

Implementación de una secuencia de enseñanza y aprendizaje para abordar la teoría especial de la relatividad en la escuela secundaria en el marco de la enseñanza para la comprensión

REVISTA
DE
ENSEÑANZA
DE LA
FÍSICA

Esther E. Cayul¹, Irene Arriasecq^{1,2}

¹ Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Paraje Arroyo Seco, CP 7000, Buenos Aires, Argentina. ECienTec.

² CONICET

E-mail: ecayul@exa.unicen.edu.ar

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados de la implementación de cinco etapas de una Secuencia de Enseñanza y Aprendizaje diseñada para abordar la Teoría Especial de la Relatividad en la escuela secundaria superior, en Argentina. Se tomó como marco teórico la Enseñanza para la Comprensión. El objetivo de esta investigación es analizar si las metas y desempeños de comprensión esperados, para los alumnos, se han logrado con esta propuesta. Se plantean diferentes interrogantes respecto del material elaborado para implementar la secuencia: ¿el tiempo estimado para la implementación es suficiente? ¿Las actividades propuestas son acordes y suficientes? ¿Los textos seleccionados son comprensibles para los alumnos? ¿Los diagramas de Minkowski son una herramienta útil para interpretar la simultaneidad? La metodología utilizada es cualitativa de tipo descriptiva. Se implementó la secuencia de enseñanza y aprendizaje en dos cursos de escuela secundaria superior, conformado por 65 alumnos, en una escuela pública dependiente de la Universidad Nacional del Centro. Los resultados obtenidos evidencian rasgos de aprendizaje significativo de la Teoría Especial de la Relatividad, por parte de los alumnos.

Palabras clave: Secuencia de Enseñanza y Aprendizaje, Teoría Especial de la Relatividad, Enseñanza para la Comprensión, Escuela secundaria.

Abstract

The results of the implementation of a Teaching - Learning Sequence for Special Relativity Theory in high school in Argentina are presented in this work. It was taken Teaching for Understanding as the theoretical framework. The objective of this research is to analyze if the goals and expected performances of understanding have been achieved by students with this proposal. Different questions regarding the material developed to implement the sequence are proposed: the estimated time for implementation is enough? Do the proposed activities are consistent and sufficient? Do the selected texts are comprehensible by the students? Do Minkowski diagrams are a useful tool to interpret concurrency? The methodology used is qualitative. The teaching - learning sequence was implemented in two groups of high school in a public school. The results show that the students show meaningful learning characteristics in Special Relativity Theory topics.

Keywords: Teaching, Learning Sequences, Special Relativity Theory, Teaching for Understanding, High School.

I. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se analiza la reelaboración de una Secuencia de Enseñanza y Aprendizaje (SEA), que consta de cinco etapas, diseñada para abordar la Teoría Especial de la Relatividad (TER) en la escuela secundaria superior (Arriasecq, 2008; Arriasecq y Greca, 2012).

El objetivo de la reelaboración e implementación de la SEA es lograr que los alumnos comprendan algunos aspectos relevantes de la TER seleccionados a partir del marco teórico de la Enseñanza para la Comprensión (EpC), (Wiske, M., 1999) en el nivel de educación secundaria.

Las etapas de la SEA analizadas corresponden a: los orígenes y características del conocimiento científico, revisión de conceptos de la Mecánica Clásica (MC), conceptos del electromagnetismo que entran en conflicto con la mecánica clásica, Tópicos de la TER y aspectos personales de la vida de Einstein.

El diseño de SEA puede caracterizarse como una actividad de carácter dual que consiste tanto en una actividad de investigación en el aula como el producto de la misma, con actividades suficientemente investigadas de enseñanza y aprendizaje de determinados tópicos con ciertos grupos de alumnos (Méheut y Psillos, 2000; Psillos y Méheut, 2001).

Una parte importante del diseño de la propuesta consistió en la elaboración de un material escrito (con formato de libro de texto) para ser utilizado por docentes y alumnos que contempló las carencias – entendidas como tales desde la perspectiva de nuestro marco teórico– encontradas en los libros de texto usuales.

Dicho material incluye, fundamentalmente, el desarrollo de tópicos específicos de la TER, selección de artículos originales para su lectura y discusión crítica, como así también la propuesta de diversos tipos de actividades (resolución de problemas, ejercicios, etc.; incluso algunas no convencionales como la elaboración de cuentos e historietas). Este material posee un enfoque que le otorga un rol tan importante a la Historia de la Ciencia y la Epistemología como el que tiene la adopción de un marco psicológico y uno didáctico.

En cuanto a la SEA las cuestiones planteadas son: en el tópico generativo seleccionado los aspectos centrales incluidos ¿valen la pena ser comprendidos? ¿las metas de comprensión establecidas para la SEA podrán ser comprendidas? ¿las actividades propuestas como desempeños de comprensión podrán ser adquiridas?

Respecto al material elaborado se plantean, entre otros, los siguientes interrogantes: ¿el tiempo estimado para la implementación es suficiente? ¿Las actividades propuestas son acordes a los contenidos propuestos? ¿Los textos seleccionados son comprensibles para los alumnos? ¿Los diagramas de Minkowski son una herramienta útil para interpretar la simultaneidad? ¿Podrán, los alumnos, interpretar sucesos utilizando como de luz? ¿los alumnos poseen el lenguaje algebraico necesario para resolver situaciones problemáticas?. Se espera que al finalizar la investigación se puedan dar respuestas a estas cuestiones.

En esta SEA se adoptaron elementos de la epistemología de Bachelard (1987), que permitieron desarrollar un análisis epistemológico del contenido de la TER. El eje psicológico fue elaborado a partir de una síntesis de diversas perspectivas sobre la formación de conceptos (se adoptan algunos aspectos de las teorías de Vergnaud (1990), Ausubel *et al.* (1991) y Vygotsky (1987), tomados como marcos teóricos complementarios que posibilitan interpretar cómo los alumnos logran conceptualizar un contenido concreto en situación de aula. En el eje didáctico se tomó como referente fundamental la concepción de objetivo-obstáculo de Martinand (1986), quien propone la existencia de una relación dialéctica entre los objetivos de la enseñanza y los obstáculos que se interponen en la concreción de los mismos (de donde emerge el concepto de objetivo-obstáculo).

