

Resolver ejercicios no es fácil. El papel de la metodología científica en la resolución de problemas de física

(Solving exercises is not easy: The role of scientific methodology for solving physics problems)

Jenaro Guisasola¹, Kristina Zuza, Mikel Garmendia, José-Ignacio Barragués

Escuela Politécnica de San Sebastian, University of the Basque Country San Sebastian, Spain

Recibido em 2/5/2015; Aceito em 31/5/2015; Publicado em 30/9/2015

Frecuentemente en los cursos de física general en la Universidad los problemas se resuelven como aplicación directa de la teoría, como si fueran ejercicios. En este artículo se muestran evidencias de que los estudiantes tienden a resolver ejercicios y problemas de manera superficial, sin aplicar estrategias de resolución fundamentales como el análisis cualitativo o la emisión de hipótesis, que impiden llegar a una solución correcta. Utilizando como referencia la resolución de un problema que suele ser considerado como ejercicio, se proponen algunas líneas de actuación que pueden guiar la resolución de problemas en la enseñanza de la física, y estimular en los estudiantes la reflexión para encontrar soluciones, así como la utilización de procedimientos científicos.

Palavras-chave: resolución de problemas, cinemática, enseñanza de bachillerato y universidad.

At university introductory physics courses, often problems are solved as a direct application of theory, as if they were exercises. In this paper we present evidence that students tend to solve problems in a superficial manner, without applying fundamental problem-solving strategies such as qualitative analysis or hypothesis making which prevents them from arriving at a correct solution. Using as a point of reference the solving of a problem that is usually regarded as an exercise, we propose some approaches that could serve as guidelines for problem-solving in Physics teaching, and stimulate reflection among students to find solutions, as well as use scientific procedures.

Keywords: problem solving, kinematics, high-school and university teaching.

1. Introducción

En la vida diaria y en la profesional la gente dedica sus mayores esfuerzos intelectuales a resolver problemas. Este hecho hace que la resolución de problemas también sea una competencia básica en la educación. En 2007, el Proyecto Tuning (<http://www.unideusto.org/tuningeu/>) llevó a cabo una encuesta entre profesores universitarios de física de toda Europa (un departamento de física de cada país de la UE) y los empleadores de los graduados en física. Uno de los resultados especifica las habilidades de identificar, formular y resolver problemas de física como competencias esenciales de cualquier programa de física. La enseñanza de la física considera que la resolución de problemas conduce a la comprensión de la física y que es una estrategia fiable para probar el aprendizaje logrado por los estudiantes [1]. Sin embargo, la investigación ha demostrado repetidamente que muchos estudiantes que siguen cursos de física general en la universidad en los

formatos tradicionales de enseñanza aprenden a resolver diferentes tipos de ejercicios cuantitativos que figuran al final de cada capítulo del libro, pero por lo general son incapaces de explicar el significado de sus propias soluciones numéricas a los problemas [2,3].

Se puede argumentar que en los cursos Introductorios de física general en la universidad y último curso de Secundaria, los problemas son sencillos y no se necesita gastar tiempo trabajando competencias científicas tales como la formulación de hipótesis acerca de la pertinencia de un modelo físico para el problema propuesto, lo que sugiere una serie de estrategias diferentes para explicar y justificar la respuesta basada en la evidencia. Probablemente muchos profesores estarán de acuerdo en que a menudo los problemas de física general pueden ser resueltos como ejercicios de aplicación directa de la teoría, y que solo cuando los problemas son complejos se necesita invertir tiempo trabajando procedimientos científicos

Los objetivos de este artículo son, en primer lugar,

¹E-mail: jenaro.guisasola@ehu.es.

mostrar evidencias de que un ejercicio de física a priori elemental, puede sin embargo encerrar complejidad y necesidad de discusión en el aula. En segundo lugar, proponer algunas líneas que puedan guiar la resolución de problemas en la enseñanza de la física

