

Actividades experimentales para la enseñanza de ondas estacionarias a través de dispositivos contruidos con materiales de fácil acceso

Experimental activities for the teaching of standing waves by means of devices built with accessible materials

Ernesto Cyrulie^{1*}, Horacio Salomone² y Néstor Olivieri²

¹Instituto de Desarrollo Humano, Universidad Nacional de General Sarmiento, Buenos Aires, Argentina.

²Instituto de Industria, Universidad Nacional de General Sarmiento, Buenos Aires, Argentina.

*E-mail: ecyrulie@campus.ungs.edu.ar

Recibido el 15 de junio de 2021 | Aceptado el 1 de septiembre de 2021

Resumen

Se presenta una serie de actividades experimentales sobre fenómenos ondulatorios, trabajadas en un curso de formación continua para docentes de física de nivel medio de la provincia de Buenos Aires. Las actividades experimentales que se describen fueron desarrolladas durante dos encuentros en los laboratorios de la Universidad Nacional de General Sarmiento (UNGS). En este trabajo nos centramos en la descripción de la secuencia que se conformó con aquellas actividades experimentales, las que estuvieron específicamente dirigidas al estudio de las ondas estacionarias y su enseñanza utilizando dispositivos sencillos. Se muestran algunos resultados de la implementación de las actividades particularmente en términos de las discusiones didácticas que se generaron con el grupo de docentes.

Palabras clave: Fenómenos ondulatorios; Actividades experimentales; Construcción de material didáctico.

Abstract

This work presents a series of experimental activities on wave phenomena, worked on in a continuous training course for physics teachers in secondary schools in the province of Buenos Aires. The experimental activities described were developed during two classes in the laboratories of the National University of General Sarmiento (UNGS). In this work, we focus on the description of the sequence that was built with these experimental activities, which were specifically directed to the study of standing waves and their teaching using simple devices. Some results of the implementation of the activities are shown, particularly about the didactic discussions that were generated with the group of teachers.

Keywords: Wave phenomena; Experimental activities; Construction of teaching materials

I. INTRODUCCIÓN

En la provincia de Buenos Aires (Argentina), el Diseño Curricular para la Orientación Ciencias Naturales, en el Ciclo Superior en la Educación Secundaria, prescribe la enseñanza de fenómenos ondulatorios, desde el estudio de las leyes de Newton -al referirse a fuerzas elásticas, deformaciones y movimiento oscilatorio-, de la luz y de algunos fenómenos

www.revistas.unc.edu.ar/index.php/revistaEF

REVISTA DE ENSEÑANZA DE LA FÍSICA, Vol. 33, no. 2 (2021)

179

La evaluación del presente artículo estuvo a cargo de la organización de la XIV Conferencia Interamericana de Educación en Física

electromagnéticos con un enfoque fenomenológico. En líneas generales, se busca un carácter más cualitativo que cuantitativo, ya que los fenómenos ondulatorios incluyen conceptos que revisten dificultad para los estudiantes. Resulta apropiado, entonces, poner el foco en los conceptos físicos fundamentales y limitar los cálculos matemáticos a los necesarios para poner de manifiesto las relaciones entre las magnitudes físicas involucradas.

Tomamos de Martín Díaz, Gómez Crespo y Sagrario Gutiérrez (2000) algunas de las dificultades que enfrentan los estudiantes a la hora de trabajar estos contenidos. El hecho de que, en los fenómenos ondulatorios, exista transferencia de energía sin transporte de materia se presenta como abstracto y difícil de entender. La concepción habitual de los estudiantes es que la materia se desplaza junto con la onda. Los alumnos presentan dificultades para comprender que se producen simultáneamente dos movimientos, el armónico simple de cada punto de la onda y el movimiento ondulatorio del conjunto de todos los puntos que conforman el sistema. Y, desde el punto de vista del modelo matemático utilizado para describir el sistema físico de la onda, los alumnos deben enfrentarse con funciones que dependen simultáneamente de dos variables, la espacial y la temporal.

