

Dificultades en estudiantes universitarios acerca de las conceptualizaciones de los parámetros básicos en la ecuación de ondas mecánicas y sus tratamientos en libros de Física⁺*

Silvia María Giorgi¹

Luis Alberto Marino¹

Ricardo Antonio Carreri¹

Cristina Noemí Cámara¹

Universidad Nacional del Litoral

Santa Fe – Argentina

Resumen

En el ciclo inicial universitario, formando parte de los contenidos de Mecánica, se aborda el estudio de las ondas mecánicas transversales representándolas matemáticamente a través de una función armónica de dos variables. Esta función involucra parámetros característicos cuya naturaleza no es inmediata para los estudiantes. Se presenta un estudio sobre los aprendizajes logrados por parte de estudiantes que cursan carreras científico-tecnológicas acerca de los significados atribuidos a la amplitud, frecuencia, rapidez de propagación, longitud de onda y fase inicial en dicha ecuación. Además, se indagó sobre el tratamiento que se da a estos parámetros en libros de física usados frecuentemente en el ciclo inicial; se investigó si se explican adecuadamente los orígenes físicos de los mismos. Del estudio realizado se desprende, por un lado, que los estudiantes presentan dificultades en comprender fenomenológicamente al movimiento ondulatorio y en interpretar el significado físico de la constante de fase; y por otro, que no todos los autores de los libros de Mecánica analizados hacen referencia a esos parámetros de un modo explícito, y con los detalles convenientes. Se mencionan recomendaciones a los docentes para el diseño de estrategias didácticas que favo-

⁺ Difficulties experienced by university students in the conceptualizations of basic parameters from the equation of mechanical waves and their treatments in physics textbooks

^{*} *Recebido: abril de 2019.
Aceito: setembro de 2019.*

¹ E-mails: sgiorgi@fiq.unl.edu.ar; lmario@fiq.unl.edu.ar; rcarreri@fiq.unl.edu.ar; ccamara@fiq.unl.edu.ar

rezcan en los estudiantes la comprensión del fenómeno ondulatorio y su propagación.

Palavras-chave: *Ondas Mecânicas; Enseñanza y Aprendizaje; Libros de Texto.*

Abstract

In the initial university cycle, and forming part of the Mechanics contents, the study of the transverse mechanical waves is addressed by representing them mathematically through a harmonic function of two variables. This function involves characteristic parameters whose nature is not easily understood by students. We present a study about the learning achieved by students from different scientific-technological careers, regarding the meanings of amplitude, frequency, the speed of propagation, wavelength and initial phase in this equation. Besides, we inquired about the treatment given to these parameters in Physics books which are frequently used in the initial cycle, observing if their physical origins are adequately explained. The study shows that students present difficulties in understanding the wave behavior from a phenomenological point of view, as well as in interpreting the physical meaning of the phase constant. Furthermore, we observed that not all the authors of the analyzed Mechanics books refer explicitly to them and with the necessary appropriate details. Recommendations about the design of didactic strategies that favour the understanding of the wave phenomenon and its propagation by students are given to teachers and professors.

Keywords: *Mechanical Waves; Teaching and Learning; Textbooks.*

I. Introducción

Los resultados obtenidos por investigadores en didáctica de la Física que han abordado la problemática de la enseñanza y el aprendizaje del tema ondas mecánicas, han mostrado que existen dificultades por parte de los estudiantes en conceptualizar el fenómeno ondulatorio unidimensional. Esto se debe principalmente a que no sólo tienen que relacionar simultáneamente más de dos variables físicas (MAURINES, 1992), lo cual los limita operativamente a manejar funciones matemáticas armónicas de dos variables (requeridas para la descripción matemática de una onda viajera), sino porque también encuentran obstáculos en la conceptualización de los procesos de generación y propagación de ondas (MAURINES, op. cit.; WELTI, 2002 y 2005; PEREZ CARMONA; ESPER, 2005; PERIAGO *et al.*, 2009; ZDES-

LAV; ZOLLMAN; SANJAY REBELLO, 2010; TONGCHAI *et al.*, 2011; PEJUAN *et al.*, 2012), del rol del medio sobre la propagación (LINDER, 1993; PERALES PALACIOS, 1997; UTGES, 2002; BRAVO; PESA, 2005, 2009; BARNIOL; ZAVALA, 2017), o en su descripción matemática (GRAYSON, 1996; WITTMANN, *et al.*, 1999; GONZÁLEZ PEDREROS, 2005).

La experiencia didáctica de los autores de este trabajo, quienes participan activamente en el dictado de Física, en concordancia con investigaciones anteriores, permite decir que existe una tendencia de los estudiantes a meramente relacionar las magnitudes físicas de un modo mecánico, sin comprender su significado físico, lo cual dificulta en ellos la conceptualización de los fenómenos. Es así que, al preguntar sobre la rapidez de propagación, los estudiantes asocian inmediatamente a la frecuencia y longitud de onda, sin tener en cuenta las propiedades del medio de propagación. Haciendo uso de dicha relación, también responden sobre la frecuencia y la longitud de onda estableciendo una tríada entre estas magnitudes en la que basan sus respuestas, que deja de funcionar cuando cambia alguno de estos parámetros como ser la frecuencia de la fuente perturbadora, o las condiciones del medio de propagación. Esto se puede relacionar con lo que señalan Perez Carmona y Esper (op cit.) al decir que muchos estudiantes no tienen claro que la creación de un movimiento ondulatorio es independiente del proceso mediante el cual se transmite energía y cantidad de movimiento en un medio.

En particular, cuando a los alumnos se les explicita la función armónica que describe la propagación de una perturbación en un medio elástico y se les solicita que propongan la ecuación de la onda, surgen en ellos dudas relativas a la equivalencia de emplear una función senoidal o cosenoidal. Se sostiene que esto último ocurre porque los estudiantes no han conceptualizado adecuadamente el significado físico de la constante de fase, o fase inicial, que es justamente el parámetro que permite ajustar la ecuación matemática para que tenga coherencia física. Es decir, si por ejemplo se coloca la fuente perturbadora en posición nula ($x = 0$), la función de onda en esa posición debe reproducir, en el tiempo, los mismos valores de estados de perturbación que arroja la función que describe el comportamiento de la fuente.

Para soslayar parcialmente las dificultades que ofrece el tema a la mayoría de los estudiantes, y para que ellos construyan conocimientos físicos acerca del fenómeno ondulatorio, se considera que es crucial que comprendan los significados de los parámetros que caracterizan a una onda y cómo se relacionan fenomenológicamente entre sí, teniendo en cuenta los procesos de generación y de propagación en lugar de recordar meros símbolos matemáticos y fórmulas de memoria. En este sentido, las clases y actividades propuestas sobre trabajos prácticos experimentales se consideran instancias fundamentales, así como también la resolución de problemas de lápiz y papel, y el uso de recursos basados en simulaciones y/o en tecnologías de la información y la comunicación, además de los libros de texto utilizados, que posibilitan a los estudiantes reflexionar acerca de los conceptos y parámetros que involucran el fenómeno ondulatorio y que se abordan en este trabajo.

El contexto de la primera etapa de este estudio comprende particularmente el ciclo inicial de carreras científico tecnológicas que se cursan en la Facultad de Ingeniería Química (FIQ) de la Universidad Nacional del Litoral (UNL) (Argentina), en el que los estudiantes tratan el tema correspondiente a ondas mecánicas en la asignatura Física I. Las evidencias proporcionadas a través de las preguntas básicas de los estudiantes durante las clases, los errores cometidos por ellos en la resolución de problemas, y los razonamientos expuestos en las respuestas dadas a preguntas teóricas durante las evaluaciones, permiten afirmar que ellos enfrentan dificultades en la conceptualización de los parámetros definidos e involucrados en el fenómeno ondulatorio. Entre dichas dificultades se mencionan a las relacionadas con el significado de la fase inicial o constante de fase, el cual es un concepto crucial al abordar el fenómeno de interferencia. No se han encontrado antecedentes de trabajos en enseñanza y aprendizaje de la Física que aborden este último aspecto.

A partir de esta experiencia didáctica, y de los insuficientes resultados obtenidos a partir de un estudio sobre las conceptualizaciones que explicitaron alumnos evaluados en un examen final (situación en la cual se indagaba sobre dichos parámetros), se vio motivado el interés de los autores en estudiar, en una segunda etapa, el tratamiento del tema en los libros de texto (LT) de física, más frecuentemente referenciados y empleados en la enseñanza en el ciclo inicial universitario de la UNL, según el estudio realizado por Autor 1 *et al.* (2013). Cabe aclarar que las conceptualizaciones evaluadas en la primera etapa fueron reconstruidas por parte de los estudiantes en base a su dedicación personal para estudiar el tema, teniendo en cuenta las diversas instancias de aprendizaje ofrecidas durante el cursado de la asignatura y habiéndola regularizado, hechos que los habilitaron a participar en la evaluación final de Física I.

En relación a los LT se planteó investigar si a través del abordaje que se presenta del tema, se promueve en los estudiantes la conceptualización del fenómeno. Para ello se propuso indagar en los libros, si los autores en la introducción explicitan adecuadamente los significados físicos de los conceptos: amplitud, frecuencia, rapidez de propagación, longitud de onda y fase inicial. Es decir, si se explicita claramente que:

- tanto la amplitud como la frecuencia de la onda son impuestas por la fuente con la que se perturba al medio en el que se propaga,
- la fase inicial depende del estado de perturbación de la fuente al comenzar a contar el tiempo, (si la fuente se coloca en la posición cero),
- la rapidez de propagación -independiente de la fuente perturbadora- depende de las propiedades del medio de propagación,
- la longitud de onda se podría ver como una respuesta, del medio de propagación, a la perturbación provocada por la fuente.

Se considera que los LT son los referentes más significativos a los que recurren los estudiantes para consolidar el aprendizaje de los contenidos de física en el ciclo inicial universitario. Se sostiene que los procesos metacognitivos que se ponen en juego a través de la lec-

tura de estos recursos promueven sus formas superiores de representación simbólica, favoreciendo el desarrollo de capacidades de abstracción y razonamiento. No obstante, en estudios anteriores (WELTI, 2005; AUTOR 2, 2017), se encontró que algunos contenidos no son presentados de manera suficientemente clara como para que los estudiantes conceptualicen adecuadamente los fenómenos físicos cuando basan su estudio a partir de estos recursos.

Se espera que los resultados de este trabajo sean de utilidad para docentes que consideren no sólo el diseño de estrategias didácticas que involucren actividades que promuevan en los estudiantes una conceptualización adecuada del fenómeno ondulatorio, sino también que, a través de estas actividades, se alerte a los estudiantes sobre las omisiones y ausencias conceptuales que presentan diversos autores en los LT.

II. Marco teórico y objetivos

El estudio del fenómeno ondulatorio en el ciclo inicial universitario supone la propuesta de un nuevo modelo matemático que involucra dos variables independientes y la definición de nuevos conceptos que generalmente están alejados de la experiencia cotidiana de los estudiantes, y a su vez no son fáciles de asimilar. Algunos conceptos tendrían un fuerte anclaje en el análisis fenomenológico global de la naturaleza de las ondas mecánicas, teniendo en cuenta a los procesos de propagación y de generación, aunque este último no siempre es profundizado desde el punto de vista matemático.