2. La investigación

En vista de la necesidad de establecer una estrecha relación entre la resolución de problemas y el aprendizaje de los conceptos teóricos, hemos diseñado un problema con papel y lápiz. Es un problema similar a los que aparecen en los libros de texto en los cursos de física general. Este tipo de problemas se clasifican como “problemas cerrados” en la investigación en resolución de problemas [4] o “problemas estructurados” [1], dado que la información incluida en el enunciado del problema o ejercicio incluye todos los elementos necesarios para evaluar la situación y se aclaran las simplificaciones que se efectuarán en los fenómenos descritos dentro del marco teórico de la física básica

El problema se eligió con la intención de que fuera común a cualquier currículum de Bachillerato científico (Secundaria Superior, 16-18 años) y de física general de primer curso de universidad. Por ello se decidió tomar un problema del tema de Cinemática en una dimensión, que suele ser el primer capítulo del programa de física. Se trataba de encontrar un problema académico familiar a los estudiantes de los niveles citados y sobre el que los estudiantes reciben instrucción independientemente de la exigencia educativa del Centro. No se quería elegir un problema de un tema del currículum que pudiera haberse tratado de forma rápida por falta de tiempo, o que fuera de alta demanda cognitiva. El problema se muestra en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Problema de movimiento con aceleración constante en una dimensión.

Un coche se mueve a lo largo de una trayectoria de acuerdo con la ecuación: $s = 25 + 16t - 2t^2$ (s en metros y t en segundos). Calcula la distancia total recorrida por el coche en 5 segundos. Explica todos los pasos que realizas para calcular la solución.

El estudio se llevó a cabo con 1.396 alumnos y profesores del País Vasco (España) durante los últimos tres años. 715 estudiantes de Bachillerato científico (Secundaria Superior, 12-16 años), 593 estudiantes de primer

año de la carrera de ingeniería en la Universidad del País Vasco y 88 profesores de ciencias en primer año de grados de física, química, ciencias de la vida y matemáticas, completaron el problema. Los estudiantes completaron el problema en condiciones de examen y después de recibir las clases del capítulo de Cinemática. La nota obtenida en el problema era parte de la evaluación final. Todos los estudiantes de Bachillerato habían estudiado al menos un año de física (2 horas por semana), en el que está incluido el tema “el movimiento en una dimensión”. En el programa se estudia la definición de desplazamiento, velocidad y aceleración y el movimiento lineal con aceleración constante. Los estudiantes de ingeniería de primer año reciben 3,5 horas de clase magistral por semana y 2 horas al mes en el laboratorio durante 15 semanas sobre Mecánica. Las clases magistrales son impartidas por profesores con experiencia del departamento de física. El movimiento en una dimensión se enseña durante dos semanas y media de este curso. Las clases de teoría y de resolución de problemas incluyen conceptos tales como desplazamiento, velocidad y aceleración, y el modelo de movimiento con aceleración constante. La enseñanza utiliza en detalle las herramientas matemáticas de derivación e integración para calcular la velocidad y la aceleración. Los profesores universitarios realizaron el problema durante un curso de formación de profesores en enseñanza sobre resolución de problemas en ciencias organizado por la Universidad del País Vasco dentro del programa de formación educativa para el profesorado.

Alcanzado este punto, invitamos al lector a resolver el problema planteado antes de seguir adelante con la lectura de los resultados que hemos obtenido en el estudio

3. Resultados

Somos conscientes de que la resolución de problemas es un proceso global en el que es difícil separar los diferentes aspectos del conocimiento procedimental y que una continua interacción entre las diferentes etapas es necesaria. Por esta razón, presentamos en primer lugar el resultado obtenido por los estudiantes y los profesores (véase el Cuadro 2) y en segundo lugar, se discuten los pasos que se utilizan para obtener el resultado.

Cuadro 2. Resultados de la distancia recorrida por el coche en 5 segundos.