Walti (2002) analiza el caso particular de las ondas estacionarias en una cuerda y advierte que los estudiantes, pero también docentes, tienen dificultades para interpretar y describir los mecanismos físicos asociados con la generación y propagación de una onda y la energía involucrada en estos procesos. Según su trabajo, los estudiantes advierten que lo que ocurre en un punto puede ocurrir después en otro punto, pero no reconocen el vínculo que explica la transferencia de la energía. Se desprende también que, en muchos casos, se tiene una correspondencia errónea de la energía potencial involucrada.

Por otro lado, Wurm, Marinelli, Fontana, Salomón y Ríos (2019) discuten el impacto de la incorporación de distintas tecnologías en la enseñanza de la física, en particular para el caso de las ondas mecánicas y las electromagnéticas. En relación con esto, Wurm *et al.* (2019) destacan la importancia de que los docentes participen en el diseño de los dispositivos, de manera que no deban adaptar sus clases a equipos de laboratorios estándares. Es decir, que sea el propio docente quien genere sus dispositivos a la medida de sus clases. Afirman que es necesario indagar las necesidades, propuestas y requerimientos de docentes y egresados del profesorado, para plantear alternativas a las prácticas experimentales actuales, en las que predomina una reproducción acrítica de experiencias tipo “recetas”. Según Marino, Giorgi, Cámara y Carreri (2017) es preciso diseñar alternativas didácticas que ayuden a superar los obstáculos detectados y permitan a los docentes generar sus propios diseños para una presentación del fenómeno ondulatorio. Esta mirada se ajusta a nuestra propuesta, que fue incluida en un curso de formación continua. Consideramos que el enfoque práctico puede brindar elementos conceptuales que contribuyan a superar algunos de los obstáculos mencionados.

El trabajo describe una secuencia de actividades llevadas a cabo en el laboratorio de física de la UNGS, en dos encuentros del curso de capacitación docente *La enseñanza de los fenómenos ondulatorios en la escuela secundaria*, brindado por la Dirección de Formación Continua de la provincia de Buenos Aires. El trabajo promovió la transferencia al ámbito escolar de diversos detalles constructivos. Los encuentros se desarrollaron con la colaboración de investigadores del área de Física pertenecientes a la universidad, en una dinámica colaborativa.

II. DESCRIPCIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN

En la propuesta se utilizaron algunos equipos profesionales, con la intención de que los docentes pudieran conocerlos, pero la propuesta no se centró en su uso. En cambio, se tuvo en cuenta que las instituciones escolares suelen tener escaso o nulo equipamiento para prácticas de laboratorio dirigidas a la enseñanza de estos contenidos. En consecuencia, las actividades fueron realizadas con elementos de fácil acceso y componentes tecnológicos en desuso, promoviendo el diseño y armado de dispositivos por parte de los docentes. En la universidad se cuenta con un depósito con variedad de materiales (de consumo y elementos para reutilizar) para que los estudiantes del profesorado dentro de una materia específica diseñen y construyan dispositivos para la enseñanza de la física.

Se realizaron algunos experimentos en el laboratorio, de los cuales mostramos aquí los que permiten visualizar el fenómeno ondulatorio que no resulta evidente, por las elevadas frecuencias de la oscilación o por lo pequeñas que resultan sus amplitudes. Esto se delineó discutiendo sobre posibles formas de enseñanza de los fenómenos ondulatorios en la escuela, que contemplase actividades experimentales. El armado y la puesta en funcionamiento de los dispositivos estuvieron principalmente a cargo del capacitador, aunque invitando a los asistentes a participar y a discutir distintos aspectos técnicos y relacionados a la didáctica específica.

Se decidió implementar una consigna general que atravesara todas las actividades; el debate que produjo cada una construyó sentido pedagógico en las mismas, al proponerse la discusión en grupos con la siguiente consigna.

- Hagan un análisis cualitativo de la potencialidad didáctica del montaje presentado y de su viabilidad de construcción o armado por parte de ustedes.
- Evalúen variantes sobre el montaje que nos permita abrir posibilidades de construcción para/en la escuela.
- Debatan y busquen acuerdos sobre el mejor momento de su uso dentro de una secuencia didáctica.

III. ONDAS EN SUPERFICIES PLANAS

Para esta etapa se secuenciaron tres actividades en una progresión modélica de una posible secuencia de enseñanza. Se inicia con elementos relativamente sencillos y culmina con la generación de ondas estacionarias en una placa, formando lo que se conoce como figuras de Chladni.

