
COMO ENSEÑAMOS Y COMO APRENDEN LOS ESTUDIANTES: ¿UN DESAJUSTE? - Primera Parte

LILLIAN C. McDERMOTT

Physics Department FM-15, University of Washington, Seattle, WA 98195, USA

Traducción: Licenciada Mercedes Vendramini de Sánchez con la revisión de A. P. Maiztegui.

ched to the needs and abilities of most students, especially at introductory level.

RESUMEN

Los resultados de la investigación en Educación en la Física han indicado que en todos los niveles de enseñanza hay una brecha amplia entre la Física que se ha enseñado a los estudiantes y la que ellos han aprendido. Estos hallazgos sugieren la presencia de otro tipo de discrepancia en la enseñanza de la Física. ¿Hay un desajuste entre cómo nosotros enseñamos y cómo los estudiantes aprenden? La respuesta a esta pregunta tiene que ver directamente con cualquier esfuerzo para introducir tópicos de física moderna en un programa corriente. En este trabajo, se argumenta que la forma en la cual tradicionalmente se enseña Física, no se ajusta bien a las necesidades y aptitudes de la mayoría de los estudiantes, especialmente en el nivel introductorio.

ABSTRACT

Results from research in physics education have indicated that at all levels of instruction there is often a wide gap between the physics that student have been taught and that they have learned. These findings suggest the presence of another type of discrepancy in physics instruction. Is there a mismatch between how we teach and how students learn? The answer to this question has a direct bearing on any effort to introduce topics from modern physics into the standard curriculum. In this pattern, the argument is made that the way in which physics is traditionally taught is not well mat-

Introducción

Todos los que enseñamos física, ya sea en el nivel secundario o el universitario, estamos al tanto de la brecha entre nuestro conocimiento de lo que está pasando hoy en la Física, y la visión que les damos a los estudiantes. Algunos de nuestros colegas critican la tendencia general a enseñar la materia, por razones intelectuales o motivacionales, como ha venido siendo enseñada por más de cincuenta años. Se preocupan porque los estudiantes no se benefician con una comprensión más profunda del mundo físico. También se preocupan porque al perder todo el entusiasmo generado por los adelantos de hoy, los estudiantes encuentran a la Física aburrida e irrelevante. La preocupación por la discrepancia entre el curriculum tradicional y la práctica corriente ha llevado a mucha discusión sobre la manera en que podemos modificar la enseñanza para mejorar el ajuste entre la Física que se enseña a los estudiantes y lo que los físicos saben y realmente hacen.

Para iniciar el tema en esta conferencia parece razonable preguntar si hemos aprendido algo de nuestra experiencia colectiva al enseñar la Física clásica que pudiese ser útil para la presente tarea. Afortunadamente, ya no tenemos que apoyarnos, como alguna vez hicimos, en una memoria

individual anecdótica. En los quince años pasados, físicos en diferentes países han venido contrubuyendo al crecimiento de un nuevo campo de investigación educativa: el aprendizaje y la enseñanza de la Física. Los resultados de la investigación en enseñanza de la Física, han indicado que en todos los niveles de enseñanza hay frecuentemente una amplia brecha entre la Física que se ha enseñado a los estudiantes y la que ellos han aprendido. Estos hallazgos sugieren la presencia de otro tipo de discrepancia en la enseñanza de la Física.

¿Hay un desajuste entre cómo nosotros enseñamos y cómo los estudiantes aprenden? La respuesta a esta pregunta tiene una relación directa con cualquier esfuerzo para introducir tópicos de Física moderna en curriculum corriente. En este trabajo se argumenta que la forma en que tradicionalmente se enseña Física no se ajusta bien a las necesidades y aptitudes de la mayoría de los estudiantes, especialmente en el nivel introductorio.

Enseñanza tradicional

La enseñanza tradicional de la Física, tanto en la escuela secundaria como en los cursos universitarios, se ha basado en la visión que el docente tiene de la materia y en su percepción del estudiante. La mayor parte del atractivo de la Física para un físico es la generalización y la síntesis del mundo natural hechas posible por la comprensión del tema. Los físicos con frecuencia encuentran estimulante la sensación de poder intelectual que resulta al ser capaz de predecir el cambio de un sistema físico ya sea, generado internamente o impuesto externamente. Hay una satisfacción estética en ser capaz de explicar una multitud de fenómenos diversos, aparentemente sin relación, en término de unos pocos principios básicos. Recordando como fueron inspirados por su propia experiencia con la Física básica, muchos docentes tienden a

imaginar a sus estudiantes como versiones jóvenes de ellos mismos. En la realidad esta descripción se ajusta sólo a una muy pequeña minoría.

La mayoría de los docentes de física son conscientes y están firmemente comprometidos con su materia. Ellos están ansiosos por transmitir sus conocimientos y su entusiasmo a los estudiantes. Habiendo obtenido una visión particular después de horas, días, meses, o años de esfuerzo intelectual, quieren compartir este conocimiento con sus estudiantes. Para ahorrarles a los estudiantes el problema de tener que pasar a través de las mismas dificultades que ellos han experimentado, los docentes con frecuencia enseñan desde el principio a lo último, desde lo general a lo particular. Con frecuencia las generalizaciones están completamente formuladas cuando son presentadas y se les muestra a los estudiantes cómo aplicarlas a problemas específicos. Hay involucrado muy poco pesamiento inductivo, el razonamiento es casi totalmente deductivo, el estudiante no está incorporado activamente al proceso de generalización y abstracción. Al presentar a los estudiantes unos pocos principios generales y mostrándoles cómo éstos pueden ser aplicados a unos pocos casos especiales, los docentes esperan enseñar a los estudiantes a hacer lo mismo en situaciones nuevas. Como resultado de esta experiencia, se espera que los estudiantes no sólo adquieran un conocimiento y habilidades específicas sino también que llegarán a apreciar la belleza y el poder que el físico encuentra en la Física.