Muestra	Respuesta en porcentaje			
	Correcto	55 m.	30 m.	Otros
Bachillerato (715)	0.0%	70.0%	15.0%	15.0%
1er Año Ingeniería (593)	0.0%	57.0%	43.0%	0.0%
Profesores (88)	5.0%	22.0%	72.0%	0.0%

¿A qué puede ser debido que se produzca un resultado erróneo tan generalizado en la resolución del problema? Si analizamos las explicaciones que se indican en la resolución, encontramos que se comienza por realizar un tratamiento directo de la información en el marco de un modelo identificable y a continuación, se utilizan los datos suministrados en la ecuación. Ejemplos estándar del tratamiento directo de la información son los siguientes:

- “La ecuación corresponde a un movimiento rectilíneo con aceleración constante y negativa. Por tanto a los 5 segundos se ha recorrido un espacio: $s = 25 + 16 * 5 - 2 * 25 = 55$ m. ” (Estudiante de Bachillerato)
- “La ecuación representa el espacio de un movimiento rectilíneo uniformemente desacelerado a lo largo del tiempo. En el segundo 5 el espacio recorrido es: $s = 55$ m. Como hay un espacio inicial de 25 m, lo que ha andado el coche son 30 m.” (Profesor 1er curso de ciencias)

El tratamiento directo de la información basado en un modelo identificable, supone un tratamiento superficial que no se detiene en la clarificación del problema ni en los conceptos involucrados. Esta forma de resolución es identificada en la investigación como resolución basada en “tipos de problema-solución”. Una vez que se cree identificado el “tipo de problema” se aplican directamente las “ecuaciones-solución” memorizadas. La investigación en resolución de problemas muestra que esta forma de resolución viene frecuentemente acompañada de una enseñanza en la que el profesor transmite detalladamente la resolución de los problemas [5]. En este tipo de enseñanza los estudiantes no tienen oportunidad de reflexionar sobre los problemas y aplicar procedimientos de resolución propios del trabajo científico (emisión de hipótesis, análisis de variables...) Que los estudiantes comprendan cómo se resuelve un problema no implica que se sepa resolverlo. Además, como muestran los resultados obtenidos, la repetición de una enseñanza de problemas basada en la transmisión del proceso de resolución puede llevar a los profesores también a enfrentarse a los problemas de forma acrítica. Los cuatro profesores de universidad que calcularon el resultado correcto eran profesores que enseñaban matemáticas en primer curso de universidad. Ellos resolvieron el problema mediante la representación gráfica s/t de la parábola que representa la ecuación y del cálculo de las coordenadas correspondientes.

En el siguiente apartado proponemos algunas estrategias de enseñanza de resolución de problemas que podrían evitar el fracaso generalizado en la resolución de problemas de física

4. De explicar problemas resueltos a guiar su resolución

En primer lugar es conveniente recordar qué entendemos por problema para evitar confusiones de lenguaje. Estamos de acuerdo con Polya [6] cuando afirma que “Resolver un problema consiste en *encontrar un camino allí donde previamente no se conocía tal*, encontrar una salida para una situación difícil, para vencer un obstáculo, para alcanzar un objetivo deseado que no puede ser inmediatamente alcanzado por medios adecuados” (cursivas de los autores). Es decir, es necesario un análisis cualitativo que proponga un camino desde una situación problemática ambigua a un problema dimensionado. El análisis cualitativo implica hacer un esfuerzo para identificar las variables relevantes y para hacer suposiciones sobre lo desconocido. El profesor guía la discusión inicial mediante la presentación de una pregunta como la siguiente: ¿Cuál es el recorrido realizado por el coche en 5 segundos?

Una forma de concretar el problema sería empezar por situar el sistema de referencia y las dimensiones del movimiento. Se pueden formular preguntas tales como: ¿en qué posición se encuentra el coche al comienzo?, ¿qué tipo de trayectoria sigue el coche? Esto permite a los estudiantes darse cuenta de que el observador se encuentra a 25 metros del coche al comenzar el movimiento y que se trata de un movimiento rectilíneo de una sola dimensión.

