

# El carácter relativo del movimiento

## The relative nature of the movement

**Ricardo Addad<sup>1</sup> y Alejandra Rosolio<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Av. Pellegrini 250. CP 2000, Rosario. Argentina.*

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

REVISTA  
DE  
ENSEÑANZA  
DE LA  
FÍSICA

### Resumen

El carácter dinámico de las teorías científicas muestra la evolución de los conceptos físicos contenidos en su marco y utilizados en el análisis de las diferentes situaciones físicas que abordan. El concepto de Sistema de Referencia resulta fundamental para la comprensión del Principio de Relatividad, y se constituye en una herramienta relevante en la resolución de problemas, ya que involucra una representación conceptual de la realidad. Las llamadas transformaciones galileanas están basadas en las nociones intuitivas clásicas de espacio y tiempo. En este trabajo se presenta una reflexión sobre los conceptos involucrados en la relatividad clásica con los objetivos, no solo de sentar una base sólida sobre la realidad relativa de aquellos conceptos físicos involucrados como paso previo al estudio de la Relatividad Especial y General, sino también de convertirse en un material de uso áulico, dinámico y no cerrado, de consulta, intercambio y discusión. Se incluye además criterios de invariancias, simetrías y limitaciones de la teoría.

**Palabras clave:** Sistema de referencia; Relatividad clásica; Simetría.

### Abstract

The dynamic nature of scientific theories shows the evolution of the physical concepts contained in its framework and used in the analysis of the different physical situations they address. The concept of the Reference System is fundamental for the understanding of the Principle of Relativity, and it is a relevant tool in solving problems, since it involves a conceptual representation of reality. The so-called Galilean transformations are based on the classic intuitive notions of space and time. This paper presents a reflection on the concepts involved in classical relativity with the objectives, not only of laying a solid foundation on the relative reality of those physical concepts involved as a previous step to the study of Special and General Relativity, but also of become a material of dynamic and non-closed use of consultation, exchange and discussion. It also includes criteria of invariances, symmetries and limitations of the theory.

**Keywords:** Reference System; Classical relativity; Symmetry.

## I. INTRODUCCIÓN

El análisis de la evolución de las ideas y conceptos científicos pone de manifiesto el enorme esfuerzo realizado para llegar a algunas de las nociones fundamentales laboriosamente desarrolladas a través del devenir de la historia, esfuerzo que ha significado la superación de grandes obstáculos para que tales nociones sean accesibles e incluso parezcan naturales. Este es el caso de la evolución de conceptos como espacio, tiempo, inercia, simetría, relatividad, entre otros. Pero al mismo tiempo, para su comprensión se requiere un gran proceso de abstracción, por la sencilla razón de que no pueden inferirse inmediatamente de la experiencia, sino a través de una especulación que sea coherente con lo observado siendo productos de un largo esfuerzo del pensamiento.

En particular, es importante reflexionar acerca de la idea arraigada en el ámbito educativo de que todo conocimiento científico es una verdad a la que se llegó simplemente por la acumulación de experiencias exitosas; en este sentido el planteo de preguntas cuestionadoras a una serie de especulaciones propuestas a lo largo de la historia se convierte en una condición imprescindible.

Este trabajo consta de un material de reflexión con potencialidad de uso áulico, dinámico y no cerrado, de consulta, intercambio y discusión; y forma parte del proyecto de investigación marco “El carácter relativo del movimiento en las representaciones de estudiantes de ingeniería”, radicado en la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario, con la finalidad de explorar la comprensión de los estudiantes de algunos conceptos básicos sobre la relatividad clásica, cuando ellos ensamblan sus ideas en un primer curso de Mecánica para carreras de Ingeniería. Es

concebido en acuerdo con uno de los objetivos de este proyecto marco que pretende sentar una base sólida en relación a la realidad relativa de aquellos conceptos físicos involucrados como paso previo al estudio de la Relatividad Especial (RE) y General (RG). Esta base, no solo involucra el carácter relativo de las magnitudes físicas relevantes, sino también criterios de invariancias, simetrías y limitaciones de la teoría, que conllevan el uso de aproximaciones, de gran complejidad en su naturaleza conceptual y matemática.