Para que el aprendizaje sea efectivo, los estudiantes deben adquirir capacidades que les permitan transformar y reconstruir los conocimientos impartidos. En este sentido, la enseñanza de la Física debe promover en ellos la comprensión de los contenidos de manera tal que puedan aplicarlos en situaciones diversas. La propuesta constructivista de Ausubel, Novak y Hanesian (1991) establece la construcción de representaciones por parte de los alumnos, que les permitan operar sobre ellas en diferentes situaciones, y no recurrir a la reproducción memorística de definiciones y al uso de fórmulas.

Más precisamente, con la enseñanza de Física se busca en los estudiantes la reconstrucción conceptual (KATTMANN, 2008; citado DUIT y TREAGUST, 2009, p. 97). Este proceso denota itinerarios de aprendizaje de los estudiantes desde concepciones anteriores a la enseñanza, hacia representaciones más cercanas a las consensuadas por la comunidad científica. Dicho proceso se puede propiciar desde mecanismos de aprendizaje intencionales suponiendo una interacción continua entre el docente, el estudiante y los materiales impartidos, de los que forman parte los LT recomendados, en los contextos de las distintas instancias de enseñanza.

Para que los alumnos sean capaces de utilizar sus conocimientos en nuevas situaciones o contextos, se requiere que reconstruyan criterios sobre cuándo y cómo el conocimiento debe ser aplicado, y si la respuesta alcanzada satisface razonablemente el problema original. A través de la enseñanza y el aprendizaje se espera que el alumno logre efectuar conexiones

entre conceptos con argumentos precisos, evitando cualquier tipo de arbitrariedades (ALCOCER *et al.*, 2004).

El logro de la deseada reconstrucción conceptual por parte de los alumnos que se busca con la enseñanza de los contenidos conceptuales involucrados en los cursos de Mecánica introductoria, requiere que ellos manejen adecuadamente tanto contenidos físicos como matemáticos. Conjuntamente, deben internalizar apropiadamente el fenómeno estudiado a partir de las distintas instancias de aprendizaje planteadas durante la estrategia didáctica planificada por el docente y/o las argumentaciones pertinentes, y a partir de propuestas didácticas implícitas presentes en los LT recomendados.

Se acuerda con los aportes de los experimentos clásicos realizados por Bransford y sus colaboradores, revisados por Alcocer *et al.* (op. cit.), en su estudio sobre ejemplos de contenidos de Física y Química presentados en libros de texto de niveles de enseñanza secundaria y primeros cursos universitarios. Estos investigadores señalan que la necesidad de recurrir a elaboraciones imprecisas, sea en la enseñanza o el aprendizaje, depende de diversos factores. Entre dichos factores, se destaca el modo en que los contenidos habituales de Física y Química se presentan en los LT, y afirman que, lo que para un lector que conoce un tema constituye una clara secuencia causa-efecto, antecedente-consecuente o problema-solución, para un lector inexperto puede ser simplemente una sucesión de afirmaciones inconexas.

En relación a los LT de ciencias se destaca que aún en la actualidad siguen siendo medios privilegiados para la adquisición de conocimientos en la universidad (OTERO, 1990; PANDIELLA; MACÍAS, 2005; MATEOS, 2009). Sin embargo, en ciertas ocasiones, las explicaciones que presentan los autores de los LT en los desarrollos de contenidos no son lo suficientemente claras para los estudiantes que se inician en el estudio de los fenómenos físicos (ALCOCER *et al.*, op. cit.; WELTI, 2005; MARINO *et al.*, 2017). Por lo tanto, si se desea que los estudiantes reconstruyan conocimientos de manera significativa, la selección y el análisis de los materiales didácticos (entre ellos los LT) resulta decisivo y fundamental.

En base a los aprendizajes puestos de manifiesto por alumnos que han tomado un curso de Mecánica del ciclo inicial universitario durante un examen final, en este trabajo se indaga, por un lado, si ellos han logrado conceptualizar la naturaleza de los parámetros involucrados en la representación matemática de una onda unidireccional; por otro lado, se analiza si los autores de los LT más frecuentemente usados en el ciclo inicial de carreras de la UNL, representan matemáticamente a las ondas materiales, y desarrollan adecuadamente los significados físicos de dichos parámetros.

III. Metodología

La primera parte del trabajo se llevó a cabo en el contexto de la asignatura Física I, en la cual se abordan los primeros contenidos de Mecánica. Esta asignatura es de cursado común para las carreras de tipo científico tecnológicas que se dictan en la FIQ, UNL. Se señala que, si bien en dicho contexto al abordar el tema ondas mecánicas se tratan a las ondas trans-

versales y longitudinales, este estudio se focaliza en ondas mecánicas armónicas transversales de amplitud mucho menor que la longitud de onda, en las que el fenómeno de dispersión es despreciable.

Se trabajó en dos etapas. La primera consistió en conocer si los estudiantes, en el contexto de la promoción de la asignatura Física I, habían conceptualizado adecuadamente los significados físicos de los siguientes conceptos relacionados con ondas viajeras: amplitud, frecuencia, rapidez de propagación, longitud de onda y fase inicial. En la segunda etapa, se analizó si el desarrollo de los contenidos relativos a dichos conceptos en los LT de Mecánica (con cálculo diferencial e integral al menos en una variable) más frecuentemente usados en el ciclo inicial de carreras de tipo científico tecnológicas (GIORGI *et al.*, 2013) es adecuado para promover el aprendizaje por parte de los estudiantes.

Se persiguieron los siguientes objetivos:

Con relación a los estudiantes participantes en la investigación:

- Evaluar las conceptualizaciones que han construido acerca los significados físicos de los conceptos mencionados.

Se parte de la hipótesis consistente en que la reconstrucción de conceptualizaciones adecuadas acerca de los parámetros involucrados en la expresión cinemática que representa al movimiento ondulatorio y, en particular de la fase inicial, no es inmediata para los estudiantes.

Con relación a los LT:

- Conocer cómo se presentan los parámetros involucrados en la expresión cinemática del movimiento ondulatorio en los capítulos de libros de Mecánica que tratan los primeros contenidos sobre el tema ondas.

- Identificar si los autores de los LT formulan de manera explícita los significados físicos de los parámetros que caracterizan a una onda mecánica señalados anteriormente.

La hipótesis que guía esta segunda etapa del estudio consiste en que el tratamiento que presentan algunos de los LT de Mecánica más recomendados acerca del fenómeno ondulatorio es insuficiente para promover la conceptualización del tema por parte de los estudiantes que estudian a partir de los mismos.

La metodología que se consideró más adecuada para lograr los propósitos de este estudio se encuadra en el paradigma de la investigación cualitativa.

La primera etapa se centralizó en el análisis de las respuestas escritas dadas por un grupo de estudiantes regulares en la asignatura Física I, en una instancia de evaluación final en la que se constituyó una muestra de 35 alumnos. De este modo se llevó a cabo un estudio de casos (CONCARI, 2002) en el sentido que las respuestas escritas estudiadas (unidades de análisis) fueron las dadas por estos estudiantes relativas a las preguntas 2, 3, 4 y 5.a del ejercicio que se muestra en el Anexo 1, incorporadas intencionalmente en el cuestionario.

Se realizó un análisis de contenido (BARDIN, 2002) del texto escrito y gráfico volcado por estos estudiantes en las respuestas dadas acerca de los significados otorgados a los

parámetros de interés mencionados (amplitud, frecuencia, rapidez de propagación, longitud de onda, fase inicial o constante de fase), en la representación matemática de una onda. Cabe mencionar que los estudiantes que conformaron la muestra adquirieron la condición de Regular en Física I por cursar la asignatura completa (acreditaron los conocimientos básicos a través de la aprobación de las evaluaciones de regularización, y aprobaron los trabajos prácticos de laboratorio).

Si bien los resultados obtenidos a partir de un estudio de casos no son generalizables, las respuestas poco adecuadas volcadas por los estudiantes en la instancia anterior, sumadas a las frecuentes dudas consultadas por ellos en las clases, dieron lugar a profundizar en el análisis acerca de la manera en que los autores de los LT de uso generalizado en el ciclo inicial universitario presentan y/o discuten los conceptos de interés.

En esta segunda etapa se trabajó con una muestra intencional de siete LT. Se seleccionaron los libros de Mecánica de nivel universitario básico con cálculo, teniendo en cuenta los autores que se mencionan en GIORGI *et al.* (2013). Los LT se muestran ordenados alfabéticamente en la Tabla 1 según el apellido del primer autor y se codificaron con la letra T seguida del número de orden alfabético.

Tabla 1 – Libros de texto que conforman la muestra.

T1	CUSSÓ, F.; LÓPEZ, C. y VILLAR, R. Física de los procesos biológicos . Barcelona: Ariel, 2004.
T2	GETTYS, W.; KELLER, F. y SKOVE, M. Física Clásica y Moderna . Madrid: McGraw Hill, 2005.
T3	RESNICK, R.; HALLIDAY, D. y KRANE, K. Física, volumen I . México: CECSA, 2006.
T4	ROEDERER, J. Mecánica elemental . Argentina: Eudeba, 2011.
T5	SEARS, F.; ZEMANSKY, M.; YOUNG, H. y FREDMAN, R. Física universitaria, volumen 1, decimosegunda edición . México: Pearson Educación, 2009.
T6	SERWAY, R. y JEWETT, J. Física para ciencias e ingeniería, volumen 1, séptima edición . México: Cengage Learning, 2010.
T7	TIPLER, P. y MOSCA, G. Física para la ciencia y la tecnología, volumen 1, quinta edición . Barcelona: Reverté, 2005.

El objeto de análisis consistió en el tipo de tratamiento que los autores de LT dan a los significados de los parámetros involucrados en la ecuación de ondas, es decir, si explicitan adecuadamente sus significados al presentar la ecuación matemática que es usada para representar al fenómeno.

En cada uno de los LT la unidad de análisis consistió en el capítulo introductorio correspondiente al tema ondas mecánicas. Se realizó un análisis de contenido (BARDIN, 2002) del texto escrito dedicado a desarrollos teóricos (párrafos), y de las figuras, indagándose sobre

el tipo de tratamiento que se presenta acerca de los conceptos mencionados (amplitud, frecuencia, longitud de onda y rapidez de propagación), y en particular sobre el relativo a la determinación de la constante de fase, o fase inicial, en la ecuación armónica que se propone para la descripción matemática de la onda.

IV. Resultados y análisis

Con relación a la primera etapa de este estudio, sobre las conceptualizaciones reconstruidas por estudiantes acerca de los conceptos mencionados y sus orígenes físicos, se analizaron las respuestas dadas a las preguntas correspondientes a los ítems 2, 3, 4 y 5.a del ejercicio que se muestra en el Anexo 1.

