

COMPRENSIÓN ONTOLÓGICA DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS EN ESTUDIANTES AVANZADOS DE FÍSICA

Ontological understanding of electromagnetic waves in senior Physics students

M. Cecilia Pocoví (cpocovi@gmail.com)

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Salta.

Avda. Bolivia 5150, CP 4400, Salta, Argentina.

Elena Hoyos (hoyosele@gmail.com)

Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta.

Avda. Bolivia 5150, CP 4400, Salta, Argentina.

Recebido em: 29/08/2023

Aceito em: 20/11/2023

Resumen

Se realizó un Estudio de Caso sobre las concepciones de alumnos universitarios avanzados de carreras de Física acerca del concepto de onda electromagnética. Con el objeto de caracterizar dichas concepciones desde el punto de vista ontológico, este trabajo se dividió en dos partes: en la primera, se analizó la ontología del concepto de ondas (tanto mecánicas como electromagnéticas); en la segunda parte, se llevaron a cabo entrevistas especialmente elaboradas para revelar las características ontológicas de las ideas de los participantes. La importancia de este estudio radica en que investigaciones previas han llamado la atención acerca de los problemas que una incorrecta caracterización ontológica puede traer para lograr la comprensión de los conceptos en Física. Se concluye que la ontología de las ondas, en general, corresponde a la categoría de Proceso Directo y que, entre los alumnos entrevistados, fue común la asignación de atributos ontológicos de las ondas mecánicas a las electromagnéticas. Se sugieren algunas estrategias didácticas posibles que podrían diseñarse para reducir la brecha entre las ideas científicas y aquellas del tipo ontológico que fueron encontradas.

Palabras clave: ondas electromagnéticas, ontología, cambio conceptual, estudiantes universitarios avanzados

Abstract

A Case Study was carried out on the conceptions that senior Physics students have about the concept of electromagnetic wave. In order to characterize these conceptions from the ontological point of view, this work was divided into two parts: in the first, the ontology of the concept of waves (both mechanical and electromagnetic) was analyzed; in the second part, especially designed interviews were carried out to reveal the ontological characteristics of the ideas of the participants. The importance of this study lies in the fact that previous investigations have called attention to the problems that an incorrect ontological characterization can bring to achieve an understanding of the concepts in Physics. It is concluded that the ontology of waves, in general, corresponds to the category of Direct Process and that, among the students interviewed, the assignment of ontological attributes of mechanical waves to electromagnetic ones was common. Some possible didactic strategies are suggested that could be designed to reduce the gap between scientific ideas and those of the ontological type that were found.

Keywords: electromagnetic waves, ontology, conceptual change, senior university students

I. INTRODUCCIÓN

Las investigaciones educativas en Física sobre el aprendizaje del concepto de ondas, han sido mayoritariamente centradas en ondas mecánicas. Así lo muestra la revisión bibliográfica realizada por McDermott y Redish (1999). Entre aquellos trabajos que tienen como tema central la electricidad o el magnetismo, los que tratan los problemas de aprendizaje del concepto de onda electromagnética son la minoría, como se puede apreciar en la revisión de este tipo de trabajos realizada en Guisasola, Almodí y Zubimendi (2003). Otros, como la revisión llevada a cabo por Duit, et al. (2014) ni siquiera mencionan al área de electromagnetismo como una de las principales investigadas en la Enseñanza de Física (menos aún, ondas electromagnéticas) y, en cambio, presentan a los circuitos simples (corriente continua) como uno de los principales temas desarrollados en las investigaciones.

Los investigadores en enseñanza de Física podríamos argumentar una excusa para no dar prioridad al aprendizaje de ondas electromagnéticas: Si los estudiantes no conocen bien los prerrequisitos que se necesitan para la comprensión del concepto de ondas electromagnéticas, no parece adecuado centrar las investigaciones en este concepto complejo sino en los prerrequisitos. Entendemos como concepto complejo aquel que involucra otros conceptos. Por ejemplo, para comprender las ondas electromagnéticas correctamente, hace falta la comprensión de otros conceptos como onda, propagación de energía, campo eléctrico y campo magnético.

Esta argumentación dejaría de ser una excusa si se considera que el tema de ondas electromagnéticas se presenta en todos los cursos de electromagnetismo a nivel universitario y su estudio no se posterga porque los alumnos no hayan logrado el tan esperado cambio conceptual en los temas previos.

En un trabajo anterior (Alurralde y Pocoví, 2005) se detectaron algunos problemas de caracterización ontológica del concepto de ondas mecánicas por parte de los alumnos. La noción de ondas mecánicas está en un nivel equivalente en el árbol ontológico (ver marco teórico) que aquel de ondas electromagnéticas. Dado que, ambos conceptos pertenecen a la categoría de Proceso, el aprendizaje de ondas electromagnéticas después de haber estudiado las mecánicas, se encuadraría dentro de lo que Chi (1992) define como cambio conceptual no radical, o sea, el cambio conceptual que se realiza dentro de una misma categoría ontológica, entre ramas paralelas. El aprendizaje de las ondas electromagnéticas realizado posteriormente a aquel de las mecánicas, debería implicar el conocimiento de los atributos que diferencian unas de otras. Una descripción de la ontología que los alumnos asocian a las ondas electromagnéticas permitiría la determinación de los atributos que los sujetos asocian con las éstas y la distinción que realizan entre las mecánicas y las electromagnéticas.

II. MARCO TEÓRICO Y PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

Dado que la teoría de cambio conceptual presentada en Chi (1992, 2005, 2013) centra su atención en los aspectos ontológicos del conocimiento de los conceptos, se eligió dicha teoría para guiar la investigación. Se realiza a continuación, un breve resumen de algunos aspectos sobresalientes de ésta que no pretende ser un reemplazo de la teoría completa. Se sugiere, al lector interesado, remitirse a las fuentes citadas para mayor información.

Chi, et al. (1994) establecieron que la confusión del estatus ontológico del concepto a ser estudiado es un factor importante que afecta el aprendizaje. Su teoría categoriza las entidades en el mundo como conceptos “basados en Materia” y “basados en Procesos”. Numerosas investigaciones (Chi, 2005; Slotta, et al., 1995; Chi, et al., 1994; Keil, 1979) muestran que el conocimiento conceptual está estructurado de acuerdo a categorías, siendo las categorías tipo “Materia” y tipo “Proceso” de gran

importancia en la enseñanza de Física (notar que el nombre de las categorías se indicará con mayúsculas para seguir la misma notación que los trabajos previos mencionados). Mientras que la mayoría de los conceptos en Física pertenecen a alguna subcategoría de “Procesos” es común que los estudiantes los asimilen a la categoría “Materia” (Slotta y Chi, 2006; Reiner, et al., 2000).

