

Relatividad Clásica: conceptos básicos

Ricardo Addad¹

¹Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Av. Pellegrini 250, CP S2000BTP, Rosario, Santa Fe, Argentina.

E-mail: addad@fceia.unr.edu.ar

REVISTA
DE
ENSEÑANZA
DE LA
FÍSICA

Resumen

La relatividad clásica es considerada con frecuencia un tema simple, basado en el sentido común. Sin embargo las dificultades de comprensión y falsas conclusiones también abundan en ella. Al analizar el referencial teórico correspondiente, y las dificultades de comprensión identificadas en estudios previos, se observa que se pueden extraer conclusiones (de gran variedad semántica e igual contenido físico) que deberán ser perfectamente catalogadas, ubicadas y utilizadas en el modelo que se aplique a la solución de un problema dado. En este trabajo se propone una estrategia didáctica basada en la resolución de problemas ejemplos contruados en base a diferentes declaraciones (físicamente equivalentes, variedad semántica) para los conceptos básicos íntimamente relacionados, sistema de referencia y el Principio de Relatividad Clásico.

Palabras clave: Relatividad clásica, Sistemas de referencia, Principio de relatividad, Dificultades de comprensión.

Abstract

The classic relativity is often considered a simple topic, based on the common sense. Nevertheless the difficulties of comprehension and false conclusions also abound in it. After analyzing the corresponding theoretical framework, and the difficulties of comprehension identified in previous studies, it appears that conclusions can be drawn (of big semantic variety and equal physical content) which must be perfectly catalogued, located and used in the model that applies itself for the solution of a given problem. In this work, a teaching strategy based on problem solving examples built based on different statements (physically equivalents, semantic variety) for the basic closely related concepts, frame of reference and the Classic Relativity Principle.

Keywords: Classic relativity, Frame of reference, Relativity Principle, Difficulties of comprehension.

I. INTRODUCCIÓN

Este trabajo forma parte de una investigación marco general cuyo objetivo es explorar sistemáticamente la comprensión de los estudiantes de algunos conceptos básicos sobre la relatividad clásica o Newtoniana, pretendiendo: a- estudiar en profundidad la estructura cognitiva de los estudiantes sobre este campo, y diagnosticar e interpretar sus vulnerabilidades conceptuales cuando ellos ensamblan sus ideas en un primer curso de Mecánica; b-proponer o probar nuevas estrategias pedagógicas específicas; y c-estudiar el cambio conceptual después de la instrucción.

Con el sustento de este marco, durante el transcurso de los años 2011 y 2013, se propusieron dos estrategias didácticas basadas en la solución de problemas ejemplo en un curso introductorio universitario de mecánica desde la perspectiva de sistemas de referencia (SR) diferentes, confrontando ideas primarias y resultados, considerando criterios de validez y extensión a los llamados sistemas de referencia no inerciales (SRnI). La implementación de esta metodología se encuentra actualmente en la fase ampliatoria, previéndose no sólo aumentar el número de problemas ejemplo, sino también realizando modificaciones a los propuestos de tal manera que permitan abordar un universo más amplio no sólo de conceptos físicos, sino también de dificultades de comprensión detectadas y reconocidas.

En este trabajo, con el fin ampliatorio descripto, nuestro interés se focalizó principalmente en el conocimiento de los estudiantes sobre dos ideas claves (conceptos básicos) inherentes a la relatividad: SR y Principio de Relatividad Clásico (PRC), explorando los distintos significados que ellos le asignan y sus múltiples relaciones. De un trabajo de investigación de carácter exploratorio, con conclusiones realizadas durante el transcurso del año 2012 y consistente en el análisis de una serie de evaluaciones diagnósticas

preliminares y principales, se obtuvieron un repertorio con base empírica de concepciones de los estudiantes en declaraciones interpretativas puntuales que mejor captan la comprensión conceptual de estos conceptos primarios, destacando sus vulnerabilidades en el tema. Los resultados obtenidos permitieron diagramar, modificar y seleccionar problemas ejemplo para su trabajo de resolución en el aula, como estrategia didáctica en un curso introductorio universitario de mecánica. El objetivo buscado era promover la discusión, ampliar el posible universo de significados que los estudiantes asignan a estos conceptos y poner en evidencia concepciones erróneas que permitan resolver algunas dificultades de comprensión detectadas y reconocidas.