Los tres ejes anteriormente analizados se conjugan en la perspectiva más amplia de EpC.

A. Marco Teórico

En esta propuesta se asume como comprensión a la capacidad que presentan las personas para pensar y actuar con flexibilidad, ante diversas situaciones en el mundo, utilizando lo que saben de manera creativa e innovadora. Si *un estudiante no puede ir más allá de la memorización y el pensamiento y la acción rutinarios, esto indica falta de comprensión* (Perkins, 2005).

Según Perrone (2005), una pedagogía para la comprensión debe ser lo suficientemente flexible y atractiva para que le sea útil a todos los alumnos. Debe trabajar para alumnos de todos los niveles de capacidad y desempeño académicos. Debe comprometer la gama completa de posibilidades intelectuales para que los alumnos puedan poner en juego todos sus talentos en la actividad escolar.

Como señala Wiske (2005), en una pedagogía para la comprensión se necesita más que una idea acerca de la naturaleza de la comprensión y para su desarrollo se hace necesario un marco conceptual guía que debe abordar cuestiones clave: ¿Qué tópicos vale la pena comprender? ¿Qué aspectos de esos tópicos deben ser comprendidos? ¿Cómo se puede promover la comprensión? y ¿Cómo se puede averiguar lo que comprenden los alumnos?

Para dar respuesta a estos interrogantes, el proyecto de investigación colaborativa sobre EpC desarrolló cuatro constructos: tópicos generativos, metas de comprensión, desempeños de comprensión y evaluación diagnóstica continua (Wiske, op. cit.).

B. Constructos de la Enseñanza para la Comprensión en la SEA

Tópicos generativos: para dar respuesta a la pregunta ¿qué temas o tópicos vale la pena comprender? la EpC propone seleccionar tópicos generativos. Son temas o contenidos centrales para el dominio de una disciplina, se relacionan con las preocupaciones y experiencias cotidianas de los alumnos, son accesibles e interesantes y se conectan con otros tópicos de la disciplina o fuera del dominio de la misma.

El tópico generativo seleccionado, para toda la SEA, corresponde a la Teoría Especial de la Relatividad que se encuentra en el Marco de Referencia para la Orientación en Ciencias Naturales, Física, correspondiente a la enseñanza secundaria superior de Argentina.

En el tópico generativo TER los aspectos centrales que deben ser comprendidos son: espacio y tiempo, sistema de referencia, observador, simultaneidad y medición; cada uno de ellos es indispensable para la comprensión de la TER.

Metas de comprensión: afirman de manera explícita lo que se espera que los alumnos lleguen a comprender. Estas metas definen las ideas, procesos, relaciones o preguntas que a través de la indagación comprenderán mejor los alumnos.

En esta SEA, se seleccionaron las metas necesarias para que el alumno pueda abordar los contenidos de la TER a través de las actividades conceptuales y prácticas realizadas en el aula y como tarea que realizaban en sus hogares. Estas metas llevaban al alumno a plantear ideas, diseñar procesos, establecer relaciones e indagar sobre los conceptos abordados. En las sección tablas se presentan y enumeran la metas de comprensión de la SEA (ver tablas I y II). La numeración de cada una de las metas de comprensión en estas tablas, coinciden uno a uno con las de desempeño de comprensión de las tablas III y IV.

Desempeños de comprensión: como lo define Perkins (*op.cit.*), son actividades que van más allá de la memorización y la rutina. Un desempeño de comprensión siempre nos obliga a ir más allá. En estas etapas de la SEA los desempeños de comprensión, que se espera que adquieran los alumnos, son: análisis, interpretación, relación y explicación de conceptos epistemológicos, mecanicistas, electromagnéticos y relativistas. En las tablas III y IV, de la sección tablas, se presentan los desempeños de comprensión.

Evaluación diagnóstica continua: como se asume que la evaluación no puede dissociarse del proceso de enseñanza y aprendizaje es un elemento clave en la SEA. Esta evaluación desempeña diversas funciones: diagnóstica, acreditación, seguimiento, etc. En este marco teórico los criterios de evaluación contemplan que los alumnos se involucren en evaluar su propio trabajo y el de sus compañeros, los docentes renuncian "... a su papel de únicos árbitros de excelencia..." y a "... negociar la autoridad intelectual con sus alumnos." (Wiske, *op. cit.*). Los alumnos y los docentes asumen nuevos roles y relaciones.

El hecho de ser una evaluación continua permite identificar tanto las dificultades de los alumnos en comprender algunas metas como en alcanzar los desempeños comprensivos esperados.

La evaluación diagnóstica continua contempló las diversas tareas individuales y grupales, realizadas por los alumnos, para establecer las notas solicitadas por la institución.

TABLA I. Metas de comprensión referentes a las dos etapas iniciales

1.- Conocer el desarrollo y evolución de la Física a lo largo de la historia: Culturas antiguas, física y cosmología aristotélica, mecánica clásica, mecánica cuántica y teoría especial de la relatividad.
2.- Caracterizar la ciencia de la antigüedad, la física y cosmología aristotélica.
3.- Comprender los aspectos fundamentales de la cosmología y física aristotélica, y su vigencia por dos mil años.
4.- Entender las diferencias del conocimiento científico y otras clases de conocimientos.
5.- Identificar un movimiento, evento, objeto y observador.
6.- Diferenciar los conceptos de trayectoria, distancia recorrida, posición, desplazamiento, rapidez, velocidad: promedio e instantánea.
7.-Representar situaciones eligiendo sistemas de coordenadas unidimensionales y bidimensionales.
8.- Establecer respecto de qué SRI se analiza un movimiento.
9.- Utilizar ecuaciones de transformación para resolver un problema en diferentes SRI.
10.- Analizar las diferentes acepciones de los conceptos espacio y tiempo a lo largo de la historia.
11.- Debatir sobre la sincronización y simultaneidad de eventos.
12.- Relacionar significativamente los conceptos de observador, proceso de medición e instrumentos.