Respecto a los ejemplos solicitados a los estudiantes acerca de cómo generar ondas mecánicas transversales en al menos tres medios elásticos distintos, se consideró que un ejemplo es adecuado cuando se explicita el medio material y la fuente de perturbación. Cabe señalar que en los trabajos prácticos sobre ondas los estudiantes experimentaron con ondas viajeras generadas en la superficie del agua con distintos tipos de barreras adosadas a un motor periódico de frecuencia regulable, ondas en un resorte tenso generadas perturbando con la mano y ondas estacionarias generadas con un motor similar al anterior en una cuerda tensa.

Dieron ejemplos adecuados 18 estudiantes de un total de 35. Sólo 8 contestaron dando los 3 ejemplos solicitados, 7 dieron 2 ejemplos y 3 sólo uno. En los casos que se categorizaron como no adecuados se puso como ejemplo al sonido siendo éste un fenómeno de tipo longitudinal, o no se mencionó a la fuente de perturbación (5 estudiantes). Esto último pone en evidencia el escaso aprovechamiento por parte de los estudiantes de las actividades prácticas de laboratorio que se imparten a lo largo del cursado de la asignatura. No contestaron lo solicitado 12 estudiantes.

En otro ítem se solicitó que, para una onda cuya representación es senoidal, se expliquen los significados de los siguientes parámetros: amplitud, frecuencia, longitud de onda, rapidez de propagación y fase inicial.

Se consideraron respuestas adecuadas para:

- La amplitud, a aquellas que refirieron a la máxima o mínima posición alcanzada por un punto material afectado por la perturbación, respecto a la de equilibrio.

- La frecuencia, a la afirmación relacionada con la inversa del periodo de oscilación de los puntos materiales alcanzados por la perturbación.

- La longitud de onda, a las respuestas consistentes en que es la distancia que recorre la perturbación en un periodo, o la distancia que existe entre dos puntos que vibran en fase.

- La rapidez de propagación, a las afirmaciones que aluden a la rapidez con la que viaja la perturbación en el medio elástico.

- La fase inicial, a la respuesta que alude a las condiciones de movimiento del punto cuya posición es cero (generalmente en el que se ubica la fuente) al comenzar a contar el tiempo.

Se encontró que, la mayoría de los estudiantes dio respuestas adecuadas acerca de los conceptos: amplitud (19 estudiantes), frecuencia (19 estudiantes) y rapidez de propagación (26 estudiantes), y alrededor de la mitad (14 estudiantes) respondió adecuadamente sobre la longitud de onda. Sólo dos estudiantes contestaron apropiadamente sobre la fase inicial.

Acordando con resultados de investigaciones anteriores y con la experiencia de los autores de este trabajo, se puede decir que estos parámetros son descriptos por los estudiantes aludiendo al fenómeno de propagación en sí, sin tener en cuenta a la fuente de perturbación ni a las condiciones mecánicas del medio, es decir sin tener en cuenta los orígenes físicos de estos parámetros, por ese motivo se agregó en el cuestionario el ítem siguiente en el que se debía contestar sobre los agentes, o factores, que intervienen en el fenómeno y determinan los parámetros mencionados. Los resultados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2 – Tipos de respuestas dadas por los estudiantes acerca de los factores o agentes que determinan los parámetros característicos de una onda viajera.

Tipos de respuestas dadas por los estudiantes	Números de estudiantes N = 35
Identificando los agentes responsables de cada parámetro	3
General, aludiendo al perturbador y al medio material	4
Aludiendo sólo al medio	2
Aludiendo sólo al perturbador	4
No adecuada	4
No contesta	18

Las mayores dificultades se observaron en las respuestas dadas sobre la fase inicial. Se encontró que sólo dos estudiantes aludieron en sus respuestas al estado de movimiento de la fuente de perturbación colocada en el origen de coordenadas cuando se empieza a contar el tiempo. En los párrafos siguientes se profundiza en el estudio de las conceptualizaciones de los estudiantes sobre este parámetro.

Sólo 3 alumnos aludieron a la fuente de perturbación como responsable de la frecuencia, amplitud y fase inicial de la onda (esto último si se ubica la fuente de perturbación en la posición cero), y a las condiciones del medio material como determinantes de la rapidez de propagación. Es de destacar que la mayoría de los estudiantes no contestó esta pregunta.

Con relación al ítem 4.a del ejercicio mostrado en el Anexo 1 consistente en la determinación de la función matemática que describe a la onda, conociendo la frecuencia, amplitud, rapidez y sentido de propagación, y las condiciones de la fuente de perturbación al comenzar a contar el tiempo (en el instante $t = 0$ el punto de la cuerda de abscisa $x = 0$ tiene una elongación $y(0,0) = 0$, y la componente de su velocidad de oscilación $v_y(0,0)$ es positiva), los resultados se sintetizan en la Tabla 3.

Se encontró que sólo dos estudiantes analizaron adecuadamente el estado de movimiento de la fuente de perturbación colocada en el origen de coordenadas cuando se empieza

a contar el tiempo. Resulta notable que un elevado número de estudiantes no tiene en cuenta a la fase inicial en la función matemática que propone, o directamente no contesta la pregunta. Se destaca que dos estudiantes usaron la función seno para el análisis adecuado del valor de la elongación inicial en el origen, pero no consideraron la condición de componente de la velocidad de perturbación positiva, y que siete de ellos, al usar la función coseno determinaron adecuadamente el valor de la fase inicial sin contemplar la condición de velocidad.

Tabla 3 – Estrategias aplicadas por los estudiantes para la determinación de la constante de fase inicial en la ecuación de onda.

Tipos de estrategias puestas en juego por los estudiantes para la determinación de la constante de fase	Números de estudiantes N = 35
Análisis correcto de $y^*(0,0)$ y $v_y^{**}(0,0)$	2
Uso de función seno con <i>sólo</i> análisis correcto de $y(0,0)$	2
Uso de función coseno con <i>sólo</i> análisis correcto de $y(0,0)$	7
No se considera	10
No adecuada	3
No contesta	11

* y : elongación; ** v_y : componente de la velocidad

A partir de los resultados anteriores se desprende que efectivamente, a pesar de las instancias de aprendizaje ofrecidas por la cátedra para el desarrollo del tema, y de los materiales de estudio recomendados, entre los cuales se encuentran presentes los LT, estos estudiantes no conceptualizaron adecuadamente el fenómeno ondulatorio, especialmente en lo referido al papel que juegan las condiciones iniciales en el modelo matemático que describe el fenómeno de propagación de la perturbación en un medio.

Lo anterior motivó a los autores a investigar cómo es tratado el tema en los LT recomendados a los estudiantes (GIORGI *et al.*, 2013), los cuales se mostraron en la Tabla 1. En el Anexo 2 se transcribe una síntesis del análisis realizado del capítulo introductorio correspondiente a ondas mecánicas para cada LT que conforma la muestra. Se estudiaron las interpretaciones verbales y gráficas dadas por los autores acerca de los parámetros y conceptos de interés en este trabajo.

En la Tabla 4, para cada LT analizado, se muestra si se explicita para el caso de ondas armónicas de amplitud mucho menor que la longitud de onda, en las que el fenómeno de dispersión es despreciable, que la amplitud y la frecuencia son parámetros impuestos por la fuente perturbadora, y que la rapidez de propagación depende de las condiciones mecánicas del medio elástico.

De la misma se desprende que en tres de los siete LT analizados (T1, T3 y T5) los autores explicitan que tanto la amplitud como la frecuencia de la onda es la de oscilación de la fuente perturbadora, y que la rapidez de propagación depende de las propiedades mecánicas

del medio material. En T2 se explicitan sólo los dos primeros parámetros, en T7 el segundo y el tercero, en T6 sólo el tercero, y en T4 ninguno.

Tabla 4 – Explicitación en los LT de las características de la amplitud, frecuencia y rapidez de propagación de la onda.

Libro	Se explicita que:		
	La amplitud de la onda es la de oscilación de la fuente perturbadora	La frecuencia de la onda es impuesta por la fuente perturbadora	La rapidez de propagación depende de las propiedades mecánicas del medio
T1	Sí, explícitamente	Sí, explícitamente	Sí, explícitamente
T2	Sí, implícitamente	Sí, implícitamente	No, al presentar el tema
T3	Sí, implícitamente	Sí, implícitamente	Sí, en general
T4	No	No	No, al presentar el tema
T5	Sí, explícitamente	Sí, explícitamente	Sí, explícitamente
T6	No	No, al presentar el tema	Sí, explícitamente
T7	Sí, implícitamente	No, al presentar el tema	Sí, explícitamente

Completando la información recabada, respecto al tratamiento del signo del término temporal en la fase, de la fase inicial y de la longitud de onda, la síntesis de lo encontrado se muestra en la Tabla 5. En la misma se informa si se explican adecuadamente los significados del signo del término temporal en la fase, de la llamada fase inicial o constante de fase, y si se menciona que la longitud de onda queda determinada por la rapidez de propagación (que depende de las condiciones del medio) y la frecuencia de la fuente.

Tabla 5 – Tipos de explicaciones dadas por los autores de LT acerca del signo del término temporal en la fase, de la fase inicial o constante de fase, y de la longitud de onda.

Libro	Se explican los significados de:		
	El signo del término temporal en la fase	La fase inicial	La longitud de onda
T1	Sí	No, al presentar la función	Si
T2	Sí	No, al presentar la función	No
T3	Sí, de manera incompleta	No, al presentar la función	No
T4	Sí	No	No
T5	Sí	No	No
T6	Sí	No	No
T7	No	Sí, de manera incompleta	No

Se encontró que en sólo un LT (T7) no se dan explicaciones con respecto al signo del término temporal de la fase, sin embargo, sí se explica el significado de la constante de fase, aunque de manera incompleta.

Con respecto a la conceptualización de la longitud de onda como dependiente de las condiciones mecánicas del medio elástico y de la frecuencia de la fuente, estas condiciones son explicitadas sólo por los autores de T1. Los autores de ese LT indican que, si el extremo de una cuerda tensa se desplaza con un movimiento armónico simple, la onda que se genera recibe el nombre de onda armónica. Se explica adecuadamente que la frecuencia y la amplitud de la onda quedan determinadas por la fuente de vibración, y que la rapidez de propagación depende del medio y a veces de la frecuencia (medio dispersivo). Se señala que la longitud de onda depende en gran medida del medio de propagación ya que está determinada por la frecuencia y la velocidad de propagación; cuando una onda atraviesa la frontera entre dos medios cambia la velocidad de propagación, la frecuencia se conserva por lo que cambia la longitud de onda. Se presenta la ecuación del desplazamiento de la cuerda respecto a la posición de equilibrio con la función seno y con la fase inicial nula (Ec. 22.1; p. 1042). Luego, sólo se menciona que se puede usar, en general, una función coseno o seno con fase inicial ϕ_0 , "...donde el uso de la fase inicial ϕ_0 sólo representa la elección de un origen de tiempo y espacio distintos de cero." (p. 1042). En los apartados siguientes al escribir la ecuación de onda no se contempla la fase inicial hasta el correspondiente al análisis de Fourier, en el que se escribe la ecuación de onda incorporando a la fase inicial pero no se hace mención alguna sobre la misma.