El desarrollo del programa refleja generalmente las actitudes y prácticas que caracterizan típicamente la enseñanza de la Física. El problema con el enfoque tradicional que ignora la posibilidad de que la percepción de los estudiantes pueda ser muy diferente de la del docente.

El mismo material de enseñanza puede parecer muy distinto a los docentes, d

que éste puede aparecer a los estudiantes. Tal vez la mayoría no esté preparada para aprender lo que nosotros queremos que aprendan con el programa que hemos elaborado. Para ser efectivo, un programa debe encontrar a los estudiantes en su estado de desarrollo intelectual presente y ayudarlos gradualmente a profundizar su comprensión.

Enseñanza vs Aprendizaje: Generalizaciones y evidencias básicas

En esta sección, ofrecemos algunas generalizaciones sobre aprendizaje y enseñanza de la Física, y presentamos algunas de las evidencias, a partir de investigaciones, que hemos empleado al hacer esta síntesis. Hemos reunido los datos usados para apoyar las generalizaciones, en muchos años de investigaciones sistemáticas de la comprensión por el alumno de varios tópicos de un programa tradicional. Nos basamos sólo en los resultados de nuestras propias investigaciones, si bien los hallazgos de otros investigadores igualmente servirán bien en varias instancias. La razón para esta elección es el conocimiento detallado que tenemos de los estudios que nosotros mismo hemos conducido y en nuestra larga experiencia en enseñar los temas involucrados.

Como no hemos realizado investigaciones sobre la comprensión del estudiante de la Física Moderna y como tenemos una experiencia limitada en enseñar tales tópicos, no damos ejemplos de Física Moderna. Sin embargo estamos convencidos de que las implicaciones que hemos obtenido tienen amplia aplicabilidad en esa rama ¹.

Para proveer un encuadre de la discusión, presentamos unos pocos ejemplos específicos del tipo de cuestiones que nosotros presentamos a los estudiantes. Las usamos

¹Nuestro lector tenga presente que este trabajo fue presentado en la Conferencia sobre enseñanza de la Física Estadística, Badajoz, España. Julio de 1992.

como una prueba en la investigación para examinar tanto el nivel de comprensión de conceptos importantes como también la habilidad para hacer el razonamiento necesario para aplicar los conceptos en situaciones físicas simples. Las preguntas son realizadas durante entrevistas de demostración individuales y también en pre-tests, post-tests y exámenes escritos.

1. La habilidad para resolver problemas cuantitativos estandar no es un criterio adecuado para la comprensión funcional.

Con frecuencia, el criterio más usado en la Enseñanza de la Física como una medida del dominio de la materia es la performance en problemas cuantitativos estándar. Como garantía de haber alcanzado el nivel de un curso muchos estudiantes que completan un curso típico de Física básica, universitario o secundario, pueden resolver tales problemas satisfactoriamente. Sin embargo, con frecuencia dependen de fórmulas memorizadas y pueden no entender una relación entre conceptos. Como resultado no desarrollan una comprensión funcional de la física, esto es, habilidades para hacer el razonamiento necesario para aplicar conceptos relevantes en situaciones no encontradas previamente.

Dificultad intelectual general: la percepción de que la clave para resolver un problema físico es encontrar la fórmula correcta.

La instrucción tradicional no desafía, sino que tiende a reforzar la suposición común en los estudiantes de que la Física es una colección de hechos y fórmulas. Desafortunadamente, esta percepción de la Física orienta su enfoque en la resolución de problemas. Esta actitud parece impregnar muchas de las dificultades de los estudiantes descriptas más adelante.

1.1. Dinámica: los teoremas de impulso-cantidad de movimiento y trabajo-energía

En un estudio realizado hace varios años, examinamos si los estudiantes que habían estudiado los teoremas de impulso-cantidad

de movimiento y trabajo-energía y resuelto los problemas asociados, podían aplicar estas relaciones a un movimiento simple, Ref 2 y 3. A los estudiantes se les pidió comparar los cambios en momento y energía cinética de dos cilindros con bases de hielo seco, que se mueven sobre una mesa (Fig.1). Los dos cilindros (uno hecho de bronce y otro de plástico) tienen masas muy diferentes pero están sometidos a fuerzas constantes e iguales entre las líneas paralelas. La fuerza es aplicada por un corriente constante de aire que fluye a través de la manguera de una aspiradora invertida que tiene pequeñas tiras de papel sujetas a su abertura. Estas sirven como espaciadores para mantener una distancia constante entre la manguera y el cilindro asegurando así que la fuerza sea constante. Los cilindros parten del reposo en la línea A y se mueven perpendicularmente a las líneas. Después de que cada cilindro cruza la línea B, el estudiante debe decidir si tienen la misma cantidad de movimiento o no, y la misma energía cinética o no. La tarea sobre comparación entre cantidad de movimiento-impulso y trabajo-energía fueron presentadas a estudiantes por primera vez durante una investigación que realizamos hace varios años. Los datos obtenidos en esta investigación se reunieron a través de entrevistas de demostración individuales, un método usado con frecuencia por nuestro grupo. Durante cada una de estas entrevistas el investigador mostraba el movimiento de los cilindros y establecía con el estudiante un diálogo que incluía tanto preguntas estructuradas como discusiones abiertas. Los 28 estudiantes que participaron en las entrevistas eran voluntarios de dos cursos de física introductorios: los alumnos distinguidos de un curso basado en álgebra y los de otro basado en cálculo infinitesimal. En cada uno de los grupos participantes en el estudio el promedio de las notas finales del curso fue algo mayor que la nota promedio del curso para el grupo total.

