

EL PAPEL DE LA EXPERIMENTACIÓN EN LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA

Julia Salinas

Departamento de Física - Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología

Universidad Nacional de Tucumán (Argentina)

Correo electrónico: jsalinas@herrera.unt.edu.ar

Resumen

Se mencionan cuestiones estrechamente vinculadas con el carácter experimental de la Física que podrían ser incorporadas bastante fácilmente en la totalidad de las actividades de enseñanza-aprendizaje de la física y no sólo en los trabajos prácticos de laboratorio, pero que sin embargo muchas veces no son debidamente atendidas en las aulas. En Física la experimentación juega un doble papel: controlar la validez de hipótesis previas y suscitar conjeturas que orientan desarrollos teóricos posteriores. En ambos casos es de crucial importancia la información factual a la que se accede mediante observaciones y experiencias.

Introducción

La Física es una compleja ciencia de la naturaleza, cuya caracterización ha generado (y genera) extensos estudios y profundos debates. Es posible, interesante, deseable y beneficioso, que los actores del proceso educativo nos involucremos en la dilucidación de cuestiones controvertidas pertinentes para la educación en ciencias. Sin embargo, la existencia de un campo abierto a la confrontación de visiones alternativas sobre particularidades de esta disciplina, no debe oscurecer la presencia de importantes consensos sobre rasgos que le son propios. En particular, a partir de extensa experiencia con alumnos y colegas, hemos encontrado fértil para el aprendizaje y la enseñanza de la Física, pensar que su cuerpo de conocimientos se apoya en cuatro fuertes principios que afirman, respectivamente, lo siguiente:

El mundo natural es externo y accesible a la inteligencia humana (hay una realidad que existe por sí misma, independientemente del sujeto; el raciocinio humano puede conocer esa realidad en alguna medida).

Los fenómenos naturales están regidos por leyes que pueden ser identificadas en casos simples (la simplificación es un medio para posibilitar el trabajo teórico; dada la extrema complejidad de los sucesos y procesos reales, para acceder a las leyes generales es menester idealizar las situaciones; hay pocas regularidades en el nivel de los hechos observables porque en el mundo natural, los fenómenos simples -y las leyes que los rigen- se combinan de maneras complejas).

Las leyes pueden ser expresadas en lenguaje matemático (el lenguaje matemático es empleado en la Física para cuantificar, estructurar y expresar enunciados sobre sucesos y procesos del mundo físico; así se ganan precisión, poder deductivo y elegancia formal).

Las teorizaciones se contrastan severamente (el conocimiento científico sobre el mundo natural es verificable; además de presentar validez lógica, confirma la adecuación a los hechos mediante la observación o la experimentación).

Estos principios son parte de una visión que podría ser caracterizada como “realista científica”. Ninguno es banal u obvio y cada uno de ellos podría dar lugar a precisiones, matizaciones (y también desacuerdos) que ocuparían páginas. Pero cuentan con fuerte fundamentación desde el campo de la Epistemología (ver, por ejemplo, Chalmers 1992) y se muestran aptos para orientar la educación científica (ver, por ejemplo, McComas 2000). Se los propone como marco para reflexionar sobre el papel de la experimentación en la enseñanza de la Física.

La Física, una ciencia factual madura

La Física conoce el mundo empleando idealizaciones, herramientas lógico-matemáticas y un complejo ir y venir entre formulación y validación de enunciados (Bachelard 1974). A fin de no distorsionar la naturaleza del saber que se pretende aproximar a los estudiantes, es menester que en el aula los modelos, los enunciados formales y la relación teoría-control empírico se empleen con criterios y procedimientos coherentes con los usados en la actividad científica.

