the mobile is multiple: the interest of the students is encouraged but also the range of existing experiments is very wide and varied.

The main objective of this Thesis aims to explore new ways of applying the sensors of smartphones to the didactics of Physics. At the same time that an innovative element is introduced, such as the use of a mobile device as a measuring tool, simple experiments have been chosen to being adapted to both secondary and university education. This document compiles a series of publications that show a different approach to the laboratory work.

The acceleration sensor enables us to study the forced and damped oscillations in a dynamic track, and the harmonic oscillatory motion, in a torsion apparatus; the pressure sensor is used for the analysis of damped oscillations in a viscous medium; the gyroscope to study the dynamics of a yo-yo; and, finally, the ambient light sensor is used to determine the dependence of the illuminance of several light sources with the distance.

*A mi familia y amigos,
por su apoyo incondicional.*

ÍNDICE

Capítulo 1: Introducción	1
1.1. Antecedentes	3
1.1.1. Los sensores en el aula	10
1.2. Proceso de diseño	12
1.2.1. Metodología de diseño	13
1.2.2. Diseños realizados	13
1.3. Objetivos de la Tesis	14
1.4. Estructura de la Tesis	15
Capítulo 2: Publicaciones	19
2.1. Cómo visualizar las oscilaciones forzadas en tu Smartphone	21
2.2. El <i>smartphone</i> como barómetro en experimentos de Física	37
2.3. Demonstration of the parallel-axis theorem through the Smartphone	53
2.4. Dynamics of a yoyo using a smartphone gyroscope sensor	63
2.5. Characterization of linear light sources with the smartphone's ambient light sensor	79
Capítulo 3: Discusión general de los resultados	89
3.1. Aportaciones realizadas	91
3.2. Evaluación de los resultados	93
Capítulo 4: Conclusiones	95
4.1. Cumplimiento de los objetivos	97
4.2. Aportaciones realizadas	98
4.3. Líneas de investigación futuras	98
Bibliografía general	101
Apéndice: Encuesta de disponibilidad de sensores	113

Capítulo 1

Introducción

El objetivo fundamental de esta Tesis es explorar nuevas vías de aplicación de los sensores de los teléfonos móviles inteligentes (comúnmente llamados *smartphones*) a la didáctica de la Física. Al mismo tiempo que se introduce un elemento innovador, como es el uso de un dispositivo móvil como herramienta de medida, se ha optado por ensayos sencillos que se puedan adaptar tanto a las enseñanzas a nivel de educación secundaria como universitaria. En este documento se recopila, en formato de compendio de publicaciones, una serie de experiencias que aportan una perspectiva diferente al trabajo realizado en un laboratorio.

1.1. Antecedentes

En los últimos años se ha producido un avance espectacular en el campo de las nuevas tecnologías. Los ordenadores personales han dejado paso a los portátiles, y estos, a su vez, se han visto desplazados por las tabletas digitales y los *smartphones*. La proliferación de dichos *smartphones* a precios asequibles, ha supuesto un nuevo hito en el mundo digital. El acceso a un dispositivo con pantalla táctil, conectado a internet y con un conjunto de sensores cada vez más numeroso, se ha generalizado. Son verdaderos ordenadores de bolsillo, fáciles de transportar, que permiten almacenar datos y tienen un procesador más potente que el utilizado por la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) en el Programa Apollo que llevó al primer hombre a la luna (NASA, 2009). Con estas características, no es de extrañar que los profesores se hayan fijado en los móviles y en el amplio abanico de posibilidades que ofrecen.

La incorporación de las Tecnologías de Información y Comunicaciones (TIC) en el ámbito docente supone nuevos retos. Por una parte, hay que adquirir una educación que permita salvar la brecha o fractura digital y, por otra parte, estudiar cómo se puede englobar en el proceso de docencia y aprendizaje cotidiano. Entre los estudios realizados sobre el uso de las TIC en las aulas, cabe destacar el realizado por la Comisión Europea que analiza la correlación existente entre cinco indicadores: las infraestructuras

existentes, el grado de uso de las mismas por parte del profesorado y el alumnado, el grado de competencia digital, las directrices marcadas por la escuela y las opiniones y actitudes, tanto de los directivos como de los profesores y el alumnado. Resalta la existencia de un profesorado competente en TIC, generalmente autodidacta, que incorpora las nuevas tecnologías en su metodología docente. Propone fomentar la formación del profesorado y desarrollar políticas encaminadas a facilitar la infraestructura y el apoyo institucional a las TIC (Wastiau, 2013).

La Física es una disciplina científica experimental que debe combinar la teoría con la práctica. En el laboratorio, el estudiante se enfrenta a la naturaleza, toma medidas, las analiza y pone a prueba las leyes de la Física que ha estudiado previamente en las clases de teoría. De esta manera se mejora la comprensión del fenómeno en estudio y se facilita el aprendizaje (Rowland, 1886).

En un laboratorio de Física se manejan diversos aparatos de medida. Algunos son sencillos (regla, balanza, dinamómetro...), y otros mucho más sofisticados (osciloscopio, multímetro, sonda Hall,...). Para que la formación del estudiante sea completa, tiene que adquirir habilidades en el uso de estas herramientas y, sobre todo, aprender a identificar las incertidumbres asociadas a las mediciones realizadas. Una vez finalizada la toma de datos, se procede a su análisis matemático. Generalmente se dispone de programas ofimáticos (hoja de cálculo, pequeñas aplicaciones, etc.) para el cálculo de las curvas de ajuste y su representación gráfica. Finalmente, se valora el grado de adecuación de la experiencia a la teoría estudiada.

Aunque se aplican experiencias relacionadas con la teoría estudiada, se comprueba que para algunos estudiantes las prácticas resultan rutinarias y poco enriquecedoras. No se muestran interesados en las mismas; realizan las medidas mínimas necesarias para salir del paso, de manera mecánica, y transcriben los datos sin una reflexión crítica sobre el trabajo realizado.

De hecho, dentro de la comunidad científica no existe un consenso sobre la utilidad del trabajo experimental en la educación científica. Las opiniones varían desde las primeras posiciones favorables, como la de Henry Rowland (1886), hasta los que cuestionan su eficiencia (Hodson, 1993). Una de las principales causas esgrimidas es la discrepancia que existe entre la

motivación del profesor, que propone una experiencia, y la percepción del alumnado que la realiza: ya sea porque se trata de seguir un manual de instrucciones, o porque el manejo de los aparatos es demasiado complicado, o porque tal vez no se ha hecho hincapié en la relación entre lo observado y lo estudiado. El reto es transformar una práctica de manipulación de equipos en una de manipulación de ideas (Svensson, 2018). Una buena práctica de laboratorio, según la clasificación propuesta por Hodson (2013) y modificada por Svensson (2018), deberá contemplar los siguientes ítems:

- A1.- Motivar, estimulando el interés y la diversión.
- A2.- Enseñar habilidades de laboratorio.
- A3.- Mejorar el aprendizaje del conocimiento científico.
- A4.- Profundizar en el método científico y desarrollar la pericia en su uso.
- A5.- Desarrollar ciertas 'actitudes científicas', como la mentalidad abierta.
- A6.- Conectar la ciencia con la vida cotidiana.

En este marco, se propone que los estudiantes utilicen su propio *smartphone* como instrumento de medida, controlando los sensores mediante aplicaciones (*Apps*) gratuitas. La ventaja de utilizar el móvil es múltiple: por una parte, se fomenta el interés del alumnado, y, por otra parte, la gama de ensayos existente es variada. No se busca la precisión, sino que los resultados se puedan interpretar de forma fácil e inmediata (Hochberg, 2018). Generalmente, las *Apps* permiten visualizar, en tiempo real, las medidas tomadas.

El uso de teléfonos móviles en las prácticas de aula es relativamente reciente. En 2007, Van Domelen explica su experiencia enseñando la polarización de la luz con la pantalla de un móvil (Van Domelen, 2007). Posteriormente Falcão utiliza la cámara de fotos para explicar la cinemática de un chorro de agua (Falcão, 2009). A partir de este momento, los estudios se multiplican y en marzo de 2012 la revista *The Physics Teacher*, de la American Association of Physics Teachers, crea la columna *iPhysicsLabs* especializada en la publicación de experimentos docentes con *smartphones* (Vogt, 2012a). Solo desde el año 2011, se han publicado más de 150

artículos relativos al uso de los *smartphones* como herramientas de laboratorio de Física, muchos en revistas especializadas internacionales como *European Journal of Physics*, *American Journal of Physics*, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, *Physics Education* y la citada *The Physics Teacher* (Cabeza, 2018). En España, la *Revista Española de Física*, publicada por la Real Sociedad Española de Física, también ha publicado diversos artículos sobre esta temática.

Un *smartphone* lleva incorporado un conjunto de sensores capaces de detectar cambios en su entorno y traducirlos en señales eléctricas. De esta manera, el fabricante facilita la interacción entre el usuario y el móvil: la pantalla gira al cambiar la orientación (acelerómetro), o se apaga mientras se habla por teléfono (sensor de proximidad), o cambia de brillo si percibe la luz solar (sensor de luz), etc. Existen programas capaces de interpretar las señales de los sensores y traducirlas en medidas numéricas, de aquí su interés como herramienta de medida en el laboratorio de Física. Algunas de las experiencias desarrolladas son curiosas y estimulan el interés por la ciencia, y otras ayudan a verificar y clarificar los conceptos teóricos estudiados. A continuación, se detallan los sensores más comunes en un *smartphone* y algunas experiencias desarrolladas con dichos sensores:

- El sensor de aceleración o acelerómetro, se ha utilizado para estudiar la caída libre (Vogt, 2012a); el movimiento de un péndulo (Vogt, 2012b); el movimiento armónico libre y amortiguado de un muelle (Castro-Palacio, 2013b); los modos de vibración en osciladores acoplados (Castro-Palacio, 2013a); el batido mecánico (Giménez, 2017c); el coeficiente de rozamiento entre materiales (González, 2016a; González, 2018); y la obtención de la masa en una balanza inercial (Barrera-Garrido, 2017).
- El giróscopo, a veces combinado con el acelerómetro ha servido para comprobar la conservación del momento angular (Shakur, 2013); estudiar la energía de rotación en un péndulo físico (Monteiro, 2014a); y la relación entre la velocidad angular y la aceleración centrípeta (Monteiro, 2014b).
- El micrófono y el altavoz, juntos o de manera independiente, se han empleado para el estudio de propagación de ondas en el vacío (Villa,

2009); la determinación de la velocidad del sonido en un gas (Parolin, 2013); el análisis de ondas acústicas (Kuhn, 2013b); el batido acústico (Kuhn, 2013c); el efecto Doppler (Gómez-Tejedor, 2014a); el estudio de interferencia de sonidos (Polak, 2016); y la determinación de los modos de vibración de una varilla (González, 2016b), entre otros.

- La cámara, al transformar las imágenes en una señal digital, se ha empleado en el estudio de la difracción de rayos infrarrojos emitidos con un mando a distancia (Kuhn, 2012); la difracción de la luz y la visión del color (Thoms, 2013); la polarización de la luz y la ley de Malus (Monteiro, 2017b); e incluso para medir la radiación solar de rayos ultravioleta (Igoe, 2013; Mei, 2015; Al-Taani, 2018).
- El sensor de luz ambiente ha servido para analizar sistemas oscilatorios (Sans, 2013), y estudiar la eficiencia luminosa de diferentes fuentes de luz (Sans, 2015; Salinas, 2018b).
- El magnetómetro o sensor de campo magnético, se empleó en la medida del campo creado por un imán (Arribas, 2015); el campo inducido por una corriente continua (ley de Oersted) (Sans, 2015); el campo magnético de una espira circular (Ogawara, 2017); y el campo inducido por una bobina (Monteiro, 2017c).
- El barómetro se ha utilizado para estudiar la presión hidrostática en agua (Machia, 2016) y en el aire (Monteiro, 2016); estudiar la tensión superficial en globos (Vandermarlière, 2016); las ondas de presión en túneles (Müller, 2016); y las velocidades verticales en ascensores, escaleras y drones (Monteiro, 2017a).
- El sensor de temperatura se utilizó para caracterizar el coeficiente de restitución de diversos materiales en función de la temperatura (González, 2016b) y, junto con el barómetro, se ha empleado para estudiar la ley de Gay-Lussac en un gas de volumen constante (Vieyra, 2017).

Actualmente, una línea de investigación apunta en el sentido de combinar diversos sensores para estudiar un mismo fenómeno y comprobar la precisión de los *smartphones* como herramientas de medida (Kuhn, 2013a; González, 2016b; Monteiro, 2019a; Monteiro, 2019b). Por otra parte, se

compara diferentes aplicaciones gratuitas de *Play Store* para valorar su adecuación al estudio del movimiento uniformemente acelerado (Carvajal, 2019).

La Física también se puede estudiar fuera del laboratorio, por ejemplo, en un parque de atracciones. En 1975, John Roeder analizó el funcionamiento de una decena de atracciones en un parque. A partir de las velocidades angulares determinó las aceleraciones a las que estaban sometidos los pasajeros. Llegó a la conclusión de que las más emocionantes no solo dependían de la aceleración alcanzada sino de la forma y el ritmo a la que cambia (Roeder, 1975). Posteriormente, Carole Escobar publicó un artículo (Escobar, 1990) donde explicaba más detalladamente la Física que encerraba cada uno de los juegos de un parque: desde el sencillo carrusel, pasando por los columpios y toboganes, hasta las montañas rusas y los bucles. Recogiendo su testigo, algunos centros proponen a sus estudiantes que analicen uno de los juegos como trabajo de fin de curso. Con la proliferación de los *smartphones*, se combina el uso de las cámaras con los sensores para estudiar desde el movimiento en un carrusel a las fuerzas que actúan en una caída libre (Pendriil, 2013; Vieyra, 2014). Incluso se investiga la dinámica tridimensional de una atracción, que une el movimiento pendular con rotaciones, utilizando el acelerómetro y el giroscopio (Pendriil, 2018). La Física también tiene su espacio en un parque acuático para analizar fenómenos de hidrostática o la propagación de ondas, por ejemplo (Cabeza, 2014).

Otro ejemplo de aplicación curioso, fuera del aula, es el estudio de la conservación del momento lineal en un instrumento indígena tradicional como es el "*Meriam Karbit*" (Pramuda, 2016). O incluso, es interesante comprobar cómo se equilibra un soporte "*SpillNot*[®]" para transportar una taza de café sin que se derrame (Tornaría, 2014).

Con la introducción de las TIC, y en particular los *smartphones*, en el aula, son numerosos los estudios publicados sobre cómo influyen en la docencia, desde un punto de vista pedagógico. Así se ha determinado que uno de los

* <https://spillnot.myshopify.com/>

rasgos que definen a los estudiantes, de entre 18 y 25 años, es que están acostumbrados a un acceso instantáneo a la información. Priman la velocidad de respuesta frente a la precisión de la información recabada (Bomhold, 2013).

Sin embargo, a pesar de que se han desarrollado, como se ha visto en los párrafos anteriores, muchas aplicaciones docentes, e incluso verdaderas guías (Kuhn, 2013a; Gil, 2017), son pocos los estudios centrados en los resultados de la didáctica de la Física Experimental con *smartphones*.

En un primer momento, se recopiló las impresiones de los estudiantes tras realizar las prácticas, pero sin establecer una correlación con la asimilación de los conceptos estudiados (Sans, 2015; González, 2016a).

En un segundo nivel, se analizó las discrepancias y fallos que aparecen al poner en práctica y evaluar la experiencia diseñada. Svensson (2017) utiliza una práctica sobre la conservación del momento lineal: los estudiantes golpean un balón y, mediante video-análisis, determinan las velocidades y las aceleraciones. Hernández (2018) propone el cálculo de la velocidad media de un balón, entre el instante en que se chuta y en el que choca con el suelo, utilizando el sensor de sonidos. Ambos estudios señalan las dificultades que supone el tratamiento de la información, al sobrestimarse la competencia digital del alumnado. Resaltan los problemas que se plantean al trabajar con grupos numerosos, y reconocen que algunos estudiantes manifiestan errores conceptuales de interpretación de la experiencia desarrollada. Por otra parte, los estudiantes expresan un nivel de interés y motivación alto por este tipo de actividades.

El estudio realizado por Hochberg (2018) utiliza una práctica de oscilaciones armónicas en un muelle, en un péndulo simple, y en dos péndulos acoplados. Parte de dos montajes similares, donde la única diferencia es el objeto suspendido (el móvil en un grupo y tornillos en el otro), controla que la distribución de estudiantes sea parecida y que un único profesor sea el que imparte la docencia. Mediante tests, realizados antes y después de la práctica, comprueba que el uso del *smartphone* aumenta el interés del estudiante por la Física en general, y su curiosidad por el ensayo, en particular. No es un factor de distracción y el nivel de conocimiento adquirido es similar en ambos grupos. Como elemento presente en el día a día de los

estudiantes, la didáctica de las ciencias debe mostrar nuevas aplicaciones de los móviles dentro y fuera del aula (Hochberg, 2018).

En resumen, el uso de los *smartphones* como herramientas de medida en un laboratorio docente presenta una serie de ventajas:

- Su uso está generalizado entre los estudiantes.
- La gama de experimentos propuestos es muy variada.
- Los sensores de los *smartphones* son cada vez más numerosos y precisos.
- La biblioteca de *Apps* gratuitas que obtienen datos de los sensores es amplia.
- El coste material de estos sensores en el laboratorio (nulo ya que los estudiantes utilizan sus propios *smartphones*), es inferior al del equipamiento de un laboratorio tradicional.
- Al descubrir nuevos usos de sus móviles, se fomenta el interés y la motivación de los estudiantes.

1.1.1. Los sensores en el aula

Al plantear esta tesis, centrada en el uso de los sensores de los *smartphones* de los estudiantes, surgió la cuestión de cuál era la disponibilidad real de estas herramientas. Un estudio de 2015, en Estados Unidos, indica que un 73% de los adolescentes (13 a 17 años) tiene acceso a un *smartphone* (Hochberg, 2018). Es de suponer que este porcentaje ha cambiado sensiblemente con el paso del tiempo.

Con objeto de conocer la naturaleza de los sensores de los *smartphones* de los estudiantes, entre los días 8 y 11 de abril de 2019, se realizó una encuesta en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño, de la Universitat Politècnica de València.

Entre varias titulaciones, y gracias a la colaboración del alumnado y el profesorado, se han recopilado las respuestas de 212 encuestas, lo que supone más del 28 % de los 750 matriculados de primer curso.

Lo primero a destacar es que el 100 % del alumnado disponía de un teléfono tipo *smartphone* y sólo algún profesor mantenía su teléfono móvil tradicional. Los teléfonos son relativamente nuevos (Figura 1) y tienen un sistema operativo mayoritariamente Android (Figura 2).

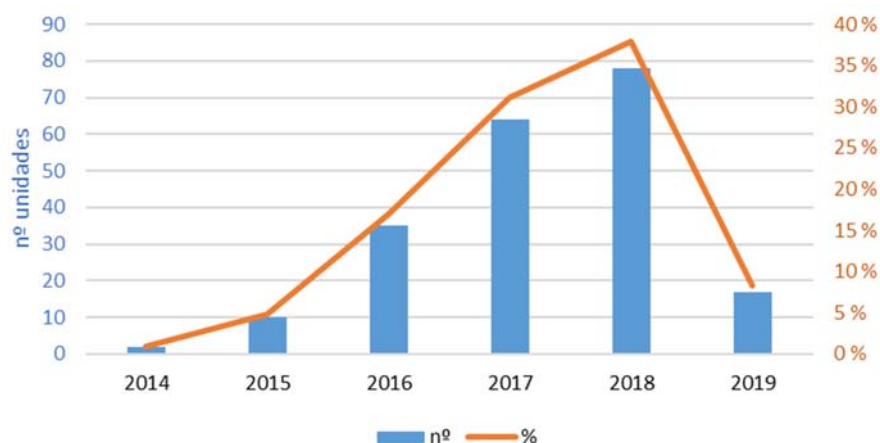


Figura 1. Año de compra (abril 2019).

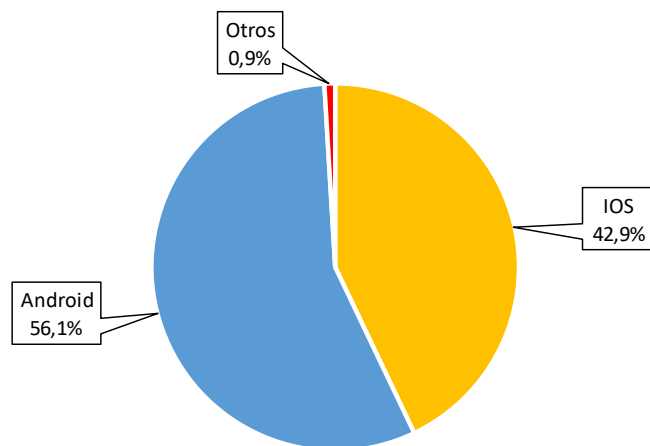


Figura 2. Sistemas operativos (abril 2019).

En cuanto a los sensores disponibles (Figura 3), alrededor del 80% dispone de acceso al acelerómetro lineal, al giroscopio y al sensor de luz. El barómetro está accesible en el 56 % de los *smartphones* por lo que su uso como herramienta de medida en el laboratorio es factible.

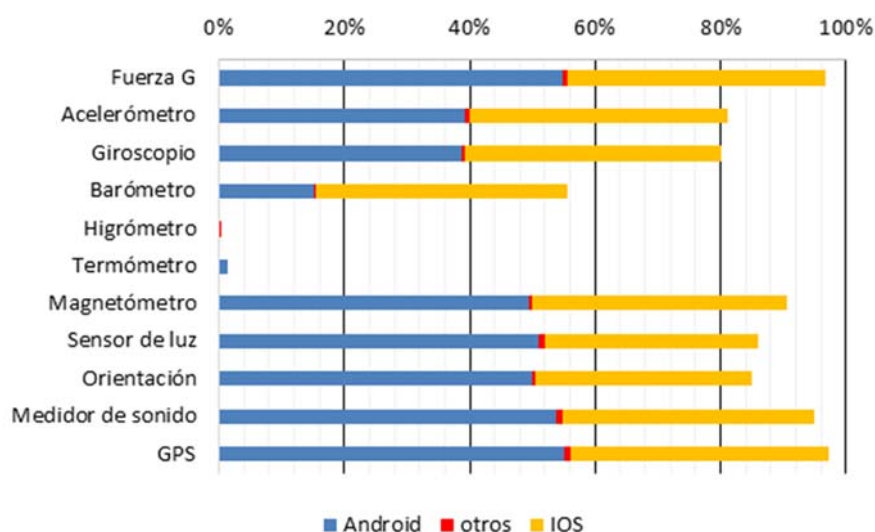


Figura 3. Sensores disponibles (abril 2019).

1.2. Proceso de diseño

En los últimos años, se han desarrollado varios Proyectos de Innovación y Mejora Educativa (PIME) centrados en la incorporación de las TIC a la didáctica de la Física experimental. Del proyecto B18/15 “*Smartphysics: el uso docente del Smartphone para el desarrollo de competencias transversales*”, se derivó la línea de investigación actualmente en marcha, con más de una decena de propuestas de experiencias publicadas y una Tesis Doctoral (Giménez, 2017b).