13.- Comprender la invariancia de la masa, la aceleración y la independencia del espacio, del tiempo, y la no invariancia de la velocidad.
14.- Interpretar la imposibilidad de definir un sistema de referencia absoluto.
15.- Reflexionar sobre el principio de relatividad de Galileo.

TABLA II. Metas de comprensión referentes a la Teoría Especial de la Relatividad

1.- Interpretar incompatibilidades de la Mecánica Clásica con aspectos del electromagnetismo.
2.- Diferenciar el éter luminoso del éter aristotélico.
3.- Analizar y debatir el experimento de Michelson Morley.
4.- Reflexionar sobre los postulados de la TER y sus implicancias en conceptos clásicos como: evento, observador, sistema de referencia, procesos de medición, simultaneidad, espacio y tiempo.
5.- Comprender de manera significativa las definiciones operacionales de tiempo y espacio.
6.- Determinar el tiempo y la longitud en sistemas propios e impropios.
7.- Reconocer la dilatación del tiempo y la contracción de longitudes ocurrida en sistemas propios e impropios.
8.- Interpretar las ecuaciones de transformación de Lorentz y aplicarlas al cálculo de velocidad en diferentes sistemas de referencias.
9.- Utilizar diagramas de Minkowski para representar sucesos en el espacio-tiempo y realizar cálculos para determinar la simultaneidad de eventos.
10.- Emplear cono de luz para representar un suceso presente con su pasado, futuro y resto.
11.- Analizar las diferentes comprobaciones experimentales, aplicaciones y repercusiones de la TER.
12.- Construir una imagen adecuada de Albert Einstein, fundamentada histórica y epistemológicamente, tanto de su vida personal como la científica.

TABLA III. Desempeños de comprensión correspondientes a las dos etapas iniciales

1.- Lectura comprensiva sobre los inicios de la Ciencia y la evolución de la Física.
2.- Elaborar un mapa conceptual que muestre relación sobre la ciencia antigua, física y cosmología aristotélica.
3.- Interpretar un dibujo donde se representa lo que en historia de la ciencia se conoce como argumento de la Torre y responder consignas relacionadas con el movimiento o no de la Tierra.
4.- Elaborar un mapa conceptual, con su correspondiente explicación, que relacione la ciencia, actividad científica y las características del conocimiento científico.
5.1- Interpretar dos figuras que representan el movimiento de un objeto desde la perspectiva de dos observadores distintos.
5.2- Analizar y debatir una simulación que presenta el movimiento en un sistema inercial.
6.- Elaborar un mapa conceptual, con su correspondiente explicación, donde se relacionen los conceptos necesarios para establecer el movimiento de un objeto.
7.- Resolver situaciones problemáticas seleccionando sistemas de coordenadas adecuadas.
8 y 9.- Utilizar ecuaciones de transformación para representar el movimiento de un objeto desde sistemas de referencia diferentes.
10.- Lectura crítica y comprensiva sobre las diferentes concepciones de tiempo y espacio relacionadas con visiones del mundo distintas y modelos científicos diferentes. Realizar una síntesis de dicha lectura expresando una opinión personal sobre los temas tratados.
11.- Identificar los instrumentos, que se pueden utilizar en mediciones, para establecer la sincronización y simultaneidad de eventos.
12.- Reflexionar sobre una situación, acompañada de un gráfico, que representa el movimiento de un objeto desde la perspectiva de dos observadores en sistemas de referencia inerciales diferentes.

13.- Aplicar las transformadas de Galileo para determinar la invarianza de la distancia, la aceleración y la no invarianza de la velocidad, entre dos SRI, uno en movimiento y el otro en reposo.
14.- Realizar una síntesis personal de conceptos fundamentales como: la invarianza y la independencia del espacio y del tiempo, la imposibilidad de definir un sistema de referencia absoluto y la noción de simultaneidad para la comprensión y la resolución de problemas en Mecánica Clásica.
15.- Resolver diversos problemas utilizando ecuaciones de transformación entre sistema inerciales y aplicando el principio de relatividad Galileana.

TABLA IV. Desempeños de comprensión correspondientes a la Teoría Especial de la Relatividad.

1.- Elaborar un mapa conceptual con la interpretación de los fenómenos vinculados con el electromagnetismo, para los cuales existía una teoría que los explicaba, y aquellos que presentaban problemas para las teorías de la época.
2.- Responder consignas referentes a la necesidad de la existencia de un éter en las diferentes etapas de la Física.
3.- Analizar y debatir el experimento de Michelson- Morley, usando una simulación, para determinar la velocidad de la Tierra respecto del éter.
4.- Resolver actividades que involucren interpretar, relacionar y analizar consecuencias de los dos postulados de la TER, y sus implicancias en conceptos clásicos.
5.- Realizar una lectura comprensiva y las actividades sugeridas a partir de un texto que explica como Einstein buscó definiciones que contuvieran instrucciones precisas para realizar medidas físicas y las denominó <i>definiciones operacionales</i> .
6.- Proponer a los alumnos resolver problemas para determinar la hora en que ocurre un evento y calcular la longitud desde diferentes sistemas de referencia.
7.- Resolver diferentes situaciones problemáticas, que involucran la dilatación del tiempo y la contracción de longitudes, en sistemas propios e impropios.
8.- Aplicar la transformación de Lorentz al cálculo de la velocidad de un objeto que se mueve en un sistema de referencia que, a su vez, se mueve con MRU respecto a otro.
9.1- Plantear y resolver problemas, de manera algebraica y construyendo diagramas de Minkowski, para establecer la simultaneidad de sucesos en diferentes sistemas de referencias inerciales.
9.2- Usar simulaciones (<i>Tren de Einstein desde el interior y el exterior</i>) para representar los diferentes problemas propuestos (en los que se varía la velocidad del tren) analizar el diagrama de espacio-tiempo, para cada evento, y escribir las conclusiones que se desprenden de cada situación.
10.- Construir cono de luz para representar sucesos como extinción del Sol, la historia de un quásar y otros, analizando qué ocurre en el pasado, presente y futuro.
11.- Leer y debatir sobre las diferentes comprobaciones experimentales, aplicaciones y repercusiones de la TER.
12.- Elaborar y presentar una síntesis sobre los aspectos más relevantes de la vida personal y científica de Albert Einstein, fundamentada histórica y epistemológicamente, con el objetivo de romper con aspectos que trascienden al “mito” y al “genio”.

