

Análisis de la ontología de un concepto relativista: Inducción Electromagnética

Elena Hoyos¹, M. Cecilia Pocovi²

hoyosele@gmail.com, cpocovi@gmail.com,

¹Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta Av Bolivia 5051, Salta Capital, Argentina.

²Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Salta, Av. Bolivia No.5051, Salta Capital, Argentina.

Resumen

El punto de partida de la enseñanza planteada desde una perspectiva de cambio conceptual ontológico es conocer la naturaleza del concepto a enseñar. En este trabajo se presenta el análisis ontológico del concepto de inducción electromagnética con el objeto de que constituya una guía para el diseño de una propuesta didáctica centrada en la naturaleza de este concepto y en su carácter relativista. A partir de este estudio, se concluye que la inducción electromagnética, independientemente del sistema de referencia inercial elegido para realizar el análisis, es un concepto tipo Proceso Directo.

Palabras clave: Ontología, proceso directo, inducción electromagnética

Ontological Analysis of a Relativistic Concept: Electromagnetic Induction

Abstract

The starting point in the design of any teaching sequence from an ontological-conceptual-change view is to know the nature of the target concept. This work presents the ontological analysis of the concept of electromagnetic induction, carried out with the purpose of constructing a guide for the design of a didactic proposal centered in the nature of the concept and in its relativistic character. From this study, it is concluded that the electromagnetic induction is a Direct Process type of concept, whatever inertial system is chosen to carry out the analysis.

Keywords: ontology, direct process, electromagnetic induction

Analyse ontologique d'un concept relativiste: l'induction électromagnétique

Résumé

Le point de départ de la conception de toute séquence d'enseignement d'un point de vue ontologique-conceptuel est de connaître la nature du concept cible. Cet ouvrage présente l'analyse ontologique du concept d'induction électromagnétique, réalisée dans le but de construire un guide pour la conception d'une proposition didactique centrée sur la nature du concept et dans son caractère relativiste. De cette étude, il est conclu que l'induction électromagnétique est un concept de type Processus Direct, quel que soit le système inertielle choisi pour effectuer l'analyse.

Mots clés: ontologie, processus direct, induction électromagnétique

Análise Ontológica de um Conceito Relativístico: Indução Eletromagnética

Resumo

O ponto de partida no projeto de qualquer sequência de ensino a partir de uma visão de mudança ontológica conceitual é conhecer a natureza do conceito alvo. Este trabalho apresenta a análise ontológica do conceito de indução eletromagnética, realizada com o objetivo de construir um guia para o desenho de uma proposta didática centrada na natureza do conceito e em seu caráter relativístico. Deste estudo conclui-se que a indução eletromagnética é um tipo de conceito de Processo Direto, seja qual for o sistema inercial escolhido para realizar a análise.

1. INTRODUCCIÓN

Einstein, en su artículo de 1905, plantea su “Principio de la Relatividad” y la hipótesis de que la luz se propaga en el espacio vacío con velocidad constante. Redefine el concepto de simultaneidad, analiza la relatividad de longitudes y de intervalos de tiempos y estudia las transformaciones de coordenadas y del tiempo entre un sistema en reposo y un sistema en movimiento de traslación uniforme relativo al primero. Analiza el comportamiento de las ecuaciones de Maxwell para el espacio vacío desde dos sistemas de referencia inerciales y encuentra las ecuaciones de transformación, que verifican su principio de relatividad, para los campos eléctricos y magnéticos. Mostrando que estos campos dependen del estado de movimiento del sistema de coordenadas. Así, incorpora el concepto de campo electromagnético, aceptando que los campos eléctrico y magnético son aspectos de esta entidad Física.

El planteo de Einstein es aceptado por la comunidad científica, es decir que a partir de 1905 se puede afirmar que el electromagnetismo es esencialmente relativista. Sólo se puede comprender acabadamente el concepto de campo electromagnético y las leyes que describen su comportamiento, desde la relatividad. La naturaleza relativista del electromagnetismo es independiente del valor de las velocidades involucradas en las situaciones estudiadas. Una de las leyes que analiza el comportamiento del campo electromagnético es la ley de Faraday – Lenz que se refiere al concepto de Inducción Electromagnética. Entonces, la enseñanza de la inducción electromagnética debe involucrar análisis relativistas, es decir, análisis desde distintos sistemas de referencia.

Las Investigaciones en Enseñanza de Ciencia encontraron que los estudiantes llegan al contexto de aprendizaje formal, con un conjunto de conocimientos que afecta dicho aprendizaje (Ausubel, 1968; Driver et al., 1985; di Sessa, 1988; Wandersee, 1994). A partir de este hallazgo, los investigadores se dedicaron a identificar los distintos procesos mediante los cuales se logra la comprensión de los conceptos científicos. Como consecuencia, surgieron varias teorías que han tenido como objetivo el diseño de estrategias o propuestas didácticas para lograr el aprendizaje; o sea, para lograr que los estudiantes cambien sus ideas iniciales por las científicas. Entre ellas, un grupo importante se enmarca dentro del llamado Cambio Conceptual que, a su vez, abarca distintas líneas. Una de estas líneas es la Ontológica (Chi, 1992, 2005, 2008, 2013; Henderson, 2017).