Fruto de la experiencia obtenida trabajando con estudiantes, se busca diseñar prácticas basadas en conceptos, que previamente se hayan desarrollado en las clases teóricas, y que se puedan visualizar en la pantalla

del móvil. De esta manera, el estudiante tiene en su mano una primera aproximación al fenómeno en estudio usando como equipamiento fundamental un dispositivo conocido, su propio *smartphone*. Ya realizará después el tratamiento de los datos, los cálculos y la redacción de informes correspondientes.

1.2.1. Metodología de diseño

La metodología seguida para el diseño de nuevas experiencias es un proceso que básicamente se puede resumir en los siguientes pasos:

- Se parte de un concepto teórico.
- Se estudia la forma de materializarlo en el laboratorio para que sea atractivo y visual.
- Se crea un prototipo y se realizan ensayos con diversos sensores.
- Se analizan los resultados obtenidos y se contrastan con la teoría.

1.2.2. Diseños realizados

En primer lugar, durante el desarrollo de esta Tesis se ha estudiado el movimiento rectilíneo vibratorio forzado con amortiguamiento débil. Se ha partido de una práctica previa de oscilaciones amortiguadas en un carril cinemático, y se ha añadido un motor vibrador. La novedad que aporta el *smartphone* es la facilidad con la que se visualiza el movimiento transitorio y el permanente.

En segundo lugar, se analiza las oscilaciones amortiguadas en un sistema “masa+muelle”. Generalmente, para explicar el amortiguador se recurre a la figura de una masa sumergida en un líquido. En esta experiencia, se sumerge el móvil (protegido con una bolsa) en un tubo transparente lleno de agua. Se hicieron pruebas tanto con el acelerómetro como con el barómetro, obteniéndose resultados similares. Durante el experimento, la pantalla del teléfono muestra cómo se va amortiguando el movimiento.

A continuación, se estudia el momento de inercia y el teorema del eje paralelo y su relación con el movimiento oscilatorio armónico. En un aparato

de torsión existente, se sustituye una de las masas por el *smartphone*. Con el sensor de aceleraciones, se registra los valores de las aceleraciones en los dos ejes contenidos en el plano del movimiento. Las gráficas muestran la forma sinusoidal, y el desfase, de las aceleraciones normal y tangencial.

La experiencia siguiente estudia el movimiento vertical de un disco unido a una cuerda. Se trata de un ejemplo clásico utilizado para presentar la dinámica de rotación. Para modelizarlo, se ha construido un yoyó gigante y se le adhiere el teléfono a una de las caras. De esta manera, se introduce un elemento lúdico y familiar como es un yoyó. Como sensor de medida se utiliza el giroscopio (sensor de velocidad angular) del propio *smartphone*. Con el movimiento de subida y bajada, en la pantalla aparece un registro en forma de diente de sierra. Los tramos, prácticamente rectos, indican una aceleración angular constante. Los cambios de signo corresponden a la posición relativa de la cuerda respecto del eje.

Por último, se estudia el campo de intensidades creado por una fuente de luz lineal. Se determina la iluminancia (flujo luminoso por unidad de superficie) creada por un tubo de luz halógeno, que podemos aproximar a una fuente de luz lineal. Si se toman las medidas con el sensor de luz a distancias regulares, se observa que las lecturas disminuyen linealmente con la distancia al tubo. Este hecho resulta impactante para los estudiantes, habituados a la ley del inverso del cuadrado de la distancia que rige para fuentes puntuales. De esta forma se puede explicar fácilmente la diferencia entre frentes de onda esféricos y cilíndricos.

1.3. Objetivos de la Tesis

En este marco, el objetivo principal de esta Tesis es plantear una serie de experiencias innovadoras y sencillas que permitan introducir los *smartphones* en la didáctica de la Física experimental a nivel de las enseñanzas secundaria y universitaria. Se propone que los estudiantes utilicen su propio *smartphone* como instrumento de medida controlando los sensores mediante *Apps* gratuitas. En particular, se investiga el uso del sensor de aceleración, el sensor de presión, el giroscopio y el sensor de luz ambiente.

1.4. Estructura de la Tesis

En primer lugar, cabe destacar que se trata de una Tesis por compendio de artículos científicos, por lo que cada uno de ellos puede ser leído de forma autónoma, al contener los aspectos necesarios para su comprensión (marco teórico, objetivos, resultados y conclusiones). Sin embargo, es importante recalcar que todos ellos se enmarcan en el mismo contexto, la propuesta de nuevas experiencias de laboratorio de Física utilizando los *smartphones* como instrumentos de medida. Así pues, la Tesis se estructura en 4 capítulos:

1. Introducción.
2. Publicaciones.
 - Cómo visualizar las oscilaciones forzadas en tu *smartphone*.
 - El *smartphone* como barómetro en experimentos de Física.
 - Demonstration of the parallel-axis theorem through the Smartphone.
 - Dynamics of a yoyo using a smartphone gyroscope sensor.
 - Characterization of linear light sources with the smartphone's ambient light sensor.
3. Discusión general de los resultados.
4. Conclusiones.

El **Capítulo 1**, de introducción, describe el contenido de la Tesis para permitir al lector el acceso directo a la información de su interés. En el primer apartado se revisa los antecedentes de la investigación y los objetivos planteados. A continuación, se indica la estructura de la Tesis completa y se describe el contenido de cada uno de los apartados que la componen.

El cuerpo principal de la Tesis está compuesto por el **Capítulo 2** que, como se ha mostrado en la enumeración previa, recoge los cinco artículos que conforman el presente compendio.

El **primer artículo** que se presenta en esta Tesis es un trabajo titulado “Cómo visualizar las oscilaciones forzadas en tu *smartphone*” (Salinas, 2018c). En este artículo se describe de forma exhaustiva y cuantitativa una nueva experiencia didáctica para el estudio de las oscilaciones forzadas en el laboratorio mediante el sensor de aceleración (acelerómetro) de un *smartphone*. El teléfono almacena los datos de tiempos y aceleraciones registrados para su posterior análisis, y al mismo tiempo los representa gráficamente en la pantalla. Este sistema permite la visualización inmediata de la aceleración y la experimentación con diversos modos de vibración, en particular el movimiento forzado y amortiguado débil. Este artículo se ha publicado en el apartado Notas de Clase de la Revista Española de Física, editada por la Real Sociedad Española de Física. Esta revista se encuentra indexada en Dialnet, Latindex, MIAR y en Google Académico.

El **segundo artículo** se titula “El *smartphone* como barómetro en experimentos de Física” (Salinas, 2018a). En este artículo se recogen dos experiencias que utilizan el sensor de presiones del teléfono móvil. En la primera se comprueba la Ley de Stevin (relación lineal entre presiones hidrostáticas y profundidad) y se obtiene la densidad del líquido. En la segunda experiencia se estudia el movimiento oscilatorio con amortiguamiento débil a partir de la serie temporal de presiones. Este artículo se publicó en la revista Modelling in Science Education and Learning publicada por el Instituto Universitario de Matemática Pura y Aplicada de la Universitat Politècnica de València. Esta revista se encuentra indexada en Dialnet, Latindex, MIAR, DOAJ, DULCINEA ERIHPlus y en Google Académico.

El **tercer artículo** lleva por título “Demonstration of the parallel-axis theorem through the Smartphone” (Salinas, 2019b). En esta ocasión se utiliza el sensor de aceleraciones del *smartphone* para visualizar y demostrar el teorema del eje paralelo en un péndulo de torsión. El *smartphone*, sujeto a un extremo del brazo del péndulo, registra simultáneamente las aceleraciones normal y tangencial. Por una parte, la visualización de las aceleraciones permite comprobar de forma sencilla la relación de los períodos de las dos aceleraciones. Por otra parte, se puede obtener la constante de rigidez del muelle. El artículo se ha publicado en la revista The Physics Teacher de la American Association of Physics Teachers. Además

de diversos repertorios destacados anteriormente, esta revista se encuentra indexada en la Web of Science en el campo “PHYSICS, MULTIDISCIPLINARY” del JCR Science Edition con un factor de impacto de 0,621 (en 2017). Hay que destacar que se trata de la mejor revista internacional en el ámbito de la docencia de la Física a nivel preuniversitario.

El **cuarto artículo** lleva por título “Dynamics of a yoyo using a smartphone gyroscope sensor” (Salinas, 2019a). Como se indica en el título, en esta práctica se utiliza el giróscopo del *smartphone* como instrumento de medida. Mediante el uso de un *yoyó* gigante, al que se le adhiere el *smartphone*, se analiza el movimiento angular de un disco sometido a las fuerzas de su peso propio y la tensión del cable. Se trata de un problema de Dinámica clásico donde se estudia la segunda ley de Newton y su versión para la rotación. A partir del registro temporal de la velocidad angular se comprueba que la aceleración angular se mantiene constante. El trabajo se ha realizado en colaboración con los profesores Martín Monteiro y Arturo Martí de Uruguay. Durante el proceso de publicación el trabajo está disponible en el repositorio *on line* arXiv en el ámbito Physics Education

Finalmente, el **quinto artículo** se titula “Characterization of linear light sources with the smartphone’s ambient light sensor” (Salinas, 2018b). En este trabajo se experimenta con el sensor de luz para registrar la iluminancia (flujo luminoso por unidad de superficie) emitida por un tubo de luz fluorescente comercial. En los ensayos realizados se ha comprobado que la iluminancia es inversamente proporcional a la distancia. El artículo ha sido publicado en la revista The Physics Teacher cuyas características se han descrito anteriormente.

A continuación, el **capítulo 3** aporta una breve discusión acerca de los principales resultados del trabajo desarrollado, mientras que el **capítulo 4** presenta las conclusiones finales de la Tesis, así como el cumplimiento de los objetivos planteados y las futuras líneas de trabajo. Por último, se muestra la **bibliografía general** utilizada a lo largo de toda la Tesis y el **apéndice** donde se recoge la información correspondiente a la encuesta sobre disponibilidad de sensores.

Capítulo 2

Publicaciones

2.1. Cómo visualizar las oscilaciones forzadas en tu *smartphone* How to visualize forced oscillations in your smartphone

Notas de clase

Una pizarra en la que intercambiar experiencias docentes

Cómo visualizar las oscilaciones forzadas en tu *smartphone*

Isabel Salinas
Dpto. de Física Aplicada, Escuela Técnica Superior
de Ingeniería del Diseño, Universitat Politècnica
de València



Cómo visualizar las oscilaciones forzadas en tu *smartphone*
How to visualize forced oscillations in your smartphone

I. Salinas¹, M.H. Giménez¹, J.A. Sans¹, J.C. Castro –Palacio²,
J.A. Monsoriu¹

¹ *Departamento de Física de Física Aplicada, Universitat Politècnica de València. Camí de Vera s/n, 46022 València, Spain*

² *Department of Earth Science and Engineering, Faculty of Engineering, Imperial College, London SW7 2AZ, United Kingdom.*

Resumen

El principal objetivo de este trabajo es extender el uso de los sensores de los *smartphones* dentro del laboratorio de Física. Estos dispositivos móviles de última generación tienen un marcado carácter tecnológico y social. Se encuentran al alcance de la mayoría de los alumnos, pero muy pocos conocen su funcionamiento. Su utilización como herramienta de medida influye directamente en una mayor motivación de los estudiantes y permite lograr una mejor comprensión de los fenómenos estudiados.

En este artículo se describe una nueva experiencia didáctica para el estudio de las oscilaciones forzadas en el laboratorio. Se presentan los elementos necesarios para adaptar un motor vibrador a un carril cinemático existente, sobre cuya deslizadera se coloca un *smartphone*. Mediante una *app* gratuita se puede controlar el sensor de aceleración (acelerómetro), de manera que se puede almacenar, en un fichero ASCII, los datos de tiempos y aceleraciones registrados, al mismo tiempo que los representa gráficamente en la pantalla. Este sistema permite la visualización inmediata de la aceleración y la experimentación con diversos modos de vibración, en particular el movimiento forzado y amortiguado débil. Se trata de una herramienta sencilla para explicar un proceso complejo.

1. Introducción

La sociedad actual está inmersa en un mundo digital que progresa a una velocidad vertiginosa. Con la utilización de los llamados “*dispositivos inteligentes*” (tabletas y *smartphones*) el uso de las nuevas tecnologías se ha generalizado. Por ello, resulta necesario adquirir y desarrollar una educación en las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC).

Al plantear el uso de las TIC en el entorno educativo, se pretende hacer la educación más atractiva para el estudiante, al mismo tiempo que se fomenta la formación en valores como la creatividad, el trabajo en grupo, el esfuerzo y la responsabilidad. No hay que olvidar el espíritu crítico que debe adquirir el alumno ante los datos recogidos en el laboratorio, ya que un teléfono móvil es un aparato de medida, muy atractivo, eso sí, pero donde los valores obtenidos no dejan de tener una incertidumbre asociada.

Las prácticas de laboratorio permiten reforzar la comprensión de las leyes de la Física que se han estudiado previamente en las clases teóricas. Tradicionalmente, el alumno monta un experimento, realiza medidas con diversos aparatos, analiza los datos experimentales obtenidos y evalúa críticamente los resultados. Para completar esta formación del alumno en el método científico, y conseguir que se produzca la máxima transferencia teoría-práctica, hay que introducir elementos innovadores en el laboratorio. En este caso, el uso del *smartphone* resulta ser atractivo y sencillo. Puede sustituir a aparatos de medida más complejos como sensores de infrarrojos o cámaras de vídeo, que necesitan estar conectados a un ordenador para un tratamiento posterior y generalmente, carecen de la inmediatez de la visualización en pantalla de los datos adquiridos.

Un *smartphone* de gama media incluye numerosos sensores. Algunos son ampliamente conocidos como son los casos de la cámara, el micrófono o el altavoz. Sin embargo, el usuario medio desconoce que su *smartphone* posee un acelerómetro, un sensor de luz, un sensor de campo magnético o un giróscopo, entre otros. Aprovechando estos sensores se han desarrollado numerosas experiencias didácticas.

Entre los sensores más utilizados está el de aceleración, el cual se ha implementado en múltiples experiencias docentes para el estudio de movimientos lineales, circulares y oscilatorios. Los primeros trabajos publicados ilustran experimentos sencillos de Mecánica Clásica, como son el cálculo de la aceleración de la gravedad a partir de la caída libre de un cuerpo, las experiencias con un péndulo simple, o el estudio de movimientos oscilatorios libres (Vogt, 2012a; Chevrier, 2013; Kuhn, 2013a).

A medida que se ha ido generalizando el uso del teléfono móvil como aparato de medida, se han desarrollado nuevas experiencias sobre oscilaciones libres, amortiguadas y acopladas, tanto en sistemas lineales como bidimensionales, en algunos casos con resultados visualmente muy atractivos como es el trazado de las figuras de Lissajous (Castro-Palacio, 2013b; Tuset-Sanchis, 2015).

En el presente trabajo se ha incorporado un motor para generar oscilaciones lineales forzadas y amortiguadas sobre un carril cinemático. En primer lugar se describe el montaje experimental. A continuación, se realiza una breve exposición de los fundamentos teóricos de los movimientos oscilatorios, y se concluye con los resultados obtenidos a través de las medidas realizadas con un *smartphone*. Este trabajo se sitúa curricularmente en los primeros cursos de Universidad, pero también puede ser planteado como una experiencia complementaria para alumnos de bachillerato.

2. Dispositivo experimental.

En esta experiencia se ha utilizado un sistema compuesto por un teléfono móvil Samsung Galaxy S5 4G LTE (masa 145 g, sistema operativo Android 4.4.2 KitKat), un carril cinemático PASCO con una deslizadera (masa 180,6 g) y dos masas adicionales (50,2 g cada una), unido mediante un muelle (constante elástica $K = 189$ (7) N/m) a un vibrador mecánico VENTUS (de 0 a 5 kHz) cuya frecuencia se controla desde un generador de funciones Keysight Technologies mod. 33210A, (frecuencia empleada: 3 Hz). El flujo de aire del carril se controla desde un soplador PASCO SF-9216. Este montaje experimental completa el utilizado en un estudio previo de oscilaciones libres y amortiguadas (Castro-Palacio, 2013b), donde se

determinó el valor de la constante elástica K a partir de métodos estáticos, colgando una masa del muelle, y se comparó con el valor obtenido a partir de la pulsación de las oscilaciones libres, con una discrepancia inferior al 0,6%.

En la Figura 1 se muestra una imagen del montaje experimental diseñado. Sobre la deslizadera del carril cinemático se ha colocado el teléfono móvil (1) que registra las aceleraciones. La deslizadera está unida mediante el muelle (2) al vibrador mecánico (3) que es un oscilador electromagnético cuya frecuencia se establece desde la fuente de alimentación (4). Controlando el caudal de aire suministrado al carril por el soplador (5) se modifica el rozamiento entre éste y la deslizadera variando así la magnitud del amortiguamiento de las oscilaciones.

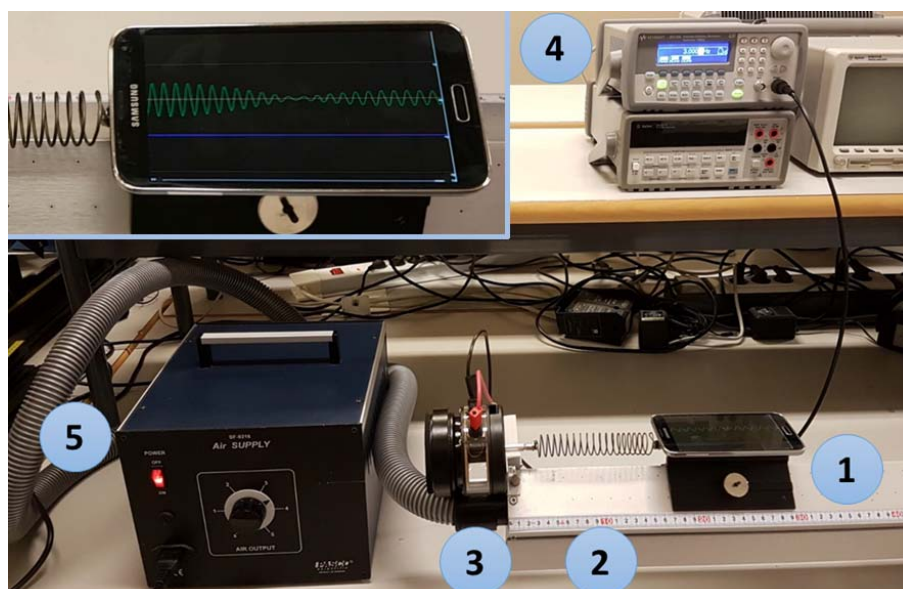


Figura 1. Configuración del sistema experimental: Las oscilaciones forzadas y amortiguadas se visualizan directamente en la pantalla del smartphone.

Para visualizar las oscilaciones en el *smartphone*, en primer lugar, obviamente, se ha de instalar la aplicación que registra los datos del

acelerómetro: en nuestro caso se utilizó AccelerometerToy® v1.0.10 ^{1*}, que ocupa 154 KiB de memoria y puede ser descargada de forma gratuita desde la página de Google Play Store®.

Una vez colocado el teléfono sobre la deslizadera, y sujeto con cinta adhesiva de doble cara, se conecta el generador de aire y se activa el motor oscilador. La frecuencia del vibrador mecánico externo se ha ajustado a una frecuencia cercana a la de la oscilación libre del sistema. El movimiento se inicia por medio de un pequeño desplazamiento de la deslizadera respecto a su posición de equilibrio. El teléfono comienza a oscilar, y al cabo de unos segundos observamos que la frecuencia del sistema se sincroniza con la del vibrador mecánico.

Una vez alcanzado el régimen estacionario, se detienen el sistema y el programa. Los datos recogidos por el sensor de aceleración se almacenan en un fichero ASCII, que se puede enviar por correo electrónico, desde el mismo programa, a un ordenador para su posterior tratamiento. El estudio de las vibraciones forzadas con amortiguamiento débil es visualmente impactante y la mera representación gráfica de los datos, ya sea en la pantalla del móvil o en una hoja de cálculo, permite diferenciar las fases transitoria y permanente.

3. Fundamento teórico.

Actuando sobre el vibrador mecánico y el caudal de aire suministrado al carril cinemático, se puede estudiar los diferentes modos de oscilación y comprobar la ecuación de movimiento obtenida a partir de la segunda ley de Newton.

Dado que el carril cinemático se coloca en posición horizontal, son únicamente tres las fuerzas que actúan en la dirección del movimiento.

- En primer lugar, la fuerza que ejerce el muelle, F_m , de valor proporcional a la distancia que separa la deslizadera de su posición de equilibrio:

^{1*} https://play.google.com/store/apps/details?id=pearson.accelerometer_toy&hl=es

$$F_m = -K x \quad (1)$$

donde K es la constante elástica del muelle.

- En segundo lugar, la fuerza disipativa, F_d , debida a la fricción entre la deslizadora y el carril. Su valor se modifica variando el caudal suministrado por el soplador de aire. Si se considera que éste se comporta como un fluido viscoso ideal, el valor de la fuerza es proporcional al módulo de la velocidad v :

$$F_d = -cv \quad (2)$$

siendo c el coeficiente de amortiguamiento (Castro-Palacio, 2013b).

- Finalmente, el vibrador mecánico aplica una fuerza exterior periódica, F_{ext} , de pulsación Ω que tiene la forma:

$$F_{ext} = F_0 \text{sen } \Omega t \quad (3)$$

donde F_0 es la amplitud de la fuerza.

Considerando estas tres fuerzas en la segunda ley de Newton, se llega a la ecuación diferencial:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\gamma \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = \frac{F_0}{m} \text{sen } \Omega t \quad (4)$$

donde $\omega_0 = \sqrt{K/m}$ es la pulsación libre (no amortiguada) y $\gamma = c/(2m)$ es la constante de amortiguamiento. Puesto que con el *smartphone* se registra la aceleración, a , conviene derivar respecto al tiempo la ecuación anterior dos veces, resultando

$$\frac{d^2a}{dt^2} + 2\gamma \frac{da}{dt} + \omega_0^2 a = -\frac{F_0 \Omega^2}{m} \text{sen } \Omega t \quad (5)$$

Se trata de una ecuación diferencial de segundo orden, de coeficientes constantes y completa. La solución general es la superposición de la solución de la correspondiente ecuación homogénea y de una solución

particular de la completa. Matemáticamente, en el caso de un amortiguamiento débil, ($\gamma < \omega_0$) dicha solución viene dada por:

$$a = Ae^{-\gamma t} \text{sen}(\omega t + \varphi) + B \text{sen}(\Omega t + \varphi') \quad (6)$$

El primer sumando es una función transitoria (tiende a cero con el tiempo) y se corresponde con la ecuación de un movimiento amortiguado débil de pulsación $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2}$. El segundo término es la solución particular de la Ec. (5), y corresponde a una oscilación armónica permanente cuya pulsación coincide con la del vibrador, Ω . Por tanto, el sistema acaba vibrando con la frecuencia de la fuerza exterior excitadora. Los parámetros A y φ vendrán determinados por las condiciones iniciales del sistema y los valores B y φ' por las características del sistema (m, K, c, F_0).