II. REFERENCIALES TEÓRICOS

A. Mecánica Clásica. Movimiento y sistemas de referencia.

En general, en la mayoría de las universidades, colegios e institutos, los cursos introductorios de Física promueven ideas de múltiples representaciones de la realidad física en marcos o SR diferentes. Estas representaciones están relacionadas con principios de invariancia, los cuales son muy importantes al dar a menudo una idea primaria sobre el funcionamiento del mundo natural, al hacer visible que una relación particular no es un mero accidente de alguna posición preferencial de un observador, sino es un efecto de alguna simetría presente en la naturaleza.

Por lo tanto, el SR se concibe como uno de los conceptos básicos a enseñar en estos cursos que describen el comportamiento de sistemas físicos considerando la perspectiva de diferentes observadores.

En la enseñanza tradicional de la Mecánica, los estudiantes aprenden a solucionar problemas cuantitativos de un nivel bajo a medio de dificultad desde un SR inmóvil fijo a Tierra. Así, su utilización se reduce sólo a la elección y orientación, según conveniencia, del origen y ejes de un sistema de coordenadas. Comúnmente, el estudio comienza con cinemática, donde se establece la naturaleza relativa del movimiento y la adición de velocidades (transformación) en su forma Galileana. En este contexto el principio de relatividad es por lo general, y por primera vez, establecido en el curso. Este principio exige o demanda la equivalencia de todos los observadores en la aplicación de leyes físicas para describir fenómenos naturales. Una declaración muy general que no puede ser comprobada por estudiantes en el tiempo en que es introducida.

La idea primaria intuitiva de movimiento es el cambio de posición de un cuerpo. Esta afirmación no siempre coincide si son dos o más los observadores que aprecian el movimiento. Los conceptos de reposo y de movimiento son relativos al observador que los describe. Es necesario indicar una referencia, establecer respecto de quién o de qué cambia la posición del cuerpo. De este modo, el movimiento de un cuerpo debe especificarse respecto a otros cuerpos que constituyen el llamado marco o SR.

La descripción matemática del movimiento de los cuerpos implica conocer sus posiciones en cada instante de tiempo. Para esto es necesario adoptar un sistema de coordenadas (SCo), solidario al SR elegido, y disponer de un instrumento para medir longitudes y otro para medir los intervalos de tiempo. El origen del sistema de coordenadas se elige libremente y los ejes se orientan convenientemente. Cuando se determina la posición de un cuerpo respecto de un SCo, solidario a un SR, se tiene ubicado el mismo. De acuerdo a esto, *los SR están basados en los conceptos de espacio y tiempo de la Teoría marco* (Addad, 2012).

En los cursos introductorios de Mecánica, el estudio del movimiento de los cuerpos se realiza en el marco de la Mecánica Clásica o Newtoniana, donde se consideran aproximaciones de las características reales del espacio y del tiempo.¹

El espacio, y por lo tanto su métrica, presenta: independencia de los objetos en él inmersos (La métrica del espacio no se ve afectada por los mismos.); constancia al transcurrir el tiempo; homogeneidad e isotropía.

El tiempo presenta a su vez: homogeneidad, anisotropía y simultaneidad absoluta en cuanto a fenómenos simultáneas. Además, se considera una variable de naturaleza distinta de las variables espaciales, y la métrica euclídea no se aplica a él.

El estudio del movimiento utiliza las razones de cambio como lenguaje matemático y las leyes de Newton relacionan las variables relevantes utilizadas para su descripción.

De la primera Ley surge el concepto de partícula libre, entendiendo como tal aquella que no interactúa con otras (se encuentra aislada del resto del Universo), estando en reposo o en movimiento rectilíneo y uniforme (estado natural) y para “sacar” la partícula de tal estado se necesita que otra (u otras) interactúe

¹ Se considera al espacio como euclidiano tridimensional, es decir, todas las mediciones y relaciones espaciales se efectúan sobre la base de la geometría de Euclides; y al tiempo como universal, es decir, que transcurre de la misma manera para todos los observadores, independientemente de su estado de movimiento.

con ella. La segunda Ley de Newton busca la causa para explicar cualquier salida del equilibrio, y cuantitativamente establece una proporcionalidad lineal entre la causa para cambiar el estado de movimiento traslacional (interacción física, Fuerzas) y el efecto (cambio en la velocidad), e identifica la constante de proporcionalidad como la masa del objeto, le da carácter resistivo, es una medida de la oposición que presenta el objeto bajo estudio al cambio de movimiento traslacional (Addad, Llonch, D'Amico y Rosolio, 2011).

