

Comprensión o memorización: ¿Estamos enseñando lo correcto?

Eric Mazur

Departamento de Física, Universidad de Harvard, Cambridge, MA 02138, USA

Cuando me preguntan qué hago para ganarme la vida y contesto que soy *físico*, frecuentemente oigo historias de horror sobre la física a nivel estudiantil- ¡casi hasta el punto de hacerme sentir avergonzado de ser físico!- Esta sensación general de frustración con los cursos de física introductoria (mecánica, electricidad, y magnetismo) está generalizada entre los estudiantes de distintas especialidades que están obligados a tomar cursos de física, e incluso por los estudiantes cuya especialización es física están frecuentemente insatisfechos con los cursos introductorios, y una gran parte de ellos que inicialmente estaban interesados en física terminan estudiando otras especialidades.

La frustración con los cursos introductorios de física ha estado presente desde los tiempos de Maxwell y recientemente publicada por Sheila Tobías¹. Tobías solicitó a un grupo de graduados en humanidades y ciencias sociales investigar sobre los cursos de física para describir las insatisfacciones. Uno podría estar tentado a no considerar los lamentos de los estudiantes cuya especialización no es física, quienes no están interesados en la física, sin embargo, la mayoría de estos estudiantes no se lamentan sobre otros cursos.

El modo en que la física fue enseñada en el año 1990 no es muy diferente del modo en que era enseñada en 1890 (a un público mucho más pequeño y más especializado). El contenido básico de los libros de texto de los cursos de introductorios de física no ha cambiado in cien años, pero el público sí ha cambiado. La física se ha convertido en piedra angular para muchos otros campos incluyendo la química, la ingeniería y las ciencias de la vida. Como resultado, el registro de alumnos en los cursos de física ha crecido enormemente, siendo la mayoría de ellos estudiantes de especialidades distintas a la física. Este cambio en la constitución de los alumnos cuya especialidad es física, interesados en la materia, con respecto a los alumnos cuyas especialidades no son física y que están obligados a tomar la materia, -‘cautivos’ como los llama Richard Crane²-, ha causado un cambio significativo en la actitud de los estudiantes hacia la materia, ha convertido la enseñanza de la física en un verdadero reto. Aunque los métodos tradicionales de enseñanza han permitido la formación de muchos científicos e ingenieros exitosos, muchos estudiantes están desmotivados por los métodos convencionales implementados. Entonces, ¿qué está mal con los métodos de los cursos introductorios de física?

¹ Sheila Tobias, *They're not Dumb, They're Different: Stalking the Second Tier* (Research Corporation, Tucson, AZ 1989).

Proc. Resnick Conference (Wiley, in press)

En los últimos nueve años he enseñado un curso introductorio de física para ingeniería y ciencias en la universidad de Harvard. Hace unos años enseñaba un curso bastante tradicional con presentaciones animadas por demostraciones en clase. En general estaba satisfecho con mis clases durante estos años a mis estudiantes les iba bien en lo que yo consideraba problemas difíciles y las respuestas que recibía de ellos eran muy positivas³. Hasta lo que yo sabía, no había muchos problemas en mis clases.

Hace unos años, sin embargo, me topé con una serie de artículos⁴ de Davis Hestenes de la Universidad del Estado de Arizona, los cuales francamente, ‘abrieron mis ojos’. En estos artículos, Hestenes muestra que los estudiantes entran a sus primeros cursos de física con creencias fuertes e intuiciones sobre los fenómenos físicos comunes. Estas nociones son derivadas de las experiencias personales y del color de las interpretaciones de los estudiantes del material presentado en los cursos introductorios. Las investigaciones de Hestenes muestran que la enseñanza cambia muy poco estas creencias de ‘sentido común’.