## II. ANTECEDENTES

La comunicación utilizada para describir el universo ha cambiado en muchas ocasiones, casi siempre permitiendo una mejor comprensión de la realidad. En el ámbito de las ciencias, concretamente en la teoría de la relatividad (TR), el lenguaje matemático ha permitido simbolizar y simplificar la teoría y los respectivos experimentos que en ella se requiere, y es menester brindar explicaciones adecuadas en diferentes escenarios, entre ellos la escuela: *¿cómo enseñar las diferentes temáticas particularmente aquellas relacionadas con el carácter relativo del movimiento?* El conocimiento científico se construye por procesos de creación y comprobación de teorías que evolucionan históricamente, considerando que solo son aproximaciones tentativas y parciales sobre determinados aspectos de la realidad.

En general, en la mayoría de las universidades, escuelas e institutos, los cursos introductorios de Física promueven ideas de múltiples representaciones de la realidad física en marcos o sistemas de referencia (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. Dada la arbitrariedad de su elección, es necesaria una destreza adicional ya que un sistema apropiado ayuda a la comprensión del fenómeno físico y facilita la solución del problema.

En la enseñanza tradicional de la Mecánica, los estudiantes aprenden a resolver problemas cuantitativos de un nivel bajo a medio de dificultad desde un SR inmóvil fijo a Tierra. Así, su utilización se reduce solo a la elección y orientación, según conveniencia, del origen y ejes de un sistema de coordenadas. El éxito en la solución de problemas cuantitativos estándares no es un criterio adecuado para evaluar la comprensión de conceptos básicos de mecánica (Bowden, 1992).

Comúnmente, el estudio de la Mecánica 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 (PR) 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.

Diferentes investigaciones han identificado algunas dificultades de comprensión que surgen en los estudiantes respecto a los temas de interés de este trabajo. Saltiel y Malgrange (1980) y Aguirre (1988), hacen referencia a dificultades de comprensión en el carácter relativo de la velocidad, considerándola como propiedad física inherente al objeto móvil, independiente de observadores; como consecuencia de esto, los estudiantes no definen la velocidad de un cuerpo con respecto a un SR (Scherr y otros, 2002; Addad, 2012). Por otra parte, Panse y otros (1994) observan dificultades atribuibles a la consideración del SR como un escenario sin ningún propósito explicativo. Además, han sido detectadas problemáticas conceptuales tales como definir la inercia como una propiedad relativa a un SR (Ramadas y otros, 1996a) y que no tiene ninguna función interpretativa específica para ellos (Pietrocola y Zylbersztajn, 1999). La creencia de la existencia de observadores privilegiados, con acceso inmediato a la obtención de valores apropiados de los parámetros espaciales y temporales que caracterizan el movimiento (Villani y Pacca, 1987) viola el PR al no considerar la equivalencia de observadores. Otras como: (i) los SR tienen límites definidos por la extensión espacial de los objetos asociados; (ii) los fenómenos pertenecen a marcos o SR; (iii) el carácter inercial o no inercial de un SR es una propiedad relativa de dos SR; (iv) sorprendentemente, nociones obvias de invariancia en longitud y tiempo presentaron problemas de comprensión. En general, la transformación Galileana de velocidades no presenta dificultades de comprensión. Aun así, en muchas situaciones los alumnos abandonan la invariancia temporal para salvar la invariancia en la longitud, aun cuando los acontecimientos afectados no son simultáneos (Panse y otros, 1994; Ramadas y otros, 1996a; 1996b; Addad, 2012).

Además de analizar las dificultades de comprensión detectadas en los estudiantes, se han propuesto estrategias utilizadas en situaciones de enseñanza–aprendizaje (Addad y otros, 2011; 2013; Addad, 2015).

Por lo tanto, se considera importante proponer material reflexivo de uso áulico con el fin de una mejora en la conceptualización de aspectos relacionados con la TR.