En el dispositivo experimental estudiado, a partir de la masa del conjunto deslizadera + masas + móvil, $m = 0,426 (0,002) \text{ kg}$, y de la constante elástica del muelle, K , se obtiene una pulsación libre (no amortiguada) $\omega_0 = 21,06 (0,39) \text{ rad/s}$. El valor de la constante de amortiguamiento γ depende del caudal de aire suministrado al carril cinemático (Castro-Palacio, 2013b), variando entre 0 y $0,7 \text{ s}^{-1}$, por lo que la pulsación teórica, ω , solo se reducirá ligeramente. Por otro lado, los valores de B y φ' dependen de la amplitud F_0 del vibrador mecánico que varía con la potencia aportada por la fuente de alimentación.

En la Figura 2 se muestran dos casos particulares en los que el motor está parado, por lo que no hay término permanente en la ecuación anterior ($B = 0$). Suministrando un caudal de aire suficiente para poder despreciar la fuerza disipativa ($\gamma = 0$) se obtiene el movimiento armónico simple mostrado en la Figura 2.a). Si disminuimos ligeramente el caudal de aire, se obtiene el movimiento amortiguado débil de la Figura 2.b). Estos casos particulares, los hemos caracterizado previamente (Castro-Palacio, 2013b) a partir de los datos proporcionados por el sensor de aceleración en un dispositivo experimental equivalente al mostrado en la Figura 1, sin el motor.

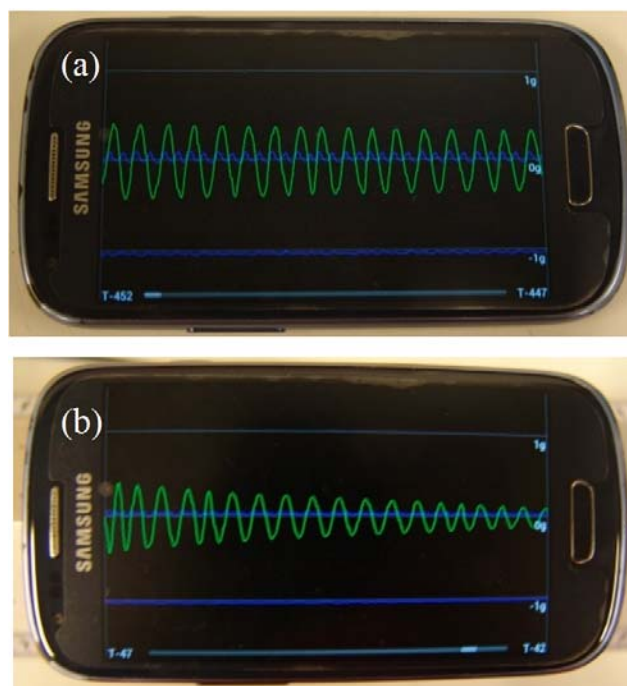


Figura 2. (a) Movimiento vibratorio armónico simple. **(b)** Movimiento amortiguado débil.

Con este dispositivo experimental no es posible caracterizar los casos de amortiguamiento fuerte y amortiguamiento crítico, ya que si se redujera mucho el caudal del aire suministrado al carril, la fuerza disipativa F_d dada por la Ec. 2 se convertiría en una fuerza de rozamiento proporcional a la normal, $F_r = \mu N$, y el sistema ya no vendría gobernado por la ecuación diferencial (4).

4. Adquisición de datos y análisis de resultados.

En este trabajo se analiza el caso de las oscilaciones amortiguadas y forzadas, por la acción de un vibrador mecánico, en el dispositivo mostrado en la Figura 1. En primer lugar, se ajustó la potencia del soplador para conseguir un rozamiento adecuado y se seleccionó la frecuencia del motor a un valor próximo a la del movimiento libre del sistema. Tras un desplazamiento inicial de la deslizadera, el *smartphone* comienza a oscilar y, al cabo de unos segundos, podemos comprobar que se sincroniza a la frecuencia del vibrador mecánico. En el movimiento armónico forzado se observan dos fases, una primera transitoria en la que cambia la amplitud, y una segunda estacionaria en la que el sistema mantiene constantes la amplitud y la frecuencia.

La secuencia completa se ha grabado en vídeo y se ha publicado en *media.upv.es* para que pueda ser empleado como recurso educativo^{2*}. En la Figura 3 se recogen imágenes de dicho vídeo.

Los datos obtenidos con el acelerómetro se han exportado mediante un fichero ASCII para su tratamiento. El programa registra tanto los tiempos como las aceleraciones según los tres ejes de coordenadas. Los valores que nos interesan son los correspondientes al eje longitudinal del teléfono, X. Estos datos experimentales se ajustan por mínimos cuadrados a la Ec. (6) que gobierna la aceleración en un movimiento oscilatorio amortiguado débil y forzado. Además de A , B , φ y φ' , que como se ha indicado anteriormente dependen de las características y las condiciones iniciales del problema, se consideró como parámetros de ajuste las pulsaciones ω (correspondiente al término transitorio) y Ω (correspondiente al término estacionario). El ajuste de los resultados experimentales se muestra en la Figura 4.

^{2*} <https://media.upv.es/player/embed.html?id=cf765de0-a83a-11e7-9479-7d8be53aecf3>

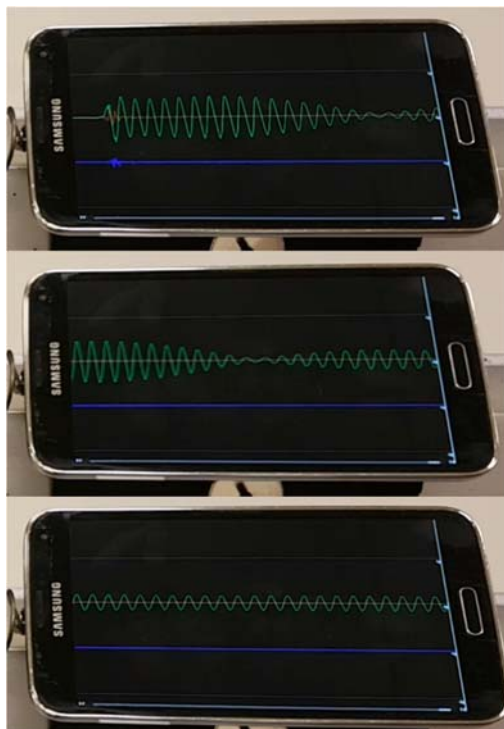


Figura 3. *Movimiento amortiguado forzado: Imágenes correspondientes a los instantes iniciales (parte superior), intermedios (parte media) y finales (parte inferior). Nótese que, una vez pasado el transitorio, el sistema termina en un movimiento armónico simple sincronizado a la frecuencia del vibrador mecánico. La secuencia completa del movimiento se puede ver en el vídeo².*

Los valores de los parámetros del ajuste y sus incertidumbres se muestran en la Tabla I. Sabiendo que el vibrador mecánico oscilaba a una frecuencia de 3 Hz obtenemos una pulsación teórica para el término estacionario de $\Omega_T = 2\pi f = 18,849(0,007) \text{ rad/s}$. Comparando este valor con la frecuencia del vibrador mecánico obtenido con el ajuste, resulta una discrepancia de $D(\%) = (\Omega - \Omega_T)/\Omega_T = 0,4\%$, valor reducido que se explica gracias a la precisión del experimento. De igual forma, el coeficiente de correlación también es muy próximo a la unidad.

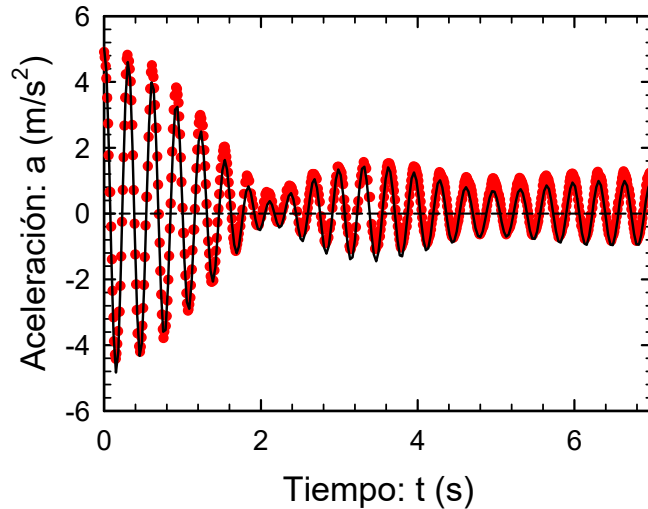


Figura 4. Datos experimentales (puntos rojos) de la aceleración de un movimiento amortiguado forzado obtenidos con el acelerómetro de un Smartphone, y ajuste (línea negra) a la función teórica de la Ec. (6).

Otra forma de analizar los resultados obtenidos es a partir de la constante elástica del muelle. Con los parámetros del ajuste sistema ω_{exp} y γ se puede obtener la pulsación libre (no amortiguada) $\omega_0^{exp} = \sqrt{\omega_{exp}^2 + \gamma^2} = 20,859 (0,010) \text{ rad/s}$. A partir de este valor se calcula la constante elástica del muelle experimental $K_{exp} = m(\omega_0^{exp})^2 = 185,35 (0,18) \text{ N/m}$, valor que comparado con la constante teórica del muelle $K = 189 (7) \text{ N/m}$ supone una discrepancia de 1,9 %.

Parámetros ajustados	
A (m/s ²)	4,62 (0,06)
ω (rad/s)	20,85 (0,01)
φ (rad)	1,32 (0,02)
γ (s ⁻¹)	0,61 (0,01)
B (m/s ²)	0,91 (0,02)
Ω (rad/s)	18,777 (0,008)
φ' (rad)	-0,64 (0,04)
R^2	0,9899

Tabla I. Valores e incertidumbres de los parámetros ajustados.

5. Conclusiones.

Con el desarrollo del presente trabajo se ha demostrado que los *smartphones*, haciendo uso de su sensor de aceleración, pueden ser utilizados en el estudio cuantitativo de todo tipo de oscilaciones, incluidas las forzadas. El objetivo fundamental de este tipo de iniciativas es la divulgación de estos elementos de desarrollo tecnológico y social en el trabajo experimental del laboratorio^{3*}. En concreto, la presente experiencia está enfocada a los alumnos de los primeros cursos de universidad. También es una experiencia que los profesores de física pueden plantear como un reto de aprendizaje a alumnos de bachillerato brillantes, como por ejemplo los que están cursando el Bachillerato de Excelencia o los que se están preparando para la Olimpiada de Física.

^{3*} <https://smartphysics.webs.upv.es/>

6. Referencias

- [Castro-Palacio, 2013b] J.C. Castro-Palacio, L. Velazquez-Abad, F. Gimenez y J.A. Monsoriu, "Using a mobile phone acceleration sensor in physics experiments on free and damped harmonic oscillations", *American Journal of Physics* **81**, 472-475 (Mayo 2013).
- [Chevrier, 2013] J. Chevrier, L. Madani, S. Ledenmat, y A. Bsiesy, "Teaching classical mechanics using smartphones", *The Physics Teacher* **51**, 376-377 (Sep. 2013).
- [Kuhn, 2013a] J. Kuhn y P. Vogt, "Smartphones as experimental tools: different methods to determine the gravitational acceleration in classroom physics by using everyday devices", *European Journal of Physics Education* **4**, 16-27 (Ene. 2013).
- [Tuset-Sanchis, 2015] L. Tuset-Sanchis, J.C. Castro-Palacio, J.A. Gómez-Tejedor, F.J. Manjón y J.A. Monsoriu, "The study of two-dimensional oscillations using a smartphone acceleration sensor: example of Lissajous curves", *Physics Education* **50**, 580-586 (Sep. 2015).
- [Vogt, 2012a] P. Vogt y J. Kuhn, "Analyzing free fall with a smartphone acceleration sensor", *The Physics Teacher* **50**, 182-183 (Mar. 2012).

2.2. El *smartphone* como barómetro en experimentos de Física



MODELLING IN SCIENCE EDUCATION AND LEARNING
Volume 11 (1), 2018 DOI: 10.4995/masel.2018.9021.
Instituto Universitario de Matemática Pura y Aplicada
Universitat Politècnica de València

*El smartphone como barómetro en
experimentos de Física*

*The smartphone as a barometer in Physics
experiments*

Isabel Salinas, Marcos H. Giménez, Juan A. Monsoriu
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
isalinas@fis.upv.es, jmonsori@fis.upv.es, mhgimene@fis.upv.es

Juan Carlos Castro Palacio
IMPERIAL COLLEGE LONDON
j.castro-palacio@imperial.ac.uk

El *smartphone* como barómetro en experimentos de Física

I. Salinas¹, M.H. Giménez¹, J.A. Monsoriu¹ and J.C. Castro –Palacio²

¹ *Departamento de Física de Física Aplicada, Universitat Politècnica de València. Camí de Vera s/n, 46022 València, Spain*

² *Department of Earth Science and Engineering, Faculty of Engineering, Imperial College, London SW7 2AZ, United Kingdom.*

Abstract

En este trabajo se presentan dos experimentos que sacan partido del sensor de presión de los teléfonos inteligentes, utilizándolo para determinar su valor en el seno de agua en equilibrio en una probeta. En un primer experimento, destinado a estudiantes de Secundaria y niveles superiores, las medidas de la presión obtenidos a diferentes profundidades permiten realizar un ajuste lineal, comprobando así la validez de la Ley de Stevin. Además, a partir de dicha ley y de los parámetros del ajuste se puede determinar la densidad del agua. Los valores obtenidos indirectamente por este procedimiento difieren entre un 2% y un 4% del resultado de dividir entre sí la masa y el volumen de una muestra.

En un segundo experimento, más enfocado a estudiantes de primeros cursos universitarios de asignaturas de Física, el teléfono móvil sumergido oscila suspendido de un muelle. Las medidas del sensor de presión permiten, mediante la Ley de Stevin, obtener la serie temporal de la presión en la correspondiente oscilación amortiguada, cuyos parámetros se determinan mediante un ajuste no lineal. La comparación de la pulsación libre obtenida a partir de estos valores difiere en un 1,5% respecto del obtenido a partir de la medición directa del periodo fuera del agua.

En ambos casos, los resultados obtenidos indican la efectividad del método utilizado en contextos docentes.

1. Introducción

Los teléfonos inteligentes (*smartphones*) forman parte de nuestra cotidianeidad. La creciente incorporación de sensores los capacita para un gran número de aplicaciones, entre las que se incluye su utilización en la enseñanza. El teléfono se puede utilizar en el laboratorio docente de Física como un instrumento más de medida gracias a sus múltiples sensores: acelerómetro, giróscopo, de temperatura, de humedad, de luz y de campo magnético. Para la gestión de cada uno de estos sensores se puede encontrar aplicaciones informáticas gratuitas en internet; permitiendo básicamente el registro y almacenamiento de los datos obtenidos.

La literatura especializada relacionada con la enseñanza de la Física ha reportado, desde el año 2010 aproximadamente, un número creciente de trabajos relacionados con los sensores de los *smartphones* y la enseñanza de la Física. Los primeros trabajos reportados ilustraron experimentos docentes sencillos de Mecánica Clásica para el Nivel Secundario, y fueron publicados en la revista *Physics Teacher* de la Asociación Americana de Profesores de Física en 2012 y 2013 (Vogt, 2012a; Chevrier, 2013; Kuhn, 2013b). En estos trabajos, los autores mostraron cómo calcular la aceleración de caída libre de un cuerpo y experimentaron con péndulos simples. En 2013, se publica un trabajo en la misma revista sobre la relación impulso-momento (Streepey, 2013). En todos los casos, el objeto de estudio es el teléfono mismo. Con la intención de extender los experimentos docentes con el sensor de aceleración al Nivel Universitario y con una dimensión más cuantitativa, Monsoriu y sus colaboradores han publicado un conjunto importante de trabajos desde 2013 hasta la fecha, que han abarcado varios temas de la Mecánica Clásica, tales como oscilaciones unidimensionales libres, amortiguadas (Castro-Palacio, 2013b) y acopladas (Castro-Palacio, 2013a), movimiento circular (Castro-Palacio, 2014) y oscilaciones bidimensionales (Tuset-Sanchis, 2015; Giménez, 2017a). En el caso de las oscilaciones bidimensionales, el uso del teléfono como dispositivo de medida supone un gran avance. Hasta ese momento, los experimentos se realizaban utilizando métodos un tanto engorrosos: por ejemplo, la trayectoria del cuerpo oscilante era plasmada sobre un papel de carbón que posteriormente era digitalizado para el análisis (Bobbillo-Ares, 1995).

En relación a los otros sensores, también se pueden citar trabajos publicados por el grupo del Prof. Monsoriu (Sans, 2013; Gomez-Tejedor, 2014a; Gomez-Tejedor, 2014b; Gomez-Tejedor, 2015) y por otros autores (Parolin, 2013; Thoms, 2013; Kuhn, 2013a; Kuhn, 2013b; Silva, 2012; Forinash, 2012; Monteiro, 2014a; Monteiro, 2014c). Por ejemplo, Gomez-Tejedor et al. (Gomez-Tejedor, 2014b), Parolin y Pezzi (Parolin, 2013) y Kuhn (Kuhn 2013a) determinan la velocidad del sonido utilizando el micrófono del móvil y un altavoz; Gomez-Tejedor et al. (Gomez-Tejedor, 2014a) estudian los movimientos rectilíneo uniforme y uniformemente acelerado utilizando el micrófono y el efecto Doppler; y Sans et al. (Sans, 2013) y Thoms et al. (Thoms, 2013) utilizan el sensor de luz ambiental. Otros trabajos muestran cómo aprovechar el giróscopo del móvil para analizar la conservación del momento angular (Shakur, 2013) y medir la energía de rotación (Monteiro, 2014a). También se reportan trabajos sobre el uso combinado de varios sensores. Por ejemplo, Monteiro et al. (Monteiro, 2014c), muestran cómo el uso combinado de giróscopos permite la medición de la aceleración y la velocidad angular, respectivamente, de un péndulo físico, para brindar así una mejor descripción de la cinemática de este sistema.

En el presente artículo se describen nuevas experiencias en relación al uso de los teléfonos inteligentes en laboratorios docentes de Física, en esta ocasión utilizando el teléfono como barómetro. En la literatura se reporta un trabajo donde se utiliza el sensor de presión del dispositivo para medir la densidad del agua (Macchia, 2016). Adicionalmente, en el presente trabajo hemos incluido la medición de la densidad del agua de una cubeta de 60 litros en la que se disuelven 2 kg de sal de cocina. En una segunda parte del artículo, el sensor de presión del teléfono se ha utilizado para estudiar sus oscilaciones amortiguadas en un recipiente con agua. A partir de las mediciones de presión y mediante un ajuste no lineal de los datos experimentales a la ecuación del movimiento armónico amortiguado, se determinaron la amplitud, el tiempo de relajación, el período y la fase inicial.

2. Determinación de la densidad de un líquido.

El experimento para determinar la densidad del agua de una cubeta se diseñó para estudiantes de Secundaria y niveles superiores. En primer lugar, el teléfono se introdujo en una bolsa plástica hermética. Antes de cerrarla, se extrajo el aire del interior tanto como fue posible, para garantizar un mejor contacto del agua con el sensor, solo mediado por la pared de plástico de la bolsa.

Una vez preparado el teléfono, se procedió a realizar las mediciones de la presión hidrostática en pascales a diferentes niveles de profundidad, entre 0 y 22 cm, y a intervalos equidistantes de 2 cm. En cada acto de medición, correspondiente a una determinada profundidad, se esperó unos segundos, de manera tal que se restablecieran las condiciones de equilibrio hidrostático. El teléfono empleado fue un Samsung s7 y para gestionar su sensor de presión se utilizó la aplicación *Physics Toolbox Suite** versión 1.7.3. Dentro de la aplicación, se seleccionó la opción "Barómetro" y se colocó en modo "Lectura Digital". A partir de un conjunto suficientemente grande de valores de presión, para cada profundidad se calculó el valor promedio y la desviación estándar.

Según la Ley de Stevin (Alonso, 1992), la presión hidrostática P en función de la profundidad h se expresa como:

$$P = P_0 + \rho gh \quad (1)$$

donde P_0 es la presión atmosférica, g la aceleración de la gravedad, ρ es la densidad del líquido, que es la magnitud a determinar en nuestro experimento. A partir de los datos de presión medios, calculados para cada profundidad, se procedió a la determinación de la densidad utilizando un ajuste lineal. La Figura 1 muestra una foto del montaje experimental (a) y una representación esquemática del experimento (b) donde se pueden apreciar las magnitudes físicas involucradas.

* Physics Toolbox Suite, Vieyra Software ver. 1.7.3., descargada en septiembre de 2017 de: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.chrystianvieyra.physicstoolboxsuite>.

El procedimiento descrito anteriormente se llevó a cabo para dos muestras: sin y con 2 kg de sal de cocina añadidos a los 60 litros de agua de la cubeta. De esa manera se garantizó contar con dos muestras de densidades diferentes y de muy fácil preparación. La Figura 2 representa los valores captados por el sensor de presión y registrados con la aplicación *Physics Toolbox Suite* en función del tiempo para cada profundidad. Se puede apreciar que las fluctuaciones de los valores son pequeñas, con una desviación estándar de 0,0296 Pa.

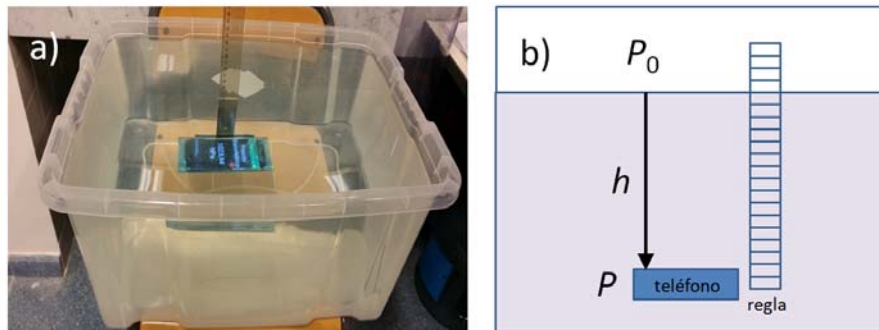


Figura 1. Foto del montaje experimental (a) y representación esquemática del experimento (b), donde se muestran las magnitudes involucradas en la Ec. (1).

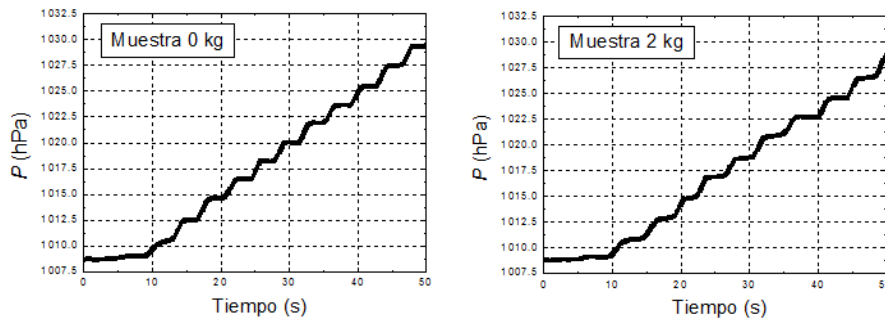


Figura 2. Presión hidrostática en función del tiempo. Los valores constantes de presión (escalones) representan las mediciones a las diferentes profundidades para los dos casos considerados en este trabajo, es decir, sin y con 2 kg de sal añadidos al agua de la cubeta.

