

JOURNAL OF SCIENCE EDUCATION (REVISTA DE EDUCACIÓN EN CIENCIAS) N 1, VOL 4, pp 25-27, 2003

**UNA PROPUESTA DE ENSEÑANZA ORIENTADA A
UN APRENDIZAJE MÁS COMPRENSIVO DE LA DINÁMICA.**

**A TEACHING PROPOSAL ORIENTED TO
A MORE COMPREHENSIVE LEARNING OF DYNAMICS.**

Lorenzo M. Iparraguirre

Facultad de Matemática Astronomía y Física. U.N.C. Haya de la Torre y Medina Allende.
Ciudad Universitaria. 5000. Córdoba. Argentina. TE: (0351) 334051/.../55. Fax.: (0351)
334054. Email: ipa@famaf.unc.edu.ar

Resumen

Se analizan algunos aspectos inconvenientes de la forma habitual de enseñanza de la dinámica, y se señala su posible incidencia en la generación y la persistencia de concepciones erróneas muy difundidas. A continuación se describe una propuesta renovadora para la enseñanza de la dinámica, la cual se considera superadora de los inconvenientes analizados.

Palabras clave: dinámica; fuerza; movimiento; aceleración; impulso.

Abstract

Some disadvantages in the traditional process of teaching dynamics are analyzed, and also it is pointed out its possible influence in the generation and persistency of widespread mistaken ideas. Afterwards we describe a proposal to renew the teaching of dynamics, which is considered able to overcome the analyzed disadvantages.

Key words: dynamics; force; movement; acceleration; impulse.

Introducción

Existe abundante literatura referida a los problemas de comprensión de los temas básicos de la dinámica. Aquí se presenta una propuesta para tratar algunos de estos problemas adaptada al nivel universitario básico, más específicamente para carreras de “no físicos”, aunque con contenido esencial se pretende darle validez vale directamente para el nivel medio también.

Por razones de simplicidad este trabajo está limitado a la dinámica de *partículas materiales* (cuerpos asimilados a puntos con masa) ya que tanto las dificultades que se quiere señalar como lo que se quiere proponer para superarlas quedan suficientemente bien ejemplificados con ellas; no obstante vale aclarar que no se considera que la partícula puntual sea la mejor forma de presentar la dinámica a los no físicos, y en la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Nacional de Córdoba de Argentina (UNC), en donde esta propuesta funciona desde hace cinco años, la dinámica se presenta y se desarrolla referida a cuerpos extensos.

La enseñanza habitual de la Dinámica

La dinámica de las partículas materiales se estructura alrededor de las tres “Leyes de Newton”, o “Leyes Fundamentales de la Dinámica”. Estas leyes tienen un contenido conceptual de gran profundidad, y es muy difícil alcanzar el nivel de comprensión debido reflexionando en contextos abstractos, por lo cual en los niveles iniciales la reflexión debe hacerse sobre ejemplos concretos, y en la práctica el aprendizaje se intenta a través de la aplicación de estas leyes a una colección de ejercicios de aplicación cuidadosamente seleccionados.

La tarea que debe realizarse en casi todos los ejercicios consiste esencialmente en aplicar la segunda ley, $F_R = ma$ (vector fuerza resultante igual a masa por vector aceleración), que podría decirse que es la que contiene los elementos de aplicación práctica de la teoría.

El proceso consiste en los siguientes pasos típicos:

- 1) Determinar cuáles son las fuerzas que actúan en cada caso particular a partir de las características del sistema, para con ellas, a través de composiciones y descomposiciones, hallar la fuerza resultante sobre el cuerpo, F_R , y sus componentes de interés.
- 2) Plantear $F_R = ma$, para obtener a , o para obtener relaciones que expresen la solución del problema. Hay un proceso de resolución analítica que es desarrollado por el profesor para distintos casos típicos. El alumno en esta etapa básica sólo debe reconocer la solución que corresponde a cada caso.
- 3) Obtener características del movimiento y revisar la coherencia con las fuerzas determinadas en 1) y con las demás características del sistema. De las dificultades, éxitos, etc., que se encuentran en los diferentes casos concretos surgen la necesidad y la posibilidad de revisar y reelaborar la interpretación de conceptos y marco teórico: *“Pero todo este proceso de reestructuración,... debe ir ... de abajo hacia arriba.... Sólo estudiando contextos y situaciones concretas pueden los alumnos trascenderlas para llegar a remover los cimientos de sus teorías”* (Pozo y Gómez, 1998, p.146). La falta de insistencia en este punto puede llevar a que no haya revisión ni reestructuración del sistema de ideas, con lo cual el aprendizaje no trascenderá lo mecánico y superficial.