Lo que caracteriza a la teoría de Chi, es que considera que el aprendizaje de la ontología o naturaleza de un concepto cumple un papel fundamental en lograr el cambio conceptual de los estudiantes. Según Chi (1992, 2005 y 2008), los conceptos pueden clasificarse de acuerdo a la categoría ontológica a la que pertenecen. Para cada categoría ontológica, se definen conjuntos de predicados que constituyen atributos ontológicos que las entidades de esa categoría pueden potencialmente tener. Siguiendo esta línea,

se considera que un estudiante aprendió un concepto, cuando es capaz de asignar la categoría ontológica correcta a dicho concepto. Es decir que, para abordar la enseñanza de un determinado fenómeno Físico es fundamental que el docente lleve a cabo un análisis previo para determinar la correcta categorización ontológica de los conceptos que describen el fenómeno estudiado. Una vez realizada esta caracterización se pueden proponer estrategias de enseñanza que permitan a los estudiantes comprender mejor el concepto. Así, el diseño de las estrategias de aprendizaje debe comenzar por el análisis de la categoría ontológica de los conceptos asociados al fenómeno a estudiar.

En este trabajo se realiza el análisis de la ontología del concepto de inducción electromagnética, basado en la teoría de Cambio Conceptual de Chi (1992, 2005, 2008, 2013), teniendo en cuenta la esencia relativista del concepto.

2. ESTADO DEL ARTE

En el caso de la inducción electromagnética, existen algunas investigaciones incipientes que proponen cambios en el orden y en la profundidad de los temas involucrados (Chabay y Sherwood, 2006) como así también en el enfoque de la presentación (Galili y Kaplan, 1997; Galili, Kaplan, y Lehavi, 2006). En el primer caso, Chabay y Sherwood (2006) proponen un estudio más profundo del concepto de flujo que el que actualmente se presenta en los libros tradicionales. En el segundo caso, la propuesta de Galili et al. (2006) resalta la complementariedad entre el campo eléctrico y el campo magnético en una aproximación débilmente relativista. Además, expresan la ley de Faraday mostrando explícitamente la contribución de la variación con el tiempo del campo magnético y la acción de la fuerza de Lorentz.

Si bien los trabajos mencionados avanzan sobre la estructuración y forma de presentación de temas de electromagnetismo, no se focalizan en cuestiones relacionadas con su aprendizaje de manera sistemática. Por su parte, Guisasola, Almudí y Zuza (2010) y Guisasola, Almudí y Zuza (2011) presentan un estudio exploratorio sobre el aprendizaje de la inducción electromagnética en estudiantes universitarios y un estudio sobre las ideas previas de los estudiantes de secundario y de nivel básico universitario. En este sentido, detectan algunos de los problemas más generalizados en la comprensión del tema a nivel básico. Los resultados de este estudio poseen algunas limitaciones: a) la clasificación de las explicaciones de los estudiantes en macro o microscópicas podría no resultar clara ya que no está basada en aspectos Físicos del concepto, b) se acepta como explicación correcta del fenómeno de inducción a una parcialmente correcta como lo es que el cambio en el flujo se debe al cambio en el campo, c) no se pone de manifiesto la característica más importante y especial de la regla del flujo, tal como la expresa Feynman et al. (1987) “No sabemos de ninguna otra parte de la Física donde un principio general, simple y exacto requiera para su comprensión real un análisis en términos de *dos fenómenos diferentes*. [...] Debemos comprender a la ‘regla’ como el

efecto combinado de dos fenómenos completamente separados” (p. 17-3). La característica explicitada por Feynman resalta la importancia que tiene el estudio de la naturaleza de los conceptos lo cual constituirá la base para planear la enseñanza de éstos.

La dependencia temporal de los fenómenos (campos) estudiados en electromagnetismo pone de manifiesto la ontología “tipo Proceso” (Chi, 1992, 2008 y Chi et al. 2012) de los conceptos involucrados. El estudio del aprendizaje de este tipo de conceptos ha sido liderado por el grupo de Chi quien, a través de sus numerosos trabajos (Chi, Slotta y de Leeuw, 1994; Chi, 2005; Chi, 2008; Slotta, Chi y Joram, 1995 y Chi et al. 2012), ha ido refinando el modelo presentado en 1992. Asimismo existen trabajos de investigación relacionados con el aprendizaje de otros conceptos tipo Proceso como lo son la Fuerza (Reiner, Slotta, Chi y Resnick, 2000), el Equilibrio Termodinámico (Slotta y Chi, 2006), la Óptica Geométrica (Galili, 1996), la Corriente Eléctrica (She, 2004), el Campo Eléctrico y Líneas de Campo (Pocoví, 2007), la FEM y la Diferencia de Potencial (Pocoví y Hoyos, 2004). Como lo establece la Teoría de Cambio Conceptual de Chi (1992), la ontología del concepto a aprender y la categorización ontológica intuitiva que le asignan los alumnos determinan el tipo de aprendizaje que se llevará a cabo y los consiguientes problemas de comprensión que pueden surgir. La evolución de esta Teoría en el tiempo fue plasmada en Chi (2005, 2008, 2013), Chi et al. (2012) y Henderson et al. (2017), en donde se proponen nuevas hipótesis que permitirían explicar el aprendizaje de conceptos “tipo Proceso” de forma más detallada y profunda. Como la misma autora establece, “La explicación propuesta aquí [...] debe ser validada con más evidencia empírica.” (Chi, 2005, p. 190).

3. MARCO TEÓRICO

Ya que el concepto sobre el que se va a desarrollar el análisis de la ontología es el de la "inducción electromagnética", resulta fundamental definir claramente las hipótesis que se utilizarán desde el punto de vista del análisis físico. Para esto se seguirá lo planteado por Galili, Kaplan, y Lehavi, (2006), como Aproximación Débilmente Relativista.

En la teoría de la Relatividad Especial, las transformaciones que dan cuenta de las posiciones y velocidades en distintos sistemas de referencia inerciales son las de Lorentz, mientras que las transformaciones de campo describen el comportamiento del campo electromagnético desde distintos referenciales inerciales.

La aproximación débilmente relativista, considera las transformaciones de Lorentz en el límite de velocidades mucho menores que la velocidad de la luz, reduciendo éstas a las transformaciones de Galileo.