A. Actividad 1

La primera actividad consistió en sobreponer un bastidor de bordado a unos 2 cm de un parlante con su cono hacia arriba. El bastidor se sumergió previamente en una solución de agua y detergente para formar dentro del mismo una película. Al parlante se le suministró una señal de audio de frecuencia regulable generada por una aplicación para *Android* en un dispositivo portátil y amplificada. Al modificar la frecuencia se pudieron obtener diferentes modos de oscilación (ver figura 1). La amplitud de la oscilación es claramente visible y eso colabora para conceptualizar el fenómeno presente en la última actividad de este apartado.

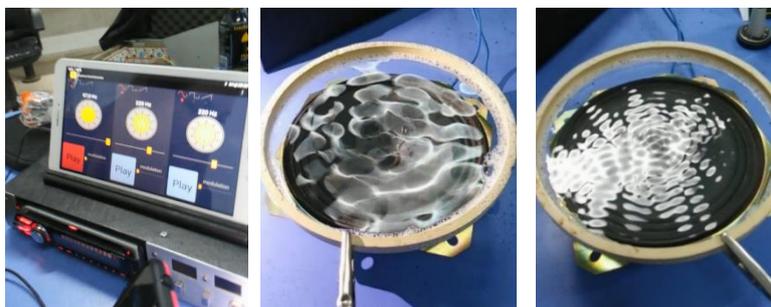


FIGURA 1. Actividad 1. Izq.: tableta con la aplicación *Frequency Sound Generator*; centro: ondas en lámina de jabón con 67 Hz; der.: ídem, 260 Hz. En la fotografía de la izquierda, bajo la tableta se aprecia un autoestéreo que es utilizado, con su función “auxiliar”, como amplificador para potenciar la señal.

B. Actividad 2

Una variante, en la que ocurre el mismo fenómeno ondulatorio anterior, fue utilizar una fina membrana de látex (recortada de un guante) estirada sobre el bastidor. Se conectó el parlante a la salida de audio de un pequeño órgano electrónico. Se esparció té sobre la superficie (lo escogimos por ser liviano y bien visible por su color) para obtener diferentes patrones (indicativos de las oscilaciones que en este caso resultan muy pequeñas). Esta experiencia dio cuenta de forma análoga a la anterior de los modos propios de vibración de la membrana según la tecla pulsada (figura 2, izq.).

Asimismo, se propuso a los participantes que emitieran, a través de un tubo de cartón apuntando a la membrana, a corta distancia, una nota a viva voz. Un patrón obtenido se ve en la figura 2, derecha. Cabe aclarar que esta última acción no genera un patrón muy estable pero aun así se identifican líneas nodales. Como cabe esperar, se ve diferente según el timbre de voz de cada persona.



FIGURA 2. Actividad 2. Izq.: Figuras sobre membrana de látex (guante) sobre el parlante que reproduce las frecuencias de las notas del órgano; der.: figuras obtenidas con la voz (ver texto). La poca simetría se debe al tensionado desigual de la goma.

C. Actividad 3

La actividad final de la primera secuencia, que anticipamos como figuras de Chladni, se logró con una hoja metálica que se fuerza a diferentes modos de resonancia, donde no resulta evidente su movimiento por la escasa amplitud del mismo. Pero se interpreta a partir de los diferentes patrones, bastante espectaculares, que se generan en su superficie con algún material granular. Un montaje que permita esta situación requiere un elemento forzador que imprima una perturbación periódica. Para ciertas frecuencias se obtendrán modos particulares de resonancia. Suele utilizarse para manifestar los nodos y antinodos (vientres) pequeños granos que sean libres de moverse sobre la superficie (té, en nuestro caso). De esta forma, las zonas de mayor amplitud de movimiento (vientres) se despejarán de los granos que se estacionarán en las zonas más o menos inmóviles (nodos o líneas nodales) formando un patrón característico para esa frecuencia. Nosotros utilizamos una chapa metálica cuadrada de 23 cm de lado y 0,6 mm de espesor (recortada del gabinete de un electrodoméstico en desuso), la misma se fijó al cono de un parlante de 6 pulgadas que sirvió como oscilador. A diferencia de los montajes anteriores, ambos elementos deben estar rígidamente vinculados (se muestra el detalle en la figura 3). Resulta necesario debido a la mayor demanda de energía que requiere la lámina para oscilar. Por esta misma razón, fue necesario amplificar la señal emitida por la tableta (usando el mismo generador). Se utilizó para este propósito un "autoestéreo" (también utilizado en la actividad 1). Como dato, para conseguir una configuración estable de una figura, con 220 Hz se determinó la potencia media arrojando 1100 mW midiendo corriente y voltaje en el parlante. Con un puntero láser se logró mostrar las zonas de movimiento adhiriendo un pequeño espejo en diferentes lugares de la placa, abriendo más o menos al haz reflejado (figura 3, der.). Para una buena observación resultó necesario elevar la potencia del amplificador explorando en varias frecuencias.