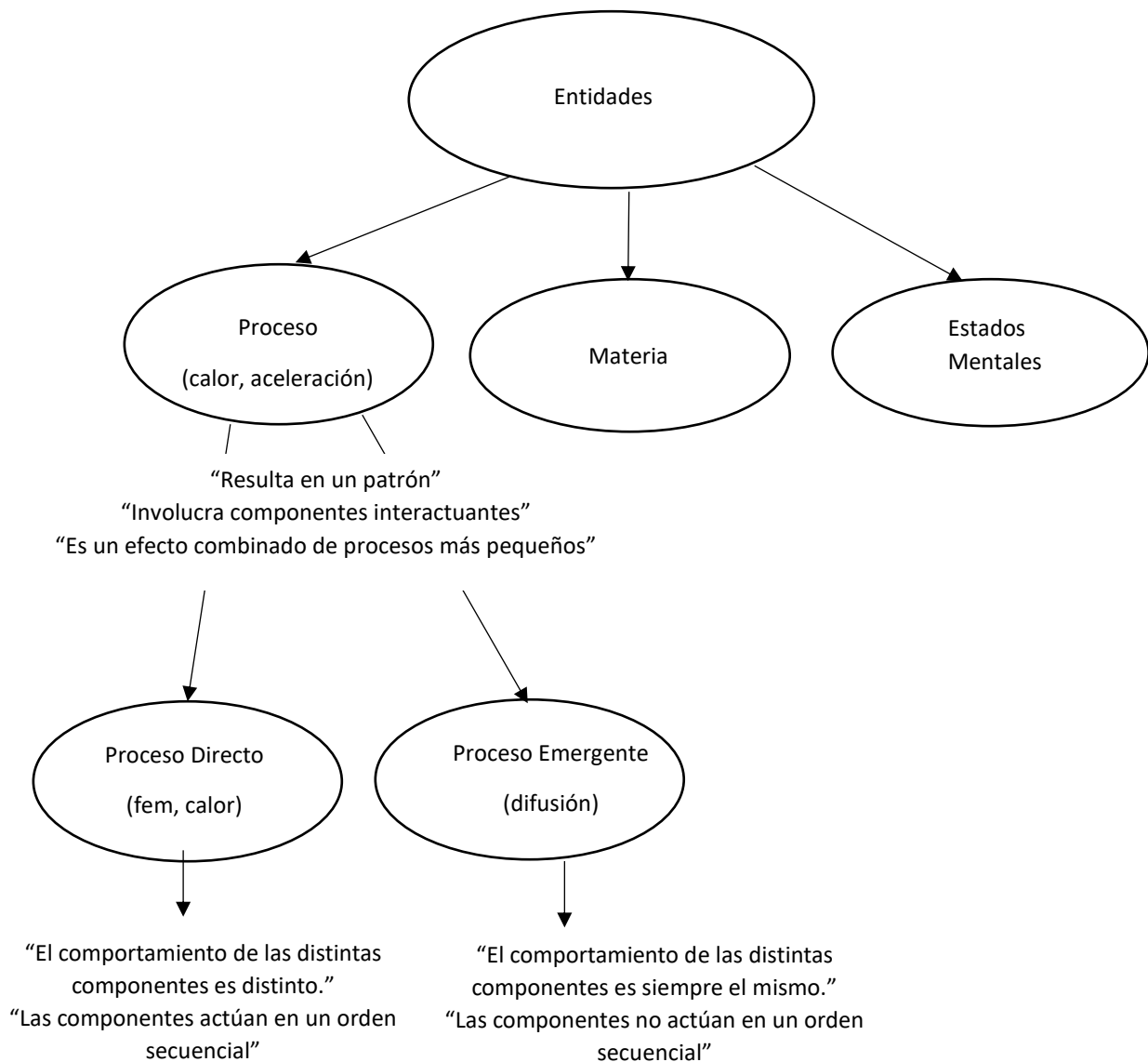
Una categorización ontológica equivocada implica que el estudiante no posee un conocimiento adecuado del concepto. En varios trabajos (Chi, 2013, 2008; Slotta y Chi, 2006; Pocoví y Finley, 2002; She, 2002), los patrones de predicados verbales utilizados por los estudiantes fueron tomados como evidencia de su entendimiento de la ontología de un concepto.

Los atributos ontológicos asociados con una cierta categoría son la clave para saber si un concepto pertenece a una categoría ontológica o no. Chi (1992) define los atributos ontológicos como “una propiedad que una entidad podría potencialmente tener como consecuencia de pertenecer a esa categoría” (p. 29). Por ejemplo, “agua” pertenece a la categoría “Materia” porque los atributos asociados con esta categoría, como “empujar o ser empujado”, “contener o ser contenido”, “consumible”, entre otros, pueden formar una oración con sentido cuando se utilizan como predicados del concepto de agua.

En el caso del concepto de onda, éste no pertenece a la categoría Materia. Hablar de onda como “empujable” (capaz de empujar o ser empujada), “contenible” (capaz de contener o ser contenido) o “consumible” no tiene sentido. En otras palabras, no se obtienen oraciones con sentido cuando se utilizan atributos correspondientes a la categoría Materia como predicados de onda.

La categoría de los conceptos tipo “Proceso” tiene atributos ontológicos como: “resulta en un patrón”, “involucra un sistema de componentes interactuantes”, “es el efecto combinado de muchos otros procesos más pequeños que ocurren en el sistema” (Slotta y Chi, 2006; Chi, 2005), entre otros. En la concepción científica actual, una onda resulta en “cualquier perturbación de una condición de equilibrio que se mueve o se propaga en el tiempo de una región a otra del espacio” (Sears et al., 1988), “una onda es el movimiento de una perturbación” (Serway, 1992) o “situaciones físicas producidas en un punto del espacio que se propagan a través del mismo y se reciben en otro punto. Todos estos procesos son ejemplos del movimiento ondulatorio” (Alonso y Finn, 1976).

Las categorías ontológicamente distintas a las que pertenecen los conceptos pueden ser representadas en estructuras jerárquicas en forma de árboles ontológicos como los introducidos por Keil (1979). A continuación, se realiza el esquema que muestra la forma de dichos árboles. Así, en la figura I, se presentan las categorías ontológicas primarias de Proceso, Materia y Estados Mentales las cuales no pretenden ser la totalidad de categorías existentes. Estos nodos superiores (elipses en la figura) dan lugar a lo que se denominan los distintos “árboles” ontológicos: Proceso, Materia y Estados Mentales. Hacia abajo se encuentran las categorías subordinadas en distintas “ramas”. Los predicados asociados con cada categoría están entre comillas y los ejemplos están entre paréntesis. La regla general para interpretar la estructura de árbol es que, si un predicado genera una proposición verdadera con un concepto en el árbol, también lo hará con todos aquellos términos que están debajo de él. En cambio, este uso de predicados no siempre se aplica a la inversa: un predicado que se utiliza para un concepto de una jerarquía más baja no tiene por qué generar oraciones verdaderas cuando se predica un concepto que está más alto jerárquicamente.



La Teoría de Cambio Conceptual de Chi, define de manera precisa lo que se entiende por un concepto tipo Proceso (Chi, 2005, 2008, 2013). De manera resumida, los conceptos tipo Proceso se definen en base a mecanismos causales en los cuales se pueden distinguir patrones globales de flujo y componentes de dichos patrones. Los patrones globales de flujo se pueden describir de distintas maneras, una de las cuales es mediante la identificación de la dirección y el sentido del patrón de flujo. Además, las componentes de dichos patrones pueden ser analizadas en múltiples niveles, es decir que las componentes globales pueden ser descompuestas en sus niveles constituyentes. Estas componentes interactúan entre sí y sus interacciones pueden ser caracterizadas de distinta manera. El patrón de flujo tanto de las componentes globales como de las constitutivas puede ser invisible. Los procesos involucran numerosos conceptos, mecanismos y principios simples y complicados del patrón y de las componentes que lo representan unívocamente. Distintos factores (condiciones o variables) pueden influir tanto en los patrones globales de flujo como en el comportamiento específico local de las componentes.