II. METODOLOGÍA

Dentro del marco metodológico utilizado se adopta la Investigación Acción, con la modalidad de profesor investigador quien tiene como propósito planificar, observar, reflexionar y realizar una evaluación diagnóstica continua de los desempeños obtenidos por los alumnos (Cohen y Manion, 1985; Carr y Kemmis, 1986; Elliot, 1994). Otro docente investigador se desempeñó como observador participante, con el objetivo de colaborar en los registros de datos. (Denzin, 1970; Schatzman y Strauss, 1973; Valles, 1989; Adler y Adler, 1994).

La investigación se llevó a cabo durante un año lectivo completo en dos cursos de quinto año, formado por 65 alumnos, de una escuela secundaria pública de la ciudad de Tandil dependiente de la UNICEN. Las clases tenían una duración de dos horas semanal.

Se utilizaron como registros de esta SEA, grabaciones de audio, notas y copias de actividades realizadas por los alumnos tales como: mapas conceptuales, respuestas a consignas teóricos-prácticas, evaluaciones parciales e integrales. Los recursos empleados en la SEA: fueron mapas conceptuales, material bibliográfico elaborado para la propuesta, animaciones y simulaciones computacionales.

A. Desarrollo de las clases

Los alumnos debían realizar lectura del material antes de asistir a clase y, en algunas ocasiones, debían resolver actividades para que al inicio de la misma se hiciera una puesta en común. Se realizaron debates, moderados por el docente, entre alumnos/docente y alumnos/alumnos. Se usaron animaciones o simulaciones, como recurso importante para la representación de fenómenos y experimentos complejos, incluso imposible de llevar a cabo en la realidad, para que los alumnos pudieran comprender el significado de algunos conceptos contra intuitivos.

B. Actividades propuestas y realizadas por los alumnos

En el transcurso del tiempo que se realizó esta SEA se propusieron diferentes actividades a los alumnos para lograr obtener las metas y desempeños de comprensión esperados.

A continuación se muestran algunas de las actividades que debieron resolver los alumnos. Se enumeran de acuerdo con las metas y desempeños de comprensión que se encuentran en las tablas I y II.

Meta y desempeño de comprensión N°3

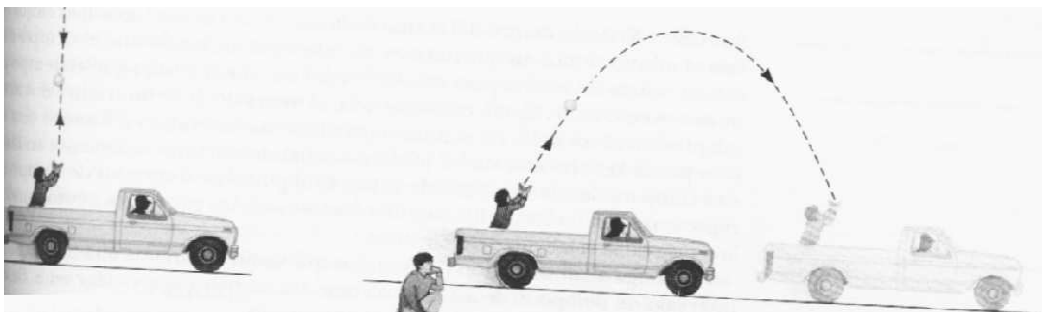


FIGURA 1. Realiza una descripción de lo que te sugieren las siguientes figuras teniendo en cuenta que, lo que se representa en la segunda figura corresponden a dos posiciones distintas del mismo vehículo.

Meta y desempeño de comprensión N° 6

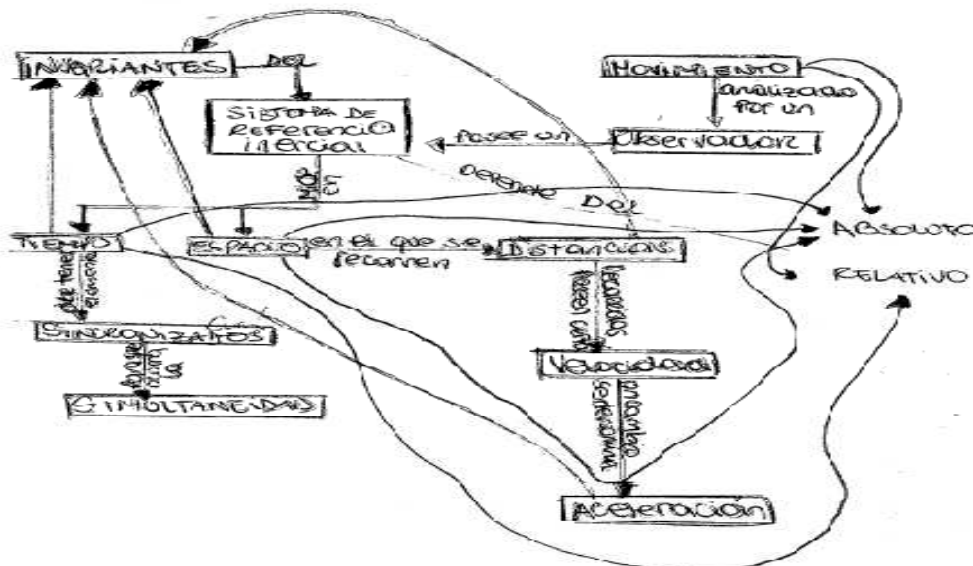


FIGURA 2. Elabora un mapa conceptual, con su correspondiente explicación, donde se relacionen los conceptos necesarios para establecer el movimiento de un objeto.