En T2 no se señala explícitamente que la frecuencia es la de la fuente perturbadora. Se analiza la relación entre la rapidez de propagación, la longitud de onda y el período. No se indica que la rapidez depende de las condiciones del medio y que la longitud de onda es una respuesta del medio a la perturbación. Se indica: "Las funciones de onda que se han presentado hasta ahora no son generales por completo, pues requieren que $y = 0$ cuando $x = 0$ y $t = 0$. La expresión más general incluye una constante de fase ϕ : $y = A \sin(kx - \omega t + \phi)$. A menudo es conveniente tomar $x = 0$ y $t = 0$ para que $\phi = 0$, como hicimos en la exposición anterior." (p. 789). No se señala que también puede usarse la función coseno en cuyo caso $\phi = \pi/2$. Se concluye que en este LT se realiza una descripción del fenómeno ondulatorio centrada en la matemática y no en los significados físicos de los parámetros involucrados, ni en su análisis conceptual.

Los autores de T3 presentan el tema definiendo los parámetros característicos de la onda viajera sin relacionarlos con la fuente perturbadora que la origina, ni con el medio en el cual se propaga. En el párrafo final del ítem Velocidad transversal de una partícula. Se destaca: "Conviene señalar que, como se explica en la siguiente sección, la rapidez de la onda depende del medio y no de la onda. Por el contrario, la velocidad transversal de la partícula depende de las propiedades de la onda – entre ellas amplitud y frecuencia – ... y no del medio" (p. 405). Con relación a la constante de fase se aclara que puede ser igual a cero si "...el desplazamiento 'y' es cero en la posición $x = 0$ y durante el tiempo $t = 0$..." (Ec. 18.11, p. 404). Sin embargo, se aclara que "... no debe ser así necesariamente. La expresión general de la onda viajera es: $y(x, t) = y_m \sin(kx - \omega t - \phi)$ – Ec. 18.16, p. 405. "La magnitud que aparece

en el argumento, a saber, $kx - \omega t - \phi$, recibe el nombre de fase de la onda. Al ángulo ϕ se le conoce como constante de fase. Esta constante no afecta la forma de la onda; la mueve hacia adelante o hacia atrás en el espacio o en el tiempo” (p. 405). Teniendo en cuenta la rapidez de propagación en una cuerda estirada se explicita que: “La rapidez de fase de una onda senoidal puede obtenerse a partir de las propiedades mecánicas del medio material por donde se propaga la onda” (p. 406).” La rapidez de una onda depende de las propiedades del medio, ...” (p. 407); aquí los autores del LT relacionan la velocidad de la onda con las propiedades del medio. En el Problema 18-1 (p. 406) los autores del LT, para un ejemplo particular, relacionan la amplitud del movimiento oscilatorio de la fuente perturbadora (barra) con la amplitud de la onda transversal que se desplaza por la cuerda y la frecuencia de la fuente perturbadora con la de la onda transversal generada.

En T4 se realiza una detallada y didáctica descripción cualitativa de la propagación de una perturbación en un cuerpo inicialmente en equilibrio mencionando que la propagación de la deformación se realiza a una velocidad finita, llamándose a este fenómeno de propagación onda elástica (p. 217). Se menciona: “...el trabajo que realizan las fuerzas exteriores durante la percusión inicial se reparte en forma de energía elástica por el cuerpo a medida que la onda avanza por él, ya que, cuando alcanza al punto Q, debe realizar trabajo en su entorno para producir la deformación...”; “... mediante la propagación de una onda elástica se puede realizar trabajo ‘a distancia’.” (p. 217). Se describe en detalle el campo de deformaciones en una onda longitudinal y una transversal (ubicando la fuente en $x = 0$) mencionando el fenómeno de polarización. Con relación a las ondas sinusoidales, se presenta la perturbación en función de la posición (viajando en sentido creciente de x) y del tiempo, a través de una función senoidal $y(x, t) = \epsilon_0 \sin [k(x - ct) + \phi]$ (p. 226) y sólo se menciona que “... ϵ_0 , k y ϕ son parámetros... El parámetro ϵ_0 es la amplitud (deformación máxima) de la onda; ϕ es la fase inicial y k es el número de onda. Podemos introducir en lugar de k un parámetro más intuitivo: la longitud de onda. Definimos a ésta como la distancia mínima entre dos puntos del medio que en un instante dado tienen igual elongación ϵ e igual velocidad material $v = \partial\epsilon/\partial t$. Por lo tanto, deberán distar un valor λ tal que sus argumentos difieran en 2π .” (p. 226 y 227). No se analiza el significado de la fase inicial ϕ .

Los autores de T5, al introducir el tema, mencionan: “... rapidez de la onda, determinada en cada caso por las propiedades mecánicas del medio” (p. 489). Con relación a las ondas periódicas se señala: “... cuando imprimimos un movimiento repetitivo o periódico al extremo libre de la cuerda... Entonces, cada partícula de la cuerda tendrá un movimiento periódico al propagarse la onda, y tendremos una onda periódica” (p. 489). Se hace referencia a la figura 15.3 (p. 489) en la que se muestra un cuerpo, apoyado sobre un resorte vertical oscilando, que tiene adosada una cuerda. En el pie de figura se señala: “15.3 Un bloque con masa m unido a un resorte tiene un movimiento armónico simple y produce una onda senoidal que viaja a la derecha por la cuerda. (En un sistema real, se tendría que aplicar una fuerza impulsora a m para reponer la energía que la onda se lleva).”, en la figura 15.3 se aclara que: “El

MAS del resorte y la masa genera una onda senoidal en la cuerda. Cada partícula de la cuerda muestra el mismo movimiento armónico simple que el resorte y la masa; la amplitud de la onda es la amplitud de este movimiento”. Haciendo referencia a la figura 15.4 (p. 490), en la que se muestra el perfil de la perturbación en distintos tiempos, se señala: “Cuando una onda senoidal pasa por un medio, todas las partículas del medio sufren un movimiento armónico simple con la misma frecuencia”. Al presentar la expresión de la rapidez de propagación $v = \lambda \cdot f$ se reitera que depende únicamente de las propiedades mecánicas del medio. Se menciona que, por ahora la rapidez de propagación no depende de la frecuencia, “...las ondas de todas las frecuencias viajan con la misma rapidez.” (p. 490). La descripción matemática de una onda se presenta con una función senoidal. Se indica la función del perturbador en $x = 0$ con la función coseno y se dice que en $t = 0$ el perturbador se halla en el estado de perturbación máximo. No se explica que en esas condiciones la fase inicial es nula. Posteriormente se explica cómo se incorpora en la fase el término espacial con el signo correspondiente, y se expresan las distintas, y equivalentes, formas de escribir la ecuación de onda (p. 493).

En T6 se presenta con la ayuda de la figura 16.8 (p. 455), en la que se muestra la perturbación en función de la posición y del tiempo, la longitud de onda (figura 18.a) y el período (figura 18.b), no se lo relaciona con el período de la fuente perturbadora. Lo mismo sucede con la amplitud. Respecto a la rapidez se menciona, “Las ondas viajan con una rapidez específica, y esa rapidez depende de las propiedades del medio perturbado.” (p. 455). En la expresión (16.13) – p. 456 – se muestra la expresión general para una onda sinusoidal con constante de fase ϕ y se menciona “... donde ϕ es la constante de fase tal como se aprendió en el estudio del movimiento periódico en el capítulo 15. Esta constante se determina a partir de las condiciones iniciales.” (p. 456). No se explica cómo se calcula, ni su significado físico. Con respecto a las ondas sinusoidales en cuerdas, se muestra la figura 16.10 (p. 457) representando instantáneas de la onda creada de esa forma a intervalos de $T/4$. “Ya que el extremo de la varilla oscila en movimiento armónico simple, cada elemento de la cuerda como el que se encuentra en P, también oscila verticalmente con movimiento armónico simple. Este debe ser el caso porque cada elemento sigue el movimiento armónico de la varilla. Por lo tanto, todo elemento de la cuerda se puede tratar como un oscilador armónico simple que vibra con una frecuencia igual a la frecuencia de oscilación de la varilla...”. En la figura 16.10 se indican la dirección de perturbación y la longitud de onda. Se escribe la ecuación de onda señalando que si en $t = 0$ la onda es como se muestra en la figura 16.10 b) – en la que la varilla se encuentra en la posición de equilibrio –, la ecuación se puede escribir como $y = A \sin(kx - \omega t)$. Se deducen las expresiones de la velocidad y aceleración transversales diferenciando dicha velocidad de la de propagación. No se menciona explícitamente que la amplitud de la onda es la del oscilador, ni se justifica que la fase inicial sea cero. Se consideran de gran valor didáctico las “preguntas rápidas” 16.3 (p. 458) y 16.4 (p. 459) de carácter cualitativo intercaladas en el texto. En el ejemplo resuelto 16.3 (p. 460) se señala: “En la figura 16.12, el bloque colgante establece una tensión en la cuerda horizontal. Esta tensión determina la rapidez con que la onda se

mueve en la cuerda” (p. 460). En el ejemplo 16.4 “Rescate del excursionista” se menciona que un helicóptero sostiene un cable del que se agarra el excursionista y éste intenta enviar señales al helicóptero lanzando pulsos transversales por el cable (denotando que la fuente de perturbación es el excursionista).

Los autores de T7 explicitan que “Una propiedad general de las ondas es que su velocidad depende de las propiedades del medio y que es independiente del movimiento de la fuente de las ondas. Por ejemplo, la velocidad del sonido de la bocina de un coche depende sólo de las propiedades del aire y no del movimiento del coche” (p. 432). En el caso de ondas armónicas, se señala: “Si un extremo de una cuerda se sujeta a un diapasón que está vibrando con movimiento armónico simple, se produce un tren de ondas sinusoidales que se propaga a lo largo de la cuerda. Este tren de ondas es una onda armónica. La distancia mínima recorrida en el espacio hasta que la función de onda se repite se llama longitud de onda λ . Cuando la onda se propaga por la cuerda, cada punto de la cuerda se mueve hacia arriba o hacia abajo (perpendicularmente a la dirección de propagación) realizando un movimiento armónico simple cuya frecuencia f es la del diapasón” (p. 439).

VI. Síntesis e implicancias para la enseñanza

El modelo ondulatorio ocupa un lugar fundamental en la estructura conceptual de la Física dado que permite encontrar una unidad explicativa de fenómenos diversos que involucran tanto ondas mecánicas como electromagnéticas. Sin embargo, en concordancia con investigaciones anteriores (BRAVO; PESA, 2005 y 2009; PEREZ CARMONA; ESPER, 2005), se encontró que dicho modelo ofrece problemas de aprendizaje a estudiantes del ciclo inicial universitario. Se sostiene que para avanzar en la elaboración de propuestas didácticas que contribuyan a un aprendizaje significativo de esta temática, es necesario conocer no sólo las dificultades de los estudiantes, sino también cómo el tema es presentado en los LT de uso frecuente.