A continuación se describen las transformaciones de campo encontradas por Einstein para dos sistemas de referencia inerciales O y O', este último en movimiento de traslación uniforme respecto de O con una velocidad \vec{u} cuya dirección es paralela al eje x. Designando los campos medidos en el sistema de referencia O con letras sin primar y los campos medidos en el sistema de referencia O' con letras primadas, las ecuaciones encontradas para la transformación de campos son:

$$\begin{cases} E_x' = E_x \\ E_y' = \gamma(E_y - uB_z) \\ E_z' = \gamma(E_z + uB_y) \end{cases} \quad \begin{cases} B_x' = B_x \\ B_y' = \gamma\left(B_y + \frac{u}{c^2}E_z\right) \\ B_z' = \gamma\left(B_z - \frac{u}{c^2}E_y\right) \end{cases}$$

Donde $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{u}{c}\right)^2}}$ Las ecuaciones anteriores muestran que

los campos eléctricos y magnéticos dependen del estado de movimiento del sistema de coordenadas desde el cual se los observa. En la aproximación débilmente relativista, las velocidades son mucho menores que la velocidad de la luz, y se cumple que $\gamma = 1$, mientras que los productos $\left(\frac{u}{c^2}E_z\right)$ y $\left(\frac{u}{c^2}E_y\right)$ no se consideran despreciables debido a las magnitudes de los campos eléctrico y magnético. Las transformaciones de campo en este límite quedan:

$$\begin{cases} E_x' = E_x \\ E_y' = (E_y - uB_z) \\ E_z' = (E_z + uB_y) \end{cases} \quad \begin{cases} B_x' = B_x \\ B_y' = \left(B_y + \frac{u}{c^2}E_z\right) \\ B_z' = \left(B_z - \frac{u}{c^2}E_y\right) \end{cases}$$

En esta aproximación se verifica el postulado de Einstein de que “las leyes de la Física son las mismas en todos los marcos de referencia inerciales”. Esta transformación de campos deja explícita la complementariedad entre campos eléctrico y magnético y su dependencia con el estado de movimiento de los sistemas de referencia considerados.

La inducción electromagnética, vista desde esta aproximación débilmente relativista, es el concepto sobre el que se va a desarrollar el análisis ontológico.

Se plantea trabajar con esta aproximación ya que el nivel de los estudiantes a los que está dirigida la propuesta didáctica que se elaboró en base a él, es universitario. La mencionada propuesta se desarrolló en un curso de Electromagnetismo a nivel universitario basado en el Análisis Matemático de varias variables (integración de línea, integración de superficies y operadores diferenciales), sin el estudio previo de Relatividad Especial.

Las teorías que se engloban bajo en el nombre de Cambio Conceptual, interpretan al aprendizaje como el resultado de la interacción entre las concepciones ontológicas iniciales del aprendiz y la ontología que realmente posee el concepto científico.

Existen teorías de cambio conceptual que se fundamentan en la idea de que los conceptos en el mundo pertenecen a distintas categorías ontológicas. Las personas, cuando aprenden, asignan al concepto aprendido, a nivel psicológico, determinada categoría ontológica que puede o no coincidir con aquella metafísica. Así, una de las implicancias de esta teoría para la educación en ciencias es que, para que un alumno conozca un concepto, es condición necesaria que lo categorice ontológicamente de manera correcta. Esta es la postura planteada por Chi (1992, 2005, 2008, 2013) y que se adoptará en este trabajo.

Las categorías ontológicas pueden ser determinadas mediante un conjunto de leyes o restricciones que gobiernan el comportamiento y los atributos ontológicos de cada una. Es decir, los objetos en una determinada categoría deben

cumplir un conjunto de leyes que dictan su comportamiento y los tipos de propiedades que poseen.

Los atributos ontológicos asociados a una cierta categoría constituyen la clave para saber si un concepto pertenece a una categoría o no. Chi et al. (1994) definen los atributos ontológicos como “una propiedad que una entidad podría potencialmente tener como consecuencia de pertenecer a esa categoría” (p. 29). Entonces, aceptando que, un conjunto distinto de reglas gobiernan el comportamiento y las propiedades de las entidades, a cada categoría ontológica se le puede asociar un conjunto distinto de predicados que modifican los conceptos que pertenecen a ella y se basan en juicios de sentido común.

Se debe tener en cuenta que, ninguna operación física (como cirugía, movimiento, etc.) puede transformar una entidad de una categoría ontológica en una entidad de otra categoría ontológica, es decir que, ningún mecanismo psicológico (como borrar, sumar características, el uso de analogías, generalización, especialización) puede transformar un concepto de una categoría ontológica en otro concepto de otra categoría ontológica (Chi, 1992). Por ejemplo, un cuerpo, una silla, o los animales poseen atributos ontológicos como ser “contenibles”, “guardables”, “empujables” o poseer volumen y masa, tener color. Los conceptos que se pueden predicar con estos atributos para formar oraciones con sentido, pertenecen a una categoría ontológica denominada tipo Materia (Reiner et al., 2000) o Entidad. En cambio, los conceptos de fuerza, guerra o vida obedecen a un conjunto diferente de leyes expresadas mediante los atributos: “resulta en”, “no se pueden guardar”, “no tiene inicio ni final aun cuando se llega al equilibrio”, “ocurren en el tiempo”, “tiene inicio y fin”, “involucra un sistema de componentes interactuantes que tienden al equilibrio” (Chi, 2013, Henderson, 2017), entre otros. Los conceptos que se pueden predicar con esta categoría ontológica para formar oraciones con sentido pertenecen a la categoría de tipo Proceso. No existe forma de transformar un cuerpo en una fuerza, o una guerra en un animal, es decir que no se puede transformar un concepto tipo Materia en otro tipo Proceso y viceversa.