Las idealizaciones y la experimentación

Toda la riqueza y heterogeneidad de los fenómenos naturales percibidos por la experiencia sensible es reemplazada en la Física por modelos de la realidad. Estos modelos son abstractos (intelectuales, no inmediatamente sensibles) y generales (los hechos singulares son considerados como casos de pautas generales). Son representaciones simplificadas, que sólo tienen en cuenta algunas de las variables que intervienen, y algunas relaciones entre esas variables, y que permiten estudiar los fenómenos en aquello que subyace como aspecto común a la diversidad aparente. El conocimiento que se elabora sobre la naturaleza trasciende a los hechos, no tiene a los fenómenos naturales como referentes inmediatos sino mediatos (Bunge 1980).

Pero aún cuando los conceptos y leyes de la Física están lejos de ser representaciones icónicas de la realidad, ellos se construyen teniendo como objetivo interpretar, explicar y predecir esa realidad. Las hipótesis, por lo tanto, deben confrontarse con las situaciones fenoménicas, para lo que es necesario traducir la proposición conceptual en datos experimentales y comparar el resultado empírico con el resultado previsto por la teoría. Si la diferencia entre ambos valores (el medido experimentalmente y el predicho teóricamente) permanece por debajo de la cota de incerteza experimental, se considerará que la hipótesis ha sido confirmada en ese caso particular.

Veamos un ejemplo sencillo. Supongamos, por ejemplo, que para un sistema masa-resorte, la teoría de oscilaciones libres predice un período de 1,34 seg (que calculamos con la expresión $T = 2\pi \sqrt{m/k}$). Determinamos a continuación el período de oscilación del sistema con otro procedimiento (por ejemplo, medimos el tiempo t de N oscilaciones y calculamos $T = t / N$) y obtenemos el valor 1,36 seg. ¿Vale la teoría? ¿La discrepancia es aceptable, y debe ser interpretada como una aproximación a la teoría, o por el contrario la discrepancia es un mentís a la teoría?

La noción de error experimental brinda elementos para zanjar la controversia: es menester estimar la imprecisión con que se han obtenido los valores 1,34 s y 1,36 s. Ambos valores, entonces, se expresarán como intervalos de valores posibles (y no como puntos de la recta numérica). Podrá así formularse una conclusión fundamentada: si la intersección de ambos intervalos no es vacía, teoría y experiencia son compatibles dentro de la precisión con que se realizó el control.

En el ámbito de la comunidad científica, estas decisiones, lejos de circunscribirse al ámbito de los laboratorios, impregnan la totalidad de las actividades de elaboración del conocimiento de la Física. En el proceso educativo en Física la experimentación debe recuperar el sentido y la riqueza derivados del papel que desempeña en la Ciencia como puente entre las teorizaciones y la realidad. Para ello es menester concebirla integrada a estrategias educativas que rompan con la separación acientífica entre clases teóricas, problemas, prácticas de laboratorio, evaluación (Gil Pérez et al. 1999). En este contexto, la noción de incerteza experimental, lejos de reducirse a un cálculo rutinario, pesado o tedioso, restringido al ámbito del laboratorio, se revela como información de capital importancia en todas las actividades de enseñanza para poder establecer vínculos científicos entre teoría y realidad.

Las herramientas lógico-matemáticas y la experimentación

En este apartado prestaremos atención a dos aspectos: las cifras significativas; y los enunciados necesarios y contingentes.

Las cifras significativas

La Física trabaja con magnitudes. Las magnitudes son funciones que a dados hechos hacen corresponder determinados números reales, o determinados vectores, que provienen de una medición. Se llama “cifra significativa” a cada dígito que ha sido medido. Así, la medición “4 seg” tiene 1 cifra significativa, mientras la medición “4,0 seg” tiene 2 cifras significativas.

A diferencia de lo que ocurre con los números reales en el campo de la Matemática (que se conocen con una precisión de tantos dígitos como se quiera), el valor numérico asociado a una magnitud medida tiene una exactitud limitada (resultante del método y de los instrumentos empleados). Así, no hay ni la más mínima duda de que para el valor del octavo dígito después de la coma decimal es 5, o de que para un número natural cualquiera todos los dígitos después de la coma decimal son ceros, etc. Pero sí hay grandes dudas (de hecho, hay un total desconocimiento), por ejemplo, sobre las décimas (y las centésimas, milésimas, etc. etc.) de segundo de un intervalo de tiempo que ha sido medido con un sistema experimental que sólo es capaz de brindar información hasta los segundos.

