

**DEL EFECTO DOPPLER Y SUS IMPLICACIONES, UNA REFLEXION CON
INTENCIONALIDAD PEDAGOGICA**

**DEL EFECTO DOPPLER Y SUS IMPLICACIONES.
UNA REFLEXIÓN CON INTENCIONALIDAD PEDAGÓGICA**

Trabajo presentado como requisito para optar al título de Licenciado en Física

Yessika Jazmín Londoño Rodríguez

Director de trabajo de grado:

María Mercedes Ayala


UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
DEPARTAMENTO FÍSICA
LÍNEA DE PROFUNDIZACIÓN: Enseñanza de las ciencias desde una perspectiva
cultural.
Bogotá-Colombia
2016

Agradezco

*A mi madre Luz Edilma Rodríguez y a mi hermano Johan Steven Rodríguez, por su
acompañamiento en la realización de este trabajo y en el cumplimiento de mis metas.*

*A la profesora María Mercedes Ayala, mi asesora, por su paciencia, colaboración y aportes
académicos en la elaboración de este trabajo*

*A Ismael Rodríguez por sus aportes conceptuales y constante apoyo en la realización del
trabajo.*

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <small>UNIVERSITY OF PEDAGOGY</small>	FORMATO	
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE	
Código: FOR020GIB	Versión: 01	
Fecha de Aprobación: 10-10-2012	Página 3 de 50	

1. Información General	
Tipo de documento	Trabajo de Grado
Acceso al documento	Universidad Pedagógica Nacional. Biblioteca Central
Título del documento	Del efecto Doppler y sus implicaciones, una reflexión con intencionalidad pedagógica.
Autor(es)	Londoño Rodríguez, Yessika Jazmín
Director	María Mercedes Ayala
Publicación	Bogotá. Universidad Pedagógica Nacional, 2016. 50 pág.
Unidad Patrocinante	Universidad Pedagógica Nacional De Colombia
Palabras Claves	ONDAS, CARACTERÍSTICAS CINEMÁTICAS, ENSEÑANZA DE LAS CIENCIAS, EFECTO DOPPLER, SONIDO, LUZ.

2. Descripción
<p>El presente trabajo sintetiza la comprensión lograda y la reflexión realizada con una intencionalidad pedagógica sobre el efecto Doppler y el modelo ondulatorio con lo que se busca aportar a la problemática planteada en su enseñanza y en ese sentido explicitar elementos que puedan tenerse en cuenta en el momento de abordar esta temática en el aula.</p> <p>El trabajo se basa en la convicción de que el maestro debe ejercer un papel activo frente al conocimiento disciplinar; en particular expresar lo que comprende de una temática científica haciendo uso sus modos de sus propias palabras e ideas, que le permita interactuar en torno a ella con los estudiantes y compañeros maestros, así como establecer un dialogo con los textos donde circula el saber científico. Establecer cómo abordar una temática y cuáles son los aspectos que considera centrales hace parte de su compromiso y quehacer.</p>

3. Fuentes

INVESTIGACIONES DIDACTICAS

Bravo, S., & Pesa, M. y. (2009). REPRESENTACIONES DE ALUMNOS UNIVERSITARIOS SOBRE PROPAGACIÓN DE ONDAS MECÁNICAS. *Investigación didáctica*.

Granés S. y Luz Marina Caicedo (1992) DEL CONTEXTO DE LA PRODUCCIÓN DE CONOCIMIENTOS AL CONTEXTO DE LA ENSEÑANZA. Análisis de una experiencia pedagógica, *Departamento de Física. Universidad Nacional de Colombia*

López Ferrero, C. Reflexiones sobre la enseñanza-aprendizaje de los textos explicativos en la universidad, Universitat Pompeu Fabra (Barcelona)

Welti, Reinaldo (2012.) El rol de las analogías matemáticas como generador de teorías físicas, *Laboratorio de Vibraciones y Ondas, Departamento de Física y Química, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Avenida Pellegrini 250, 2000 Rosario, Argentina, Diciembre*

LIBROS DE TEXTO BACHILLERATO Y UNIVERSITARIOS

F. Bueche (1990) Fundamentos de física 2, undécimo grado, vol. 2, editorial Mc Graw Hill latinoamericana

Olga Lucía Romero M, Mauricio Bautista B. (2011) Hipertexto 2 de física, EDITORIAL SANTILLANA S.A.

Paul Allen Tipler, Gene Mosca (2005), física para ciencia y tecnología, vol. 1, editorial Reverte.

Raymond Serway, J. J. (2008). *Física para ciencias e Ingenierías*. México D.F.: CENGAGE learning.

LIBROS ESPECIALIZADOS EN ONDAS

French, A.P. (1974). Vibraciones y ondas curso del MIT. Reverté.

OTRAS FUENTES (Documentos Originales y textos de enseñanza)

James Clerck Maxwell, ETER, Traducción realizada por Juan Carlos Orozco, profesor asistente del departamento de Física de la Universidad pedagógica nacional a partir del texto en ingles publicado en NIVEN, W.D (Edit) "the scientific papers of James Clerck Maxwell", vol. 2, Dover publications, Inc New Cork 1965

4. Contenidos

El trabajo se desarrolla en dos partes. En la primera parte que consta de dos capítulos se busca destacar aspectos claves a tener en cuenta la hora de comprender el modelo ondulatorio desde las características que hemos logrado configurar como tales a partir del análisis documental realizado, contrastándolas con las presentaciones que se hacen de éstas en los libros de texto.

Capítulo I: algunos problemas que surgen a presentación que hacen los textos del modelo ondulatorio

Aquí se busca determinar dificultades en la comprensión del movimiento ondulatorio atendiendo las formas de presentación de la temática de ondas que se encuentran en los textos de enseñanza de la física a nivel introductorio.

Capítulo II: las ondas una segunda aproximación

En el segundo capítulo se hace una presentación de las ondas a nivel introductorio destacando los aspectos que deben ser tenidos en cuenta como claves en la comprensión del movimiento ondulatorio

Capítulo III: el efecto Doppler y la relatividad del movimiento

En esta parte, se hace una presentación del efecto Doppler, basada en la comprensión obtenida del modelo ondulatorio y de la problemática que surge cuando se relacionan las ondas con sistemas de referencia en movimiento.

5. Metodología

Dado el carácter conceptual e interpretativo que le imprime al trabajo el sentido expresado en los dos primeros párrafos de este capítulo, se puede decir que la metodología seguida es de tipo cualitativo. La pregunta es el eje dinamizador del trabajo y constructor del sentido y significado de las situaciones y textos analizados. Su realización implica una actitud crítica por parte del investigador y el establecimiento de una relación de diálogo con los autores trabajados.

La ruta utilizada para el desarrollo del trabajo estuvo encaminada primero a realizar una indagación de corte histórico donde se dio lugar a conocer la concepción del autor original del fenómeno Christian Doppler y el contexto en donde se generó su caracterización.

Luego se realizó un análisis documental que involucro tres tipos de documentos: Uno, textos de física de nivel introductorio que abordaban el tema de las ondas y del efecto Doppler (uno de nivel medio y dos de física general, de nivel universitario. Dos, un texto especializado en ondas a nivel intermedio: Vibraciones y ondas (French, A.P. 1974), el cual fue una fuente muy importante en la comprensión del fenómeno ondulatorio. Y por último, artículos de investigación en donde se analiza la problemática de la enseñanza de las ondas. Los libros de texto fueron escogidos de acuerdo a las opiniones de algunos estudiantes de licenciatura en física y a opinión personal del

autor siendo estos los más usados a nivel de grado once y cursos introductorios de física de ondas en la licenciatura.

Finalmente se logra dejar una reflexión del análisis realizado en torno a la comprensión del fenómeno, donde se evidencia el aporte que la investigación realiza en la enseñanza de la física en el cual se brindan algunos elementos para la construcción de estrategias de enseñanza del modelo ondulatorio y por lo tanto del efecto Doppler.

6. Conclusiones

Debido al gran papel que siguen jugando los libros de texto en la escuela es preocupante que los textos no hagan una presentación del modelo ondulatorio suficientemente satisfactoria como para que se comprenda con su lectura que es una onda, sus características y se pueda interpretar con la imagen formada fenómenos físicos para los que este modelo resulte pertinente. No tratan a profundidad las características cinemáticas ni las ponen en contexto para que el estudiante las relacione con su cotidianidad

Usualmente se tiene esa imagen de una onda como una función sinusoidal que expresa la configuración del medio, muy seguramente por las formas de representación gráficas usadas. Para dar una idea más acertada de onda sería conveniente para iniciar tomar como referencia inicial las ondas de agua y tener en cuenta que se puede diferenciar entre lo que es onda y lo que no es bajo las siguientes tres condiciones: 1. hay una interacción entre una fuente y el medio y éste es perturbado; 2. un efecto producido en un lugar genera un efecto en un lugar distante al cabo de un tiempo y de manera contigua (produciendo efectos en los puntos intermedios); y 3. la información (el efecto producido por la fuente) es lo que se desplaza y no el medio. Además se debe estudiar el proceso de la propagación. Por ello también se considera clave el seguir la perturbación en el espacio (frente de onda) y la velocidad del frente de onda y anclar todo a la idea de propagación para ver los cambios que experimenta el medio a medida que la perturbación se propagaba, **ya que estudiar estos cambios significa observar la onda**. Es igualmente conveniente examinar la propagación de la perturbación de un medio como un proceso continuo, en el cual se debe tener en cuenta toda la acción, desde la producción de la perturbación hasta la recepción de la misma. Para ello también se considera clave el seguir la perturbación en el espacio (frente de onda) y la velocidad del frente de onda. Al respecto es necesario desarrollar es necesario mencionar el concepto de fase el cual permite saber qué puntos del espacio se encuentran en un mismo estado de vibración. Sin embargo las apreciaciones que se dan en el trabajo sobre el frente de onda se están planteando a nivel introductorio o como punto de partida, con esto se ofrece una entrada al estudio de las ondas. Además se debe tener en cuenta que suceden conjuntamente cambios tanto espacial como temporalmente. De acuerdo con esto se hace necesario profundizar sobre las formas de presentar tanto gráfica como matemáticamente una onda y para el caso de las ondas periódicas examinar detalladamente la relación que se guarda entre la periodicidad espacial y temporal y la velocidad de propagación.

Respecto al fenómeno del efecto Doppler clásico es importante que tanto el maestro como el estudiante relacionen las características cinemáticas de la onda para poder comprender lo que está sucediendo con la onda si alguno de los dos; receptor o emisor de la onda se mueven; ya que es confuso entenderlo por medio de la simple expresión matemática. En el trabajo se incluye una

deducción matemática de las formulas con la representación gráfica correspondiente dirigida a estudiantes de grado once. La representación gráfica de la onda juega un papel aquí importante.

A la hora de intentar comprender el efecto Doppler relativista es necesario tener en cuenta las dos máximas consideraciones; no existe un medio que sirva como marco de referencia absoluto y que la velocidad de la luz es la misma para cualquier observador en cualquier marco de referencia. En el caso de la luz al no mirarse la alteración de un medio sustancial no hay un marco de referencia preferencial que se pueda privilegiar como fijo desde el cual pueda observarse el fenómeno ondulatorio, cosa que no sucede en el caso mecánico.

La relación de las características cinemáticas de la onda y las cualidades luminosas o sonoras (tono o color) sigue siendo un campo problemático, trabajar el tono y el color debe ser todo un objeto de estudio debido a que la percepción de estas cualidades se torna difícil y a que entre estas cualidades y la frecuencia emitida y percibida están estrechamente ligadas a estas cualidades. Aunque en el trabajo no se profundiza en este sector, llama la atención el poco énfasis que se hace a la parte sensible con relación a la parte física del efecto Doppler.

Una apreciación importante es que hay fuentes valiosas en donde es más satisfactoria la explicación y la relación de las características cinemáticas, por ejemplo (French, 1974) en donde se hace un estudio minucioso de la onda y se observa la preocupación del autor por tener claridad sobre la propagación, la configuración del medio, y la descripción de estos. Como este otros textos podrían ser llevados al aula teniendo en cuenta el hecho de que no son textos autosuficientes, que generan escenarios de discusión y tienen explicaciones más satisfactorias o porque no pensar en el uso de textos originales según su pertinencia.

Cuando se consultó el documento original donde Doppler enuncia su trabajo sobre el cambio aparente de frecuencia debido a los movimientos de fuente y/o receptor se nota que Doppler sigue pensando que la velocidad se sumaba o restaba si la fuente se movía. Sin embargo se sabe que el observo en principio el fenómeno para la luz, estudiando el movimiento de las estrellas dobles en donde se debía tener en cuenta que la velocidad de la luz era muy grande comparada con la velocidad de fuente o receptor y que además de ello era constante y la misma para cualquier marco de referencia.

Elaborado por:	Yessika Jazmín Londoño Rodríguez
Revisado por:	María Mercedes Ayala

Fecha de elaboración del Resumen:	09	06	2016
--	----	----	------

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
CONTEXTO PROBLEMATICO	1
PREGUNTA PROBLEMA, OBJETIVOS Y METODOLOGIA	5
CAPÍTULO I: ALGUNOS PROBLEMAS QUE SURGEN A PRESENTACIÓN QUE HACEN LOS TEXTOS DEL MODELO ONDULATORIO	7
Consideraciones generales sobre los textos de enseñanza.....	7
La concepción de onda utilizada en los textos escolares.....	13
El efecto Doppler y su concepción.....	16
CAPÍTULO II: LAS ONDAS UNA SEGUNDA APROXIMACION	18
¿Qué se entiende por onda?.....	18
Sobre la perturbación y su propagación.....	20
Características cinemáticas de la onda.....	23
Sonido y luz, que los hace ondas: Su carácter sensorial.....	27
CAPÍTULO III: EL EFECTO DOPPLER Y LA RELATIVIDAD DEL MOVIMIENTO	30
Consideraciones sobre el efecto Doppler	30
Como se entiende el efecto Doppler	31
Deducción de las ecuaciones caso clásico.....	32
Efecto Doppler relativista.....	36
Deducción de las ecuaciones caso relativista.....	37
CONCLUSIONES	40
BIBLIOGRAFÍA	41

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo sintetiza la comprensión lograda y la reflexión realizada con una intencionalidad pedagógica sobre el efecto Doppler y el modelo ondulatorio con lo que se busca aportar a la problemática planteada a continuación y en ese sentido explicitar elementos que puedan tenerse en cuenta en el momento de abordar esta temática en el aula.