Este proceso descrito tropieza con varias dificultades importantes, y aquí se analizarán dos que se consideran fundamentales: la dificultad de manejar e interpretar vectores, y la dificultad de interpretar el concepto de aceleración.

1) La cuestión del manejo de los vectores.

La forma de expresar las fuerzas y los movimientos es esencialmente vectorial. Los vectores

que se utilizan en las formulaciones básicas de la mecánica son entes que se pueden representar dibujando una flecha adecuada a cada caso. Trabajar con vectores en estos niveles requiere, y por ello contribuye a ejercitar y desarrollar, una visión o intuición geométrica del espacio acompañada de familiarización con sistemas de coordenadas, y con conceptos de trigonometría básica. Estas cosas también son necesarias para otras asignaturas de las carreras científicas y además son útiles para muchas actividades de diversa índole.

De manera que en los cursos iniciales de mecánica, a pesar de las dificultades, la representación geométrica de los vectores y la ejercitación con ellos se consideran muy importantes para la asignatura y la formación general del estudiante.

2) La cuestión de la aceleración.

En la expresión $F_R = ma$ interviene de manera central el vector aceleración, \mathbf{a} , cuya interpretación tiene todos los problemas que le corresponden por ser vector, y además los problemas originados en el hecho que *no tiene ningún referente directo* en el movimiento que ayude a interpretarlo.

Podemos hacer el ejercicio de imaginar vectores posición, desplazamiento, y velocidad, y para todos ellos encontramos algo en el movimiento que permite visualizarlos directamente. También podemos visualizar directamente el vector representativo de la fuerza aplicada, si lo buscamos en el mecanismo de la interacción de la cual resulta, y no en el movimiento.

Pero, un alumno que se inicia, ¿cómo debe imaginar el vector aceleración?

La definición del vector $\mathbf{a} = \Delta \mathbf{v} / \Delta t$ es formalmente igual a la del vector velocidad ($\mathbf{v} = \Delta \mathbf{r} / \Delta t$), pero no hay que restar posiciones sino velocidades. La resta ya no indica un desplazamiento y *no debe ser imaginada como representativa de movimiento*. Es reconocido en la literatura que los alumnos tienden a confundir aceleración con velocidad aún en su

tratamiento unidimensional (v.g. Pozo y Gómez, 1998, p.240), y la situación es más grave en dos o tres dimensiones. Al considerar los elementos que intervienen en la definición del vector aceleración en el caso general (ver más adelante figura 1) se visualizan las dificultades que puede encontrar un alumno para imaginar las relaciones debidas entre \mathbf{a} y el movimiento. Si no puede hacerlo él estará atrapado en un círculo vicioso que le impedirá revisar, y probablemente lo llevará a reforzar concepciones alternativas no deseables: imaginando al vector \mathbf{a} como representativo de la velocidad o del movimiento, la aplicación de $F_R = m\mathbf{a}$ conduce a reforzar la difundida idea errónea que la fuerza es hacia adelante.

Cómo la enseñanza habitual tiene en cuenta estas dificultades

En función de las dificultades expuestas se busca siempre la familiarización con el concepto de aceleración antes de entrar a dinámica, para lo cual se desarrolla previamente un capítulo de cinemática lineal, y en este capítulo se simplifica el planteo comenzando con movimientos rectilíneos, donde las complicaciones del carácter vectorial de \mathbf{a} (y de las demás variables) pueden ser ignoradas.