### III. ESPACIO, TIEMPO Y MOVIMIENTO

Los conceptos que detallamos en la introducción como ejemplos: tiempo-espacio-inercia-simetría-relatividad, se encuentran en el interior del marco del fenómeno del movimiento, el cual fue objeto de estudio desde la antigüedad, y tenían que ser explicados por cualquier teoría física que aspirara a ser aceptada.

La idea primaria intuitiva de movimiento es el cambio de posición de un cuerpo, afirmación no siempre coincidente si son dos o más los observadores quienes estudian el movimiento, ya que 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, especificando su movimiento respecto a otros, que constituirán el SR.

El estudio del movimiento se realiza en el marco de la Mecánica Clásica o Newtoniana, donde se consideran aproximaciones de las características reales del espacio y del tiempo (de acuerdo a las llamadas transformaciones de simetría, con las consiguientes invariancias). El espacio, y por lo tanto su métrica (euclídea), 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 sucesos simultáneos; además se considera como parámetro en tanto es independiente del estado de movimiento del observador y la métrica euclídea no se aplica a él.

En el momento en que la relatividad del movimiento apenas comenzaba a comprenderse, Newton introdujo una teoría del movimiento absoluto en el espacio y el tiempo absolutos. *¿A qué refiere Newton como absoluto?*

Al considerar el principio de inercia, ya plenamente establecido en esa época, se enfrenta al problema de hallar el SR en el cual este principio y todas las otras leyes de la mecánica sean válidas; el principio de inercia se refiere al estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme de un cuerpo en ausencia de interacciones que actúan sobre él. La pregunta que surge de inmediato es: *¿reposo o movimiento rectilíneo uniforme respecto a qué?* La Tierra gira sobre su propio eje y alrededor del Sol, así que no puede ser respecto a ella como tampoco respecto al Sol. Además, al generalizar sus leyes a todos los cuerpos del universo, estos se mueven bajo sus interacciones. Probablemente, estas razones llevaron a Newton a la convicción de que un SR empírico fijado por cuerpos materiales nunca podría ser el fundamento de una ley que involucrara la idea de inercia. De este modo, introdujo la idea de un espacio y un tiempo absolutos. Su definición de espacio absoluto está muy relacionada con la *geometrización* del espacio real, que ya había comenzado con Galileo y había sido continuada por Descartes.

Newton plantea sus leyes del movimiento al interior de tales conceptos. Y estas leyes se referirán a los conceptos absolutos de tiempo y espacio, puesto que las causas por las cuales los movimientos verdaderos y los relativos deben distinguirse unos de otros son las fuerzas que se deben imprimir a los cuerpos para generar movimiento. El movimiento verdadero ni se genera ni se altera excepto cuando al cuerpo en movimiento se le imprime una fuerza; pero el movimiento relativo puede ser generado sin que se imprima ninguna fuerza sobre el cuerpo. La definición de SR inercial (SRI) viene dada con estas palabras en el concepto de espacio absoluto. Por lo tanto, se considera que la razón por la cual Newton asume el espacio y el tiempo absolutos, es porque sin ellos la ley de inercia carecía de sentido.

Por lo expuesto, un lugar fijo en el espacio absoluto de Newton no tiene realidad física. Para llegar a una formulación definida se introduce el concepto de SRI, un SR donde vale la ley de inercia. Para esto se recurre al PR utilizado por Galileo, el cual señala en esencia que las leyes de la mecánica tienen exactamente la misma expresión, ya sea desde un sistema de referencia con movimiento rectilíneo y uniforme o desde uno en reposo en el espacio. Este principio está relacionado directamente con la noción de espacio absoluto planteada por Newton. Si se consideran dos sistemas que se mueven uno con respecto al otro a velocidad constante, *¿qué sentido tiene preguntar cuál es el que está en reposo y cuál es el que se mueve?* Si en alguno de ellos el movimiento verdadero ni se genera ni se altera excepto cuando al cuerpo en movimiento se le imprime una fuerza, en el otro ocurrirá lo mismo. Esto es, los dos sistemas son SRI y podemos observar que no es necesaria la existencia de un sistema en reposo absoluto al cual referir todos los movimientos, sino que existe una infinidad de SRI, todos ellos efectuando un movimiento de traslación rectilínea, uno con respecto al otro, y en los cuales valen las leyes de la mecánica. De esta manera, al caracterizar a los SRI, ya no es necesario el concepto de espacio absoluto.