El trabajo se basa en la convicción de que el maestro debe ejercer un papel activo frente al conocimiento disciplinar; en particular expresar lo que comprende de una temática científica haciendo uso sus modos de hablar, que le permita interactuar en torno a ella con los estudiantes y compañeros maestros, así como establecer un dialogo con los textos donde circula el saber científico. Establecer cómo abordar una temática y cuáles son los aspectos que considera centrales hace parte de su compromiso y quehacer.

CONTEXTO PROBLEMÁTICO

Es importante antes de hablar de un tema de una disciplina científica en específico, situarnos desde un referente histórico que nos permita distinguir ciertos aspectos que fueron importantes en el desarrollo del trabajo, en este el tema central a tratar es un problema de corte epistemológico, que se evidencia en el campo de la enseñanza de las ondas, el cual es la comprensión del efecto Doppler y todas los aspectos que lo construyen como tal. Como anteriormente se dijo para poder involucrarse en el tema es necesario ver sus orígenes y por tanto como se entendía cuando se inició su estudio.

El efecto Doppler fue descubierto por el físico austriaco Christian Andreas Doppler a mediados del año 1842; como esta enunciado en varias fuentes el efecto ocurre cuando una fuente en movimiento perturba el medio. En esta situación, si la fuente se acerca a un observador éste percibirá que la frecuencia de las ondas por él recibidas es mayor que aquella de emisión; mientras que si la fuente se aleja del observador, éste detectará que las ondas detectadas tienen una frecuencia menor. De manera repetidas en la bibliografía se asocia el fenómeno a ondas sonoras y los ejemplos dados son, pues, en el campo del sonido.

Sin embargo, el científico Christian Andreas Doppler presentó el efecto refiriéndose a la luz mediante la publicación; “*Sobre la coloración de la luz en las estrellas dobles*”¹. En ella hacia sus hipótesis con relación a la luz y no había realizado un estudio anterior que diera cuenta del fenómeno para las ondas mecánicas, lo que trae a escena en este trabajo el cuestionamiento; ¿por qué es más pertinente asociar en la enseñanza del efecto Doppler a las ondas sonoras si con relación a la historia se evidencio primero en ondas lumínicas?

La historia del descubrimiento del fenómeno muestra que Doppler luego confirmó lo que había planteado para la luz con las ondas sonoras, realizando el siguiente experimento:

¹ Doppler, C. (1842). Sobre la coloración de la luz en las estrellas dobles. Praga: ETH-Biblioteca Zürich.

Utilizó una locomotora para realizar sus observaciones. Colocó un grupo de músicos en un ferrocarril y les indicó que tocaran la misma nota musical mientras que otro grupo de músicos, en la estación del tren, registraba la nota musical que oían mientras el tren se acercaba y alejaba de ellos sucesivamente. Como lo vemos realmente no fue tan evidente el fenómeno de forma inmediata para Doppler en las ondas sonoras.

Doppler había planteado el fenómeno para las ondas lumínicas pero esto al no poder ser comprobado tuvo cierto rechazo, más adelante el científico Fizeau realizó la medición de la velocidad de la luz y generalizó el trabajo de Doppler. Así en el año de 1848, éste determinó que los cuerpos celestes que se acercan hacia la Tierra son vistos de color azul y los que se alejan se ven de color rojo. Esto, en términos generales, significa que las ondas de luz, cuando se aproximan hacia el observador se dirigen hacia el extremo ultravioleta del espectro y cuando se alejan, se aproximan hacia el extremo infrarrojo del espectro, es decir, que las frecuencias de las ondas lumínicas, al igual que las de las ondas sonoras, se vuelven más altas cuando se aproximan al observador y más bajas cuando se distancian de éste.

En esta parte de la historia de la generalización del efecto Doppler tanto para la luz como para las ondas sonoras vemos la asociación de la frecuencia en el campo de la luz a lo que comúnmente llamamos “color” y en el sonido a lo que le llamamos “tono”, las cuales son características de estas ondas que se nos es permitido percibir con nuestros órganos sensoriales, esta parte es una parte fundamental de este trabajo, que al hacer una diferenciación muchas veces se muestra como aspecto problemático.

Como lo vemos en la historia del descubrimiento y desarrollo tanto teórico como experimental de este fenómeno ha transcurrido un proceso que se ha plasmado a través de los años en documentos y libros de texto para su difusión. En su abordaje y comprensión incluso en el aspecto histórico se puede evidenciar a este fenómeno del efecto Doppler como poco comprensible por diferentes razones que esperamos abordar en este trabajo, como lo es el tema de la diferencia de este fenómeno para el caso luminoso o el caso sonoro.

El trabajo tiene como objetivo identificar qué tipo de dificultades surgen al querer comprender un fenómeno ondulatorio de este tipo que está presente en la cotidianidad y es de gran importancia en el desarrollo de explicaciones del universo como en el caso de la astronomía y en otros ámbitos por ejemplo en la medicina para los exámenes ecográficos.

Los siguientes tres aspectos consideramos son fuentes de dificultades que no permiten lograr una comprensión del efecto mediante la presentación que hacen de éste los textos de enseñanza:

- **La presentación que hacen los textos del modelo ondulatorio y de su relación con el efecto Doppler**

Al estudiar el fenómeno de manera personal, o al ser abordado en el aula de clase es común hacer uso de diferentes libros de texto que el maestro o el estudiante consideran adecuados para su estudio; en estos textos se hace una presentación del tema de forma general poco explícita y por tanto no facilita la comprensión del tema. En la mayoría de los textos de

secundaria² referencian el cambio de frecuencia sufrido por una onda debido al movimiento a través de una ecuación y ejemplifican con el caso del sonido. Si bien en los textos universitarios³ hay una deducción de dicha expresión matemática, no son suficientemente claros los argumentos involucrados en las deducciones.

De hecho la parte que se considera más problemática para el estudiante que inicia el estudio del efecto Doppler son las deducciones matemáticas que se realizan en los textos, en particular su relación con el modelo ondulatorio, cuya caracterización cinemática involucra conceptos como lo son la frecuencia, la longitud de onda, los frentes de onda, la velocidad de propagación, etc. De otra parte la forma como afecta la velocidad de la fuente a la onda es un problema que amerita ser discutido ampliamente. Preguntas como las siguientes son válidas para los estudiantes a la hora de estudiar en modelo ondulatorio y por lo tanto el efecto Doppler: ¿la velocidad de la fuente afecta la velocidad de propagación? ¿Afecta la longitud de onda?, incluso ¿se afecta la forma de la onda? (si cuando estaba la fuente en reposo la onda era sinusoidal, cuando la fuente se mueve ¿sigue siendo sinusoidal? ¿Por qué? Estas concepciones asociadas deberían relacionarse de manera directa con la deducción matemática que se presente, proporcionando también un análisis gráfico que corresponda a la deducción matemática. Lo cual lleva al cuestionamiento sobre la relación que debe existir entre la representación matemática (analítica) y la representación gráfica del fenómeno.

- **No se tematiza la diferencia existente del efecto Doppler para el caso mecánico y para el caso electromagnético.**

Así como se hace un abordaje al sonido que se podría pensar confuso y poco explícito, también se ve que no se dedica en los textos de nivel básico un espacio para mostrar que el fenómeno no solo se presenta en ondas sonoras sino también en otro tipo de ondas, como lo son el resto de las ondas mecánicas y también ondas electromagnéticas como lo es el caso de la luz. Al no realizar esta presentación de las diferentes ondas, el estudiante podría pensar que no pertenece el fenómeno a estas ondas y no lo asociaría con ellas. En el libro de **Paul A. Tipler, física preuniversitaria** se hace una presentación para las ondas sonoras y también se toca el tema de las ondas electromagnéticas pero de manera tangencial, el autor presenta la diferencia entre este efecto en ondas mecánicas y en ondas electromagnéticas así: “*se dice que las ecuaciones para describir el fenómeno cambian porque van en contra de la relatividad de Einstein, en donde es imposible detectar un movimiento absoluto y por*

² En el texto **Santillana, Investiguemos 11**, por ejemplo se hace una presentación del fenómeno en el capítulo de acústica o sonido, en el cual se dedica un numeral a explicar que es el efecto Doppler. Muestra mediante ecuaciones como son las frecuencias para 3 casos específicos que en los libros denominan como los más comunes: cuando la fuente está en movimiento y el receptor en reposo, cuando la fuente esta en reposo y el receptor en movimiento y cuando la fuente y el observador se encuentran en movimiento. Para los tres casos anteriores presentan las ecuaciones de las frecuencias percibidas por el observador. Al presentar estas ecuaciones, por ejemplo en el texto **de Santillana física de grado 11**, solo las colocan para cada caso y no se explicita de donde la deducen y porque se ha pensado que esa ecuación para la frecuencia puede explicar el fenómeno, lo cual lleva a pensar que no se muestra la conexión entre la teoría y lo que se experimenta al evidenciar el fenómeno o al representarlo de manera gráfica.

³En textos como el **Paul A. Tipler, física preuniversitaria** se hace un abordaje, mucho más explícito en donde se muestra la relación de las ecuaciones con la parte grafica en donde se evidencia el comportamiento de los diferentes frentes de onda para las situaciones ya enunciadas, a pesar de ello el poder comprender la presentación que hace el libro del fenómeno exige tener un nivel de abstracción avanzado que permita deducir y relacionar de donde se forman las diferentes expresiones matemáticas que dan cuenta de las frecuencias.

tanto las ecuaciones sin una corrección son solo aproximadamente correctas” pero no se explicita el caso. En el presente trabajo buscamos entender la diferencia que hay entre el efecto para ondas mecánicas y para ondas electromagnéticas.

- **La presentación que se hace de la relación existente entre las características cinemáticas del modelo ondulatorio y las propiedades del fenómeno acústico o lumínico**

Es necesario abordar de manera explícita por qué la frecuencia de la onda está ligada al tono en el caso acústico y al color en el caso lumínico. Es importante entonces establecer una relación entre el modelo ondulatorio y los efectos sensibles del fenómeno que es interpretado a la luz de este modelo. Resulta ilustrativo al respecto la confusión que se suele tener en la percepción sensorial del efecto Doppler en el caso acústico cuando escuchamos el sonido de una sirena al alejarse: al cambio que percibimos en ese sonido lo asociamos con el cambio de volumen o intensidad del sonido, el cual evidentemente si cambia y es más fácil de percibir. Estamos entonces obligados a examinar las condiciones que nos permitirían captar el cambio de tono cuando la sirena se mueve. En este sentido se genera la pregunta; ¿Cómo hacer notar que existe un cambio de frecuencia y hacerlo más evidente para la experiencia sensible en el caso sonoro y en el caso lumínico?

Vista así la problemática, abordarla nos lleva a hacer visibles las principales dificultades que surgen al intentar comprender el modelo ondulatorio a través de textos introductorios de enseñanza y conectarlo con los fenómenos físicos. El reflejo de esto se evidencia en la vaga asociación que se puede hacer de las concepciones básicas presentadas con el entorno y los fenómenos en él. Tal es el caso del efecto Doppler.

El trabajo se desarrolla en dos partes. En la primera parte, que consta de dos capítulos, se busca destacar aspectos a tener en cuenta a la hora de generar condiciones que propicien la comprensión del modelo ondulatorio claves configurados como tales a partir del análisis documental realizado. En el capítulo primero se busca determinar dificultades en la comprensión del movimiento ondulatorio atendiendo las formas de presentación de la temática de ondas que se encuentran en los textos de enseñanza de la física a nivel introductorio. En el segundo capítulo se hace una presentación de las ondas a nivel introductorio destacando los aspectos que deben ser tenidos en cuenta como claves en la comprensión del movimiento ondulatorio. En la segunda parte, desarrollada en un capítulo, se hace una presentación del efecto Doppler, basada en la comprensión obtenida del modelo ondulatorio y de la problemática que surge cuando se relacionan las ondas con sistemas de referencia en movimiento.

PREGUNTA PROBLEMA, OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

PREGUNTA PROBLEMA

¿Cuáles son las dificultades en la presentación y abordaje del efecto Doppler que no permiten la comprensión y cómo asociar el efecto Doppler a la experiencia sensible para hacerlo más cercano al sujeto que lo está comprendiendo?

OBJETIVO GENERAL

Traer a escena posibles dificultades en la comprensión del efecto Doppler y del modelo ondulatorio y de acuerdo con ello dar elementos que contribuyan a la creación de estrategias de enseñanza para el abordaje de este tema y de la enseñanza de las ondas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar una indagación de corte histórico que permita visualizar el contexto en el cual Christian Doppler presenta el efecto Doppler.
- Realizar un análisis documental encaminado a determinar posibles dificultades que puedan tener estudiantes y profesores en la comprensión del efecto Doppler y del modelo ondulatorio.
- Hacer una reflexión del análisis realizado en torno a la comprensión del fenómeno, donde se evidencie el aporte que la investigación realiza en la enseñanza de la física.

METODOLOGÍA

Dado el carácter conceptual e interpretativo que le imprime al trabajo el sentido expresado en los dos primeros párrafos de este capítulo, se puede decir que la metodología seguida es de tipo cualitativo. La pregunta es el eje dinamizador del trabajo y constructor del sentido y significado de las situaciones y textos analizados. Su realización implica una actitud crítica por parte del investigador y el establecimiento de una relación de diálogo con los autores trabajados.

La ruta usada para el desarrollo del trabajo estuvo encaminada primero a realizar una indagación de corte histórico donde se dio lugar a conocer la concepción del autor original del fenómeno Christian Doppler y el contexto en donde se generó su caracterización.

Luego se realizó un análisis documental que involucró tres tipos de documentos: Uno, textos de física de nivel introductorio que abordaban el tema de ondas y del efecto Doppler (uno de nivel medio y dos de física general, de nivel universitario). Dos, un texto especializado en ondas de nivel intermedio. Y por último, artículos de investigación en los que se examina la problemática de la enseñanza de las ondas. Los libros de texto fueron escogidos de acuerdo a opiniones de algunos estudiantes de licenciatura en física y a

opinión personal del autor siendo estos de los más usados a nivel de grado once en bachillerato y cursos introductorios de física de ondas en la licenciatura.

Finalmente se logra dejar una reflexión del análisis realizado en torno a la comprensión del fenómeno, donde se evidencia el aporte que la investigación realiza en la enseñanza de la física en el cual se brindan estos elementos para la construcción de estrategias de enseñanza del modelo ondulatorio y por lo tanto del efecto Doppler.

