

Evaluación del entendimiento de ondas mecánicas utilizando un test de opción múltiple en español

Evaluation of the understanding of mechanical waves using a multiple-choice test in Spanish

Pablo Barniol*¹, Genaro Zavala^{2,3}

¹Tecnologico de Monterrey, Escuela de Humanidades y Educacion, Monterrey, Mexico

²Tecnologico de Monterrey, Escuela de Ingenieria y Ciencias, Monterrey, Mexico

³Universidad Andres Bello, Facultad de Ingenieria, Santiago, Chile

Recibido en 20 de mayo, 2019. Aceptado en 23 de junio, 2019

El “Mechanical Waves Conceptual Survey (MWCS)”, es el test de opciones múltiples más importante diseñado hasta la fecha para evaluar el entendimiento de estudiantes universitarios en cuatro temas de ondas mecánicas: propagación, superposición, reflexión y ondas estacionarias. En este estudio se presenta una modificación significativa de este test en español. El test fue implementado con 418 estudiantes que terminaban un curso que cubre los temas evaluados por el test en una universidad privada mexicana. Los cuatro objetivos del presente artículo son: (1) presentar el test en español y su proceso de rediseño, (2) mostrar que es un instrumento de evaluación confiable con poder discriminatorio adecuado, (3) exponer un análisis detallado del entendimiento de los estudiantes en los conceptos evaluados en el test, y (4) establecer recomendaciones específicas, basadas en los análisis previos, para la instrucción de estos conceptos. De esta forma, este artículo ofrece un análisis exhaustivo de dificultades de entendimiento, recomendaciones basadas en investigación y un test disponible en el Apéndice que pueden ser empleados por investigadores del área de la enseñanza de la física, y por profesores que enseñen el tema de ondas mecánicas en cursos de física en países hispanohablantes.

Palabras clave: Test de onda mecánicas, test de opción múltiple, análisis de confiabilidad, análisis de entendimiento.

The “Mechanical Waves Conceptual Survey (MWCS)”, is the most important multiple-choice test designed to date to evaluate the understanding of university students in four themes of mechanical waves: propagation, superposition, reflection, and standing waves. In this study, we present a significant modification of this test in Spanish. We administered the test to 418 students who finished a course that covers the topics tested by the survey in a private Mexican university. The four objectives of this article are: (1) to present the test in Spanish and its redesign process, (2) to show that it is a reliable evaluation instrument with adequate discriminatory power, (3) to present a detailed analysis of students’ understanding on the concepts evaluated in the test, and (4) to establish specific recommendations, based on the previous analyzes, for the instruction of these concepts. In this way, this article offers a comprehensive analysis of understanding difficulties, research-based recommendations and the test available in the appendix that can be used by researchers in the field of physics education, and by teachers who teach the subject of mechanical waves in physics courses in Spanish-speaking countries.

Keywords: Mechanical waves test, multiple choice test, reliability analysis, analysis of understanding.

1. Introducción

Los tests de opción múltiple son muy valorados en el área de la educación de la física, ya que son muy útiles para evaluar el aprendizaje conceptual de una población grande de estudiantes y el análisis estadístico de los datos recabados permite una mayor generalización de los hallazgos [1, 2]. Estos tests deben cumplir con un proceso de diseño adecuado [1] y con pruebas estadísticas de confiabilidad y poder discriminatorio [3]. En el área de la educación de la física se han diseñado varios tests de este tipo para evaluar el entendimiento conceptual en: vectores [4, 5], fuerzas [6], movimiento [7], momento y

energía [8], principio de Arquímedes en el contexto de flotación [9], electricidad y magnetismo [10].

En 2009, Tongchai et al. [11] presentaron el “Mechanical Waves Conceptual Survey (MWCS)”, que es el test más importante diseñado hasta la fecha para evaluar el entendimiento de estudiantes universitarios en cuatro temas de ondas mecánicas: propagación, superposición, reflexión y ondas estacionarias. Este test ha sido muy utilizado en el área de la educación de la física [12, 13]. Al analizar el test, se pudo constatar que este tenía varios puntos que podían ser mejorados. Por ejemplo: varias preguntas tenían problemas de diseño, varias preguntas de opción múltiple no tenían las cinco respuestas posibles recomendadas en el área, varias preguntas tenían

*Correo electrónico: pablo.barniol@tec.mx

un formato de dos niveles (“two-tier” en inglés) que no es recomendado en el área [14], y varias preguntas no eran independientes entre sí, como se recomienda para preguntas de opción múltiple [15]. Teniendo en cuenta estos puntos, se decidió modificar de manera significativa el test convirtiéndolo en un test estándar de opción múltiple con cinco opciones para cada pregunta. En un estudio nuestro anterior [16] se presentó una modificación significativa de este test en inglés. En el presente estudio se presenta la versión modificada del test en español. Los cuatro objetivos del presente artículo son: (1) presentar el test en español y su proceso de rediseño, (2) mostrar que la versión modificada en español es un instrumento de evaluación confiable con poder discriminatorio adecuado, (3) presentar un análisis detallado del entendimiento de los estudiantes en los conceptos evaluados en el test, y (4) establecer recomendaciones específicas, basadas en investigación, para la instrucción de estos conceptos.

La originalidad del presente artículo radica en dos puntos. El primer punto se centra en la necesidad apremiante de realizar un análisis del test modificado en su versión en español. Varios investigadores, como Lindell y Ding [17], han señalado la importancia de analizar la confiabilidad de los instrumentos de evaluación al realizar un cambio del idioma en estos instrumentos. En el presente artículo se da a conocer y analiza por primera vez la confiabilidad del test modificado en su versión en español. El test presentado en el Apéndice puede ser utilizado por investigadores del área de la enseñanza de la física, y por profesores que enseñan el tema de ondas mecánicas en países hispanohablantes [18, 19]. El segundo punto se centra en los análisis y las recomendaciones instruccionales, que se presentan en el presente artículo, y pueden también servir a investigadores y profesores para diseñar material instruccional [20, 21] destinado a mejorar el entendimiento de los estudiantes en este tema.