Otro aspecto a analizar sería la aceleración negativa del coche. Aquí, los estudiantes tienen la oportunidad de especular con el razonamiento hipotético con preguntas como las siguientes: ¿El movimiento es acelerado o desacelerado? ¿Si el movimiento es desacelerado se parará el coche? ¿Se detendrá antes de los 5 segundos? Si el coche se detuviera antes de los 5 segundos, ¿en qué instante se detendría?

En este punto, los estudiantes conocen las estrategias de Cinemática para el cálculo de las respuestas de las preguntas anteriores. Se pueden utilizar dos tipos de estrategia, la analítica que es seguida por casi todos los estudiantes y la gráfica que representa las variables espacio/tiempo. En la estrategia analítica, se considera que el movimiento tiene aceleración constante y negativa, sus ecuaciones son: $s = s_0 + v_0 t + 1/2 a t^2$ y $v = v_0 + a t$. Además, varios datos del movimiento del coche son conocidos, tales como su velocidad inicial (16 m/s) y su aceleración (-4 m/s²). Partiendo de que el $t = 0$ es el tiempo inicial del movimiento, se puede concluir que a los 4 segundos el coche se detiene ($0 = 16 - 4t$). Llegados a este punto, el profesor podría guiar la discusión de los estudiantes mediante preguntas tales como: ¿Qué sucede entre el segundo 4 y el 5?, ¿cuánto espacio ha recorrido el coche hasta el segundo 4? ¿Qué distancia ha recorrido el coche entre el segundo 4 y el 5? Los estudiantes suelen sustituir los valores del tiempo ($t = 4$ y $t = 5$) en la ecuación, obteniendo los resultados:

$$s(4) = 57 \text{ m y } s(5) = 55 \text{ m.}$$

En el caso de seguir una estrategia gráfica, la parábola de la gráfica espacio/tiempo tiene un máximo en el punto $t = 4$ s lo que permite llegar a los mismos resultados que en la estrategia analítica (ver Fig. 2).

El análisis de los resultados de una situación problemática es inherente a la actividad científica. Por ello, el profesor podría guiar la discusión con las siguientes preguntas: ¿Es razonable aceptar que en el segundo 4 el coche ha recorrido 57 metros y en el segundo 5 ha recorrido menos distancia? ¿Puedes hacer un esquema de la trayectoria que sigue el coche? Aquí se plantea una discusión sobre el significado del valor que se obtiene al aplicar la ecuación del movimiento. Todos los libros de texto y la gran mayoría de profesores de física subrayan que la variable s de la ecuación del movimiento representa la posición de la partícula pero no representa el espacio recorrido en una trayectoria. Esta importante clave conceptual es constantemente repetida en las ecuaciones del movimiento de una partícula. Sin embargo, la interpretación que hacen los estudiantes de los resultados del problema (ver Cuadro 2) muestra que presentan confusión entre la *posición* que ocupa el coche en el instante $t = 5$ (respuesta errónea de 55 metros) y la *distancia recorrida* o bien, confunden el *desplazamiento* del coche (respuesta errónea de 30 metros) con la *distancia recorrida*. La discusión sobre un esquema del movimiento del coche como el de la Fig 1 ayuda a clarificar los conceptos de posición, desplazamiento y espacio recorrido.



Figura 1. Trayectoria de movimiento rectilíneo seguida por el coche (no está dibujada a escala).

Para aquellos casos que utilizan una estrategia basada en la gráfica espacio/tiempo, los estudiantes tienden a confundir la parábola de la gráfica con la trayectoria del coche, afirmando que la trayectoria que realiza el coche es la propia parábola, es decir, que sigue una trayectoria bidimensional, en lugar de unidimensional (eje vertical s de la gráfica). En este caso es útil comparar la trayectoria de la Fig 1 con la gráfica s/t de la Fig. 2.

De las reflexiones realizadas en la discusión con los estudiantes se concluye correctamente que el espacio recorrido por el coche son 32 metros hasta el segundo 4, más los 2 metros que retrocede el coche desde el segundo 4 al segundo 5. Es decir, el coche ha recorrido 34 metros desde su punto de partida.