ALGUNOS PROBLEMAS QUE SURGEN DE LA PRESENTACIÓN QUE HACEN LOS TEXTOS DEL MODELO ONDULATORIO

Comprender el mundo físico y sus fenómenos no es tan fácil a través de la lectura de conceptos en los libros de texto. Esto no es fácil debido a que la sola lectura nos lleva a una serie de ideas vagas que no nos permite a asociarlas con nuestro entorno. Para poder hacer una buena asociación resulta útil apoyarnos en otra bibliografía como por ejemplo escritos originales, o en general de autores que se han preocupado por entender y explicar al lector lo que sucede en nuestro entorno.

El modelo ondulatorio es un esquema de interés especial debido al gran número de fenómenos físicos que se le pueden asociar. Por lo cual consideramos de gran importancia dar respuesta en este trabajo a la pregunta: ¿Qué se entiende por onda?

Muchas dificultades concernientes al modelo ondulatorio presentado en los textos están relacionadas con el problema de comprender el mecanismo de propagación y el rol del medio en el movimiento ondulatorio.

CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LOS TEXTOS DE ENSEÑANZA

Los libros de texto en la época actual han seguido siendo una herramienta de estudio y difusión central en todas las áreas del conocimiento (humanidades, ciencias sociales, ciencias naturales, etc.) tanto en los grados de secundaria como en nivel universitario, por esta razón es importante para la enseñanza centrar su interés en el contenido procedente de los libros de texto ya que estos representan una influencia muy fuerte en el pensamiento del lector y además se han convertido en referente del saber científico.

Libros de texto. Así se llaman los libros que sirven para apoyar el desarrollo de un programa escolar, ante todo son una herramienta que pretende facilitar el aprendizaje de los alumnos y la labor de los docentes, además en muchos casos son considerados elementos organizadores de las experiencias de aprendizaje. Usualmente se considera que un buen libro de texto es aquel que aborda los temas propuestos en los programas escolares, explicándolos a sus lectores, de manera clara y suficiente; por ello el lenguaje y el diseño del libro deben resultar apropiados para sus lectores. Sin embargo es posible distinguir las siguientes intencionalidades algunas más explícitas y otras implícitas.

- Los libros de texto tienen la intención de explicar los temas a sus lectores de forma clara y especificando ideas del autor con respecto al tema.

- Presentan una intencionalidad de difusión de información del área de conocimiento a la que pertenece el texto.
- Tienen una intención pedagógica en la cual se debe activar la comunicación con el lector y facilitar la interpretación de la información presentada.
- Brindar orientaciones al lector de tal modo que pueda acceder y recorrer la información y así contribuir al cumplimiento de sus objetivos personales con relación a la comprensión del tema.
- Poseen otras intenciones como lo es hacer que la información sea asequible para todos los lectores es decir generalizarla.

Implícitamente en términos generales la mayoría de los textos hacen circular una imagen realista del conocimiento científico que lo convierte en el conocimiento verdadero y contribuyen a generar una imagen de ciencia desarrollada por personas especiales, genios, y condiciones muy especiales, (accidentes, momentos de inspiración) en los cuales se hace posible un descubrimiento de la realidad de las cosas, de lo que verdaderamente acontece, de la verdad.

En el caso científico los textos deberían tener la intención de rescatar la idea de estudiar la naturaleza y no los conceptos como lo enuncia Bachelard (1948) *“en el siglo XVIII los libros hablaban de la naturaleza, de la vida cotidiana, con un lenguaje accesible al lector. Sin embargo, los libros de este siglo se han vuelto autosuficientes, ellos hacen las preguntas y las responden, se prestan a presentar la ciencia como algo organizado y elevado por encima de los conocimientos e intereses del lector”*

CRITICA A LOS TEXTOS

- **La imagen realista de la ciencia presentada por los libros de texto:** Por diferentes razones elegir un buen libro de texto científico es una tarea compleja ya que por su contenido y presentación de los temas muchos de estos pueden dar al lector una imagen de la ciencia según la cual la información presentada es una “verdad única” contribuyendo a generar una imagen de ciencia realista, la cual podría llevar al lector (estudiante o maestro) a evitar pensar en otro tipo de explicaciones y construcciones que él puede realizar acerca de su entorno y los fenómenos que suceden en él.
- **La presentación de los conceptos:** Otra crítica se evidencia en los conceptos y como ellos son presentados en los libros de texto, en el caso de la física y otras ciencias hacen de ellos solo nombres y palabras que se deben aprender, pero que en sí mismas no dicen nada. Un pensamiento similar se presenta en la charla que el profesor Feynman ofreció en la decimocuarta convención anual de la Asociación Nacional de Profesores de Ciencias de los Estados Unidos, en 1966 en torno al tema ¿Qué es la ciencia? El profesor Feynman da a conocer su molestia con varias cosas que plantean los textos escolares, plantea que es importante aprender estas palabras y nombres ya que se han adoptado como un lenguaje y que este lenguaje es necesario para la comunicación, pero que hay que aprender a distinguir cuando

estamos enseñando herramientas para la ciencia y cuando estamos enseñando ciencia, un ejemplo de ello lo cito directamente⁴:

“Para aclarar más aún mi punto de vista voy a criticar un libro de ciencias que desgraciadamente no es una excepción ya que en otros se encuentran situaciones igualmente criticables. Un libro de primero de primaria comienza la primera lección de una manera desafortunada para enseñar ciencia, que da una idea errónea de lo que ella es. Ilustra un perrito de juguete de cuerda, luego una mano que lo acciona y finalmente al perrito en movimiento. Bajo la última figura se pregunta: “¿Qué lo hace mover?”. Luego aparece la foto de un perro verdadero y la misma pregunta, y así mismo después con una lancha de motor, etc. En un principio creí que la idea era que la ciencia tiene aspectos Físicos, biológicos y químicos, pero no era esto. La respuesta que aparece en la “guía” del maestro es “la energía lo hace mover”. El concepto de energía es muy sutil y de difícil comprensión. Es decir, no es fácil entender la energía lo suficientemente bien como para utilizar el concepto en forma tan correcta que se pueda deducir algo a partir de él; escapa al nivel de primero de primaria. Esto es equivalente a decirle al niño cosas como “Dios lo hace mover” o “el espíritu lo hace mover”, o “la movilidad lo hace mover”; más aún, se podría decir igualmente “la energía lo hace mover. Veamos otro aspecto. Si se trata de definir energía, el asunto puede invertirse; podemos decir que si algo se mueve posee energía, pero no que lo que lo hace mover es la energía; es una diferencia tan sutil como en aquel enunciado de la inercia. Quizás se puede aclarar más de la siguiente manera: si se pregunta a un niño qué hace que el perro de cuerda se mueva, debe pensarse en lo que respondería una persona común y corriente; podría ser: “el resorte enrollado trata de desenrollarse, con lo cual acciona el mecanismo”. ¿Qué buena forma de iniciar un curso de ciencia! Desbaratemos el juguete, veamos cómo funciona, observemos el mecanismo, los engranajes, la forma como fue armado, la ingeniosidad de los que diseñan estos y otros juguetes; sería excelente. Pero la respuesta del texto es desafortunada pues pretende enseñar una definición y no enseña nada. Supóngase que un estudiante dijera: “yo no creo que sea la energía lo que lo hace mover”. ¿Hacia dónde se orientaría la discusión después de esta respuesta? Lo que considero grave es que en la primera lección se enseñe una fórmula mística para responder preguntas. El libro trae otras semejantes: “la gravedad lo hace caer”, “la suela de los zapatos se gasta por la fricción”. Decir simplemente que es por la fricción es triste, eso no es ciencia.”.
Feynman (1966).

El profesor Feynman toca uno de los puntos que puede ser causa de que los lectores no logren una conceptualización con sentido y que genere en el lector cuestionamientos, este es uno de los muchos ejemplos en donde el lector presenta dificultad debido a que los conceptos físicos se presentan como una palabra que hay que aprender para poder relacionarse con la ciencia, el lector es bombardeado en un

⁴ Feynman, Richard P. ¿QUÉ ES CIENCIA? revista *Physics Teacher* en septiembre de 1969

mismo tema a estudiar con innumerables conceptos que en muchas ocasiones el libro de texto no logra relacionar con las experiencias del sujeto, en este sentido es acertada la afirmación que hace el profesor Feynman cuando habla del concepto de energía y de su difícil comprensión.

¿CUÁL ES LA RAZÓN DEL ORDEN DE LOS CONTENIDOS PRESENTADOS EN LOS LIBROS DE TEXTO?

Una crítica sale de una de las preguntas planteadas por el profesor García. E (2012) en la Conferencia número 3 del “1er Encuentro de Estudios Históricos Para la Enseñanza de las Ciencias y 4to Encuentro Nacional Sobre Enseñanza de la Mecánica” en su tema a exponer; *El Papel de la Experimentación en los Libros de Texto* también se pone en la tarea de cuestionar la labor de los libros de texto con relación al aspecto mencionado, el profesor lanza una serie de preguntas que son interesantes por ejemplo ; ¿Por qué el orden de los contenidos en los cursos de física?, Se puede dar una respuesta trivial a la pregunta anteriormente planteada como por ejemplo decir que el hecho de que los contenidos tengan siempre el mismo orden en los libros de texto es porque los primeros contenidos son prerrequisito de los siguientes y no se pueden estudiar de manera diferente, pero en esencia esa tal vez no puede ser la razón, otros autores como M.Arca, P.Guidoni y P.Mazzoli⁵ plantean acerca de los contenidos la idea de que estos contenidos han sido planteados de cierta forma pensando en una forma de enseñar ciencia a la cual ellos le llaman “*la enseñanza como búsqueda de transmisión de instrumentos adecuados para la esquematización y estructuración coherente del conocimiento*” la transmisión de estos contenidos no es lo importante si no su nivel de significado, lo cual desemboca en una problemática que poseen estos cursos de física planteados en los libros donde no se evidencia muchas veces esta falta de significado, lo cual los reduce a una lista de contenidos aplicables al aprendizaje de la ciencia en diversos niveles escolares. Esta problemática se presenta como una de las más importantes ya que no da lugar a la formación de argumentos en el lector del libro de texto y además fomenta a la memorización de contenidos en un orden que puede no representar nada para el lector y sus experiencias cotidianas. Además de la falta de significado como problemática de los contenidos M.Arca, P.Guidoni y P.Mazzoli hacen un planteamiento interesante en cuanto a lo que son los contenidos y los presentan como “*instrumentos de conocimiento*” que pueden ayudar a esquematizar, más no como el conocimiento mismo de acuerdo con este planteamiento pareciese que los contenidos no debiesen tener un orden ya que son herramientas de esquematización que el estudiante o en este caso el lector pueden usar de manera autónoma y además que los contenidos no deben ser enseñados como el conocimiento mismo.

LOS CONTENIDOS A ENSEÑAR EN BASE A LOS LIBROS DE TEXTO

Otra pregunta que se plantea el profesor (García, E 2012) que puede desembocar en una crítica interesante es: ¿Qué de los contenidos se debe enseñar? Con relación a este cuestionamiento, se presentan la postura de que todos los contenidos son importantes a la hora de enseñar, pero desde otro punto de vista el papel del lector o de la persona que está

⁵ M.Arca, P.Guidoni y P.Mazzoli. Enseñar ciencias (1990), editorial PAIDOS, pagina 46.

utilizando el libro de texto es importante, el interés que puede presentar el estudiante o el maestro sobre un contenido es el que dicta si debe ser enseñado el contenido y de qué forma se debe llegar con el contenido al estudiante, dentro de los contenidos de física es importante señalar el hecho de que a pesar de que la física en su estudio se fragmenta para ver con detalle los fenómenos, todos ellos se relacionan directamente, sin embargo no es necesario que alguien que quiere aprender física o alguien que enseñe física tenga que relacionarse con todas sus partes, por ello los contenidos de los textos son elegibles como se dijo ya según el interés del lector, por ejemplo las ondas que es el tema a estudiar en esta investigación. No requiere que el lector se relacione con termodinámica si no es su interés y aun así puede descubrir mucho y cuestionarse acerca de las ondas sin incursionar en la termodinámica.

DESACTUALIZACIÓN DE LOS LIBROS DE TEXTO

Los libros de texto son una fuente adecuada de búsqueda de una información específica en cuanto a hallazgos pasados de la física y en general de la ciencia pero para la enseñanza es posible que no sean adecuados en cuanto al punto de vista de la actualización, así lo plantea (Ayala, M. 1992) en su artículo “la enseñanza de la física para la formación de profesores en física” allí la maestra hace hincapié en lo estáticos que han permanecido estos contenidos de la física en los libros de textos durante casi cien años, es decir no han sufrido cambios de fondo considerables sino más bien se han convertido en una acumulación de saberes que permanecen inamovibles y casi comparables con versículos de la biblia de la iglesia católica, lo cual resulta inadecuado ya que las épocas en las que se han usado los libros de texto han cambiado pero los textos no, no se han tenido en cuenta nuevos hallazgos, nuevas aplicaciones de la física, etc.

PLANTEAMIENTO DE CURSOS DE EN BASE A LIBROS DE TEXTO

Además del problema de actualización de los saberes se presenta otro que es el de la preparación de los cursos de física a la base de los libros de texto (lo cual se considera relativo, pero influenciado social y culturalmente), por este planteamiento de (Ayala, M. 1992) el cual podría llevar a pensar que un curso de física debido a los problemas que se ven en los libros de texto, no puede ser planteado desde los contenidos dados por el libro de texto y además da la idea de que el libro de texto no es el único recurso disponible para llevar una temática al aula.

LA DESPROFESIONALIZACIÓN Y DEPENDENCIA DOCENTE DE LOS TEXTOS ESCOLARES

La falta de dominio de los fundamentos teóricos de la actividad práctica que realizan los maestros, los convierte en trabajadores funcionales para el sistema, con independencia de cuál sea su posición ideológica ante el mismo (Rozada, 1989, 77). La desprofesionalización, como la pérdida de la capacidad de decisión y control sobre las tareas propias de su profesión: Planificación, desarrollo y evaluación de los procesos de enseñanza se, libera a los profesores de la responsabilidad de pensar sobre su función de guía en el proceso de aprendizaje y comprensión de los fenómenos que en física son objeto de estudio.