A partir del inapropiado desempeño de los estudiantes que conformaron la muestra, evidenciado en las tareas propuestas, se puede afirmar que estos estudiantes no han reconstruido (KATTMANN, 2008; citado DUIT; TREAGUST, 2009) representaciones adecuadas sobre el fenómeno ondulatorio, ni a través de las distintas instancias de aprendizajes ofrecidas por la cátedra durante el cursado de Física I, ni habiendo recurrido a los LT más frecuentemente usados como material de consulta sobre el tema.

Los resultados encontrados, con relación a los parámetros estudiados, permiten decir que la comprensión del modelo matemático que describe a una onda conlleva a la superación por parte de los estudiantes de obstáculos de aprendizaje relacionados con sus orígenes físicos. En particular, se destaca a la constante de fase, siendo un elemento crucial para comprender el concepto de coherencia el cual resulta básico en el estudio de la interferencia de ondas, y como consecuencia, de los diversos y numerosos fenómenos que se explican a través de dicho fenómeno.

Para diseñar cualquier estrategia de enseñanza, se deberían analizar cuidadosamente no sólo las concepciones iniciales de los estudiantes, sino también cuáles son las ideas básicas que quieren enseñarse, y que constituyen las bases del conocimiento que es deseable que reconstruyan. De esto se desprende la necesidad de señalar a los docentes que, al desarrollar el tema, se ponga énfasis en el diseño de actividades a través de las cuales los estudiantes adviertan que tanto la frecuencia, como la amplitud de una onda, quedan determinadas por las características de la fuente perturbadora, y que la rapidez de propagación depende de las propiedades mecánicas del medio que es perturbado, que son las que posibilitan que la perturbación se propague con una determinada longitud de onda. En cuanto a la constante de fase, resulta necesario brindar a los estudiantes actividades a través de las cuáles aprendan cómo se determina, eligiendo funciones seno o coseno, para escribir la ley del movimiento y cuál es su significado físico

Por un lado, se señala la conveniencia de hacer explícitos en las clases, como también en los diferentes materiales de estudio y consulta, el origen físico de los parámetros con los que se describe formalmente a una onda viajera. Por otro, que los docentes tengan en cuenta que en algunos de los LT que se recomiendan a los estudiantes, el tema ondas mecánicas no se encuentra desarrollado de manera integral exhaustiva como para que ellos conceptualicen el fenómeno y las ecuaciones que lo representan.

Respecto a los LT, se observó que en seis de los siete libros que conformaron la muestra analizada, los autores no profundizaron en la elección de la función armónica que usaron para la representación matemática de una onda, ni en la determinación de la fase inicial. Seguramente este análisis no es debidamente presentado con el fin de facilitar el tratamiento del tema, sin embargo, se sostiene que esta “facilitación” no propicia en los estudiantes la reconstrucción de conocimientos abarcadores sobre el fenómeno (BRANSFORD *et al.*, 1982, citados por ALCOCER *et al.*, 2004).

En los LT se abordan y se explican adecuadamente la mayoría de los parámetros involucrados en la ecuación de ondas con énfasis en aspectos matemáticos, con escasa referencia a lo fenomenológico. Algunos conceptos como la amplitud, frecuencia y rapidez de propagación son relacionados matemáticamente sin hacer explícita su naturaleza individual, o asociados al proceso de propagación (BRAVO; PESA, 2005 y 2009), sin aludir en la debida medida al papel que juegan la fuente perturbadora y las condiciones mecánicas del medio en el cual se genera y se propaga la onda, lo cual se sostiene que no propicia la comprensión global del fenómeno ondulatorio en los estudiantes. Esto podría ser, en parte, la causa de que muchos de ellos respondan preguntas teóricas haciendo uso sólo de la relación entre la rapidez de propagación, frecuencia y longitud de onda, en lugar de analizar el origen físico de esos parámetros, lo que daría lugar a una conceptualización más amplia que les permitiría entender mejor otros fenómenos como ser el de refracción de ondas, en el que cambian las condiciones del medio de propagación.

De lo anterior surgen consideraciones sobre las arbitrariedades descritas por Alcocer *et al.* (2004), como la dificultad de los estudiantes en establecer conexiones entre conceptos con argumentos precisos, presentes en los LT más frecuentemente recomendados y en los que se apoyan para estudiar los temas, lo cual los estaría alejando de una apropiada reconstrucción conceptual.

Los resultados de este trabajo deberían alertar a los docentes sobre la necesidad de poner en evidencia, a través de tareas que faciliten la comprensión por parte de los estudiantes (LEDESMA; POCOVÍ, 2013), las connotaciones físicas derivadas de los aspectos fenomenológicos de las ondas y de los parámetros que caracterizan a la generación y propagación de una perturbación. Acordando con otros investigadores, se sugiere elaborar alternativas didácticas que colaboren a superar los obstáculos detectados en los estudiantes (GRAYSON, 1996; WITTMANN; STEINBERG; REDISH, 2003; WITTMANN, 2002; ANDRÉS; PESA; MENESES, 2006; J BHATHAL; SHARMA; MENDEZ, 2010; PEJUAN *et al.*, 2012; ENGHAG *et al.*, 2013; BARNIOL; ZAVALA, 2017). No obstante, coincidiendo con las recomendaciones de Bravo y Pesa (2009), se sostiene que es necesario evaluar la potencialidad de las situaciones que se presentan en el aula para dar sentido a los conceptos abordados como así también de las distintas secuencias de situaciones que faciliten la reconstrucción progresiva de conceptos. Dichas secuencias deberían contemplar una presentación detallada del fenómeno ondulatorio que resulte comprensible a los estudiantes, y que les sirva de base para abordar el estudio de fenómenos asociados a las ondas electromagnéticas en cursos posteriores, aunque conlleve mayor tiempo de clase destinado al tema.

Si los resultados encontrados en este trabajo podrían aportar a los docentes elementos para el diseño de estrategias didácticas que promuevan en los estudiantes una conceptualización adecuada del fenómeno ondulatorio, las aspiraciones de los autores se verían alcanzadas.

Agradecimiento

Se agradece a Universidad Nacional del Litoral por el apoyo para la realización de este trabajo en el marco del proyecto CAI+D 2011 código: 50120110100098LI.

Referencias

ALCOCER, L.; CARRIÓN, R.; ALONSO, J. J.; CAMPANARIO J. M. Presentaciones aparentemente arbitrarias de algunos contenidos comunes en libros de texto de física y química. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, Vigo, España, v. 3, n.1, p. 98-122, 2004. Disponible en: <http://reec.uvigo.es/volumenes/volumen3/REEC_3_1_6.pdf>. Acceso en: feb. 2017.

ANDRÉS, M.; PESA, M.; MENESES, J. Conceptos-en-acción y teoremas-en-acción de estudiantes del Profesorado de Física: Ondas Mecánicas. **Revista de Investigación Universidad**

Pedagógica Experimental Libertad, Caracas, Venezuela, n. 59, p. 221-247, 2006. Disponible en: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=376140373009>>. Acceso en: ago. 2019.

AUSUBEL, D.; NOVAK, J.; HANESIAN, H. **Psicología Educativa, un punto de vista cognitivo**. 5ta. Reimpresión. México: Trillas, 1991. 626 p.

BARDIN, L. **El análisis de contenido**. 3. ed. Madrid: Akal, 2002. 94 p.

BARNIOL, P.; ZAVALA, G. The Mechanical Waves Conceptual Survey: An Analysis of University Students' Performance, and Recommendations for Instruction. **EURASIA Journal of Mathematics Science and Technology Education**, Taiwan, United Kingdom, Slovakia, v. 13, n. 3, p. 929-952, 3, 2017. Disponible en: <<https://www.researchgate.net/publication/>>. Acceso en: ago. 2019.

BHATHAL, R.; SHARMA, M.; MENDEZ, A. Educational analysis of a first-year engineering physics experiment on standing waves: based on the ACELL approach. **European Journal of Physics**, v. 31, n. 1, p. 23-35, 11, 2009. Disponible en: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0143-0807/31/1/003>>. Acceso en: ago. 2019.

BRAVO, S.; PESA, M. La construcción de representaciones sobre movimiento ondulatorio. Una interpretación a partir de la teoría de los campos conceptuales de Vergnaud y la teoría de los modelos mentales de Johnson-Laird. **Revista de Enseñanza de la Física**, Córdoba (Argentina), v. 18, n. 2, p. 25-42, 6, 2005.

BRAVO, S.; PESA, M.; CABALLERO SAHELICES, C. Representaciones de alumnos universitarios sobre propagación de ondas mecánicas. **Enseñanza de las Ciencias**, Barcelona, v. 27, n. 3, p. 405-420, 9, 2009.

CONCARI, S. El enfoque interpretativo investigación en educación en ciencias. **Revista Ensaio: Avaliação y Políticas Públicas em Educação**, Río de Janeiro, v. 10, n. 36, p. 315-330, jul/set de 2002.

ENGHAG, M.; FORSMAN J.; LINDER C.; MACKINNON, A.; MOONS E. Using a disciplinary discourse lens to explore how representations afford meaning making in a typical wave physics course. **International Journal of Science and Mathematics Education**, UK, v. 11, n. 3, p. 625-650, 2013. Disponible en: <<https://repository.uwc.ac.za/handle/10566/3080>>. Acceso en: ago. 2019.

GIORGI, S.; MARINO, L.; CÁMARA, C.; BONAZZOLA, M. Un estudio sobre libros de Física en el contexto del Ciclo Inicial de carreras de grado en la Universidad Nacional del Litoral. En: REUNIÓN EN EDUCACIÓN EN FÍSICA, 18, 2013, San Fernando del Valle de Catamarca. **Memorias...** Catamarca, Argentina: APFA, 2013. 1 CD.

GONZÁLEZ PEDREROS, G. I. Enseñanza de ondas mecánicas en cuerdas usando Mathematica. **Universitas Scientiarum**, Bogotá, v. 10, n. 3, p. 17-24, 2005.

GRAYSON, D. J. Using education research to develop wave's courseware. **Computational Physics**, United States, v. 10, n. 1, p. 30 -37, 1, 1996.

LEDESMA, L.; POCOVÍ, M. C. Ontología del concepto de aceleración: su comprensión mediante el aprendizaje a partir de textos. **Latin American Journal of Physics Education**, México, v. 7, n. 1, p. 68-78, 3, 2013.

LINDER, C. University physics student's conceptualizations of factors affecting the speed of sound propagation. **International Journal of Science Education**, UK, v. 15, n. 6, p. 655-662, 11, 1993.

MARINO, L.; GIORGI, S.; CÁMARA, C.; CARRERI, R. 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**, Córdoba (Argentina), v. 29 n. Extra, p. 7-19, 11, 2017.

MATEOS, M. Aprender a leer textos académicos: Más allá de la lectura reproductiva. En: POZO, J. I.; PÉREZ ECHEVERRÍA, M. del P. (Ed.) **Psicología del aprendizaje universitario: La formación en competencias**. Madrid: Ediciones Morata S. L, 2009. cap VI, p. 106-119.