Tanto en la categoría Materia como en la categoría Proceso existen sub-categorías. Por ejemplo, los conceptos tipo Materia podrían dividirse en aquellos pertenecientes al Reino Natural y aquellos producidos por el hombre (Artefactos). La sub-categoría Reino Natural se divide, a su vez, en otras sub-categorías: Seres Vivos (con, a su vez, más sub-categorías como Animales, Plantas, etc) y Seres No Vivos (con otras subcategorías como Sólidos, Líquidos, etc.), y así sucesivamente. De manera similar, los conceptos tipo Proceso tienen como sub-categorías a Procesos Directos o Secuenciales y Procesos Emergentes.

El cambio conceptual, es decir la modificación de la categoría ontológica asignada a un concepto, puede ser más difícil o más fácil de realizar durante el aprendizaje, dependiendo de la categoría ontológica a la que el estudiante asigna inicialmente al concepto en cuestión. Por ejemplo, un concepto puede ser de tipo Materia y, a su vez, pertenecer a las categorías subordinadas de Reino Natural, Seres Vivos y Animales.

- Un alumno podría asignar inicialmente al "coral", de manera correcta, las categorías: Materia, Reino Natural y Seres Vivos; pero, al mismo tiempo, podría haber categorizado ese concepto como Planta en lugar de Animal. En este caso el cambio conceptual se debe producir desde la sub-categoría Planta a la sub-categoría Animal. Dado que el concepto está bien categorizado en varias sub-categorías superordinadas de la categoría Animal, el “cambio conceptual” que debe realizar el estudiante es relativamente simple.
- Otro alumno durante el aprendizaje de este concepto, puede asignarle correctamente las categorías: Materia y Reino Natural; pero lo puede haber categorizado como Ser No Vivo. En este caso, el cambio conceptual se debe producir desde la sub-categoría Ser No Vivo a la categoría subordinada Ser Vivo, y luego se debe categorizarlo como Animal. Este cambio conceptual es un poco más complejo de realizar que el del ejemplo anterior.
- Un tercer alumno durante el aprendizaje del concepto de "coral" puede asignarle correctamente la categoría Materia pero puede haberlo categorizado como una Construcción del Hombre. En este caso el cambio conceptual se debe producir desde la subcategoría Construcción del Hombre a la categoría subordinada Reino Natural y, luego, se debe categorizar como Ser Vivo y, finalmente, como Animal. Este cambio conceptual es todavía más complejo de realizar que la situación mencionada en el párrafo anterior y mucho más compleja que la primera situación descrita.
- Siguiendo la misma línea de pensamiento, un alumno podría asignarle la categoría Proceso. En este caso, el cambio conceptual se debe producir desde la categoría Proceso a la categoría Materia, luego debe asignarlo a Reino Natural, a Seres Vivos y finalmente a la categoría Animal. Este “Cambio Conceptual” es el más complejo que podría realizar un aprendiz.

En Física, son esenciales las categorías tipo Materia y tipo Proceso (Chi, 1992; Chi et al. 1994). Es decir que se pueden caracterizar las entidades vinculadas al aprendizaje de la Física como conceptos “basados en Materia o de tipo Entidad” y conceptos “basados en Procesos”. Mientras que la mayoría de los conceptos en Física pertenecen a la categoría Proceso (Chi et al. 1994), es común que los estudiantes asimilen los conceptos en la categoría Materia o Entidad (Reiner et al., 2000; Pocoví y Finley, 2003).

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 constituyentes 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.

El comportamiento específico de las componentes individuales o de sus constituyentes depende de ciertas condiciones locales, por lo tanto, existen relaciones causa-efecto entre estas condiciones que afectan al patrón global o a los comportamientos locales de las componentes. Como consecuencia, se debe tener en claro, que entender el mecanismo causal entre las componentes y el patrón, es distinto de entender las relaciones causa-efecto que tienen algunos factores sobre el patrón y/o las componentes. Es decir que entender cómo ciertos factores influyen el comportamiento del patrón no significa que se ha entendido la causa que produjo el patrón o cómo el comportamiento de las componentes produce el patrón.

Chi (2005) describe 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 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 (2008) los identifica como Procesos Emergentes. En la Tabla I, traducida de Chi 2008 pp74-75, se muestran de manera resumida, las características que distinguen la interacción entre las componentes constituyentes de los Procesos Directos y Emergentes.

	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	Las interacciones de las componentes constituyentes no están restringidas, todas las componentes interactúan entre sí, es decir existe una interacción sin

	algunas otras componentes pre-especificadas.	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.

Tabla I. Comportamiento de las interacciones a nivel de componentes en Procesos Directos vs Procesos Emergentes

En la Tabla II, traducida de Chi 2008 pp74-75, 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.

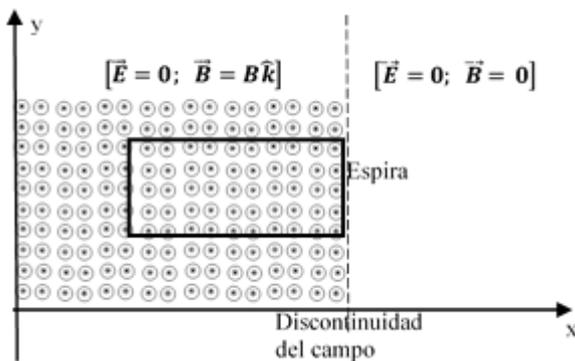
	Proceso Directo o Secuencial	Proceso Emergente
[1]	Diferentes subgrupos de componentes pueden tener funciones y roles identificables que contribuyen a diferentes aspectos del patrón de flujo directamente.	Las componentes no pueden dividirse en subgrupos con roles o funciones distintos. El patrón es causado 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 afectan o 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

Tabla II. Comportamiento de las interacciones entre las componentes y el patrón global en Procesos Directos vs Procesos Emergentes.