Las siguientes actividades que plantearon y resolvieron los alumnos, se enumeran de acuerdo con las metas y desempeños de comprensión que se encuentran en las tablas III y IV.

Meta y desempeño de comprensión N° 9.1

Un pasajero de un tren, con velocidad constante respecto de un SRI, situado en el punto medio del vagón, enciende una lámpara y el haz de luz viaja hacia las paredes donde se encuentran ubicadas dos puertas P1 y P2. El tren tiene un mecanismo que consigue que cuando la luz alcanza una pared, se abre una puerta. La velocidad con la que se desplaza el tren es de $0.2c$; $0.5c$; 0.7 y $0.9c$.

a) Resuelve de manera algebraica tratando de establecer la posible simultaneidad de las aperturas de las puertas para dos observadores situados respectivamente en el interior del vagón (O') y otro (O) sobre el andén del tren. Para el caso en que la velocidad del tren es de $0.5c$.

b) Resuelve usando diagramas de espacio-tiempo para establecer la simultaneidad de los eventos.

Solución al problema planteado.

a)

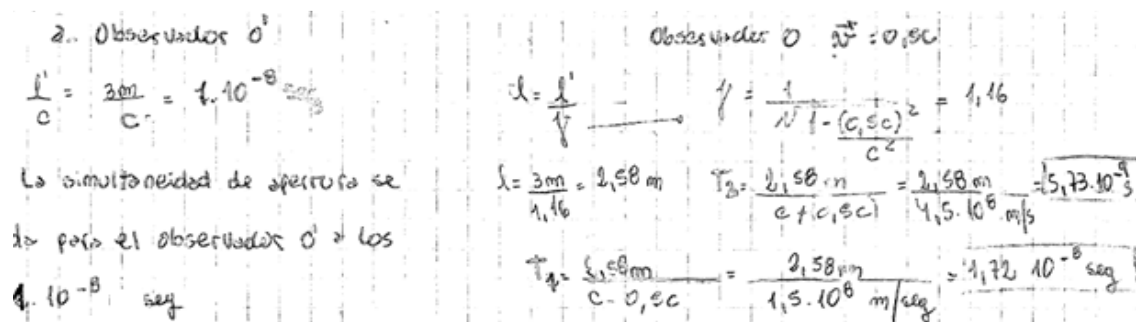
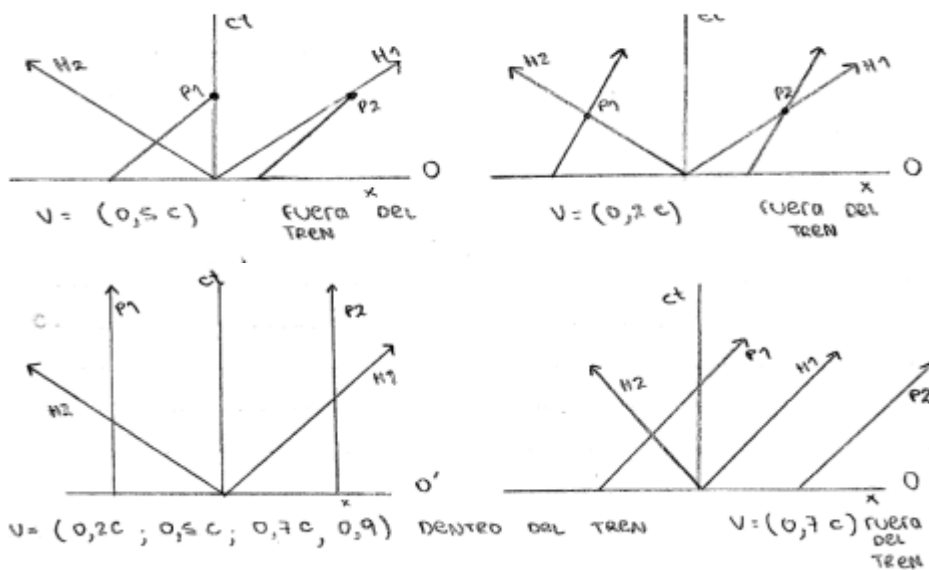


FIGURA 3. Resolución algebraica para determinar la simultaneidad en la apertura de las puertas del tren para un observador ubicado en el interior del tren y un observador externo.

b)



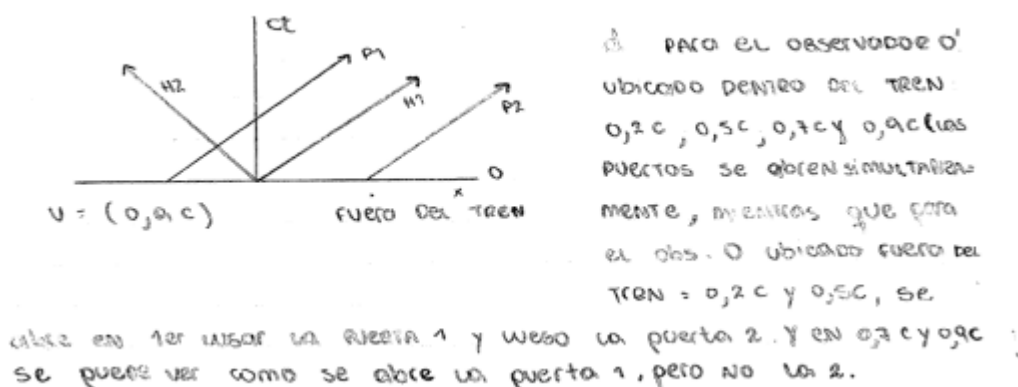


FIGURA 4. Diagramas espacio-tiempo para determinar la simultaneidad en la apertura de las puertas del tren, para un observador interno y externo, variando la velocidad del tren.