De manera que en general se sigue la secuencia MRU (movimiento rectilíneo uniforme) \rightarrow MRUV (ídem uniformemente variado) \rightarrow aplicaciones: caída libre vertical, tiro vertical, tiro oblicuo \rightarrow a veces MCU (movimiento circular uniforme).

Luego se entra al estudio de la dinámica, en donde se debe acoplar el manejo logrado de los vectores al concepto logrado de aceleración, esencialmente aplicando $F_R = m\mathbf{a}$ a los diversos casos seleccionados.

Luego se sabe que los resultados son desalentadores. Aunque los alumnos lleguen a apren-

der lo que se les exige para aprobar (en general ejercicios tipo que el profesor ha seleccionado), se sabe que *muchos de los que aprueban* mantienen su creencia de que la fuerza es en el sentido del movimiento, siguen sin distinguir bien si a las fuerzas las aplica alguien o si las tiene el cuerpo, no aciertan al dibujar las fuerzas que actúan en casos simples, etc. Normalmente los alumnos tienen dificultades para explicar qué fuerzas actúan en un cuerpo en movimiento, aún en los casos más simples que se han estudiado exhaustivamente en el curso, tales como una piedra lanzada hacia arriba (Pozo y Gómez 1998, p.232; Watts y Zylbersztajn 1981; Viennot 1979; etc.).

Es posible señalar dos defectos de la estrategia de enseñanza habitual que contribuyen muy directamente con estos resultados desalentadores.

Defecto 1: la enseñanza de la cinemática separada de la dinámica

Es una ilusión pensar que estudiar cinemática antes de dinámica va a simplificar su tratamiento al poder prescindir del concepto de fuerza o de causa. El concepto de fuerza no estará construido hasta que no lo esté todo el marco teórico de la dinámica. Mientras tanto ya está presente en la mente del alumno de alguna manera poco definida o diferenciada, y no necesariamente con el nombre de fuerza.

¿Cómo es posible creer que un alumno está pensando sólo en cinemática, liberado del concepto de fuerza, si para él la fuerza puede tener como referente al movimiento?

Por otra parte, además, tanto alumnos como profesores acostumbran a referirse a la aceleración como a una causa, y así es que dicen, por ejemplo: “en ese caso *actúa la aceleración* que hace que la velocidad aumente”. ¿Cómo es posible pensar que el alumno está dedicado a especular sobre características del movimiento, liberado del problema de las causas, si por

un lado *tal vez él necesite causas* para entender mejor, y por otro lado se le está ofreciendo la aceleración como causa?

Defecto 2: la cinemática unidimensional no es la preparación ideal para la dinámica

La cinemática unidimensional conlleva naturalmente una carga de ejercitaciones típicas, que podrían ser muy útiles si se dispusiera de un tiempo ilimitado, pero eso no es lo que sucede.

Los minutos que se dedican a ejercitaciones con gráficas $x(t)$, $v(t)$ y $a(t)$, no se dedicarán a dibujar las fuerzas que actúan sobre el móvil en un lugar de la trayectoria para analizar cómo debe cambiar la dirección o el módulo del vector velocidad, y cómo se refleja eso en el movimiento. Este análisis es necesario para poder decir que se comprenden las leyes, y en este esquema sólo puede ser hecho si se trata la aceleración por medio de la representación gráfica de la diferencia vectorial de velocidades (figura 1), según los pasos típicos siguientes:

a) Considerar dos posiciones vecinas sobre la trayectoria, con los correspondientes vectores velocidad. → b) Considerar un diagrama vectorial en el cual los vectores velocidad sucesivos se representan con un origen común. Considerar allí el vector diferencia uniendo los extremos de ambos. → c) Identificar el vector aceleración con el vector diferencia considerado por unidad de tiempo transcurrido entre las posiciones. Considerar este vector ubicado sobre el intervalo correspondiente de la trayectoria. → d) Descomponer el vector \mathbf{a} según las direcciones tangencial y normal al trozo de trayectoria, para poder realizar cualquier análisis (no se ha mostrado la descomposición en la figura).