Es fácil pensar en una razón por la cual puede ocurrir esto: el libro de texto, aparece ante los maestros como el único material en el que se sistematizan de forma práctica lo que se debe hacer en un curso. En el texto se encuentra la metodología que posibilita el desarrollo de los objetivos, se presentan ya seleccionados y secuenciados los contenidos (con sus definiciones, ejemplos, evaluaciones, etc.), se proponen actividades sobre los mismos, aparece la estrategia de enseñanza que ha de seguir el maestro en la presentación de la información, por ello para el maestro representa la posibilidad de ahorrar un montón de trabajo propio de su profesión.

En el marco de las diferentes críticas que se pueden realizar en torno a los diferentes libros de texto usados en la escuela y universidad, o incluso para el estudio personal cabe mencionar que los libros de texto han cambiado su finalidad y uso inicial, el cual debería estar encaminado a convertirse en una herramienta de estudio que apoye la comprensión del lector, más no en un material que motive a la memorización e indagación nula del tema de interés del lector y a la desprofesionalización docente como ya se ha mencionado.

¿POR QUÉ ES IMPORTANTE UN ANÁLISIS DE TEXTOS?

En la educación en ciencias y considerando todos los comentarios en torno a los libros de texto científicos, para los maestros de física el análisis de textos se ha convertido en una preocupación de gran importancia ya que los contenidos de los textos y su forma de presentación en muchos sentidos parece no ser la adecuada, las críticas presentadas anteriormente son unas de las muchas fallas que se han encontrado en ellos y en su uso, las cuales son contradictorias a lo que preocupa en la enseñanza de la física la cual está centrada en las ideas, preguntas, planteamientos y dificultades que los estudiantes tengan al estudiar un contenido de la física que para ellos sea motivo de indagación, que muchas veces viene a ser resuelto con un concepto citado en un libro de texto, muchas veces inconcluso y poco satisfactorio para el estudiante.

Diferentes investigaciones educativas⁶ que se vienen dando demuestran la preocupación anterior sobre las dificultades de los estudiantes para conceptualizar y comprender los diferentes fenómenos físicos. En este sentido el campo de interés de esta investigación se encuentra direccionado a la enseñanza y comprensión de un fenómeno ondulatorio: el efecto Doppler.

Teniendo en cuenta la consideración anterior, se podría decir que estas investigaciones educativas u otras de corte didáctico han ido mostrando su interés en conocer las dificultades para así poder plantear unas rutas de aprendizaje que hagan que el estudiante se cuestione sobre un asunto de la física que se esté tratando y con ello el mismo estudiante trate de generar una respuesta a sus preguntas de tal forma que esta respuesta signifique más para él, precisamente porque él fue quien la construyó, nos encaminamos al análisis de

-
- ⁶ Ver: L. Maurines: *Los estudiantes y la propagación de las señales mecánicas: Dificultades de una situación de varias variables y procedimientos de simplificación. Enseñanza de las Ciencias, 10 (1), pp49-57. (1992)*
 - E. de Santa Ana, M^a. C. Mato y F. Martínez. *las ideas del alumnado de secundaria sobre ondas, sonido y ruido. diseño y análisis de un diagnóstico inicial y orientaciones para una propuesta de enseñanza y aprendizaje.*
 - Bravo, Silvia; Pesa, Marta y Caballero Sahelices, de Física. *Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología. Universidad Nacional de Tucumán, Argentina enseñanza de las ciencias, 2009, 27(3), 405-420* Conces. Representación de los estudiantes universitarios sobre la propagación de ondas mecánicas. Departamento

textos en los contenidos de ondas ya que en este campo se presenta mucha dificultad de los lectores (estudiantes y maestros) para hacer representaciones satisfactorias de las propiedades de las ondas de su mecanismo de propagación y por tanto de sus fenómenos.

La investigación puede con este análisis dar pautas en la escogencia de los textos con el fin de lograr que los lectores encuentren en los textos una forma de dar a una significación de los contenidos y no a una simple transmisión de información por parte del texto hacia el lector, lo cual considero un error ya que se generaran prácticas de repetición, memorización, activismo que en nada ayudan a que el sujeto tenga una postura frente a la ciencia mucho menos de su propio conocimiento, lo cual se considera otro aspecto de importancia del análisis de textos a realizar.

ASPECTOS IMPORTANTES A LA HORA DE ANALIZAR UN LIBRO DE TEXTO

Además de los aspectos de forma (ilustraciones, recursos, etc.), se consideran otros aspectos alrededor de las dificultades que puedan presentar los lectores sobre el tema en cuestión

- Las pretensiones que tiene el libro con relación a la comprensión del estudiante sobre sus contenidos y la crítica de los mismos en torno a las experiencias propias que pueda tener el lector con relación a ellos.
- Los cuestionamientos que se plantean en el libro pueden ser resueltos de manera trivial, o permiten que el lector indague más sobre el tema y lo relaciones con experiencias cotidianas.
- ¿El texto tiene prerequisites al estudiar el tema, no es comprensible lo que plantea si no se estudia lo anterior?(esta parte plantea lo de la escogencia de los contenidos sin importar el orden)
- ¿Tiene algo que ver con la comprensión del lector el orden de los contenidos dispuestos en el texto?
- Cuáles son las partes en las que el libro actúa de forma autosuficiente (plantea preguntas y las responde el mismo), ayuda en algo a la comprensión del tema esto.
- La forma como se presentan los contenidos ayuda en algo a que el estudiante se haga una representación de los conceptos.

LA CONCEPCIÓN DE ONDA UTILIZADA EN ALGUNOS TEXTOS ESCOLARES

Se ha realizado la tarea de analizar varios libros de texto en los que se aborda las ondas a nivel introductorio .En ellos se han encontrado representaciones que tienen características que ya hemos nombrado como por ejemplo una imagen de ciencia “realista”, que dota a las propiedades y símbolos con características ontológicas que pueden llegar a formar una representación poco satisfactoria para el lector y no generara en el ningún cuestionamiento.

CATEGORÍAS DE ANÁLISIS

- Hay dificultades en la comprensión de los planteamientos que el texto hace si las hay ¿cuáles son?
- ¿Se utilizan relaciones con la experiencia sensible para ayudar a aclarar las concepciones.
- ¿Las ecuaciones y gráficos presentados son claros, o no?
- ¿Cuáles son las diferencias entre los textos analizados?

CUADRO COMPARATIVO

PRESENTACIÓN DEL MODELO ONDULATORIO		
<i>Fundamentos de Física 2: undécimo grado F.Bueche</i>	<i>Física (Tipler, Mosca) Volumen 1</i>	<i>Física para ciencias e ingeniería R. Serway</i>
ONDAS EN UNA CUERDA		
<ul style="list-style-type: none"> • Se hace uso de los fenómenos ondulatorios para ilustrar las propiedades de las ondas. • Se presenta claramente el movimiento de las porciones de cuerda hacia arriba y hacia abajo, con una imagen clara, en donde se muestra en diferentes momentos el estado de la cuerda cuando el pulso pasa. • La primera imagen de onda es la sinusoidal. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se hace un estudio de los conceptos claves para entender el movimiento ondulatorio, se definen magnitudes, como velocidad de propagación, longitud de onda, frecuencia y luego estas se aplican a ejercicios, ¿Cuál es la intencionalidad de realizar ejercicios que muestren la proporcionalidad entre cantidades? • Para lo anterior se puede ver que es necesario incluir más preguntas de tipo cualitativo para desarrollar habilidades no solo algorítmicas. • La primera imagen de onda sigue siendo la función sinusoidal. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dan a conocer que es necesario de tres elementos claves para que suceda el fenómeno ondulatorio: • “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 partir del cual los elementos del medio puedan influirse mutuamente” • Se considera al ejemplo de ondas en el agua como elemento importante para conceptualizar la idea de que lo que se desplaza no es el medio, sino la propagación.

PRESENTACIÓN DE LA FUENTE DE ONDA		
<p>♦ No se aclara el papel de la fuente, se nombra muy tangencialmente, para decir que es ella la que envía las ondas No se atribuye a ella el hecho de la forma que tomara la onda.</p>	<p>♦ Se da una idea de fuente no muy clara, de la cual no se puede realizar una representación.</p>	<p>♦ Se enuncian varios ejemplos de fuente y se le da a esta un papel importante en la emisión de las ondas.</p>
FRENTE DE ONDA		
<ul style="list-style-type: none"> No se menciona. Se utilizan pulsos. 	<ul style="list-style-type: none"> No se menciona. Se utilizan pulsos. 	<ul style="list-style-type: none"> En vez de utilizar un frente de onda como los formados en el agua cuando se deja caer en un estanque, se hace uso del pulso, del cual se cree cumple la misma función del frente de onda en el seguimiento de la onda.
FRECUENCIA		
<ul style="list-style-type: none"> No se enfatiza en esta característica, se asume que ya se entiende porque se trató cuando se estudió el capítulo de movimiento armónico simple. Se usa la frecuencia para conceptualizar la velocidad de propagación y deducir la ecuación para esta. 	<ul style="list-style-type: none"> No se toma en cuenta para definir las características cinemáticas, luego se usan en las observaciones del 	<ul style="list-style-type: none"> Solo hasta el capítulo de ondas sonoras se habla de esta característica cinemática, y siempre se usa para complementar la velocidad de propagación, no se aclara que debe haber una diferencia entre la frecuencia de la fuente y la de la onda.
VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN		
<ul style="list-style-type: none"> Enuncian que la velocidad de propagación está dada por una ecuación que no se preocupan por deducir y no dicen físicamente a que se refieren con velocidad de propagación. Sin embargo más adelante justifican la dependencia cualitativa de las cantidades usadas en la ecuación. $v = \frac{F}{m L}$ 	<ul style="list-style-type: none"> Señalan que la velocidad de la onda depende de las características del medio y que es independiente del movimiento de la fuente, explican la dependencia cualitativa de la velocidad de propagación con la tensión de la cuerda (para el caso de ondas en una cuerda) y la masa por unidad de longitud. $v = \frac{F_T}{\mu}$	<ul style="list-style-type: none"> Se enuncia la velocidad de las ondas en cuerdas y se hace la deducción a partir del análisis mecánico, el cual no es claro. $v = \frac{\bar{T}}{\mu}$

EL EFECTO DOPPLER Y SU CONCEPCIÓN

En principio es de notarse que el modelo inicial de los tres libros es el modelo de ondas en una cuerda, este modelo podría ser claro e interesante si se hiciera una descripción más clara de que es lo que se propaga y qué papel juegan las características cinemáticas en el proceso de propagación de la perturbación. En los tres libros se presenta diferentes situaciones que se consideran como ondulatorias y no hacen énfasis en el porqué de la escogencia de las situaciones y que es lo que las hace ondas o no.

Consideramos que uno de los modelos más valiosos para entender la propagación de la onda es el modelo de las ondas en el agua, para trasladarnos ahí si al modelo de ondas en una cuerda y mostrar la pertinencia de la función sinusoidal en la descripción de una perturbación periódica y su propagación. En ninguno de los textos se hace énfasis en el modelo, el cual es útil para la comprensión de conceptos claves como lo son la fase los frentes de onda, la fuente, la frecuencia y la relación longitud de onda frecuencia.

Otra dificultad encontrada es la manera en cómo se presenta la velocidad de propagación, en los tres textos se da la ecuación, sin deducirla y explicar el porqué de ésta, no dan un ejemplo que ilustre sobre el porqué de la dependencia de ésta con la tensión, la masa y la longitud de la cuerda, únicamente se dice que depende de las propiedades del medio. En el libro *Fundamentos de física* (F. Bueche 1990) más adelante justifican de forma breve la dependencia cualitativa de la velocidad respecto a la tensión y masa por unidad de longitud así; “A la tensión en la cuerda se debe la fuerza que acelera a un trozo de cuerda hacia arriba o hacia abajo cuando él pulso pasa a través de la región”. Sin embargo, no es claro como interviene en la velocidad del pulso y quedan dudas con relación a la velocidad de propagación en otros medios de propagación.

$$v = \frac{F}{m l}$$

Si la velocidad de propagación se entiende como la velocidad que llevan las ondas cuando viajan a través de un medio implica que ésta puede cambiar según el medio en el que viajen. Sin embargo esta idea parece tornarse un poco confusa para algunos estudiantes. Así, a pesar de que se dice que la velocidad de propagación depende únicamente del medio, un buen número de estudiantes después de tomar clases en un curso de onda siguen diciendo que la velocidad de propagación depende de lo que hace la mano al producir ondas en una cuerda; otros consideran que la velocidad de propagación disminuye si disminuye la amplitud de la perturbación⁷. Se suele resaltar también la dificultad de los estudiantes para comprender el mecanismo de propagación y el rol del medio en el movimiento ondulatorio⁸. Esto puede explicar por qué es difícil considerar que la

⁷ *Los estudiantes y la propagación de las señales mecánicas: dificultades de una situación de varias variables y procedimientos de simplificación*, enseñanza de las ciencias 1992

⁸ *Representaciones de alumnos universitarios sobre propagación de ondas mecánicas* Bravo, Silvia I; Pesa, Marta y Caballero Sahelices, enseñanza de las ciencias, 2009, 27(3), 405–420

frecuencia de la onda sea la misma en diferentes puntos del medio y hablar así de la frecuencia de la onda, o usar un modelo de este tipo que resulte adecuado para representar fenómenos físicos como el sonido, luz, ondas sísmicas, etc.

El modelo de onda en el agua es utilizado en los tres libros, en el capítulo de sonido, cuando es necesario utilizar la noción de los frentes de onda. Tampoco es entendible en dos de los textos como se llega a esas ecuaciones que describen por ejemplo la frecuencia percibida por un observador cuando la fuente se aleja o se acerca a él, para el caso del efecto Doppler.

En el libro de **Tipler, P. (2006)** utilizan tres imágenes que son de utilidad para entender el cambio de frecuencia gráficamente.

