

Efecto Doppler: ¿Cómo obtenemos evidencia de la existencia de este fenómeno?

Di Laccio^{1,4}, José Luis; Ferrón², Mercedes; Gil³, Salvador; Alonso-Suárez⁴, Rodrigo

- 1.- Departamento de Física, Centro Regional de Profesores del Litoral. 50000, Salto, Uruguay.
- 2.- Liceo Departamental N°1. 50000, Salto, Uruguay.
- 3.- Escuela de Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de San Martín, Campus Miguelete. San Martín, Buenos Aires. Argentina.
- 4.- Departamento de Física, CENUR Litoral Norte, Universidad de la República. 50000, Salto, Uruguay.

jdilaccio@unorte.edu.uy

RESUMEN

En este trabajo presentamos un experimento sobre el efecto Doppler acústico plausible de ser usado en enseñanza media. Los alumnos se dividen en grupos y cada uno mide, con una PC, una señal de audio de frecuencia conocida que es generada con un Smartphone que ellos mismos transportan. A partir de ello se detecta el cambio de frecuencia en la señal recibida debido al movimiento relativo entre el observador y la fuente. Esto se realizó para los casos en donde la fuente y el observador se acercan y se alejan respectivamente. Se determinan las frecuencias medidas por el observador por dos métodos diferentes y se comparan los resultados para ver el grado de aceptación que tiene la ecuación del cambio de frecuencia para este fenómeno. El acento de esta propuesta está puesto en el trabajo en equipo de los alumnos y en los procedimientos que usa la ciencia para validar el conocimiento, más que en la precisión absoluta de los resultados.

Palabras clave: Efecto Doppler, TIC, enseñanza de ciencias básicas.

1. Introducción

En este trabajo se presenta una propuesta de enseñanza del efecto Doppler acústico para el secundario. Se propone como estrategia la realización de un proyecto experimental de bajo costo con la incorporación de TIC [1]. El experimento recrea a escala reducida las facetas de una investigación científica: delimitación del problema de estudio, generación de hipótesis, diseño de experimentos, recolección cuidadosa de datos, análisis de los resultados, elaboración de conclusiones y construcción de informes. Esta propuesta busca principalmente profundizar en los aspectos metodológicos de la ciencia, además de transmitir información sobre la temática específica.

Si escribimos en el buscador de Google: “Efecto Doppler”, rápidamente nos ofrece cerca de 300 mil resultados con una búsqueda de menos de medio segundo. La información es de fácil acceso para nuestros alumnos. Lo anterior no está libre de inconvenientes ya que muchos de nuestros alumnos consideran que con “repetir” la información basta para saber del tema y que el tema se agota con esto. En general no se preguntan: ¿Cómo sabemos esto? ¿Por qué esto es correcto? Es decir, repiten información sin conocer la forma en que validamos el conocimiento. La idea que

tienen muchos de nuestros alumnos al culminar el secundario es que la física está asociada a la resolución de ejercicios y que éstos poco tienen que ver con su vida cotidiana. La forma en la que se presenta en los cursos de secundaria no permite que aprecien lo desafiante, divertida y motivante que es aprenderla. En general, la atención está puesta en la transmisión de información en un clima de seriedad y los alumnos poco podrán hacer con información en su trabajo o posteriores estudios, y posiblemente la olviden velozmente. Lo que entendemos es útil para su vida laboral y/o la continuación de sus estudios es aprender física “haciendo física”, vivenciando los procedimientos de la misma. Esto contribuye a consolidar su alfabetización científica y a que nuestros alumnos puedan participar en debates científicos de coyuntura, con herramientas de decisión fundadas y fomentar en ellos a su vez un espíritu crítico y reflexivo acerca de la información que se les presente.

2. Marco Teórico

2.1.El efecto Doppler acústico

Alguna vez esperando cruzar una calle hemos escuchado el sonido de una sirena de un vehículo. Recordaremos como va cambiando el sonido a

medida que el móvil se nos acerca y, especialmente, el cambio del tono justamente al momento de pasarnos. Si hubiésemos viajado en el coche no habríamos observado este cambio.