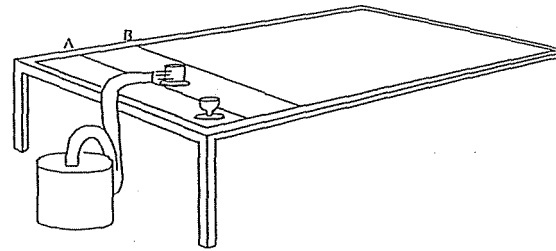


Figura 1: Configuración usada en las comparaciones impulso-cantidad de movimiento y trabajo-energía

Más recientemente estas mismas tareas fueron presentadas como pruebas escritas en un curso masivo basado en cálculo infinitesimal después que el material había sido enseñado en clase. Los estudiantes observaron la demostración experimental y escribieron sus predicciones y explicaciones que incluían un diagrama similar a la Figura 1.

1.1.1. Respuesta correcta

Una solución correcta de las dos cuestiones requiere sólo razonamiento cualitativo.

Dado que a los dos cilindros se les aplican fuerzas constantes e iguales, el cambio en la cantidad de movimiento es proporcional al tiempo que cada uno emplea para atravesar la distancia entre las líneas. Por su mayor masa, una aceleración menor es impartida al cilindro de bronce. Este, durante un tiempo mayor que emplea entre las líneas, recibe un mayor impulso. Por lo tanto, el cilindro de bronce experimenta un cambio mayor en la cantidad de movimiento que el cilindro de plástico. Como no hay fricción involucrada y los cilindros no rotan, la energía cinética total del centro de masa es igual al trabajo realizado sobre el cilindro. Dado que la misma fuerza constante es aplicada a cada cilindro a lo largo de la misma distancia, el cambio en la energía cinética es el mismo. Para que una re-

ta fuese considerada correcta durante las entrevistas individuales era necesario que el estudiante hiciese tanto la comparación correcta como un razonamiento adecuado. Si bien todos los estudiantes habían estudiado el material sobre momento y energía, no se esperaba realmente que muchos fuesen capaces de hacer el análisis correcto al observar la demostración por primera vez. Por lo tanto, mientras la entrevista progresaba, se daba a los estudiantes una creciente ayuda para que notasen las características del movimiento que se necesitaban para hacer la comparación.

Si un estudiante todavía parecía perdido, los términos "impulso" y "trabajo" eran mencionados por el investigador y se preguntaba al estudiante si estas palabras representaban ideas que se podrían aplicar a la demostración.

1.1.2. Resultados

Cuando se les pidió comparar el momento, sólo en 25% de los estudiantes distinguidos manifestaron que el momento del cilindro de bronce sería mayor que el del cilindro de plástico y dieron una explicación correcta. Después de la intervención del docente, el número de elevó eventualmente a un 65%.

La performance sobre la tarea de energía cinética fue algo mejor. Inicialmente el 50% de los estudiantes dijo que la energía cinética sería la misma. Después de la intervención del docente, 85% fueron capaces de hacer una comparación correcta y dar una explicación correcta. Casi ninguno de los estudiantes del curso basado en álgebra fue capaz de aplicar conceptos de impulso o trabajo a una comparación, ya sea de momento o energía cinética, de los dos cilindros. La intervención del investigador no pareció ayudar a estos estudiantes como lo había hecho con los estudiantes distinguidos. Los resultados de proponer en forma escrita estas dos tareas en el curso basado en cálculo infinitesimal fueron similares a los resultados de las entrevistas con los estudiantes del curso basado en álgebra. En

las preguntas escritas sólo un 5% de los estudiantes hizo una comparación correcta, ya sea para la cantidad de movimiento o la energía cinética. Dado que no fue posible dar a estos estudiantes ayuda individual, no sabemos cuántos hubiesen sido capaces de dar una respuesta correcta con el tipo de ayuda que fue dada por el investigador durante las entrevistas.

1.1.3. Ejemplos de dificultades conceptuales y de razonamiento

Al menos tan importantes como las comparaciones correctas hechas por los estudiantes, fueron sus explicaciones dadas. El razonamiento usado revela muchísimo sobre la naturaleza de sus dificultades. Los extractos de las entrevistas presentadas más adelante se basan todos en los problemas sobre trabajo-energía y han sido elegidas porque ilustran diferentes tipos de dificultades observadas con ambas tareas.

• Búsqueda de fórmulas al azar

Los comentarios que aparecen abajo fueron hechos por un estudiante relativamente lento en una entrevista. El estudiante había fallado al analizar correctamente el movimiento y se le pregunta ahora explícitamente acerca del término "trabajo":

D: "...¿Había oído Usted alguna vez el término trabajo? ¿Recuerda qué significa eso en física?"

E: "... trabajo era ... el cambio en energía cinética ... o ... déjeme pensar ... puede haber sido la fuerza multiplicada por ... No estoy seguro, creo que recuerdo la fórmula: r , F , el coseno del ángulo entre las dos. Pero nosotros hicimos problemas sobre eso y no puedo recordar exactamente."

El estudiante recuerda la fórmula que relaciona trabajo con energía cinética. Su comprensión del concepto de trabajo, sin embargo, parece limitarse a repetir los elementos de la fórmula que no recuerda. No fue capaz de conectar los símbolos con los hechos de la demostración.

• Uso de términos técnicos al azar

Si bien muchos estudiantes son capaces de decir fórmulas que definen conceptos particulares, con frecuencia fallan al discriminar entre esos conceptos en explicaciones orales de fenómenos físicos. Los comentarios que siguen fueron hechos por estudiantes al intentar comparar las cantidades de movimiento finales y las energías cinéticas de los cilindros en Fig. 1.

E₁: *"Las cantidades de movimiento de cada cilindro deberían ser iguales porque la misma fuerza actuó con igual energía sobre ambos cilindros."*

E₂: *"(Las cantidades de movimiento) son iguales porque la fuerza aplicada sobre ellos fue la misma a lo largo de la misma distancia."*

El uso indiscriminado del lenguaje refleja usualmente la naturaleza fragmentaria de la comprensión del estudiante. La falta de consistencia con frecuencia hace imposible interpretar sin ambigüedad el significado que un estudiante adjudica a un término técnico.