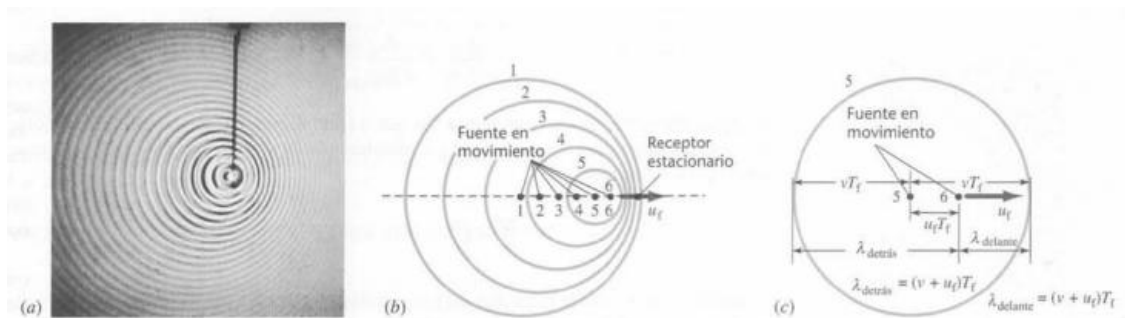


Imagen 1: Representa la ubicación de los frentes de onda y el tamaño de la longitud de onda entre dos frentes sucesivos cuando la fuente se ha movido a un receptor estacionario. Tipler, A. (2006). FISICA PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGIA

La imagen (b) ilustra el movimiento de la fuente en 6 posiciones diferentes, y los frentes de onda producidos por esta, además se encuentra un receptor estacionario recibiendo los frentes de onda que en la parte delantera se encuentran más juntos y en la parte de atrás más separados. La imagen (c) utiliza dos posiciones de la fuente, la 5 y la 6 para observar como son las longitudes de onda detrás y delante, utilizando la simbología dada anteriormente en el texto para denotar a la velocidad de la onda (v), a la velocidad de la fuente (u_f) y al periodo (T_f), definen matemáticamente a que son iguales esas longitudes de onda. Y se realiza la deducción teniendo en cuenta las cantidades. La explicación anterior satisface mucho más que las otras.

LAS ONDAS: UNA SEGUNDA APROXIMACIÓN

¿QUÉ SE ENTIENDE POR ONDA?

En esta parte del escrito

En pocas palabras se podría decir que la idea de onda está íntimamente ligada a la producción de efectos a distancia, cuando un cambio en una zona de un medio o del espacio genera un cambio en otra zona vecina y así sucesivamente. El cambio que se considera como origen puede ser considerado como la fuente de los otros cambios. Pero cada cambio también puede ser asumido como origen de los otros cambios y por lo tanto como fuente.

Para iniciar consideraremos situaciones que se pueden asociar a lo que se suele entender por onda y que en términos generales se podría describir como una condición o cambio físico que se traslada de forma continua de una región del espacio a otra:

- Una piedra cae en un estanque de agua.
- Un grupo de hinchas en un estadio hace una ola.
- Una persona agita el extremo de una cuerda.
- Lanzar una pelota de un lado a otro.

Al estudiar las situaciones se tratará de responder a la pregunta ¿estas situaciones representan un movimiento ondulatorio? Si no es así ¿por qué? Con relación a la pregunta anterior es importante situarse en lo que se considera onda y qué condiciones se tienen que cumplir para ser o no una onda.

Condiciones:

1. Hay una interacción entre una fuente y un medio y éste es perturbado.

En la primera situación “una piedra cae en un estanque” se cumple esta condición, la piedra sería la fuente y ésta perturba un medio el cual es el agua en el estanque, generando una onda en ella. Usualmente se considera como fuente a un objeto que se diferencia del medio que al interactuar con él produce un cambio en el estado del medio en un punto dado y en un tiempo dado que a su vez produce cambios lugares del mismo, pero dado la conexión física existente entre los diferentes puntos o vecindades del medio, es posible decir que el cambio original, al ser origen de otros cambios en otros lugares y estos a su vez de otros, puede ser considerado como la fuente de los otros cambios; visto así, cada cambio también puede ser asumido como origen de los otros cambios y por lo tanto como fuente.

En la segunda situación no es claro si se cumple o no la interacción entre una fuente y un medio, de hecho no es claro que es el medio y que es la fuente.

En la tercera situación, se cumple la condición de que una fuente perturba un medio, la fuente se identifica claramente como la “mano” y el medio como la cuerda.

La cuarta situación es diferente a las otras, uno podría considerar que la pelota es la fuente, pero ¿qué es el medio en este caso? ¿Puede la pelota ser considerada como un pulso o como una perturbación?

2. Se ve un efecto en un lugar que resulta en otro lugar.

En todas las situaciones enunciadas se ve que el efecto se transporta de un lugar a otro, pero es importante tener en cuenta que se hace de forma continua.

3. La información es lo que se desplaza y no el medio.

En la primera situación no es obvio que el transporte de medio no sucede, pero se puede comprobar colocando algún objeto en cualquier parte del agua. Se evidencia que cuando sucede la perturbación en el sitio inicial el cuerpo está en reposo, después de un tiempo el cuerpo oscila con relación a su posición de equilibrio, pero no se desplaza pero la perturbación sí.

En la segunda situación se cumple que el efecto sucede en un lugar y termina en otro, comienza en la primera persona de la fila y termina en la última.

En la tercera situación el pulso o información viaja desde un extremo de la cuerda al otro, lo cual se evidencia claramente.

En la cuarta situación si se concibe a la pelota como la fuente. ¿La fuente sería la que viaja? ¿Qué es lo que se desplaza? A mi criterio no se cumple la condición ya que no es claro el papel de la fuente y el medio.

En conclusión se puede diferenciar entre lo que es onda y lo que no bajo las tres condiciones enunciadas anteriormente, se deben cumplir las tres condiciones para poder decir si es o no una onda y además se debe estudiar el proceso de la propagación. Para ello también se considera clave el seguir la perturbación en el espacio (frente de onda) y la velocidad del frente de onda.

La onda es un proceso espacio temporal que requiere ser representada por ende en el espacio y el tiempo. Una foto de la configuración de un medio no es nunca una buena representación de una onda y menos cuando se trata de contribuir a conformar la idea de onda ya que la idea de cambio está íntimamente ligada a ella. Por lo tanto una sucesión de configuraciones del medio en instantes separados intervalos iguales de tiempo permitirá ver los cambios que suceden en diferentes puntos del medio y como se propagan.

SOBRE LA PERTURBACIÓN Y SU PROPAGACIÓN

Para poder tener una idea más clara nos centramos especialmente en las ondas como un proceso que sucede en tres momentos; la producción de la perturbación, la propagación de la perturbación y la recepción de la misma.

Un cambio en una parte produce cambios en otras partes lejanas a la inicial, hacer una referencia en la onda de agua que es lo que es claro para muchos, y como se genera ese cambio.

Es de anotar que en casi ninguna de las definiciones que existen sobre ondas se considera como parte importante a la producción de la perturbación, tal vez se considera que es obvia la forma en como esta se produce y solo se debe estudiar la propagación, sin embargo es de nuestro interés estudiar la producción como parte importante de nuestra comprensión. La producción al parecer se centra en la acción que produce un objeto o fuente sobre un medio.

Acerca del medio se tuvieron debates acalorados en la comunidad científica, ya que en principio el medio se vio como una necesidad. Esto porque no se concebía que pudiera perturbarse algo diferente a la materia y al haber ausencia de esta, era complicado estudiar el comportamiento de diferentes fenómenos, entre ellos la luz. En el artículo de Maxwell sobre ETER, se ve con claridad la necesidad de usar este éter como medio y se le describe como una sustancia sutil que existe donde supuestamente hay espacios vacíos. Así este se convierte en un medio de transmisión de los fenómenos, sin embargo aún seguía siendo un problema el explicar el movimiento de los “éteres”. Por ello toda idea de éter fue desechada, menos la planteada por Huygens para explicar la propagación de la luz.

Para Maxwell la luz era una concepción no sustancial y esto lo podíamos demostrar según Maxwell por medio del fenómeno de interferencia. Dos cuerpos cuando están juntos no pueden aniquilarse mutuamente, entonces si la luz tiene naturaleza ondulatoria dos ondas sí podrían aniquilarse. “la luz no es una sustancia, es un proceso que se verifica en una sustancia”⁹

Para el caso de ondas mecánicas, esta acción (perturbación) produce un cambio en la configuración del medio afectado y en consecuencia de ello el medio comunica ese cambio en todo su alrededor.

Para pensar en la producción es muy importante tener en cuenta a una fuente, que en este caso podría considerarse fuente a uno de los dos medios que interactúan, (todo esto para el caso mecánico), esta fuente genera la perturbación en un solo punto del medio, esa perturbación tiene un carácter informativo y se puede considerar que la velocidad con la cual se perturbo el medio será la velocidad inicial de la propagación del mismo.

⁹ Maxwell, J. ETER, Traducción realizada por Juan Carlos Orozco, profesor asistente del departamento de Física de la Universidad pedagógica nacional a partir del texto en ingles publicado en NIVEN, W.D (Edit) “the scientific papers of James Clerck Maxwell”, vol. 2, Dover publications, Inc New Cork 1965.

Para ello podríamos pensar en varios ejemplos cotidianos como lo son golpear un tambor con nuestras manos, tocar la cuerda de una guitarra, arrojar una roca a un estanque. Para los ejemplos anteriores podría resultar satisfactorio pensar en la producción de la perturbación como una acción instantánea de un medio sobre otro, el cual responde a ese cambio comunicando esa información en todo su espacio, pero ¿qué pasa con el sonido como onda? ¿Cómo consideramos la producción de la perturbación en una flauta por ejemplo? ¿Cuáles serían los medios que interactúan para que se produzca la perturbación? Las anteriores son preguntas que surgen al creer o pensar en el sonido como una onda, lo cual no es tan obvio al pensar en las características que convertirían al sonido en onda.

SOBRE LA PROPAGACIÓN

¿Cuál es la diferencia entre los ejemplos que se dieron al principio del capítulo? Se pensara que tal vez las diferencias son mínimas, sin embargo lo importante ahí es la propagación. En los ejemplos las personas tal vez solo tienen en cuenta el instante inicial y el efecto final, pero la propagación es la clave para diferenciar entre lo que es onda y lo que no. Durante la propagación sucede la comunicación de la perturbación de una sección a otra del medio, esto provoca cambios en diferentes zonas de este hasta llegar al efecto final. En el ejemplo de la pelota no sucede esto, no se debe el efecto final a esta comunicación de cambios, ya que la pelota se desplazó para producir el efecto final.

Cuando ha terminado la producción de la perturbación, esta se transporta a través de un medio el cual creemos elástico, o eso es lo que nos dicen las miles de definiciones que encontramos en la bibliografía, pero que podríamos percibir realmente. Es importante considerar el medio, como parte fundamental para que exista la onda, cuando la perturbación se produce, esta necesita ser comunicada o transportada, pero el carácter de la perturbación no es sustancial, es de carácter informativo, de transmitir una información.

El medio fue durante mucho tiempo un tema clave para poder aclarar la naturaleza de la luz y del sonido como ondas, de acuerdo a la configuración y respuesta de este, varios pensadores importantes aportaron a la concepción de la luz y el sonido como ondas.

Existe en el estudio de las ondas las dos visiones predominantes en el estudio de sus fenómenos, una que permite imaginar al medio como un conjunto de partículas, las cuales transmiten la perturbación de una a las siguientes en su vecindad, y también está la visión de considerar al cuerpo como un cuerpo continuo. La primera es a la que se le llama discreta y la otra es la continua.

Desde las visiones anteriores se explican satisfactoriamente el fenómeno de la propagación de la perturbación, y muchos libros de texto dan preferencia a una de las dos visiones, según convenga al autor, por ejemplo A. French (1971) describe a las ondas como un fenómeno en donde todas las partículas de un medio se mueven alrededor de un punto de equilibrio y hay una transferencia de energía entre las partículas del medio, de tal forma que todo el sistema se encuentra en constante vibración; esta perspectiva muestra al medio como un conjunto de partículas, en donde la cantidad de estas es tan grande que casi no se puede distinguir en donde comienza una y termina la otra.

De acuerdo con la perspectiva continua el medio tiene un papel importante, y además no está compuesto de partículas, si no que este es un continuo el cual al ser perturbado, ocurren cambios en el debidos a la transferencia de energía, estos cambios se pueden estudiar situándonos en diferentes puntos de este medio, a los que se les pueden llamar porciones, porciones muy pequeñas y los cambios se estudian en las vecindades de esas pequeñas porciones.

Cualquiera de las dos versiones explica y nos da una idea de cómo responde el medio a la perturbación, cabe aclarar que nuestro interés no está en decir cuál de las dos es la mejor o cual es la verdadera, lo que nos interesa realmente es meternos en la tarea de entender que es una onda y como varios de los aportes de matemáticos y pensadores son de ayuda para esta tarea.

Desde la perspectiva anterior, tomamos en cuenta como es el comportamiento del medio desde la perspectiva del autor A. French (1971), el cual nos presenta al medio como un conjunto de partículas acopladas las cuales transmiten la información (onda) de una a la otra.

Según el texto de A. French (1971), no existe nada semejante a un medio totalmente continuo, por ello el autor del texto escoge hacer el análisis y sienta su posición de modelo ondulatorio a través de los osciladores acoplados, aquí se hace referencia a un sistema de N partículas vibrantes, las cuales están conectadas entre sí, lo cual asemeja a mi parecer a un medio continuo en donde se afecta una parte y sus vecindades son afectadas también. Este punto de vista es de utilidad al estudiar la forma en como el medio responde a esa perturbación.

El caso ondulatorio sucede según A. French (1971) cuando las partículas oscilantes no son una, o dos sino un N muy grande y (x) la distancia entre partículas es tan pequeña que tiende a ser cero. El caso particular de una cuerda cuando es sometida a una vibración, cabe resaltar que la aproximación es muy adecuada, es clara y permite al lector hacerse una idea de lo que sucede en el medio y como vibra este cuando es perturbado, en este caso cada partícula u oscilador vibra de cierta forma con relación a un punto de equilibrio, pero la frecuencia y amplitud, las cuales son características cinemáticas son definidas para todo el conjunto.

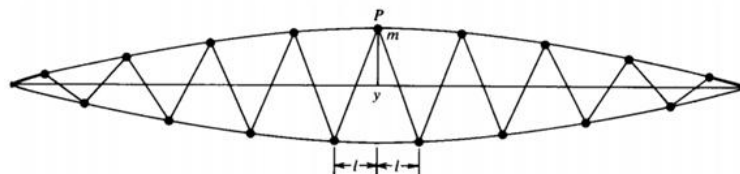


Imagen 2: Amplitudes de una línea completa de partículas en el modo superior para una cuerda fija por ambos extremos. A. French (1971)

Otras visiones consideran esta concepción de que la propagación de la perturbación se debe entender explicando el comportamiento o respuesta del medio, en este caso el medio pensado como un conjunto de partículas acopladas que oscilan de cierta forma según la perturbación producida por la fuente en este medio que bien puede ser de la forma anterior descrita. Es importante lo anterior ya que estamos hablando de la propagación del pulso y para ello observamos la configuración del medio según este va siendo afectado por la perturbación en diferentes instantes.