Gráfico s/t

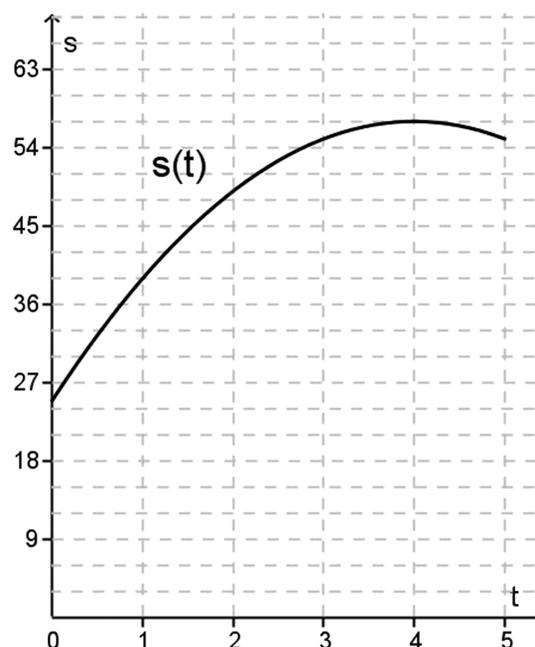


Figura 2. Gráfica s/t del segundo 0 al segundo 5.

El problema se puede finalizar planteando en qué situación real podríamos encontrar una situación como la que describe el problema, por ello, se propone a los estudiantes que propongan una situación en la cual esta ecuación pudiera explicar la trayectoria que realiza el coche durante los primeros 5 segundos. Teniendo en cuenta que la aceleración es negativa, la primera opción suele estar relacionada con los frenos del coche. Una segunda reflexión lleva a los estudiantes a concluir que con el freno del coche no es posible explicar el retroceso del coche en el último segundo. La única opción posible es que el coche (sin acelerar ni frenar) afronte una rampa de cierta pendiente. A pesar de que éste pueda ser el final del problema planteado, también puede ser el punto de partida de otro nuevo problema que nos puede ayudar a reafirmar los contenidos trabajados en este mismo problema o afrontar situaciones nuevas y más complejas que exijan a los estudiantes el aprendizaje de conceptos que no se han trabajado hasta el momento. Podemos pedirles, por ejemplo, que calculen el ángulo de la pendiente de la rampa por la cual se ha desplazado el coche, o que reescriban la ecuación para una pelota que es lanzada verticalmente

5. Observaciones finales

En este estudio se han presentado pruebas de que un simple “ejercicio de aplicación” puede necesitar el uso de procedimientos científicos para ser comprendido y resuelto.

La estrategia habitual basada en la “búsqueda de una fórmula ad hoc para introducir los datos” conduce a resultados incorrectos y a falta de clarificación con-

ceptual. Al sacar conclusiones e implicaciones para la enseñanza, sin embargo, es necesario tener en cuenta que el estudio se ha llevado a cabo con un solo problema. Nuestro estudio no ha sido diseñado para presentar pruebas concluyentes sobre las dificultades de todos los estudiantes universitarios con la resolución de problemas de física. Puede haber dificultades debido a otros factores no tomados en cuenta explícitamente en este estudio. Hemos comprobado que los resultados obtenidos en este estudio son coherentes con resultados que hemos obtenido en otros estudios previos [3,7] y en otros estudios internacionales sobre las dificultades de los alumnos en la resolución de problemas [8].