MAURINES, L. Los estudiantes y la propagación de las señales mecánicas: dificultades de una situación de varias variables y procedimientos de simplificación. **Enseñanza de las Ciencias**, Barcelona, v. 10, n. 1, p. 49-57, 4, 1992.

OTERO, J. Variables cognitivas y metacognitivas en la comprensión de textos científicos: el papel de los esquemas y el control de la propia comprensión. **Enseñanza de las Ciencias**, Barcelona, v. 8, n. 1, p. 17-22, 4, 1990.

PANDIELLA, S.; MACÍAS, A. Comprensión lectora y comprensión conceptual de un texto sobre conducción térmica, **Enseñanza de las Ciencias**, Barcelona, n. extra. VII Congreso, 2005. Disponible en: <<https://core.ac.uk/reader/13306048>>. Acceso en: ago. 2019.

PEJUAN, A; BOHIGAS, X.; JAÉN, X.; PERIAGO, C. Misconceptions about sound among engineering students. **Journal of Science Education and Technology**, Switzerland, v. 21, p. 669-685, Feb/Dec 2012.

PERALES PALACIOS, F. J. Escuchando el sonido: concepciones sobre acústica en alumnos de distintos niveles educativos. **Enseñanza de las Ciencias**, Barcelona, v. 15, n. 2, p. 233-247, 1997.

PEREZ CARMONA, M. C.; ESPER, L. Algunos problemas en la conceptualización de ondas. **Enseñanza de las Ciencias**, Barcelona, n. Extra, VII Congreso, 2005. Disponible en: <<https://core.ac.uk/download/pdf/13301844.pdf>>. Acceso en: ago. 2019.

PERIAGO, C., PEJUAN, A., JAÉN, X., BOHIGAS, X. Misconceptions about the Propagation of Sound Waves. In: 20th EAEEIE ANNUAL CONFERENCE, 7, 2009, United States. Conference Paper in: <<https://www.researchgate.net/publication/224082127>>. Acceso en: ago. 2019.

TONGCHAI, A.; SHARMA, D.; JOHNSTON, I.; ARAYATHANITKUL, K. SOANKWAN, C. Consistency of students' conceptions of wave propagation: Findings from a conceptual survey in mechanical waves. **Phys. Rev. St Phys. Educ. Res.**, United States, v. 7, n. 020101, 7, 2011.

TREAGUST, D.; DUIT, R. Multiple Perspectives of Conceptual Change in Science and the Challenges Ahead. **Journal of Science and Mathematics Education in Southeast Asia**, Waynesville USA, v. 32, n. 2, p. 89-104, 2009.

UTGES, G. La enseñanza y aprendizaje de conceptos complejos. En busca de referentes teóricos para comprender las dificultades de los estudiantes en la comprensión del concepto de onda. En: SIMPOSIO DE INVESTIGADORES EN ENSEÑANZA DE LA FÍSICA, VI, 2002, Corrientes, Argentina. **Memorias...** Corrientes, Argentina: APFA, 2002. 1 CD.

WELTI, R. Concepciones de estudiantes y profesores acerca de la energía de las ondas. **Enseñanza de las Ciencias**, Barcelona, v. 20, n. 2, p. 261-270, 2002.

WELTI, R. Obstáculos conceptuales en el aprendizaje de la energía de las ondas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 27, n. 3, p. 487-490, 2005.

WITTMANN, M.; STEINBERG, R.; REDISH, E. Making sense of how students make sense of mechanical waves. **The Physics Teacher**, USA, v. 37, n. 2, p. 15- 29, 1999. Disponible en: <<https://aapt.scitation.org/toc/pte/37/1?expanded=37>>. Acceso en: sep. 2018.

WITTMANN, C. M. The object coordination class applied to wave pulses: Analyzing student reasoning in wave physics. **International Journal of Science Education**, UK, v. 24, n. 1, p. 97-118, 2002.

WITTMANN, C. M.; STEINBERG, R. N.; REDISH, E. F. Understanding and affecting student reasoning about sound waves. **International Journal of Science Education**, UK, v. 25, n. 8, p. 991-1013, 2003.

ZDESLAV, H.; ZOLLMAN, D.; SANJAY REBELLO, N. Identifying students' mental models of sound propagation: The rol of conceptual blending in understanding conceptual change. **Physical Review Physics Education Reaserch**, United States, v. 6, n. 020114, 2010.

Anexo 1

Problema de ondas impartido en un examen final usado como instrumento para indagar sobre las conceptualizaciones de los estudiantes acerca de los parámetros de interés.

1. *¿Qué son las ondas mecánicas?*
2. *Explique ejemplos sobre cómo generar ondas mecánicas transversales senoidales viajeras al menos en tres medios elásticos distintos.*
3. *Para una onda viajera senoidal explique los significados de los siguientes conceptos:*
 - a. *Amplitud*
 - b. *Frecuencia*
 - c. *Longitud de onda*
 - d. *Rapidez de propagación*
 - e. *Fase inicial*
4. *Explique cuál/es son el/los factor/es, o agente/s, que determinan que la onda viajera quede caracterizada por cada uno de los parámetros anteriores (a, b, c, d, e).*
5. *Una onda armónica transversal de frecuencia 80 Hz y amplitud 25 cm se propaga a lo largo de una cuerda tensa de gran longitud, orientada según el eje x , con una velocidad de 12 m/s en su sentido positivo. Sabiendo que en el instante $t = 0$ el punto de la cuerda de abscisa $x = 0$ tiene una elongación $y = 0$, y su velocidad de oscilación es positiva, determine:*
 - a. *La expresión matemática que representa dicha onda.*
 - b. *La expresión matemática que representa la velocidad de oscilación en función del tiempo del punto de la cuerda de abscisa $x = 75$ cm.*
 - c. *Los valores máximos de la velocidad y de la aceleración de oscilación de los puntos de la cuerda.*
 - d. *La diferencia de fase de oscilación en un mismo instante entre dos puntos de la cuerda separados 37,5 cm.*

Anexo 2

Síntesis, para cada LT que conforma la muestra, del análisis realizado del capítulo correspondiente a ondas mecánicas acerca de las explicaciones presentadas por los autores sobre los parámetros y conceptos de interés.

T1: Cussó, López y Villar

Capítulo 22. Ondas: luz y sonido. 2.2 Ondas transversales y longitudinales. Se presenta una cuerda tensa que se perturba continuamente en dirección transversal y se dice que esa perturbación es la que se propaga; lo mismo ocurre en un resorte tenso horizontal que se perturba en la misma dirección que el resorte; y con un diapasón, o un alta voz, y las ondas del sonido. **3. Ondas: características generales. 3.1 Ondas armónicas.** Se menciona que, si

el extremo de la cuerda tensa se desplaza con un movimiento armónico simple, la onda que se genera recibe el nombre de onda armónica. Se presenta la ecuación del desplazamiento de la cuerda respecto a la posición de equilibrio con la función seno y con la fase inicial nula (Ec. 22.1; p. 1042). Luego, sólo se menciona que se puede usar, en general, una función coseno o seno con fase inicial φ_0 , “...donde el uso de la fase inicial φ_0 sólo representa la elección de un origen de tiempo y espacio distintos de cero.” (p. 1042). **3.2 Características de una onda armónica: frecuencia, velocidad de propagación y longitud de onda.** Se presentan matemáticamente a la longitud de onda, periodo y rapidez de propagación, la ecuación de la onda se expresa con constante de fase inicial nula. **3.3 Características de una onda y su relación con la fuente emisora y el medio de propagación.** Se explica adecuadamente que la frecuencia y la amplitud de la onda quedan determinadas por la fuente de vibración, y que la rapidez de propagación depende del medio y a veces de la frecuencia (medio dispersivo). Se señala que la longitud de onda depende en gran medida del medio de propagación ya que está determinada por la frecuencia y la velocidad de propagación, cuando una onda atraviesa la frontera entre dos medios cambia la velocidad de propagación, la frecuencia se conserva por lo que cambia la longitud de onda. Con relación a la etapa de detección se mencionan como ejemplos a la luz y el sonido que son detectados por los ojos y oídos. En los apartados siguientes al escribir la ecuación de onda no se contempla la fase inicial hasta el apartado **3.5 Ondas no armónicas. Análisis de Fourier**, en el que se escribe la ecuación de onda contemplando la fase inicial pero no se hace mención alguna sobre la misma.

T2: Gettys, Keller y Skove

Capítulo 32: Ondas. 32.2. Características de las ondas. Se menciona el caso de un resorte tenso que se agita en un extremo a los fines de generar una onda. En la figura 32.2 (p. 783) se presentan dos esquemas con resortes en los que se muestra una mano perturbando horizontal y verticalmente; a partir de estos esquemas los estudiantes tendrían que “observar” y conceptualizar que la amplitud y frecuencia son impuestas por la fuente perturbadora. **Expresión matemática para una onda viajera** (p. 784). Se propone una función de onda $f(x, t) = f(x + vt)$ o $f(x, t) = f(x - vt)$, se analiza el significado del signo según el sentido de propagación. Se propone la función $y(x, t) = A \text{ sen}[k(x - vt)]$. Se muestra un ejemplo resuelto - Ejemplo 32.1. (p. 785)- que aborda un pulso con una función no senoidal. **32.4. Ondas armónicas.** A partir de la figura 32.12. (p. 788) se representa gráficamente y contra x para una onda de amplitud A y longitud de onda λ . Se señala que A es el desplazamiento máximo de cualquier elemento de la cuerda y se la indica en la figura, y λ es la distancia a que se vuelve a repetir la onda, o la distancia entre dos crestas o valles sucesivos. Se analiza nuevamente el signo del término temporal en la fase. Se señala que para un elemento de la cuerda situado $x = 0$, tenemos $y = A \text{ sen}[-(2\pi v/\lambda) t] = -A \text{ sen}[(2\pi v/\lambda) t]$. Pero, del Capítulo 14, sabemos que un movimiento armónico simple (MAS) con periodo T viene descrito por $y = \text{sen}[(2\pi/T) t]$. Por lo tanto, el elemento realiza un MAS con periodo $T = \lambda/v$ como se muestra en la Figura 32.13.