Cuando una fuente de sonido en movimiento se nos acerca, y nos encontramos en reposo, detectamos un aumento en la frecuencia y entonces el tono lo escuchamos más agudo que el emitido. En cambio, al alejarse el tono es más grave. En la Figura 1 se muestran los diferentes frentes de onda de la sirena vistas por un observador parado en la calle. La frecuencia medida por el observador es, en cada caso:

$$f_{Obs} = f_{fuente} \frac{c \pm v_{Obs}}{c \mp v_{fuente}} \quad (1)$$

En esta ecuación, f_{fuente} es la frecuencia emitida por la fuente, c es el módulo de la velocidad del sonido respecto del aire, v_{Obs} es el módulo de la velocidad del receptor y v_{fuente} es el módulo de la velocidad de la fuente. En cada caso, los signos superiores se toman en el caso en que “se acercan” y los inferiores cuando “se alejan” [2] [3].

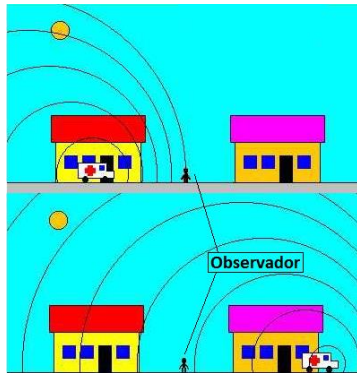


Figura 1. Frentes de onda vistos por el observador estacionario en la calle.

La velocidad del sonido en un gas no es constante, sino que depende de la temperatura. Tomando el modelo de gas ideal para el aire, la ecuación de la velocidad del sonido se expresa de la siguiente manera,

$$c = v_s = \sqrt{\frac{\gamma R}{M} (T_0 + t_{eC})} \approx \sqrt{\frac{\gamma R T_0}{M}} + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\gamma R t_{eC}}{M T_0}}$$

donde $R=8.315 \text{ J/(K.mol)}$ es la constante universal de los gases, $M=28.95 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}$ es la masa molar del aire, $T_0=273.15 \text{ K}$ y $\gamma=1.4$. Esta última

expresión es aproximada y se obtiene al desarrollar

$$\left(1 + \frac{t_{eC}}{T_0}\right)^{\frac{1}{2}}$$

por el binomio de Newton [4].

Luego, la velocidad del sonido puede ser determinada a través de:

$$c = v_{(T=f(C))} = 331.4 + 0.61 \times t_{eC} \quad (2)$$

El valor de 331.4 m/s es la velocidad del sonido en el aire a 0°C.

Si el observador se encuentra en reposo ($v_{Obs} = 0$), digamos, una persona que escucha en la calle la sirena, la Ec. (1) se simplifica a:

$$f_{Obs} = f_{fuente} \frac{c}{c \mp v_{fuente}} \quad (3)$$

Si el observador mide el período en vez de la frecuencia, la frecuencia del observador se obtiene por:

$$f_{Obs} = \frac{1}{T_{Obs}} \quad (4)$$

3. Desarrollo del trabajo

3.1. Equipos necesarios y método

El objetivo central es que varios grupos de alumnos entiendan los mecanismos por los cuáles la ciencia evidencia determinados fenómenos. Aquí se utiliza el Efecto Doppler como medio para entender esos métodos.

Para el experimento en concreto se debe realizar la medición y grabación de señales de audio utilizando la tarjeta de sonido de la PC [5] [6]. Los equipos para realizar este experimento son de fácil acceso. Se necesitan por cada grupo de estudiantes cuatro Smartphones, una PC, un micrófono, una cinta métrica y un termómetro. En nuestra experiencia los Smartphones los aportan los alumnos al igual que la PC. Las aplicaciones (apps.) necesarias para la experiencia son sugeridas por los docentes y se obtienen gratuitamente desde internet. Estas permiten generar las frecuencias, medir aceleración, distancia y tiempo. Existen varias aplicaciones que cumplen con estos cometidos. Nosotros hemos seleccionado las siguientes: FrequencyGenerator para generar el tono emitido, AndroSensor para las mediciones de aceleración, Smart Measure para emular la cinta métrica y un temporizador digital o cronómetro para medir tiempo. La PC debe contar con un programa sencillo para grabar sonido. Las PC

Magallanes (distribuidas en el secundario por el Plan Ceibal en Uruguay) ya traen instalado el programa Audacity. No obstante, este programa se puede instalar en cualquier PC, bajando este software que es de distribución libre.

El análisis de la señal de audio permite determinar el cambio aparente de período debido al movimiento relativo entre el observador y la fuente y con ello podemos calcular la frecuencia a través de la Ec. (4). Cuando la fuente se acerca al observador el período “disminuye” respecto al emitido y cuando se aleja “crece”, y la frecuencia escuchada aumenta y disminuye respectivamente.