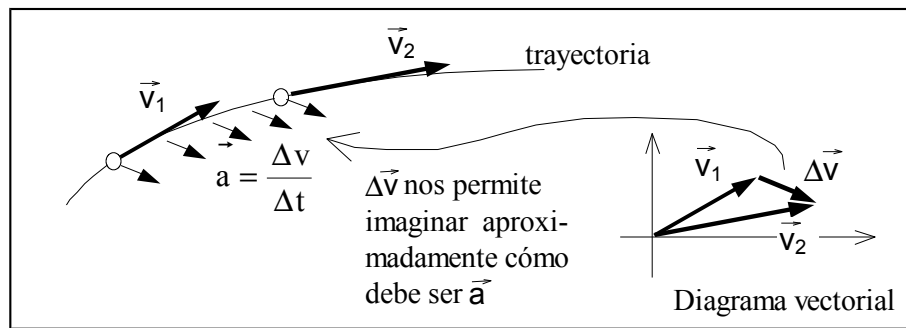


Fig. 1. Elementos mínimos que hay que considerar para visualizar qué es la aceleración

La cinemática unidimensional no adiestra en la utilización de estos elementos, que prácticamente no aparecen hasta que se llega al estudio del MCU, e introduce una colección de gráficas y aplicaciones que distraen sin contribuir esencialmente a la comprensión de la dinámica, y a veces hasta generan confusiones por la abundancia de elementos parecidos. Así por ejemplo, la similitud entre los procedimientos y figuras utilizadas para definir la velocidad como pendiente de la gráfica $x(t)$, y el vector velocidad como tangente a la trayectoria, lleva a la muy conocida confusión del vector velocidad con la tangente a la gráfica $x(t)$, que ha sido detectada tanto en alumnos como en profesores (Carrascosa y Gil, 1985).

Una propuesta de superación de los inconvenientes

Todos los que enseñan mecánica han recibido a su vez el tipo de enseñanza que aquí se está cuestionando, han debido superar los inconvenientes, y es posible presumir que en general consideran que la tarea es ardua pero necesaria, y que todos los que quieran comprender o entender estas cosas deberán ser capaces del esfuerzo correspondiente.

Sin subestimar la importancia de estas afirmaciones, hay que considerar que tal vez muchos estudiantes en su contacto inicial con estos temas puedan estar demasiado lejos de la com-

prensión requerida. Puede ser que muchos de ellos resuelvan su problema priorizando tratamientos matemáticos de incuestionable valor, pero que no les llevarán a la comprensión debida. Las tareas que el profesor selecciona indican a los alumnos dónde deben poner sus esfuerzos. Si no se les exige tanto analizar trayectorias con fuerzas y velocidades en el espacio como analizar gráficas $x(t)$, $v(t)$, $a(t)$, o cómo aplicar fórmulas y llegar a resultados cuantitativos, ¿por qué deberían destinar tiempo a reflexionar profundamente sobre lo primero?

Saber y entender mecánica implica, además de saber aplicar los procedimientos típicos a los ejemplos de interés y conocer los aspectos salientes de los movimientos resultantes, poder analizar cómo son las fuerzas que actúan y cómo cambia \mathbf{v} en función de esas fuerzas. Esto último es esencial para revisar las propias ideas en el proceso de construir el significado de las leyes.

Ahora bien, si se cambia el enfoque y se utiliza desde el comienzo $\mathbf{I} = \Delta \mathbf{p}$ (impulso igual a variación de la cantidad de movimiento) como ley fundamental de la dinámica, en lugar de $\mathbf{F}_R = m\mathbf{a}$, resulta posible enseñar directamente cómo cambia \mathbf{v} en función de las fuerzas aplicadas sin depender del concepto de aceleración.

El esquema general que se propone es:

1) El adiestramiento con los vectores, su visualización gráfica y la de las operaciones vectoriales se considera fundamental como en cualquier propuesta. La estática constituye una buena oportunidad para practicar con vectores fuerza, sin perjuicio de lo cual también es posible desarrollarla después de la dinámica, según los gustos.