Por ejemplo, después de un par de meses de enseñanza de física, todos los estudiantes serán capaces de enunciar la tercera ley de Newton – ‘acción y reacción’ – y la mayoría de ellos podrá aplicar esta ley en problemas numéricos. Un pequeño sondeo superficial, sin embargo, muestra rápidamente que muchos de estos estudiantes carecen de una comprensión fundamental de la ley. Hestenes proporcionó muchos ejemplos en los cuales a los estudiantes se les preguntaba comparar las fuerzas que diferentes objetos ejercían uno sobre otro. Cuando se les preguntaba, por ejemplo, comparar las fuerzas en una colisión entre un camión pesado y un auto ligero, una gran parte de la clase firmemente creía que el camión pesado ejercía una fuerza mayor sobre el auto ligero que a la inversa. Cuando leía esto, mi primera reacción fue -‘No mis estudiantes...!’- Intrigado, decidí probar la comprensión conceptual de mis estudiantes, también como la de los estudiantes de la especialización de física en Harvard.

La primera advertencia vino cuando les di la prueba a mi clase y un estudiante preguntó: ‘Profesor Mazur, ¿cómo debo contestar estas preguntas?’ ‘¿De acuerdo a cómo usted nos ha enseñado, o del modo en que pensamos?’. A pesar de esta observación, los resultados de la prueba fueron un *choque*. Los estudiantes pasaron apenas un poco mejor en la prueba de Hestenes que en la prueba parcial de dinámica rotacional. Pero, la prueba de Hestenes es sencilla -sí, probablemente demasiado sencilla para ser considerada seriamente como una prueba por algunos colegas- mientras que el material cubierto en la evaluación (dinámica rotacional momento de inercia) pienso, fue de mayor dificultad.

2 H. Richard Crane, *Am. J. Phys.* 36, 1137 (1968).

3 Mis resultados en las evaluaciones del Comité de Harvard para Educación de Pregrado han estado, de manera consistente, entre los resultados más altos del Departamento de Física de Harvard.

4 Ibrahim Abou Halloun and David Hestenes, *Am. J. Phys.* 53, 1043 (1985); *ibid.* 53, 1056 (1985); *ibid.* 55, 455 (1987);

Hestenes, David, *Am. J. Phys.* 55, 440 (1987).

Invertí muchas, muchas horas discutiendo los resultados de esta prueba con mis estudiantes uno por uno. Mi sensación previa de satisfacción con mis resultados como profesor se convertía cada vez más en tristeza y frustración. ¿Cómo estos estudiantes indiscutiblemente brillantes, capaces de resolver problemas complicados, fallan en estas preguntas ostentadamente fáciles?

Para comprender estos hechos aparentemente contradictorios, decidí poner a la par, en las siguientes evaluaciones, las preguntas cualitativas, ‘simples’, con los problemas cuantitativos más ‘difíciles’ sobre un mismo concepto. Para mi sorpresa alrededor del 40% de los estudiantes tuvo un mejor resultado en los problemas cuantitativos que en las preguntas conceptuales – en el tema de circuitos DC, una docena y media incluso obtuvo la más alta calificación en un problema que involucraba un circuito de dos lazos, sin embargo, obtuvieron cero en una pregunta simple, relacionada con el tema. Lentamente, el problema subyacente se reveló a sí mismo: muchos estudiantes se concentran en aprender las “recetas”, o “las estrategias de aprendizaje” como son llamadas en los libros de texto, sin considerar los conceptos subyacentes. ¡Sorpresivamente! Muchas de las piezas del rompecabezas repentinamente cayeron en sus puestos. La petición constante de los estudiantes de resolver más y más problemas y cada vez menos tiempo de conferencia -¿no sería esto, lo que se esperaría si los estudiantes son evaluados por sus habilidades de resolución de problemas?- Los errores inexplicables, que había visto en los estudiantes aparentemente ‘brillantes’ -las estrategias de resolución de problemas funcionan en unos cuantos, pero seguro, no en todos los problemas. Las frustraciones de los estudiantes con la física – cuan aburrida debe ser la física si sólo es reducida a un conjunto de recetas mecánicas que incluso ¡no funcionan todo el tiempo! Y si, la tercera ley de Newton es natural para mí- es obviamente correcta, pero ¿cómo convengo a mis estudiantes?- Ciertamente no sólo con enunciar la ley y luego usarla ciegamente en problemas...Después de todo, le costó a la humanidad miles de años para formular la tercera ley.