Chi (2005) caracteriza dos tipos de Proceso, los cuales difieren en el mecanismo que causa el patrón de flujo, y también se diferencian en el comportamiento o la función de las componentes (o agentes) que producen el patrón global de flujo. Uno de los tipos de Proceso, se caracteriza porque la naturaleza de las componentes o sus constituyentes están causando directamente el patrón global de flujo, es decir que definen la dirección y el sentido del patrón global. A estos Procesos, Chi (2005) los identifica como Procesos Directos. El otro tipo de Proceso se caracteriza porque ni las componentes

agregadas, ni sus constituyentes están causando directamente (ni indirectamente) el patrón global de flujo. En cambio, el mecanismo del flujo debe explicarse en términos de los resultados interactivos colectivos de todos los componentes constituyentes, de modo que ni una componente individual ni un grupo de componentes individuales causan el patrón global. A este tipo de procesos Chi los identifica como Procesos Emergentes. En la Tabla I, se muestran de manera resumida, las características que distinguen la interacción entre las componentes constituyentes de los Procesos Directos y Emergentes.

Tabla I. Comportamiento de las interacciones a nivel de componentes en Procesos Directos vs Procesos Emergentes. Tabla elaborada en base a las presentadas en Chi (2005) y Chi et al. (2008)

	Proceso Directo o Secuencial	Proceso Emergente
[1]	El comportamiento de las distintas componentes es distinto.	El comportamiento de todas las componentes es uniforme, es decir que se comportan de igual forma.
[2]	Las interacciones de las componentes están restringidas, en el sentido de que cada componente sólo puede interactuar con algunas otras componentes pre-especificadas.	Las interacciones de las componentes constituyentes no están restringidas, todas las componentes interactúan entre sí, es decir existe una interacción sin restricciones entre componentes.
[3]	Las componentes actúan en un orden secuencial.	Todas las componentes interactúan simultáneamente.
[4]	Las interacciones entre componentes dependen unas de las otras (está vinculado con la característica de secuencial)	Las interacciones entre componentes son independientes entre sí (está vinculado con la característica de simultaneo)
[5]	La interacción de las componentes termina cuando el patrón de flujo se detiene	Las componentes constituyentes continúan su comportamiento indefinidamente.

En la Tabla II, se muestran de manera resumida, las características que distinguen la interacción entre las componentes y el patrón global de flujo de los Procesos Directos y Emergentes.

Tabla II. Comportamiento de las interacciones entre las componentes y el patrón global en Procesos Directos vs Procesos Emergentes. Tabla elaborada en base a las presentadas en Chi (2005, 2008).

	Proceso Directo o Secuencial	Proceso Emergente
[1]	Diferentes subgrupos de componentes pueden tener funciones y roles identificables que contribuyen a diferentes aspectos del patrón de flujo directamente.	Las componentes no pueden dividirse en subgrupos con roles o funciones distintos. El patrón es causado al considerar las interacciones de todas las componentes.
[2]	El comportamiento de algunas componentes afecta directa o indirectamente al patrón global de flujo del proceso.	El comportamiento de cualquiera de las componentes afecta directamente al patrón global del proceso.
[3]	El comportamiento de algunas de las componentes se correlaciona con el patrón general del proceso	Las interacciones en el nivel del componente son disjuntas (o independientes) del comportamiento del patrón
[4]	Frecuentemente las interacciones de algunos subgrupos de componentes son más responsables del patrón que otras componentes	Las contribuciones de las interacciones de todos las componentes tienen el mismo estatus; una no es más o menos importante que otra.
[5]	Los comportamientos de las componentes son “intencionales”, en el sentido de que sirven al propósito, la función o el objetivo del patrón	Ninguno de los componentes interactúa con el propósito de producir un objetivo global

En forma cualitativa los Procesos Emergentes, involucran componentes uniformes es decir componentes individuales que no se diferencian entre sí y que pueden interactuar con cualquier otra componente. El patrón global de flujo observado en el proceso surge de la contribución de todas las interacciones de todas las componentes, tal como ocurren a lo largo del tiempo. También cualitativamente, el patrón global de flujo de los Procesos Directos, resulta más o menos directamente a partir del comportamiento de algunos subgrupos de componentes o de una sola componente. Es decir que, los comportamientos de las componentes pueden diferenciarse y las interacciones de algunas componentes causan todos o algunos aspectos del patrón. Por lo tanto, los mecanismos causales responsables de los patrones globales de procesos Emergentes y Directos son ontológicamente distintos.

Habiendo mostrado los aspectos salientes del marco teórico seleccionado, nos centraremos en el problema de investigación que nos ocupa en el presente trabajo: la caracterización ontológica de las ideas de los estudiantes acerca de ondas electromagnéticas. Este concepto es de fundamental importancia para cualquier alumno de carreras científicas ya que en él se basa todo el desarrollo del

electromagnetismo. Para lograr responder esa cuestión se necesita, en primera instancia, conocer la naturaleza u ontología de las ondas en general y, en particular, de aquellas electromagnéticas y también de las mecánicas. Estas últimas se consideran en el estudio de la ontología pues son las que los estudiantes aprendieron en cursos anteriores y podrían influir en la caracterización ontológica que asignen a las ondas electromagnéticas. En segunda instancia, se diseñaron e implementaron entrevistas especialmente elaboradas para revelar las características ontológicas de las ideas de los participantes acerca de las ondas electromagnéticas. Así, este trabajo se divide en dos partes correspondientes a cada una de estas instancias.

III. PARTE I: ONTOLOGÍA DE LAS ONDAS

El concepto de onda puede ser analizado desde su ontología.

Para comenzar este estudio citamos a continuación una definición de onda encontrada en el libro de Alonso y Finn (1976):

“Son situaciones físicas producidas en un punto del espacio, que se propagan a través del mismo y se reciben en otro punto (...) Supongamos que tenemos una propiedad física descrita por un cierto campo. Éste puede ser un campo electromagnético, la deformación de un resorte, la presión en un gas, la deformación de un sólido, el desplazamiento transversal de una cuerda y, quizás, hasta el campo gravitacional. Supongamos que las condiciones en un lugar lleguen a ser dependientes del tiempo o dinámicas de modo que haya una perturbación del estado físico en aquel lugar. Las propiedades físicas del sistema descritas por la ecuación del campo dependientes del tiempo (...) dan como resultado la propagación de esta perturbación a través del espacio. Esto ocasiona cambio en las condiciones físicas en otros lugares. Entonces, decimos que hay una onda asociada al campo particular considerado.” (Alonso y Finn, 1976, p. 694)

Analizando el concepto de ondas desde su ontología, se puede identificar como “patrón global de flujo” a la transferencia de energía que se produce desde el lugar en el cual se origina la perturbación hasta la posición del observador. La existencia de este patrón global ya indica que se trata de un concepto tipo Proceso.

Para definir de qué tipo de Proceso se trata, se identificarán las componentes de dicho patrón y las interacciones mencionadas más arriba. Este análisis se realizará a continuación tanto para ondas mecánicas como para las electromagnéticas, seleccionando en cada una un caso particular para facilitar esta tarea.

ONDAS MECÁNICAS

El caso específico seleccionado es el de un pulso de onda transversal en una cuerda infinita. En este caso, las componentes a nivel global son: el generador del pulso en el extremo de la cuerda y la cuerda misma. La cuerda como componente global puede, a su vez, desglosarse en sus niveles constituyentes: los pedacitos infinitesimales de cuerda. En el caso presente, la propiedad física del sistema analizado (ver definición de Alonso) es el desplazamiento transversal de la posición de cada pedazo infinitesimal de cuerda (perturbación).