De cualquier manera es muy importante lograr familiaridad con vectores posición y desplazamiento, y con la figura del triángulo representativo de la diferencia de vectores (figura 2).

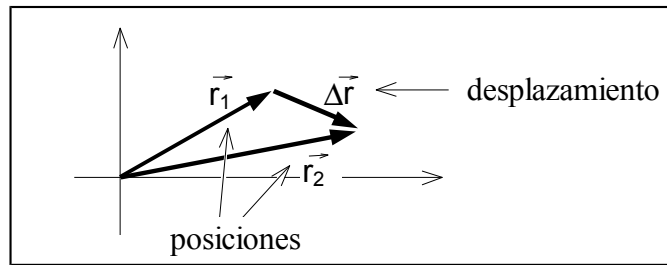


Fig. 2. Esquema fundamental para la enseñanza de la dinámica que proponemos.

- 2) Se define el vector velocidad. Se hace la construcción habitual para mostrar que es tangente a la trayectoria. Se recomienda considerar intervalos infinitesimales (con toda la explicación habitual), pero se puede mantener el tratamiento en el ámbito de los intervalos finitos suficientemente pequeños. *En esta propuesta se reserva el tratamiento de la aceleración y los demás detalles de cinemática para después de la dinámica.* No se insiste aquí en las gráficas $x(t)$ con su pendiente, para no mezclar elementos que puedan ser fuente de confusiones (en esta propuesta no viene al caso hacer hincapié inicialmente en el concepto de derivada, ya que la estructura del planteo se relaciona más directamente con la integración o sumatoria).
- 3) Se define el vector cantidad de movimiento (lineal), \mathbf{p} , multiplicando por la masa el vector velocidad ($\mathbf{p} = m\mathbf{v}$). Se apela a la idea que ambos son proporcionales y que tienen prácticamente el mismo referente para realizar abundante ejercitación, aprovechando todas las oportunidades para dibujar vectores \mathbf{p} y vectores \mathbf{v} en muchos casos diferentes.
- 4) Se enuncian las leyes de la dinámica. La segunda ley se enuncia en la forma $\mathbf{F}_R \Delta t = \Delta \mathbf{p}$, o $\mathbf{I} = \Delta \mathbf{p}$, definiendo el impulso aplicado por una fuerza $\mathbf{I} = \mathbf{F} \Delta t$. Nuevamente se recomienda plantear intervalos infinitesimales, pero eso no es esencial a la propuesta. El referente para el vector impulso es la fuerza, pero con la diferencia importante y que debe desta-

carse, que cualquier fuerza que se aplique *requiere tiempo* para producir un efecto sobre el movimiento. El efecto será una variación de \mathbf{p} , o si se lo prefiere, de \mathbf{v} , y *crece con el tiempo que se mantiene aplicada la fuerza*. Este último resaltado es un elemento conceptual importante que debe destacarse en las aplicaciones.

5) Se hacen ejercicios en los cuales se ponen en juego las leyes. Estos ejercicios van descubriendo paulatinamente detalles de cinemática, pero *no se quedan en ella*. Las gráficas que hay que hacer en ellos son dibujos de trayectorias con vectores \mathbf{p} , vectores \mathbf{v} , vectores \mathbf{I} , o vectores \mathbf{F} . O diagramas vectoriales donde se muestra la relación entre $\mathbf{p}_{\text{inicial}}$, \mathbf{I} , y $\mathbf{p}_{\text{final}}$. Se discute si la trayectoria es curva o no. Qué pasa a lo largo de la trayectoria y qué pasa transversalmente a ella. Se analiza a qué intervalo de tiempo corresponde \mathbf{I} , y a qué instantes corresponden $\mathbf{p}_{\text{inicial}}$ y $\mathbf{p}_{\text{final}}$. Si la mano ya soltó a la piedra, o si aún la está impulsando, etc.