La validez de las Leyes de la Mecánica de Newton se restringe al llamado SR inercial (SRI), cuya definición primaria se puede formular como: aquel desde el cual se observa a la partícula libre con aceleración nula. Serán pues SRI equivalentes todos los que se encuentren en reposo o en movimiento rectilíneo y uniforme, desde todos ellos se cumplen las tres leyes de la Mecánica Clásica, a este hecho se le ha dado el nombre de PRC o de Galileo (Martínez, 2005; Ohanian, 2004).

¿Existe la posibilidad de encontrar una partícula libre, es decir, alejada de toda influencia del resto del Universo?, o en forma equivalente ¿Podemos encontrar un algún SRI en el Universo?

La Naturaleza se presenta en SR que no son inerciales, donde para el estudio de sus manifestaciones se debe ser cauteloso e incluir en el mismo el uso de aproximaciones, que pueden ser de gran complejidad no sólo de naturaleza conceptual, sino también de naturaleza matemática. Al hacer esto en forma habitual, se incorpora en los modelos construidos algunos efectos, que no pueden asociarse a interacciones newtonianas, y pueden ser fuente de falsas ideas y errores al tratar de aplicar al estudio particular las leyes de la mecánica clásica (Addad et al, 2011).

A menudo, en la resolución de problemas de mecánica resulta cómodo seleccionar un observador solidario a un SRnI. Esta selección exige introducir en su descripción unas fuerzas ficticias desde el punto de vista de un observador inercial, a las que se denominan fuerzas de inercia (ficticias o pseudofuerzas). Estas pseudofuerzas, que no tienen par de acción-reacción, se incluyen al tratar de buscar una causa a efectos que no se pueden asociar a una interacción newtoniana.²

Las observaciones efectuadas desde un SR pueden ser “traducidas” y comparadas a aquellas realizadas desde otro SR, pero en algunos casos, los factores de corrección que son necesarios introducir pueden ser de consideración. Esta traducción se realiza mediante las llamadas transformaciones.

Al considerar la cinemática relativa podemos clasificar a nuestras magnitudes relevantes (posición, velocidad y aceleración) como: *absolutas*, es decir referidas al SRI (considerado fijo); *relativas*, que serán aquellas que surgen de considerar al sistema móvil (SRI o SRnI) como fijo y *de arrastre*, es decir aquellas que se obtienen considerando el punto (origen del sistema móvil y el representativo del objeto estudiado considerado como partícula) rígidamente vinculado al sistema móvil (SRI o SRnI).

De esta forma, las transformaciones (traducciones) entre las observaciones realizadas en diferentes SRI (S y S') son las correspondientes a las observaciones de Galileo:

$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{v}_A = \vec{v}' + \vec{v}_0 = \vec{v}' + \vec{V} \quad (1)$$

$$\vec{a} = \vec{a}' \quad (2)$$

Donde las magnitudes sin primar (\vec{v}, \vec{a}) y primadas (\vec{v}', \vec{a}') se refieren a la velocidad y aceleración del objeto bajo estudio observadas en el mismo instante de tiempo desde dos SRI diferentes³.

La magnitud $\vec{v}_A \equiv \vec{v}_0$, es la llamada velocidad de arrastre⁴ y la denotaremos con la letra V.

Si se analiza la ecuación (2), claramente muestra que la dinámica es la misma, ¡Newton tiene validez!

Al considerar la transformación entre las observaciones realizadas en un SRI (S) y en un SRnI (S'), aumenta en forma notable la complejidad matemática:

$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{v}_A = \vec{v}' + (\vec{v}_0 + \vec{\omega} \wedge \vec{r}') \quad (3)$$

² De acuerdo al problema a estudiar y a la elección del sistema de referencia puede reducirse el problema dinámico a uno de estática más sencillo e incluso más intuitivo.