A continuación, se describirá cómo se produce el patrón global de flujo. Inicialmente se tiene una cuerda a lo largo del eje x , en equilibrio. En uno de los extremos, se entrega energía a un oscilador (primera componente) de manera que éste comienza a moverse de forma perpendicular a la dirección x . Este movimiento produce un cambio en la posición del segmento de cuerda (segunda componente) que está en contacto con el oscilador de manera que se produce una perturbación de la posición inicial de dicho segmento de cuerda mientras que el resto de la cuerda se mantiene en su posición de equilibrio. Este cambio en la posición es debido a la transferencia de energía del oscilador hacia la

cuerda. En un instante posterior, el cambio en la posición del primer segmento de cuerda, produce el desplazamiento transversal, en este caso, del segmento siguiente de cuerda (componente subsiguiente), también mediante una transferencia de energía. Así, los segmentos consecutivos (componentes subsiguientes) van alterando su posición debido a un proceso de transferencia de energía. El análisis precedente involucra tanto el espacio como el tiempo como variables intervinientes en la propagación de una onda. En base al análisis precedente, se puede concluir que una onda mecánica es un Proceso Secuencial. En la Tabla III, se muestran de manera resumida, las características que distinguen la interacción entre las componentes constituyentes de los Procesos Secuenciales para el caso de las ondas mecánicas.

TABLA III. Comportamiento de las interacciones entre las componentes para Procesos Secuenciales en general y para el caso particular de las ondas mecánicas.

	Proceso Directo o Secuencial	Ondas mecánicas
[1]	El comportamiento de las distintas componentes es distinto.	En el oscilador (por ejemplo, uno eléctrico), transforma algún tipo de energía (por ejemplo, eléctrica) en mecánica. Los pedacitos de cuerda reciben energía mecánica y la transfieren al pedacito siguiente.
[2]	Las interacciones de las componentes están restringidas, en el sentido de que cada componente sólo puede interactuar con algunas otras componentes pre-especificadas.	La interacción del oscilador se realiza exclusivamente con el primer trozo de cuerda mientras que las interacciones de los trocitos subsiguientes de cuerda son con sus vecinos.
[3]	Las componentes actúan en un orden secuencial.	La transferencia de energía entre las distintas componentes es secuencial.
[4]	Las interacciones entre componentes dependen unas de las otras (está vinculado con la característica de secuencial)	Si el oscilador no transfiere energía al primer trocito de cuerda, no se comienza a propagar la onda. De la misma manera, si un pedacito no transfiere energía al siguiente, tampoco se obtendría una onda.
[5]	La interacción de las componentes termina cuando el patrón de flujo se detiene	Si deja de haber transferencia de energía a la cuerda, los trocitos de cuerda dejan también de transferir energía a los subsiguientes.

En la Tabla IV, se muestran de manera resumida, las características que distinguen la interacción entre las componentes constituyentes y el patrón global de flujo de los Procesos Secuenciales para el caso de las ondas mecánicas.

TABLA IV. Comportamiento de las interacciones entre las componentes y el patrón global para procesos directos en general y para el caso particular de las ondas mecánicas.

	Proceso Directo o Secuencial	Ondas mecánicas
[1]	Diferentes subgrupos de componentes pueden tener funciones y roles identificables que contribuyen a diferentes aspectos del patrón de flujo directamente.	La función del oscilador es suministrar energía a la cuerda. La cuerda, actuará como medio de transferencia de energía mediante la propagación de la onda.
[2]	El comportamiento de algunas componentes afecta directa o indirectamente al patrón global de flujo del proceso.	Si se tienen dos cuerdas con distintas propiedades dinámicas (tensión y densidad de masa), el patrón de onda que se obtiene con el mismo oscilador es diferente pues las velocidades de propagación son diferentes. Si se tienen dos osciladores de distinta frecuencia o de distinta amplitud y se conectan a una misma cuerda, el patrón obtenido es diferente ya que la energía transmitida es distinta.
[3]	El comportamiento de algunas de las componentes se correlaciona con el patrón general del proceso	Dependiendo de la forma de oscilación del oscilador, se tendrán distintas formas de onda.
[4]	Frecuentemente las interacciones de algunos subgrupos de componentes son más responsables del patrón que otras componentes	La interacción inicial entre el oscilador y el primer trocito de cuerda es responsable del inicio de la propagación de la onda a lo largo de la cuerda. Sin esta primera interacción, no habría propagación de una onda.
[5]	Los comportamientos de las componentes son “intencionales”, en el sentido de que sirven al propósito, la función o el objetivo del patrón	El comportamiento, tanto del oscilador como de los pedacitos de cuerda, sirven al propósito de la propagación de la onda.

Del análisis realizado precedentemente, se concluye que las Ondas mecánicas pertenecen a la categoría ontológica de Proceso Directo.

ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Una vez estudiadas las ondas mecánicas, resulta más fácil abordar, en segundo lugar, el concepto de ondas electromagnéticas. Para ello, se debe identificar nuevamente las componentes del patrón global de flujo y las interacciones componente-componente y componente-patrón. Este estudio se centrará en el caso de una onda armónica que se propaga en el espacio vacío. ¿Cómo se establece una onda electromagnética? Alrededor de una carga eléctrica en reposo se genera un campo eléctrico. Cuando una carga se mueve con velocidad constante, no sólo se establece el campo eléctrico sino también un campo magnético. Una vez que se alcanza un estado estacionario, el campo electromagnético resultante tiene una densidad de energía asociada que se mantiene constante en el tiempo. A pesar de que existen pruebas de la presencia de la carga, no se transmiten señales a puntos distantes, ni tampoco se transporta energía o cantidad de movimiento, evitando así la generación de radiación electromagnética. El campo electromagnético sólo sufrirá cambios si la carga está acelerada, en cuyo caso se podría enviar información a través del espacio. En este caso, se generarán señales mediante ondas electromagnéticas. En otras palabras, las componentes a nivel global son: la carga acelerada (generador) y el espacio con los campos asociados. Esta componente global, puede, a su vez, desglosarse en sus niveles constituyentes: los volúmenes infinitesimales de espacio con sus campos asociados. En este caso, la propiedad física del sistema analizado es el cambio en el campo electromagnético en cada punto del espacio (perturbación).

A continuación, se describirá cómo se produce el patrón global de flujo. Previo al establecimiento de una onda, se tiene un campo electromagnético estacionario en el espacio con cierta energía asociada. Inicialmente se entrega energía a una carga que se pone a oscilar (movimiento acelerado) de manera que se establece en el espacio cercano un campo electromagnético variable con el tiempo que tiene también asociada una energía. A continuación, este campo electromagnético variable con el tiempo existente en el espacio en las cercanías de la carga genera a su vez, otro campo electromagnético variable con el tiempo en el espacio contiguo que también posee una energía asociada. Este proceso continúa de manera que el campo electromagnético variable se propaga en forma de onda en el espacio, transmitiendo energía. El análisis precedente involucra tanto el espacio como el tiempo como variables intervinientes en la propagación de una onda. En base al análisis precedente, se puede concluir que una onda electromagnética es un Proceso Directo lo cual era esperable ya que lo mismo se concluyó para el caso de ondas mecánicas y el fenómeno ondulatorio es uno solo. En la Tabla V, se muestran de manera resumida, las características que distinguen la interacción entre las componentes constituyentes de los Procesos Directos para el caso de las ondas electromagnéticas.