Se hace intervenir el rozamiento, la resistencia del aire, la viscosidad de los fluidos, etc.; esto es posible porque *no se espera poder hallar $x(t)$, sino poder decir si v disminuye, si lo hace más o menos, si la trayectoria se curva más o menos, etc.* Esto es muy importante porque se pueden encarar numerosas situaciones cotidianas de gran interés.

Una y otra vez se realiza (con otras letras) la misma figura que antes se necesitaba para entender la aceleración (figura 3).

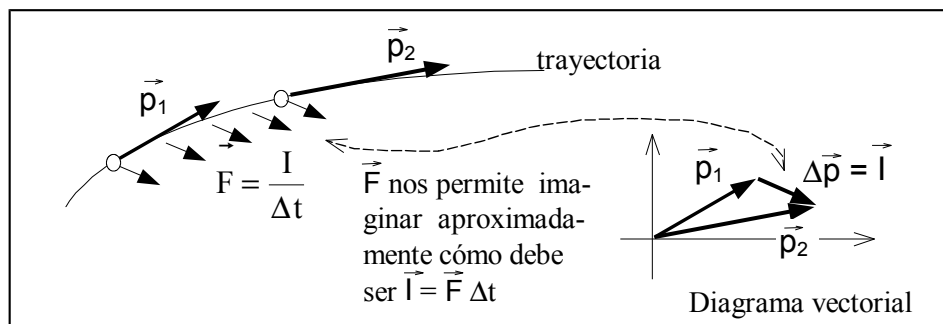


Fig. 3. El esquema básico de esta propuesta.

6) Finalmente se completa el curso con lo que sea necesario en cada lugar. Éste es un buen momento para el teorema del trabajo y la energía cinética. Luego, en la Facultad de Ciencias Químicas, por ejemplo, donde esta propuesta lleva varios años de funcionamiento, se utilizan estas leyes para tratar los choques entre partículas con los cuales se desarrolla la teoría cinética de los gases.

7) Y finalmente le llega el turno a los aspectos cinemáticos de muchos movimientos típicos, que podrán ser acompañados de reflexiones basadas en las leyes mecánicas a cada paso. En ese momento es posible extenderse en el tratamiento de algunas gráficas $x(t)$, $v(t)$, etc., que ya no podrán ocupar el lugar de los conceptos fundamentales. Ahora se puede definir la aceleración, no ya como la clave sin la cual no se podrá comprender la mecánica, sino como un concepto más que enriquece los tratamientos.

Es importante cerrar esta descripción destacando algunos elementos.

Por un lado digamos que la forma en que interviene el tiempo en las leyes establece una diferencia importante entre esta propuesta y la tradicional. En la propuesta tradicional la presencia del intervalo de tiempo en el denominador, en $a = \Delta v / \Delta t$, o en $F = \Delta p / \Delta t$, lleva directamente a razonar en términos de *ritmos de variación*, y a operar matemáticamente con derivadas. En esta propuesta el intervalo de tiempo en el numerador lleva a razonar en términos de *suma o acumulación de efectos*, y a operar matemáticamente con integrales.

Vemos cómo cada cosa tiene ventajas y desventajas. Cuando se trabaja con cálculo infinitesimal, por ejemplo en el nivel universitario, es más simple operar con derivadas que con inte-

grales. Pero en cualquier nivel los conceptos y los razonamientos son decididamente más simples y directos cuando están organizados en términos de cantidades acumuladas, que en términos de ritmos de variación.

Las ideas sobre cómo una fuerza aplicada transversalmente puede cambiar el curso de un movimiento, no sólo están expresadas en las leyes de la dinámica, sino que están muy arraigadas en la vida diaria y en la física intuitiva de los alumnos, al punto que a veces tratan de expresarlas componiendo el vector velocidad inicial con el vector fuerza aplicada para obtener un vector representativo de algo no muy bien definido relacionado con la velocidad final. Esta propuesta facilita que cada vez que un alumno quiera componer un vector velocidad con un vector fuerza, pueda tomarse esa idea como punto de anclaje para la idea correcta: que la velocidad debe ser multiplicada por la masa, ya que a mayor masa la misma fuerza influirá menos, y que la fuerza debe ser multiplicada por el intervalo de tiempo durante el cual actúa, ya que la duración de éste hará aumentar proporcionalmente el efecto. Así se transforma directamente una idea intuitiva del alumno, en la ley fundamental de la dinámica: $P_{\text{inicial}} + \mathbf{I} = P_{\text{final}}$.