El carácter experimental de la Física trae como consecuencia, que permanentemente se recurra a valores medidos. La comunidad científica controla cuidadosamente la exactitud cuantitativa, y aplica de manera sistemática un criterio básico que establece que cuando las situaciones tratadas requieren realizar operaciones matemáticas con cantidades que representan valores de magnitudes, deben conservarse las cifras significativas (ni más, ni menos, que las que corresponden).

Este criterio debe ser incorporado de manera sistemática en las actividades educativas en Física toda vez que se manejen valores asociados a magnitudes medidas, y tiene que ver, nuevamente, con el hecho de que el carácter experimental de la Física debe permear todas las actividades en el aula si se pretende una enseñanza que favorezca una correcta adquisición del saber de la disciplina. Tanto el redondeo en exceso de los valores (vale decir, la pérdida injustificada de cifras significativas) cuanto el redondeo en defecto (vale decir, la aceptación injustificado de cifras no significativas), desvinculan entre sí los valores de las magnitudes y sus significados empíricos, y desvalorizan ante los estudiantes la importancia de la precisión cuantitativa fáctica que caracteriza el saber físico.

Enunciados necesarios y enunciados contingentes

En el cuerpo de conocimientos de la Física intervienen enunciados con significado formal (vinculados al sistema que cuantifica y da coherencia lógica) y enunciados con significado existencial (vinculados al mundo) (Hanson 1973).

La validez de los enunciados formales está regida exclusivamente por las reglas lógicas (postulados, definiciones, principios de formación de los enunciados y principios de inferencia) aceptadas en la teoría en que intervienen. Si en todas las operaciones en las que interviene un enunciado formal se respetan las reglas lógicas establecidas, éste queda demostrado (probado concluyentemente). La validez es *necesaria*.

En cambio, para establecer la verdad de un enunciado existencial, la satisfacción de un sistema lógico es condición necesaria pero no suficiente. Sólo el control empírico puede decir si el enunciado es adecuado a su objeto. Y aún si la respuesta es afirmativa, el carácter de verdadero es provisorio, pues no queda excluida la posibilidad de que un futuro enunciado muestre mayor adecuación al trozo de realidad al que refiere la teoría. Sólo se muestra que el enunciado es plausible (posible). La verdad es *contingente*.

Esta distinción parece simple y clara, casi obvia. Sin embargo, en el proceso educativo en Física surgen problemas cuando se la debe aplicar o reconocer en casos concretos, pues se confunden

enunciados de diferente tipo entre sí. No siempre se comprende que los enunciados que sólo plantean relaciones entre signos, brindan sólo información formal, aún cuando los signos tengan referentes fácticos. Tal es el caso en las definiciones (por ejemplo, los enunciados que establecen que las componentes de la velocidad instantánea son iguales, numéricamente, a las derivadas de las coordenadas respecto al tiempo, son enunciados formales, necesarios, que ninguna experiencia puede refutar). También es el caso de las convenciones adoptadas para valores de referencia (por ejemplo, el valor de la constante dieléctrica del vacío coincide necesariamente con el número natural 1; en otras palabras, " $K_{\text{vacío}} = 1$ " es un enunciado formal, no fáctico; la igualdad no es contingente sino necesaria; no está determinada por la naturaleza sino por reglas lógicas independientes de toda observación o experimentación; si los aislantes modificaran repentinamente su comportamiento, el valor de la constante dieléctrica del vacío no se modificaría).