Otra forma de determinar la frecuencia recibida por el observador es utilizando la Ec. (3), a partir de la frecuencia conocida de la fuente, su velocidad y la rapidez del sonido respecto del aire. La velocidad del sonido respecto del aire se determina con la Ec. (2) usando la temperatura del aire ambiente durante el experimento, que es medida con un termómetro. Para determinar el módulo de la velocidad de la fuente se utiliza la Ec. (5). Se debe realizar el cociente entre la distancia recorrida por la fuente entre dos marcas de longitud conocida y el intervalo de tiempo necesario para recorrerlas, bajo la hipótesis de que la rapidez es constante. Para asegurarnos que la velocidad puede considerarse como constante usamos el acelerómetro del celular.

$$v_{fuente} = \frac{x_f - x_i}{\Delta t} \quad (5)$$

Determinadas las frecuencias por ambos métodos podemos comparar los resultados que se obtienen. Además, se pueden comparar los resultados de cada uno de los grupos.

3.2.El trabajo de los grupos de alumnos

Se conforman diferentes grupos y en cada uno de ellos la PC actúa como observador. Un alumno de cada grupo transporta el Smartphone como fuente emisora de sonido y medidor de aceleración. Inicialmente se realizan marcas en el piso, espaciadas un metro, como indica la Figura 2. Estas, conjuntamente con el tiempo entre marcas, se usarán para determinar la velocidad de la fuente al acercarse y alejarse de la PC receptora mediante la Ec. (5). Colocamos la computadora en el centro ($x=0m$) y abrimos el programa Audacity, seleccionando la mayor frecuencia del proyecto permitida por este [6]. La frecuencia de la fuente es un tono de 5 kHz emitido por el Smartphone.



Figura 2. Marcas y PC (Observador) colocada al centro.

Luego, tres estudiantes sincronizan sus cronómetros y se ubican en las marcas $x=-2m$, $x=0m$ y $x=2m$, respectivamente. El cuarto estudiante se coloca en la marca $x=-3m$, activa la aplicación AndroSensor iniciando el registro de las componentes de la aceleración. Esto se hace con el fin de comprobar que la velocidad del alumno con Smartphone (AS), a medida que pasa por las diferentes marcas, es aproximadamente constante. Dicho de otra manera, que la aceleración de AS sea prácticamente cero. Esto se realiza observando la pantalla del celular directamente o exportando los datos registrados a una hoja de cálculo. Luego, AS abre la aplicación Frequency Generator y activa la emisión de un tono a la frecuencia de 5 kHz. Comienza a caminar en línea recta con pasos regulares, pasando por cada punto hasta llegar a la marca $x=3m$. Las medidas se hacen entre las marcas $-2m$ y $2m$ pero tomamos un metro más a cada lado para tener un movimiento regular en el tramo de interés. En la Figura 3 se presentan los diferentes momentos descriptos: (a) sincronización de relojes, (b) los alumnos se ubican en sus lugares y (c) luego de configurar el Smartphone comienza el recorrido.

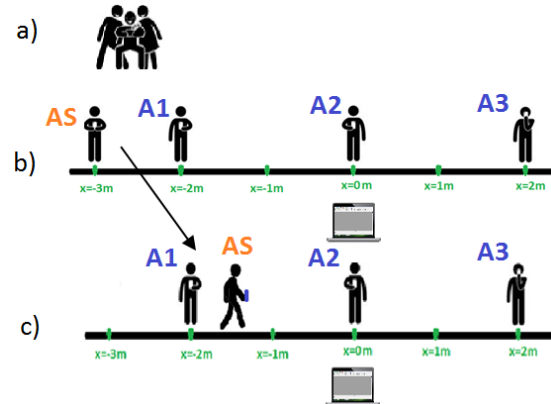


Figura 3. a) Los alumnos sincronizan los relojes. b) Cada uno toma su lugar. c) La fuente emisora inicia su recorrido.

El alumno 1 (A1) registra el momento en que se inicia la grabación de audio, el momento en que el AS empieza su recorrido y el momento en que éste pasa frente a él. El alumno 2 (A2) registra el tiempo en que el AS pasa justo frente a él. El alumno 3 (A3) registra el tiempo en que el AS pasa frente a él. Luego del recorrido el AS apaga el

generador de frecuencia. La grabación de sonido finaliza cuando el estudiante AS pasa por la marca $x=3m$.