Antes de que este problema haya sido obvio para mí - las mediciones tradicionales, los problemas cuantitativos y la retroalimentación de los estudiantes-, yo había sido engañado con la creencia de que estaba teniendo éxito en mis clases y que los estudiantes estaban teniendo éxito en aprender la física introductoria. Ahora la figura luce bastante distinta. Mientras que algunos físicos destacados habían escrito sobre la carencia de los estudiantes de comprensión fundamental, creo que muchos aún no están conscientes del problema- como yo lo estaba hace unos años-.

Un problema importante con el método tradicional de enseñanza es que favorece a la resolución de problemas más que a la comprensión conceptual. Como resultado, muchos estudiantes memorizan ‘las estrategias de resolución de problemas; por esto la física de los cursos introductorios se vuelve nada más que solución de problemas de memoria y poca adquisición de comprensión de los principios fundamentales. Esta práctica de memorizar algoritmos y ecuaciones sin comprender los conceptos detrás de

5 Ver por ejemplo: Arnold Arons, *A Guide to Introductory Physics Teaching* (John Wiley & Sons: New York, NY, 1990);

Richard P. Feynman, *The Feynman Lectures*, Vol. 1, (Addison Wesley, New York, N.Y., 1989) p. 1-1; Ken Wilson., *Phys.*

Today 44:9 (1991) p. 71-73.

Proc. Resnick Conference (Wiley, in press)

las manipulaciones es intelectualmente poco provechoso y termina en un desempeño pobre y de frustración con el material, y ¿qué provecho tiene enseñar la manipulación mecánica de las ecuaciones sin lograr entenderlas?

Otro problema yace en la presentación del material. Frecuentemente, proviene directamente de los libros de texto y/o de las notas de clase, dando a los estudiantes poco incentivo para asistir a clases. El hecho de que la presentación tradicional es casi siempre un monólogo en frente del público enteramente pasivo agrava el problema. Solamente los expositores excepcionales son capaces de mantener la atención de los estudiantes durante toda la clase. Es aún más difícil proporcionar una adecuada oportunidad a los estudiantes para que piensen críticamente con los argumentos expuestos y en las clases introductorias pocos estudiantes tienen la motivación y la disciplina de hacerlo después de clases. Consecuentemente, las clases solo refuerzan el sentimiento de que el paso más importante para dominar el material es la solución de problemas. Uno termina en un círculo rápidamente creciente donde los estudiantes piden cada vez más problemas de ejemplo (de tal forma que aprendan mejor como resolverlos), lo cual a su vez refuerza su sensación de que la clave del éxito es la solución de problemas.

En los últimos tres años exploré propuestas nuevas para enseñar física introductoria. En particular, estaba buscando medios para concentrar la atención de los estudiantes en los conceptos subyacentes sin sacrificar la habilidad de los estudiantes para resolver problemas. Durante este periodo de tiempo, desarrollé un método de enseñanza, llamado *Instrucción entre Pares*⁶ el cual describiré en el resto de este artículo. Se ha vuelto claro que la *Instrucción entre Pares* es muy efectiva en la enseñanza de los conceptos fundamentales en los cursos introductorios de física y conlleva a un mejor desempeño en los problemas tradicionales. Esto ha sido comprobado no solo en Harvard, sino también en un número de universidades, que van desde universidades estatales a colegios de arte y academias militares. Lo más interesante que he encontrado, es que permite enseñar de manera más fácil y gratificante.

Instrucción entre Pares: Haciendo que los estudiantes piensen en clase.

El objetivo básico del método es explotar la interacción de los estudiantes en clase y enfocar la atención del estudiante en los conceptos subyacentes. En vez de presentar el material en secuencia como en los libros de texto y las notas de clase), las clases consisten de un número de presentaciones de los puntos clave del material, cada uno seguido por una *prueba conceptual* -una pregunta corta de opciones múltiples del tema tratado-. A los estudiantes se les da un tiempo para formular individualmente una respuesta, y luego se les pide que discutan sus respuestas con los otros estudiantes en clase. Este proceso a) fuerza a los estudiantes a pensar críticamente a través de los argumentos desarrollados en clase y b) les proporciona (también como al profesor) un medio para evaluar su comprensión del concepto.

⁶ Ver por ejemplo el capítulo 8 in *Revitalizing Undergraduate Science: Why Some Things Work and Most Don't* by Sheila Tobias (Research Corporation, Tucson, AZ, 1992).