CARACTERÍSTICAS CINEMÁTICAS Y SU RELACIÓN ENTRE ELLAS

LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN

La velocidad de propagación de una onda se entiende como la distancia recorrida por la onda en un determinado tiempo. Todas las ondas tienen una velocidad de propagación constante que depende de las características del medio, ya que influyen las fuerzas recuperadoras elásticas del medio. Sin embargo si se quiere demostrar que la onda se ha movido se debe tener en cuenta otras características, tales como el frente de onda, la longitud de onda y la frecuencia. En primer lugar hacer el seguimiento de un frente de onda durante una longitud de onda, nos permite saber cómo es el tiempo que tarda la onda en completar un ciclo completo, como se sabe el tiempo es fundamental en la definición de velocidad y también de distancia.

Para aclarar un poco más la situación se ilustra con la siguiente imagen, en donde se muestra una fuente (F), en un momento $t=0$, en donde estará emitiendo una pulsación, en el siguiente instante $t=t1$ el pulso se había emitido y la distancia que se desplazó exactamente antes del instante en el que se emite la siguiente pulsación, será una longitud de onda (λ) y por lo tanto el tiempo que tardo esa pulsación en viajar esa longitud de onda será llamado periodo (T). la velocidad de propagación será por tanto:

$$v = \frac{d}{t} = \frac{\lambda}{T}$$

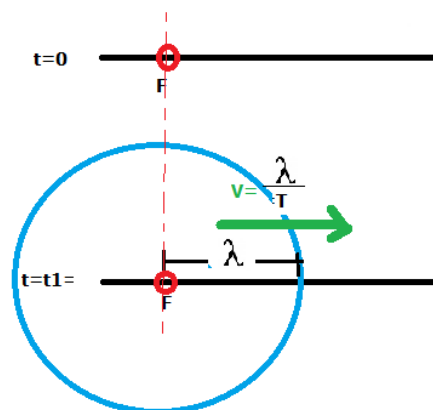


Imagen 3: la ilustración muestra el seguimiento de un frente de onda y de acuerdo a ello la relación entre las características de propagación de la onda. Elaboración propia

Como se puede ver en la imagen se hace necesario el uso de otras características cinemáticas para definir a la velocidad de propagación en términos de lo que se ha movido el frente de onda cuando se ha producido la primera pulsación y viene la segunda detrás. No se pueden estudiar por separado, ya que en el proceso de la propagación de la perturbación, estas vienen directamente ligadas en el movimiento de los pulsos enviados por la fuente.

LONGITUD DE ONDA

Aunque ya se ha hablado anteriormente sobre esta característica, se presenta no solo como una distancia cualquiera, sino más bien como la distancia más importante en la construcción del movimiento de la onda. La longitud de onda es la que nos muestra la periodicidad espacial. Esta característica es la base para definir como se encuentra la onda en diferentes momentos en el tiempo y al igual que el frente de onda permite un seguimiento. En fenómenos como el efecto Doppler el cambio de la longitud de onda en primera instancia es lo que permite evidenciar el cambio en la frecuencia, durante el viaje de la onda el cambio de esta característica nos permite ver que está sucediendo espacialmente.

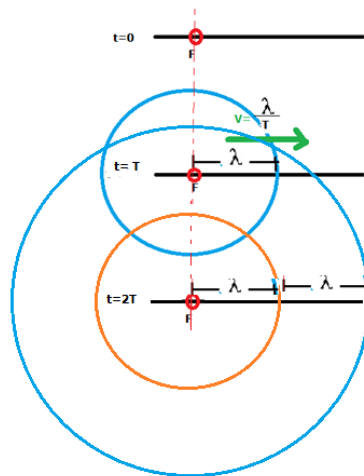


Imagen 4: se muestra la emisión de dos pulsos sucesivos, en el instante $t=0$ hasta ahora se empieza a emitir el pulso, en el instante $t=T$ se evidencia que la onda ha recorrido en el espacio una distancia λ , en ese instante se está empezando a emitir el segundo pulso, el pulso en color azul representa al primer pulso emitido y el naranja el segundo pulso. Luego en un $t=2T$ el primer pulso habrá recorrido 2λ y el primer pulso una distancia λ . Elaboración propia

Como se evidencia en el diagrama arriba, la emisión de los pulsos, y la distancia que este recorre se encuentra relacionada directamente con el periodo de emisión de los pulsos.

La longitud de onda puede llegar a sufrir cambios si la fuente se encuentra en movimiento, por esto esta longitud es importante en el cambio de dos características de las ondas; la velocidad de propagación y la frecuencia.

PERIODO

El periodo al igual que la longitud de onda se presenta como una característica muy importante para evidenciar periodicidad es análoga a la longitud de onda, pero en este actúa en el campo temporal. Se sabe que la fuente emite cada pulsación después de que ha pasado un periodo, por lo tanto este tiempo se presenta como parte fundamental también, al igual que la longitud de onda para seguir al pulso en el tiempo. La primera figura es un ejemplo de ello.

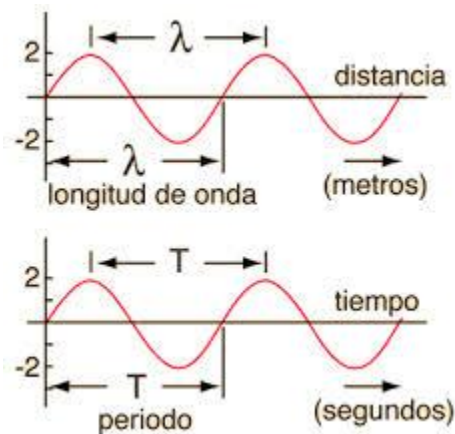


Imagen 5 M Olmo R Nave, Gráficos de ondas, Tomado de <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/>

En las figuras se muestra la periodicidad espacial y la periodicidad temporal de una onda periódica unidimensional; en la primera se representa la configuración del medio en un instante dado, el estado de un del medio en el mismo momento (por ejemplo cuando la ubicación es la variable que designa el estado del medio). En la segunda se muestra el cambio de estado experimentado por cada punto del medio en el tiempo.

EL FRENTE DE ONDA

Este elemento es muy importante a la hora de analizar la propagación, ya que es el que nos permite seguir al pulso en el tiempo y el espacio, debido a su forma y comparación con otros frentes podemos determinar también otras características cinemáticas de la onda. El frente de onda ha sido considerado por varios físicos como parte fundamental y si se observa en la historia del desarrollo de la teoría lo han definido de maneras diversas.

Para algunos el frente de onda es la representación de cómo se configura el medio después de estar en equilibrio y ser perturbado por una fuente, tal es el caso de una gota de agua que cae en un estanque (img1), los frentes de onda producidos tienen una forma circular.



Imagen 6: tomada de <http://forum.lawebdefisica.com/entries/509-Frente-de-ondas>

Los frentes de onda producidos por una lámina que toca el agua serán líneas rectas, visualmente en el agua el efecto es claro; pero ¿qué es un frente de onda? ¿Por qué nos interesamos en él? El frente de onda se define como “el lugar geométrico que une todos los puntos que, en un instante dado, se encuentran en idéntico estado de vibración, es decir, tienen igual fase”



Imagen 7: Bautista, M, Editorial Santillana tomado de Hipertexto Física Santillana

FRECUENCIA

Esta característica muchas veces se presenta como confusa debido a que no existe una sola frecuencia y por lo tanto estas se suelen confundir entre sí. En el proceso producción-propagación- recepción, del pulso intervienen la frecuencia de la fuente, la cual en casi todos los textos se define como el número de oscilaciones (perturbaciones sobre el medio) en una unidad de tiempo. Pero en el caso de la onda es algo un poco diferente, si se considera la situación en que la fuente es estacionaria, ósea que no se desplaza, la frecuencia de la onda y la frecuencia de la fuente coinciden, pero si el caso es que la fuente se mueve, la cantidad de ciclos de la onda cambian como sucede en el fenómeno del efecto Doppler que se estudiara más adelante en el capítulo 3. Sin embargo es necesario aclarar que existe una diferencia.

Con relación a lo sensorial, la frecuencia no solo nos da información sobre el número de ciclos realizados por la onda en una unidad de tiempo, sino que también influye en lo que es percibido, sensorialmente la frecuencia es lo que se conoce como *tono*.

SONIDO Y LUZ: QUE LOS HACE ONDAS Y SU CARÁCTER SENSORIAL

CASO SONORO: TONO Y FRECUENCIA

La historia del sonido está ligada a la historia y desarrollo de la teoría ondulatoria. Posiblemente la propagación del mismo, propio de la experiencia cotidiana, es decir, la producción de un efecto en un lugar y su detección en otro, ha hecho que se considere el carácter ondulatorio como propio de este fenómeno. Sin embargo, la consolidación de la

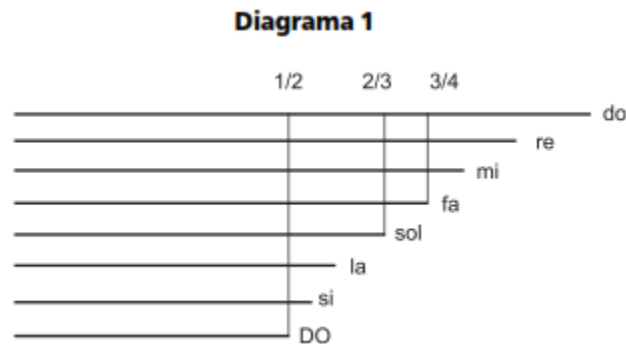


imagen ondulatoria del sonido fue una síntesis de los esfuerzos de muchos pensadores a lo largo de la historia. Una de las primeras referencias que asocian al sonido como una onda se encuentra en una declaración hecha por Aristóteles cuando indicó que el sonido percibido se debía a una fuente que alteraba o hacía entrar en movimiento el aire circundante. Aristóteles afirmaba que la fuente debía encontrarse en movimiento hacia adelante para que las ondas sonoras inalteradas puedan propagarse hasta el punto en donde sean insostenibles. Pitágoras ha sido reconocido como el padre de la acústica al considerársele como el primer pensador en dotar de un fundamento matemático a la música. Se dice que el pensador griego se interesó en ello al darse cuenta que los sonidos emitidos por diferentes martillos al golpear un yunque eran concordantes u armónicos y no dependían de la fuerza del golpe, de su forma sino de su tamaño. Para dilucidar las relaciones matemáticas existentes entre los sonidos emitidos y los objetos que lo emiten, parte del reconocimiento de que al pulsar una cuerda tensionada se produce un sonido que depende de la longitud de ésta. "Cuando la cuerda pulsada se divide en porciones de cierta longitud, surgen ocho sonidos que se conocen como las ocho notas de la escala musical, Diagrama 1" (TOMASINI, pág. 15). Considera que la propiedad que relaciona el tamaño del objeto vibrante se verifica para cualquier objeto vibrante; por ejemplo, dividiendo adecuadamente la longitud de un tubo por donde circula el aire se obtienen las notas de la escala musical. En la actualidad las notas musicales, nos recuerda Tomasini, no se definen a partir del objeto vibrante sino a partir de la frecuencia de la onda sonora emitida por éste.

Galileo fue otro de los que contribuyó enormemente en la construcción de lo que hoy conocemos como ondas sonoras el cual es un modelo útil en la comprensión del sonido y sus fenómenos, Galileo fue quien demostró que la frecuencia de las ondas sonoras era la que determinaba el tono, esto lo hizo con un experimento sencillo; en un plato de latón rozó un cincel produciendo un chillido o sonido muy agudo, Galileo relacionó el espacio de las ranuras en el cincel al sonido que este producía, el cual era cambiante en el tono de los chillidos.

Luego de esto hubo hallazgos que cambiaron el rumbo de las ideas con relación al sonido el cual era incierto en su naturaleza hasta que se midió su velocidad por primera vez y también se aclararon dudas con el famoso experimento de Boyle que demostró que el sonido necesita un medio elástico para poder propagarse, Boyle colocó un reloj haciendo tic tac dentro de un recipiente parcialmente vacío, comprobando así que no se escuchaba el sonido del reloj. Aun así la definición matemática de la teoría de las ondas sonoras no empezó hasta que Newton postulara la interpretación del sonido como pulsos de presión transmitidos a través de partículas vecinas.

Como verán, el sonido al igual que la luz ha sido un tema de interés científico discutido ampliamente y que aún genera interrogantes, el sonido ha sido caracterizado y explicado analizando algunos procesos físicos que lo producen, como por ejemplo, una cuerda vibrando, aire vibrando al interior de un instrumento de viento, etc. La característica principal de esos sonidos es el tono, el cual se dice que es producido por la frecuencia de la onda. Cuanto mayor sea su frecuencia, más aguda o "alta" será la nota musical. El tono es una propiedad subjetiva de un sonido por la que puede compararse con otro en términos de "alto o "bajo". Los sonidos de mayor o menor frecuencia se denominan respectivamente, agudos o graves; términos relativos, ya que entre los tonos diferentes uno de ellos será siempre más agudo que el otro y a la inversa.

Mientras que la frecuencia de un sonido, es una definición física cuantitativa, que se puede medir con aparatos sin una referencia auditiva, la elevación es nuestra evaluación subjetiva de la frecuencia del sonido. La percepción puede ser diferente en distintas situaciones, así para una frecuencia específica no siempre tendremos la misma elevación.

A pesar de que esta característica del sonido es subjetiva, la percepción de más grave o más agudo es notable por ejemplo en fenómenos como el efecto Doppler cuando el observador o la fuente generadora del sonido se encuentran en movimiento, muchas veces el cambio de este tono puede ser confundido con el cambio de intensidad sonora (Amplitud) la cual también sufre cambios debido a la disipación de la energía de la onda sonora.

CASO LUMINOSO: LA CONCEPCIÓN DE LA LUZ Y EL COLOR EN EL SIGLO XIX

Durante la época del siglo XIX existían hipótesis sobre la naturaleza de la luz y como esta se manifestaba en nosotros por medio de sensaciones, varios pensadores de la época lanzaban sus especulaciones acerca del tema, entre ellos; Newton, Huygens Young y por supuesto Doppler. Existían diversas explicaciones con relación a los fenómenos producidos por la luz y con ello se instauraron las explicaciones más predominantes: la naturaleza ondulatoria de la luz y la naturaleza corpuscular.