Los valores medios de presión, obtenidos a partir de las mediciones con el sensor del teléfono, se representan en función de la profundidad en la Figura 3. La representación de estos datos responde a un modelo lineal caracterizado por la Ec. (1). Después de realizar un ajuste lineal, utilizando el método de los Mínimos Cuadrados, se obtuvieron los valores de la pendiente a y la ordenada en el origen b , que en nuestro caso se corresponden con la constante ρg y la presión atmosférica P_0 en la Ec. (1). La Tabla I muestra un resumen de estos resultados y la comparación de los valores obtenidos con otro método alternativo; consistente en medir el volumen V y la masa m , para luego determinar la densidad másica según su definición: $\rho = m/V$. Se puede apreciar que los valores obtenidos difieren en un 4 % y 2 % para los casos sin y con sal de cocina añadidos, respectivamente. Esta diferencia porcentual puede estar relacionada con restos de aire en el interior de la envoltura de plástico, la precisión en el posicionamiento vertical o la falta de horizontalidad del teléfono durante las mediciones.

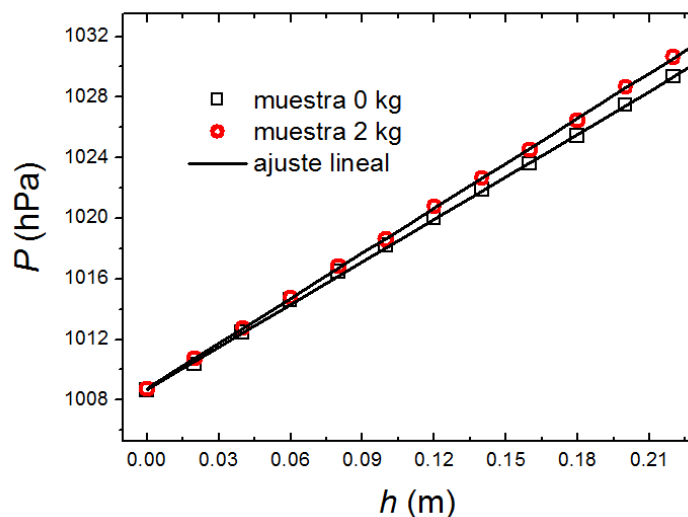


Figura 3. Presión hidrostática en función de la profundidad.

$P = ah + b$ $a = \rho g ; b = P_0$		
	Muestra 0 kg	Muestra 2 kg
a (hPa/m)	93,68 (0,63)	99,14 (0,35)
b (hPa)	1008,717 (0,082)	1008,766 (0,046)
R^2	0,999	0,999
ρ (kg/m ³)	956 (16)	1012 (14)
ρ_{balanza} (kg/m ³)	996 (1)	1033 (1)
D (%)	4,0 %	2,0 %

Tabla I. Resultados del ajuste lineal realizado con el método de los Mínimos Cuadrados. Las incertidumbres se muestran entre paréntesis.

3. Caracterización de oscilaciones amortiguadas.

El experimento para el estudio de las oscilaciones amortiguadas en el seno del agua se diseña para estudiantes de primeros cursos universitarios de asignaturas de Física. Antes de sumergir el teléfono en agua, se siguió el proceso ya indicado anteriormente para protegerlo. Una vez preparado, el dispositivo, se suspendió de un resorte y, se añadió un peso auxiliar debajo, tal como se muestra en la Figura 4, donde se incluyen una foto (panel a) y un esquema (panel b) del montaje experimental.

Las mediciones de la presión hidrostática fueron registradas con el sensor de presión del teléfono (barómetro). Al igual que en los experimentos del apartado anterior, se empleó un teléfono Samsung Galaxy S7, y para gestionar su sensor de presión se utilizó la aplicación *Physics Toolbox*

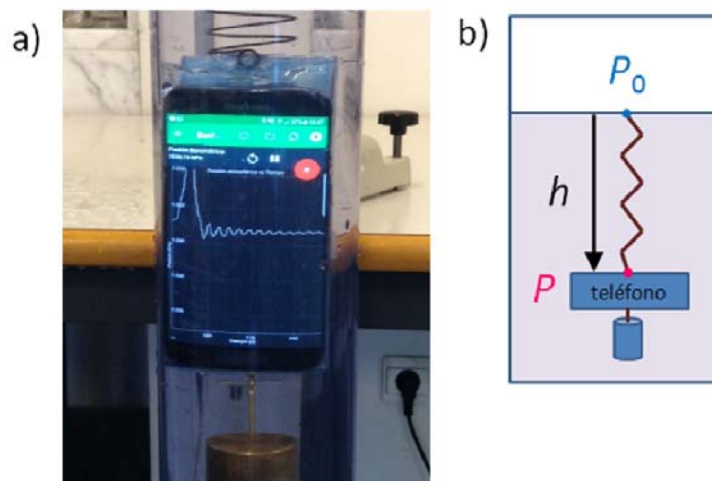


Figura 4. Foto del montaje experimental (a) y representación esquemática del experimento (b), donde se muestran las magnitudes involucradas en la Ec. (1).

*Suite** versión 1.7.3. De acuerdo con la ley de Stevin, existe una relación lineal entre presión y desplazamiento. Por tanto, la serie temporal de presiones se ajusta a una expresión matemática equivalente a la del movimiento oscilatorio amortiguado del teléfono.

Por tal motivo, los datos de presión P medidos en función del tiempo t han sido ajustados mediante el algoritmo de Levenberg-Marquardt (Levenberg, 1944; Marquardt, 1963) a la siguiente ecuación:

$$P = P_{eq} + Ae^{-t/\tau} \sin(\omega t + \phi) \quad (2)$$

donde P_{eq} es la presión hidrostática en la posición de equilibrio del sistema, A la amplitud inicial, ω la pulsación, ϕ la fase inicial y τ el tiempo de relajación.

* Physics Toolbox Suite, Vieyra Software ver. 1.7.3., descargada en septiembre de 2017 de: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.chrystianvieyra.physicstoolboxsuite>.

En la Figura 5 se representa la curva del ajuste obtenido junto con los datos medidos. La Tabla II incluye los valores de los diferentes parámetros de la curva ajustada. A partir de la pulsación y el tiempo de relajación se obtiene la pulsación libre del sistema,

$$\omega_0 = \sqrt{\omega^2 + \frac{1}{\tau^2}} = 5,4305 \text{ rad/s} \quad (3)$$

El resultado presenta una desviación del 1,5%, con respecto a la pulsación libre calculada a partir de la medición directa del período promedio de 10 oscilaciones, $\omega_0 = 5,5116 \text{ rad/s}$.

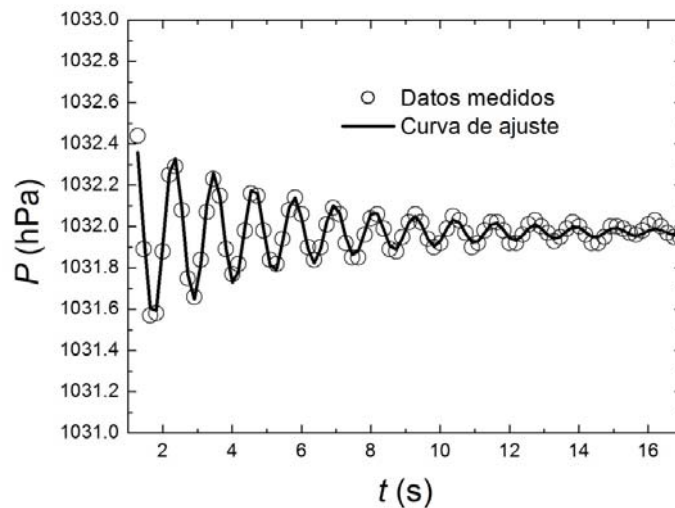


Figura 5. Datos medidos con el sensor de presión en función del tiempo y el respectivo ajuste no lineal practicado.

Parámetros	Valores (incertidumbre)
P_{eq} (hPa)	1031,9732 (0,0021)
A (hPa)	0,627 (0,021)
τ (s)	4,45 (0,16)
ω (rad/s)	5,4258 (0,0082)
ϕ (rad)	1,553 (0,033)
R^2	0,9708

Tabla II. Resultados del ajuste no lineal realizado con algoritmo de Levenberg-Marquardt. Las incertidumbres se muestran entre paréntesis.

4. Conclusiones

En un primer estudio se ha utilizado el sensor de presión de un teléfono inteligente para medir su valor a diferentes profundidades. El correspondiente ajuste lineal, junto con la Ley de Stevin ha permitido obtener el valor de la densidad del agua. La comparación con la densidad obtenida de mediciones con una probeta y una balanza, arroja una diferencia porcentual del 4% y 2% para los casos sin y con 2 kg de sal de cocina añadidos a los 60 litros de agua de la cubeta. En un segundo experimento, se ha utilizado el sensor de presión del móvil al estudio del movimiento oscilatorio amortiguado del teléfono en el agua. La serie temporal de presiones, que dependen linealmente de la profundidad del teléfono, se ha utilizado para describir las oscilaciones. El valor de la pulsación obtenido del ajuste se utilizó para calcular la pulsación libre del sistema, que se comparó con la calculada a partir de la medición directa del período del sistema en el aire, resultando una desviación 1,5%. Este tipo de experiencias, donde los móviles son utilizados como instrumentos de medida, han encontrado una gran aceptación entre los estudiantes de

primero de Ingeniería de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño de la Universitat Politècnica de València (España). De hecho, se ha realizado una encuesta de satisfacción a los alumnos que realizaron la misma práctica, pero aplicando metodologías diferentes, y se ha comparado los resultados. En general, la calificación obtenida en los grupos que realizaron la práctica innovadora (con *smartphone*) es mucho más alta en todos los apartados de la encuesta, con una valoración media de 8,2 (sobre 10 puntos), en comparación con los que han seguido el método tradicional, con una valoración global de 6,3 puntos. En definitiva, podemos afirmar que el grado de satisfacción del alumnado se incrementa en un 30% cuando utilizan los *smartphones* en el laboratorio.

4. Agradecimientos

Los autores quisieran agradecer al Instituto de Ciencias de la Educación de la Universitat Politècnica de València (España) por el apoyo brindado a los grupos de Innovación Docente MoMa y e-MACAFI.

5. Referencias

- [Alonso, 1992] M. Alonso y E.J. Finn, “*Physics*”, Massachusetts, United States; Addison-Wesley Publishing Company (1992).
- [Bobillo-Ares, 1995] N.C. Bobillo-Ares y J. Fernandez-Nufiez, “Two-dimensional harmonic oscillator on an air table”, *European Journal of Physics Education* **16**, 223–227 (Ene.1995).
- [Castro-Palacio, 2013a] J.C. Castro-Palacio, L. Velazquez-Abad, F. Gimenez y J.A. Monsoriu, “A quantitative analysis of coupled oscillations using mobile accelerometer sensors”, *European Journal of Physics Education* **34**, 737–744 (Abr. 2013).
- [Castro-Palacio, 2013b] J.C. Castro-Palacio, L. Velazquez-Abad, F. Gimenez y J.A. Monsoriu, “Using a mobile phone acceleration sensor in physics experiments on free and damped harmonic oscillations”, *American Journal of Physics Education* **81**, 472-475 (Mayo 2013).

- [Castro-Palacio, 2014] J.C. Castro-Palacio, L. Velazquez-Abad, J.A. Gómez Tejedor, F.J. Manjón y J.A. Monsoriu, "Using a smartphone acceleration sensor to study uniform and uniformly accelerated circular motions", *Revista Brasileira de Ensino de Física* **36**, 1-5 (Jun. 2014).
- [Chevrier, 2013] J. Chevrier, L. Madani, S. Ledenmat, y A. Bsiesy, "Teaching classical mechanics using smartphones", *The Physics Teacher* **51**, 376-377 (Sep. 2013).
- [Forinash, 2017] K. Forinash y R.F. Wisman, "Smartphones as portable oscilloscopes for physics labs", *The Physics Teacher* **50**, 242-243 (Abr. 2012).
- [Giménez, 2017a] M.H. Giménez, J.C. Castro-Palacio, J.A. Gómez-Tejedor, L. Velazquez y J.A. Monsoriu, "Theoretical and experimental study of the normal modes in a coupled two-dimensional system", *Revista Mexicana de Física E* **63**, 100–106 (Mayo 2017).
- [Gomez-Tejedor, 2014a] J.A. Gomez-Tejedor, J.C. Castro-Palacio y J.A. Monsoriu, "The acoustic Doppler effect applied to the study of linear motions. Introduction to linear motions", *European Journal of Physics Education* **35**, 025006 (Ene. 2014).
- [Gomez-Tejedor, 2014b] J.A. Gomez-Tejedor, J.C. Castro-Palacio y J.A. Monsoriu, "Direct measurement of the speed of sound using a microphone and a speaker", *Physics Education* **49**, 310-313 (May 2014).
- [Gomez-Tejedor, 2015] J.A. Gomez-Tejedor, J.C. Castro-Palacio y J.A. Monsoriu, "Frequency Analyser: A New Android Application for High Precision Frequency Measurement", *Computer Applications in Engineering Education* **23**, 471-476 (Feb. 2015).
- [Kuhn, 2013a] J. Kuhn y P. Vogt, "Smartphones as experimental tools: different methods to determine the gravitational acceleration in classroom physics by using everyday devices", *European Journal of Physics Education* **4**, 16-27 (Ene. 2013).

- [Kuhn, 2013b] J. Kuhn y P. Vogt, "Analyzing acoustic phenomena with a smartphone microphone", *The Physics Teacher* **51**, 118-119 (Feb. 2013).
- [Levenberg, 1944] K. Levenberg, "A method for the solution of certain non-linear problems in least squares", *Quarterly of Applied Mathematics* **2** 164-168 (Feb. 1944).
- [Macchia, 2016] S. Macchia, "Analyzing Stevin's law with the smartphone barometer", *The Physics Teacher* **54**, 373-373 (Sep. 2016).
- [Marquardt, 1963] D. Marquardt, "An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters SIAM", *Journal on Applied Mathematics* **11**, 431-441 (Jun. 1963).
- [Monteiro, 2014a] M. Monteiro, C. Cabeza y A.C. Martí, "Rotational energy in a physical pendulum", *The Physics Teacher* **52**, 180-181 (Mar. 2014).
- [Monteiro, 2014c] M. Monteiro, C. Cabeza y A.C. Martí, "Exploring phase space using smartphone acceleration and rotation sensors simultaneously", *European Journal of Physics Education* **35**, 045013 (Jul. 2014).
- [Parolin, 2013] S.O. Parolin y G. Pezzi, "Smartphone-aided measurements of the speed of sound in different gaseous mixtures", *The Physics Teacher* **51**, 508-509 (Nov. 2013).
- [Sans, 2013] J.A. Sans, F.J. Manjón, A.L.J. Pereira, J.A. Gomez-Tejedor y J.A. Monsoriu, "Oscillations studied with the smartphone ambient light sensor", *European Journal of Physics Education* **34**, 1349-1354 (Sep. 2013).
- [Shakur, 2013] A. Shakur y T. Sinatra, "Angular momentum", *The Physics Teacher* **51**, 564-565 (Dic. 2013).
- [Silva, 2012] N. Silva, "Magnetic field sensor", *The Physics Teacher* **50**, 372-373 (Sep. 2012).
- [Streepey, 2013] J.W. Streepey, "Using iPads to illustrate the impulse-momentum relationship", *The Physics Teacher* **51**, 54-55 (Ene. 2013).

- [Thoms, 2013] L.J. Thoms, G. Colicchia y R. Girwidz, “Color reproduction with a smartphone”, *The Physics Teacher* **51**, 440-441 (Oct. 2013).
- [Tuset-Sanchis, 2015] L. Tuset-Sanchis, J.C. Castro-Palacio, J.A. Gómez-Tejedor, F.J. Manjón y J.A. Monsoriu, “The study of two-dimensional oscillations using a smartphone acceleration sensor: example of Lissajous curves”, *Physics Education* **50**, 580-586 (Sep. 2015).
- [Vogt, 2012a] P.Vogt y J. Kuhn, “Analyzing free fall with a smartphone acceleration sensor”, *The Physics Teacher* **50**, 182-183 (Mar. 2012).

2.3. Demonstration of the parallel-axis theorem through the Smartphone

iPhysicsLabs

Jochen Kuhn and Patrik Vogt, Column Editors
 Technische Universität Kaiserslautern, Department of Physics/
 Physics Education Research Group, Germany, kuhn@physik.uni-kl.de

Demonstration of the parallel axis theorem through a smartphone

I. Salinas, M. H. Gimenez, J. A. Monsoriu, and J. A. Sans, Universitat Politècnica de València, València, Spain; juasant2@upv.es

New learning strategies try to extend the use of common devices among students in physics lab practices. In particular, there is a recent trend to explore the possibilities of using smartphone sensors to describe physics phenomena.^{1,2} On the other hand, the study of the moment of inertia by the use of the torsion pendulum is a typical example in the first courses of fundamentals of physics.³ This example allows the exploration of harmonic motion, Newton's second law, the moment of inertia theory, and the parallel axis theorem all in one. Here, we report the use of the accelerometer sensor of a smartphone to visualize and demonstrate the parallel axis theorem in a torsion pendulum.

$$\ddot{\theta} + \frac{k}{I} \theta = 0, \quad (2)$$

where the angular frequency is:

$$\Omega = \sqrt{\frac{k}{I}} = \frac{2\pi}{T}, \quad (3)$$

The moment of inertia of the system can be described as the addition of the moment of inertia of its components, as follows:

$$I = I_{\text{rod}} + I_{\text{smartphone}} + I_{\text{mass}} \quad (4)$$

Now, applying the parallel axis (or Huygens-Steiner) theorem to m that says the moment of inertia around any axis (I_{mass}) separated a distance d to the center of mass can be obtained from the moment of inertia of a parallel axis passing through the center of mass of the object (I_{mass0}),

$$I_{\text{mass}} = I_{\text{mass0}} + md^2. \quad (5)$$

Then, the moment of inertia of the system can be expressed as a function of the distance, such as

$$I = I_{\text{rod}} + I_{\text{smartphone}} + I_{\text{mass0}} + md^2 = I_0 + md^2. \quad (6)$$

Demonstration of the parallel-axis theorem through the Smartphone

I. Salinas¹, M.H. Giménez¹, J.A. Monsoriu¹ and J.A. Sans¹

¹*Departamento de Física de Física Aplicada, Universitat Politècnica de València, València, Spain*

Abstract

New learning strategies try to extend the use of common devices among students in physics lab practices. In particular, there is a recent trend to explore the possibilities of using smartphone sensors to describe physics phenomena (Monteiro, 2017b; Giménez, 2017b). On the other hand, the study of the moment of inertia by the use of the torsion pendulum is a typical example in the first courses of fundamentals of physics (Green, 1958). This example allows the exploration of harmonic motion, Newton's second law, the moment of inertia theory, and the parallel axis theorem all in one. Here, we report the use of the accelerometer sensor of a smartphone to visualize and demonstrate the parallel axis theorem in a torsion pendulum.

1. Experiment

The study of the torsion pendulum motion will serve to visualize the forced, damped or simple harmonic motion and explore the implications of the moment of inertia and the parallel-axis theorem (Boyd, 1985; Christie, 2014).

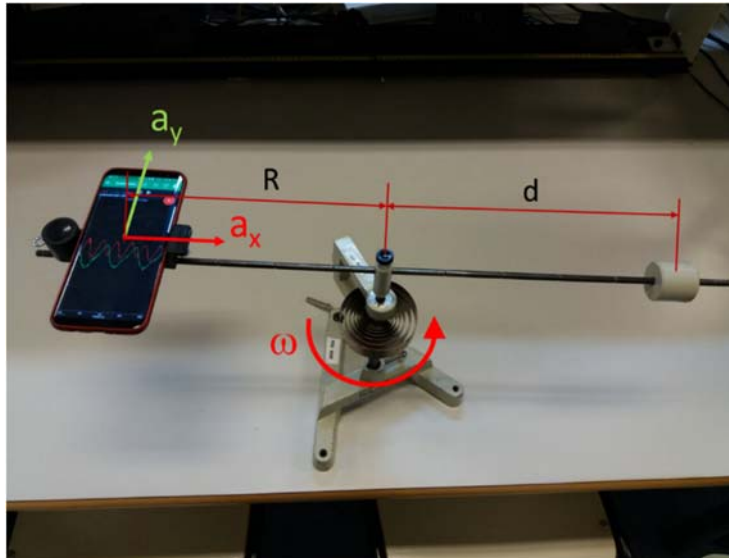


Figure 1. Scheme of the experiment performed.

In the experiment described in Figure 1, a rod rotates around its rotation axis subjected to the force of a spring (stiffness k). In order to measure the acceleration caused in the extreme of the rod, we took advantage of the accelerometer sensor of the smartphone whereas a known-mass m is placed at several distances from the centre of the rod. Thus, applying the Newton's second law we know that the moment of force or torque is related to the angular acceleration α and the moment of inertia I . Therefore, the motion is dominated by the stiffness of the spring and the angle shifted θ with the following relation:

$$M_T = I\alpha = -k\theta \quad (1)$$

Then, the equation that must be solved is:

$$\ddot{\theta} + \frac{k}{I}\theta = 0 \quad (2)$$

where the angular velocity is:

$$\Omega = \sqrt{\frac{k}{I}} = \frac{2\pi}{T} \quad (3)$$

The moment of inertia of the system can be described as the addition of the moment of inertia of its components, as follows:

$$I = I_{rod} + I_{smartphone} + I_{mass} \quad (4)$$

Now, applying the parallel-axis (or Huygens-Steiner) theorem to m that says the moment of inertia around any axis (I_{mass}) separated a distance d to the centre of mass, can be obtained from the moment of inertia of a parallel-axis passing through the centre of mass of the object (I_{mass0}).

$$I_{mass} = I_{mass0} + md^2 \quad (5)$$

Then, the moment of inertia of the system can be expressed in function of the distance, such as:

$$I = I_{rod} + I_{smartphone} + I_{mass0} + md^2 = I_0 + md^2 \quad (6)$$

The period squared of the oscillation can be expressed as:

$$T^2 = \frac{4\pi^2 I}{k} = \frac{4\pi^2 I_0}{k} + \frac{4\pi^2 m}{k} d^2 \quad (7)$$

In summary, there is a straight relationship between the period of the oscillation registered in the extreme of the rod and the distance of the mass to its centre of gravity.

3. Analysis and discussion

By means of a slight shift of the rod in the spring, the system starts to oscillate. The oscillations of the system are collected by the Android application Physics Toolbox Suite* taking advantage of the smartphone's

* <https://play.google.com/store/apps>.

accelerometer sensor. The representation of the oscillations is shown in Figure 2, which allows us to calculate the period (T) of each oscillation for the normal and tangential component of the acceleration.

The values of the time period of the tangential component of the acceleration at each position of the mass m of 0.236 kg are represented in Table I.