Es en este contexto donde Newton enuncia sus leyes del movimiento: las tres leyes de la dinámica y su ley de la gravitación universal, y es en ellas donde sintetiza una concepción general del Universo, con lo que culmina una revolución en el pensamiento que se había iniciado casi ciento cincuenta años atrás. En ellas, el estudio del movimiento utiliza las razones de cambio temporales como lenguaje matemático y relacionan las interacciones y las variables relevantes utilizadas para su descripción. De esta forma, los conceptos y relaciones que conforman la teoría de la mecánica relativa contribuyen a desarrollar criterios de selección de SR para simplificar matemáticamente la descripción de movimientos y su consiguiente explicación.

La primera ley de Newton se centra en el concepto de partícula libre, en estado de reposo o en movimiento rectilíneo y uniforme, de modo que para “sacarla” de tal estado se necesita que otra (u otras) interactúe con ella. La segunda ley 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 (inercia traslacional) que presenta el objeto bajo estudio al cambio de movimiento traslacional. La tercera ley facilita la adecuada identificación de las interacciones físicas actuantes sobre un cuerpo determinado, puesto que enfatiza la individualización del agente del medio ambiente que ejerce cada una de ellas (Rosolio y otros, 2015).

Según lo expuesto, uno de los límites en la validez de las Leyes de la Mecánica de Newton es que se restringe a los llamados SRI, cuya definición primaria se puede formular como *aquellos desde los cuales se observa a la partícula libre con aceleración nula*. Detectado uno, serán pues SRI equivalentes todos los que se encuentren en reposo o en movimiento rectilíneo y uniforme respecto de él. Desde todos ellos se cumplen las tres leyes de la Mecánica Clásica, este hecho constituye el llamado PR Clásico (PRC) o de Galileo (Martínez, 2005; Addad, 2012; 2015). En todos ellos estas leyes son válidas y mantienen la misma estructura del lenguaje matemático formal para su descripción. Esto implica que dos observadores solidarios a SRI diferentes no podrían determinar cuál de ellos se encuentra en reposo y cuál en movimiento; solo su velocidad relativa tiene un significado objetivo, no existiendo forma alguna de privilegiar un SRI sobre otro. Cabe aclarar que la aceleración intrínseca del SR o su velocidad angular sí puede ser determinada por medidas efectuadas respecto al SR en sí mismo (Addad, 2012).

De acuerdo a lo expresado, *¿existe la posibilidad de encontrar una partícula libre, es decir, alejada de toda influencia del resto del Universo?*, o en forma equivalente *¿podemos encontrar algún SRI en el Universo?* Esta pregunta expone una dificultad a la mecánica clásica, y también toca la esencia de la teoría de la RG, y puede ser disparador a la extensión de los conceptos físicos involucrados.

*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 solo de naturaleza conceptual, sino también de naturaleza matemática. En el marco clásico, 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.* (Addad, 2015)

#### IV. SIMETRÍA, INVARIANCIA Y FORMA DE LAS LEYES FÍSICAS

El PR es mucho más antiguo que la Teoría de la Relatividad (TR), incluso más antiguo que la mecánica clásica de Newton. Fue formulado por Galileo Galilei alrededor de 1600, como un argumento en la discusión del heliocentrismo versus el geocentrismo. Como respuesta a este último argumento Galilei introdujo una nueva idea: la inercia, concluyendo que un observador no es capaz de determinar si él está en un SR que está en reposo o en movimiento uniforme y rectilíneo, pudiendo lanzar o dejar caer masas, dejar rodar bolas sobre planos inclinados, medir el periodo de péndulos, o realizar todos los experimentos mecánicos imaginables a su disposición y los resultados serán los mismos en movimiento (uniforme) que en reposo. Este principio en la formulación primaria de Galilei, se expresa: *es imposible determinar en base a experimentos (mecánicos) si un SR está en reposo o en movimiento uniforme y rectilíneo*.