TABLA V. Comportamiento de las interacciones entre las componentes para Procesos Directos en general y para el caso particular de las ondas electromagnéticas.

	Proceso Directo o Secuencial	Ondas electromagnéticas
[1]	El comportamiento de las distintas componentes es distinto.	<p>Para que la carga oscile, se le entregó energía. Esa energía se transmite al campo electromagnético generado por ella.</p> <p>Los puntos del espacio en los que existe un campo electromagnético variable con el tiempo recibieron energía electromagnética y la transfieren a los puntos siguientes.</p>

[2]	Las interacciones de las componentes están restringidas, en el sentido de que cada componente sólo puede interactuar con algunas otras componentes pre-especificadas.	La interacción del oscilador se realiza exclusivamente con los puntos del espacio contiguo mientras que las interacciones de cada uno de los puntos del espacio por los cuales se propaga la onda se lleva a cabo con los puntos subsiguientes del espacio vecino.
[3]	Las componentes actúan en un orden secuencial.	La transferencia de energía entre las distintas componentes es secuencial.
[4]	Las interacciones entre componentes dependen unas de las otras (está vinculado con la característica de secuencial)	Si el oscilador no transfiere energía al entorno contiguo, no se comienza a propagar la onda. De la misma manera, si un punto del espacio no transfiere energía al siguiente en forma de campo electromagnético variable, tampoco se obtendría una onda.
[5]	La interacción de las componentes termina cuando el patrón de flujo se detiene	Si la carga generadora deja de oscilar, el campo electromagnético variable deja de existir y no se produce la transferencia de energía con el entorno y, por lo tanto, tampoco se transfiere energía al resto del espacio.

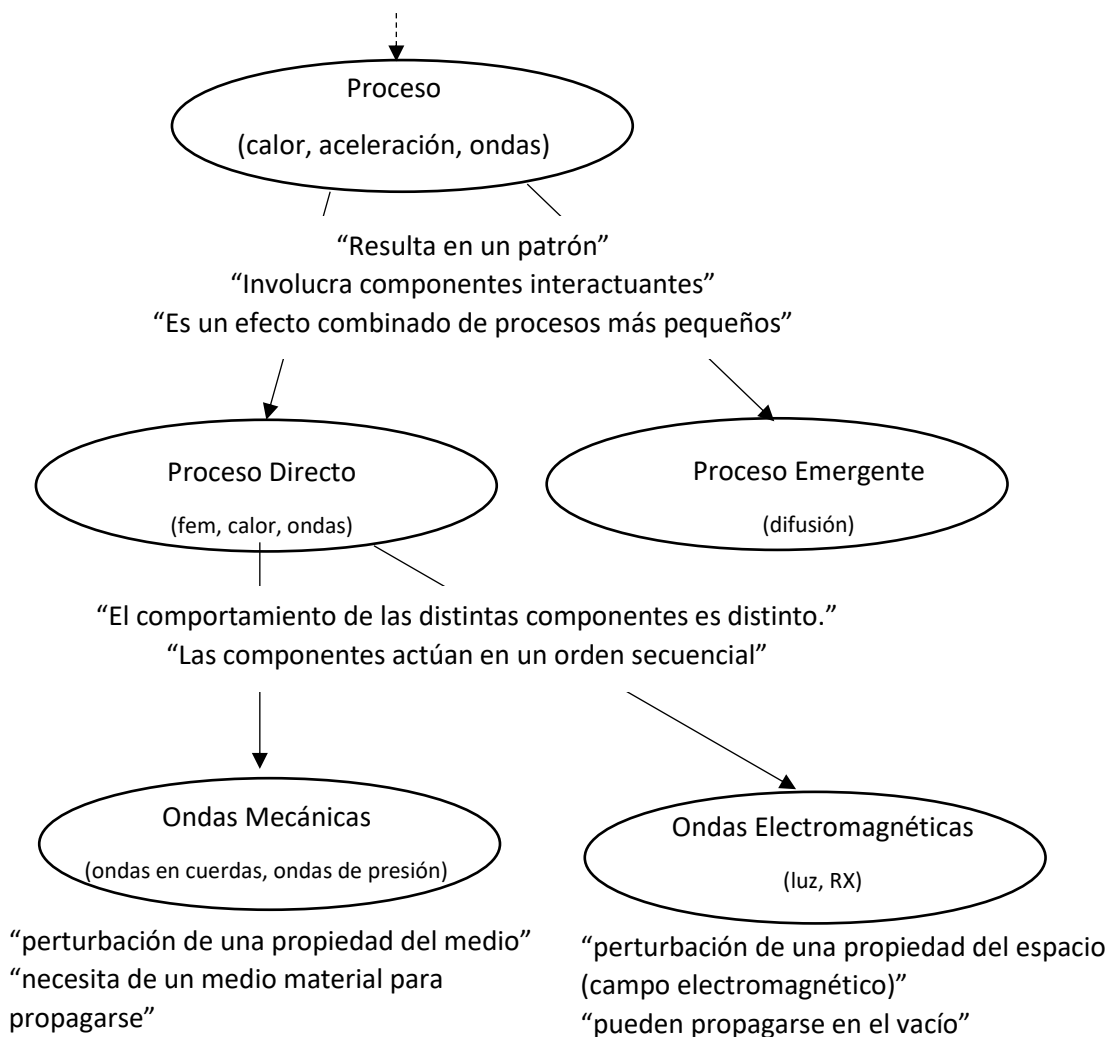
En la Tabla VI, se muestran de manera resumida, las características que distinguen la interacción entre las componentes constituyentes y el patrón global de flujo de los Procesos Secuenciales para el caso de las ondas electromagnéticas.

TABLA VI. Comportamiento de las interacciones entre las componentes y el patrón global para procesos directos en general y para el caso particular de las ondas electromagnéticas.

	Proceso Directo o Secuencial	Ondas electromagnéticas
[1]	Diferentes subgrupos de componentes pueden tener funciones y roles identificables que contribuyen a diferentes aspectos del patrón de flujo directamente.	La función del oscilador es suministrar energía al campo electromagnético en el entorno de él. Los puntos del espacio en los que existe campo electromagnético transfieren energía mediante la propagación de la onda.
[2]	El comportamiento de algunas componentes afecta directa o indirectamente al patrón global de flujo del proceso.	Si se tienen dos zonas del espacio con distintas propiedades (con distinto índice de refracción), el patrón de onda que se obtiene con el mismo oscilador es diferente pues las velocidades de propagación son diferentes. Si se tienen dos osciladores de distinta frecuencia o de distinta amplitud en zonas del espacio con iguales características, el patrón

		obtenido es diferente ya que la energía transmitida es distinta.
[3]	El comportamiento de algunas de las componentes se correlaciona con el patrón general del proceso	Dependiendo de la forma de oscilación del oscilador, se tendrán distintas formas de onda.
[4]	Frecuentemente las interacciones de algunos subgrupos de componentes son más responsables del patrón que otras componentes	La interacción inicial entre el oscilador y el espacio contiguo es responsable del inicio de la propagación de la onda en el espacio. Sin esta primera interacción, no habría propagación de una onda.
[5]	Los comportamientos de las componentes son “intencionales”, en el sentido de que sirven al propósito, la función o el objetivo del patrón	El comportamiento, tanto del oscilador como del campo electromagnético en el espacio, sirven al propósito de la propagación de la onda.