2. Revisión de literatura

Hasta la fecha existen en la literatura tres tests de opción múltiple que evalúa la comprensión de los estudiantes en el tema de ondas: (1) un test para estudiantes de secundaria [22], (2) un test para estudiantes universitarios de nivel introductorio: el “Mechanical Waves Conceptual Survey (MWCS)” [11], y (3) un test para estudiantes universitarios de nivel avanzado [23]. Varios investigadores, antes y después del diseño del MWCS, han analizado las dificultades que tienen los estudiantes en los cuatro temas de este test: (1) Propagación [24-33], (2) Superposición [27, 28, 31, 34-36], (3) Reflexión [34], y (4) Ondas estacionarias [37]. Además, algunos estudios han propuesto nuevos materiales de instrucción o modificaciones curriculares en el tema de ondas mecánicas [29, 31, 34, 37, 38]. Como se mencionó anteriormente, el test MWCS ha sido utilizado en el área de la educación de la física para evaluar el entendimiento de los estudiantes en ondas mecánicas [12, 13]. Sobre esto último, es muy im-

portante notar que nuestra versión modificada del test ha empezado a ser también utilizada en el área [39, 40].

3. Metodología y proceso de rediseño del test

En esta sección se establece la metodología de la implementación del test y se cubre el primer objetivo de este estudio: presentar el test en español y su proceso de rediseño.

3.1. Participantes

Este estudio de investigación se llevó a cabo en una universidad privada de México. El campus cuenta con 15,000 estudiantes de pregrado, de los cuales la mitad son estudiantes de ingeniería en diversos campos. Su plan de estudios incluye cuatro cursos introductorios de física. En el tercer curso, “Fluidos, ondas y termodinámica”, los alumnos estudian los cuatro temas evaluados en el MWCS.

El libro de texto para este curso es “Física para científicos e ingenieros” por Serway y Jewett [41]. Los estudiantes también asisten a sesiones de laboratorio de las cuales cuatro son del tema de las ondas. Durante las dos primeras sesiones, trabajan con dos de los “Tutoriales para Física Introductoria” de McDermott y Shaffer [42]: “Superposición y reflexión de pulsos” y “Reflexión y transmisión”. Luego, en las últimas dos sesiones de laboratorio, los estudiantes estudian ondas estacionarias en cuerdas y ondas estacionarias sonoras. El test modificado (MWCS modificado en español) que se muestra en el Apéndice se aplicó a los participantes después de haber llevado el curso descrito anteriormente. Es importante mencionar que para la traducción del MWCS modificado al español se consultó a investigadores de diversos países hispanohablantes (México, España y Chile) para lograr una traducción que evitara posibles particularidades de vocabulario y pueda ser utilizada en todos los países hispanohablantes.

3.2. Descripción de la versión modificada del test

La Tabla 1 muestra una descripción de la versión modificada del test. La tabla muestra los temas y los subtemas evaluados en el test, así como una descripción del concepto evaluada en de cada pregunta.

4. Análisis de confiabilidad y poder discriminatorio del test modificado en español

En esta sección se cubre el segundo objetivo de este estudio: mostrar que la versión modificada del test en español es un instrumento de evaluación confiable con poder discriminatorio adecuado siguiendo el análisis recomendado

Tabla 1: Descripción de la versión modificada del test.

Tema	Subtema	Pregunta	Concepto evaluado
Propagación	Variables del sonido	1	Interpretación de amplitud y frecuencia
	Velocidad de ondas sonoras	2	Velocidad en el aire independiente de la frecuencia
		3	Velocidad en aire independiente de frecuencia y amplitud
	Velocidad de ondas en cuerdas	4	Velocidad proporcional a la tensión e independiente de los cambios en el movimiento de la mano (concepto ligeramente modificado)
		5	Velocidad proporcional a densidad y tensión
	Desplazamiento del medio en ondas sonoras	6	Oscilación longitudinal de partículas de aire perturbadas
		7	Aumento de frecuencia: la oscilación es más rápida
		8	Aumento de la amplitud: la oscilación es más amplia
Superposición	Superposición- Construcción	9	Superposición de dos ondas durante el traslape
	Superposición- Destrucción	10	Superposición de dos ondas después del traslape
		11	Superposición de dos ondas durante el traslape
	12	Superposición de dos ondas después del traslape	
Reflexión	Reflexión-Extremo fijo	13	Reflexión completa de un pulso asimétrico
		15	Media reflexión de un pulso simétrico
	Reflexión-Extremo libre	14	Reflexión completa de un pulso asimétrico
		16	Media reflexión de un pulso simétrico
Ondas estacionarias	Ondas estacionarias transversales en cuerdas	17	Al aumentar la frecuencia en la cuerda, la longitud de onda de la nueva onda estacionaria disminuye
		18	Al aumentar la tensión en la cuerda, la longitud de onda de la nueva onda estacionaria aumenta
		19	Al aumentar la densidad de la cuerda, la longitud de onda de la nueva onda estacionaria aumenta
	Ondas estacionarias longitudinales en sonido	20	Patrón de desplazamiento de las moléculas de aire dentro de un cilindro abierto en un extremo en el primer armónico
		21	Patrón de desplazamiento de las moléculas de aire dentro de un cilindro abierto en ambos extremos en el primer armónico (Nueva pregunta)
		22	El tono generado por el aire soplado en el extremo de una botella será mayor cuando contenga un mayor volumen de agua

por Ding et al. [3]. Se realizan cinco pruebas estadísticas: tres pruebas se enfocan en el análisis individual de los ítems del test (índice de dificultad del ítem, índice de discriminación del ítem y coeficiente de punto biserial del ítem) y dos pruebas en el análisis de todo el test (confiabilidad del test y delta de Ferguson). Los autores señalan que si el test cumple con estas cinco pruebas se puede concluir que el test es un test confiable con un poder discriminatorio satisfactorio.