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.

4. Análisis de la Ontología de la Inducción Electromagnética

A continuación, se desarrolla un análisis acabado de la naturaleza de la inducción electromagnética, identificando los atributos ontológicos, el patrón resultante y los tipos de interacciones entre ellos para establecer qué aspectos del concepto deben, necesariamente, ser resaltados en cualquier propuesta didáctica. Para realizar este estudio se eligió una experiencia particular en la que en la generación de la inducción electromagnética se involucran espiras o circuitos de manera tal que la magnitud medible asociada a la inducción es la corriente que se establece en el circuito o espira.



La situación que se va a analizar es: Un observador en un sistema inercial O, mide en una zona limitada del espacio, un campo electromagnético constante $[\vec{E} = \mathbf{0}; \vec{B} = B\hat{k}]$, junto a otra zona del espacio, en la cual el campo electromagnético es nulo $[\vec{E} = \mathbf{0}; \vec{B} = \mathbf{0}]$, podría decirse que existe una discontinuidad del campo entre ambas zonas. Una espira de resistencia R en reposo respecto del observador O, se ubica de manera que ésta esté completamente en la región del espacio donde existe campo electromagnético, y con uno de sus lados justo en el límite entre ambas zonas. Esta situación inicial se muestra en la siguiente figura.

Mediante la acción de un agente externo, la espira se mueve a velocidad constante, respecto del observador O, hacia la zona donde el campo electromagnético es nulo, el observador O mide una corriente inducida (existe movimiento de cargas) en la espira. Es sabido que una

corriente en una espira, se establece si existe una fuerza electromotriz (fem, ε), es decir que existe una fem.

En otro sistema de referencia inercial O' con un observador O' en reposo en él, se mueve a velocidad constante $\vec{u} = \vec{v}$ respecto del sistema O. De este modo, O' se mueve a la misma velocidad que la espira. Para el observador O', la situación inicial es la misma que ve el observador O, es decir, mide en una zona limitada del espacio, un campo electromagnético constante $[\vec{E} = \mathbf{0}; \vec{B} = B\hat{k}]$, junto a otra zona del espacio, en la cual el campo electromagnético es nulo $[\vec{E} = \mathbf{0}; \vec{B} = \mathbf{0}]$. Una espira de resistencia R en reposo respecto del observador O, se ubica de manera que ésta esté completamente en la región del espacio donde existe campo electromagnético, y con uno de sus lados justo en el límite entre ambas zonas, como muestra la figura. El observador O', cuando se inicia la experiencia ve situaciones distintas a las descritas por O, en el espacio donde está la espira, mide un campo electromagnético que cambia con el tiempo, este campo presenta ambas facetas eléctrica y magnética. Cuando se inicia el estudio, en todo el espacio que ocupa la espira, existe un campo electromagnético; a medida que transcurre el tiempo, en parte del espacio que ocupa la espira el campo electromagnético es cero y en el espacio restante el campo es distinto de cero, hasta que finalmente el campo se anula en todo el espacio que ocupa la espira. Este campo también presenta una discontinuidad en el espacio donde está la espira. Mientras el campo varía, el observador O' mide una corriente inducida en la espira.

4.1. Inducción Electromagnética, ¿concepto tipo Materia o concepto tipo Proceso?

En la descripción realizada por el observador O se advierte un mecanismo causal que produce un patrón global de flujo. El mecanismo causal, en primera aproximación, es el movimiento de la espira desde la zona del espacio con campo electromagnético, hacia la zona del espacio sin campo electromagnético. Esta situación, produce una fem y una corriente inducidas en la espira, es decir que se establece un patrón global de flujo, con una dirección y sentido característicos. La fem y corriente inducidas constituyen la inducción electromagnética. Se identifican las siguientes componentes del patrón global de flujo:

- el campo electromagnético (con una discontinuidad).
- la espira en movimiento

A partir de este análisis, se puede señalar que la inducción electromagnética es un concepto tipo Proceso.

En la explicación realizada por el observador O' se muestra un mecanismo causal que produce un patrón global de flujo. El mecanismo causal, es la variación en el tiempo del campo electromagnético, que produce una fem y una corriente inducidas en la espira. Las componentes del patrón global de flujo son:

- la espira
- el campo electromagnético variable con el tiempo (con discontinuidad).

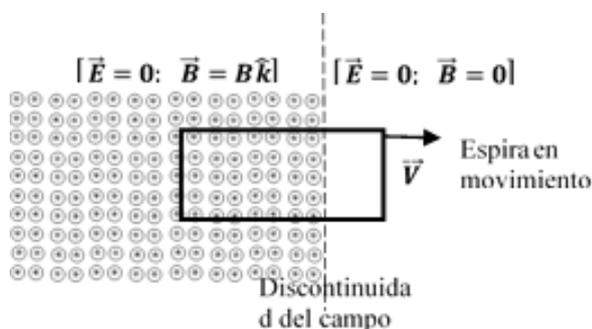
Es decir que, para ambos observador, la inducción electromagnética es un concepto tipo Proceso.

4.2. Inducción Electromagnética, ¿concepto tipo Proceso Directo o tipo Proceso Emergente?

Para poder identificar el tipo de proceso que constituye la inducción electromagnética es necesario describir detalladamente los mecanismos físicos que intervienen en su generación.

El observador O realizaría el siguiente análisis: Una espira en reposo en una zona del espacio con campo electromagnético $[\vec{E} = \mathbf{0}; \vec{B} = B\hat{k}]$ contiene cargas libres en su interior en reposo efectivo que no interactúan con el campo.