El PRC es solamente válido dentro de la misma clase de SRI (ya que salir de esta clase implica aceleraciones, que son medibles a través de experimentos). Sin embargo, dentro de esta clase, no hay observadores privilegiados: todos los experimentos dan el mismo resultado para cualquier observador solidario a un SRI y por lo tanto todos los observadores inerciales ven la misma física. Este hecho produce una formulación de equivalencia del PRC: *todos los sistemas inerciales son equivalentes, es decir, todos los observadores inerciales ven la misma física*, imponiéndose de este modo ciertas condiciones sobre la forma de las leyes de la física. Para ello existen las llamadas transformaciones que no solo imponen restricciones en la forma que pueden tener las leyes físicas sino también ofician de

traductor sobre los valores obtenidos por observadores solidarios a SR diferentes. Dentro de la clase de SRI, estas transformaciones tienen una forma específica y una estructura matemática de un grupo de simetría (grupo de operaciones o transformaciones geométricas que deja invariante cierta entidad geométrica o entidad física). En otras palabras: las leyes de la física deben ser invariantes y las cantidades físicas que aparecen en estas leyes tienen que ser tales que transformen bien bajo las transformaciones de ese grupo, de acuerdo a esto se formula el PR de forma covariante: *las leyes de la física transforman bien bajo las transformaciones del grupo de simetría que relacionan a los distintos observadores*. Surgen entonces las preguntas: *¿qué se entiende por simetría en física? ¿qué significa invariancia y covariancia?*

Es de nuestro conocimiento que la Física se basa esencialmente en dos pilares: los hechos experimentales, por un lado, y su traducción en un formalismo matemático coherente por el otro. En ambos enfoques, se utiliza una visión física, la simetría, la cual representa una metodología seguida por la Física Moderna para construir modelos coherentes y exitosos cuyo objetivo es comprender las leyes físicas fundamentales en todas las escalas, desde el universo microscópico al macroscópico.

Su connotación antigua es muy variada, incluyendo términos como belleza, armonía, correspondencia entre partes, equilibrio, igualdad, proporción y regularidad. Estos términos están claramente relacionados entre sí; el concepto de simetría utilizado en la física moderna surgió de esta familia de ideas.

Estamos familiarizados con las simetrías aproximadas de los objetos físicos que encontramos a nuestro alrededor, podemos definir una simetría de una figura geométrica dada como la invariancia de esa figura cuando se intercambian partes iguales en una operación específica (como la rotación). El desarrollo del concepto algebraico de un grupo, permitió una generalización y refinamiento de esta idea; surgió una noción matemática precisa de simetría que era aplicable no solo a los objetos físicos, sino también a las ecuaciones matemáticas y, por lo tanto, a lo que nos interesa especialmente, las leyes de la física expresadas como ecuaciones matemáticas. *La noción teórica de grupo de simetría es la noción de invariancia bajo un grupo específico de transformaciones*. Invariancia es un término matemático: algo es invariante cuando una transformación dada no lo altera. Esta noción matemática se utiliza para expresar la noción de simetría física en la que estamos interesados, es decir, la invariancia en un grupo de transformaciones. Este es el concepto de simetría que ha demostrado ser tan exitoso en la ciencia moderna.

Lo que debemos distinguir es entre simetrías de objetos y simetrías de leyes. Una cosa es preguntar acerca de las simetrías geométricas de ciertos objetos; otra es preguntar acerca de las simetrías de las leyes que rigen la evolución temporal de esos objetos. Podemos aplicar las leyes de la mecánica a la evolución de ciertos objetos, considerados como un sistema aislado, y veremos que estas leyes son invariantes rotacionalmente (no existe una orientación preferida en el espacio) aunque el objeto en sí no lo sea. La aplicación de los principios de simetría a las leyes fue de importancia central para la física en el siglo XX, como se observa en el contexto de las teorías de la RE y RG. Requerir que las leyes, cualquiera que sea su forma precisa, satisfaga ciertas propiedades de simetría, se convirtió en una herramienta metodológica central de los físicos teóricos en el proceso de llegar a la forma detallada de varias leyes.