• Argumentos de compensación inapropiados

Parece haber una tendencia sistemática entre ambos grupos de estudiantes a hacer una particular comparación incorrecta de las energías cinéticas. La respuesta inicial de más de un tercio de los estudiantes fue que el cilindro de plástico tenía mayor energía cinética que el de bronce. El siguiente extracto ilustra el razonamiento típicamente usado por los estudiantes que cometen ese error.

D: *"¿El cilindro de plástico y el cilindro de bronce tienen igual o diferente energía cinética?"*

E: *"Pienso que el cilindro más pequeño tendrá menos energía cinética ... porque la energía cinética es $\frac{1}{2}mv^2$ y dado que v está al cuadrado, el de mayor velocidad probablemente tendrá una mayor energía cinética."*

El estudiante usa un tipo de argumento de compensación para concluir incorrectamente que la energía cinética es igual para los dos cilindros. El argumento de que la velocidad es una variable más importante que la masa al comparar las energías cinéticas, dado que la velocidad aparece al cuadrado en lugar de linealmente en la definición, es un tipo de análisis relativamente sofisticado. Sin embargo la Física esencial del problema se ha perdido. El razonamiento del estudiante se basa solamente en la definición de energía cinética y está ausente cualquier referencia a la forma en la cual el trabajo realizado sobre el cilindro está relacionado al cambio en la energía cinética.

• Uso inapropiado de las leyes de conservación

Otro error relativamente común cometido por los estudiantes fue afirmar que la energía cinética final y la cantidad de movimiento final de los cilindros eran las mismas.

Los siguientes comentarios ilustran el razonamiento utilizado por los estudiantes para sostener esta afirmación.

E₁: *"Las cantidades de movimiento son iguales. No hubo fuerzas externas actuando sobre ninguno de ellos después de la segunda marca así que la cantidad de movimiento se conservó..."*

Las energías son iguales porque no hubo fuerzas externas actuando sobre ninguno de ellos después de la segunda marca y entonces la energía cinética se conservó."

E₂: *"Tienen igual cantidad de movimiento porque ambos se movieron por la aplicación de una misma fuerza $F = dp/dt$. Tienen igual energía cinética porque todas las fuerzas son conservativas (no hay fricción)."*

E₃: *"El momento de (los cilindros) A y debería ser igual. ...Es como tener una colisión elástica porque la fuerza impartida a cada cilindro es la misma ... La energía"*

cinética debería ser igual también, dado que es como una colisión elástica así que la energía debería conservarse."

E₄: "Los momentos son iguales ... se aplica la misma fuerza como en una colisión ... por lo tanto deberían tener energía cinética idéntica porque no hubo fuerza externa actuando sobre ellos."

Cada uno de los comentarios anteriores se basa en una inapropiada aplicación del principio de conservación de la energía o de la cantidad de movimiento. Debería notarse que si bien los estudiantes obtienen un ordenamiento correcto de las energías cinéticas finales, el razonamiento que han usado para obtener la respuesta final es inconsistente con la situación física real. El argumento de que las energías cinéticas finales de los cilindros son iguales, no debería apoyarse en la conservación de la energía sino en reconocer que la fuerza externa ha hecho un trabajo igual sobre cada cilindro.

Típicamente, los estudiantes que basaron sus argumentos en leyes de conservación tendían a interpretar el término "conservación" como implicando una "igualdad" de energía cinética o de la cantidad de movimiento. Algunos estudiantes justificaron el uso de leyes de conservación sugiriendo una analogía en la situación en la cual los cilindros sufren una colisión elástica. En todos los casos los estudiantes descuidaron considerar las circunstancias bajo las cuales se mantienen las leyes de conservación, o bien fallaron al reconocer la existencia de fuerzas externas que actúan sobre los cilindros.

• Razonamiento causal incompleto

El siguiente extracto demuestra que aún cuando hubo evidencia de comprensión del trabajo y la energía cinética considerados separadamente, de esto no se deducía una comprensión de la conexión entre esos conceptos. Lo transcripto a continuación ilustra el tipo de intervención que la mayoría de los estudiantes necesitó antes de progre-

sar en las tareas de comparación:

D: "... ¿Qué ideas tiene Usted del término trabajo? "

E: Bueno, la definición que nos dan es que es la cantidad de fuerza aplicada multiplicada por la distancia.

D: Bien, ¿Está esto relacionado a lo que hemos visto aquí? ¿Cómo aplicaría Usted eso a lo que hemos visto aquí?

E: Bueno, se hace una cierta cantidad de trabajo sobre el cilindro a lo largo de la distancia entre las dos líneas verdes: está aplicando una fuerza a lo largo de esa distancia; y desde ese punto el cilindro sigue con una velocidad constante sin ninguna fuerza actuando sobre él.

D: Bien, entonces ¿nosotros realizamos la misma cantidad de trabajo sobre los dos cilindros, o distinta?

E: Realizamos la misma cantidad.

D: Nos ayuda esto a decidir sobre la energía cinética o sobre la cantidad de movimiento?

E: Bueno, el trabajo es igual al cambio en energía cinética, así que se va de energía cinética cero a una cierta cantidad después, ... entonces hace trabajo sobre cada uno ... pero las velocidades y masas son distintas así que ellas (las energías cinéticas) no son necesariamente las mismas.

Durante la mayor parte de este diálogo, la estudiante muestra un conocimiento satisfactorio del concepto de trabajo. Si bien ella menciona que el trabajo realizado es igual al cambio en energía cinética, todavía es incapaz de concluir que las energías cinéticas deben ser iguales. Ella puede enunciar el teorema trabajo-energía pero no puede concluir que los dos cilindros tienen igual energía cinética.