Meta y desempeño de comprensión N° 9.2

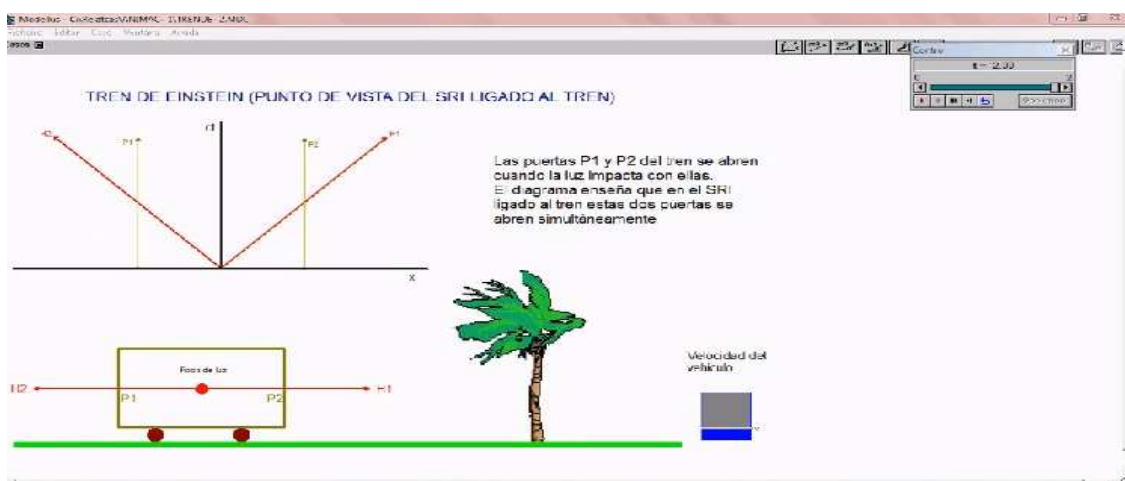


FIGURA 5: Representación de eventos simultáneos utilizando simulación (Tren de Einstein desde el interior) para representar los diferentes problemas propuestos, en los que se varía la velocidad del tren. Análisis de los diagramas de espacio-tiempo.

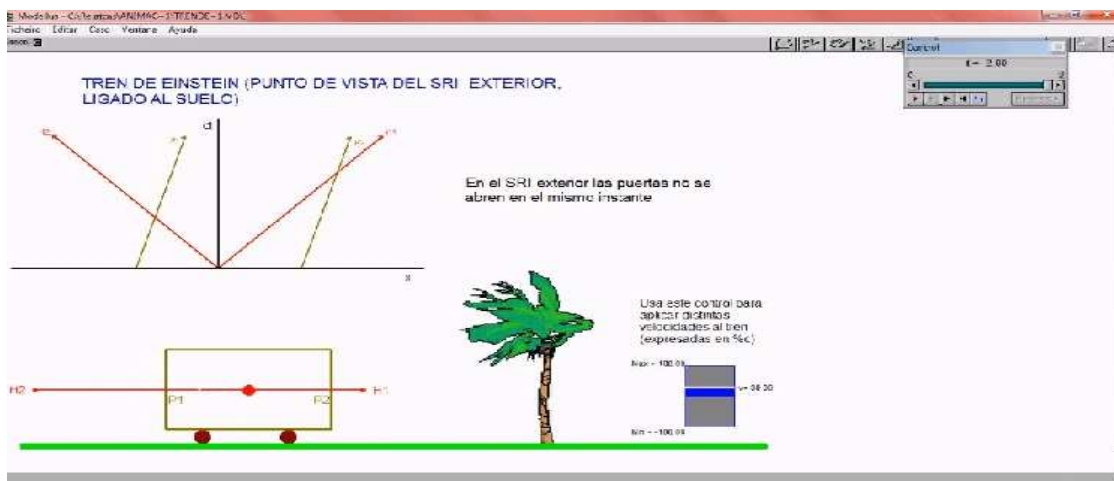


FIGURA 6: Representación de eventos no simultáneos utilizando simulación (Tren de Einstein desde el exterior) para representar los diferentes problemas propuestos, en los que se varía la velocidad del tren. Análisis de los diagramas de espacio-tiempo.

el. En el tren de Einstein (punto de vista observador O' dentro del SR) se venían los eventos por la velocidad en que circula el tren, siempre son simultáneos y ocurren al mismo tiempo.

Tomando en cuenta el ser fuera del tren (observador O) se concluye que a mayor velocidad que circula el tren, el evento 1 y 2 se encuentran más alejados. El primero ocurre más rápido y el segundo demora más. Si el tren iguala (velocidad) la velocidad de la luz, el evento 2 nunca ocurre. Mientras mayor sea la velocidad del tren, los líneas del universo P_1 y P_2 se acercan más al eje x .

FIGURA 7: Análisis de la simulación tren de Einstein interior y exterior

III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Al finalizar la implementación de la SEA se pudieron dar respuestas a los diversos interrogantes planteados al inicio de la investigación.

El tiempo estimado para desarrollar la SEA se duplicó respecto al estimado debido a que se esperaba trabajar durante un cuatrimestre y la implementación llevó dos cuatrimestres enteros.

Las actividades propuestas en el material elaborado para desarrollar la TER resultaron, en algunas etapas insuficientes, y se debieron adicionar nuevas actividades para promover una mayor comprensión en los alumnos. Algunos textos seleccionados e incorporados en este material resultaron difíciles de comprender y otros fueron comprensibles en su totalidad.