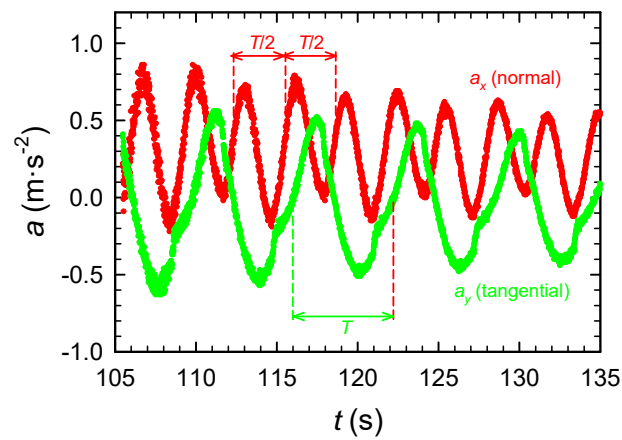


Figure 2. Plot of the normal and tangential component of the acceleration in function of time with the mass m at $d = 0.20$ m

d (m)	$T_{average}$ (s)
0.05	4.87
0.10	5.18
0.15	5.65
0.20	6.24
0.25	6.92
0.30	7.68

Table I. Average time period of the tangential acceleration for each position (d) of the mass (m).

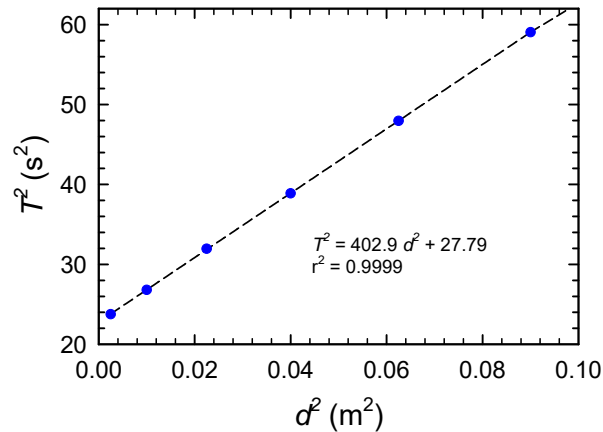


Figure 3. Linear fit of period squared in function of the square of the distance of the mass to the center of gravity.

The square of the values showed in Table I are displayed in Figure 3, where one can observe a linear trend, according to Equation (7). The high quality of the fit ($r^2 = 0.9999$) offered a large reliability of the parameters obtained.

Thus, from the fit to a linear dependence through minimum squares and comparing with Equation (7), we can obtain that the slope a_{slope} is related to the stiffness of the spring as

$$a_{slope} = \frac{4\pi^2 m}{k} \quad (8)$$

Applying Equation (1), one can also find the value of the stiffness of the spring by the application of a force at a determined distance. In our case, we have applied 0.25 N at a distance of 0.3 m and we have observed that the rod rotated π radians, then

$$k = \frac{|M_T|}{\theta} = 0.0239 \text{ Nm} \quad (9)$$

The stiffness calculated from Equation (7) is

$$k_{measured} = \frac{4\pi^2 m}{a} = 0.0231 \text{ Nm} \quad (11)$$

The discrepancy obtained in the calculation of the stiffness of the spring by both of these methods of less than 4%.

In summary, we present a new way to calculate the stiffness of a spring applying previously acquired knowledge about moment of inertia and parallel axis theorem thanks to the use of the accelerometer sensor of a smartphone. This new method has been proved as an invaluable tool to make the experiments more relevant to the students and discover the potential possibilities of this common device as a sensor in multitude of basic Physics experiments.

5. Acknowledgments

The authors would like to thank the Institute of Educational Sciences of the Universitat Politècnica de València (Spain) for the support of the Teaching Innovation Groups MoMa and e-MACAFI. JAS acknowledges Ramón y Cajal fellowship program (RYC-2015-17482).

6. References

- [Boyd, 1985] J.N. Boyd y P.N. Raychowdhury, "Parallel axis theorem", *The Physics Teacher* **23**, 486 (Nov. 1985).
- [Christie, 2014] D. Christie, "Tennis Rackets and the Parallel-axis Theorem", *The Physics Teacher* **52**, 208-209 (Abr. 2014).
- [Giménez, 2017c] M.H. Giménez, I. Salinas y J.A. Monsoriu, "Direct Visualization of Mechanical Beats by means of an Oscillating Smartphone", *The Physics Teacher* **55**, 424-425 (Oct. 2017).
- [Green, 1958] R.E. Green, "Calibrated Torsion Pendulum for Moment of Inertia Measurements", *American Journal of Physics* **26**, 498-499 (Jul. 1958).
- [Monteiro, 2017b] M. Monteiro, C. Stari, C. Cabeza, y A.C. Martí, "Magnetic field 'flyby' measurement using a smartphone's magnetometer and accelerometer simultaneously," *The Physics Teacher* **55**, 580-581 (Dic. 2017).

2.4. Dynamics of a yoyo using a smartphone gyroscope sensor



The screenshot shows the top portion of an arXiv preprint page. At the top left is the Cornell University logo and name. Below that is a red navigation bar with the text 'arXiv.org > physics > arXiv:1903.01343' and a search box on the right. Below the red bar is a grey bar with the text 'Physics > Physics Education'. The main title 'Dynamics of a yoyo using a smartphone gyroscope sensor' is displayed in bold. Below the title are the authors' names: 'Isabel Salinas, Martin Monteiro, Arturo C. Marti, Juan A. Monsoriu'. A submission date '(Submitted on 4 Mar 2019)' is shown. The abstract text follows, describing the investigation of a yoyo's dynamics using smartphone sensors. At the bottom, there are fields for 'Comments', 'Subjects', and 'Cite as', with the subjects being 'Physics Education (physics.ed-ph)' and 'Classical Physics (physics.class-ph)', and the citation being 'arXiv:1903.01343 [physics.ed-ph]'.

Cornell University

arXiv.org > physics > arXiv:1903.01343

Search or
(Help | Advanc

Physics > Physics Education

Dynamics of a yoyo using a smartphone gyroscope sensor

Isabel Salinas, Martin Monteiro, [Arturo C. Marti](#), Juan A. Monsoriu

(Submitted on 4 Mar 2019)

The dynamics of a traditional toy, the yoyo, is investigated theoretically and experimentally using smartphone sensors. In particular, using the gyroscope the angular velocity is measured. The experimental results are complemented thanks to a digital video analysis. The concordance between theoretical and experimental results is discussed. As the yoyo is a ubiquitous, simple and traditional toy this simple proposal could encourage students to experiment with everyday objects and modern technologies.

Comments: 10 pages, 5 figures

Subjects: **Physics Education (physics.ed-ph)**; Classical Physics (physics.class-ph)

Cite as: [arXiv:1903.01343](#) [physics.ed-ph]
(or [arXiv:1903.01343v1](#) [physics.ed-ph] for this version)

Dynamics of a yoyo using a smartphone gyroscope sensor

Isabel Salinas¹, Martín Monteiro², Arturo C. Marti³, Juan A. Monsoriu¹

¹ *Universitat Politècnica de València, València, Spain*

² *Universidad ORT Uruguay*

³ *Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Uruguay*

Abstract

The dynamics of a traditional toy, the yoyo, is investigated theoretically and experimentally using smartphone' sensors. In particular, using the gyroscope the angular velocity is measured. The experimental results are complemented thanks to a digital video analysis. The concordance between theoretical and experimental results is discussed. As the yoyo is a ubiquitous, simple and traditional toy this simple proposal could encourage students to experiment with everyday objects and modern technologies.

Keywords: yoyo, toys, smartphone, gyroscope, recreational physics.

PACS numbers: 01.40.-d, 01.50., 01.50.My

1. Introduction

A yoyo, like the one shown in the left panel of Figure 1, is a traditional toy whose origin can be traced back at least to the ancient Greece. It is made up of two disks joined by an axle and a string wound around the axle. The player holds one end of the string with his/her hand by inserting one finger into a small knot and executes several plays. In the simplest version, the player lets the toy to fall by effect of the gravity, spinning and unwinding the string. When the yoyo reaches the lowest position, it bounces back and starts climbing the string as the string is wound again in the axle. To counteract the friction effects the player applies small pushes, up or down, when the yoyo is climbing or falling respectively.

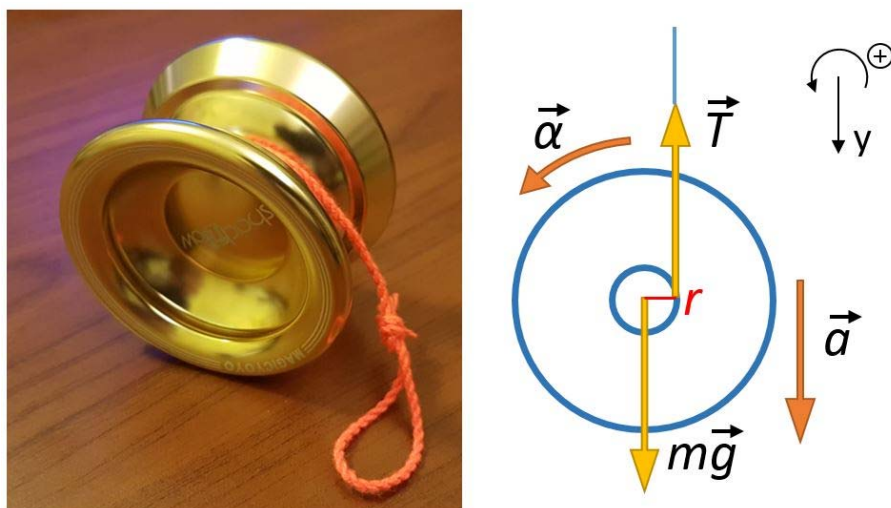


Figure 1. In the left panel the traditional toy consisting of two disks joined by an axle. A string, with a passing knot in the free end is wound around the axle as can be seen in the picture. When the yoyo is either climbing or falling two forces are exerted on it as shown in right panel: the weight, $m\vec{g}$ and the tension of the string \vec{T} . In the diagram it is also indicated, the inner radius, r , the acceleration of the center of mass, a , and the angular acceleration α .

The dynamics of the yoyos has received few attention in the physics literature. A traditional device used in introductory physics labs that shares some of the characteristics of yoyos is the Maxwell wheel. This device was used to investigate the kinematics and dynamics of rotating discs and in particular the concept of moment of inertia. In a previous work (Pecori, 1998), the dynamics of this apparatus was studied using the sensors available at that time. Here, we focus on using the traditional yoyo supplemented with modern and widespread resources, such as smartphone built-in sensors, to present an experiment that can be easily implemented in many Physics labs.

The usage of toys to teach physics is an interesting approach to promote engagement and creativity (Güémez, 2009). Traditionally, toys have been widely used as tools in demonstrations. However, it is frequently difficult to

extract quantitative results in physics experiments involving toys. One possible strategy to address this difficulty is the use of smartphone sensors.

Physics experiments using smartphone sensors have expanded significantly in the last years. Recently, in several articles published in the literature the use of smartphones has been proposed in topics like oscillations (Castro-Palacio, 2013b), mechanics (Castro-Palacio, 2014), optics (Salinas, 2018b) and electromagnetism (Forinash, 2018) among others. Physics experiments using smartphones include not only experiments in traditional laboratory environments, but also in non-traditionally places as amusement parks (Vieyra, 2014; Pendrill, 2018; Monteiro, 2014b].

Smartphones possess a growing number of sensors. Among the spectrum of sensors available the use of the gyroscope (also known as angular velocity sensor) has received comparatively less attention than others (Monteiro, 2014a; Monteiro, 2014b; Monteiro, 2014c; Monteiro, 2015; Monteiro, 2017a; de Jesus, 2018; Patrinoopoulos, 2015; Pörn, 2016). This sensor is clearly well suited to experiment in situations involving rotational dynamics. In some cases, it can be used in conjunction with other sensors, typically the accelerometer (Monteiro, 2014c; Monteiro, 2015), to get a more compelling insight into interesting physical phenomena. Here, we focus on smartphone rotation sensor to analyze the dynamics of a yoyo.

A brief theoretical analysis is given in the next Section. After that, in Section 3 we describe the experimental setup which consists essentially of a homemade yoyo in which a smartphone was fixed. In the proposed experiment, the yoyo is thrown several times while the built-in gyroscope sensor is recording the angular velocity. To complement the analysis, we also record the experiment using a digital camera. In Section 4 we present and discuss the results. Thanks to the smartphone sensor the angular velocity is measured and the angular acceleration is readily obtained by a linear fit. The angle, obtained from the video analysis, allows to obtain the angular acceleration using a quadratic fit. We compare the angular acceleration obtained by both methods and corroborate their coherence. Finally in Section 5 we discuss the conclusion and perspectives. This experiment, whose previous requirements include essentially a working knowledge of the Newton equations, is aimed at students of high school or freshman level.

2. Theoretical analysis of the yoyo dynamics

We consider a yoyo, with mass m , hanging from a string and moving only in the vertical direction. The string is considered as weightless and inextensible. The applied forces are the tension of the string, \vec{T} , and the weight, $m\vec{g}$ as indicated in Figure 1 (right panel) both acting in the vertical direction. Assuming the y -axis oriented downwards, the second Newton law can be written as

$$ma_y = mg - T \quad (1)$$

where a_y is the vertical acceleration of the center of mass.

Similarly, let us consider the rotational version of the Newton's second law in the center of mass. We assume that the tension is applied upwards, at the right of the center of mass, at a perpendicular distance which coincides with the radius of the inner cylinder, r , as shown in Figure 1. Assuming the positive torques in the counterclockwise direction, the rotational law can be expressed as

$$I\alpha = Tr \quad (2)$$

Where α is the angular acceleration of the yoyo.

The third equation needed to solve the problem comes from the non-slipping condition of the yoyo, relative to the string, and relates the vertical acceleration and the angular acceleration. In the configuration shown in the figure this constraint reads as

$$a_y = \alpha r \quad (3)$$

The angular acceleration can be obtained solving Eqs. 1-3. Considering the expression relating the radius of gyration and the inertia moment, $I = mr_g^2$ and substituting, we obtain the relation

$$\alpha = g \frac{r}{r^2 + r_g^2} \quad (4)$$

Equation 4 links the (constant) angular acceleration to the physical characteristics of the yoyo and the gravitational acceleration when the yoyo is either climbing or falling on the *left* of the string as shown in Figure 1. However, when the yoyo is on the right of the string, the sign of torque produced by the string and the non-slipping conditions change their signs and the angular acceleration, α' , results the opposite value that in Eq. 4

$$\alpha' = -g \frac{r}{r^2 + r_g^2} \quad (5)$$

In a typical play, the yoyo is released from the support and falls along one side of the string. At the lowest point, when the string is fully stretched, the yoyo behaves like a physical pendulum during a very brief period of time. In this lapse the yoyo rotates 180 degrees around the end of the string and the vertical velocity of the center of mass and the angular acceleration change their sign. After that, the yoyo starts climbing but now along the *opposite* side of the string. As a consequence of the conservation of angular momentum, the angular velocity when leaving is conserved before and after the yoyo is in the lowest point. The origin of the impulsive force applied by the string on the yoyo may be related to the elasticity of the string or to sudden displacements of the support (or player's hand).

The expected temporal evolution of the angular velocity deduced from the previous considerations is depicted in Figure 2. At the beginning the yoyo falls along the right side of the string (time period 1). When it reaches the lowest point, there exists an impulsive force due to the finite length of the string and the yoyo climbs along the left side rotating to the same side, but decreasing its angular velocity (time period 2). When it arrives to the support the angular velocity is null, and the yoyo falls again with the same angular acceleration, along the left side but now rotating in opposite sense (time period 3). Finally, during the last period, the yoyo goes upwards again but on the right side (time period 4).

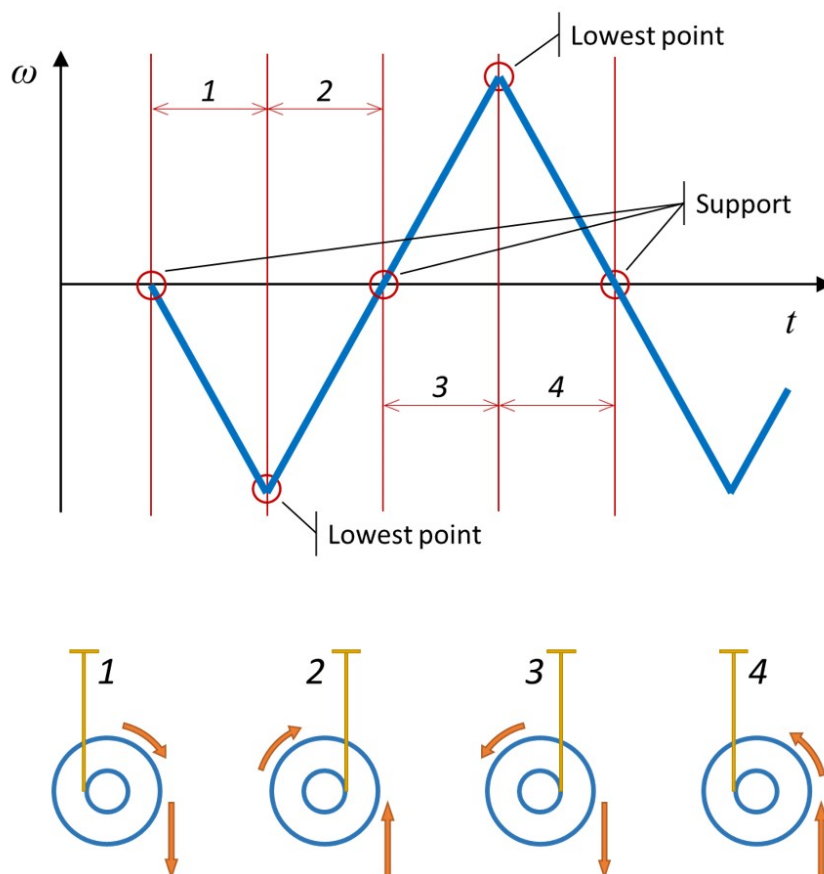


Figure 2. Schematic representation of the yoyo angular velocity as a function of time (top panel) and its orientation relative to the string (bottom panel) in each of the time periods (1; 2; 3; 4) indicated above. The angular velocity displays a saw tooth pattern while the angular acceleration (not shown here) takes opposite (constant) values depending whether the yoyo is hanging on the left or right of the string. The changes in the slope occur when the yoyo reaches the lowest position. The arrows in the bottom panel indicate the sense of the rotation and the vertical motion.

3. Experimental Setup

The experimental setup comprises only a yoyo and a smartphone with a built-in rotation sensor or gyroscope. Since smartphones are usually more voluminous than typical yoyos we built a home-made yoyo which consists of two methacrylate plates (diameter $D = 19.5$ cm; and thickness $e = 0.8$ cm) joined by an empty PVC pipe (external diameter $D_e = 5$ cm and length $l_e =$

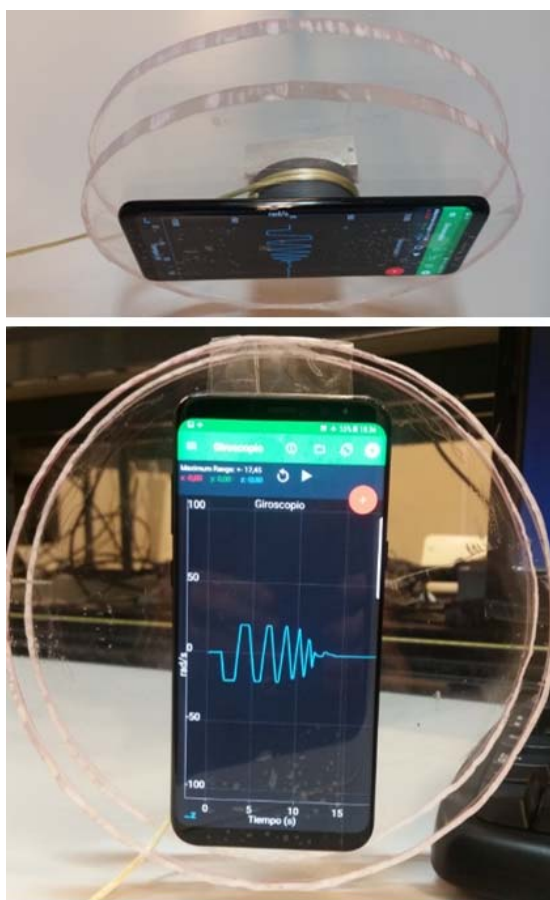


Figure 3. Two pictures of the experimental setup consisting of two methacrylate disks joined by an empty PVC tube. On the smartphone, a screenshot of the *Physics Toolbox Suite* app can be appreciated.

2.2 cm) where a string is wound. In one of the exterior faces of the yoyo a smartphone is fixed with its center of mass coinciding with the yoyo axes while in the other face a mass is placed to counterbalance the smartphone.

The smartphone is a Samsung S8+ which includes a built-in gyroscope. In Figure 3 we show our experimental device. The Physics Toolbox Suite* app was used to register experimental data and export to a CSV (comma separated values) file. In the lower panel a screenshot of the app displaying the temporal evolution of the angular velocity during the whole move can be appreciated.

4. Results

The yoyo is held with the string wound and then released while the smartphone registers the angular velocity along several bounces. In the upper panel of Figure 4 we show the temporal evolution of the angular velocity during a whole move. As can be seen in the graph, at the initial time the angular velocity is null. When the yoyo is released, it starts going downwards as the string is unwound and the angular velocity increases in modulus. Different from the behavior previously discussed, it can be seen that the graph displays several *plateaux* due to the saturation of the sensor when the angular velocity reaches 20 rad/s (this specific value depends on the smartphone employed).

At successive downwards and upwards travels, the energy is slowly dissipated and the *plateau* disappears.

The overall outlook of the temporal behavior displayed in Figure 4 can be understood in the light of the discussion presented in Sec. 2. The saw tooth comprises sections with approximately constant slopes whose (opposite) values correspond to the Eqs.4-5. In addition, the changes of slope occur when the yoyo reaches the lowest point and the zeros correspond to the passing near the supporting point (or the hand). In the lower panel of Figure

* <https://play.google.com/store/apps>.

4, two temporal windows are zoomed. In each interval, the yoyo goes up, reaches the support, and goes down, but, as indicated in the previous paragraph, rotating in opposite directions.

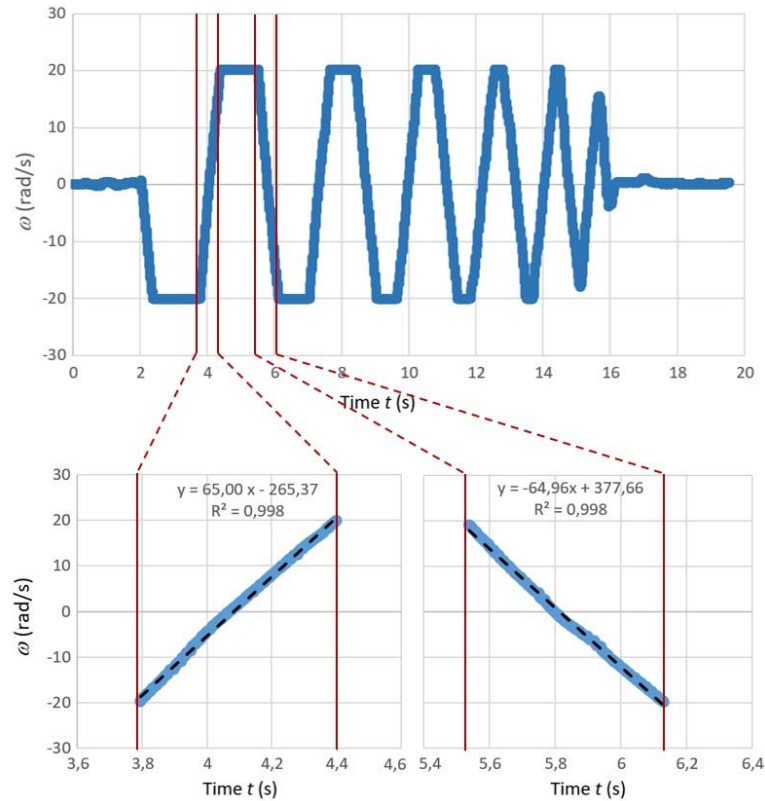


Figure 4. Experimental results for the whole temporal evolution of the angular velocity (upper panel) and a zoom with two windows (bottom panel). In both of them the yoyo starts at the lowest point, goes up, reaches the support (zero angular velocity) and falls again until the lowest point. Notice that in each windows the yoyo is climbing and falling along one or the other side of the string. Angular accelerations correspond to the slope of the linear fit shown in each window.