4.1. Índice de dificultad

El índice de dificultad (P) es, según Ding et al. [3], una medida de dificultad de un ítem del test. El rango recomendado por los autores para este índice es entre 0.3 y 0.9. En la Tabla 2 se muestran los índices de dificultad de cada uno de los ítems del test. Se observa que la mayoría de las preguntas cumplen con los criterios establecidos y que sólo una pregunta se encuentra por debajo del valor recomendado (0.3): pregunta 9 (0.29). Sin embargo, el índice de dificultad promedio del test es 0.46 (Tabla 3) está en el rango recomendado [0.3, 0.9], y de hecho es muy cercano al valor óptimo (0.5) identificado por los investigadores.

4.2. Índice de discriminación

El índice de discriminación (D) es, según Ding et al. [3], una medida del poder de discriminación que tiene cada ítem del test. Los autores establecen dos criterios

para este índice: (1) eliminar los ítems con índices de discriminación negativos y (2) que la mayoría de los ítems tengan un buen índice de discriminación, con un valor mayor o igual a 0.3. En la Tabla 2 se muestran los índices de discriminación de cada uno de las preguntas del test (utilizando el método 25 %-25 %). Se observa que todas las preguntas cumplen con los criterios establecidos. Ding et al. [3] también recomiendan calcular el índice de discriminación promedio del test, sugiriendo un valor mayor o igual a 0.3. El índice de discriminación promedio del test utilizando el método 25 %-25 % (0.50, ver Tabla 3) cumple con el criterio recomendado.

4.3. Coeficiente punto biserial

Ding et al. [3] mencionan que el coeficiente punto biserial (r_{pbs}) es una medida de la consistencia de un ítem con todo el test, y que básicamente refleja la correlación entre las calificaciones de los estudiantes en un ítem con las calificaciones en todo el test. Los autores recomiendan seguir el criterio de que un ítem con una buena confiabilidad tiene un valor mayor o igual a 0.2. En la Tabla 2 se muestran los coeficientes puntos biserial de cada pregunta del test. Se observa que todas las preguntas cumplen con los criterios establecidos. Los autores también recomiendan calcular el promedio de los coeficientes punto biserial que es la suma de todos los coeficientes dividida por el número de ítems en el test. El rango recomendado para este promedio también es mayor o igual a 0.2. El

Tabla 2: Índice de dificultad del ítem (P), índice de discriminación del ítem (D) y coeficiente punto biserial (r_{pbs}) para cada una de las preguntas del test.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
P	0.66	0.44	0.38	0.41	0.64	0.33	0.32	0.31	0.29	0.79	0.44
D	0.34	0.49	0.54	0.57	0.55	0.61	0.63	0.61	0.54	0.51	0.44
r_{pbs}	0.29	0.40	0.43	0.44	0.39	0.53	0.53	0.55	0.47	0.46	0.37
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
P	0.65	0.53	0.36	0.39	0.31	0.56	0.30	0.47	0.43	0.64	0.39
D	0.63	0.56	0.41	0.68	0.33	0.47	0.47	0.30	0.51	0.35	0.55
r_{pbs}	0.47	0.43	0.34	0.53	0.29	0.33	0.42	0.28	0.43	0.29	0.46

Tabla 3: Resumen de pruebas estadísticas realizadas para el test.

Prueba estadística	Valores deseados	Test
Índice de dificultad	[0.3, 0.9]	Promedio: 0.46
Índice de discriminación	$\geq 0,3$	Promedio: 0.50
Coficiente punto biserial	$\geq 0,2$	Promedio: 0.41
Índice Kuder-Richardson	$\geq 0,7$ para medidas grupales	0.79
Delta de Ferguson	>0.9	0.98

promedio de los coeficientes punto biserial (0.41, Tabla 3) cumple también con este criterio.

4.4. Índice de confiabilidad Kuder-Richardson y Delta de Ferguson

El índice de confiabilidad de Kuder-Richardson es una medida de la consistencia de todo el test. Ding et al. [3] establecen el criterio ampliamente aceptado de que un índice de confiabilidad mayor a 0.7 es confiable para medidas de grupo, lo que es muy utilizado en la mayoría de contextos en educación de la ciencia. El valor obtenido en este índice para el test es de 0.79 (Tabla 3) que cumple con este criterio. La delta de Ferguson es una medida del poder discriminatorio de un test que investiga que tan ampliamente están distribuidas las calificaciones de un test en el rango posible. Ding et al. [3] recomiendan seguir el criterio de que un test que ofrece un buen poder de discriminación es mayor a 0.9. La delta de Ferguson del test es 0.98 (Tabla 3) que se encuentran dentro del rango recomendado por los autores.

4.5. Resumen de las cinco pruebas estadísticas

En la Tabla 3 se muestra el resumen de las cinco pruebas estadísticas recomendadas por Ding et al. [3]. Como se observa todos los valores promedio cumplen con lo recomendado por los investigadores. A partir de esto es posible afirmar que el test es un instrumento de evaluación confiable y con poder discriminatorio adecuado.

5. Análisis del entendimiento de los estudiantes en los conceptos evaluados en el test

En esta sección se cubre el tercer objetivo de este estudio: presentar un análisis detallado del entendimiento de los estudiantes en los conceptos evaluados en el test. En la Tabla 4 se presentan los porcentajes de respuesta correcta de las preguntas de la versión modificada.

5.1. Desempeño general de los estudiantes a partir de las calificaciones

El promedio de las calificaciones obtenidas de la población de 418 estudiantes que terminaban el curso que cubre los temas evaluados por el test en una universidad privada mexicana es 10.03 de los 22 puntos posibles (cada pregunta vale 1 punto). Este promedio, expresado como porcentaje del posible total de puntos, es 46%, que corresponde con el índice promedio de dificultad mostrado en la Tabla 3 (0.46). Es interesante notar que los estudiantes que se encuentran en el promedio (10.03) tienen dificultad para contestar 12 de las 22 preguntas de la versión modificada.