En relación con las metas de comprensión establecidas para los alumnos se encontró que los conceptos que tuvieron mayor dificultad en comprender fueron: características del conocimiento científico: sistemático, objetivo y metódico; diferenciación de los conceptos de trayectoria, distancia recorrida y posición; análisis de los conceptos espacio y tiempo; simultaneidad de los eventos; observación en diferentes sistemas de referencias inerciales; uso de ecuaciones de transformación en sistemas de referencia inerciales (SRI). Los conceptos que tuvieron menor dificultad en comprender fueron: aspectos de la física y cosmología aristotélica; sistemas de referencia; procesos de medición e instrumentos empleados; invarianza de la masa, del tiempo, de la aceleración y de la distancia (en Mecánica Clásica).

En cuanto, a los desempeños de comprensión correspondientes a las dos etapas iniciales, los alumnos pudieron reconocer y diferenciar las características del conocimiento científico, analizar e interpretar la física y cosmología aristotélica, establecer relaciones y explicar conceptos necesarios para describir el movimiento de un objeto. Estos desempeños fueron evaluados a través de la construcción de sucesivos mapas conceptuales, debates, realización de actividades teóricas y prácticas.

Pudieron identificar diferentes sistemas de referencias inerciales e interpretar eventos desde la perspectiva de observadores diferentes en diversas situaciones planteadas. Tuvieron dificultad en: seleccionar sistemas de coordenadas adecuadas; utilizar ecuaciones de transformación para representar el movimiento de un objeto desde sistemas de referencias diferentes; resolver problemas usando ecuaciones de transformación entre SRI, es decir, que la mayor dificultad se presentó en cuestiones que involucraban resoluciones algebraicas.

A través del análisis de lecturas sugeridas y debates realizados en clase pudieron comprender la imposibilidad de establecer un sistema de referencia absoluto, la invarianza del espacio, del tiempo, de la distancia y de la aceleración en SRI.

Respecto a las metas de comprensión establecidas para las tres últimas etapas las que presentaron mayor dificultad fueron: Interpretar incompatibilidades de la Mecánica Clásica con aspectos del electromagnetismo; determinar la dilatación del tiempo y la contracción de longitudes ocurrida en sistemas propios e impropios; aplicar las ecuaciones de transformación de Lorentz al cálculo de velocidad en diferentes sistemas de referencias; realizar cálculos para determinar la simultaneidad de eventos; emplear cono de luz para representar un suceso presente con su pasado y futuro. Las metas que pudieron ser comprendidas sin mayor dificultad fueron: diferenciar el éter luminoso del éter aristotélico; analizar y debatir el experimento de Michelson- Morley; reflexionar sobre los postulados de la TER y sus implicancias en conceptos de MC; comprender de manera significativa las definiciones operacionales de tiempo y espacio; utilizar diagramas de Minkowski para representar sucesos en el espacio-tiempo; analizar las diferentes comprobaciones experimentales, aplicaciones y repercusiones de la TER; construir una imagen adecuada de Albert Einstein.

Los desempeños de comprensión que presentaron mayor dificultad en las últimas tres etapas fueron: interpretación de fenómenos vinculados con el electromagnetismo que no podían ser explicados por las teorías vigentes; resolución de situaciones problemáticas con el objetivo de corroborar la dilatación del tiempo y la contracción de longitudes en SRI; utilización de transformada de Lorentz para calcular velocidades de objetos que se mueven relativamente; resolución de manera algebraica de problemas que involucran establecer la simultaneidad de sucesos en diferentes SRI; representación de sucesos utilizando cono de luz.

En cuanto a los desempeños de comprensión que pudieron comprender e interpretar de manera significativa son: la necesidad de plantear la existencia de un éter en la historia de la Física; la interpretación, con la ayuda de una simulación, y el debate sobre el experimento de Michelson- Morley; la resolución de actividades que involucraban interpretar y relacionar los postulados de la TER y sus implicancias en conceptos de la MC; la comprensión de las definiciones operacionales; la resolución gráfica, utilizando diagramas de Minkowski, para establecer la simultaneidad de eventos en diferentes SRI; el análisis de simulaciones donde se analizaba la variación de la velocidad de un tren y se representaba la variación de diagramas espacio-tiempo; las diferentes comprobaciones experimentales, aplicaciones y repercusiones de la TER y los aspectos más relevantes de la vida personal y científica, de Albert Einstein.

Respecto a la evaluación diagnóstica continua, permitió identificar las dificultades que los alumnos tenían en comprender y relacionar los diversos conceptos físicos desarrollados en la SEA.

Esta evaluación, de tareas individuales y grupales realizadas por los alumnos, desempeñó diversas funciones: diagnóstica, de seguimiento y de acreditación para obtener las notas parciales e integradoras que solicitaba la institución educativa.

IV. COMENTARIOS FINALES

Se retoman las preguntas que se plantearon al comienzo de este trabajo y las respuestas que hasta el momento se pueden brindar. Una de ellas se refiere al tiempo real que demanda la implementación de la SEA: si se pretende desarrollar las cinco etapas de la SEA se deberá destinar un ciclo lectivo completo ya que los intensos debates, la diversidad de actividades propuestas, las pocas horas semanales del espacio curricular Física, lo demanda.

Otra de las preguntas iniciales se refiere al material elaborado con formato de texto para docentes y alumnos. Se plantea si las actividades propuestas son acordes a los contenidos y si los textos seleccionados son comprensibles para los alumnos. Los resultados obtenidos muestran que las actividades

son acordes a los contenidos, sin embargo en algunos temas como posición de un objeto en diferentes SRI, tiempos y longitudes en sistemas propios e impropios, deben incorporarse más actividades que involucren situaciones problemáticas variadas para que los alumnos resuelvan de manera gráfica y algebraica. En otros contenidos deberían presentarse más ejemplos, como simultaneidad en la TER y cono de luz, y en algunos se debe disminuir la extensa y compleja explicación como en el caso de sistemas de coordenadas. En cuanto a los textos seleccionados son comprendidos por la mayoría de los alumnos.