Since the rotation is nearly uniformly accelerated, we perform a linear fit,

$$\omega = \omega_0 + \alpha t \quad (6)$$

The slope of the adjustment corresponds in absolute value with the angular acceleration, resulting 65.00 rad/s^2 in the first interval and 64.96 rad/s^2 in the second. Between both results there is a minimum discrepancy of 0.06 % within the experimental uncertainties. In addition, it can be noticed, in both temporal windows, a small concavity of the angular velocities. The causes of this phenomenon, to be studied elsewhere, could be related to several effects such as rolling resistance, the non-uniform friction of the thread with the walls of the yoyo or also the alternance of period of slipping and rolling related to the statics and kinematics friction effects.

Video analysis provides a useful tool to compare with the experimental results obtained from the rotation sensor. The analysis was made from frames extracted from the video at 30fps. On top of Figure 5 we show 7 consecutive frames in which the yoyo is descending. To determine the angles, we mark the axis of the mobile approximately with a segment and from its projections the angle with the vertical is obtained. The drawback of this method is that, when the yoyo reaches a certain speed, it is difficult to visualize the shape of the phone. In the lower panel of Figure 5 we show the angular variable as a function of time. Taking into account the uniformly accelerated circular movement, we perform a quadratic fit

$$\Delta\theta = \omega_0\Delta t + \frac{1}{2}\alpha(\Delta t)^2 \quad (7)$$

which results in an angular acceleration $\alpha = 64.52 \text{ rad/s}^2$. This value appears very close to the previously obtained using the smartphone sensor with only a 0.7 % deviation.

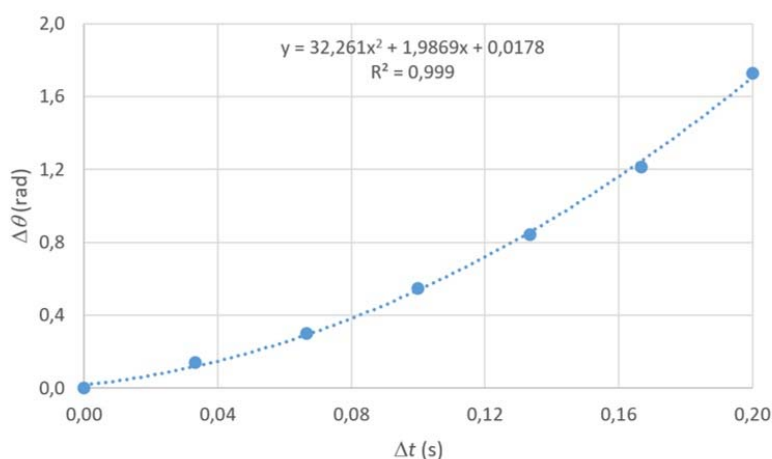
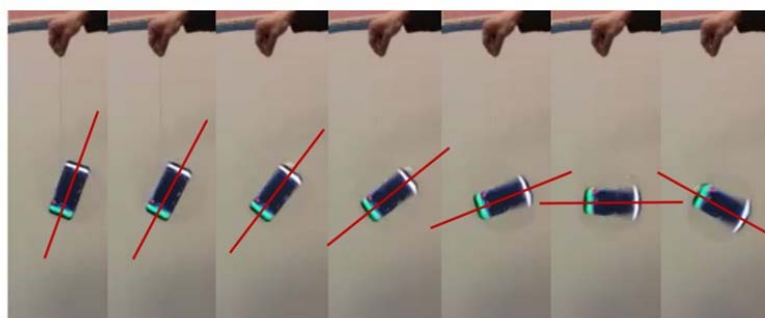


Figure 5. Angular acceleration obtained through video analysis. In the upper panel we show successive screenshots of the smartphone and a red segment indicating its main axis. The orientation of the smartphone (angle between the red line and the initial orientation) is plotted in the lower panel as a function of time. The angular acceleration is found thanks to the quadratic fit indicated in the legend.

5. Conclusion

In this work we propose a simple experiment using a traditional toy, the yoyo, and a modern device, the smartphone which involves several basics concepts in mechanics. Thanks to the gyroscope sensor the dynamics of the

toy can be accurately analyzed and compared with results obtained from video analysis. The gyroscope sensor provides the angular velocity and by means of a linear fit the angular accelerations can be also obtained. We analyzed a whole move of the yoyo and then focus our attention in two temporal windows. The accelerations in each window, in module, are very similar and also coherent with the results obtained analyzing frame by frame the video. It must be emphasized that, depending on the altitude of the thrown the smartphone sensor could not be able to register all the range of angular velocity values.

One important feature of some smartphone sensors to bear in mind is that they provide measures with respect to the own smartphone. For example, the accelerometer measures acceleration in a moving frame (that is relative to the smartphone) (Monteiro, 2015). The gyroscope sensor measures the angular velocity with respect to an inertial reference frame. In the present experiment, as the smartphone is rotating fixed to the yoyo respect the same axis, the gyroscope is more appropriate than the accelerometer to get a useful measure.

An interesting proposal for the classroom is to present the problem to the students, let them to discuss and predict the evolution of the angular variables and, then, to perform the experiment and compare the prediction with the results. This kind of proposal using elements familiar to the students could contribute to show that Physics is everywhere and promote a critical thinking.

6. Acknowledgments

We thank the Institute of Educational Sciences of the Universitat Politècnica de València (Spain) for the support of the Teaching Innovation Groups MoMa and e-MACAFI. We also thank the support from the program CSIC *Grupos I+D* (Uruguay).

7. References

- [Castro-Palacio, 2013b] J.C. Castro-Palacio, L. Velazquez-Abad, F. Gimenez y J.A. Monsoriu, "Using a mobile phone acceleration sensor in physics experiments on free and damped harmonic oscillations", *American Journal of Physics* **81**, 472-475 (Mayo 2013).
- [Castro-Palacio, 2014] J.C. Castro-Palacio, L. Velazquez-Abad, J.A. Gómez Tejedor, F.J. Manjón y J.A. Monsoriu, "Using a smartphone acceleration sensor to study uniform and uniformly accelerated circular motions", *Revista Brasileira de Ensino de Física* **36**, 1-5 (Jun. 2014).
- [de Jesus, 2018] V.L.B. de Jesus, C.A.C. Pérez, A.L. de Oliveira y D.G.G. Sasaki, "Understanding the gyroscope sensor: a quick guide to teaching rotation movements using a smartphone", *Physics Education*, **54**, 015003 (Oct. 2018).
- [Forinash, 2018] K. Forinash y R. Wisman, "Smartphone audio port data collection cookbook", *Papers in physics* **10**, 100006 (Jun. 2018).
- [Güemez, 2009] J. Güemez, C. Fiolhais y M. Fiolhais, "Toys in physics lectures and demonstrations - a brief review", *Physics education* **44**, 53-64, (Ene. 2009).
- [Monteiro, 2014a] M. Monteiro, C. Cabeza, A.C Marti, "Rotational energy in a physical pendulum", *The Physics Teacher* **52**, 180-181 (Mar. 2014).
- [Monteiro, 2014b] M. Monteiro, C. Cabeza, A.C Marti, P. Vogt y J. Kuhn, "Angular velocity and centripetal acceleration relationship", *The Physics Teacher*, **52**, 312-313 (Mayo 2014).
- [Monteiro, 2014c] M. Monteiro, C. Cabeza, A.C Marti, "Exploring phase space using smartphone acceleration and rotation sensors simultaneously", *European Journal of Physics Education* **35**, 045013 (Jul. 2014).
- [Monteiro, 2015] M. Monteiro, C. Cabeza, A.C Marti, "Acceleration measurements using smartphone sensors: Dealing with the equivalence principle", *Revista Brasileira de Ensino de Física* **37**, 1303 (Mar. 2015).

- [Monteiro, 2017a] M. Monteiro, C. Stari, C. Cabeza y A.C. Marti, "The Polarization of Light and Malus's Law Using Smartphones", *The Physics Teacher* **55**, 264-266 (Mayo 2017).
- [Patrinopoulos, 2015] M. Patrinopoulos y C. Kefalis, "Angular velocity direct measurement and moment of inertia calculation of a rigid body using a smartphone", *The Physics Teacher* **53**, 564-565 (Dic. 2015).
- [Pecori, 1998] B. Pecori y G. Torzo, "The Maxwell wheel investigated with MBL", *The Physics Teacher* **36**, 362-366 (Sept. 1998).
- [Pendriil, 2018] A.M. Pendriil y C. Modig, "Pendulum rides, rotations and the Coriolis effect", *Physics Education* **53**, 045017 (Jul. 2018).
- [Pörn, 2016] R. Pörn y M. Braskén, "Interactive modeling activities in the classroom-rotational motion and smartphone gyroscopes", *Physics Education* **51**, 065021 (Nov. 2016).
- [Salinas, 2018b] I. Salinas, M.H. Giménez, J.A. Monsoriu y J.C Castro-Palacio, "Characterization of linear light sources with the smartphone's ambient light sensor", *The Physics Teacher* **56**, 562-563 (Oct. 2018).
- [Vieyra, 2014] R.E. Vieyra y C. Vieyra, "Analyzing forces on amusement park rides with mobile devices", *The Physics Teacher* **52**, 149-151 (Mar. 2014).

2.5. Characterization of linear light sources with the smartphone's ambient light sensor

iPhysicsLabs

Jochen Kuhn and Patrik Vogt, Column Editors
 Technische Universität Kaiserslautern, Department of Physics/
 Physics Education Research Group, Germany; kuhn@physik.uni-kl.de

Characterization of linear light sources with the smartphone's ambient light sensor

Isabel Salinas, Marcos H. Giménez, and Juan A. Monsoriu, Universitat Politècnica de València, Cami de Vera s/n, 46022, València, Spain
 Juan C. Castro-Palacio, Imperial College, London SW7 2AZ, United Kingdom

The smartphone's ambient light sensor has been used in the literature to study different physical phenomena.¹⁻⁵ For instance, Malus's law, which involves the polarized light, has been verified by using simultaneously the orientation and light sensors of a smartphone.¹ The illuminance of point light sources has been characterized also using the light sensor of smartphones and tablets, demonstrating in this way the well-known inverse-square law of distance.^{2,3} Moreover, these kinds of illuminance measurements with the ambient light sensor have allowed the determination of the luminous efficiency of different quasi-point optical sources (incandescent and halogen lamps) as a function of the electric power

In this case, the luminous flux is distributed over cylindrical wavefronts (Fig. 1), so the illuminance is characterized by the following equation,

$$E = \frac{\phi}{2\pi rL}, \quad (3)$$

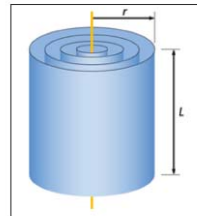


Fig. 1. Cylindrical wavefronts produced by a linear light source.

where r is the distance from the detector to the center of the linear source of length L . Thus, the luminance is only proportional to the inverse of the source-detector distance and not to the inverse of the squared distance. It can be noticed that Eqs. (2) and (3) are completely analogous to the equation of the electric field generated by a point charge ($E \sim 1/r^2$) or by an infinite line of charge ($E \sim 1/r$), respectively. The objective of

this work is to verify experimentally the illuminance dependence, $1/r$, for linear sources using the ambient light sensor of a smartphone.

Characterization of linear light sources with the smartphone's light sensor

I. Salinas¹, M.H. Giménez¹, J.A. Monsoriu¹ and J.C. Castro –Palacio²

¹ *Departamento de Física de Física Aplicada, Universitat Politècnica de València. Camí de Vera s/n, 46022 València, Spain*

² *Department of Earth Science and Engineering, Faculty of Engineering, Imperial College, London SW7 2AZ, United Kingdom.*

1. Introduction

The smartphone's ambient light sensor has been used in the literature to study different physical phenomena (Monteiro, 2017; Vieira, 2014; Klein, 2014; Sans, 2017; Kapucu, 2017). For instance, Malus's law, which involves the polarized light, has been verified by using simultaneously the orientation and light sensors of a smartphone (Monteiro, 2017a).

The illuminance of point light sources has been characterized also using the light sensor of smartphones and tablets, demonstrating in this way the well-known inverse-square law of distance (Vieira, 2014; Klein, 2017). Moreover, these kinds of illuminance measurements with the ambient light sensor have allowed the determination of the luminous efficiency of different quasi-point optical sources (incandescent and halogen lamps) as a function of the electric power supplied (Sans, 2017). Regarding mechanical systems, the inverse-square law of distance has also been used to investigate the speed and acceleration of a moving light source on an inclined plane (Kapucu, 2017) or to study coupled and damped oscillations (Sans, 2013). In the present work, we go further in presenting a simple laboratory experiment using the smartphone's ambient light sensor in order to characterize a non-point light source, a linear fluorescent tube in our case.

2. Basic theory

The smartphone's ambient light sensor is able to measure the illuminance (E) provided by an optical source, which is defined as the luminous flux (φ) per unit area (A):

$$E = \frac{\varphi}{A} \quad (1)$$

We can consider the optical source as a point source when its size is negligible compared to the distance between the detector and the source. In this case, the emitted wavefronts can be considered as spherical surfaces of radius r centered on the point source. Thus, in mathematical terms, the illuminance can be expressed as:

$$E = \frac{\varphi}{4\pi r^2} \quad (2)$$

Therefore, for point optical sources, the illuminance is governed by the inverse-square law of distance. However, if the resulting illuminance from a non-negligible size light source were to be calculated at a given distance, an integral over the actual geometry of the source would have to be performed. One way to avoid using concepts that are more complex in high school and

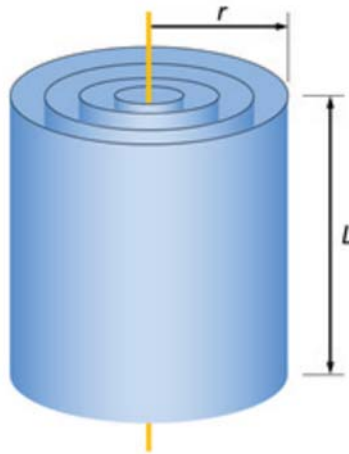


Figure 1. *Cylindrical wavefronts produced by a linear light source*

first-year university levels is to consider a linear source as an example of a non-point source.

In this case, the luminous flux is distributed over cylindrical wavefronts (Figure 1), so the illuminance is characterized by the following equation,

$$E = \frac{\phi}{4\pi rL} \quad (3)$$

where r is the distance from the detector to the center of the linear source of length L . Thus, the luminance is only proportional to the inverse of the source-detector distance and not to the inverse of the squared distance. It can be noticed that Eqs. (2) and (3) are completely analogous to the equation of the electric field generated by a point charge ($E \sim 1/r^2$) or by an infinite line of charge ($E \sim 1/r$), respectively. The objective of this work is to verify experimentally the illuminance dependence, $1/r$, for linear sources using the ambient light sensor of a smartphone.

3. Experiments and results

Most smartphones nowadays bear a light sensor, which allows illuminance of any light source placed nearby to be measured. Here, we will also use the light sensor but this time to measure the resulting illuminance of a light source of non-negligible size. To keep it simple, we have chosen the case of a linear source that is represented in our experiments as a conventional fluorescent tube of length $L = 120$ cm. The fluorescent tube (OSRAM T8, 36 W, 3350 lm) and the smartphone (Samsung Galaxy S7), while measuring the illuminance with the light sensor, are included in the photo of Figure 2.

In order to collect the sensor data, the *Physics Toolbox Suite*^{*} free application for Android has been used. Using this simple experimental setup (Figure 2), measurements of the illuminance were carried out at each distance r and during 30 s. The background light was controlled such that it was kept close to zero. To perform a new measurement, the sensor was covered with an

^{*} Physics Toolbox Suite, Vieyra Software, <https://play.google.com/store/apps>.



Figure 2. *Photo of the experimental setup.*

opaque black cloth until it was placed at the new position, and so on for the other measurements. The illuminance was averaged at each point over 30 s. The results showing the dependence of the illuminance $E \sim 1/r$ are included in Figure 3.

The luminous flux in Eq. (3) has been obtained by means of a linear fit using the data for E , directly measured with the light sensor vs. the inverse distance $1/r$ as

$$E = a \frac{1}{r} \tag{4}$$

where a is a constant to be determined. The output of the fitting is shown in Figure 4. A linear correlation coefficient of 0.9991 was obtained that shows clearly the linear dependence between the plotted variables. The resulting value of the slope, $a = 431.3 \text{ lx m}$, was used to calculate the luminous flux $\phi = a2\pi L = 3252 \text{ lm}$. This value was compared with the one reported by the

manufacturer, 3350 lm. A percentage deviation of 3% was obtained, which indicates the effectiveness for teaching of the methodology presented here.

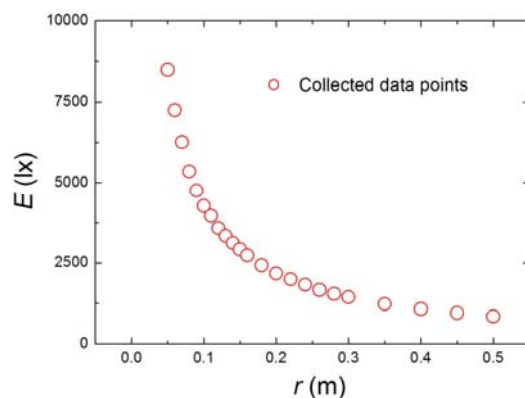


Figure 3. Data points collected with the light sensor. The inverse of distance dependence of the illuminance can be observed.

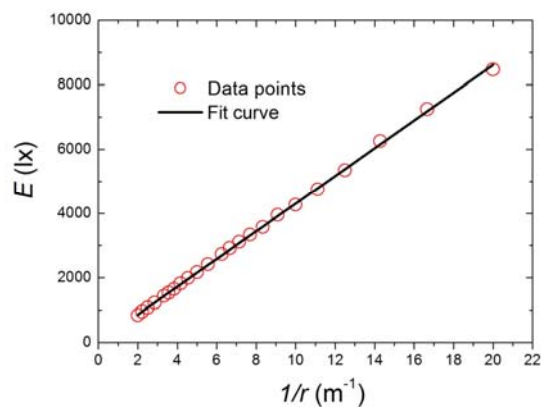


Figure 4. Measured data points (open red circles) of the illuminance and linear fit (black solid line) vs. the inverse distance.

This simple setup and experiment shows that the smartphone's ambient light sensor is fair enough to verify the inverse-distance law for linear sources ($E \sim 1/r$). This kind of smartphone physics experiment is being implemented with success in the first engineering courses at the School of Design Engineering, Universitat Politècnica de València, Spain.

4. Acknowledgements

The authors would like to thank the Institute of Educational Sciences of the Universitat Politècnica de València (Spain) for the support of the Teaching Innovation Groups MoMa and e-MACAFI.

5. References

- [Kapucu, 2017] S. Kapucu, "Finding the acceleration and speed of a light-emitting object on an inclined plane with a smartphone light sensor," *Physics Education* **52**, 055003 (Jul. 2017).
- [Klein, 2014] P. Klein, M. Hirth, S. Gröber, J. Kuhn y A. Müller, "Classical experiments revisited: Smartphones and tablet PCs as experimental tools in acoustics and optics," *Physics Education* **49**, 412–417 (Jul. 2014).
- [Monteiro, 2017a] M. Monteiro, C. Stari, C. Cabeza y A.C. Marti, "The Polarization of Light and Malus's Law Using Smartphones," *The Physics Teacher* **55**, 264-266 (Mayo 2017).
- [Sans, 2013] J.A. Sans, F.J. Manjón, A.L.J. Pereira, J.A. Gomez-Tejedor y J.A. Monsoriu, "Oscillations studied with the smartphone ambient light sensor," *European Journal of Physics Education* **34**, 1349-1354 (Sep. 2013).
- [Sans, 2017] J.A. Sans, J. Gea-Pinal, M.H. Gimenez, A.R. Esteve, J. Solbes y J.A. Monsoriu, "Determining the efficiency of optical sources using a smartphone's ambient light sensor," *European Journal of Physics* **38**, 025301 (Mar. 2017).

[Vieira, 2014] L.P. Vieira, V.O.M. Lara y D.F. Amaral, "Demonstration of the inverse square law with the aid of a tablet/smartphone," *Revista Brasileira de Ensino de Física* **36**, 1-3 (Jul. 2014).

Capítulo 3

Discusión general de los resultados

Como se ha comentado anteriormente, el objetivo fundamental de esta Tesis es explorar nuevas vías de aplicación de los sensores de los teléfonos móviles inteligentes (*smartphones*) a la didáctica de la Física Experimental. En este apartado se resumen brevemente los principales resultados presentados en los artículos del capítulo anterior.

3.1. Aportaciones realizadas

En la Introducción, se ha bosquejado la situación de la docencia de la Física Experimental. En el laboratorio los estudiantes trabajan, desde el punto de vista práctico, leyes físicas que han analizado previamente en las clases de teoría y problemas. El objetivo de las prácticas de laboratorio es doble: por un lado, reforzar los conocimientos teóricos adquiridos, y por otro, habituarse a las técnicas experimentales propias del método científico (manejo de aparatos de medida, toma de datos experimentales, análisis de los mismos, cálculo de incertidumbres, etc.).

En esta Tesis se propone, como elemento motivador, que los estudiantes utilicen su propio *smartphone* como instrumento de medida, controlando los sensores mediante aplicaciones (*Apps*) gratuitas. La ventaja de utilizar el móvil es múltiple: por una parte, se fomenta el interés del alumnado; por otra parte, la gama de ensayos existente es muy amplia y variada.

En el apartado “1.2.2.- Diseños realizados” se describen las experiencias desarrolladas, desde el punto de vista de la teoría que trabajan y los resultados que puede visualizar el estudiante en su *smartphone*. En el Capítulo 2 se recopilan los artículos en su idioma original. A continuación, se clasifican las aportaciones realizadas en función del sensor utilizado.