Del análisis realizado precedentemente, se concluye que las Ondas electromagnéticas pertenecen a la categoría ontológica de Proceso Directo y resulta posible completar el árbol ontológico planteado en la Figura I, como se muestra en la Figura II.



Chi (2008, 1992) establece que el aprendizaje de un nuevo concepto se puede encuadrar dentro de dos categorías de cambio conceptual: Radical y No Radical. El primero se refiere a situaciones en las que el cambio conceptual se realiza entre dos árboles diferentes: la idea previa y la científica pertenecen a distintos árboles ontológicos. El segundo caso, corresponde a un cambio conceptual en el que la idea inicial de un sujeto se puede calificar como perteneciente o bien a una jerarquía equivocada o bien a una rama paralela, dentro del árbol ontológico correcto.

IV. PARTE 2: IDEAS DE LOS ESTUDIANTES

En esta segunda parte de la investigación, se estudió la caracterización ontológica de las ideas de los estudiantes acerca de ondas electromagnéticas. Para ello, se diseñaron e implementaron entrevistas que permitieron lograr dicha caracterización.

La metodología utilizada en esta etapa de la investigación corresponde a un estudio de caso genérico o básico tal como el definido en Merriam (1998). Las características de dicha metodología son:

“ – incluye descripción e interpretación

– identifica patrones recurrentes en la forma de temas o categorías

– puede delinear un proceso” (pag. 12)

La selección de la muestra corresponde al de muestra “seleccionada con un propósito” (purposeful sample) como la definida por Patton (2002). Según el autor, “La lógica y el poder de una muestra “seleccionada con un propósito” yace en seleccionar casos ricos en información para su estudio. Los casos ricos en información son aquellos de los cuales uno puede aprender mucho acerca de aspectos de importancia central para el propósito de la investigación” (traducción de las autoras, Patton, 2002, p. 181).

Se seleccionaron tres estudiantes avanzados de Licenciatura en Física, que ya habían estudiado el tema de ondas electromagnéticas en un curso básico y en uno avanzado. Los tres alumnos constituían el total de la cohorte que estaba realizando la tesis de licenciatura en Física y, dada esta historia académica, se consideró que correspondían a casos potencialmente ricos en información.

Se caracterizó a cada estudiante con un número con el objetivo de mantener el anonimato como es deseable en este tipo estudios (Merriam, 1998).

Como instrumento de investigación, se realizaron entrevistas semiestructuradas siguiendo el modelo de Viabilidad planteado por Clement (2000) referido a los análisis Interpretativos de Estudios Generativos. En estos estudios, las entrevistas buscan contestar a la pregunta de cuáles podrían ser los patrones observados que proveen evidencia sobre la existencia de algún proceso. En el presente caso, se buscó identificar predicados para proveer evidencia de la ontología asignada por los alumnos a las ondas electromagnéticas. Para llevar a cabo estas entrevistas, se generó un protocolo de preguntas principales, permitiendo a las investigadoras la realización de preguntas de profundización adecuadas a cada caso.

ANÁLISIS DE LOS REGISTROS OBTENIDOS

Las entrevistas apuntaron a detectar los atributos ontológicos que los estudiantes asignan a las ondas electromagnéticas, en particular relacionados con qué es una onda electromagnética y cuál es la perturbación que se propaga.

En los tres casos investigados, las entrevistas duraron entre 30 y 50 minutos y fueron llevadas a cabo por dos de los investigadores en simultáneo, de manera de optimizar la elaboración de las preguntas

de profundización (Heller, 1998). Las preguntas principales que se realizaron a los participantes fueron:

- Si yo no supiera nada acerca de ondas electromagnéticas y vos tuvieras que explicarme el concepto, ¿cómo lo harías?
- Si es que el entrevistado recurre a elaborar gráficos explicativos de las ondas electromagnéticas: En los gráficos realizados, ¿Qué representa cada eje? (Es importante ver si se refiere a que el gráfico se realiza para un cierto tiempo).
- ¿qué son las “montañitas” que dibujaste?
- ¿qué representa un punto en las montañitas? (tanto en los gráficos de campo en función de x como de t)
- Cuando hablás de perturbación, ¿qué querés decir con eso? ¿cuál es la perturbación en este caso?
- Si el entrevistado se refiere al “campo eléctrico” o al “campo magnético”, indagar si tiene claro que esos campos varían con el tiempo.

Además, se realizaron preguntas de profundización cada vez que se consideraron necesarias.

Se analizaron los registros obtenidos, aislando los predicados utilizados por los estudiantes para describir las ondas electromagnéticas. Esos predicados sirvieron para detectar la ontología que los alumnos asignan a las ondas electromagnéticas (Proceso o Materia) y los atributos que usan con ellas (los cuales harán que la proposición sea verdadera, falsa o sin sentido). Este tipo de análisis es común en trabajos referidos a la detección de la ontología de un concepto (Chi et al., 1994; She, 2002; Pocoví, 2007; Pocoví y Hoyos, 2023). A1, A2 y A3 representan a los distintos sujetos. Cabe aclarar que los tres participantes realizaron esquemas de las ondas electromagnéticas representando la onda del campo E y la del campo B perpendiculares entre sí. Los resultados se muestran en las Tablas 1 y 2. Los * indican que no hubo consenso entre los investigadores para clasificar esa proposición. Cabe aclarar que, si se detectaban proposiciones que claramente se refirieran a una transmisión de la onda como un Proceso Directo, esto es, como un proceso en el que la perturbación se propaga de manera secuencial y contigua entre componentes, entonces, dichas proposiciones fueron clasificadas como Proceso Directo. En caso contrario, sólo como Proceso.

A continuación, en la Tabla I, se muestran las respuestas de los estudiantes, referidas a cómo se transmiten las ondas electromagnéticas y si es necesario un medio para dicha transmisión.

TABLA I. Proposiciones relacionadas con la necesidad de existencia o no de un medio de propagación.

Atributos asignados a una onda em	Categoría de la onda electromagnética	Falso/verdadero/sin sentido
“la onda electromagnética se propaga por partículas contiguas” (A1)	Proceso Directo	falso
“como personitas o pedacitos de sogas que transmiten el movimiento de uno a otro” (A1)	Proceso Directo	falso
“Las ondas electromagnéticas no existen sin un medio para propagarlas” (A1)	Proceso	falso

“los libros dicen que se propaga en el vacío” (A1)	Proceso	verdadero
“Tengo un valor de campo eléctrico en esta partícula... es éste que dibujé (señala un vector (raya) en su dibujo)” (A1)	*	*
“son perturbaciones del campo electromagnético que se van propagando en una cierta dirección” (A2)	Proceso	verdadero
“en el vacío podemos tener un campo que varía” (A2)	Proceso	verdadero
“ese campo que se va propagando en forma ondulatoria va llenando el espacio vacío” (A2)	Proceso/ Materia	*
“una onda electromagnética es una perturbación que se está transmitiendo” (A3)	Proceso	verdadero
“este campo [electromagnético] vendría a ser el medio de transmisión de la onda” (A3)	Materia	Sin sentido
“el campo electromagnético es una sopa que rellena absolutamente todo” (A3)	Materia	Sin sentido

Como se muestra en la Tabla I, los predicados que los estudiantes entrevistados utilizaron para describir una onda electromagnética, pertenecen, en casi todos los casos, a la categoría de Proceso. Esto es, en general, se refieren a las ondas como propagándose, transmitiéndose o propagando perturbaciones.