³ Relativas a cada sistema, pero seleccionando un sistema como fijo uno de estos pares se convierten en absolutas según nuestra declaración.

⁴ Es la velocidad que tendría el objeto bajo estudio respecto de uno de los SRI, considerado rígidamente unido al otro (coincide con velocidad del origen de un SRI respecto al otro, única diferencia posible puesto que los sistemas están en una traslación rectilínea uniforme relativa y existe restricción en la característica de las trayectoria);

$$\vec{a} = \vec{a}' + \vec{a}_A + \vec{a}_{Co} + \frac{d\vec{\omega}}{dt} \wedge \vec{r}' = \vec{a}' + (\vec{A} + \vec{\omega} \wedge (\vec{\omega} \wedge \vec{r}')) + 2\vec{\omega} \wedge \vec{v}' + \frac{d\vec{\omega}}{dt} \wedge \vec{r}' \quad (4)$$

Donde las magnitudes sin primar ($\vec{r}, \vec{v}, \vec{a}$) y primadas ($\vec{r}', \vec{v}', \vec{a}'$) se refieren a la posición, velocidad y aceleración del objeto bajo estudio observadas en el mismo instante de tiempo desde un observador en S y otro en S'. La magnitud $\vec{\omega}$ representa la velocidad angular de rotación del SRnI observada desde el SRI. En este caso la velocidad de arrastre $\vec{v}_A = \vec{V} + \vec{\omega} \wedge \vec{r}'$, consta de dos términos, el primero es la velocidad del origen del SRnI respecto del SRI sólo al considerar su traslación (arrastre traslacional, no hay restricción en la característica de la trayectoria traslacional) y el segundo término es la velocidad que el objeto bajo estudio tendría si rotara rígidamente unido al SRnI (arrastre rotacional).

El estudio dinámico entre estos sistemas es diferente, hay efectos (aceleraciones) que surgen sólo en virtud de que la observación se lleva a cabo desde un SRnI (acelerado traslacionalmente, rotacionalmente o en movimientos más complejos), y estos efectos no son producidos por interacciones newtonianas, y por tanto no obedecen la tercera Ley de Newton al no tener pares de acción-reacción. Como ejemplo, en la ecuación (4) se reconoce $\vec{a}_{Co} = 2\vec{\omega} \wedge \vec{v}'$, la *aceleración de Coriolis o complementaria*⁵.

El observador físico en un SRnI determina para el objeto bajo estudio una aceleración \vec{a}' con lo que interpretará que sobre la partícula actúa una resultante $\sum \vec{F}'$. Evidentemente estas causas para explicar la salida del equilibrio mecánico son distintas, ésta última contiene los términos:

$$\sum \vec{F}' = m\vec{a}' = m\vec{a} - m\vec{A} - m\vec{\omega} \wedge (\vec{\omega} \wedge \vec{r}') - m\vec{a}_{Co} - m\left(\frac{d\vec{\omega}}{dt} \wedge \vec{r}'\right) \quad (5)$$

Se observa que a los efectos no causados por interacciones pueden asociarse fuerzas ficticias o de inercia, y la regla general que beneficia la comprensión es el agregado de ellas una por una, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\vec{F}_{inercia} = -m\vec{a}_{inercia} \quad (6)$$

Por cada aceleración de inercia o ficticia, debe agregarse en el diagrama de cuerpo libre una fuerza asociada que tiene la misma proporcionalidad a su efecto, como el caso de interacciones newtonianas, de igual dirección pero de sentido contrario (Addad et al, 2011).