En primer lugar, se ha empleado el sensor de aceleración lineal. Se trata del sensor más conocido dentro de los integrados en un *smartphone*. La función principal del acelerómetro es, como su mismo nombre indica, medir la aceleración con la que desplazamos linealmente el teléfono en las tres

dimensiones del espacio. Este sensor ha permitido el diseño de las siguientes experiencias:

- El estudio cualitativo del movimiento vibratorio armónico simple, el movimiento amortiguado débil y el movimiento forzado con amortiguamiento débil que describe un *smartphone* (Artículo 1).
- La determinación de los parámetros de ajuste de un movimiento forzado con amortiguamiento débil (Artículo 1).
- La determinación de la constante elástica de un muelle a partir de un movimiento forzado con amortiguamiento débil (Artículo 1).
- El estudio cuantitativo de las aceleraciones, normal y tangencial, y la caracterización del movimiento oscilatorio, en un péndulo de torsión (Artículo 3).
- La determinación de la constante de rigidez de un muelle de un péndulo de torsión (Artículo 3).

En segundo lugar, se ha empleado el sensor de presión o barómetro. Se trata de un sensor que no tienen todos los *smartphones* y por ello no está tan extendido su uso en ensayos. Este sensor se ha empleado para medir la presión hidrostática (Ley de Stevin) de dos formas diferentes. En una, las mediciones se realizan por escalones de profundidad y, en la otra, se utiliza la serie temporal de presiones, para describir las oscilaciones de un *smartphone* unido a un muelle, que oscila en un medio viscoso. Ambas experiencias están recogidas en la misma publicación:

- La determinación de la densidad de diferentes líquidos (Artículo 2).
- La determinación de la pulsación de un movimiento oscilatorio con amortiguamiento débil, (Artículo 2).

En tercer lugar, se ha empleado el sensor de velocidad angular o giroscopio. Este sensor es el más indicado para registrar movimientos de rotación. Se ha empleado para el análisis de la dinámica de un disco (yoyó), que se mueve en un plano vertical, suspendido de una cuerda. A partir de la velocidad angular, se ha obtenido su aceleración angular comprobando que es constante (Artículo 4).

Finalmente, tenemos el sensor de luz ambiente. La principal función de este sensor es detectar la intensidad de la luz ambiente para poder ajustar el brillo de la pantalla de forma automática, haciéndola más clara o más oscura según se requiera. Este sensor ha permitido proponer una nueva experiencia de laboratorio en la que se caracteriza la iluminancia creada por una fuente lineal (tubo de luz halógeno) empleando el *smartphone* como luxómetro (Artículo 5).

3.2. Evaluación de los resultados

Cabe mencionar que los principales resultados alcanzados, tras varios años de investigación, son la elaboración de la presente tesis Doctoral y la publicación de los artículos que la componen. Estos artículos han sido evaluados y publicados en revistas de prestigio en la didáctica de Física tanto a nivel nacional (Revista Española de Física y Modelling in Science Education and Learning) como internacional (The Physics Teacher). Cabe destacar que The Physics Teacher es una de las pocas revistas internacionales sobre enseñanza de la Física indexada en el Web of Science.

Además de estos artículos, las diferentes experiencias desarrolladas con los *smarphones* han sido evaluadas y presentadas en diversos congresos de innovación educativa como son: International Technology, Education and Development Conference (INTED), International Conference on Higher Education Advances (HEAD), Congreso Nacional de Innovación Educativa y Docencia en Red (IN-RED) y el Congreso Universitario de Innovación Educativa en las Enseñanzas Técnicas (CUIEET). Hay que reseñar la gran aceptación que tuvo la presentación oral de la experiencia “Cómo visualizar las oscilaciones forzadas en tu *smartphone*”, presentada en la “XXXVI Reunión Bienal de la Real Sociedad Española de Física. 27 Encuentro Ibérico de Enseñanza de la Física”, celebrada en Santiago de Compostela en el 2017.

Capítulo 4

Conclusiones

En este capítulo de conclusiones, se analiza el nivel de cumplimiento de los objetivos de investigación planteados en la Introducción. También se recopilan las principales conclusiones alcanzadas, se exponen cuáles son las aportaciones más relevantes del trabajo y se proponen varias líneas futuras de investigación.

4.1. Cumplimiento de los objetivos

El objetivo principal, que consiste en “*Plantear una serie de experiencias innovadoras y sencillas que permitan introducir los smartphones en la didáctica de la Física experimental a nivel de las enseñanzas secundaria y universitaria*”, ha sido alcanzado con el diseño de las cinco experiencias innovadoras recogidas en esta Tesis, y la posterior redacción, evaluación y publicación de los artículos.

Como objetivos particulares, se planteó investigar “*el uso del sensor de aceleración, el sensor de presión, el giroscopio y el sensor de luz ambiente*”.

Los Artículos 1 y 3 incluidos en el Capítulo 2 corresponden al primero de los objetivos particulares mencionados, al desarrollar experiencias en las que se utilizan series temporales de aceleraciones registradas por un *smartphone* (oscilación libre, oscilación amortiguada, oscilación forzada).

El Artículo 2 describe dos experimentos en los que se utiliza el sensor de presión del *smartphone*. En el primero, para comprobar la validez de la Ley de Stevin y, en el segundo, para obtener la serie temporal de presiones correspondiente a una oscilación amortiguada.

El Artículo 4 desarrolla un experimento en el que se utiliza el giroscopio del *smartphone*, para obtener la serie temporal de velocidades angulares.

Por último, en el Artículo 5 se hace uso del sensor de luz ambiente del *smartphone*. Utilizándolo como luxómetro, se verifica la dependencia de la iluminancia de una fuente lineal de luz, con la inversa de la distancia a la misma.

En general, las experiencias propuestas son adecuadas para asignaturas de Física de primer curso de universidad. Se pueden adaptar, con alguna simplificación de la base teórica y del análisis de datos, para un nivel de educación secundaria.

4.2. Aportaciones realizadas

Como se ha detallado en la Introducción, la literatura existente, en el campo de las aplicaciones de los *smartphones* en la didáctica de la Física Experimental, es muy amplia. Sin embargo, las experiencias desarrolladas son todas innovadoras, ya sea por el objeto del estudio (vibraciones forzadas con amortiguamiento, oscilaciones en un aparato de torsión, dinámica de un yoyó, caracterización de una fuente lineal de luz), ya sea por el sensor empleado (barómetro).

Hay que reseñar que se ha elaborado dos vídeos, de acceso libre, como resultado de los ensayos realizados durante el diseño de las experiencias “Cómo visualizar las oscilaciones forzadas en tu *smartphone*”^{*} (Artículo 1), y “El *smartphone* como barómetro en experimentos de Física”[†] (Artículo 2). En ambos casos se muestra la pantalla del móvil mientras registra la secuencia temporal completa de la experiencia.

Asimismo, la encuesta sobre la disponibilidad de sensores en los *smartphone* de los estudiantes, realizada en el ámbito de esta tesis, cuantifica la situación real en un aula de primer curso de universidad, a principios del año 2019.

4.3. Líneas de investigación futuras

El propósito de este trabajo era plantear una serie de experiencias sencillas haciendo uso de los sensores de un *smartphone* mediante aplicaciones gratuitas. A medida que se ha ido avanzando en el estudio de los sensores,

^{*} <https://media.upv.es/portal/video/cf765de0-a83a-11e7-9479-7d8be53aef3>

[†] <https://media.upv.es/portal/video/4c916340-0a53-11e8-8598-1bd5a4a266de>

el abanico de posibles aplicaciones en el laboratorio se ha abierto. En este sentido, como línea de investigación futura se propone el desarrollo de nuevas experiencias de Física tales como:

- *Conservación de la energía mecánica:* Complementando a la experiencia desarrollada con el giroscopio y el yoyó, se podría comprobar la conservación de la energía mecánica y obtener el momento de inercia del sistema.
- *Sensor de luz:* Son varias las ideas que están en fase de estudio:
 - El estudio de la variación de la intensidad a lo largo del eje de una fuente circular (tubo fluorescente circular y/o cordón de ledes).
 - El estudio de la influencia de la forma de la fuente luminosa a medida que se alcanzan distancias muy superiores a su tamaño.
- *Combinación de sensores:* Utilizar el acelerómetro y el sensor de presión para estudiar un sistema de masa variable.

Bibliografía general

- [Al-Taani, 2018] H. Al-Taani y S. Arabasi, "Solar Irradiance Measurements Using Smart Devices: A Cost-Effective Technique for Estimation of Solar Irradiance for Sustainable Energy Systems", *Sustainability* **10**, 508 (Feb. 2018).
- [Alonso, 1992] M. Alonso y E.J. Finn, "*Physics*", Massachusetts, United States; Addison-Wesley Publishing Company (1992).
- [Arribas, 2015] E. Arribas Garde, I. Escobar García, C.d.P. Suárez Rodríguez, A. Nájera López, y A. Beléndez Vázquez, "Medida del campo magnético de imanes pequeños con un smartphone: una práctica de laboratorio muy económica", *Experiencias de innovación docente en la enseñanza de la Física Universitaria* (4ª Edición) Albacete, abril de 2015, [en línea], 209-222, Disponible en: <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/48866/1/Capítulo12-AB-2015.pdf> [consultado el 08/04/2019]
- [Barrera-Garrido, 2017] A. Barrera-Garrido, "A smartphone inertial balance", *The Physics Teacher* **55**, 248-249 (Abril, 2017).
- [Bobillo-Ares, 1995] N.C. Bobillo-Ares y J. Fernandez-Nufiez, "Two-dimensional harmonic oscillator on an air table", *European Journal of Physics Education* **16**, 223–227 (Ene.1995).
- [Bomhold, 2013] C.R. Bomhold, "Educational use of smart phone technology: A survey of mobile phone application use by undergraduate university students", *Program* **47**, 424-436 (Ene. 2013).
- [Boyd, 1985] J.N. Boyd y P.N. Raychowdhury, "Parallel axis theorem", *The Physics Teacher* **23**, 486 (Nov.1985).
- [Cabeza, 2014] C. Cabeza, N. Rubido y A.C. Martí. "Learning physics in a water park", *Physics Education* **49**, 187-194 (Mar. 2014).
- [Cabeza, 2018] C. Cabeza, M. Monteiro y A. Martí. "Los Smartphones y la Enseñanza de la Ciencia." 1ª Jornada de Ciencias CEIBAL "Herramientas para la Docencia", LATU junio de 2018, [en línea], disponible en <http://fisicamartin.blogspot.com/2018/06/los-smartphones-y-la-ensenanza-de-la.html> [consultado el 08/04/2019]

- [Carvajal, 2019] J.S. Carvajal Montealegre, D.D.P. Jiménez Romero y J. Herman Muñoz, "App's como herramientas pedagógicas para el proceso de Enseñanza-Aprendizaje de la Física", *Revista científica* (número especial), 160-168 (nd. 2019).
- [Castro-Palacio, 2013a] J.C. Castro-Palacio, L. Velazquez-Abad, F. Gimenez y J.A. Monsoriu, "A quantitative analysis of coupled oscillations using mobile accelerometer sensors", *European Journal of Physics Education* **34**, 737–744 (Abr. 2013).
- [Castro-Palacio, 2013b] J.C. Castro-Palacio, L. Velazquez-Abad, F. Gimenez y J.A. Monsoriu, "Using a mobile phone acceleration sensor in physics experiments on free and damped harmonic oscillations", *American Journal of Physics* **81**, 472-475 (Mayo 2013).
- [Castro-Palacio, 2014] J.C. Castro-Palacio, L. Velazquez-Abad, J.A. Gómez Tejedor, F.J. Manjón y J.A. Monsoriu, "Using a smartphone acceleration sensor to study uniform and uniformly accelerated circular motions", *Revista Brasileira de Ensino de Física* **36**, 1-5 (Jun. 2014).
- [Chevrier, 2013] J. Chevrier, L. Madani, S. Ledenmat, y A. Bsiesy, "Teaching classical mechanics using smartphones", *The Physics Teacher* **51**, 376-377 (Sep. 2013).
- [Christie, 2014] D. Christie, "Tennis Rackets and the Parallel-axis Theorem", *The Physics Teacher* **52**, 208-209 (Abr. 2014).
- [de Jesus, 2018] V.L.B. de Jesus, C.A.C. Pérez, A.L. de Oliveira y D.G.G. Sasaki, "Understanding the gyroscope sensor: a quick guide to teaching rotation movements using a smartphone", *Physics Education*, **54**, 015003 (Oct. 2018).
- [Escobar, 1990] C. Escobar, "Amusement park physics", *The Physics Teacher* **28**, 446-453 (Oct. 1990).
- [Falcão, 2009] A.E.G. Falcão Jr, R.A. Gomes, J.M. Pereira, L.F.S. Coelho y A.C.F. Santos, "Cellular phones helping to get a clearer picture of kinematics", *The Physics Teacher* **47**, 167-168 (Mar. 2009).

- [Forinash, 2017] K. Forinash y R.F. Wisman, "Smartphones as portable oscilloscopes for physics labs", *The Physics Teacher* **50**, 242-243 (Abr. 2012).
- [Forinash, 2018] K. Forinash y R. Wisman, "Smartphone audio port data collection cookbook", *Papers in physics* **10**, 100006 (Jun. 2018).
- [Gil, 2017] S. Gil y J. Di Laccio, "Smartphone una herramienta de laboratorio y aprendizaje: laboratorios de bajo costo para el aprendizaje de las ciencias", *Latin-American Journal of Physics Education* **11**, 5 (Mar. 2017).
- [Giménez, 2017a] M.H. Giménez, J.C. Castro-Palacio, J.A. Gómez-Tejedor, L. Velazquez y J.A. Monsoriu, "Theoretical and experimental study of the normal modes in a coupled two-dimensional system", *Revista Mexicana de Física E* **63**, 100–106 (Mayo 2017).
- [Giménez, 2017b] M.H. Giménez, "Aplicaciones de los Sensores de los smartphones a la Didáctica de la Física Experimental", *Universitat Politècnica de València* (Tesis doctoral) (Mayo 2017).
- [Giménez, 2017c] M.H. Giménez, I. Salinas y J.A. Monsoriu, "Direct Visualization of Mechanical Beats by means of an Oscillating Smartphone", *The Physics Teacher* **55**, 424-425 (Oct. 2017).
- [Gomez-Tejedor, 2014a] J.A. Gomez-Tejedor, J.C. Castro-Palacio y J.A. Monsoriu, "The acoustic Doppler effect applied to the study of linear motions. Introduction to linear motions", *European Journal of Physics Education* **35**, 025006 (Ene. 2014).
- [Gomez-Tejedor, 2014b] J.A. Gomez-Tejedor, J.C. Castro-Palacio y J.A. Monsoriu, "Direct measurement of the speed of sound using a microphone and a speaker", *Physics Education* **49**, 310-313 (Mayo 2014).
- [Gomez-Tejedor, 2015] J.A. Gomez-Tejedor, J.C. Castro-Palacio y J.A. Monsoriu, "Frequency Analyser: A New Android Application for High Precision Frequency Measurement", *Computer Applications in Engineering Education* **23**, 471-476 (Feb. 2015).

- [González, 2016a] M. Á. González, M. Á. González y G. Delgado, "Uso de smartphones en experimentos de Física en el laboratorio y fuera de él" IV Congreso de Docentes de Ciencias, Madrid abril 2016, [en línea], disponible en https://www.researchgate.net/profile/Manuel_Gonzalez37/publication/304624257_Uso_de_smartphones_en_experimentos_de_Fisica_en_el_laboratorio_y_fuera_de_el/links/5774fe2608aead7ba06fbe24.pdf [consultado el 08/04/2019].
- [González, 2016b] M. A. González y M. Á. González, "El laboratorio en el bolsillo: Aprendiendo física con tu smartphone", *Revista de ciencias* **6**, 28-35 (Sept. 2016).
- [González, 2018] M. A. González, A. Gómez, y M.Á. González, "Smartphones on the air track. Examples and difficulties", *Papers in Physics* **10**, 100005-100005 (Mayo 2018).
- [Green, 1958] R.E. Green, "Calibrated Torsion Pendulum for Moment of Inertia Measurements", *American Journal of Physics* **26**, 498-499 (Jul. 1958).
- [Güémez, 2009] J. Güémez, C. Fiolhais y M. Fiolhais, "Toys in physics lectures and demonstrations - a brief review", *Physics education* **44**, 53-64, (Ene. 2009).
- [Hernández, 2018] A. Hernández, "Diseño de actividades de aprendizaje basadas en dispositivos móviles personales", [Trabajo Fin de Máster], *Universidad de Valladolid* (Mayo 2018).
- [Hochberg, 2018] K. Hochberg, J. Kuhn y A. Müller, "Using smartphones as experimental tools—effects on interest, curiosity, and learning in physics education", *Journal of Science Education and Technology* **27**, 385-403 (Abr. 2018).
- [Hodson, 1993] D. Hodson, "Re-thinking old ways: Towards a more critical approach to practical work in school science", *Studies in Science Education* **22**, 85-142 (nd. 1993).

- [Igoe, 2013] D. Igoe, A. Parisi y B. Carter, "Characterization of a smartphone camera's response to ultraviolet A radiation", *Photochemistry and photobiology* **89**, 215-218 (nd. 2013).
- [Kapucu, 2017] S. Kapucu, "Finding the acceleration and speed of a light-emitting object on an inclined plane with a smartphone light sensor", *Physics Education* **52**, 055003 (Jul. 2017).
- [Klein, 2014] P. Klein, M. Hirth, S. Gröber, J. Kuhn y A. Müller, "Classical experiments revisited: Smartphones and tablet PCs as experimental tools in acoustics and optics", *Physics Education* **49**, 412-417 (Jul. 2014).
- [Kuhn 2012] J. Kuhn y P. Vogt, "Diffraction experiments with infrared remote controls", *The Physics Teacher* **50**, 118-119 (Feb. 2012).
- [Kuhn, 2013a] J. Kuhn y P. Vogt, "Smartphones as experimental tools: different methods to determine the gravitational acceleration in classroom physics by using everyday devices", *European Journal of Physics Education* **4**, 16-27 (Ene. 2013).
- [Kuhn, 2013b] J. Kuhn y P. Vogt, "Analyzing acoustic phenomena with a smartphone microphone", *The Physics Teacher* **51**, 118-119 (Feb. 2013).
- [Kuhn, 2013c] Kuhn, Jochen, and Patrik Vogt. "Applications and examples of experiments with mobile phones and smartphones in physics lessons." *Frontiers in Sensors* 1.4 (Oct. 2013): 67-73.
- [Levenberg, 1944] K. Levenberg, "A method for the solution of certain non-linear problems in least squares", *Quarterly of Applied Mathematics* **2**, 164-168 (Feb. 1944).
- [Macchia, 2016] S. Macchia, "Analyzing Stevin's law with the smartphone barometer", *The Physics Teacher* **54**, 373-373 (Sep. 2016).
- [Marquardt, 1963] D. Marquardt, "An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters SIAM", *Journal on Applied Mathematics* **11**, 431-441 (Jun. 1963).

- [Mei, 2015] B. Mei, W. Cheng y X. Cheng, "Fog computing based ultraviolet radiation measurement via smartphones", *2015 Third IEEE Workshop on Hot Topics in Web Systems and Technologies (HotWeb)*, Wahington, DC, 12-13 November 2015, IEEE, 79-84 (Nov. 2015).
- [Monteiro, 2014a] M. Monteiro, C. Cabeza y A.C. Martí, "Rotational energy in a physical pendulum", *The Physics Teacher* **52**, 180-181 (Mar. 2014).
- [Monteiro, 2014b] M. Monteiro, C. Cabeza, A.C. Martí, P. Vogt y J. Kuhn, "Angular velocity and centripetal acceleration relationship", *The Physics Teacher*, **52**, 312-313 (Mayo 2014).
- [Monteiro, 2014c] M. Monteiro, C. Cabeza y A.C. Martí, "Exploring phase space using smartphone acceleration and rotation sensors simultaneously", *European Journal of Physics Education* **35**, 045013 (Jul. 2014).
- [Monteiro, 2015] M. Monteiro, C. Cabeza y A.C. Martí, "Acceleration measurements using smartphone sensors: Dealing with the equivalence principle", *Revista Brasileira de Ensino de Física* **37**, 1303 (Mar. 2015).
- [Monteiro, 2016] M. Monteiro, P. Vogt, C. Stari, C. Cabeza y A.C. Martí, "Exploring the atmosphere using smartphones", *The Physics Teacher* **54**, 308-309 (Ago. 2016).
- [Monteiro, 2017a] M. Monteiro, C. Stari, C. Cabeza y A.C. Martí, "The Polarization of Light and Malus's Law Using Smartphones", *The Physics Teacher* **55**, 264-266 (Mayo 2017).
- [Monteiro, 2017b] M. Monteiro, C. Stari, C. Cabeza, y A.C. Martí, "Magnetic field 'flyby' measurement using a smartphone's magnetometer and accelerometer simultaneously", *The Physics Teacher* **55**, 580-581 (Dic. 2017).
- [Monteiro, 2019a] M. Monteiro, C. Stari, C. Cabeza y A.C. Martí, "Physics experiments using simultaneously more than one smartphone sensors", arXiv preprint arXiv:1901.05068. (Ene. 2019).
- [Monteiro, 2019b] M. Monteiro, C. Stari, C. Cabeza y A.C. Martí, "Sensors based on micromechanical devices: mobile labs at the service of

- experimental science teaching”, arXiv preprint arXiv:1901.05079. (Ene. 2019).
- [Müller, 2016] A. Müller, M. Hirth y J. Kuhn, “Tunnel pressure waves—A smartphone inquiry on rail travel”, *The Physics Teacher* **54**, 118-119 (Feb. 2016).
- [NASA, 2009] NASA HomePage Last Updated: July 13, 2009 Disponible en: <https://www.nasa.gov/audience/foreducators/diypodcast/rocket-evolution-index-diy.html> [consultado el 08/04/2019]
- [Ogawara, 2017] Y. Ogawara, S. Bhari y S. Mahrley, “Observation of the magnetic field using a smartphone”, *The Physics Teacher* **55**, 184-185 (Mar. 2017).
- [Parolin, 2013] S.O. Parolin y G. Pezzi, “Smartphone-aided measurements of the speed of sound in different gaseous mixtures”, *The Physics Teacher* **51**, 508-509 (Nov. 2013).
- [Patrinopoulos, 2015] M. Patrinopoulos y C. Kefalis, “Angular velocity direct measurement and moment of inertia calculation of a rigid body using a smartphone”, *The Physics Teacher* **53**, 564-565 (Dic. 2015).
- [Pecori, 1998] B. Pecori y G. Torzo, “The Maxwell wheel investigated with MBL”, *The Physics Teacher* **36**, 362-366 (Sept. 1998).
- [Pendrill, 2018] A.M. Pendrill y C. Modig, “Pendulum rides, rotations and the Coriolis effect”, *Physics Education* **53**, 045017 (Jul. 2018).
- [Polak 2016] R.D. Polak, N. Fudala, J.T. Rothchild, S.E. Weiss y M. Zelek, “Easily accessible experiments demonstrating interference”, *The Physics Teacher* **54**, 120-121 (Ago. 2016).
- [Pörn, 2016] R. Pörn y M. Braskén, “Interactive modeling activities in the classroom-rotational motion and smartphone gyroscopes”, *Physics Education* **51**, 065021 (Nov. 2016).
- [Pramuda, 2018] A. Pramuda, H. Kuswanto y S. Hadiati, “Utilising “Meriam Karbit” Indigenous Knowledge to Construct Alternative Physics Experiments Based Smartphone Camera”, *Journal of Physics: Conference Series* **1108**, 012007 (Nov. 2018).