Las simetrías de la ley (ecuación) se encuentran en el conjunto de sus soluciones, por lo tanto, se puede usar las simetrías de la ley como una guía para encontrar soluciones, es decir, para determinar qué fenómenos son físicamente posibles cuando no se conocen todas las soluciones.

En este punto, será útil decir algunas palabras sobre invariancia y covarianza. A menudo, el término invariante se reserva para objetos, y covariante se usa para ecuaciones o leyes. A modo de ejemplo, podemos decir que una ecuación es covariante en una transformación dada, cuando su forma no se modifica por esa transformación. La invariancia de una ecuación es un requisito más fuerte que la covarianza. La forma de la ecuación no solo debe ser la misma, sino que también los valores de cualquier cantidad no dinámica, incluidas las "constantes", como la velocidad de la luz.

Las leyes de la física deben ser invariantes bajo traslaciones en el tiempo, no hay un momento especial y son válidas en todos los instantes de tiempo. Esta simetría encaja bien con la hipótesis básica de la ciencia de que los resultados son reproducibles para que la teoría pueda ser refutable: si un científico obtiene cierto resultado en el momento  $t = t_1$ , otro investigador debería ser capaz de obtener el mismo resultado en  $t = t_1 + \Delta t$ . Esta simetría se llama la *homogeneidad del tiempo*.

De la misma manera, las leyes de la física deben ser invariantes bajo traslaciones en el espacio, físicamente correspondiendo al hecho de que no importa el lugar donde hacemos los experimentos y matemáticamente a que no hay un punto especial en el espacio y que podemos elegir el origen del SR donde queramos. Esta simetría se llama la *homogeneidad del espacio*.

La *isotropía* del espacio es el hecho de que todas las direcciones son equivalentes y que no hay ninguna dirección privilegiada. En otras palabras, la orientación de un experimento físico es irrelevante.

Como expresamos, estas simetrías no solo imponen restricciones en la forma que pueden tener las leyes físicas, sino también ayudan a encontrar soluciones de las ecuaciones de movimiento. Como ejemplo, la homogeneidad del espacio implica que las interacciones permitidas en el potencial de

interacción solo pueden depender de las distancias entre dos partículas, pero no de las posiciones de las partículas con respecto a cierto origen. Así también, la isotropía del espacio implica que este potencial tiene que ser un potencial central, que depende de la distancia radial, pero no de los ángulos. Efectivamente, los potenciales que uno encuentra en teorías de gravedad, electromagnetismo, física molecular o nuclear son típicamente de esta forma, que claramente satisface estos requisitos.

Aparte de las simetrías bajo traslaciones y rotaciones, el PR nos proporciona otra simetría, relacionada con observadores en movimiento relativo. Ya que el PR impone que un observador solo es capaz de medir velocidades relativas entre SR, las leyes de la física no pueden ser formuladas en términos de velocidades: solo los cambios de velocidad son admisibles, ya que estos son independientes de los observadores. Efectivamente, las leyes de Newton están formuladas en función de la aceleración, y no de la velocidad. Pero hay más por destacar: si dos observadores observan el mismo suceso, cada uno desde su propio SR, se tienen que poder relacionar los resultados de un observador con los resultados del otro. La relación entre los resultados de diferentes observadores es también una transformación (cambio de coordenadas). Las rotaciones, las traslaciones en el tiempo y el espacio son ejemplos de cambios de coordenadas, pero igual de importantes son los cambios en los resultados entre dos observadores que están en movimiento relativo.