Newton tenía la concepción de que se podían ver los objetos por medio del fenómeno de la refracción, el cual sucedía cuando los corpúsculos de luz interactuaban con el medio (Éter). En ese entonces era una herramienta para poder dar solución a diferentes fenómenos, especialmente el de la luz y su naturaleza.

Huygens también propuso algunas ideas sobre la luz, su teoría se fundamentaba en que la luz era un movimiento mecánico transmitido desde una fuente luminosa al ojo, aunque no aclara como sucede el fenómeno de la visión en cuanto a las sensaciones de los colores. Para Huygens todos los fenómenos naturales son efectos mecánicos, también creía que la luz tenía una naturaleza ondulatoria y que su comportamiento era análogo al del sonido cuando se propaga en el aire, en consecuencia, propone un medio que él llamó el éter, que se concibe como una densa colección de pequeñas esferas elásticas muy rígidas, a través del cual se propaga la luz en forma longitudinal. Estas esferas llenan todo el espacio e incluso penetran en cuerpos materiales "sólidos" a través de su estructura porosa.

Young por otro lado se encontraba completamente convencido de la naturaleza ondulatoria de la luz, propuso una idea similar a la de Huygens la diferencia en su teoría es que atribuye la variación de la velocidad de la luz a la rigidez o resistencia del medio en que se propaga.

Un experimento fundamental para explicar la teoría ondulatoria de la luz, fue el de la doble rendija, Young recoge pasajes de Newton sobre la óptica y el éter en apoyo a su propia teoría de las cuatro hipótesis, en donde también utiliza como herramienta al éter para explicar la naturaleza ondulatoria de la luz. Estas hipótesis que indican claramente la conexión entre la teoría de la óptica y un éter en el comienzo del siglo XIX:

1. Un éter luminoso impregna el universo, es raro y elástico en un alto grado.
2. Las ondulaciones se propagan en este éter cada vez que un cuerpo se vuelve luminosa.
3. La sensación de diferentes colores depende de las diferentes frecuencias de vibración salido por la luz en la retina.
4. Todos los cuerpos materiales tienen una atracción para el medio etéreo, por medio de la cual se acumula en su sustancia y por una pequeña distancia alrededor de ellos en un estado de mayor densidad, pero no de una mayor elasticidad.

EL EFECTO DOPPLER Y LA RELATIVIDAD DEL MOVIMIENTO

CONSIDERACIONES SOBRE EL EFECTO DOPPLER

El efecto Doppler debe su nombre al físico Austriaco Christian Andreas Doppler (1803-1846), quien no dedico su vida a demostrar el efecto, por el contrario todo le surgió de un momento a otro durante una época de su vida en donde no le iba nada bien en su profesión como docente del Politécnico de Praga. Es curioso encontrar en la mayoría de textos que el experimento sonoro realizado por Doppler fue la causa de su descubrimiento, cuando realmente el centra sus hallazgos en lo sucedido con la luz de las estrellas.

Durante la época de la escritura del artículo que hizo famoso a Doppler¹⁰, el creyó que análogo a la luz, se encontraba el sonido, y que con él también se podía encontrar ese aparente cambio de frecuencia que surge cuando una fuente de ondas se aleja o se acerca de un observador. Sin embargo el fenómeno fue planteado en principio para las ondas luminosas en su artículo, aunque no demostró su teoría hasta 1945, con el conocido número del tren. Posteriormente el físico Francés L. Fizeau aplicó este principio a la astronomía.

En el texto Doppler da por sentado la naturaleza ondulatoria de la luz. Más adelante en el capítulo dos de su escrito Doppler observa que el color es una manifestación de la frecuencia de la onda de luz, en el ojo del espectador. Él describe su principio de que un cambio de frecuencia se produce cuando la fuente o el observador se mueven. Luego Doppler plantea su modelo matemático para las ondas luminosas.

En el cuadro 1 se encuentran las ecuaciones de la frecuencia observada con relación a la frecuencia de la fuente y su comparación con la ecuación moderna, para dos situaciones.

En la primera situación donde el observador se acerca a la fuente con una velocidad (v_0), la ecuación moderna es idéntica a la ecuación planteada por Doppler. Se nota que Doppler hace uso de la velocidad de la luz "c", que para esa época todavía estaba por determinarse el valor definitivo.

¹⁰ "[Über das farbige Licht der Doppelsterne und einiger anderer Gestirne des Himmels](#)" (*On the coloured light of the binary stars and some other stars of the heavens*) Polytechnic of Prague, 1846.

		Ecuación Doppler ^[11]	Ecuación Moderna
1.	Observador acercándose a fuente estacionaria con la velocidad v_o	$n/x = (a + a_o) / \text{una}$	$f'/f = (c + v_o) / c$
2.	Fuente acercándose a un observador estacionario con la velocidad v_s	$n/x = a / (a - a_s)$	$f'/f = c / (c - v_s)$

Tabla 1: Ecuaciones originales del artículo original de Doppler "Sobre la coloración de las estrellas dobles" (1842)

En la situación número dos se nota un cambio de la ecuación moderna con relación a la ecuación planteada por Doppler.

COMO SE ENTIENDE EL EFECTO DOPPLER

Hilando con el resto del trabajo, se han trabajado un poco más a fondo y con más reflexión las características cinemáticas de las ondas y el mecanismo de propagación, los cuales son elementos claves para entender este fenómeno propio de las ondas. El efecto Doppler sucede a menudo en la cotidianidad, para acercarse más a lo que se entiende por este efecto, es útil la siguiente situación planteada por el texto universitario de R. Serway (2008)¹¹:

“Para comprender que causa este cambio de frecuencia aparente, imagine que está en un bote anclado en un mar tranquilo donde las ondas tienen un periodo $T = 3.0$ s. Por tanto, cada 3.0 s una cresta golpea su bote. La figura muestra esta situación, con las ondas acuáticas moviéndose hacia la izquierda. Si usted pone su reloj en $t = 0$ justo cuando una cresta golpea, la lectura en el reloj es 3.0 s cuando la siguiente cresta golpea, 6.0 s cuando la tercera cresta golpea, y así sucesivamente. A partir de estas observaciones, concluye que la frecuencia ondulatoria es $f = 1/T = 1/(3.0 \text{ s}) = 0.33 \text{ Hz}$. Ahora suponga que enciende su motor y se dirige directamente hacia las ondas que se acercan, como en la figura. Una vez más pone su reloj en $t = 0$ cuando una cresta golpea el frente (la proa) de su bote. Sin embargo, ahora, ya que se mueve hacia la cresta de



¹¹ Física para ciencias e ingeniería volumen 1, séptima edición D.R. 2008 | S.A. de C.V.,

onda siguiente mientras ella se mueve hacia usted, lo golpea a menos de 3.0 s después del primer golpe. .En otras palabras, el periodo que ahora observa es más corto que el periodo de 3.0 s que observo cuando estaba en posición estable. Ya que $f = 1/T$, observa una frecuencia ondulatoria mayor que cuando estaba en reposo.

Si usted da vuelta y se mueve en la misma dirección que las ondas (figura), se observa el efecto opuesto. Pone su reloj en $t = 0$ cuando una cresta golpea la parte trasera del bote (la popa). Ya que ahora se mueve alejándose de la siguiente cresta, en su reloj transcurren más de 3.0 s para cuando dicha cresta lo alcanza. Por lo tanto, se observa una frecuencia más baja que cuando estaba en reposo”.

La situación anterior es muy clara y evidencia como sucede el fenómeno para las ondas en el agua, es clara y concisa. Se pueden identificar claramente al receptor de las ondas (bote), su dirección y velocidad y como estas afectan la frecuencia percibida. Todo esto sin necesidad de remitirnos al modelo matemático. Ahora bien el modelo matemático planteado debe estar acorde con los ejemplos.

DEDUCCIÓN DE LAS ECUACIONES: CASO CLÁSICO

Convenciones:

V_o = velocidad de la onda

V_e = velocidad del emisor

V_r = velocidad del receptor

T_e = periodo de recepción.

T_r = periodo de emisión o tiempo entre la emisión de un pulso y el otro.

F= fuente

R=receptor

1. Fuente acercándose al observador en reposo (para $V_e < V_o$)

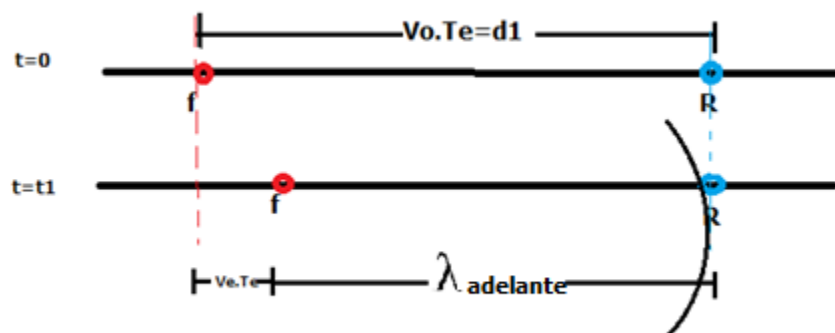


Imagen 8 Fuente acercándose al observador en reposo. Elaboración propia

En el primer instante $t=0$ la fuente recién está enviando el primer pulso la situación es como la ilustrada arriba, luego de un periodo (T_e), el receptor estará recibiendo el primer pulso y simultáneamente la fuente estará enviando el segundo pulso desde una posición

más cercana al receptor, la fuente se ha movido una distancia $v_e T_e$ y el pulso se ha desplazado una distancia $v_o T_e$. Se quiere encontrar la longitud de onda del segundo pulso, la cual no es la misma del primer pulso debido a que la fuente se desplazó, por tanto esa longitud de onda será:

$$\lambda \text{ adelante} = v_o T_e - v_e T_e$$

$$\lambda \text{ adelante} = T_e (v_o - v_e)$$

Así sabiendo que $d = vt$ donde se podría asumir que $v = v_o$, que $t = T_r$ y $d = \lambda \text{ adelante}$

$$T_r = \frac{T_e (v_o - v_e)}{v_o}$$

Y como $T = \frac{1}{f}$;

$$\frac{1}{f_r} = \frac{(v_o - v_e)}{f_e v_o}$$

$$f_r = f_e \frac{v_o}{(v_o - v_e)}$$

2. Fuente alejándose del observador estacionario

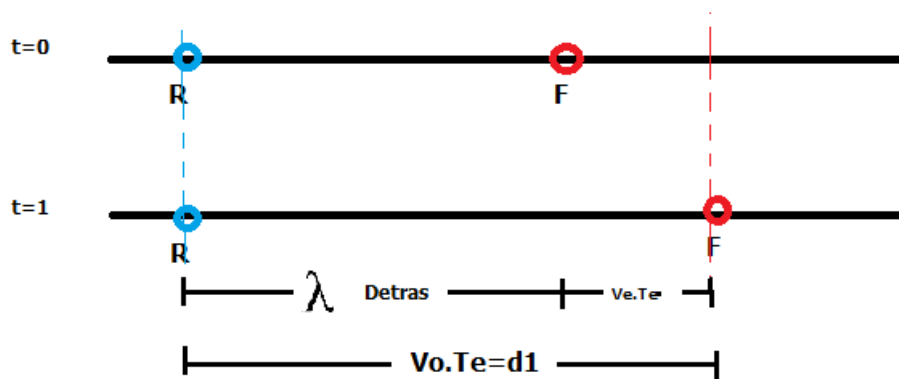


Imagen 9 Fuente alejándose del observador, estando el observador en reposo. Elaboración propia

En el primer instante $t=0$ cuando la fuente recién está enviando el pulso la situación es como la ilustrada arriba, luego de un periodo, el receptor estará recibiendo el primer pulso y

simultáneamente la fuente estará enviando el segundo pulso desde una posición más lejana al observador, la fuente se ha movido una distancia $v_e T_e$ y el pulso se ha desplazado una distancia $v_o T_e$. Se quiere encontrar la longitud de onda del segundo pulso, la cual no es la misma del primer pulso debido a que la fuente se desplazó, por tanto esa longitud de onda será:

$$\lambda \text{ detras} = v_o T_e + v_e T_e$$

$$\lambda \text{ detras} = T_e(v_o + v_e)$$

Así sabiendo que $d = vt$ donde se podría asumir que $v = v_o$, que $t = T_r$ y $d = \lambda \text{ detras}$

$$T_r = \frac{T_e(v_o + v_e)}{v_o}$$

Siguiendo el razonamiento de la situación anterior la expresión matemática que nos da cuenta de la frecuencia observada es:

$$f_r = f_e \frac{v_o}{(v_o + v_e)}$$

De acuerdo a los dos casos ya enunciados, se puede determinar una lambda general:

$$\lambda \text{ general} = T_e(v_o \pm v_e)$$

En este caso se preguntaran el porqué del receptor en la parte de atrás, pero en realidad, no interesa la posición del receptor si de todas maneras la fuente va a estar alejándose. Tendríamos así un caso análogo al de receptor delante de la fuente, pero está alejándose en dirección contraria:

3. Fuente estacionaria y observador alejándose.

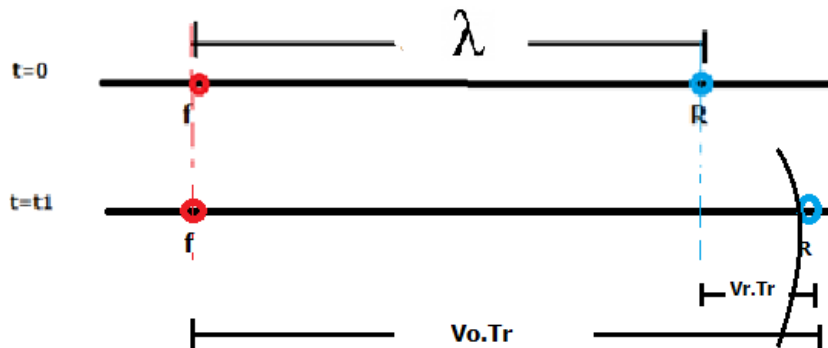


Imagen 10 Fuente estacionaria y observador alejándose. Elaboración propia

Para $t=0$ cuando la fuente envía el pulso la situación es como la ilustrada, luego de un periodo, el receptor estará recibiendo el primer pulso y simultáneamente la fuente estará enviando el segundo pulso, en ese instante el observador se habrá desplazado una distancia $v_r T_r$ y el pulso se ha desplazado una distancia $v_o T_r$. Se quiere encontrar la longitud de onda del segundo pulso, la cual no es la misma del primer pulso debido a que la fuente se desplazó, por tanto esa longitud de onda será:

$$\lambda = v_o T_r - v_r T_r$$

$$\lambda = T_r (v_o - v_r)$$

Así sabiendo que $d = vt$ donde se podría asumir que $v = v_o$, que $t = T_r$ y $d = \lambda$ adelante

$$T_r = \frac{\lambda}{(v_o - v_r)}$$

Y como $v_o = \lambda f_e$:

$$f_r = \frac{(v_o - v_r)}{\lambda}$$

$$f_r = f_e \frac{(v_o - v_r)}{v_o}$$

4. Fuente en reposo y observador acercándose

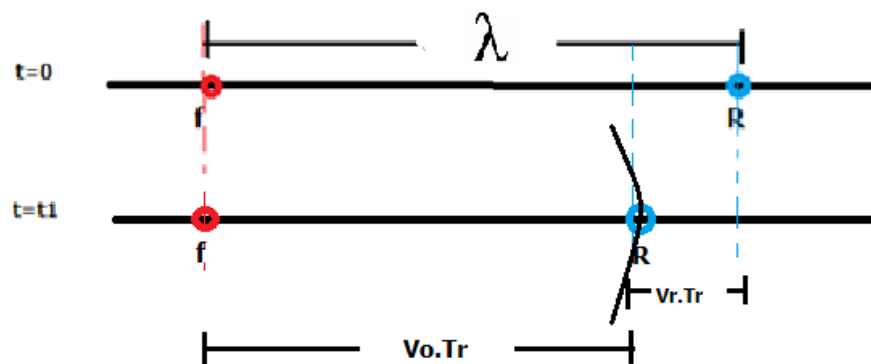


Imagen 11 Fuente en reposo y observador acercándose

Para $t=0$ cuando la fuente envía el pulso la situación es como la ilustrada, luego de un periodo, el receptor estará recibiendo el primer pulso y simultáneamente la fuente estará enviando el segundo pulso, en ese instante el observador se habrá desplazado una distancia $v_r T_r$ acercándose a la fuente y el pulso se ha desplazado una distancia $v_o T_r$. Se quiere encontrar la longitud de onda del segundo pulso, la cual no es la misma del primer pulso debido a que la fuente se desplazó, por tanto esa longitud de onda será:

$$\lambda = v_o T_r + v_r T_r$$

$$\lambda = T_r (v_o + v_r)$$

Así sabiendo que $d = vt$ donde se podría asumir que $v = v_o$, que $t = T_r$ y $d = \lambda$ adelante

$$T_r = \frac{\lambda}{(v_o + v_r)}$$

Y como $v_o = \lambda f_e$;

$$f_r = \frac{(v_o + v_r)}{\lambda}$$

$$f_r = f_e \frac{(v_o + v_r)}{v_o}$$

Por tanto la forma general de la ecuación, para todos los casos estaría descrita así:

$$f_r = f_e \frac{(v_o \pm v_r)}{(v_o \pm v_e)}$$

EFFECTO DOPPLER RELATIVISTA

El no poder diferenciar en el caso electromagnético cual se mueve en el movimiento relativo fuente-observador es lo que lleva a establecer una diferencia de este efecto entre este caso y el caso mecánico. En la formulación que involucra a la luz ya no es posible hablar de un movimiento absoluto; en este contexto solo es válido pensar en un movimiento puramente relativo.

Este fenómeno para el caso luminoso es problemático debido a que se obliga a pensar en una onda sin medio y por tanto sin marco de referencia. Se da por sentado tanto en libros de texto como en cursos introductorios que dando la formulación matemática de las frecuencias de recepción se obtendrá un conocimiento satisfactorio acerca del fenómeno, sin embargo termina siendo una información confusa y sin sentido

DEDUCCIÓN DE ECUACIONES: CASO RELATIVISTA

Único caso: fuente de luz que se aproxima a un observador en reposo

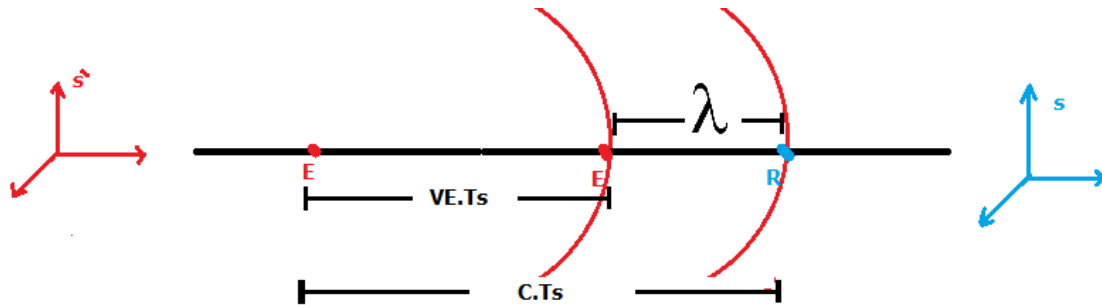


Imagen 12 Único caso: Fuente de luz que se aproxima a un observador en reposo

Convenciones:

S' = sistema de referencia emisor

S = sistema de referencia receptor

E = emisor

VE = velocidad emisor

T_s = tiempo propio

T_s' = tiempo impropio

f_s' = frecuencia emisor

f_s = frecuencia de recepción

λ = longitud de onda

R = receptor

c = velocidad de la luz

γ = coeficiente de transformación de Lorentz

La situación presentada en la figura arriba es la de una fuente de luz que se aproxima a un observador en reposo, se puede ver en la figura como se desplaza la fuente desde una posición a otra más cercana al observador con relación al sistema de referencia S , correspondiente a la fuente.

Lo que se desplaza la onda hacia el receptor se puede entender como:

$$c T_s$$

La cantidad anterior se puede entender como la distancia que recorrió la luz en un periodo medida desde el observador.

Por otro lado, lo que se desplaza la fuente desde el primer pulso emitido hasta la emisión del segundo pulso medida también es:

$$v_E T_S$$

Así:

$$\lambda = c T_S - v_E T_S$$

$$\lambda = T_S(c - v_E)$$

Ahora se mide el tiempo propio, que sería el tiempo medido por el receptor en el sistema de referencia S':

$$T_S = T_S' \gamma$$

$$T_S = \frac{T_S'}{1 - \frac{v_E^2}{c^2}}$$

$$T_S = \frac{c T_S'}{c^2 - v_E^2}$$

Como T_S también es $T_S = \frac{1}{f_s}$

$$\frac{1}{f_s} = \frac{\sqrt{c^2 - v_E^2}}{c T_S'}$$

Así f_s será

$$f_s = \frac{\sqrt{c^2 - v_E^2}}{c} f_s'$$

Pero como se debe colocar el factor que hace parte de la frecuencia del observador cuando la fuente se desplazo

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

Entonces

$$f_s = \frac{c}{(c - v_E)} * \frac{\sqrt{c^2 - v_E^2}}{c} f_s'$$

$$f_s = \frac{\sqrt{c^2 - v_E^2}}{(c - v_E)} f_s'$$

$$f_s = \frac{(c - v_E)(c + v_E)}{(c - v_E)^2} f_s'$$

$$f_s = \frac{(c + v_E)}{(c - v_E)} f_s'$$

De la misma forma se demuestra que

$$f_s = \frac{(c + v_E)}{(c - v_E)} f_s'$$

No existe distinción entre el movimiento de la fuente y/o el observador ya que la velocidad de la luz es constante.

CONSIDERACIONES SOBRE EL EFECTO DOPPLER RELATIVISTA

- La relación que existe entre los marcos de referencia, ya no está dada por las transformaciones de galileo si no por Lorentz.
- No se debe encontrar diferencia entre si se mueve o no el observador, lo único que importa es que haya movimiento relativo entre la fuente y el observador.
- La relación entre las frecuencias depende de cómo es movimiento del receptor y viceversa
- La fuente no es un punto, la fuente se extiende como marco de referencia
- Las expresiones matemáticas para el efecto Doppler serán distintas ya sea que la fuente esté estacionaria y el observador externo se esté moviendo o que la fuente se esté moviendo también. Esta es precisamente una muestra de las asimetrías a las que Einstein hacía referencia cuando se suponía que las ondas luminosas eran transportadas a través de un medio de referencia estacionario conocido como el éter.
- A pesar de que se ha hecho el estudio de las ecuaciones que modelan el fenómeno aún queda una duda por analizar ¿la frecuencia en el caso relativista cuál es? ¿de qué estaríamos hablando cuando el objeto se aleja o se acerca, con relación a la frecuencia?

CONCLUSIONES

- Las grandes dificultades en la comprensión del modelo ondulatorio se deben en gran parte a la explicación poco satisfactoria que brindan los libros de texto sobre el tema. Estos libros de texto no tratan a profundidad las características cinemáticas ni las ponen en contexto para que el estudiante las relacione con su cotidianidad. Lo anterior es importante debido al gran papel que juegan los libros de texto en la escuela, estos son consultados por la mayoría de docentes y estudiantes de las diferentes instituciones.
- Se debe entender la propagación de la perturbación como un proceso, en el cual se debe tener en cuenta toda acción, desde la producción de la perturbación hasta la recepción de la misma y además se debe tener en cuenta que suceden cambios en el medio.
- Como no es claro el papel de las características cinemáticas en la propagación de las ondas, es difícil también que se comprendan los fenómenos asociados a las ondas. Un caso particular de lo anterior es la comprensión del efecto Doppler, en el cual se hace necesario manejar las concepciones de longitud de onda, frente de onda, velocidad de propagación y frecuencia.
- Se hace necesario profundizar más tanto gráfica como matemáticamente sobre el fenómeno del efecto Doppler clásico, ya que es confuso entenderlo por medio de la expresión matemática. Es importante que tanto el maestro como el estudiante relacionen las características cinemáticas de la onda para poder comprender lo que está sucediendo con la onda si alguno de los dos; receptor o emisor de la onda se mueven. Se anexa una deducción matemática de las fórmulas que tiene también su explicación gráfica. (nivel de escolaridad: grado 11 y curso de ondas de la licenciatura en física)
- A la hora de intentar comprender el efecto Doppler relativista se deben tomar en cuenta las dos máximas consideraciones; que ya no existe un medio que sirva como marco de referencia absoluto y que la velocidad de la luz es la misma para cualquier observador en cualquier marco de referencia.
- Se puede diferenciar entre lo que es onda y lo que no bajo las tres condiciones enunciadas anteriormente, se deben cumplir las tres a mi criterio para poder decir que si es o no es una onda y además se debe estudiar el proceso de la propagación. Para ello también se considera clave el seguir la perturbación en el espacio (frente de onda) y la velocidad del frente de onda.

BIBLIOGRAFÍA

Ballesteros, I. R. (2013). Descripción Física De la Armonía Musical, una propuesta para la enseñanza de las ondas sonoras. *Universidad Pedagógica Nacional*.

Bravo, S., & Pesa, M. y. (2009). REPRESENTACIONES DE ALUMNOS UNIVERSITARIOS SOBRE PROPAGACIÓN DE ONDAS MECÁNICAS. *Investigación didáctica*.

Crawford, F. (1994). *WAVES, Berkeley physics course*. Barcelona: Reverté.

Fabio Vélez U., PhD. Apuntes de relatividad primera edición (2012). Bogotá, Colombia. Corcas editores SAS.

F. Bueche (1990) Fundamentos de física 2, undécimo grado, vol. 2, editorial Mc Graw Hill latinoamericana.

French, A. P. (1974). *Vibraciones y ondas*. Barcelona: REVERTÉ.

Granés S. y Luz Marina Caicedo. () DEL CONTEXTO DE LA PRODUCCIÓN DE CONOCIMIENTOS AL CONTEXTO DE LA ENSEÑANZA. Análisis de una experiencia pedagógica, *Departamento de Física. Universidad Nacional de Colombia*

James Clerck Maxwell, ETER, Traducción realizada por Juan Carlos Orozco, profesor asistente del departamento de Física de la Universidad pedagógica nacional a partir del texto en ingles publicado en NIVEN, W.D (Edit) “the scientific papers of James Clerck Maxwell”, vol. 2, Dover publications, Inc New Cork 1965

López Ferrero, C. Reflexiones sobre la enseñanza-aprendizaje de los textos explicativos en la universidad, *Universitat Pompeu Fabra (Barcelona)*

M, Arca. P, Guidoni y P, Mazzoli. Enseñar ciencias (1990), Editorial PAIDOS, pág. 46.

MICHINEL MACHADO, J.L. y D'ALESSANDRO MARTÍNEZ, A. el concepto de energía en los libros de textos: de las concepciones previas a la propuesta de un nuevo sub lenguaje, escuela de física, facultad de ciencias, ucv enseñanza de las ciencias, 1994

Olga Lucía Romero M, Mauricio Bautista B. (2011) Hipertexto 2 de física, EDITORIAL SANTILLANA S.A.

Paul Allen Tipler, Gene Mosca (2005), física para ciencia y tecnología, vol. 1, editorial Reverte.

Perales, F. Javier y Jiménez, Juan de dios, LAS ILUSTRACIONES EN LA ENSEÑANZA-APRENDIZAJE DE LAS CIENCIAS. ANÁLISIS DE LIBROS DE TEXTO, Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales. Facultad de Ciencias de la Educación Universidad de Granada. Campus Universitario de Cartuja. Revista enseñanza de las ciencias, 2002

Raymond Serway, J. J. (2008). *Física para ciencias e Ingenierías*. México D.F.: CENGAGE learning.

Richard P. Feynman, ¿QUÉ ES CIENCIA? , conferencia en la *convención anual de la Asociación Nacional de Profesores de Ciencias de los Estados Unidos, en 1966*.

Welti, Reinaldo (2012.) El rol de las analogías matemáticas como generador de teorías físicas, *Laboratorio de Vibraciones y Ondas, Departamento de Física y Química, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Avenida Pellegrini 250, 2000 Rosario, Argentina, Diciembre*

Welti, Reinaldo, (2002) concepciones de estudiantes y profesores acerca de la energía de las ondas, Taller de Investigación en la Didáctica de las Ciencias. Departamento de Física y Química Facultad de Ciencias Exactas e Ingeniería. Universidad Nacional de Rosario Av. Pellegrini, 250. 2000 Rosario. Argentina, ENSEÑANZA DE LAS CIENCIAS, 2002.