- [Roeder, 1975] J.L. Roeder, "Physics and the amusement park", *The Physics Teacher* **13**, 327-332 (Sep. 1975).
- [Rowland, 1886] H.A. Rowland, "The Physical Laboratory in Modern Education", *Science* **7**, 573-575 (Jun. 1886).
- [Salinas, 2018a] I. Salinas, M.H. Giménez, J.A. Monsoriu y J.C Castro-Palacio, "El *smartphone* como barómetro en experimentos de Física", *Modelling in Science Education and Learning* **11**, 15-24 (Feb. 2018).
- [Salinas, 2018b] I. Salinas, M.H. Giménez, J.A. Monsoriu y J.C Castro-Palacio, "Characterization of linear light sources with the smartphone's ambient light sensor", *The Physics Teacher* **56**, 562-563 (Oct. 2018).
- [Salinas, 2018c] I. Salinas, M.H. Giménez, J. Sans, J.C Castro-Palacio y J.A. Monsoriu, "Cómo visualizar las oscilaciones forzadas en tu *smartphone*", *Revista Española de Física* **32**, 21-24 (Dic. 2018).
- [Salinas, 2019a] I. Salinas, M. Monteiro, A.C. Marti y J.A. Monsoriu, "Dynamics of a yoyo using a smartphone gyroscope sensor", arXiv preprint arXiv:1903.01343 (Mar. 2019).
- [Salinas, 2019b] I. Salinas, M.H. Giménez, J.A. Monsoriu y J.A. Sans, "Demonstration of the parallel-axis theorem through the Smartphone", *The Physics Teacher* **57**, 220-221 (Mayo 2019).
- [Sans, 2013] J.A. Sans, F.J. Manjón, A.L.J. Pereira, J.A. Gomez-Tejedor y J.A. Monsoriu, "Oscillations studied with the smartphone ambient light sensor", *European Journal of Physics Education* **34**, 1349-1354 (Sep. 2013).
- [Sans, 2015] J.A. Sans, F.J. Manjón, V.P. Cuenca-Gotor, M.H. Giménez-Valentín, I. Salinas, J.J. Barreiro, J.A. Monsoriu y J.A. Gómez-Tejedor, "Smartphone: a new device for teaching Physics", en 1st International Conference on Higher Education Advances (HEAD'15), *Editorial Universitat Politècnica de València*, 415-422 (2015, June).
- [Sans, 2017] J.A. Sans, J. Gea-Pinal, M.H. Gimenez, A.R. Esteve, J. Solbes y J.A. Monsoriu, "Determining the efficiency of optical sources using a smartphone's ambient light sensor", *European Journal of Physics* **38**, 025301 (Mar. 2017).

- [Shakur, 2013] A. Shakur y T. Sinatra, "Angular momentum", *The Physics Teacher* **51**, 564-565 (Dic. 2013).
- [Silva, 2012] N. Silva, "Magnetic field sensor", *The Physics Teacher* **50**, 372-373 (Sep. 2012).
- [Streepey, 2013] J.W. Streepey, "Using iPads to illustrate the impulse-momentum relationship", *The Physics Teacher* **51**, 54-55 (Ene. 2013).
- [Svensson, 2018] T. Svensson, "Smartphone physics—a smart approach to practical work in science education? Experiences from a Swedish upper secondary school." *Stockholm University, Faculty of Science, Department of Mathematics and Science Education*. (Student thesis) (Mar. 2018).
- [Thoms, 2013] L.J. Thoms, G. Colicchia y R. Girwidz, "Color reproduction with a smartphone", *The Physics Teacher* **51**, 440-441 (Oct. 2013).
- [Tornaría, 2014] F. Tornaría, M. Monteiro y A.C. Marti, "Understanding coffee spills using a smartphone", *The Physics Teacher* **52**, 502-503 (Nov. 2014).
- [Tuset-Sanchis, 2015] L. Tuset-Sanchis, J.C. Castro-Palacio, J.A. Gómez-Tejedor, F.J. Manjón y J.A. Monsoriu, "The study of two-dimensional oscillations using a smartphone acceleration sensor: example of Lissajous curves", *Physics Education* **50**, 580-586 (Sep. 2015).
- [Van Domelen, 2007] D. Van Domelen, "Teaching light polarization with cell phones", *The Physics Teacher* **45**, 469-469 (Nov. 2007).
- [Vandermarlière, 2016] J. Vandermarlière, "On the inflation of a rubber balloon", *The Physics Teacher* **54**, 566-567 (Dic. 2016).
- [Vieira, 2014] L.P. Vieira, V.O.M. Lara y D.F. Amaral, "Demonstration of the inverse square law with the aid of a tablet/smartphone", *Revista Brasileira de Ensino de Física* **36**, 1-3 (Jul. 2014).
- [Vieyra, 2014] R.E. Vieyra y C. Vieyra, "Analyzing forces on amusement park rides with mobile devices", *The Physics Teacher* **52**, 149-151 (Mar. 2014).

- [Vieyra, 2017] R.E. Vieyra, C. Vieyra y S. Macchia. "Kitchen physics: Lessons in fluid pressure and error analysis", *The Physics Teacher* **55**, 87-90 (Feb. 2017).
- [Villa, 2009] C. Villa, "Bell-jar demonstration using cell phones", *The Physics Teacher* **47**, 59-59 (Ene. 2009).
- [Vogt, 2012a] P. Vogt y J. Kuhn, "Analyzing free fall with a smartphone acceleration sensor", *The Physics Teacher* **50**, 182-183 (Mar. 2012).
- [Vogt, 2012b] P. Vogt y J. Kuhn, "Analyzing simple pendulum phenomena with a smartphone acceleration sensor", *The Physics Teacher* **50**, 439-440 (Oct. 2012).
- [Wastiau, 2013] P. Wastiau, R. Blamire, C. Kearney, V. Quittre, E. Van de Gaer y C. Monseur, "The Use of ICT in Education: a survey of schools in Europe", *European Journal of Education* **48**, 11-27 (nd, 2013).

Apéndice

Encuesta de disponibilidad de sensores

Con objeto de conocer la naturaleza de los sensores de los *smartphones* de los estudiantes, entre los días 8 y 11 de abril de 2019, se realizó una encuesta en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño, de la Universitat Politècnica de València.

Entre varias titulaciones, y gracias a la colaboración del alumnado y el profesorado, se han recopilado las respuestas de 212 encuestas, lo que supone más del 28 % de los 750 matriculados de primer curso.

La encuesta

Para saber que sensores tiene disponible un *smartphone* se ha utilizado la aplicación PHYSICS TOOLBOX SUITE. Esta aplicación es gratuita y se instaló en los móviles de los estudiantes aprovechando la red *wifi* de la universidad.

Cuando se instala en un móvil con sistema operativo Android, tiene un programa (“Reporte múltiple”) que ilumina los sensores que se pueden activar. De esta forma se comprueba fácilmente los sensores operativos.

Cuando el sistema operativo es IOS, se han detectado problemas de descarga, si el software no está actualizado, y el aspecto del programa cambia. En este caso, hay que entrar en cada uno de los programas para ver si está accesible el sensor.

Para resolver este problema, se hizo una encuesta a doble cara, mostrando las dos apariencias del programa, como se muestra en las figuras 1 y 2. En la tabla 1 se muestra los datos extraídos de las encuestas procesadas.

ENCUESTA DE DISPONIBILIDAD DE SENSORES EN TELÉFONOS MÓVILES

Fecha:

Datos generales:

Grado que estudias:

Sexo: Hombre Mujer


Disponibilidad de sensores:

1.- ¿Dispone de teléfono móvil? S N

En caso afirmativo contestar las siguientes cuestiones:

2.- ¿Modelo? ¿año de compra aproximado?

3.- ¿Sistema operativo? Android IOS otro

4.- Tras instalar la aplicación **PHYSICS TOOLBOX SUITE**, accede a la opción  , entra en la aplicación "Reporte Múltiple" y señala los sensores que puedes activar:

- Fuerza G
- Acelerómetro lineal
- Giroscopio
- Barómetro
- Montaña rusa
- Proximidad
- Regla
- Magnetómetro
- Brújula
- GPS
- Orientación
- Sensor de Luz
- Detector de Color
- Sonómetro
- Detector de Tono
- Osciloscopio
- Analizador de espectro
- Espectrograma

⇒ - **Reporte Múltiple:** (señalar los sensores para registrar)

- Generador de tonos
- Generador de color
- Estroboscopio
- Play
- Diagrama de datos manual

⇒

- Fuerza G
- Acelerómetro lineal
- Giroscopio
- Barómetro
- Higrómetro
- Termómetro
- Magnetómetro
- Sensor de luz
- Orientación
- Medidor de sonido
- GPS

Figura 1. Modelo para Android

ENCUESTA DE DISPONIBILIDAD DE SENSORES EN TELÉFONOS MÓVILES

Fecha:

Datos generales:

Grado que estudias:

Sexo: Hombre Mujer

Disponibilidad de sensores:

1.- ¿Dispone de teléfono móvil? S N

En caso afirmativo contestar las siguientes cuestiones:

2.- ¿Modelo? ¿año de compra aproximado?

3.- ¿Sistema operativo? Android IOS otro

4.- Tras instalar la aplicación **PHYSICS TOOLBOX SUITE**, accede a la aplicación y señala los programas que puedes activar:

- g-Force Meter
- Linear Acceleration
- Gyroscope
- Barometer
- Proximeter
- Magnetometer
- GPS
- Inclinator
- Color Detector
- Tone Detector
- Oscilloscope (audio)
- Espectrum Analyzer (audio)
- Tone Generator

Figura 2. Modelo para IOS.

Didáctica de la Física Experimental con un Smartphone

ENCUESTA	marca	modelo	año	nº	sist. Operativo	Sensores											
						Fuerza G	acelerómetro	giroscopio	Barómetro	Higrómetro	termómetro	magnetómetro	sensores de luz	orientación	Medidor de sonido	Gps	
1	One Plus	6	2019	1	Android	1	1	1				1	1	1	1	1	1
2	ND	-	-	1	Android	1						1	1		1	1	1
3	ND	-	-	1	Android	1	1	1				1	1	1	1	1	1
4	Huawei	-	2016	1	Android	1						1	1	1	1	1	1
5	Huawei	-	2017	1	Android												
6	Huawei	-	2018	2	Android	2						2	2	2	2	2	2
8	Huawei	-	2019	1	otro	1	1		1	1		1	1	1	1	1	1
9	Huawei	P Smart +	2018	1	Android	1	1	1				1	1	1	1	1	1
10	Huawei	Y560	2015	1	Android	1											1
11	Huawei	Y5 II	2015	1	Android	1						1	1	1	1	1	1
12	Huawei	Y6	2014	1	Android	1	1					1	1	1	1	1	1
13	Huawei	Y6	2017	2	Android	2						2	2	2	2	2	2
15	Huawei	P8 lite	2014	1	Android												1
16	Huawei	P8 lite	2016	1	Android	1						1	1	1	1	1	1
17	Huawei	P8 lite	2017	1	Android	1	1	1				1	1	1	1	1	1
18	Huawei	P8	2017	1	Android	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1
19	Huawei	P8 lite	2017	1	Android	1	1	1				1	1	1	1	1	1
20	Huawei	P9 lite	2017	3	Android	3						3	3	3	3	3	3
23	Huawei	P10 lite	2017	1	Android	1	1	1				1	1	1	1	1	1
24	Huawei	P10 mate	2018	3	Android	3	3	3	3			3	3	3	3	3	3
27	Huawei	P20 lite	2018	1	Android	1	1	1				1	1	1	1	1	1
28	Huawei	P20	2018	1	Android	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1
29	Huawei	P20	2018	1	Android	1	1	1			1	1	1	1	1	1	1
30	Huawei	P20 Pro	2019	1	Android	1	1	1				1	1	1	1	1	1
31	Xiaomi	-	2018	1	Android	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1
32	Xiaomi	-	2018	2	Android	2						2	2	2	2	2	2
34	Xiaomi	-	2018	1	Android	1	1	1				1	1	1	1	1	1
35	Xiaomi	-	2019	1	Android	1	1	1				1	1	1	1	1	1
36	Xiaomi	-	2019	1	Android	1						1	1	1	1	1	1
37	Xiaomi	MI A1	2018	4	Android	4	4	4				4	4	4	4	4	4
41	Xiaomi	MI A2	2018	5	Android	5	5	5				5	5	5	5	5	5
46	Xiaomi	MI A2 lite	2018	1	Miui	1	1	1				1	1	1	1	1	1
47	Xiaomi	MI 4 c	2017	1	Android	1	1	1				1	1	1	1	1	1
48	Xiaomi	MI 5s	2016	1	Android	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1
49	Xiaomi	Redmi 5 plus	2018	1	Android	1	1	1				1	1	1	1	1	1
50	Xiaomi	Redmi 4 pro	2017	1	Android	1	1	1				1	1	1	1	1	1
51	Xiaomi	Redmi note 4	2017	1	Android	1	1	1				1	1	1	1	1	1
52	Xiaomi	Redmi note 5	2018	4	Android	4	4	4				4	4	4	4	4	4
56	Xiaomi	Redmi note 6	2018	1	Android	1						1	1	1	1	1	1
57	Xiaomi	Redmi note 6	2019	1	Android	1						1	1	1	1	1	1
58	Xiaomi	MI 8	2018	1	Android	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1
59	Xiaomi	Redmi 6 A	2018	1	Android	1	1	1				1	1	1	1	1	1
60	One Plus	5t	2017	1	Android	1	1	1				1	1	1	1	1	1
61	LG	-	2016	1	Android												
62	LG	G4	2016	1	Android	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1
63	LG	G6	2017	1	Android	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1
64	LG	K10	2017	1	Android	1						1	1	1	1	1	1
65	LG	V30	2018	1	Android	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1
66	LG	X cam	2017	1	Android	1	1	1				1	1	1	1	1	1
67	One Plus	3t	2017	1	Android	1	1	1				1	1	1	1	1	1
68	Huawei	Honor 7x	2018	1	Android	1	1	1				1	1	1	1	1	1
69	Huawei	Honor 8	2016	1	Android	1	1	1				1	1	1	1	1	1
70	Sony	Xperia Z3	2016	1	Android	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1
71	Sony	Xperia XA2	2018	1	Android	1						1	1	1	1	1	1
72	Sony	peria XZ1 compact	2018	1	Android	1	1	1				1	1	1	1	1	1
73	Sony	Xperia	2019	1	Android	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1
74	BQ	-	2018	1	Android	1	1	1				1	1	1	1	1	1
75	BQ	M5	2016	1	Android	1	1	1				1	1	1	1	1	1
76	BQ	Aquarius X	2017	1	Android	1	1	1				1	1	1	1	1	1
77	BQ	Aquarius Xpro	2017	1	Android	1	1	1				1	1	1	1	1	1
78	BQ	Aquarius Xpro	2018	2	Android	2	2	2				2	2	2	2	2	2
80	BQ	Aquarius XU	2017	1	Android	1	1	1				1	1	1	1	1	1
81	BQ	Aquarius U	2017	1	Android	1	1	1				1	1	1	1	1	1
82	BQ	Aquarius U plus	2017	1	Android	1	1	1				1	1	1	1	1	1
83	Cubot	X18 plus	2019	1	Android	1	1	1	1				1				1
84	Motorola	Moto C plus	2017	1	Android	1											1
85	Samsung	J3 2016	2016	1	Android	1											1
86	Samsung	J5-30	2017	1	Android	1	1	1				1	1	1	1	1	1
87	Samsung	J5	2017	2	Android	2	2	2				2	2	2	2	2	2
89	Samsung	J5	2018	1	Android	1	1	1				1	1	1	1	1	1
90	Samsung	J5 2017	2017	1	Android	1						1	1	1	1	1	1

Tabla 1. Datos de sensores.

Didáctica de la Física Experimental con un Smartphone

ENCUESTA	marca	modelo	año	nº	Sist. Operativo	Sensores													
						Fuerza G	acelerómetro	giroscopio	Barómetro	Higrómetro	termómetro	magnetómetro	sensores de luz	orientación	Micrófono de sonido	GPS			
91	Samsung	S6	2015	1	Android	1	1	1	1						1	1	1	1	1
92	Samsung	S6	2016	1	Android	1	1	1	1						1	1	1	1	1
93	Samsung	S6-edge	2017	1	Android	1	1	1	1						1	1	1	1	1
94	Samsung	J6	2017	1	Android	1												1	1
95	Samsung	J6	2018	2	Android	2												2	2
97	Samsung	S7	2016	1	Android	1	1	1	1						1	1	1	1	1
98	Samsung	S7	2017	1	Android	1	1	1	1						1	1	1	1	1
99	Samsung	J7 2016	2016	1	Android	1												1	1
100	Samsung	J7 2017	2018	2	Android	2	2	2	2						2	2	2	2	2
102	Samsung	S8	2017	1	Android	1	1	1	1						1	1	1	1	1
103	Samsung	S8+	2018	1	Android	1	1	1	1						1	1	1	1	1
104	Samsung	S8	2018	1	Android	1	1	1	1						1	1	1	1	1
105	Samsung	S8	2019	1	Android	1	1	1	1						1	1	1	1	1
106	Samsung	S8+	2017	1	Android	1												1	1
107	Samsung	S9	-	1	Android	1	1	1	1						1	1	1	1	1
108	Samsung	G9	-	1	Android	1	1	1	1						1	1	1	1	1
109	Samsung	Note 9	2018	1	Android	1	1	1	1						1	1	1	1	1
110	Samsung	A5	2015	1	Android	1									1	1	1	1	1
111	Samsung	A5	2016	1	Android	1									1	1	1	1	1
112	Samsung	A5	2017	2	Android	2									2	2	2	2	2
114	Samsung	A5	2016	1	Android	1									1	1	1	1	1
115	Samsung	A6	2018	1	Android	1	1	1							1	1	1	1	1
116	Samsung	A7	2018	1	Android	1	1	1							1	1	1	1	1
117	Samsung	A8	2018	3	Android	3	3	3	3						3	3	3	3	3
120	Samsung	S8	2018	1	Android	1	1	1	1						1	1	1	1	1
121	Huawei	P8 lite	2016	1	Android	1									1	1	1	1	1
122	Apple	Iphone	-	1	IOS	1	1	1	1						1	1	1	1	1
123	Apple	Iphone SE	2017	2	IOS	2	2	2	2						2			2	2
125	Apple	Iphone SE	2018	1	IOS	1	1	1	1						1			1	1
126	Apple	Iphone 5S	2016	1	IOS	1	1	1	1						1	1	1	1	1
127	Apple	Iphone 5S	2018	1	IOS	1	1	1	1						1	1	1	1	1
128	Apple	Iphone 6	-	1	IOS	1	1	1	1						1	1	1	1	1
129	Apple	Iphone 6	2015	1	IOS	1	1	1	1								1	1	1
130	Apple	Iphone 6	2015	2	IOS	2	2	2	2						2	2	2	2	2
132	Apple	Iphone 6	2016	1	IOS														
133	Apple	Iphone 6	2016	5	IOS	5	5	5	5						5			5	5
138	Apple	Iphone 6	2017	6	IOS	6	6	6	6						6			6	6
144	Apple	Iphone 6S	2016	1	IOS														
145	Apple	Iphone 6S	2015	3	IOS	3	3	3	3						3	3	3	3	3
148	Apple	Iphone 6S	2016	4	IOS	4	4	4	4						4	4	4	4	4
152	Apple	Iphone 6S	2017	8	IOS	8	8	8	8						8	8	8	8	8
160	Apple	Iphone 6S	2018	1	IOS	1	1	1	1						1	1	1	1	1
161	Apple	Iphone 6S	2019	1	IOS	1	1	1	1						1	1	1	1	1
162	Apple	Iphone 6S plus	2016	1	IOS														
163	Apple	Iphone 6S plus	2016	1	IOS	1	1	1	1						1	1	1	1	1
164	Apple	Iphone 6S plus	2017	1	IOS	1	1	1	1						1	1	1	1	1
165	Apple	Iphone 6S	2016	1	IOS	1	1	1	1						1	1	1	1	1
166	Apple	Iphone 7	2016	2	IOS	2	2	2	2						2	2	2	2	2
168	Apple	Iphone 7	2017	8	IOS	8	8	8	8						8	8	8	8	8
176	Apple	Iphone 7	2018	6	IOS	6	6	6	6						6	6	6	6	6
182	Apple	Iphone 7 plus	2016	1	IOS	1	1	1	1						1	1	1	1	1
183	Apple	Iphone 7 plus	2017	2	IOS	2	2	2	2						2	2	2	2	2
185	Apple	Iphone 7 plus	2018	1	IOS	1	1	1	1						1	1	1	1	1
186	Apple	Iphone 7 plus	2019	1	IOS	1	1	1	1						1	1	1	1	1
187	Apple	Iphone 8	2016	1	IOS	1	1	1	1						1	1	1	1	1
188	Apple	Iphone 8	2017	1	IOS	1	1	1	1						1	1	1	1	1
189	Apple	Iphone 8	2018	5	IOS	5	5	5	5						5	5	5	5	5
194	Apple	Iphone 8	2018	1	IOS														
195	Apple	Iphone 8	2019	2	IOS	2	2	2	2						2	2	2	2	2
197	Apple	Iphone 8 plus	2016	1	IOS	1	1	1	1						1	1	1	1	1
198	Apple	Iphone 8 plus	2018	2	IOS	2	2	2	2						2	2	2	2	2
200	Apple	Iphone X	2017	1	IOS	1	1	1	1						1	1	1	1	1
201	Apple	Iphone X	2018	5	IOS	5	5	5	5						5	5	5	5	5
206	Apple	Iphone X	2019	3	IOS	3	3	3	3						3	3	3	3	3
209	Apple	Iphone XR	2019	1	IOS	1	1	1	1						1	1	1	1	1
210	Apple	Iphone XS	2018	2	IOS	2	2	2	2						2	2	2	2	2
212	Apple	Iphone X	2018	1	IOS	1	1	1	1						1	1	1	1	1

Tabla 1 (cont). Datos de sensores.

	Fuerza G	Acelerómetro	Giroscopio	Barómetro	Higrómetro	Termómetro	Magnetómetro	Sensor de luz	Orientación	Medidor de sonido	GPS
Android	116	83	82	32	0	3	105	108	106	114	117
	55 %	39 %	39 %	15 %	0%	1%	50 %	51 %	50 %	54 %	55 %
Otros	2	2	1	1	1	0	1	2	1	2	2
	1%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	1%	1%
IOS	87	87	87	85	0	0	86	72	73	85	87
	41 %	41 %	41 %	40 %	0%	0%	41 %	34 %	34 %	40 %	41 %
total	205	172	170	118	1	3	192	182	180	201	206
	97 %	81 %	80 %	56 %	0%	1%	91 %	86 %	85 %	95 %	97 %

Tabla 2. Sensores disponibles.

Android	IOS	Otros	total
119	91	2	212
56,13 %	42,93 %	0,94 %	100 %

Tabla 3. Sistema operativo.

Año	Android	IOS	Otros	nº	%
2014	2			2	1,0%
2015	4	6		10	4,9%
2016	15	20		35	17,0%
2017	35	29		64	31,1%
2018	51	26	1	78	37,9%
2019	8	8	1	17	8,3%
				206	

Tabla 4. Año de compra.