Debido a la acción de un agente externo, la espira se mueve con velocidad constante \vec{V} respecto del observador O, hacia la zona del espacio donde no existe campo electromagnético. La figura muestra lo que observador O ve un instante después de iniciada la experiencia.

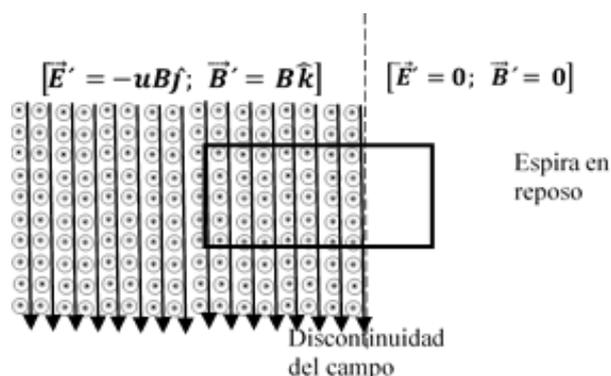


En esta situación, la estructura de la espira interactúa con las cargas, mediante una fuerza sobre las cargas \vec{F}_{e-c} , que se mantiene durante el tiempo que la espira está en movimiento. Como consecuencia de la interacción, se produce un movimiento efectivo de las cargas en la misma dirección y sentido que el de la espira. Ahora, el campo electromagnético interactúa con las cargas en movimiento a través de la fuerza electromagnética $\vec{F} = q(\vec{V} \times \vec{B})$. Esta fuerza modifica la velocidad de las cargas de \vec{V} a \vec{V}_q . O sea que las cargas se mueven a velocidad \vec{V}_q en el interior del campo electromagnético y experimentan la fuerza resultante $\vec{F} = q\vec{E} + q(\vec{V}_q \times \vec{B}) + \vec{F}_{e-c} = q(\vec{V} \times \vec{B})$, donde la velocidad \vec{V} es la velocidad de la espira. La fuerza descripta actúa sobre las cargas que están en la zona del espacio donde el campo electromagnético es no nulo.

En la situación planteada, existen tramos de la espira para los cuales el campo electromagnético es nulo; en estos tramos, la estructura de la espira y las cargas interactúan y no existe interacción entre el campo electromagnético y las cargas. La única fuerza que actúa sobre las cargas es \vec{F}_{e-c} .

Para el observador O, la fem inducida en la espira se define como el trabajo por unidad de carga de la fuerza que actúa sobre las cargas en una trayectoria cerrada $\varepsilon = \frac{1}{q} \oint \vec{F} \cdot d\vec{l} = -VBL_{da}$. Como la fem es distinta de cero entonces se establece una corriente en la espira, que es la corriente inducida igual a $I = -\frac{VBL_{da}}{R}$.

Mientras que O' observa inicialmente una espira en reposo en un campo electromagnético constante que presenta sólo su faceta magnética. Las cargas libres en el interior de la espira tienen movimiento promedio efectivo nulo y no interactúan con el campo. Cuando se pone en marcha la experiencia, O' observa una espira en reposo en un campo electromagnético variable en el tiempo que tiene ambas facetas eléctrica y magnética; además, O' percibe que este campo es discontinuo, es decir que se anula en la zona del espacio donde está uno de los tramos de la espira. El campo electromagnético que mide O' puede obtenerse aplicando las transformaciones de campo en la aproximación débilmente relativista, obteniendo durante la experiencia un campo electromagnético $[\vec{E}' = -uB\hat{j}; \vec{B}' = B\hat{k}]$. La figura muestra lo que observador O' ve un instante después de iniciada la experiencia.



Ahora las cargas en reposo efectivo en los tramos de la espira donde existe un campo electromagnético interactúan con la faceta eléctrica del campo. Esta interacción se manifiesta mediante la fuerza $\vec{F}' = q(\vec{V}' \times \vec{B}')$. La fem inducida en el sistema de referencia O' es $\varepsilon' = \frac{1}{q} \oint \vec{F}' \cdot d\vec{l}' = -VBL_{da}$. Es importante resaltar que el valor de la fem es distinto de cero debido a la discontinuidad del campo. La corriente inducida es $I' = -\frac{VBL_{da}}{R}$.

En base a la explicación anterior desde el punto de vista del observador O, y teniendo en cuenta las componentes del patrón de flujo que son el campo electromagnético y la espira, se observa que la espira está compuesta por su estructura y por las cargas en su interior. Es decir que la estructura de la espira y las cargas pueden considerarse como componentes del patrón global de flujo a un nivel diferente o más desagregado que aquel al que pertenece la espira.

A continuación, se analizará primero la interacción entre las componentes, es decir la interacción entre el campo electromagnético, la estructura de la espira en movimiento y las cargas.

Se observa que el comportamiento de las componentes es bien diferenciado, es decir que los comportamientos del campo electromagnético de la estructura de la espira y de las cargas son distintos, siendo ésta es una característica de los Procesos Directos. Las interacciones de las componentes están restringidas, el campo electromagnético (magnético) actúa sobre cargas en movimiento, pero no actúa sobre la estructura de la espira, mientras que la estructura de la espira actúa sobre las cargas pero no actúa sobre el campo

electromagnético, ésta es otra característica de los procesos Directos. Las componentes actúan en un orden secuencial y dependen unas de otras: existe una interacción entre la estructura de la espira y las cargas y otra interacción entre las cargas en movimiento efectivo y el campo electromagnético. Es destacable que la última interacción no podría producirse sin que las cargas estén en movimiento, es decir, no podría producirse sin que la estructura de la espira y las cargas hayan interactuado previamente. Cuando la espira sale totalmente de la zona del espacio donde existe campo electromagnético, desaparece la interacción entre cargas y campo y por lo tanto también desaparece el patrón global de flujo. Todas estas características de la interacción entre componentes del patrón son atributos de un Proceso Directo.