FIGURA 3. Actividad 3. Izq.: patrones obtenidos a 645 y a 2242 Hz; der.: soporte atornillado al centro geométrico de la placa y luego montado sobre el cono del parlante. Imagen obtenida en una pared por un haz láser abierto al apuntar un puntero sobre una zona nodal de la chapa donde se fijó con adhesivo un espejo de muy pequeño tamaño (el laboratorio fue oscurecido).

Junto a la práctica se abordó con los docentes participantes un modelo matemático del fenómeno observado y que se reproduce a continuación.

Se conoce que la frecuencia de una lámina circular puede relacionarse con la cantidad de líneas nodales radiales (n) y diamétricas (m) por la siguiente expresión:

$$f = c(m + 2n)^p \quad (1)$$

Aquí c y p dependen de las características de la lámina.

Por otro lado, la frecuencia de resonancia para el caso de una placa cuadrada, como fue nuestro caso, vale:

$$f = V\pi/a(m^2 + n^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Donde a es la dimensión de los lados de la placa y V es la velocidad del sonido en el material de la placa. En este caso m y n representan la cantidad de líneas nodales en una dirección y en la perpendicular a esta sobre la placa. Este modelo, sin embargo, comprobamos que no resulta sencillo verlo reproducido en la chapa. Ciertas características como bordes imperfectos, falta de planitud, tensiones del material, etc., serán los factores que lo dificultan.

IV. DETERMINACIÓN DE LAS FRECUENCIAS DE OSCILACIÓN DE UN OBJETO (COPA)

A. Actividad 4

Para esta actividad se dispusieron diferentes copas de vidrio y se provocó su resonancia en el laboratorio. Resulta bastante conocido que los sonidos que emiten son diferentes según el modelo; y también varían si se les introduce agua. Una práctica simple consistió en hacerlas sonar con los dedos humedecidos frotando el borde de la copa en sentido circular con una suave presión (deben lavarse copa y dedos con detergente previamente). Se utilizó el programa *Audacity* que permite grabar el sonido y genera un registro gráfico que tiene correspondencia con las ondas sonoras. El gráfico de amplitud en función del tiempo permite determinar la frecuencia predominante en el sonido de la copa (y que podría aplicarse a otro objeto). La reproducción gráfica deja ver además que la onda sonora tiene cierta modulación en amplitud, luego, al observar la representación de breves intervalos temporales se aprecia un modelo ajustable a una onda sinusoidal. Tomando el valor en Hertz de la frecuencia principal de algunas copas, se reprodujo un sonido con la tableta en coincidencia con dicha frecuencia, con lo que se consigue una similitud de sonido (al acercar progresivamente las frecuencias se aprecia fácilmente un batido al momento de resultar cercanas). Reproduciendo el sonido con *Audacity* con parlantes a pequeña distancia de la copa se logra que acople y suene por sí misma unos segundos (se percibe interrumpiendo repentinamente el sonido con el programa). Los resultados fueron más o menos notables cambiando la disposición de dos parlantes en torno a la copa (figura 4, abajo a la derecha), probablemente debido a la disposición de zonas nodales estimuladas.