5.2. Identificación de los subtemas más difíciles para los estudiantes

Para realizar esta identificación, primeramente, se clasificaron las preguntas por nivel de dificultad. En la Tabla 5 se muestra esta clasificación por rango de porcentajes de respuesta correcta.

Como se observa en la Tabla 5, 10 preguntas muestran un nivel alto de dificultad ya que obtuvieron porcentajes de respuesta correcta menor al 40%. Estas preguntas son 3, 6, 7, 8, 9, 14, 15, 16, 18, 22. Dos puntos llaman la atención al analizar estas preguntas. El primer punto es que estas preguntas se encuentran en los cuatro temas evaluados por el test: Propagación, Superposición, Reflexión y ondas estacionarias. El segundo punto es que dos subtemas “Desplazamiento del medio en ondas sonoras” y “Reflexión-Extremo libre” son los más difíciles para los estudiantes, ya que todas las preguntas de estos subtemas tienen un nivel alto de dificultad. En el primer subtema se encuentran tres preguntas (preguntas 6, 7 y 8) y en el segundo subtema se encuentran dos preguntas (preguntas 14 y 16).

Tabla 4: Resultados obtenidos en la versión modificada del test. El porcentaje de respuesta correcta está en negrita.

Subtema	Pregunta	Concepto evaluado	Opciones (%)				
			A	B	C	D	E
Variables del sonido	1	Interpretación de amplitud y frecuencia	17	66	2	9	6
Velocidad de ondas sonoras	2	Velocidad en el aire independiente de la frecuencia	44	39	5	3	10
	3	Velocidad en aire independiente de frecuencia y amplitud	10	3	40	38	8
Velocidad de ondas en cuerdas	4	Velocidad proporcional a la tensión e independiente de los cambios en el movimiento de la mano (concepto ligeramente modificado)	27	11	12	41	9
	5	Velocidad proporcional a densidad y tensión	64	8	9	6	13
Desplazamiento del medio en ondas sonoras	6	Oscilación longitudinal de partículas de aire perturbadas	1	33	29	13	24
	7	Aumento de frecuencia: la oscilación es más rápida	9	32	8	32	19
	8	Aumento de la amplitud: la oscilación es más amplia	31	9	34	19	7
Superposición- Construcción	9	Superposición de dos ondas durante el traslape	28	17	20	29	6
	10	Superposición de dos ondas después del traslape	79	10	4	6	2
Superposición- Destrucción	11	Superposición de dos ondas durante el traslape	12	18	44	20	6
	12	Superposición de dos ondas después del traslape	65	14	8	9	5
Reflexión-Extremo fijo	13	Reflexión completa de un pulso asimétrico	9	12	5	53	21
	15	Media reflexión de un pulso simétrico	26	39	6	23	6
Reflexión-Extremo libre	14	Reflexión completa de un pulso asimétrico	20	36	13	20	11
	16	Media reflexión de un pulso simétrico	31	11	8	36	12
Ondas estacionarias transversales en cuerdas	17	Al aumentar la frecuencia en la cuerda, la longitud de onda de la nueva onda estacionaria disminuye	12	3	26	56	3
	18	Al aumentar la tensión en la cuerda, la longitud de onda de la nueva onda estacionaria aumenta	30	19	22	22	6
	19	Al aumentar la densidad de la cuerda, la longitud de onda de la nueva onda estacionaria aumenta	29	8	47	8	8
Ondas estacionarias longitudinales en sonido	20	Patrón de desplazamiento de las moléculas de aire dentro de un cilindro abierto en un extremo en el primer armónico	24	11	43	12	10
	21	Patrón de desplazamiento de las moléculas de aire dentro de un cilindro abierto en ambos extremos en el primer armónico (Nueva pregunta)	12	3	6	13	64
	22	El tono generado por el aire soplado en el extremo de una botella será mayor cuando contenga un mayor volumen de agua	39	18	8	18	16

Tabla 5: Clasificación de preguntas por nivel de dificultad.

Nivel de dificultad	Rango de porcentaje de respuesta correcta	Preguntas
Alto	Menor al 40 %	3, 6, 7, 8, 9, 14, 15, 16, 18, 22
Medio	40 %-50 %	2, 4, 11, 19, 20
Bajo	Mayor al 50 %	1, 5, 10, 12, 13, 17, 21

5.3. Errores frecuentes

En esta subsección, se presenta un análisis general de los errores más frecuentes en las preguntas de cada subtema.

Propagación

Variables del sonido. La pregunta 1 es la única pregunta de este subtema y evalúa la interpretación de la amplitud y frecuencia en ondas sonoras. La pregunta prueba si un estudiante entiende que una persona, que canta al mismo volumen que otra persona, pero con un tono más alto, generará una onda de sonido con la misma amplitud, pero con una frecuencia diferente. Como se observa en la Tabla 4, el 66 % de los estudiantes responden esta pregunta correctamente (opción B), y el error más frecuente (opción A, 17 %) es confundir frecuencia con amplitud.

Velocidad de las ondas sonoras. Las preguntas 2 y 3 son de este subtema. La pregunta 2 evalúa si los estudiantes entienden que la velocidad de las ondas de sonido en el aire es independiente de la frecuencia de las ondas. En esta pregunta, los estudiantes deben comparar la velocidad de dos ondas de sonido con diferentes frecuencias y la misma amplitud en el aire. La respuesta correcta es que ambas velocidades son iguales, ya que la velocidad del sonido depende solo de las propiedades del aire. El 44 % de los estudiantes respondieron esta pregunta correctamente eligiendo la opción A. El error más frecuente (opción B, 39 %) seleccionado por los estudiantes indica que la velocidad de la onda con la frecuencia más alta es más rápida, utilizando la ecuación $v = f\lambda$. Estos estudiantes no se dan cuenta de que la velocidad del sonido en el aire es independiente de la frecuencia de la onda. La multiplicación de la frecuencia por la longitud de onda es la velocidad de la onda. Dado que la frecuencia es diferente, los estudiantes podrían pensar que la velocidad será diferente porque (según la ecuación) depende de la frecuencia. Sin embargo, no se dan cuenta de que cuando la frecuencia es diferente en el mismo medio, en este caso aire, la longitud de onda también cambia en consecuencia para producir la misma velocidad. Por otra parte, la pregunta 3 evalúa si los estudiantes comprenden que la velocidad de las ondas de sonido en el aire es independiente de la frecuencia