Comentarios de cierre

De acuerdo con muchos autores, consideramos que la solución de los problemas asociados con el aprendizaje de la dinámica no vendrá de la mano de un solo recurso, sino que deberá buscarse en toda una serie de cambios metodológicos que involucren muchos aspectos del complejo contexto en el que tiene lugar el proceso. En ese sentido vale destacar que una característica positiva de esta propuesta es que encierra en sí misma un cambio metodológico de cierta amplitud.

En el caso concreto de aplicación de esta propuesta en la Universidad, con alumnos que en principio no están interesados directamente en los temas de física, se puede afirmar que los resultados son buenos, pero los alumnos siguen teniendo muchas dificultades para comprender diversas características de los movimientos. Ahora bien, cuando en un examen final se encuentra que aproximadamente el 50 % de los alumnos, después de haber cursado la materia organizada de esta manera, fracasa para explicar el efecto que produce sobre el movimiento de un cuerpo la aplicación de una fuerza transversal durante un cierto intervalo de tiempo, no se puede evitar pensar: *¡qué abismalmente lejos de la posibilidad de generar explicaciones básicas estarían estos alumnos si hubieran recibido un curso tradicional!*

Algunas palabras acerca de la enseñanza en el nivel medio

La enseñanza universitaria constituye un referente natural para la escuela media, que en cierta medida se siente obligada a capacitar para los niveles superiores, porque además los profesores de física de los niveles no universitarios aprenden dinámica de la manera tradicional que se ha descrito, y *no conocen que puede haber otra forma de enseñarla*. De manera, que el problema que plantea el concepto de aceleración en la enseñanza de la dinámica se transfiere muy agravado a los niveles medio y terciario. Y tal vez la mayor virtud y ambición de esta propuesta podría ser influir en el nivel medio a través de una formación diferente de sus profesores, y a través de cambios en sus mencionados referentes universitarios.

La propuesta presentada aquí se adapta al nivel medio con las mismas limitaciones con las cuales se adapta la enseñanza universitaria tradicional. Los incrementos infinitesimales se sustituyen por incrementos finitos, las fuerzas se mantienen constantes en la mayoría de los casos, etc. Hay que seleccionar los problemas y ejercicios de aplicación adaptándolos al ni-

vel, determinando previamente con cuidado lo que se espera lograr.

Podría, por ejemplo, iniciarse el tratamiento de los temas de mecánica en el nivel medio con un trabajo consistente en muchos análisis cualitativos de movimientos con abundantes dibujos de vectores fuerza y velocidad sobre las correspondientes trayectorias, discutiendo las relaciones entre ellos sobre la base de *leyes cualitativas* (enunciadas para tal efecto) que describiran los diferentes efectos que la aplicación de una fuerza tiene sobre el movimiento (dirección y rapidez) de un cuerpo. Esto tendría una continuidad natural con el tratamiento cuantitativo para hacer según la propuesta de estas páginas en una etapa posterior, en la universidad si fuera el caso.

Bibliografía

Pozo, J.I., Gómez, M.A., *Enseñar y Aprender Ciencias*, Ed. Morata, Madrid, 1998.

Carrascosa, J., Gil, D., La metodología de la superficialidad y el aprendizaje de las ciencias, *Enseñanza de las Ciencias*, **3**, [2], 113-120, 1985.

Viennot, L., Spontaneous learning in elementary dynamics, *European Journal of Science Education*, **1** [2], 205-221, 1979.

Watts, D.M., Zylbersztajn, A., A survey of some children's ideas about force, *Physics Education*, **16**, [6], 360-365, 1981.

Received 11.03.2002, accepted 15.09.2002