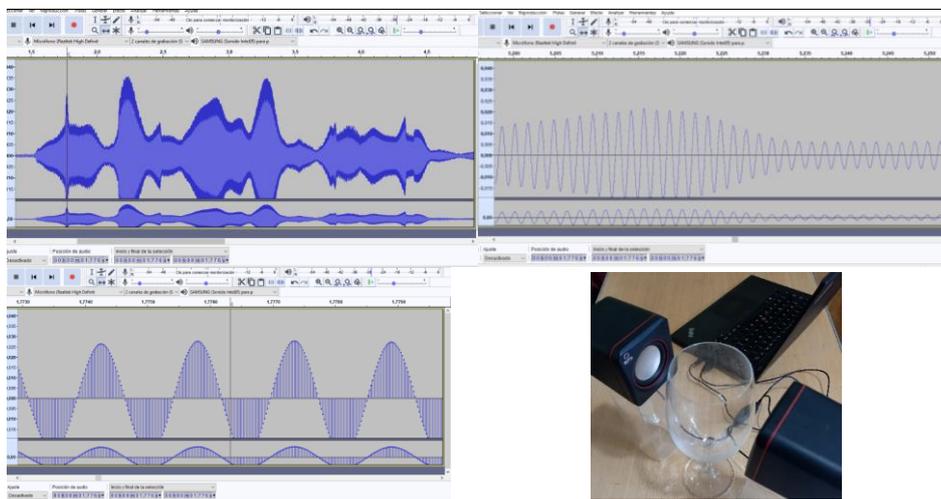


FIGURA 4. Actividad 4. Registros en pantalla de Audacity de vibración de una copa a 666 Hz acotados a diferentes intervalos temporales (3300, 54 y 6,6 ms.). Parlantes frente a la copa expuesta a su propio sonido grabado (ver texto).

B. Actividad 5

Finalmente, poniendo de manifiesto que el sonido generado es producido por un movimiento de oscilación real – que no resulta visible- en otra actividad se hizo incidir un rayo láser (puntero) al cuerpo de la copa durante su resonancia; la luz refractada por el vidrio genera una figura luminosa sobre una superficie. Pueden apreciarse así interesantes movimientos complejos en la figura que dan cuenta de las ondulaciones. Naturalmente, no llega a apreciarse la oscilación que corresponde a la frecuencia base por ser demasiado alta para que aquella sea observada (figura 5).



FIGURA 5. Actividad 5. Izq.: Láser apuntando a la copa; der.: Imagen obtenida con la luz láser refractada al atravesar la pared de la copa. Se visualiza un movimiento ondulatorio llamativo que reproduce las variaciones en amplitud que se tienen en la copa.

V. ONDAS ESTACIONARIAS EN UNA CUERDA

Este fenómeno es un clásico en la enseñanza de los movimientos ondulatorios. Existen sistemas comerciales apropiados para lograrlo. Sin embargo, pueden generarse con elementos de fácil acceso y construcciones sencillas.

A. Actividad 6

Con un sentido didáctico y considerando que no resulta visible que en una onda estacionaria en una cuerda se tiene la superposición de ondas que se propagan, se consideró en su etapa inicial un recurso simple para representar el fenómeno. Se trata de dos espirales de alambre superpuestas, arrollados en sentido contrario y centrados en un mismo eje (figura 5). Al girarlos manualmente frente a una fuente de luz puntual se observa un llamativo efecto en la sombra proyectada sobre alguna superficie. Al ser dos helicoides contrarios, en la sombra se ven sus proyecciones desplazándose simultáneamente pero en sentido inverso, análogamente al fenómeno que desea representar. Dicho fenómeno puede observarse en la simulación siguiente: <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Waventerference.gif>

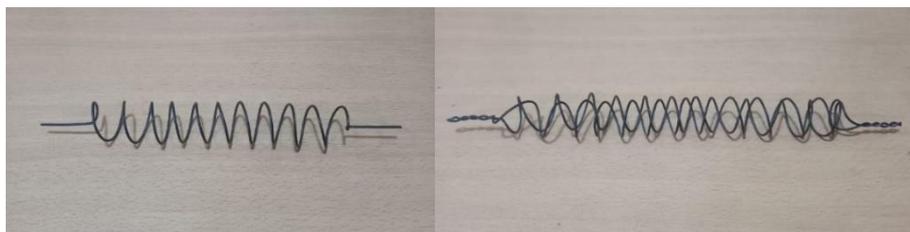


FIGURA 5. Actividad 6. Izq.: alambre simple en forma de hélice; der.: doble alambre, arrollados en hélices contrarias. Sus sombras generan la ilusión de movimiento longitudinal al rotarlos.