Debería notarse que si las entrevistas hubiesen terminado antes, la impresión hubiese sido que la comprensión de la estudiante era adecuada. Después de todo, casi

todo lo dicho fue correcto. Fue sólo después al continuar probando su respuesta, que el investigador fue capaz de determinar que la estudiante no entendía que el teorema trabajo-energía representa una relación muy especial entre el trabajo realizado y el cambio de energía cinética.

1.1.4. Comentarios

En resumen, la mayoría de los estudiantes que participaron en este estudio no interpretaron los teoremas impulso-cantidad de movimiento y trabajo-energía, como expresiones de leyes físicas que relacionan las magnitudes físicas diferentes, definidas con precisión. Aparentemente, ellos no reconocieron la relación "causa-efecto" inherente en estas ecuaciones. En cambio con frecuencia interpretaron que el símbolo "=" representa una relación matemática, en la cual las variables pueden tomar cualquier valor, siempre que la igualdad entre los dos miembros de la ecuación se mantenga.

1.2. Circuitos Eléctricos: Ley de Ohm, fórmulas para la resistencia equivalente y potencia

En un proyecto que se extendió durante muchos años, investigamos la comprensión de los estudiantes de los circuitos eléctricos. Los resultados de esta investigación se usaron para guiar el desarrollo de estrategias de enseñanza para enfrentar las dificultades que habíamos identificado. Encontramos que los circuitos mostrados en la Fig. 2, proveen un medio efectivo para sacar a luz dificultades conceptuales y de razonamiento que los estudiantes tienen con este material. Como una parte de nuestra investigación, se mostró a los estudiantes el diagrama del circuito de la Fig. 2 y se les dijo suponer que todas las baterías eran ideales (i.e. la resistencia interna es despreciable). Se les pidió clasificar las cinco lámparas iguales de acuerdo a su brillo relativo y explicar su razonamiento.

Este problema había sido dado a más de 500 estudiantes universitarios y probó ser

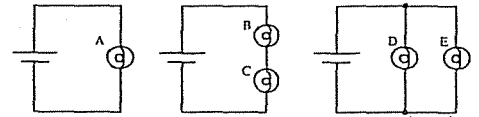


Figura 2: Se les pide a los estudiantes que listen de mayor a menor brillo los cinco bulbos idénticos que aparecen en los circuitos y que expliquen su razonamiento. Deben suponer que las baterías son ideales. La respuesta correcta es: $A = D = E > B = C$.

fructífero para extraer algunos errores de concepto. Aparecieron casi todos los ordenamientos posibles de las lámparas. Cuando fue dado en exámenes finales, aproximadamente un 10% de los estudiantes de cursos basados en álgebra y un 15% de los estudiantes de cursos basados en cálculo fueron capaces de ordenar correctamente las lámparas. Ya sea que las preguntas fueran administradas antes o después de la enseñanza no parece afectar los resultados. Nosotros hemos encontrado el mismo porcentaje de éxitos entre estudiantes universitarios graduados que entre no graduados. Una reciente administración de este problema a más de 100 docentes de ciencia de educación en la ciencia dió resultados similares.

1.2.1 Respuesta correcta

El problema puede resolverse ya sea cualitativamente o cuantitativamente. Si bien no es estrictamente apropiada, la ley de Ohm lleva al ordenamiento adecuado. Sin embargo, para comparar brillos relativos ningún cálculo es requerido. Es suficiente razonar a partir de un simple modelo cualitativo en el cual el brillo de la lámpara está relacionado a la intensidad de la corriente o a la diferencia de potencial. En

artículo previo, nosotros delineamos un tal modelo y mostramos como puede usársele para determinar que el bulbo *A*, el bulbo *D* y el bulbo *E*, tendrán brillos iguales y más brillantes que los otros dos bulbos, que tendrán brillos iguales entre sí, es decir: $A = D = E > B = C$.

Con baterías reales el ordenamiento relativo del brillo de los bulbos sería diferente, es decir: $A > D = E > B = C$. Para determinar si un número significativo de respuestas incorrectas se podía haber debido a una falla en advertir que las baterías eran ideales, formulamos una pregunta similar para el circuito de la Fig. 3. Para un físico, los circuitos de las Fig. 2 y 3 son virtualmente idénticos. A pesar de que en la Fig. 2 el ordenamiento relativo de los bulbos depende si las baterías son ideales o reales, éste no es el caso en la Fig. 3. Si la batería en la Fig. 3 fuese real todos los bulbos brillarían más apagadamente pero el ordenamiento relativo sería el mismo que para una batería ideal, es decir: $A = D = E > B = C$.

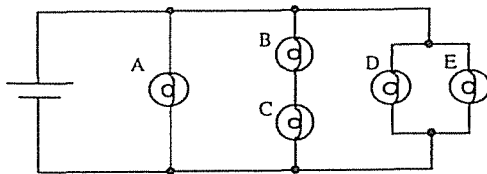


Figura 3: Variante del circuito de la figura 2. En este caso el ordenamiento relativo del brillo de los bulbos no depende de suponer a la batería ideal.

Si los estudiantes hubieran respondido incorrectamente al problema basado en la Fig. 2 porque consideraron que las baterías eran reales, un incremento en el porcentaje de las repuestas correctas podría haber sido esperado con la Fig. 3. Sin embargo, este

porcentaje fue el mismo para los dos casos.

1.2.2. Ejemplos de dificultades específicas

El examen detallado de los errores cometidos por los estudiantes en el ordenamiento de las lámparas de Fig. 2 y Fig.3, tanto como sus respuestas a muchas otras cuestiones nos permitió identificar un número de dificultades específicas subyacentes. Ilustramos tres de ellas en el contexto basado en la cuestión de la Fig. 2.