Sin embargo, dentro de estos casos, el Alumno 1, identifica al Proceso mencionado con uno de naturaleza mecánica, no distinguiendo así entre los atributos ontológicos propios de las ondas electromagnéticas de aquellos propios de las mecánicas: insiste en tener una entidad material (como una partícula o pedacitos de sogá) para hablar de la propagación del campo en ese lugar. Estas respuestas del Alumno 1, corresponderían a la asociación de un concepto (onda electromagnética) en una rama del árbol ontológico con otro concepto (onda mecánica) perteneciente a una rama paralela. Evidentemente, toda la educación formal que ha tenido este estudiante avanzado no ha alcanzado para lograr el cambio conceptual requerido para comprender la naturaleza de las ondas electromagnéticas, quedando su conocimiento atado al de las ondas mecánicas estudiadas en primera instancia.

El alumno 2 se caracterizó, a lo largo de toda la entrevista, por dar respuestas escolarizadas. Incluso, cuando realizó los esquemas de las ondas, se refirió a “Este dibujo creo que era del Alonso...”. Sus respuestas fueron cuidadosamente encuadradas en un lenguaje escolarizado/formal. En algún momento (proposición 7) dejó entrever una idea material del campo electromagnético diciendo que “llena el espacio vacío” pero para poder afirmar esto, se debió realizar alguna pregunta de profundización que se pasó por alto durante la entrevista.

El Alumno 3, después de definir a la onda electromagnética como la transmisión de una perturbación, lo cual correspondería correctamente a una idea del fenómeno ondulatorio como un Proceso, “salta” de árbol ontológico y pasa a utilizar predicados materiales en sus descripciones. A diferencia del Alumno 1 que, si bien asigna propiedades materiales al medio de propagación, distingue al medio del campo en sí mismo, el Alumno 3 llega incluso a identificar el campo con el medio (el campo “vendría

a ser el medio de transmisión”). Además, menciona un elemento tipo éter al que se refiere como una “sopa” con la que también identifica al campo electromagnético (“es una sopa”). Es decir, para el Alumno 3, el campo es lo mismo que el medio y ambos poseen características materiales. Por esta razón, las ideas del Alumno 3 se clasificaron como materiales, es decir, como pertenecientes a un árbol ontológico distinto al de Procesos. En otras palabras, en este primer conjunto de respuestas, las ideas del Alumno 3 se encuentran ontológicamente más alejadas de la concepción científica que aquellas del Alumno 1: mientras que las del Alumno 3 pertenecen a un árbol ontológico distinto, las del 1, pertenecen al mismo árbol, pero a ramas paralelas. De todas formas, ninguno de los dos logró, hacia el final de su carrera, un cambio conceptual hacia la concepción científica de ondas electromagnéticas.

Los Alumnos 1 y 2, que elaboraron una gráfica, no indicaron en su gráfica que el dibujo corresponde a un tiempo específico y, cuando se les preguntó dónde entraba la variable tiempo en la gráfica, no pudieron referirse a que el gráfico realizado corresponde a un instante determinado.

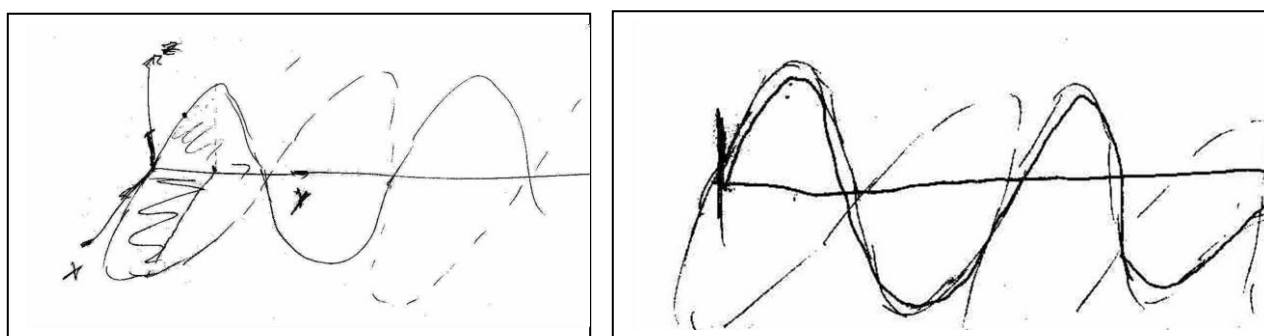


FIGURA 1. Se muestran las gráficas realizadas por A1 (izquierda) y A2 (derecha).

A continuación, la Tabla II agrupa las respuestas referidas a qué entienden los estudiantes por lo que constituye la perturbación en el caso de una onda electromagnética.

TABLA II. Propositiones relacionadas con qué es la perturbación en una onda electromagnética.

Atributos asignados a una onda electromagnética	Categoría de la onda electromagnética	Falso/verdadero/sin sentido
“La perturbación se relaciona con el movimiento de alguna cosa” (A1)	Proceso	falso
“La perturbación la explicaría con una soga, ya que es lo mismo, es algo que se mueve en el espacio” (A1)	Proceso	falso
“Aquí no tenemos nada que se haya desplazado” (A2)	Proceso	verdadero
“pienso que es una perturbación del campo electromagnético que está tratando de volver a su posición de equilibrio” (A2)	Proceso	*

“este dibujo (indica el dibujo de E y B en función de x) me representa cómo se iría moviendo el espacio sintiendo la propagación de la onda” (A3)	Proceso/Materia	falso
“[para ver la perturbación]yo tendría que pintar de alguna forma esa sección del espacio para seguir el movimiento” (A3)	Proceso/Materia	falso

Así como en el caso anterior, la Tabla II se caracteriza por contener proposiciones que corresponden a ondas electromagnéticas entendidas como Proceso. Las proposiciones no son lo suficientemente explícitas como para clasificar esas ideas como Proceso Directo. Sin embargo, y también como en el caso anterior, las perturbaciones que se propagan en estos Procesos tienen características mecánicas o materiales. Esto es, a excepción de una de las proposiciones encontradas, se considera que la perturbación que se transmite involucra el movimiento de alguna “cosa” ya sea “el espacio”, “una sección del espacio” o “algo”.

En el caso del alumno 1, las proposiciones enunciadas son coherentes con su visión mecanicista de las ondas electromagnéticas ya manifestada en la Tabla I. Así, se refiere a que el caso de una sogá “es lo mismo” que el caso que nos ocupa. En ese sentido, se mantiene en una rama ontológica paralela a la de las ondas electromagnéticas.

Con respecto al alumno 2, éste manifiesta correctamente que no se tiene “nada que se haya desplazado” y que se trata de una “perturbación del campo electromagnético”. Sin embargo, la expresión “campo electromagnético que está tratando de volver a su posición de equilibrio” muestra una idea mecanicista de “algo” que sufre un desplazamiento, aunque lo haya descartado en primera instancia. O sea, en estas aparentes contradicciones existe tal vez una idea de Proceso más asociado con la rama ontológica paralela de las ondas mecánicas que con la rama de las electromagnéticas.