En cinemática relativa las magnitudes relevantes (posición, velocidad y aceleración) pueden clasificarse como: absolutas, medidas por un observador  $O_1$  en un SRI (considerado fijo); relativas, medidas por un observador  $O_2$  en un sistema móvil, SRI o SR no inercial (SRnI), y de arrastre, medidas por el observador  $O_1$  y considerando el objeto estudiado rígidamente vinculado al sistema móvil. En particular, las transformaciones 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 diferentes. La magnitud  $\vec{v}_A \equiv \vec{v}_0 = \vec{V}$  es la llamada velocidad de arrastre y la denotaremos con el símbolo  $\vec{V}$ . Esta velocidad es la que tendría el objeto bajo estudio, considerado rígidamente unido a uno de los SR, observada desde otro. La condición de rigidez hace coincidir esta velocidad con la del origen del SR al cual se lo vincula. En el caso de las transformaciones galileanas, la única diferencia en el movimiento entre los SRI es una traslación rectilínea y uniforme. El análisis de las ecuaciones (1) y (2) muestra que la dinámica es la misma y confirman los resultados conocidos de que en la mecánica newtoniana las posiciones y las velocidades son relativas, pero las aceleraciones son absolutas, en acuerdo con el PRC que afirma que diferentes observadores inerciales ven la misma física. Las leyes de la física que estos observadores inerciales formulan tienen que ser invariantes bajo las transformaciones de Galileo (respecto a las relaciones entre sus resultados), y cumplir con las restricciones que imponen en su forma las simetrías correspondientes al espacio y tiempo. Estas forman un grupo, llamado el grupo de Galilei: grupo de simetrías de la mecánica newtoniana. Específicamente, el término invariancia galileana se refiere al PR aplicado a la mecánica newtoniana, es decir: *las leyes de Newton se mantienen en todos los SR relacionados entre sí mediante una transformación galileana*.

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 denomina fuerzas de inercia (o *seudofuerzas*). Estas *seudofuerzas*, 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 (Addad y otros, 2011). De acuerdo al problema a estudiar y a la elección del SR puede reducirse el problema dinámico a uno de estática más sencillo e incluso más intuitivo.

## V. MÁS ALLÁ DE LA MECÁNICA DE NEWTON

El verdadero punto de partida de Einstein fue la incompatibilidad de la mecánica newtoniana, la teoría de Maxwell y el PRC. La mecánica newtoniana y la teoría de Maxwell tienen grupos de simetría diferentes, mientras el PR dice en grandes líneas que todas las teorías físicas deberían tener el mismo grupo. La solución de Einstein a este problema teórico, la teoría de la RE, es una reformulación de la mecánica newtoniana en términos del grupo de Lorentz, el grupo de simetría de la teoría electromagnética de Maxwell. Si todos los SRI son equivalentes y todos los observadores inerciales ven la misma física (no

solo la mecánica, sino a la física entera, incluidos el electromagnetismo y la óptica), entonces todos ellos deben llegar a las mismas leyes. En otras palabras, extiende el PR a toda la física e introduce un segundo principio de invariabilidad de la velocidad de la luz, según el cual la velocidad de la luz en el vacío es constante e independiente del estado de movimiento del observador. Llevar estos dos postulados hasta sus últimas consecuencias implica abandonar las ideas intuitivas del espacio y el tiempo. Es más, la teoría de la gravedad, tal como fue propuesta por Newton, no era compatible con la estructura del espacio y el tiempo que surge de la RE. Einstein formuló una nueva versión de la gravedad, a través de la teoría de la RG, que esencialmente la convierte en una teoría de campos, un concepto introducido por Faraday y Maxwell unos 50 años antes. La interacción gravitatoria ya no es instantánea y a distancia, sino a través de un campo intermediario por el cual la fuerza gravitatoria se propaga con velocidad finita. Lo revolucionario de la RG es la identificación de este campo intermediario con la métrica, un objeto matemático que describe las propiedades geométricas del espacio, induce por lo tanto a una profunda relación entre la gravedad y la curvatura del espacio-tiempo.

## VI. REFLEXIONES FINALES

La TR nos presenta cuestiones sobre las cuales se debe reflexionar. Por un lado, la RE ha eliminado los conceptos del espacio absoluto, del tiempo absoluto y de la velocidad absoluta, por no ser observables. Mientras que la RG ha incorporado en la física el concepto del espacio-tiempo dinámico, como una entidad física real. Este ha pasado de ser un escenario estático donde ocurre la física a ser una parte más de ella que influye lo que contiene y puede ser influenciado por ello. Y por otro, nos enseña que una buena teoría física tiene que hacer algo más que simplemente reproducir los resultados experimentales de un observador, debería poder hacerlo para cualquiera de ellos, y si distintos observadores están relacionados por ciertas transformaciones de simetría, entonces la teoría debería reflejar estas simetrías y tomar una forma tal que sea invariante bajo estas transformaciones. En otras palabras, la TR nos muestra la forma en que debemos formular una teoría física. Por ello, no es de extrañar que sea uno de los pilares fundamentales de la física conocida. Lo que resulta curioso, desde nuestro punto de vista educativo moderno post-relativista, es que el PR, que es fundamental en el desarrollo de la TR, vea disminuida su importancia en la enseñanza de la mecánica newtoniana. Se mencionan las transformaciones de Galilei en cualquier curso de física general, aunque más bien de manera anecdótica y un desarrollo posterior.