y amplitud de las ondas. Esta pregunta es muy similar a la anterior, ya que le pide al estudiante que compare las velocidades de dos ondas de sonido en el aire con diferentes amplitudes, pero con las mismas frecuencias. Una vez más, la respuesta correcta es que ambas velocidades son iguales. Solo el 40 % de los estudiantes (opción C) respondieron esta pregunta correctamente. El error más común (opción B, 41 %) se debe nuevamente a la concepción inadecuada de que ambas velocidades son iguales porque ambas ondas tienen la misma frecuencia, usando la ecuación $v = f\lambda$.

Velocidad de onda en cuerdas. Las preguntas 4 y 5 prueban el entendimiento de este subtema. La pregunta 4 evalúa la comprensión de que la velocidad de una onda en una cuerda es proporcional a la tensión de la cuerda e independiente de los cambios en el movimiento de la mano que genera la onda. El concepto evaluado en esta pregunta fue ligeramente modificado en la versión modificada del test. Sólo el 41 % (opción D) contesta correctamente la pregunta respondiendo que para generar una onda más rápida se debe mover la mano *“hacia arriba y hacia abajo de la misma manera en que la movió para producir el pulso original, pero con la cuerda más tensa.”* El error más frecuente (opción A, 27 %) es la concepción alternativa de que para generar una onda más rápida se debe mover la mano *“hacia arriba y hacia abajo más rápidamente manteniendo la misma altura que el pulso original.”*

La pregunta 5 presenta la misma situación de la pregunta 4 y evalúa el entendimiento de que la velocidad de la onda depende de la tensión y en forma inversa de la densidad. El 64 % contesta correctamente esta pregunta, eligiendo la opción A, de que para generar una onda más rápida se debe *“usar una cuerda más ligera con la misma tensión, porque la velocidad aumenta cuando la densidad disminuye.”* El error más frecuente (opción E, 13 %) es considerar que la velocidad de la onda es independiente de la densidad y la tensión de la cuerda. Esta opción establece que no se puede lograr que la onda sea más rápida *“ni cambiando la cuerda ni cambiando la tensión de la cuerda, porque la velocidad está determinada por la frecuencia y la longitud de onda según $v = f\lambda$ ”*.

Desplazamiento del medio en ondas sonoras. Las preguntas 6 a 8 son de este subtema. La pregunta 6 evalúa la comprensión de la oscilación longitudinal de una partícula de aire perturbada por ondas de sonido. Esta pregunta les pide a los estudiantes que describan el movimiento de una partícula perturbada por una onda de sonido frente a un altavoz. Solo el 33 % responde esta pregunta correctamente (opción B) entendiendo que la partícula oscilaría longitudinalmente de lado a lado: *“Se moverá hacia adelante y hacia atrás con respecto a la misma posición”*. En el error más frecuente (opción C, 29 %), los estudiantes tienen la concepción inadecuada de que la partícula oscilaría de arriba abajo como si fuera en una onda transversal. Por otra parte, la pregunta 7 evalúa la comprensión de los estudiantes de que un aumento

en la frecuencia de las ondas de sonido producirá una oscilación más rápida de una partícula de aire. El 32 % de los estudiantes elige la respuesta correcta: *“Se moverá hacia adelante y hacia atrás más rápido que antes, con respecto a la misma posición”*. El error más frecuente (opción D, que tiene el mismo porcentaje que la respuesta correcta, 32 %) es una continuación de la respuesta incorrecta del problema 6, en donde se elige la opción: *“Se moverá hacia arriba y hacia abajo más rápido que antes, con respecto a la misma posición”*. Por último, la pregunta 8 evalúa si los estudiantes entienden que un aumento en la amplitud de una onda de sonido producirá una oscilación más amplia de una partícula de aire. Esta pregunta es una continuación de la anterior y pregunta si el cambio en el movimiento de la partícula produciría una onda de sonido con mayor amplitud. La respuesta correcta es que el movimiento producirá una oscilación más amplia (opción A): *“Se moverá hacia adelante y hacia atrás una distancia mayor que antes, con respecto a la misma posición”*. Solo el 31 % de los estudiantes contestaron esta pregunta correctamente. El error más frecuente (opción D, 34 %) es una continuación de las respuestas incorrectas más frecuentes en las preguntas 6 y 7 y considera el movimiento de la partícula como una amplitud más amplia del movimiento en una onda transversal. Los estudiantes tienden a responder pensando que las ondas sonoras son transversales, aunque sus respuestas (las más frecuentes) coincidan en un razonamiento correcto de las relaciones entre las cantidades físicas asociadas.

Superposición

Superposición constructiva. Las preguntas 9 y 10 son de este subtema. La pregunta 9 pide a los estudiantes que elijan el dibujo correcto de la superposición constructiva de dos ondas en el momento de traslape. Solo el 29 % (opción D, ver Tabla 4) responde correctamente eligiendo la opción que muestra la adición de desplazamientos debidos a cada pulso de onda punto por punto. El error más común es elegir un dibujo que no muestra superposición cuando los puntos máximos de las ondas no se superponen (opción A, 28 %). La pregunta 10 es una continuación de la pregunta 9 y pide a los estudiantes que elijan el dibujo correcto de la superposición constructiva de las dos ondas después del momento del traslape. El 79 % de los estudiantes selecciona la respuesta correcta (opción A), que muestra dos ondas que han pasado a través de la otra y conservaron su forma. El error más frecuente (opción B, 10 %) es elegir un dibujo que muestra ondas más pequeñas con la justificación conceptualmente inadecuada *“las ondas se han hecho más pequeñas porque han chocado y por lo tanto perdido energía”*.