En el caso del alumno 3, si bien se refiere a “movimiento” que puede dar la idea de Proceso, este planteo es erróneo ya que la acción de “movimiento” corresponde a lo que puede hacer una entidad material. Este alumno ni siquiera logra asociar la onda electromagnética sobre la que se le está preguntando con otra diferente pero estudiada previamente. Por esa razón, se clasificó la idea como Proceso/ Materia. Desde el punto de vista ontológico, nuevamente suponemos que el alumno 3 está más alejado que el 1 de la categorización ontológica aceptada por la comunidad científica.

V. CONSIDERACIONES FINALES

La primera parte de esta investigación permitió la clasificación ontológica de los fenómenos ondulatorios en general y, en particular, de las ondas mecánicas y las electromagnéticas. Si bien el estudio llevado a cabo con las ondas mecánicas fue planteado para facilitar el análisis de las electromagnéticas, también sirvió para el reconocimiento de algunas características ontológicas manifestadas por los estudiantes, según las cuales se asignaban predicados a las segundas, correspondientes a las primeras. El análisis realizado que muestra en detalle la naturaleza de las distintas ondas debería ser tenido en cuenta en el planteo de propuestas didácticas futuras.

Los resultados mostrados en la segunda parte de esta investigación, son inquietantes. A lo largo de las entrevistas y en varias oportunidades, los alumnos mencionaron recurrentemente a los atributos de las ondas mecánicas para referirse a las electromagnéticas. Por ejemplo, las referencias utilizadas por los alumnos 1 y 2, hubieran tenido sentido si correspondieran a la descripción de ondas mecánicas, o sea, a la descripción de ondas que pertenecen a una rama paralela a aquella de las ondas

electromagnéticas en el árbol ontológico. Las respuestas dadas por el alumno 3, parecieran estar todavía más alejadas de la naturaleza correcta de las ondas electromagnéticas y más cercanas a una concepción material correspondiente a otro árbol ontológico. En definitiva, los estudiantes entrevistados no han logrado la concepción ontológica correcta de las ondas electromagnéticas hacia el final de su formación académica.

Hay que tener en cuenta que, al ser éste un estudio de caso, no sería pertinente realizar ninguna generalización. Sin embargo, este tipo de estudios pueden servir para plantear hipótesis que se utilicen como punto de partida en investigaciones futuras y para planteamientos de propuestas didácticas que deberán incluir descripciones de la naturaleza del fenómeno ondulatorio como parte de la enseñanza.

El uso de analogías en la enseñanza de física tiene muchos partidarios. En temas de electricidad y magnetismo se usan a menudo, tal vez, por el hecho de que los estudiantes ya han estudiado mecánica previamente. Por ejemplo, los profesores muchas veces utilizamos analogías entre la corriente y una manguera con agua; entre el potencial eléctrico y la altura y entre las ondas electromagnéticas y las mecánicas. Estudios como el presente, nos alertan sobre el extremo cuidado que hay que tener en resaltar sus límites de validez. Así podrá evitarse o reducirse la confusión entre el fenómeno original descrito por la analogía y el fenómeno bajo estudio.

REFERENCIAS

Alonso, M y Finn, E. (1976). *Física. Campos y Ondas*. Volumen II. México. Fondo Educativo Interamericano, S.A.

Alurralde, E. M. y Pocoví, M. C. (2005). Pulsos de onda: resolución de problemas y comprensión de su ontología. *Actas de la XIV Reunión de Educación en Física*. 10 al 14 de octubre, Río Negro, Bariloche.

Chi, M. T. H. (1992). Conceptual change within and across ontological categories: examples from learning and discovery in Science', in Giere, R. (ed.) *Minnesota Studies in the Philosophy of Science* Vol XV, 129-186, (U. of Minnesota Press, Minneapolis).

Chi, M. T. (2005). Commonsense conceptions of emergent processes: Why some misconceptions are robust. *Journal of the Learning Sciences*, 14, 161-199.

Chi, M. T. (2008). Three types of conceptual change. Belief Revision, Mental Model Transformation and categorical shift. En Vosniadu (Ed.), *Handbook of research on conceptual change*. (págs. 61-82). Hillsdale - N.J: Erlbaum.

Chi, M. T. (2013). Two kind and four sub-types of misconceived knowledge way to change it, and learning outcomes. En S. Vosniadou (Ed.), *International Handbook of Research on Conceptual Change* (págs. 49-70). Londres: Routledge Handbooks.

Chi, M. T. H., Slotta, J. D. y De Leeuw, N. (1994). From Things to Processes: a theory of conceptual change for learning science concepts, *Learning and Instruction* 4, 27-43.

Clement. J. (2000). Analysis of clinical interviews: foundations and model viability. En A. E. Kelly y R. A. Lesh (Eds) *Handbook of Research Design in Mathematics and Science Education*, 547-590, NJ: LEA.

Duit, R., Schecker, H., Hottecke, D. y Niedderer, H. (2014). Teaching Physics. En S. K. Abell y N. G. Lederman (Eds.) *Handbook of Research on Science Education*, 434-457, NY: Routledge.

Guisasola, J.; Almudí, J. M. y Zubimendi, J. L. (2003). Dificultades de aprendizaje de los estudiantes universitarios en la teoría de campo magnético y elección de los objetivos de enseñanza. *Enseñanza de las Ciencias*, 21 (1) 79-94.

Heller, P. (1998). *Planning, Conducting, and Analyzing Classroom Research*. [Course Studies in Science Education, University of Minnesota].

Keil, F. C. (1979). *Semantic and conceptual development*. Cambridge: Harvard University Press.

McDermott, L. y Redish, E.F. (1999). Resource Letter: PER-1: Physics Education Research. *American Journal of Physics*, 67 (9) 755-767.

Merriam, S.B. (1998). *Qualitative research and case study applications in education*. CA: Jossey-Bass Inc. Publishers.

Patton, M. Q. (2002). *Qualitative research and evaluation methods* (3rd ed.). Thousand Oaks, CA: Sage.

Pocoví, M. C. (2007). The effects of a history-based instructional material on the students' understanding of field lines. *Journal of Research in Science Teaching*, 4 (1), 107-132. ISSN 0022-4308.

Pocoví, M. C. y Finley, F. (2002). Lines of force: Faraday's and students' views. *Science & Education*, (11), 459-474.

Pocoví, M. C. y Hoyos, E. (2023). Problemas de categorización ontológica de las concepciones de diferencia de potencial y fem en alumnos universitarios. *Revista Electrónica en Educación en Ciencias*. Año 18, N° 1, julio, 51-62. ISSN 1850 - 6666. <https://doi.org/10.54343/reiec.v18i1.373>.

Reiner, M., Slotta, J. D., Chi, M.T.H. y Resnick, L.B. (2000). Naive physics reasoning: a commitment to substance – based conceptions. *Cognition and Instruction*, 18 (1), 1-34.

Sears, F; Zemansky, M; Young, H. (1988). *Física universitaria. Sexta Edición*. USA. Addison-Wesley Iberoamericana.

Serway, R. 1992. *Física Tomo I - 3ª Edición*. McGraw-Hill. México

She, H. C. (2002). Concepts of higher hierarchical level required more dual situational learning events for conceptual change: A study of students' conceptual changes on air pressure and buoyancy. *International Journal of Science Education*, 24(9), 981–996.

Slotta, J. D., Chi, M. T. H., Joram, E. (1995). Assessing students' misclassifications of physics concepts: an ontological basis for conceptual change. *Cognition and Instruction*, 13_(3), 373-400.

Slotta, J. D. y Chi, M. T. (2006). Helping students understand challenging topics in science through ontology training. *Cognition and Instruction*, 24, 261-289.