B. Actividad 7

Para la experiencia con cuerda se recurrió a un pequeño motor de CC (extraído de una impresora en desuso) en cuyo eje se incorporó una sección de un corcho desplazada excéntrica. Al apoyar una cuerda elástica (tomada por sus extremos) en su superficie lateral se logra imprimir el movimiento oscilatorio necesario (figura 6, izq.). Los diferentes modos se obtuvieron modificando la velocidad del motor a través de una fuente variable (o de la tensión en la cuerda). Los resultados obtenidos se corresponden con los que pueden encontrarse en la bibliografía. Disponiendo solo de voltaje fijo podría recurrirse a una resistencia variable, por ejemplo, improvisándola con alambre NiCrom y una pinza cocodrilo como cursor. Utilizando más o menos pilas en serie podrían lograrse resultados similares.

Consideramos la variante de generar ondas estacionarias en tres dimensiones (oscilando en todos los planos posibles en torno a un mismo eje; en el caso anterior se establece en uno). Para ello fijamos, al eje de un motor, una pieza circular con una perforación desplazada de su centro donde se incorporó un rodamiento pequeño, dentro del cual se colocó el extremo de la cuerda evitando que se retorciera durante el giro (figura 6, der.). La rotación con los mismos períodos que en el caso anterior produce idénticos modos pero con una configuración de revolución.

Un flash estroboscópico permitió “congelar la onda” cuando se consigue que su frecuencia de oscilación sea múltiplo de la del flash. No obstante, disparando una serie de fotografías con un teléfono móvil con flash se consiguen buenos resultados en aquellas en las que se logra captar la cuerda con gran amplitud.



FIGURA 6. Actividad 7. Izq.: onda estacionaria en cuerda (hilo “Tatora” en nuestro caso) apoyada sobre la superficie de un corcho giratorio excéntrico, der.: montaje de la cuerda desplazada radialmente del eje del motor para ondas estacionarias en revolución. En ambos casos se trata de dispositivos construidos con motores de CC (extraídos de antiguas impresoras).

VI. RESULTADOS

Uno de los ejes de la capacitación fueron las posibles representaciones de los estudiantes, durante el aprendizaje de los fenómenos ondulatorios. Las discusiones con los docentes se situaron en dicho contexto, centrandolo en armados que no requiriesen dispositivos comerciales. Se resaltó que la visualización de ciertas manifestaciones, que pudo lograrse con elementos concretos, puede contribuir a la conceptualización de fenómenos naturales complejos.

Han valorado especialmente la discusión sobre las posibilidades de montaje con elementos accesibles y reutilizables, algo que no parece estar muy extendido en el nivel medio. Los docentes se mostraron particularmente estimulados por la utilización de materiales de origen hogareño. Es posible que esos recursos también favorezcan a un aprendizaje más contextualizado. Sostenemos que la física cobraría más sentido para los alumnos si les permitiera encontrar explicaciones sobre el mundo cotidiano; algunos artefactos que se utilizan en el hogar pueden ser un medio para esta posibilidad (Cyrulies, 2021).

No obstante, manifestaron dificultades con relación al tiempo que requiere este tipo de propuesta, particularmente por las características del trabajo en el nivel secundario. Se mencionó que en la formación docente no suele haber espacio para el diseño y la construcción de material didáctico, como sugieren Wurm *et al.*, (2019), aunque esto no se puede generalizar.

Sobre el lugar de las actividades dentro de una secuencia, la visión general fue la de actividades demostrativas. Si bien esta finalidad puede ser importante en muchas situaciones, se promovió la problematización: por ej., consignas más o menos abiertas, que requieran el uso de los dispositivos y que puedan responderse con la manipulación de estos. Mediante un debate con esta mirada, se obtuvieron varias posibilidades en cuanto al momento de introducir la actividad experimental.