También genera confusiones el hecho de que una misma proposición pueda actuar como enunciado formal en un contexto y como enunciado fáctico en otro. Un ejemplo que suele despertar mucho interés en estudiantes y profesores remite a la conocidísima expresión "Fuerza = masa x aceleración". En un contexto en el que se hayan definido previamente los conceptos "fuerza" y "aceleración" y no se haya definido de manera independiente el concepto "masa", la relación puede emplearse para definir el valor numérico de la magnitud "masa" en términos de los valores numéricos de las magnitudes "fuerza" y "aceleración". En ese caso, se trata de un enunciado formal, necesariamente válido en el contexto en cuestión. Pero en otro contexto, en el que se hayan definido previamente de manera independiente los conceptos "masa", "aceleración" y "fuerza", la relación expresa una (probable) relación entre valores numéricos de magnitudes, cuya verdad o falsedad debe ser establecida con ayuda de la observación y la experimentación.

La Física es una ciencia experimental y su saber habla sobre el mundo, pero no todos los enunciados que conforman su cuerpo de conocimiento tienen significado factual. Comprender esto y saber interpretar y actuar en consecuencia, es parte de un adecuado aprendizaje de la disciplina. Favorecer esta comprensión, debe ser parte de estrategias que atribuyan un correcto papel a la experimentación en la enseñanza de la disciplina.

La formulación de enunciados, la validación de enunciados y la experimentación

En los dos apartados anteriores hemos mencionado cuestiones estrechamente vinculadas con el carácter experimental de la Física que podrían ser incorporadas bastante fácilmente en la totalidad de las actividades de enseñanza, pero que sin embargo muchas veces no son debidamente atendidas en las aulas.

Atenderemos ahora brevemente algunos aspectos relacionados con la realización de trabajos prácticos en el laboratorio. Hemos dejado esta cuestión para el final a fin de enfatizar que la incidencia del carácter experimental de la Física en la enseñanza de la disciplina, no debe reducirse al desarrollo de labor experimental concreta por parte de los estudiantes, a pesar de la gran importancia que atribuimos a la realización de dicha labor, y de la imperiosa necesidad de incorporarla habitualmente entre las estrategias de enseñanza.

Cabe, en primer lugar, alertar sobre las serias distorsiones presentes en dos orientaciones bastante extendidas para las prácticas de laboratorio. El trabajo experimental de los estudiantes no puede reducirse a una mera ilustración de la teoría, ya que esta reducción desvirtúa el papel que la experimentación desempeña en el campo científico y empobrece el potencial formativo de los laboratorios. Tampoco puede concebirse como un entrenamiento en supuestos métodos científicos, pues la separación dicotómica entre método y contenido que subyace a esta orientación distorsiona el genuino espíritu de la labor científica, en la que toda habilidad "práctica" depende fuertemente del contexto y tiene una clara componente "conceptual".

Puede ser conveniente destacar, también, que en la Física, la experimentación juega un doble papel: controlar la validez de hipótesis previas y suscitar conjeturas que orientan desarrollos teóricos posteriores (Blanché 1980). En ambos casos es de crucial importancia la información factual a la que se accede mediante observaciones y experiencias.

Este doble papel de la experimentación puede ponerse en evidencia en el aula con sistemas experimentales muy sencillos, y de muy bajo costo. El análisis experimental de un sistema masa-resorte, por ejemplo, permite controlar la validez de las expresiones teóricas deducidas para movimientos oscilatorios libres sin amortiguamiento. Estas expresiones teóricas en general suelen ser aceptables para el período de un sistema real en aire, pero no para la amplitud, dentro de la precisión experimental que se puede alcanzar con reglas milimetradas y cronómetros manuales. El proceso de control plantea entonces preguntas que exceden la capacidad explicativa de la teoría de oscilaciones libres sin amortiguamiento y orienta un proceso de construcción conceptual (la incorporación de un nuevo término en la ecuación de movimiento que tenga en cuenta el efecto del roce viscoso).

En general, cabe resaltar la conveniencia de que la labor desarrollada en los laboratorios de Física escolares sea coherente con la actividad científica: los trabajos prácticos han de cubrir todas las fases de una investigación y no quedarse reducidos a la parte experimental (Gil Pérez 1993). Esto implica que los estudiantes:

- Realicen prácticas que planteen situaciones problemáticas de interés, abordables con los conocimientos y el equipamiento disponibles.