Muchos estudiantes trataron de enfocar este problema cualitativo en la misma forma en que ellos habían tratado otros problemas de circuitos. La mayoría había usado la Ley de Ohm en cálculos de rutina para una variedad de circuitos. Ellos habían aprendido como calcular la resistencia equivalente de una red pero, como se ilustra más adelante, no habían comprendido el concepto de resistencia equivalente suficientemente bien como para aplicarlo apropiadamente.

- Uso indiscriminado de conceptos estrechamente relacionados: fallas para distinguir entre la resistencia de un elemento y la de la red

Virtualmente ninguno de los estudiantes del curso basado en cálculo trataron de resolver el problema basado en la Fig. 2 pensando la resistencia equivalente en términos cualitativos. Alrededor de un 40% inmediatamente comenzó a usar álgebra para encontrar la resistencia equivalente de los circuitos en serie y en paralelo. Ellos entonces sustituyeron sus respuestas (R , $2R$, ó $R/2$) en la fórmula para la potencia en la red. Así, el ordenamiento dependió de cual forma de la fórmula habían usado ($P = I^2 R$ ó $P = V^2/R$). Por ejemplo, cuando los valores para la resistencia equivalente son sustituidos en $P = V^2/R$, el ordenamiento de las lámparas resultantes es $D = E > A > B = C$.

Hemos encontrado que los estudiantes con frecuencia no distinguen entre la resistencia de un sólo elemento y la resistencia equi-

valente de una red que contiene tal elemento. Muchos estudiantes no advirtieron que para determinar el brillo de una lámpara individual, los valores de la corriente, diferencia de potencial y resistencia usados deben pertenecer directamente a esa lámpara. Ellos no parecieron considerar la resistencia equivalente como una abstracción que en primer lugar es usada para encontrar la corriente total o diferencia de potencial, en una rama, red, o circuito. Con frecuencia pareció que los estudiantes estaban pensando en la resistencia equivalente del circuito como si fuera una propiedad de una lámpara individual dentro del circuito. Debería notarse que muchos de los estudiantes que fueron incapaces de llegar a una solución cualitativa correcta, antes habían resuelto exitosamente problemas sobre circuitos más complicados usando la ley de Ohm y las reglas de Kirchhoff.

2. Ciertas dificultades conceptuales no desaparecen durante la enseñanza tradicional. Ellas pueden ser explícitamente tratadas en más de un contexto. Los cambios conceptuales significativos requieren desafíos reiterados

Como indican los resultados obtenidos a partir de la cuestión basada en la Fig. 2, los estudiantes con frecuencia egresan de un curso introductorio típico con algunas de las mismas dificultades conceptuales que tenían al entrar. Aparentemente estas dificultades no son tratadas exitosamente por la presentación estándar del material en la clase tradicional y el esquema de laboratorio.

Algunos de los comentarios anteriores sugieren que los estudiantes memorizan definiciones de los conceptos pero no los vinculan en conjunto. Para que un concepto sea útil es necesario no sólo tener una clara definición operacional de ese concepto sino también entender su relación con otros conceptos. Sin embargo muchos estudiantes no sintetizan conceptos relacionados entre sí en una estructura conceptual coherente y

consistente que ellos puedan aplicar a una variedad de situaciones físicas.

Dificultad conceptual general: falta de una estructura conceptual

Las dificultades conceptuales que los estudiantes encuentran en la Física varían en importancia y frecuencia. Algunas tienden a desaparecer cuando los estudiantes progresan a lo largo del programa. Otras son lo suficientemente serias como para que el aprendizaje significativo no se alcance aún cuando la performance en problemas cuantitativos pueda no ser afectada.

2.1. Ejemplos de errores de concepto persistentes acerca de circuitos eléctricos

Ciertas dificultades conceptuales que los estudiantes tienen con los circuitos eléctricos parecen ser del tipo caracterizado en lo que sigue. Dos de éstas son tan agudas, que parecen ser intuitivas. Una es la creencia de que la corriente está "trepando" en un circuito y la otra es la creencia de que la batería es una fuente de corriente constante. Las dos se ilustran en el contexto de un problema basado en Fig. 2.

• Creencia de que la corriente está "trepando" en un circuito

La creencia de que la corriente está "trepando" es un error común. No es necesariamente un concepto marcadamente diferente del que los estudiantes tienen en mente. El lenguaje que muchos usan sin embargo sugiere fuertemente que ellos imaginan a la corriente como siendo constantemente producida por la batería y "consumida" por los elementos en un circuito.

Al predecir el brillo relativo de las lámparas en la Fig. 2, muchos estudiantes creen que una lámpara en el circuito en serie será más brillante que la otra. La explicación incorrecta, más común, es que el bulbo está más brillante que el C porque el bulbo B consume la corriente primero y al bulbo C le queda la corriente restante.

Para resolver problemas cuantitativos est

estudiantes deben asumir que la corriente es la misma en todos los puntos de un circuito o rama cuando los elementos son conectados en serie. Sin embargo, hemos encontrado que para muchos estudiantes el hecho de que la corriente se conserva consiste en una abstracción que ellos no pueden aplicar a problemas cualitativos.

• Creencia de que la batería es una fuente de corriente constante

Tal vez más arraigada y persistente aún es la creencia aparentemente intuitiva de que la batería es una fuente de corriente constante (es decir: la corriente a través de la batería siempre tiene el mismo valor). Aún buenos estudiantes a menudo no advierten el papel crítico desempeñado por la resistencia en determinar la corriente. El siguiente ordenamiento por un estudiante en el curso basado en cálculo para las lámparas en la Fig. 2 refleja la creencia de que la corriente en los tres circuitos es la misma.

"A, B, y C son todas iguales en brillo y más brillantes que D y E, que son iguales entre sí. La misma corriente i va a través de A pero en el tercer circuito la corriente se divide entre D y E."