Un caso interesante resultó el tratamiento sobre la energía en la cuerda. Inspirados en el trabajo de Welti (2002) se planteó un análisis sobre la energía potencial y cinética. En consonancia, se tuvieron algunas respuestas que sugerían que se tiene mayor energía potencial en los elementos de la cuerda que tienen el mayor apartamiento de su posición de equilibrio (resulta nula allí). También se puso de manifiesto en ciertos casos que la referencia inmediata a la energía potencial remite a la gravitatoria (quizá debido a que en muchas ocasiones es la única que se enseña en la escuela). En el caso de la energía puesta en juego en el sistema de la cuerda obliga a asignar como potencial a la elástica, la que se hace máxima para un elemento de la cuerda con elongación nula, es decir en un nodo (un elemento de la cuerda no mantiene su longitud constante durante la oscilación). Resultó un buen recurso para la discusión de estos aspectos el sistema rotante donde la energía potencial elástica es independiente del plano de oscilación. Fue necesario aclarar que aún en cuerdas que no suelen considerarse elásticas en el uso cotidiano (un piolín, por ejemplo), su posibilidad de tener ligeros estiramientos es la que permite generar ondas estacionarias.

VII. CONCLUSIONES

La secuencia de actividades se pudo desarrollar según lo planificado y resultó un espacio de reflexión y discusión sobre la práctica docente con relación a la enseñanza de los fenómenos ondulatorios. Resaltamos la gran predisposición de los docentes ante la propuesta de laboratorio y la valoración positiva que han tenido de las actividades.

Señalaron que no es habitual la construcción personal de dispositivos en la enseñanza de la física. Sin embargo, hubo consenso en que puede ser muy conveniente hacerlo, modificando un escenario común caracterizado por el escaso material con el que se cuenta en las instituciones.

Sostenemos que una de las fortalezas de las actividades es la reutilización de componentes y elementos comunes con los cuales se logra un tratamiento fenomenológico del contenido. Pero también el atractivo de las experiencias puede contribuir a desarrollar interés del alumnado por un estudio más formal, en contraste con una situación de enseñanza donde este último no se contextualice.

El uso de las TIC también contribuye a enriquecer las actividades. Es el caso del generador de pulsos y del programa Audacity, ambos de instalación gratuita. La incorporación de más prácticas similares en la formación inicial de los docentes, probablemente, favorezca la superación de un formato institucional caracterizado por la poca actividad experimental en la enseñanza y en el aprendizaje de la física. Este último modelo, que hoy quizá sea dominante, asocia directamente las prácticas específicas a los dispositivos comerciales, como si no hubiese otras posibilidades.

REFERENCIAS

Diseño Curricular 5° Año, Orientación Ciencias Naturales, Física Clásica y Moderna. Provincia de Buenos Aires. Recuperado de <https://abc.gob.ar/secundaria/sites/default/files/documentos/fisica.pdf>

Diseño Curricular 6° Año, Orientación Ciencias Naturales, Física Clásica y Moderna. Provincia de Buenos Aires. Recuperado de https://abc.gob.ar/secundaria/sites/default/files/documentos/fisica_0.pdf

Cyrulies, E. (2021). Experiencias de laboratorio sobre el calor con un artefacto hogareño en la formación del profesorado de Física. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* 18(2), 2202.

Marino, L., Giorgi, S., Cámara, C. y Carreri, R. (2017). Los conceptos básicos involucrados en la ecuación de ondas armónicas mecánicas: su tratamiento en los libros de texto de física usados en el ciclo inicial universitario. *Revista de Enseñanza de la Física*, 29(Extra), 7-19.

Martín Díaz, M., Gómez Crespo, M. y Gutiérrez, J. (2000). *La física y la química en la secundaria.* Madrid: Narcea.

Welti, R. (2002). Concepciones de Estudiantes y Profesores Acerca de la Energía de las Ondas. *Enseñanza de las Ciencias*, 20(2), 261-270.

Wurm, G., Marinelli, M., Fontana, L., Salomón, S. y Ríos, R. (2019). Desarrollo de instrumental de laboratorio controlado por sistemas embebidos. *Revista de Enseñanza de la Física*, 31(Extra), 741-747.