- Enfrenten esas situaciones con tratamientos que complementen aspectos cualitativos y cuantitativos.

- Consulten antecedentes de estudios vinculados con el tema.

- Acoten el problema a tratar, las condiciones en que se lo hará, las variables significativas, las conceptualizaciones relevantes, etc. (en otras palabras, que practiquen la modelización).

- Propongan hipótesis.

- Conciben diseños alternativos aptos para controlar la validez de esas hipótesis.

- Pongan en práctica esos diseños y analicen la coherencia de los resultados obtenidos, cotejándolos con los que reportan otros que han estudiado el mismo problema (u otros problemas relacionados) y con las predicciones de las hipótesis que se están contrastando.

- Reformulen eventualmente el marco teórico y/o metodológico, la modelización, las hipótesis de trabajo, etc.

- Identifiquen perspectivas que quedan abiertas para futuras investigaciones.

- Elaboren informes sobre el trabajo realizado.

Unas pocas palabras finales

Sin un vínculo claro entre los desarrollos teóricos modelados y los fenómenos reales, la física no aparece ante los estudiantes como una ciencia de la naturaleza. Aislado de criterios que permitan salvar la brecha entre la teorización y los comportamientos reales, el método científico hipotético-deductivo puede transformarse para ellos en un juego de ficciones ingeniosas sin relación con el mundo real y el empleo de lenguaje matemático puede reducirse a una ejercitación numérica sin significado fáctico.

Demasiadas veces los docentes reducimos la enseñanza a una especie de “presentación de resultados”, mediante un discurso centrado en la definición de conceptos y el desarrollo de leyes y teorías que los estudiantes no logran conciliar con el mundo real ni con sus propias ideas y representaciones sobre ese mundo natural.

Los estudiantes deben ser incorporados al análisis de modos en que los supuestos de los modelos teóricos se adecuan a los sistemas reales. Estas cuestiones son muy importantes desde el punto de

vista de su comprensión del conocimiento de la física. De otro modo es difícil que atribuyan significado a la física del aula, que es válida en circunstancias que no les quedan claras.

En este trabajo hemos intentado mostrar que el papel de la experimentación en la enseñanza de la Física excede largamente el trabajo en el laboratorio, y para ello hemos mencionado aspectos concretos, vinculados al carácter experimental de la disciplina, que pueden ser incorporados a las diversas estrategias educativas desarrolladas en las aulas: introducción de conceptos, resolución de problemas de lápiz y papel, evaluación y, por supuesto, prácticas de laboratorio.

Referencias bibliográficas

- BACHELARD G., 1974, *La formación del espíritu científico* (Siglo Veintiuno Editores, Buenos Aires)
- BLANCHÉ R., 1980, *El método experimental y la filosofía de la física* (Fondo de Cultura Económica, México)
- BUNGE M., 1980, *La ciencia, su método y su filosofía* (Ediciones Siglo Veinte, Buenos Aires)
- CHALMERS A., 1992, *La ciencia y cómo se elabora* (Siglo Veintiuno de España Editores, Madrid)
- GIL PÉREZ D., 1993, Contribución de la historia y la filosofía de las ciencias al desarrollo de un modelo de enseñanza / aprendizaje como investigación, *Enseñanza de las Ciencias*, 11(2)
- GIL PÉREZ D., FURIÓ C., VALDÉS P., SALINAS J. et al., 1999, ¿Tiene sentido seguir distinguiendo entre aprendizaje de conceptos, resolución de problemas de lápiz y papel, y realización de prácticas de laboratorio?, *Enseñanza de las Ciencias*, 17(2)
- HANSON N.R., 1973, Sobre la estructura del conocimiento físico, en la compilación de S. Elam *La educación y la estructura del conocimiento* (Ed. El Ateneo, Buenos Aires)
- MCCOMAS W., 2000, *The nature of science in science education* (Kluwer Academic Publishers, The Netherlands)