En cuanto a la interacción entre las componentes y el patrón global de flujo de los conceptos tipo Proceso, en este caso, corresponde a la interacción entre: el campo electromagnético, la estructura de la espira en movimiento y las cargas y la inducción electromagnética.

Identificando al patrón global de flujo con la corriente inducida, la magnitud y el sentido de circulación de la corriente quedan determinados por el vector campo electromagnético (magnitud, dirección y sentido) y el vector velocidad de la espira. Si se modifica en algo alguno de estos vectores se modifica la magnitud de la corriente inducida o su sentido de circulación. Además, la discontinuidad del campo y el movimiento de la espira afectan directamente al patrón global de flujo es decir, a la generación de la inducción electromagnética (si la espira no se moviera o si el campo tuviera el mismo valor en todo el espacio, no existiría inducción electromagnética; si la espira se moviera perpendicular a la dirección especificada tampoco existiría patrón global de flujo). El movimiento de las cargas se correlaciona con el patrón global de flujo: se puede ver que el movimiento de las cargas se correlaciona con la corriente inducida. La interacción entre la estructura de la espira y las cargas y la interacción entre las cargas en movimiento y el campo electromagnético son, claramente, los causantes de la generación de la fem y la corriente inducidas. Los comportamientos de las cargas son funcionales a la generación de la corriente que es en definitiva el patrón global de flujo de este Proceso. Por todo lo analizado acerca de la interacción entre componentes y la interacción entre las componentes y el patrón global de flujo, se puede deducir que la inducción electromagnética es un concepto tipo Proceso Directo.

Mientras tanto, para el observador O' , las cargas constituyen las componentes del patrón más desagregadas dado que son parte constitutiva de la espira. En el análisis de la interacción entre componentes se observa que las cargas y el campo electromagnético tienen distintos comportamientos; además las cargas sólo interactúan con la faceta eléctrica del campo es decir que la interacción es restringida. La interacción entre el campo electromagnético y las cargas sólo inicia cuando el campo presenta su faceta eléctrica. En base a lo antedicho, se puede pensar que existe una secuencia: previo al inicio de la experiencia, el campo electromagnético tiene sólo su faceta magnética, después de iniciada la experiencia el campo electromagnético presenta ambas facetas eléctrica y magnética, una vez que aparece la faceta eléctrica del

campo, se manifiesta la interacción con las cargas. Para este observador la interacción entre las cargas y el campo termina cuando el campo se anula en todo el espacio donde está la espira, en ese momento la fem inducida es nula y no existe corriente en la espira, es decir, el patrón de flujo se detiene. Como resultado del análisis de la interacción entre componentes este observador también concluye que el proceso es de tipo Directo.

Por completitud, se analizará la interacción entre las componentes y el patrón global de flujo. También este observador puede identificar al patrón global de flujo con la corriente inducida, de manera que la magnitud y el sentido de circulación de la corriente quedan determinados por el vector campo electromagnético (magnitud, dirección y sentido). Si se modifica en algo el campo, se modifica la magnitud de la corriente inducida o su sentido de circulación. La discontinuidad del campo y el tipo de faceta que presenta, afectan directamente al patrón global de flujo es decir, a la generación de la inducción electromagnética (si el campo no presentara su faceta eléctrica, no existiría inducción electromagnética y, si el campo, aún con su faceta eléctrica, tuviera el mismo valor en todo el espacio, tampoco existiría inducción electromagnética). Para este observador, igual que para el anterior, el movimiento de las cargas se correlaciona con el patrón global de flujo y el movimiento de las cargas se correlaciona con la corriente inducida. La interacción entre las cargas y el campo electromagnético con su faceta eléctrica son, claramente, los causantes de la generación de la fem y la corriente inducidas. Igual que para el observador anterior los comportamientos de las cargas son funcionales a la generación de la corriente que es en definitiva el patrón global de flujo de este Proceso.

Confirmando lo planteado inicialmente, la inducción electromagnética es un concepto tipo Proceso Directo para los dos observadores que estudian la experiencia propuesta. El análisis de la categoría ontológica a la que pertenece la inducción electromagnética para cualquier observador puede ser inferido del análisis realizado. Se puede concluir que la categoría ontológica de un concepto no depende del observador que realice la categorización.

5. RESULTADOS

El análisis realizado muestra dos resultados a destacar. Por una parte, se resalta la esencia relativista de la inducción electromagnética. Ésta se hace visible porque los distintos observadores describen la misma situación desde distintos sistemas de referencia inerciales. Utilizando la transformación de campos en la aproximación débilmente relativista, estos observadores encuentran el campo electromagnético en cada sistema de referencia, es decir tienen una misma entidad física vista por distintos observadores. Este resultado se desataca dado que en el análisis clásico de esta situación, se plantearía que cada observador mide un campo distinto, el observador O mediría un campo magnético mientras que el observador O' mediría un campo eléctrico. En el electromagnetismo clásico el campo magnético es una entidad física distinta e independiente del campo eléctrico, esta concepción plantea muchas dificultades en el aprendizaje de la inducción electromagnética. En palabras de Feynman "No sabemos de ninguna otra parte de la física donde un principio general,

simple y exacto requiera para su comprensión real un análisis en términos de *dos fenómenos diferentes*. (p. 17-3).