Las dos ilustraciones anteriores son ejemplos de las dificultades conceptuales comunes que tienden a persistir, a menos que sean tratadas específicamente. Como ya se ha mencionado, la performance de los estudiantes en el problema basado en la Fig. 2 fue completamente independiente de cuando la pregunta fue hecha. En particular, las creencias de que la corriente es "consumida" en un circuito y que la batería es una fuente de corriente constante aparecieron casi tan frecuentemente antes como después que los estudiantes completaron el estudio de los circuitos eléctricos.

2.2 Ejemplos de estrategia de enseñanza para tratar errores conceptuales persistentes acerca de circuitos eléctricos

Ayudar a los estudiantes a desarrollar una

comprensión conceptual sólida no es simplemente una cuestión de hacer una lista de conceptos erróneos y explicaciones de errores que ellos deberían evitar. Hay evidencia considerable de que los estudiantes no cometen los mismos errores en todas las circunstancias. Un error particular puede ser evocado bajo un conjunto de condiciones, pero no en otro. El concepto puede ser el factor determinante. Un error puede ser el síntoma de dificultades conceptuales subyacentes, o de dificultades de razonamiento, o una combinación de ambas. Si un razonamiento equivocado yace en el corazón de la dificultad con un concepto, enfocar la enseñanza sólo en dicho concepto no da a los estudiantes la clase de ayuda necesaria.

Tal vez la razón más fuerte para no prevenir a los estudiantes acerca de los errores comunes es que un enfoque tal raramente es efectivo. Generalmente no es una gran ayuda decir a los estudiantes qué error evitar: con frecuencia ellos están desprevenidos acerca de la discrepancia entre las palabras del docente y sus propios pensamientos. El error descrito puede parecer trivial y así, ignorado. Los estudiantes que tienen predisposición a cometer un error particular pueden momentáneamente suprimir esa tendencia. La dificultad subyacente puede permanecer latente, sólo para emerger en otro contexto. Dificultades conceptuales y de razonamiento no pueden ser salvadas mediante afirmaciones del docente. Tales cambios significativos en el pensamiento requieren del estudiante un compromiso conceptual significativo.

2.2.1 Construcción de un modelo conceptual para un circuito eléctrico

Muchas de las dificultades de razonamiento y conceptuales que los estudiantes tienen en ciertos circuitos eléctricos son interdependientes y mutuamente se refuerzan. Dado que no pueden aislarse unas de otras, ellas deben tratarse juntas. Una estrategia instruccional general que nosotros hemos

encontrado útil para lograr este propósito es hacer que los estudiantes construyan un modelo conceptual para corriente eléctrica sobre la base de sus propias observaciones. Si bien la experiencia "con las manos" es el enfoque preferido, es posible sustituirla con demostraciones simples.

La construcción del modelo comienza con la introducción del concepto de un circuito completo. Después que esa idea ha sido desarrollada cuidadosamente, se hacen dos suposiciones que parecen plausibles a los estudiantes:

a.) existe un flujo en el circuito completo y b.) el brillo de los bulbos indica la cantidad de flujo. El flujo es llamado corriente eléctrica pero lo que fluye no es identificado. Las dos suposiciones forman la base para el desarrollo del modelo.

El proceso de construcción del modelo ayuda a los estudiantes a sintetizar los conceptos eléctricos básicos en una estructura coherente. También en el camino de construcción del modelo los estudiantes con frecuencia corrigen, por su cuenta, muchas ideas erróneas que tienen sobre circuitos eléctricos.

Sin embargo hay una amplia evidencia de que ciertas dificultades conceptuales tienden a persistir, a menos que sean tratadas específicamente.

2.2.2. La generalización de un conflicto conceptual: sacar a luz, confrontar, resolver

Para que ocurra un cambio conceptual significativo los estudiantes deben estar activamente involucrados con el proceso de aprendizaje. Nosotros hemos encontrado que un medio efectivo para obtener el grado de compromiso mental deseable es generar un conflicto conceptual y pedir a los estudiantes que lo resuelvan. Nosotros hacemos uso frecuente de una estrategia de enseñanza en la cual se expone deliberadamente la tendencia a cometer un error particular. Encontramos que permitir que

ocurra un error, o evocarlo si hay razones para creer que esta latente la tendencia a cometer tal error, es el primer paso para ayudar a los estudiantes a vencer una dificultad subyacente. Igualmente importante es la necesidad de insistir que los estudiantes confronten y resuelvan los temas que han surgido. El procedimiento, que tiene aplicación general, puede ser resumido como una secuencia de pasos que pueden ser caracterizados como: *sacar a luz, confrontar, resolver*. Estos pasos no definen una sola estrategia sino un continuo.

• Tratamiento de la creencia que la batería es una fuente de corriente constante.

Con un ejemplo específico nosotros ilustramos cómo usamos una variante de la estrategia "*sacar a luz, confrontar, resolver*" para ayudar a los estudiantes a sobrepasar la creencia casi intuitiva de que la batería es una fuente de corriente constante.

Los estudiantes comparan el brillo de una sola lámpara con los de dos lámparas en paralelo. Se les pide usar sus observaciones para determinar las intensidades relativas de corriente a través de la batería en los dos circuitos. Al tratar de responder a esta cuestión, los estudiantes comienzan a considerar las implicancias de sus observaciones. Casi siempre retorna la creencia común de que la batería es una fuente de corriente constante.

La siguiente es casi una reproducción verbal de una observación hecha por una docente de escuela secundaria durante un taller reciente. Después de pedírsele que reflexionara en sus observaciones que dos bulbos en paralelo conectados a la batería son tan brillantes como un sólo bulbo conectado a la batería, exclamó:

"Esto significaría que la cantidad de corriente desde la batería es distinta en casos diferentes, y eso no tiene sentido!"