Gran parte de las metas de comprensión establecidas a priori fueron comprendidas, aunque algunas presentan mayor dificultad. Las metas de comprensión establecidas, tanto para la MC como para la TER, que presentan mayor dificultad son las que involucran resoluciones con operaciones algebraicas como el uso de ecuaciones de transformación en la MC, la aplicación de las transformadas de Lorentz ó las relaciones para calcular tiempo y longitudes en sistemas propios e impropios. Las metas comprendidas son las que involucran actividades tales como analizar textos, interpretar simulaciones, realizar debates, relacionar conceptos, representaciones gráficas de sucesos.

Respecto a la pregunta si las actividades propuestas como desempeños de comprensión podrían ser adquiridas por los alumnos la respuesta es que aquellas que involucran manejo operacional algebraico son más difíciles de adquirir. En cambio las que tienen que ver con aspectos teóricos conceptuales de análisis, explicación y relación de conceptos pueden ser adquiridas por la mayoría de los alumnos.

Las dificultades presentes en las metas de comprensión se evidencian en los desempeños de comprensión correspondientes. Las situaciones problemáticas en las cuales los alumnos deben: calcular tiempo, longitud o velocidad en diferentes SRI, establecer la simultaneidad de sucesos calculando tiempos propios e impropios con diferentes velocidades en el móvil, construir cono de luz, pasado, presente y futuro de un suceso. Estas dificultades operacionales evidenciadas en cuestiones matemáticas responde la pregunta inicial sobre si los alumnos poseen el lenguaje algebraico necesario para resolver situaciones problemáticas. Otra de las preguntas planteadas en este trabajo es si los alumnos podrían interpretar sucesos utilizando cono de luz. Parecería que este desempeño no fue adquirido por los alumnos. Sin embargo, podría deberse al breve tiempo dedicado a este contenido debido a que ya finalizaba el ciclo escolar.

Respecto a los desempeños de comprensión, para la MC y la TER, la mayoría de los alumnos pudo resolver actividades en las que debían analizar, interpretar y debatir situaciones problemáticas; realizar gráficos para resolver situaciones problemáticas como la construcción y análisis de diagramas de Minkowsky para establecer la simultaneidad de eventos.

Por último, los diagramas de Minkowski parecen ser una herramienta útil para interpretar la simultaneidad. Los alumnos lograron construir diagramas y representar diversas situaciones; también pudieron determinar si dados ciertos sucesos eran simultáneos o no para un determinado sistema de referencia inercial.

REFERENCIAS

- Adler, P. A. y Adler, P. (1994). Observational techniques. En N.K. Denzin y Lincoln (Eds), *Handbook of Qualitative Research* (pp. 377-392). Thousand Oaks, CA: Sage.
- Arriasecq, I. (2008). La Enseñanza y el Aprendizaje de la Teoría Especial de la Relatividad en el nivel medio/polimodal. Tesis de doctorado. Universidad de Burgos, España.
- Arriasecq, I., y Greca, I. (2012). A Teaching-Learning Sequence for the Special Relativity Theory at High School Level Historically and Epistemologically Contextualized. *Science & Education*, 21(6), pp. 827-851.
- Ausubel, D., Novak, J. y Hanesian, H. (1991). *Psicología Educativa, un punto de vista cognoscitivo*. México: Ed. Trillas.
- Bachelard G. (1987). *La formación del espíritu científico*. México: Siglo XXI.
- Cohen, L. y Manion, L. (1985). *Research Methods in Education* (2ª edn). London: Croom Helm.
- Carr, W. y Kemmis, S. (1986) *Becoming Critical*. London: The Falmer Press.

- Denzin, N.K. (1970). *The research act: A theoretical introduction to sociological methods*. New York: McGraw-Hill.
- Elliott, J. (1993). *El cambio educativo desde la investigación-acción*. Madrid: Morata.
- Martinand, J. L. (1986). *Connaître et transformer la matière*. Berna: Peter Lang.
- Méheut, M. y Psillos, D. Orgs. (2000). Designing and validating teaching-learning sequences in a research perspective. An international symposium, París.
- Psillos, D. y Méheut, M. Co-Ords. (2001). Teaching-learning sequences as a means for linking research to development. In D. Psillos, P. Kariotoglou, V. Tselfes, G. Bisdikian, G. Fassouloupoulos, E. Hatzikraniotis and M. Kallery (Eds.) *Proceeding of Third International Conference on Science Education Research in the Knowledge Based Society* (Thessaloniki: Art of Text Publication), 226- 241.
- Perkins, D. (2005). ¿Qué es la comprensión? En M, Wiske. compiladora: *La Enseñanza para la Comprensión?* (pp. 69-78). Bs. As: Paidós.
- Perrone, V. (2005). ¿Por qué necesitamos una pedagogía de la comprensión? en Wiske, M.compiladora: *La Enseñanza para la Comprensión?* Bs. As: Paidós.
- Sanchez Alonso, M. y Selva Soler, V. (2006). *Animaciones y Simulaciones: Construyendo la Relatividad*. España.
- Schatzman, L. y Strauss, A. (1973). *Field research. Strategies for natural sociology*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Valles, S. (1999). *Técnicas cualitativas de investigación social. Reflexión metodológica y práctica profesional*. Madrid: Síntesis, S.A.
- Vergnaud, G. (1990). La théorie des champs conceptuels. *Recherches en Didactique des Mathématiques*. 10 (23), pp. 133-17.
- Vygotsky, L. (1987). *Pensamiento y lenguaje*. Buenos Aires: La Pléyade.
- Wiske, M. (1999). *La Enseñanza para la Comprensión*. San Francisco. Paidós Ibérica, S.A.
- Wiske, M.(2005). *La Enseñanza para la Comprensión*. Bs. As: Paidós.