Una vez construido el diagrama de cuerpo libre sólo falta plantear la ecuación dinámica que resuelva el problema:

$$\sum \vec{F} + \sum \vec{F}_{inercia} = m\vec{a}' \quad (7)$$

B. Dificultades de comprensión.

Diferentes autores han identificado, a través de sus trabajos de investigación, algunas dificultades de comprensión que surgen en los estudiantes respecto a los temas de interés de este trabajo (Addad et al, 2011; Addad, 2012; Addad, Llonch, Rosolio y Sanchez, 2013), entre ellas: *a*- Reconocen al movimiento y la velocidad como propiedades físicas inherentes al objeto móvil, independiente de observadores (Saltiel y Malgrange, 1980; Aguirre, 1988). Como consecuencia de esto, los estudiantes no definen la velocidad de un cuerpo con respecto a un SR (Scherr, Shaffer y Vokos, 2002), *b*- Consideran el SR como un escenario sin ningún propósito explicativo (Panse, Ramadas y Kumar, 1994), *c*- Definen que el carácter de inercia de un SR es una propiedad "relativa", más bien que una intrínseca (Ramadas, Barve y Kumar, 1996) y el término es usado como "una palabra mágica" porque no tiene ninguna función interpretativa específica para ellos (Pietrocola y Zylbersztajn, 1999), etc.

C. SRI y PRC. Variedad semántica.

Al analizar el referencial teórico correspondiente, y las dificultades de comprensión identificadas en estudios previos, se observa que se pueden extraer conclusiones (de gran variedad semántica e igual

⁵ Se puede observar que no es posible justificarla intuitivamente de primera intención, surge de la influencia del movimiento de arrastre sobre la velocidad relativa y del movimiento relativo sobre la velocidad de arrastre.

contenido físico) que deberán ser perfectamente catalogadas, ubicadas y utilizadas en el modelo que se aplique a la solución del problema planteado. Como ejemplo, en todos los SRI las leyes de la mecánica Newtoniana son válidas y mantienen la misma estructura del lenguaje matemático formal para su descripción. Esto implica que dos observadores solidarios a SRI diferentes (movimiento relativo uniforme, único posible por definición) no podrían determinar cuál de ellos se encuentra en reposo y cuál en movimiento. Sólo su velocidad relativa tiene un significado objetivo. En el marco de la mecánica newtoniana no existe forma alguna de privilegiar un SRI sobre otro o identificar un SRI en reposo absoluto. Surge una primera variedad semántica: *Existe una imposibilidad de determinar el reposo absoluto.*

Una variación semántica a esta declaración puede construirse al considerar que: *por observaciones efectuadas en un SR, su velocidad absoluta (intrínseca) no puede ser obtenida.* Esta última debería ser comparada con el hecho que la aceleración 'intrínseca' del SR (aceleración absoluta) \vec{A} o su velocidad angular $\vec{\omega}$, sí puede ser determinada por medidas efectuadas respecto al SR en sí mismo. Esta imposibilidad de determinar la velocidad absoluta de un SR, con medidas efectuadas respecto al SR en sí mismo, es *propriadamente el PRC*, ya que si los observadores solidarios a los SR pudieran determinar sus velocidades absolutas, ellos podrían determinar quién de ellos se encuentra "realmente en reposo" o "realmente moviéndose", determinación que violaría la equivalencia de SRI – la primera declaración que hicieramos del PRC.

Al considerar las transformaciones y los SRnI, el PRC también puede ser expresado un poco más técnicamente de una forma que está al alcance de estudiantes que inician su formación básica. El PRC proviene de observar que los términos de la derecha en la ecuación (7) poseen \vec{A} y $\vec{\omega}$ del SR, pero *no su velocidad intrínseca*. Esta simplemente está ausente en la Segunda Ley del Movimiento para todo SR, inercial o no inercial.

III. ESTRATEGIA DIDÁCTICA

Nuestra estrategia didáctica consistió de dos etapas, la primera de instrucción a los alumnos donde se formularon diferentes declaraciones (equivalentes) para los conceptos básicos íntimamente relacionados, SR y PRC, con el objetivo de ampliar el universo de significados que los estudiantes le podrían asignar a estos conceptos y de esta manera enriquecer no sólo la comprensión de ellos, sino también las conclusiones de su estudio. Debe destacarse que la instrucción fue desarrollada de forma estándar y tácitamente cubrió las variaciones semánticas antes indicadas.