Superposición destructiva. Las preguntas 11 y 12 son de este subtema. La pregunta 11 es muy similar a la pregunta 9, pero pregunta sobre la superposición destructiva de dos ondas en el momento de la superposición. El 44 % responde correctamente eligiendo la opción que muestra la adición de desplazamientos debi-

dos a cada impulso de onda punto por punto (opción C). El error más frecuente es elegir un dibujo que tiene una forma aproximadamente correcta, pero que carece de la precisión necesaria para ser considerada correcta (opción D, 20%). La pregunta 12 es una continuación de la pregunta 11 y pide a los estudiantes que elijan el dibujo correcto de la superposición destructiva de dos ondas después del momento de traslape. En este caso, el 65% responde correctamente al elegir la opción A que muestra que las ondas han pasado una a través de la otra y han mantenido su forma. El error más común (opción B, 14%) es elegir la opción *“las ondas se han cancelado mutuamente”*.

Reflexión

Reflexión-Extremo fijo. Las preguntas 13 y 15 son parte de este subtema. La pregunta 13 pide elegir el dibujo correcto que muestra la reflexión completa de un pulso asimétrico moviéndose a lo largo de una cuerda hacia la derecha hacia un extremo fijo. La respuesta correcta es un dibujo que muestra un pulso en el lado opuesto de la cuerda e invertido verticalmente. El 53% de los estudiantes contestaron correctamente (opción D, ver Tabla 4). El error más común es la opción E (21%), que muestra un pulso reflejado en el lado correcto de la cuerda (lado opuesto) pero sin inversión vertical. La pregunta 15 está relacionada, ya que requiere seleccionar el dibujo de una media reflexión de un pulso simétrico en una cuerda que se mueve hacia un extremo fijo. En este caso, la respuesta correcta es la opción que muestra la cuerda en su forma original, como si no hubiera pulso, porque el pulso medio reflejado cancela el medio pulso que aún no se ha reflejado. El 39% de los alumnos contestaron esto correctamente (opción B). El error más común es elegir la opción A (26%), que muestra únicamente el medio pulso que aún no se ha reflejado sin considerar el medio pulso reflejado.

Reflexión-Extremo libre. Las preguntas 14 y 16 son de este subtema. La pregunta 14 pide elegir el dibujo correcto que muestra la reflexión completa de un pulso asimétrico moviéndose a lo largo de una cuerda hacia la derecha hacia un extremo libre. En este caso, la respuesta correcta es un pulso en el mismo lado de la cuerda, pero con una inversión vertical. Sólo el 36% de los estudiantes responde correctamente (opción B). Una de las opciones incorrectas más frecuentes, la opción D (20%), muestra un pulso en el lado inadecuado de la cuerda, pero con la inversión vertical adecuada. La pregunta 16 está relacionada, ya que requiere seleccionar el dibujo de una media reflexión de un pulso simétrico en una cuerda que se mueve hacia un extremo libre. En este caso, la respuesta correcta es un pulso con doble amplitud. Sólo el 31% responde esta pregunta correctamente (opción A). El error más común (opción D, 36%) es elegir la opción que representa únicamente el medio pulso sin reflejar en el mismo lado de la cuerda.

Como se puede observar en estos dos subtemas de reflexión, el porcentaje de respuestas correctas son similares

y los estudiantes tienen problemáticas similares confundiendo ambos casos y no tomando en cuenta la reflexión de los pulsos. Esto puede denotar que los estudiantes con estas problemáticas, pueden solo estar recurriendo a la memoria para responder sin realmente hacer un análisis de los casos.

Ondas estacionarias

Ondas estacionarias transversales en cuerdas.

Las preguntas 17 a 19 son de este subtema. La pregunta 17 evalúa el entendimiento de que, al aumentar la frecuencia en una cuerda, manteniendo sin cambio otras variables involucradas, la longitud de onda de la nueva onda estacionaria disminuye. Recordemos que el fenómeno físico para esta situación está representado por las ecuaciones: $v = \sqrt{T/\mu}$, $f = v/\lambda$. El 56% de los estudiantes contesta correctamente esta pregunta eligiendo la opción D: *“La longitud de onda disminuye porque ésta es inversamente proporcional a la frecuencia ya que la velocidad no cambia”*. El error más frecuente (opción C, 26%) es una respuesta correcta con razonamiento incorrecto: *“La longitud de onda disminuye porque ésta es directamente proporcional a la frecuencia ya que la velocidad no cambia.”* Como se observa, estos estudiantes tienen el error conceptual de que la longitud de onda es directamente proporcional a la frecuencia.

La pregunta 18, es una continuación de la situación que se presenta en la pregunta 17. Esta pregunta evalúa el entendimiento de que, al aumentar la tensión en la cuerda, la longitud de onda de la nueva onda estacionaria aumenta. Sólo el 30% de estudiante contesta correctamente esta pregunta (opción A): *“La longitud de onda aumenta porque a medida que la tensión aumenta, la rapidez de la onda se incrementa.”* En esta pregunta se encuentran dos respuestas incorrectas más frecuentes con porcentaje de selección igual al 22%: opciones C y D. En estas dos opciones se contesta incorrectamente que la longitud de onda disminuye debido a dos distintos razonamientos: en la opción C *“porque a medida que la tensión aumenta, la rapidez de la onda se incrementa”* (que es el razonamiento correcto), y en la opción D *“porque a medida que la tensión aumenta, es más difícil hacer que la cuerda vibre”* (que es un razonamiento incorrecto).

Por último, la pregunta 19, es una continuación de la situación física presentada en las preguntas 17 y 18. La pregunta 19 evalúa el entendimiento de que, al aumentar la densidad de la cuerda, la longitud de onda de la nueva onda estacionaria aumenta. El 47% de los estudiantes elige la respuesta correcta A: *“La longitud de onda disminuye porque a medida que la cuerda se hace más pesada, la rapidez de la onda decrece”*. El error más frecuente (opción A, 29%) es respuesta incorrecta con razonamiento correcto: *“La longitud de onda aumenta porque a medida que la cuerda se hace más pesada, la rapidez de la onda decrece”*.