Las estrategias de enseñanza que se proponen para ayudar a los estudiantes en sus dificultades de resolución, que no implican seguir una secuencia rígida de aplicación sino un tratamiento holístico, se pueden resumir en las siguientes acciones que se han utilizado en la resolución del problema planteado:

- a) Realizar un *análisis cualitativo* que en el ejemplo resuelto se ha concretado en situar el sistema de referencia, reconocer el marco teórico de referencia de cinemática en una dimensión, e identificar leyes y principios fundamentales como las ecuaciones MRUA que permiten identificar y analizar variables implicadas, y concluir que el movimiento tiene aceleración negativa.
- b) *Emitir hipótesis* sobre la evolución del movimiento, planteándose la posibilidad de que el coche se detenga debido a la aceleración negativa.
- c) Plantear y valorar posibles *vías alternativas de resolución*, como la estrategia analítica recurriendo a las ecuaciones del MRUA, o la estrategia gráfica que permite visualizar la evolución del s/t .
- d) *Analizar los resultados*, y su *coherencia con las hipótesis emitidas*, comprobar que se obtiene la misma respuesta siguiendo otro camino de resolución (analítico y gráfico), plantear en qué situación real se daría la situación planteada (una rampa).
- e) *Plantear nuevos problemas*, como calcular el ángulo de la pendiente de la rampa, o *proponer situaciones similares* a la planteada (definir la trayectoria para una pelota lanzada verticalmente)

El cambio de la enseñanza por transmisión de la solución a la enseñanza basada en guiar a los estudiantes en la resolución de problemas, no es sencillo [9]. Es necesario destacar que el cambio de la enseñanza debe ir acompañada de una formación previa y una tutoría en la implementación. En general, se requiere un trabajo previo entre el grupo de profesores que discuten y toman en cuenta las diferentes posibilidades que pueden surgir en un problema. La capacitación también es

necesaria en el diseño de las preguntas y la manera de acercarse con ellas a los estudiantes. La forma de preguntar debe representar, por un lado, un desafío para estimular la reflexión y la búsqueda de soluciones y, por otro, no ir más allá de las posibilidades cognitivas de los estudiantes. Este equilibrio necesario representa un reto para el grupo de profesores involucrados que requiere que tengan en cuenta los resultados de la investigación en enseñanza de la física y su aplicación en el contexto de la resolución de problemas. Por otro lado, si el objetivo de la enseñanza de uno es dar a los estudiantes la oportunidad de utilizar los procedimientos científicos, u ofertar posibilidades de reflexionar sobre la pertinencia de un modelo para resolver el problema propuesto, o si queremos ayudar a nuestros estudiantes a abandonar sus procedimientos ingenuos, entonces el uso del método de enseñanza de resolución guiada de problemas se puede recomendar calurosamente [7]. Sin embargo, esto supone aceptar las competencias del proceso científico como parte esencial de la enseñanza de la física y esto puede ser un problema, ya que no necesariamente se comparte este objetivo entre todos los profesores universitarios de física

Referencias

- [1] D. Maloney, in: *Handbook of Research in Science Teaching & Learning*, edited by D. Gabel, (Mac Millan Publishing Company, New York, 1994).
- [2] R.J. Dufresne and W.J. Gerace, *The Physics Teacher* **42**, 428 (2004).
- [3] J. Guisasola, M. Ceberio and J.L. Zubimendi *Research In Science Education* **36**, 163 (2006).
- [4] A. Dumas-Carré and M. Goffard *Rénover les Activités de Résolution de Problèmes en Physique* (Armand Colin Paris 1997).
- [5] E. Kim and S-J. Pak, *American Journal of Physics* **70**, 759 (2002).
- [6] G. Polya, *How to solve it* (Princeton University Press Princeton, 1973).
- [7] J. Guisasola, M. Ceberio and K. Zuza, in: *Research Based Undergraduate Science Teaching*, edited by D.W. Sunal, C.S. Sunal, E.L. Wright, C.L. Mason and D. Zollman (Information Age Publishing, Charlotte, 2014), p. 379-402.
- [8] D.H. Jonassen, in: *Learning to Solve Complex Scientific Problems*, edited by D.H. Jonassen (Lawrence Erlbaum Associates New York 2007).
- [9] L. Hsu, E. Brewster, T.M. Foster and K.A. Harper, *American Journal of Physics* **72**, 1147 (2004).