El alumno 2 (A2), que se encuentra frente a la PC, debe iniciar la grabación en la PC antes de que el alumno AS comience a caminar. El micrófono debe estar conectado a la PC y debe estar colocado en la misma línea en la que camina el estudiante AS, además de estar aproximadamente a la misma altura que el celular.

3.3.Resultados

Se presentan los resultados obtenidos por uno de los grupos. En la Tabla 1 se presentan los registros realizados.

Tabla 1. Datos de tiempo necesarios para analizar la señal y calcular la velocidad media de la fuente.

| Acción | Tiempo(s) |
|---------------------------------|-----------|
| Sincronización | 00.00 |
| Inicia grabación de señal | 21.27 |
| Inicia generador de frecuencias | 27.11 |
| AS camina | 28.95 |
| AS en lugar 1 | 30.91 |
| AS en lugar 2 | 33.88 |
| AS en lugar 3 | 36.52 |
| AS se detiene | 39.20 |

De acuerdo con los tiempos anteriores la señal de audio se estudia en las cercanías de 10s y 12s. Se toman al menos 30 períodos para luego determinar uno de ellos.

En la Tabla 2 se resume la información y los valores de frecuencias obtenidos con la Ec. (4).

Tabla 2. Determinación de la frecuencia al acercarse y luego alejarse del observador.

| | |
|-------------------------------------|-------------------------|
| frecuencia de muestreo Audacity(Hz) | 384000 |
| Δt (s) Paso de medición | 2.60×10^{-6} |
| t (s)_período acerca | 10.00 |
| t (s)_período aleja | 12.00 |
| $30T$ (s)_acerca | 1.9913×10^{-4} |
| $30T$ (s)_alejaja | 2.0069×10^{-4} |
| f (Hz)_acerca | 5022 |
| f (Hz)_alejaja | 4983 |

Las Figuras 4 y 5 muestran la señal ampliada en los tiempos correspondientes a cuando la fuente se acerca y cuando se aleja.

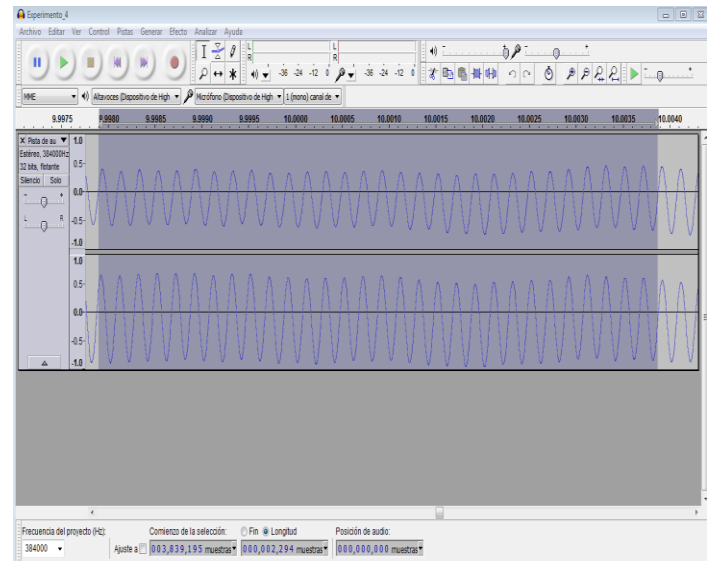


Figura 4. Se amplía la señal para determinar la cantidad de muestras correspondientes a 30 períodos próximos a 10s. Se obtienen 2294 muestras.