Cada elemento de la cuerda sigue un MAS con este mismo período” (p. 788). No se señala explícitamente que la frecuencia es la de la fuente perturbadora. Se analiza la relación entre la rapidez de propagación, la longitud de onda y el período. Tampoco se señala que la rapidez depende de las condiciones del medio y que la longitud de onda es una respuesta del medio a la perturbación. Se habla de los parámetros para la descripción de una onda (frecuencia, frecuencia angular, número de onda) y se muestra otra manera conveniente, por concisa, de escribir la ecuación: $y = A \text{ sen } (k x - \omega t)$ señalando que son muy útiles las expresiones entre la rapidez de propagación, la longitud de onda, la frecuencia angular y la temporal, y el número de onda. Luego se indica: “Las funciones de onda que se han presentado hasta ahora no son generales por completo, pues requieren que $y = 0$ cuando $x = 0$ y $t = 0$. La expresión más general incluye una constante de fase ϕ : $y = \text{sen } (k x - \omega t + \phi)$. A menudo es conveniente tomar $x = 0$ y $t = 0$ para que $\phi = 0$, como hicimos en la exposición anterior.” (p. 789). Se concluye que se realiza una descripción del fenómeno ondulatorio centrada en la matemática y no en los significados físicos de los parámetros, ni en su análisis conceptual. **32.5. La ecuación de onda a partir de la segunda ley de Newton** Se analiza un elemento de cuerda llegando a la expresión de la velocidad de propagación en función de la tensión y la densidad lineal de masa (p. 792), válida para los casos en que la longitud de onda es mucho mayor que la amplitud.

T3: Resnick, Halliday y Krane

Capítulo 18: Ondas. 18.1 Ondas mecánicas. “...Las ondas mecánicas se desplazan por un medio elástico. Pueden originarse cuando provocamos una perturbación en algún sitio inicial de este último. La perturbación se desplaza por el medio gracias a las propiedades elásticas del medio.” (p. 401). **18.3 Ondas viajeras. Ondas periódicas armónicas senoidales** (p. 404): “Pongamos por ejemplo, el caso de una onda transversal de forma senoidal... Si la onda se propaga en la dirección $+x$ con la rapidez de fase v , la ecuación de la onda es: $y(x, t) = y_m \text{ sen } \frac{2\pi}{\lambda}(x - v t)$ -Ec. 18-7, p. 404-. El período T de la onda, es el tiempo necesario para que un punto en determinada coordenada x cumpla un ciclo completo de movimiento transversal”. Aquí los autores hacen referencia a que en el capítulo 17 (Oscilaciones) se hizo un análisis sobre f y T , remitiendo a que este punto material en la coordenada x se mueve con un MAS cuya frecuencia es f . “Durante el tiempo T , la onda recorre una distancia $v \cdot T$ que debe corresponder a una longitud de onda λ , así que $\lambda = v \cdot T$ (Ec. 18-8, p. 404). Poniendo la Ec. 18-8 en la 18-7, obtenemos otra expresión de la onda viajera: $y(x, t) = y_m \text{ sen } 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right)$ (Ec. 18-9, p. 404). Para reducir la Ec. 18-9 a una forma más compacta introducimos 2 magnitudes: el número de onda k y la frecuencia angular ω . Se definen por medio de: $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ y $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$ (Ec. 18-10, p. 404). Expresada en estas magnitudes, la ecuación de una onda senoidal que sigue la dirección positiva x es...” y $(x, t) = y_m \text{ sen } (k x - \omega t)$ -Ec. 18-11, p. 404-. “Al comparar las Ec. 18-8 y 18-9, vemos que la

rapidez de fase v de la onda (que a menudo llamaremos rapidez de la onda) está dada por”
 $v = \lambda f = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k}$ -Ec. 18-13, p. 405-. Es decir que hasta aquí los autores del LT definen los parámetros característicos de la onda viajera sin relacionarlos con la fuente perturbadora que la origina ni con el medio en el cual se propaga. En el párrafo final del Ítem **Velocidad transversal de una partícula**, se destaca: “Conviene señalar que, como se explica en la siguiente sección, la rapidez de la onda depende del medio y no de la onda. Por el contrario, la velocidad transversal de la partícula depende de las propiedades de la onda – entre ellas amplitud y frecuencia-,....y no del medio” (p. 405). **Fase y constante de Fase.** “En las ecuaciones de las ondas viajeras (Ec. 18-11, p. 404), hemos supuesto que el desplazamiento y es cero en la posición $x = 0$ y durante el tiempo $t = 0$. Por supuesto, no debe ser así necesariamente. La expresión general de la onda viajera es: $y(x, t) = y_m \text{sen}(kx - \omega t - \Phi)$ -Ec. 18-16, p. 405-. La magnitud que aparece en el argumento, a saber, $kx - \omega t - \Phi$, recibe el nombre de fase de la onda. Al ángulo Φ se le conoce como constante de fase. Esta constante no afecta la forma de la onda; la mueve hacia adelante o hacia atrás en el espacio o en el tiempo” (p. 405). **18-4 Rapidez de onda en una cuerda estirada.** Se menciona: “La rapidez de fase de una onda senoidal puede obtenerse a partir de las propiedades mecánicas del medio material por donde se propaga la onda” (p. 406). “La rapidez de una onda depende de las propiedades del medio,...” (p. 407). Aquí los autores del LT relacionan la rapidez de la onda con las propiedades del medio. Problema 18-1 (p. 406) “En el extremo de una larga cuerda horizontal, una onda senoidal transversal es generada por una barra que mueve el extremo hacia arriba, y hacia abajo una distancia de 1,30 cm. El movimiento es continuo y se repite 125 veces por segundo” “Solución a) “al recorrer la barra un total dilatatorio de e 1,30 cm, el extremo de la cuerda se aleja $1,30 \text{ cm}/2 = 0,65 \text{ cm}$ de la posición de equilibrio, primero hacia arriba y luego hacia abajo; por tanto la amplitud de la onda y_m es 0,65 cm”. En este problema los autores del LT, para un ejemplo particular, relacionan la amplitud del movimiento oscilatorio de la fuente perturbadora (barra) con la amplitud de la onda transversal que se desplaza por la cuerda. Además, se señala que: “El movimiento entero se repite 125 veces por segundo, y por lo mismo la frecuencia es 125 vibraciones por segundo, es decir, $f = 125 \text{ Hz}$ ” (p. 406). Aquí se relaciona la frecuencia de la fuente perturbadora con la de la onda transversal generada en la cuerda.

T4: Roederer

Capítulo 7: Propagación de ondas. a) Propagación de una perturbación elástica.

Se realiza una detallada y didáctica descripción cualitativa de la propagación de una perturbación en un cuerpo inicialmente en equilibrio mencionando que la propagación de la deformación se realiza a una velocidad finita, llamándose a este fenómeno de propagación *onda elástica* (p. 217). Se menciona: “...el trabajo que realizan las fuerzas exteriores durante la percusión inicial se reparte en forma de energía elástica por el cuerpo a medida que la onda avanza por él, ya que, cuando alcanza al punto Q , debe realizar trabajo en su entorno para pro-

ducir la deformación...”; “... mediante la propagación de una onda elástica se puede realizar trabajo ‘a distancia’.” (p. 217). Se describe en detalle el campo de deformaciones en una onda longitudinal y una transversal (ubicando la fuente en $x = 0$) mencionando el fenómeno de polarización. **b) Descripción matemática de una onda elástica plana.** Se estudia la deformación en función de la posición (en un punto fijo), y del tiempo (“fotografía instantánea de la onda”). Se analiza el sentido de propagación y cómo esto influye en el signo del término temporal del argumento de la función perturbación. Se llega a la ecuación diferencial de la onda (p. 220) distinguiéndose que la derivada segunda de la perturbación respecto del tiempo es la aceleración de los puntos del cuerpo en su movimiento de deformación. Se calcula la rapidez de propagación en función de las propiedades elásticas del medio. Se llega a las expresiones correspondientes para: una onda longitudinal en una barra, una onda transversal en una cuerda, para un caso general de medios homogéneos e isotropos (pág. 223). Se hace mención del efecto de dispersión para ondas muy intensas. Se tratan las ondas acústicas, y el caso real de una cuerda tensa. Se señala que el sistema de coordenadas (debería decir, de referencia) para el estudio de las ondas es fijo respecto al medio. **c) Ondas sinusoidales.** Se presenta la perturbación en función de la posición (viajando en sentido creciente de x) y del tiempo, a través de una función senoidal y sólo se menciona que “... ε_0 , k y φ son parámetros... El parámetro ε_0 es la amplitud (deformación máxima) de la onda; φ es la fase inicial y k es el número de onda. Podemos introducir en lugar de k un parámetro más intuitivo: la longitud de onda. Definimos a ésta como la distancia mínima entre dos puntos del medio que en un instante dado tienen igual elongación ε e igual velocidad material $v = \partial\varepsilon/\partial t$. Por lo tanto, deberán distar un valor λ tal que sus argumentos difieran en 2π .” (p. 226 y 227). No se analiza el significado de la fase inicial φ .

T5: Sears, Zemansky, Young, Fredman

Capítulo 15: Ondas Mecánicas. 15.1 Tipos de ondas mecánicas. Se menciona: “...rapidez de la onda, determinada en cada caso por las propiedades mecánicas del medio” (p. 489). **15.2 Ondas periódicas:** “...cuando imprimimos al extremo libre de la cuerda un movimiento repetitivo o periódico...cada partícula de la cuerda tendrá un movimiento periódico al propagarse la onda, y tendremos una onda periódica” (p. 489). Se hace referencia a la figura 15.3 (p. 489) en la que se muestra un cuerpo, apoyado sobre un resorte vertical oscilando, que tiene adosada una cuerda. En el pie de figura se señala: “15.3 Un bloque con masa m unido a un resorte tiene un movimiento armónico simple y produce una onda senoidal que viaja a la derecha por la cuerda. (En un sistema real, se tendría que aplicar una fuerza impulsora a m para reponer la energía que la onda se lleva).”, en la figura 15.3 se aclara que: “El MAS del resorte y la masa genera una onda senoidal en la cuerda. Cada partícula de la cuerda muestra el mismo movimiento armónico simple que el resorte y la masa; la amplitud de la onda es la amplitud de este movimiento”.

En la figura 15.5, se señalan las crestas y los valles de la onda, la amplitud y con flechas la dirección y sentido de propagación. Haciendo referencia a la figura 15.4 (p. 490), en la que se muestra el perfil de la perturbación en distintos tiempos, se señala: “*Cuando una onda senoidal pasa por un medio, todas las partículas del medio sufren un movimiento armónico simple con la misma frecuencia*”. Al presentar la expresión de la rapidez de propagación $v = \lambda \cdot f$ se reitera que depende únicamente de las propiedades mecánicas del medio. Se menciona que, por ahora la rapidez de propagación no depende de la frecuencia, “...*las ondas de todas las frecuencias viajan con la misma rapidez.*” (p. 490). Se abordan las ondas longitudinales perturbando un fluido con un pistón con un movimiento armónico simple. **15.3 Descripción matemática de una onda. Función de onda de una onda senoidal.** Se presenta la función del perturbador en $x = 0$ con la función coseno y se dice que en $t = 0$ el perturbador se halla en el estado de perturbación máximo. No se explica que en esas condiciones la fase inicial es nula. Luego, se explica cómo se incorpora en la fase el término espacial con el signo correspondiente, y se expresan las distintas, y equivalentes, formas de escribir la ecuación de onda.