Por otra parte, el segundo resultado es la caracterización ontológica de la inducción electromagnética como un Proceso Directo. El análisis elaborado para lograr esta caracterización ontológica constituye el resultado más importante, dado que proporciona la descripción detallada de los mecanismos físicos intervinientes en la generación del Proceso Directo bajo estudio: la inducción electromagnética. Esta descripción muestra lo que los estudiantes deben aprender para considerar que asignan la categoría ontológica correcta a la inducción electromagnética. Es sabido que en la enseñanza tradicional de la inducción electromagnética, el caso presentado en este trabajo como una misma situación física vista por dos observadores en sistemas de referencia inerciales distintos, se presenta como dos situaciones distintas. Aún si este fuera el caso, el análisis de la ontología del concepto es aplicable. Es decir que la asignación de la categoría ontológica correcta al concepto es independiente de si esta es realizada en un estudio clásico del electromagnetismo o si está en una aproximación débilmente relativista.

6. CONCLUSIONES

En concordancia con el modelo de Cambio Conceptual generado por Chi y su equipo, el conocimiento de la ontología de un concepto, resulta indispensable para su correcta comprensión. Así, se planteó el estudio de la naturaleza del concepto de Inducción Electromagnética. Utilizando un caso particular en el que se produce esta inducción, y que corresponde a un caso frecuentemente presentado como ejemplo en la bibliografía, se analizaron las propiedades que tiene este concepto y se determinó que pertenece a la categoría ontológica de tipo Proceso Directo. El análisis implicó “desmenuzar” el proceso de generación de Inducción Electromagnética para identificar las componentes, sus interacciones y la secuencialidad requerida por el Proceso. Este análisis se realizó desde sistemas de referencia distintos, mostrando que la categoría ontológica de la Inducción Electromagnética es independiente del sistema de referencia desde donde se realiza la observación.

Es a partir del conocimiento del tipo ontológico del concepto, que se puede plantear cualquier investigación asociada con su enseñanza y aprendizaje.

Se espera que la realización de este trabajo contribuya, en una pequeña medida, al planteamiento de nuevas propuestas didácticas más completas y precisas y rigurosas con el objeto de mejorar la enseñanza de la Inducción Electromagnética, incorporando la ontología del concepto como parte fundamental de su conocimiento.

REFERENCIAS

Ausubel, D. P. (1968). *Educational psychology: a cognitive view*. New York: Holt.

Chabay, R. y Sherwood, B. (2006). Restructuring the introductory electricity and magnetism course. *American Journal of Physics*, 74(4) (pp 329 – 336).

Chi, M. T. (1992). Conceptual change within and across ontological categories: Examples from learning and discovery in science. En R. N. Giere y H. Feigl (Eds.), *Cognitive models of science: Minnesota studies in the philosophy of science* (págs. 129-186). Minneapolis: MN: University of Minnesota Press.

Chi, M. T., 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.

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., Roscoe, R., Slotta, J., Roy, M., y Chase, M. (2012). Misconceived causal explanations for "emergent" processes. *Cognitive Science*, 36, 1-61.

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

diSessa, A. (1988). Knowledge in piece. En G. Forman, y P. Pufall (Eds.), *Constructivism in the computer age* (págs. 49-47). Hillsdale, N.J: Lawrence Erlbaum.

Driver R., Guesne E. y Tiberghien A. Children's Ideas in Science. Open University Press Milton Keynes Philadelphia (2000)

Einstein, A. (1905). *Sobre la electrodinámica de cuerpos en movimiento* traducido en *Albert Einstein a cien años de sus trabajos más importantes y a ochenta de su vista a la Argentina*. Academia Nacional de Ciencia Exactas, Física y Naturales 2005 Buenos Aires Argentina.

Feynman, R., Leightonm, R., Sands, M. (1987). *Física, Vol 1 y 2*. Addison-Wesley Iberoamericana.

Galili, I (1996). Students' conceptual change in geometrical optics. *International Journal of Science Education*, 18 (7), 847-868

Galili, I. y Kaplan, D. (1997) Changing approach to teaching electromagnetism in a conceptually oriented introductory physics course. *American Journal of Physics*, 65(7), Julio 1997.

Galili, I., Kaplan, D. y Lehavi, Y. (2006). Teaching Faraday's law of electromagnetic induction in an introductory physics course. *American Journal of Physics*, 74(4), 337-343.

Guisasola, J., Almudí, J. M. y Zuza, K. (2010). Dificultades de los estudiantes universitarios en el aprendizaje de la inducción electromagnética. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 32 (1).

Guisasola, J., Almudí, J. M. y Zuza, K. (2011). University Students' Understanding of electromagnetic induction. *International Journal of Science Education*, pp (1,26)

Henderson, J. B. Langbeheim, E. y Chi, T. H. (2017). Addressing robust misconceptions through ontological distinction between sequential and emergent processes. En B. Sherin, T. G. Amin y O. Levrini (Eds.), *Converging perspectives on conceptual change: Mapping an emerging paradigm in the learning sciences* (pp. 26-33).NY: Routledge.

Pocoví, M. C. y Finley, F. (2003). Historical evolution of the field view and textbook account. *Science and Educations*, 12(4), 387-396.

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*, 44(1), 107-132.

Pocoví, C. y Hoyos, E. (2004). Estudio de Caso de la comprensión de diferencia de potencial y Fem en alumnos avanzados y graduados en física. *Investigações em Ensino de Ciências*, 9, (3).

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

She, H. C. (2004). Fostering "Radical" conceptual change through dual situated learning model. *Journal of Research in Science Teaching*, 41(2), 142-164.

Slotta, J. D., Chi, M. T. y Joram, E. (1995). Assessing student misclassifications of physics concepts: An ontological basis for conceptual chang. *Cognition and Instruccion*, 13, 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.

Slotta, J. D. (2011). In defense of Chi's ontological incompatibility hypothesis. *Journal of the Learning Sciences*, 20(1), 445-451.

Wandersee, J. H., Mintzes, J. J. y Novak, J. D. (1994). *Research on alternative conceptions in science*. En D. L. Gabel (Eds.), *Handbook of research on science teaching and learning* (págs. 177-210). New York: Macmillan Publishing Company.