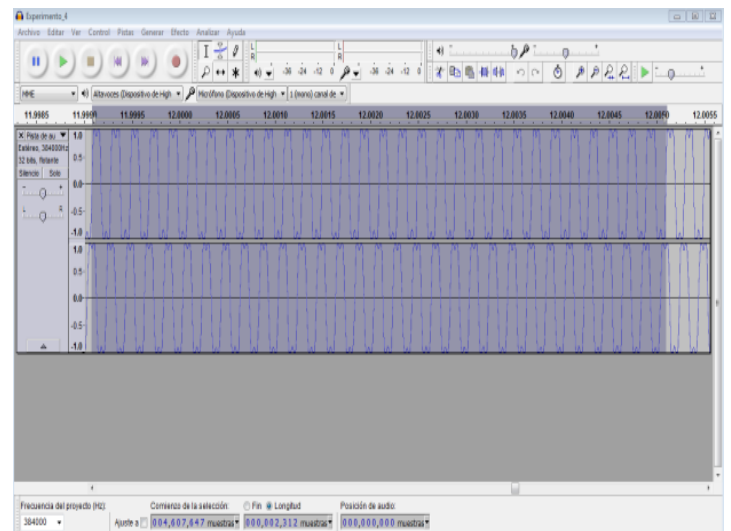


Figura 5. Se aumenta la señal en $t=12$ s para determinar la cantidad de muestras correspondientes a 30 períodos de la señal. Se obtienen 2312 muestras.

Para determinar la frecuencia de forma independiente, usando la Ec. (3), primero determinamos la velocidad del sonido a la temperatura de $15.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ que nos encontrábamos al realizar el experimento. Los datos relevantes para

la determinación de la frecuencia se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Informaciones necesarias para calcular las frecuencias.

| | |
|----------------------|--------|
| f_{fuente} (kHz) | 5000 |
| Temperatura (°C) | 15.5 |
| Δx (m) | 2.0 |
| Δt acerca(s) | 2.97 |
| v_{acerca} (m/s) | 0.673 |
| Δt aleja(s) | 2.64 |
| v_{aleja} (m/s) | 0.757 |
| v_{sonido} (m/s) | 340.85 |

La velocidad del sonido es:

$$v_{(15.5^\circ\text{C})} = 331.4 + 0.61 \times 15.5$$

$$v_{(15.5^\circ\text{C})} = 340.85 \text{ m/s.}$$

Y las frecuencias obtenidas son:

$$f_{Obs-acerca} = 5000 \frac{340.85}{340.85 - 0.673}$$

$$f_{Obs-acerca} \approx 5010 \text{ Hz}$$

$$f_{Obs-acerca} = 5000 \frac{340.85}{340.85 + 0.757}$$

$$f_{Obs-acerca} \approx 4989 \text{ Hz}$$

El grupo obtiene valores de frecuencias mayores cuando se acercan y menores cuando se alejan.

Dado que el experimento se realiza en secundario no se desarrollan en profundidad los cálculos de incertidumbres. Se opta por la comparación entre los resultados obtenidos con la señal y la ecuación (3). Para compararlas y ver el porcentaje de diferencia se realiza el cociente entre el valor absoluto de la diferencia de las frecuencias divida la frecuencia obtenida con la ecuación Doppler multiplicada por cien:

$$e_{(\%)} = 100 \times \frac{|f_{señal} - f_{ecuación}|}{f_{ecuación}}$$

Cuando se acercan se obtiene:

$$100 \times \frac{|5022 - 5010|}{5010} \approx 0.24\%$$

Cuando se alejan se obtiene:

$$100 \times \frac{|4983 - 4989|}{4989} \approx 0.12\%$$

Otra opción para determinar las frecuencias con la señal obtenida es usar las herramientas de Audacity y realizar una transformada discreta de Fourier (FFT) para obtener las frecuencias. Para esto basta con seleccionar la región de la señal que nos interesa y utilizar la opción de análisis de espectro del menú “analizar” del Audacity.

Para reflexionar sobre los resultados se analizan fortalezas y debilidades que tiene el experimento realizado, buscando acciones para mejorar nuestro experimento.

4. Discusión

Las frecuencias aparentes obtenidas están de acuerdo con el Efecto Doppler, en el sentido de que aumenta al acercarse a la fuente y disminuye al alejarse. Los valores obtenidos por ambos métodos presentan pequeñas diferencias que son esperables, dado que el diseño del experimento no cumple con todas las hipótesis necesarias para obtener la Ec. (3). Si una persona camina a una velocidad de 1 m/s, a temperatura de unos 20°C y la frecuencia de la fuente es de 5 kHz, deberíamos esperar variaciones de frecuencias de unos 15Hz. En la caminata del alumno estamos dentro de éstos márgenes.

Cuanto mayor sea la velocidad que logremos del alumno al acercarse o alejarse del observador, podremos mejorar la visualización del cambio de frecuencia. También podemos recurrir a las herramientas del Audacity para obtener mayor precisión en el experimento.