T6: Serway y Jewett

Capítulo 16 Movimiento ondulatorio. 16.1 Propagación de una perturbación. Se señala que “*Todas las ondas mecánicas requieren 1) alguna fuente de perturbación, 2) un medio que contenga elementos que sean factibles de perturbación y 3) algún mecanismo físico a partir del cual los elementos del medio puedan influirse mutuamente. Una forma de demostrar el movimiento ondulatorio es sacudir un extremo de una larga cuerda que esté bajo tensión y tenga su extremo opuesto fijo como se muestra en la figura 16.1... que representa cuatro instantáneas...*” (p. 450) de lo que los autores llaman “*chichón*” (o pulso). Se presentan a las ondas transversales y longitudinales haciendo referencia a que las segundas viajan más rápido que las primeras. Se presenta a la ecuación $y = f(x \pm vt)$. Se analiza a través de un ejemplo el viaje de un pulso cuya ecuación es $y(x, t) = 2 / [(x - 3,0 t^2) + 1]$ (p. 453) y para otras funciones. **16.2 El modelo de onda progresiva** Se menciona que una onda senoidal se podría establecer en una sogá al agitar el extremo de la sogá hacia arriba y hacia abajo en movimiento armónico simple. Se señala la importancia de distinguir entre la velocidad de propagación y la velocidad de los puntos del medio. Se presenta con la ayuda de la figura 16.8 (p. 455), en la que se muestra la perturbación en función de la posición y del tiempo, la longitud de onda (figura 18.a) y el período (figura 18.b), no se lo relaciona con el período de la fuente perturbadora. Lo mismo sucede con la amplitud. Respecto a la rapidez se menciona, “*Las ondas viajan con una rapidez específica, y esa rapidez depende de las propiedades del medio perturbado.*” (p. 455). Se presenta al número de onda y a la frecuencia angular. En la expresión (16.13) -p. 456- se muestra la expresión general para una onda sinusoidal con constante de fase ϕ y se menciona “... *donde ϕ es la constante de fase tal como se aprendió en el estudio del movimiento periódico en el capítulo 15. Esta constante se determina a partir de las condiciones iniciales.*” (p. 456). No se explica cómo se calcula, ni su significado físico. **On-**

das sinusoidales en cuerdas. Se menciona que, para crear una serie de pulsos, una onda, se sustituye la mano por una varilla oscilatoria que vibre en movimiento armónico simple. Se muestra la figura 16.10 (p. 457) representando instantáneas de la onda creada de esa forma a intervalos de $T/4$. “*Ya que el extremo de la varilla oscila en movimiento armónico simple, cada elemento de la cuerda como el que se encuentra en P, también oscila verticalmente con movimiento armónico simple. Este debe ser el caso porque cada elemento sigue el movimiento armónico de la varilla. Por lo tanto, todo elemento de la cuerda se puede tratar como un oscilador armónico simple que vibra con una frecuencia igual a la frecuencia de oscilación de la varilla...*”. En la figura 16.10 se indican la dirección de perturbación y la longitud de onda. Se escribe la ecuación de onda señalando que si en $t = 0$ la onda es como se muestra en la figura 16.10 b) -en la que la varilla se encuentra en la posición de equilibrio-, la ecuación se puede escribir como $y = A \text{sen}(kx - \omega t)$. Se deducen las expresiones de las componentes de la velocidad y aceleración transversales diferenciando dicha velocidad de la de propagación. No se menciona explícitamente que la amplitud de la onda es la del oscilador, ni se justifica que la fase inicial sea cero. En la “pregunta rápida” 16.3 (p. 458) se pregunta si duplicando la amplitud, cambian la rapidez y la frecuencia de la onda, y la máxima rapidez transversal de un elemento. **16.3 La rapidez de ondas en cuerdas.** A través de un análisis dinámico se llega a la expresión de la rapidez de propagación en función de la tensión y de la densidad lineal de masa, ecuación (16.18) –p. 458-. En la “pregunta rápida” 16.4 (p. 459) se plantea perturbar con la mano un extremo de una cuerda tensa y se pregunta qué pasa con la velocidad de propagación cuando: se mueve la mano más rápidamente hacia arriba y hacia abajo una vez en la misma cantidad, y más lentamente; se mueve la mano una mayor distancia hacia arriba y hacia abajo en la misma cantidad de tiempo, y una distancia menor; se usa una cuerda más pesada de la misma longitud y con la misma tensión, y una cuerda más liviana; se aumenta la tensión manteniendo la densidad lineal de masa, y se disminuye; se mantiene la densidad lineal de masa y se aumenta la tensión. Las dos preguntas calificadas por los autores como “rápidas” mencionadas (que son en realidad de tipo cualitativo) intercaladas en el texto, se consideran de gran valor didáctico. En el ejemplo resuelto 16.3 (p. 460) “*La rapidez de un pulso en una cuerda*”, se presenta el caso de una cuerda fija en un extremo a una pared, que pasa a través de una polea, y en el otro extremo cuelga verticalmente un cuerpo (fig. 16.12, p. 460), se pide la velocidad de propagación. En la solución, bajo el título “*conceptualizar*” se señala: “*En la figura 16.12, el bloque colgante establece una tensión en la cuerda horizontal. Esta tensión determina la rapidez con que la onda se mueve en la cuerda*” (p. 460). En el ejemplo 16.4 “*Rescate del excursionista*” se menciona que un helicóptero sostiene un cable del que se agarra el excursionista y éste intenta enviar señales al helicóptero lanzando pulsos transversales por el cable (denotando que la fuente de perturbación es el excursionista). Se da el tiempo que tarda el pulso en llegar al otro extremo del cable. Se solicita la aceleración del helicóptero.

T7: Tipler y Mosca

Capítulo 15: Movimiento Ondulatorio. 15.1 Movimiento Ondulatorio Simple. Se aclara que las ondas son generadas por una perturbación, que se propaga en un medio: *“Las ondas mecánicas se originan mediante la perturbación de un medio. Cuando se pulsa una cuerda tensa, la perturbación provocada se propaga a lo largo de la misma en forma de un pulso ondulatorio. Su propagación surge de la interacción de cada segmento de la cuerda con los segmentos adyacentes”* (p. 412). **Velocidad de las ondas.** *“Una propiedad general de las ondas es que su velocidad depende de las propiedades del medio y que es independiente del movimiento de la fuente de las ondas. Por ejemplo, la velocidad del sonido de la bocina de un coche depende sólo de las propiedades del aire y no del movimiento del coche”* (p. 432). En el caso de los pulsos de ondas en una cuerda, se muestra la expresión de la velocidad de propagación en función de la tensión en la cuerda y su masa por unidad de longitud (Ec. 15.3, p. 433). La aplicación en contexto de dicha ecuación se realiza en el Ej. 15.1 (p. 433) *“El gusano que corre para salvar su vida”*. En el caso de ondas sonoras en un fluido como el aire o el agua se muestra la expresión de la velocidad en función de su módulo de compresibilidad (adiabático, para ondas sonoras audibles) y la densidad del medio (en equilibrio) -Ec. 15.4, p. 434-. Se concluye que *“Comparando las Ec. 15.3 y 15.4 puede verse que, en general, la velocidad de las ondas depende de una propiedad elástica del medio...”*, p. 434. Se analiza que para el caso de un gas, la velocidad es función de una constante que depende del gas (coeficiente de evolución adiabática), la constante universal de los gases, la temperatura absoluta del gas, y su masa molar (Ec. 15.5, p. 434). En el Ej. 15.2 (p. 435) se calcula la rapidez de propagación de ondas sonoras en aire a distintas temperaturas. **15.2 Ondas periódicas.** Se menciona: *“Si el extremo de una cuerda tensa se mueve en forma periódica hacia arriba y hacia abajo, se genera una onda periódica. Si una onda periódica se mueve a lo largo de una cuerda tensa u otro medio, cada punto del medio oscila con el mismo período”* (p. 438). **Ondas armónicas.** *“Si una onda armónica se mueve en un medio, cada punto del medio oscila siguiendo un movimiento armónico simple”* (p. 438). *“Si un extremo de una cuerda se sujeta a un diapasón que está vibrando con movimiento armónico simple, se produce un tren de ondas sinusoidales que se propaga a lo largo de la cuerda. Este tren de ondas es una onda armónica. La distancia mínima recorrida en el espacio hasta que la función de onda se repite se llama longitud de onda λ . Cuando la onda se propaga por la cuerda, cada punto de la misma se mueve hacia arriba o hacia abajo (perpendicularmente a la dirección de propagación) realizando un movimiento armónico simple cuya frecuencia f es la del diapasón”* (p. 439). La función sinusoidal que describe los desplazamientos en dirección y (perpendicularmente a la dirección de propagación x) es: $y = A \text{sen}(kx + \delta)$ -Ec. 15.11, p. 439-. En donde A es la amplitud, λ la longitud de onda y δ una constante de fase que depende de la elección del origen ($x = 0$); k es el número de onda: $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ (Ec. 15.12, p. 439). En estos párrafos queda claro que la frecuencia de la oscilación depende de la fuente perturbadora; se menciona que la constante de fase depende de la elección del origen $x=0$ para el estudio de la perturbación,

aunque no se explicita la causa. De este modo “Para describir una onda que se mueve en el sentido creciente de x con velocidad v , sustituyamos x en la Ec. 15.11 por $(x - vt)$..., eligiendo δ igual a cero se obtiene”: $y(x, t) = A \sin(kx - \omega t)$ -Ec. 15.13, p. 439-. Para obtener la ecuación anterior en la que se hizo δ igual a cero, se supuso que a $x = 0$; $t = 0 \rightarrow y = 0$, y esto, no se explicita. “En donde $\omega = kv$ (Ec.15.14, p. 439), es la frecuencia angular y el argumento de la función seno, $(kx - \omega t)$, se denomina fase.”, (p. 439). Aquí al definir la fase ya se ha incluido la hipótesis de que la fase inicial se ha tomado igual a cero. “La frecuencia angular está relacionada con la frecuencia f y el período T mediante”: $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ (Ec. 15.15, p. 439). En el Ejemplo 15.6 “Un Altavoz” (p. 445) se plantea que: “Un diafragma de un altavoz de 30 cm vibra con una frecuencia de 1 kHz y una amplitud de 0,020 mm. Suponiendo que las moléculas próximas al diafragma tienen esa misma amplitud de vibración, determinar...”, es decir se hace referencia a que la amplitud de la onda (sonora) es igual a la amplitud a la que vibra la fuente perturbadora (diafragma del altavoz). Algo similar se puede observar si se analiza el primer párrafo y el último del sub-tema “Transferencia de energía a una cuerda mediante ondas”. En el primero (p. 440) se dice: “Consideremos una cuerda sujeta a un diapason. Cuando éste vibra, transfiere energía al segmento de cuerda unido a él.”... Cuando una onda se mueve a lo largo de la cuerda, la energía se transmite por ésta a los restantes segmentos.” mientras que en el último (p. 441) se dice: “Obsérvese que tanto la potencia media como la energía transmitidas son proporcionales al cuadrado de la amplitud de la onda”. Sin embargo, aquí esto se indica implícitamente y es el lector quien debe hacer la relación correspondiente.



Direito autoral e licença de uso: Este artigo est licenciado sob uma [Licena Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).