Ondas estacionarias longitudinales en sonido.

Las preguntas 20 a 22 son de este subtema. La pregunta 20 pregunta por el patrón de desplazamiento de las

moléculas de aire dentro de un cilindro abierto en un extremo en el primer armónico. El 43 % de los estudiantes elige la opción C que es la correcta. Recordemos que el primer patrón armónico se extiende desde un antinodo en el lado abierto hasta un nodo adyacente en el lado cerrado. El error más frecuente es la elección de la opción A (24 %) que muestra un patrón que se extiende desde un nodo en el lado abierto hasta un nodo adyacente en el lado cerrado. Por otra parte, la pregunta 21 está relacionada, pregunta por el patrón de desplazamiento de las moléculas de aire dentro de un cilindro abierto en ambos extremos en el primer armónico. En este caso, el 64 % contesta correctamente la pregunta eligiendo la opción E. Recordemos que el primer patrón armónico se extiende desde un antinodo en el primer lado abierto hasta un antinodo adyacente en el segundo lado abierto. En esta pregunta, el error más frecuente es la opción D con porcentaje de elección del 13 % que muestra un patrón que se extiende desde un nodo en el primer lado abierto hasta un segundo antinodo adyacente en el lado cerrado.

Por último, la pregunta 22 evalúa la comprensión de que el tono generado por el aire soplado en el extremo de una botella será mayor cuando contenga un mayor volumen de agua. El 39 % elige la respuesta correcta (opción A): *“El tono del segundo sonido sería más alto que el tono del primero porque la columna de aire se hace más corta y la longitud de onda cambia.”* En esta pregunta se observan dos errores más frecuentes con porcentaje de selección igual al 18 %: opción B y D. Un error frecuente (opción B) con porcentaje de selección igual al 18 % es *“El tono del segundo sonido sería más alto que el tono del primero porque hay una columna de aire más corta, por lo que las moléculas de aire tienen menos espacio para vibrar.”*

6. Recomendaciones para la instrucción de los conceptos evaluados en el test

Esta sección cubre el cuarto objetivo de este estudio: establecer recomendaciones específicas, basadas en los análisis previos, para la instrucción de los conceptos evaluados en el test. McDermott [43] señala que todo cambio curricular debe partir de una investigación del entendimiento de los estudiantes. El análisis del entendimiento conceptual de los estudiantes en el test, realizado en la sección anterior, cumple con este rol de investigación y permite establecer recomendaciones para la instrucción de estos conceptos.

Al analizar la distribución de las calificaciones se notó que los estudiantes que están en el promedio de la distribución (10.03 de 22) tienen dificultades para contestar correctamente 12 de las 22 preguntas del test. Los cuatro temas de ondas mecánicas, propagación, superposición, reflexión y ondas estacionarias, que cubre el test son conceptos que los estudiantes deberían haber adquirido en los primeros cursos de física a nivel universitario. Este

resultado muestra la necesidad de modificar la instrucción en estos temas para incrementar el entendimiento conceptual de los estudiantes de estos conceptos.

Después de este análisis se agruparon las preguntas del test según grado de dificultad y se identificaron los subtemas más difíciles para los estudiantes. Se observó que las preguntas más difíciles para los estudiantes con un porcentaje correcto de selección menor al 40 % eran las siguientes: 3, 6, 7, 8, 9, 14, 15, 16, 18, 22. (ver conceptos evaluados en estas preguntas en Tabla 4). Se notó que estas preguntas más difíciles se encuentran en los cuatro temas, propagación, superposición, reflexión y ondas estacionarias, evaluados por el test y que dos subtemas “desplazamiento del medio en ondas sonoras” (del tema de propagación) y “reflexión-extremo libre” (del tema reflexión) son los más difíciles para los estudiantes, ya que todas las preguntas de estos subtemas tienen un nivel alto de dificultad. De esto se desprende la recomendación de enfatizar la instrucción de los conceptos evaluados en estas preguntas y subtemas.

Por último, McDermott [43] propone también que los errores conceptuales persistentes deben ser abordados explícitamente en la instrucción. En el artículo se identificó y describió de manera detallada el error más frecuente para todas las preguntas del test. Los profesores universitarios de física pueden utilizar este catálogo de errores al planificar su instrucción para los conceptos evaluados en el test. Sobre esto, parece conveniente considerar especialmente los errores con porcentajes de selección mayor al 30 % que se encuentran en los ítems relacionados 2, 3 y 7, 8. En los ítems 2 y 3 (opciones B) se observa el error frecuente de considerar que la velocidad de las ondas de sonido en el aire es dependiente de la frecuencia de las ondas, mientras que en los ítems 7 y 8 (opciones D) se constata el error frecuente de considerar la oscilación de una partícula de aire perturbada por ondas de sonido como si fueran ondas transversales en lugar de ondas longitudinales.

7. Conclusiones

El “Mechanical Waves Conceptual Survey (MWCS)”, es el test de opciones múltiples, con preguntas en formato estándar y de dos niveles, más importante diseñado hasta la fecha para evaluar el entendimiento de estudiantes universitarios en cuatro temas de ondas mecánicas: propagación, superposición, reflexión y ondas estacionarias. En este estudio se presentó primeramente una modificación significativa de este test en español explicitando su proceso de rediseño. Después de detallar el proceso de rediseño, en el presente artículo se mostró que la versión modificada de este test en español es un instrumento de evaluación confiable con poder discriminatorio adecuado. Posteriormente, se realizó un análisis detallado del entendimiento de los estudiantes en los temas y subtemas evaluados en el test. Se analizó el desempeño general de los estudiantes a partir de las calificaciones, se identifica-

ron los subtemas más difíciles para los estudiantes, y se describieron los errores más frecuentes en cada una de las preguntas del test. Finalmente, se establecieron recomendaciones específicas, basadas en los análisis previos, para la instrucción de estos conceptos.