El diseño de este experimento apunta a que los alumnos sean parte del experimento, caminando, usando los cronómetros, midiendo y luego procesando los datos.

Las acciones tendientes a buscar mejoras para el experimento llevaron a buscar otras alternativas, todas ellas vinculadas con el aumento de la velocidad de la fuente:

- 1) Realizar el recorrido idéntico al de nuestro diseño inicial en bicicleta o patineta.
- 2) Modelizar la caminata a sistema de riel metálico y carrito de laboratorio, ver Figura 6.



Figura 6. Modificación posible del sistema inicial, usar riel metálico, celular, PC y celular.

- 3) Construir un péndulo siendo el smartphone la masa pendulante, emitiendo el tono y grabando las componentes de la velocidad angular, ver figura 7.

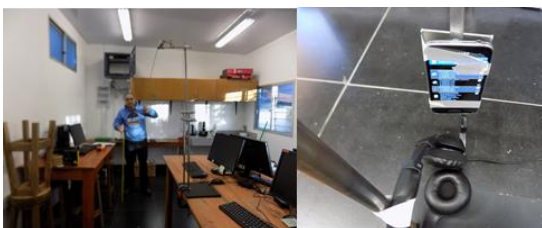


Figura 7. Péndulo físico con celular emitiendo en el extremo.

Las acciones anteriores son todas válidas pero la construcción del péndulo de unos 2.0 m de longitud aproximadamente nos da la posibilidad de tener velocidades de unos 5.0 m/s que son muy adecuadas para evidenciar cambios de frecuencias de unos 70Hz.

Es de destacar como a partir de un diseño elemental, el caminar con la fuente, vamos luego enriqueciendo los conocimientos de los alumnos y generando nuevos desafíos.

5. Conclusión

Las frecuencias obtenidas por ambos métodos desarrollados están de acuerdo con el fenómeno conocido como Efecto Doppler. El experimento es simple y ayuda a que los alumnos aprendan el concepto de frecuencia a partir de sus experiencias personales y compartiendo con sus compañeros los resultados. Se cumple nuestro propósito de centrarnos en los procedimientos de la ciencia ya que este experimento permite desarrollarlos.

Entendemos que estas actividades de aula movilizadoras del pensamiento llevan a que el alumno reflexione sobre su experimento y tome decisiones basadas en su experiencia. Lo coloca en un lugar de protagonista y aprende a trabajar con relativa independencia y bajo una metodología científica. Esta forma de trabajo lo

ayudará a adaptarse a los constantes cambios y progresos característicos de nuestro tiempo y le brinda una ventaja comparativa frente a otros alumnos que sólo tienen informaciones concretas acumuladas.

En el contexto de un país en desarrollo como Uruguay donde hay una gran demanda de técnicos o profesionales con perfil tecnológico, estas experiencias colaboran en pos de lograr que más personas, en particular las más jóvenes, pierdan el miedo a la formación científico-tecnológica a través de la experimentación.

6. Referencias

- [1] Calderón, S. E., Núñez, P., Di Laccio, J. L., & Iannelli, L. M. (2015). Low cost laboratories using ICT. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 212-226.
- [2] García, F. (s.f.). *Física on ordenador: Efecto Doppler*. Recuperado el 25 de junio de 2016, <http://www.sc.edu.es/sbweb/fisica/ondas/acustica/doppler2/doppler2.htm>
- [3] Gil, S. (2014). *Experimentos de Física usando TIC y elementos de bajo costo*. Buenos aires: Alfaomega .
- [4] García, F. (s.f.). *Física con ordenador: Variación de la velocidad del sonido con la temperatura*. Recuperado el 25 de junio de 2016, de http://www.sc.edu.es/sbweb/fisica_/ondas/acustica/sonido/sonido1.html
- [5] Patrik Vogt, Jochen Kuhn and Sebastian Müller. (2011). Experiments Using Cell Phones in Physics Classroom Education: The Computer-Aided g Determination. *The Physics Teacher*, 383.
- [6] Nicolás Pérez, Cecilia Pérez, Marco Aurelio Brizzotti, José Di Laccio. (2015). Determinación de la frecuencia natural de vibración de una barra. Parte 1, estudio experimental utilizando tarjeta de sonido. *Revista de la Enseñanza de la Física*.
- [7] *Wikipedia: Audacity*. (s.f.). Recuperado el 25 de Junio de 2016, de <https://es.wikipedia.org/wiki/Audacity>