Este comentario ilustra la clase de reacción que la secuencia de enseñanza sirve para

generar: al notar la diferencia entre lo que ella piensa que debe pasar y lo que en realidad pasa, toma conciencia de la discrepancia. Si en ese punto, el docente insiste en que los estudiantes resuelvan el conflicto conceptual, ellos se ven forzados a deducir que la corriente a través de la batería no es la misma en todos los circuitos. El ciclo: sacar a luz, confrontar, resolver, que se ha ilustrado es el primer paso para ayudar a los estudiantes a aceptar la idea que la corriente a través de la batería no es constante. Ha sido nuestra experiencia que se necesitan muchos de estos encuentros para convencer a los estudiantes de que la corriente a través de la batería depende del número y del ordenamiento de los bulbos en el circuito.

2.2.3. Refuerzo del cambio conceptual: aplicar, reflexionar, generalizar.

En el enfoque instruccional ilustrado anteriormente está inherente el reconocimiento de que un encuentro casi nunca es suficiente para sobrepasar una dificultad conceptual profundamente arraigada. Son necesarios múltiples desafíos. Además, es importante proveer una variedad de contextos capaces de sacar a luz una dificultad particular por si ella estuviera todavía latente. Cuando se usa un mismo contexto los estudiantes tienden a memorizar el resultado. A menos que se les requiera aplicar el nuevo concepto en muchas situaciones diferentes, ellos tienden a volver a la creencia original. Para ser capaces de integrar en una estructura coherente las ideas poco familiares y contra-intuitivas que ellos encuentran en Física, se les debe dar a los estudiantes múltiples oportunidades para aplicar los mismos conceptos y razonamientos en diferentes contextos, para reflexionar en estas experiencias y generalizar a partir de ellas.

- Tratamiento de la creencia de que la batería es una fuente de corriente constante.

Para continuar la tarea de ayudar a los estudiantes a corregir el concepto erróneo

particularmente persistente, de que la batería es una fuente de corriente, los hacemos analizar una variedad de circuitos de diferentes configuraciones. Hemos encontrado que después que los estudiantes han confrontado y resuelto este mismo tema, no una, sino varias veces, gradualmente abandonan la creencia casi intuitiva de que la batería es una fuente de corriente constante.

Referencias Bibliográficas

- MCDERMOTT, L. C. "Lo que enseñamos y lo que se aprende - Cerrando la brecha", Am. J. Phys. 59, 301 - 315 (1991).
- LAWSON, R. A. Ph. D. tesis, Departamento de Física, Universidad de Washington, 1984 (no publicada).
- ARONS, A. B. "Una guía en la Enseñanza de Introducción a la Física" (Wiley, New York, 1990). Contiene una discusión de las dificultades que tienen los estudiantes para interpretar el símbolo " $=$ ".
- MCDERMOTT, L. C. y SHAFFER, P. S., "La investigación como una guía para el desarrollo de un curriculum: un ejemplo en Introducción a la Electricidad, Parte I: Investigación de la comprensión estudiantil", Am. J. Phys. 60, (1992) y P. S. Shaffer y L. C. McDermott, "La investigación como guía para el desarrollo de un curriculum: un ejemplo en Introducción a la Electricidad, Parte II: Diseño de Estrategias instruccionales", Am. J. Phys. 60. (1992).
- GOLDBERG F. M. y MCDERMOTT, L. C., "Una investigación de la comprensión estudiantil de la imagen real formada por una lente convergente o espejo cóncavo", Am. J. Phys. 55, 108-109 (1987).
- MCDERMOTT, L. C., ROSENQUIST, M. L. y VAN ZEE, E. H., "Dificultades de los estudiantes en conectar gráficos y Física: Ejemplos en Cinemática", Am. J. Phys. 55, 503 - 513 (1987).
- HALLOUN, I. A. y HESTENES, D., "El estado de conocimiento inicial de los estudiantes del "college"", Am. J. Phys. 53, 1043 -

10055 (1985); Otra evidencia que sustenta esta afirmaciones puede encontrarse en el segundo artículo in Ref. 3 y Ref. 4.

- THORTON, R. K. y SOKOLOFF, D. R., "Aprendiendo el concepto de movimiento usando herramientas basadas en real time microcomputadoras". Am. J. Phys. 58, 858 - 870 (1990);
- HESTENES, D., WELLS, M. y SWACKHAMER, G., "Inventario de conceptos de fuerza", Phys. Teach. 30, 141 - 158 (1992);
- MAZUR, E. , "Pensamiento cualitativo vs pensamiento cuantitativo: Estamos enseñando lo correcto?" "Novedades en Óptica y Fotónica", 2, 38 (1992).
- McDERMOTT, L. C. et al., Physics by Inquiry (Grupo de Educación en la Física, Universidad de Washington, Seattle, Wa, 1982 - 1992), (en prensa).
- McDERMOTT L. C., et. al., "Guías en Física", (Grupo de Educación en la Física, Universidad de Washington, Seattle, WA, (1991 - 1992). Este es el título tentativo de un conjunto de Guías actualmente en desarrollo.

Nota de los Editores

Este artículo, producto de la larga experiencia de Lillian como docente e investigadora, saca a luz realidades de la enseñanza/aprendizaje de cada día que, sin embargo, para muchísimos docentes será una verdadera revelación, una eficiente ayuda para su tarea y un agudo incentivo para la reflexión.

Este trabajo fue presentado en la Cuarta Conferencia Internacional sobre Enseñanza de la Física Moderna, organizada por el mencionado C. I. de Enseñanza en la Física y realizada en Badajoz, España, en Julio de 1992. Su longitud (mayor que la usual de un artículo para nuestra Revista) nos obliga a publicarlo en dos partes, pero por su contenido queremos ofrecerlo a nuestros lectores.