Para reforzar la comprensión funcional (conceptual y procedimental) se diagramaron, modificaron y seleccionaron problemas⁶ para su trabajo en el aula (segunda etapa), con el objetivo de promover la discusión y poner en evidencia concepciones erróneas. Estos serán resueltos desde varios SR previamente elegidos. La primera elección del SR será realizada por consenso de los alumnos, de acuerdo al que ellos consideren que permitirá la descripción física más sencilla. Una vez realizada la resolución, se discuten las ventajas y desventajas del SR elegido, se exponen los razonamientos o explicaciones ofrecidas y por consenso se resumen estos (a través de una sintaxis apropiada con el agregado de matices) en respuestas interpretativas cercanas a las variaciones semánticas estudiadas de los conceptos básicos de interés. El docente sugiere la resolución desde los demás sistemas, con el fin de confrontar resultados y comparar los distintos procedimientos, razonamientos y respuestas interpretativas. Su comparación demuestra de un modo convincente la ventaja de un SR correctamente elegido y la relación íntima con el PRC. Este acercamiento tiene otro aspecto metodológico importante: permite una mejor comprensión del fenómeno considerado cuando es estudiado por observadores diferentes, aproximándose a la realidad no inercial de la naturaleza.

A modo de ejemplo se muestran algunos problemas modificados para su trabajo en el aula.

La investigación previa (Addad, 2012), confirmó en parte que los estudiantes comprenden y/o justifican el PRC utilizando el razonamiento llamado de *reciprocidad cinemática* (Bandyopadhyay (2009); Bandyopadhyay y Kumar (2010)). Claramente, una gran mayoría de estudiantes son conscientes de la equivalencia de SR ("observadores solidarios a SR") pero la mayor parte de ellos establecen esta equivalencia a través de la reciprocidad cinemática y no avanza con la identidad de las leyes como un argumento para la equivalencia de los SR.

⁶ En base al trabajo de investigación de carácter exploratorio (Addad, 2012) consistente en una serie de evaluaciones diagnósticas preliminares y principales se obtuvo un repertorio con base empírica de concepciones de los estudiantes en declaraciones interpretativas puntuales que mejor captan la comprensión conceptual de estos, destacando sus vulnerabilidades en el tema. El tratamiento y resultados obtenidos permitió diagramar, modificar y seleccionar problemas para su trabajo en el aula.

De acuerdo a esta llamada reciprocidad, se diagramaron problemas que contienen variaciones semánticas del PRC para que comenten si era verdadera o falsa, dando sus razones justificadas. Como ejemplo (1): *Considere los dos observadores mostrados en la Figura 1, el primero de ellos (A) en reposo respecto a la Tierra, y el segundo (B) corriendo con velocidad constante. Como (B) se mueve con relación a (A) con velocidad \vec{v} , (A) se mueve con relación a (B) con velocidad $-\vec{v}$. No hay manera de privilegiar cualquiera de estos observadores, por lo tanto (A) y (B) son observadores equivalentes.*

Cambiamos la situación a la aceleración relativa entre SR. El análisis de los resultados previos muestra que pocos estudiantes articulan la idea básica que buscábamos, a saber que mientras la reciprocidad cinemática es verdadera hasta en esta segunda cuestión, los SR no son equivalentes, ya que la esencia del PRC es la identidad de leyes en los dos SR. Esta comprensión profundamente defectuosa de la consideración del carácter inercial o no inercial como una propiedad relativa entre dos sistemas también fue hallada en estudios anteriores (Ramadas *et.al* 1996; Bandyopadhyay y Kumar, 2010).

Como ejemplo (2): *Considere los dos observadores mostrados en la Figura 2, el primero de ellos (A) en reposo respecto a la Tierra, y el segundo (B) esquiando con aceleración constante. El observador (B) es un SRnI y se mueve con relación a (A) con una aceleración constante \vec{a} . Claramente (A) se mueve con relación a (B) con aceleración constante $-\vec{a}$. De esta manera el observador A es un SRnI. Fueron también expuestas variaciones como el ejemplo (3) que se muestra en la Figura 3: *Considere los dos esquiadores (A) y (B) que mantienen su velocidad relativa constante al bajar por una pista inclinada. Si el esquiador (B) se encuentra en reposo relativo a (A), (A) se encuentra en reposo relativo a (B). Por lo tanto, ambos observadores, (A) y (B) se constituyen en SRI.**

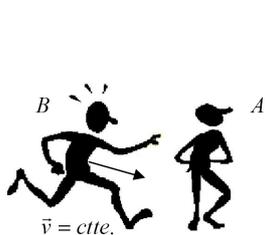


FIGURA 1. Ejemplo (1).