Es muy importante enfatizar en esta conclusión, que el test modificado presentado en el Apéndice puede ser utilizado por investigadores del área de la enseñanza de la física, y por profesores que enseñan estos conceptos en países hispanohablantes. El test podría ser utilizado para analizar el entendimiento de los estudiantes de estos conceptos en diferentes instituciones, para investigar las ganancias de aprendizaje de los estudiantes y para probar la efectividad del nuevo material instruccional [18, 19]. Además, las recomendaciones instruccionales establecidas en este artículo podrían ser consideradas por investigadores y profesores para diseñar nuevo material instruccional [20, 21] destinado a mejorar el entendimiento de los estudiantes de estos conceptos.

Material suplementario

El siguiente material suplementario está disponible en línea:

Apéndice - Evaluación diagnóstica de ondas mecánicas.

Referencias

- [1] R. Beichner, American Journal of Physics **62**, 750 (1994).
- [2] E. F. Redish, American Journal of Physics **67**, 562 (1999).
- [3] L. Ding, R. Chabay, B. Sherwood y R. Beichner, Physical Review Special Topics -Physics Education Research **2**, 1 (2006).
- [4] P. Barniol y G. Zavala, Revista mexicana de física E **60**, 86 (2014).
- [5] P. Barniol y G. Zavala, Physical Review Special Topics - Physics Education Research **10**, 1 (2014).
- [6] D. Hestenes, M. Wells y G. Swackhamer, Physics Teachers **30**, 141 (1992).
- [7] R. K. Thornton y D. R. Sokoloff, American Journal of Physics **66**, 338 (1998).
- [8] C. Singh y D. Rosengrant, American Journal of Physics **71**, 607 (2003).
- [9] L.V.M. Niño, R. Sánchez, F. Cañada, y G. Martínez, Revista Brasileira De Ensino De Física **38**, 1 (2016).
- [10] D.P. Maloney, T.L. O’Kuma, C.J. Hieggelke y A. Van Heuvelen, American Journal of Physics **69**, S12 (2001).
- [11] A. Tongchai, M.D. Sharma, I.D. Johnston, K. Arayathanikul y C. Soankwan, International Journal of Science Education **31**, 2437 (2009).
- [12] A. Tongchai, M.D. Sharma, I.D. Johnston, K. Arayathanikul y C. Soankwan, Physical Review Special Topics - Physics Education Research **7**, 1 (2011).
- [13] P. Barniol y G. Zavala, Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education **13**, 929 (2017).
- [14] W.K. Adams y C.E. Wieman, International Journal of Science Education **33**, 1289 (2011).
- [15] B.B. Frey, S. Petersen, L.M. Edwards, J.T. Pedrotti y V. Peyton, Teaching and Teacher Education **21**, 357 (2005).
- [16] P. Barniol y G. Zavala, Physical Review Physics Education Research **12**, 1 (2016)
- [17] R. Lindell y L. Ding, AIP Conference Proceedings **1513**, 27 (2013).
- [18] R.R. Hake, American Journal of Physics **66**, 64 (1998).
- [19] J. E. Parreira, Revista Brasileira de Ensino de Física **40**, 1 (2018).
- [20] P.F.T. Dorneles, I.S. Araujo y E.A. Veit, Revista Brasileira De Ensino De Fisica, **28**, 487 (2006).
- [21] P. Barniol y G. Zavala, Revista Brasileira de Ensino de Física **37**, 3501 (2015).
- [22] I. Caleon y R. Subramaniam, International Journal of Science Education **32**, 939 (2010).
- [23] T.R. Rhoads y R.J. Roedel, 28th Annual Frontiers in Education Conference **13c1**, 14 (1999).
- [24] C.J. Linder y G.L. Erickson, International Journal of Science Education **11**, 491 (1989).
- [25] C.J. Linder, Physics Education **27**, 258 (1992).
- [26] C.J. Linder, International Journal of Science Education **15**, 655 (1993).
- [27] C.M. Wittmann, N. Steinberg y E.F. Redish, Physics Teacher **37**, 15 (1999).
- [28] C. M. Wittmann, International Journal of Science Education **24**, 97 (2002).
- [29] C.M. Wittmann, R.N. Steinberg y E.F. Redish, International Journal of Science Education **25**, 991 (2003).
- [30] Z. Hrepic, D.A. Zollman y N.S. Rebello, Physical Review Special Topics - Physics Education Research **6**, 1 (2010).
- [31] E.M. Kennedy y J.R. De Bruyn, Canadian Journal of Physics **89**, 1155 (2011).
- [32] A. Pejuan, X. Bohigas, X. Jaén y C. Periago, Journal of Science Education and Technology **21**, 669 (2012).
- [33] M. Kryjevskaja, M.R. Stetzer y P.R.L. Heron, American Journal of Physics **80**, 339 (2012).
- [34] M. Kryjevskaja, M.R. Stetzer y P.R.L. Heron, American Journal of Physics **79**, 508 (2011).
- [35] S.K. Sengören, R. Tanel y N. Kavcar, Physics Education **41**, 453 (2006).
- [36] D.J. Grayson, Computers in Physics **10**, 30 (1996).
- [37] L. Zeng, C. Smith, G.H. Poelzer, J. Rodriguez, E. Corpuz y G. Yanev, Physical Review Special Topics - Physics Education Research **10**, 1 (2014).
- [38] R. Bhathal, M. D.Sharma y A. Mendez, European Journal of Physics **31**, 23 (2010).
- [39] M.G. Reyes y S. Rakkapao, Journal of Physics: Conference Series **1144**, 012046 (2018).
- [40] A. Madsen, S.B. McKagan y E.C. Sayre, American Journal of Physics **85**, 245 (2017).
- [41] R.A. Serway y J.W. Jewett, *Física para ciencias e ingeniería* (Cengage Learning, Mexico, 2008).
- [42] L. C. McDermott y P. Shaffer, *Tutoriales para Física Introductoria* (Pearson, México, 2001).
- [43] L. C. McDermott, American Journal of Physics **69**, 1127 (2001).