*¿Se podría comprender toda la física newtoniana en forma completa y coherente, sin conocer la simetría en las leyes físicas?* Einstein declaró al PR como primer principio, una idea cuya validez no se puede demostrar directamente, sino incorporándola en una teoría. Sin embargo, un primer principio es más básico que una teoría, ya que es independiente y previo a ella, y puede ser implementado en otras de varias maneras. Lo que nos enseña la historia de la TR es que, si hay un conflicto entre una teoría concreta y un primer principio, en general de lo que uno se puede fiar es del primer principio.

Aprender es adquirir la información útil como un instrumento conceptual para facilitar la resolución de tales situaciones. En el tema de interés de este estudio, el concepto de SR es fundamental para la comprensión del PR y para mostrar cómo la resolución de problemas tiene su base en una representación de la realidad. Solo conociendo las raíces propias del referencial teórico y anticipándonos a las posibles dificultades de comprensión de los estudiantes podremos utilizar y coordinar una serie de estrategias para facilitar el aprendizaje. Seguramente nos encontraremos con nociones intuitivas de los estudiantes que tendrán que ser trabajadas y modificadas adecuadamente a fin de lograr su coherencia con el marco conceptual de la relatividad Newtoniana.

## 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*, 19-23 de septiembre, 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*, 24-26 de octubre, Esquel, Chubut, Argentina.

Addad, R., Llonch, E., Rosolio, A. y Sánchez, P. (2013). Relatividad Clásica: dificultades en el estudio del movimiento II. *Memorias XVIII Reunión Nacional de Educación en Física*, 15-18 de octubre, San Fernando del Valle de Catamarca, Catamarca, Argentina.

- Addad, R. (2015). Relatividad Clásica: conceptos básicos. *Revista de Enseñanza de la Física*, 27(Extra), 653-659.
- Aguirre, J. M. (1988). Student preconceptions about vector kinematics. *The Physics Teacher*, 26(4),212-216.
- Bowden, J. (1992). Displacement, velocity, and frames of reference: Phenomenographic studies of students understanding and some implications for teaching and assessment, *American Journal of Physics*, 60(3),262-276.
- Martínez, A. (2005). Conventions and inertial reference frames, *American Journal of Physics*, 73(5),452-454.
- Panse, S., Ramadas, J. y Kumar, A. (1994). Alternative conceptions in Galilean relativity: frames of reference. *International Journal of Science Education*. 16(1),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),261-276.
- Ramadas, J., Barve, S. y Kumar, A. (1996a). Alternative conceptions in Galilean relativity: inertial and non-inertial observers. *International Journal of Science Education*. 18(5),615–629.
- Ramadas, J., Barve, S. y Kumar, A. (1996b). Alternative conceptions in Galilean relativity: distance, time, energy and laws, *International Journal of Science Education*. 19(4),463–477.
- Rosolio, A., Sanchez, P., Llonch, E. y Cassan, R. (2015). Los diagramas de interacción en la enseñanza de la física básica universitaria. *IV Jornada de Experiencias Innovadoras en Educación en la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura*, 28 de octubre, Rosario, Santa Fe, Argentina.
- Saltiel, E. y Malgrange, J. L. (1980). “Spontaneous” ways of reasoning in elementary kinematics. *American Journal of Physics*, 1,73-80.
- 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),1238-1248.
- Villani, A. y Pacca, L. (1987). Student’s spontaneous ideas about the speed of light. *International Journal of Science Education*, 9(1),55-66.