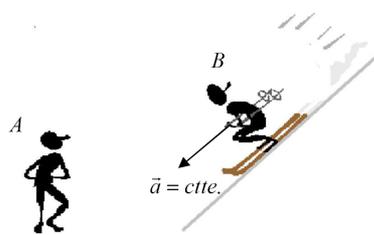


FIGURA 2. Ejemplo (2).

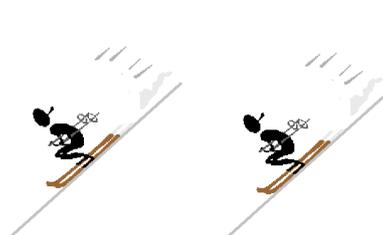


FIGURA 3. Ejemplo (3).

IV. CONCLUSIONES

La resolución de nuevas situaciones problemáticas requiere significados. Aprender es adquirir la información útil como un instrumento conceptual para facilitar la resolución de tales problemas. En este estudio, sobre todo, el concepto de SR era fundamental no sólo para la comprensión del PRC, sino también para mostrar cómo la resolución de problemas tiene su base en una representación conceptual o casi conceptual de la realidad y como tal, habilita el análisis de intuición en términos de Física.

En general, los resultados obtenidos muestran que en la enseñanza de la Física, nos equivocamos en despreciar la relatividad Newtoniana como obvia. Las nociones intuitivas de los alumnos tienen que ser con cuidado modificadas al repertorio correcto de nociones preceptivas de la relatividad Newtoniana. Todo lo que podemos decir es que esta transición no es tan difícil como la requerida para la relatividad de Einstein.

REFERENCIAS

Addad, R., Llonch, E., D'Amico, H. y Rosolio, A. (2011). Relatividad Clásica: dificultades en el estudio del movimiento. *Memorias XVII Reunión Nacional de Educación en la Física*, Villa Giardino, Córdoba, Argentina.

Addad, R. (2012). Relatividad Clásica: dificultades de comprensión en el estudio del movimiento. *Memorias XI Simposio de Investigación en Educación en Física*, Esquel, Chubut, Argentina.

Addad, R., Llonch, E., Rosolio, A. y Sanchez, P. (2013). Relatividad Clásica: dificultades en el estudio del movimiento II. *Memorias XVIII Reunión Nacional de Educación en la Física*, San Fernando del Valle de Catamarca, Catamarca, Argentina.

- Aguirre, J. M. (1988). Student preconceptions about vector kinematics. *The Physics Teacher*, 26(4), pp. 212-216.
- Bandyopadhyay, A. (2009). Students' ideas of the meaning of the relativity principle. *European Journal of Physics*, 30(6), pp. 1239-1256.
- Bandyopadhyay, A., y Kumar, A. (2010). Probing students' ideas of the principle of equivalence. *European Journal of Physics*, 32(1), pp. 139-159.
- Martínez, A. (2005). Conventions and inertial reference frames, *American Journal of Physics*, 73(5), pp. 452-454.
- Ohanian, H. C. (2004). The role of dynamics in the synchronization problem, *American Journal of Physics*, 72, pp. 141–148.
- Panse, S., Ramadas, J. y Kumar, A. (1994). Alternative conceptions in Galilean relativity: frames of reference. *International Journal of Science Education*, 16(1), pp. 63–82.
- Pietrocola, M., y Zylbersztajn, A. (1999). The use of the Principle of Relativity in the interpretation of phenomena by undergraduate physics students. *International Journal of Science Education*, 21(3), pp. 261-276.
- Ramadas, J., Barve, S. y Kumar, A. (1996). Alternative conceptions in Galilean relativity: inertial and non-inertial observers. *International Journal of Science Education*, 18(5), pp. 615–629.
- Saltiel, E. y Malgrange, J. L. (1980). “Spontaneous” ways of reasoning in elementary kinematics. *American Journal of Physics*, 1, pp. 73-80.
- Scherr, R., Shaffer, P. y Vokos, S. (2002). The challenge of changing deeply held student beliefs about the relativity of simultaneity. *American Journal of Physics*, 70(12), pp. 1238-1248.