Proc. Resnick Conference (Wiley, in press)

Las respuestas de los estudiantes a las pruebas conceptuales también proporcionan un medio continuo de evaluación de la comprensión del material por parte de los estudiantes durante la clase. Si el desempeño de los estudiantes en la prueba conceptual es satisfactorio, la clase puede proceder al siguiente tema. De lo contrario, el profesor debe disminuir el ritmo del avance, explicar con más detalle el mismo tema, y reevaluar a los estudiantes con una nueva prueba conceptual. Esto previene la formación de una brecha entre las expectativas del profesor y la comprensión de los estudiantes, una brecha que una vez formada se incrementa con el tiempo hasta que los estudiantes están totalmente perdidos.

La tabla 1 muestra un plan para una clase que presenta tres o más conceptos nuevos. Note cómo la comprensión de cada concepto por parte de los estudiantes es comprobado con por lo menos una prueba conceptual después de aproximadamente 10 minutos de haberlos expuesto. Cada uno de estos tiene el formato general presentado en la tabla 2. La duración total de un ciclo de *una prueba de un sólo concepto* es aproximadamente 15 minutos. En general, el método entero, es un conjunto de preguntas cualitativas sencillas para las pruebas conceptuales, cada una de las cuales trata con sólo un concepto fundamental, sino que también ayudan a concentrar la atención de los estudiantes en comprender *antes de* resolver problemas. Por otro lado, en la propuesta tradicional para los cursos introductorios de física, se asume que la comprensión es siguiente de la solución mecánica de problemas.

Consideremos por un momento un ejemplo específico -una clase sobre fluidos-. Suponga que el concepto que queremos desarrollar es el principio de Arquímedes. Primeramente exponemos el tema por 7 o 10 minutos, hacemos énfasis en los conceptos y las ideas detrás de la prueba, y evitamos (incluso omitiendo) cualquier ecuación y su derivación. Este período corto de exposición podría incluir una demostración (el buzo cartesiano, por ejemplo). Entonces, antes de seguir con el siguiente tema (el principio de Pascal, tal vez), proyectamos la siguiente pregunta de opción múltiple⁷ (paso 1):

Considere una bañera rebosante de agua. Junto a ella hay una segunda bañera idéntica, también rebosante de agua, pero con un barco de guerra sobre el agua. ¿Cuál pesa más?

- 1) La bañera rebosante de agua
- 2) La bañera rebosante de agua con el barco de guerra
- 3) Ambas pesan lo mismo

Es importante leer la pregunta con los estudiantes y asegurarse de que no hay peticiones de aclaración del significado de la pregunta misma (por extraño que parezca). Luego les decimos a los estudiantes que tienen un minuto para registrar su respuesta- más tiempo les permitiría a los estudiantes regresar de nuevo a las ecuaciones y manipularlas más que pensar. El salón ahora está en silencio mientras los estudiantes se concentran en la pregunta (paso 2). Después de alrededor de un minuto le pedimos a los estudiantes que registren sus respuestas (paso 3, vea también el apéndice 2), y luego que traten de convencer a sus vecinos de sus respuestas. El silencio se convierte en caos mientras, que cada cual está intrigado por la pregunta, y trata de argumentar con sus vecinos (paso 4).

⁷ Esta pregunta se encuentra en Lewis Carroll Epstein, *Thinking Physics*, Insight Press, San Francisco (1990).

Después de haberles dado un minuto para la discusión, se les pide que registren su respuesta revisada (paso 5). Luego regresamos a las respuestas en la diapositiva y pedimos que levanten la mano para ver cuántos alumnos seleccionaron las distintas respuestas. Yo uso la pregunta anterior en mi clase; los resultados están en la fig. 1.

Note que el 78% de los estudiantes obtuvieron la respuesta correcta antes de la discusión y el 88%, después de la discusión. El diagrama de pastel muestra otro beneficio de los períodos de discusión: la fracción de los estudiantes que estaban ‘bastante seguros’ de sus respuestas incrementó de 56% a 81%. Por supuesto, no tenía acceso a esos resultados tan detallados en clase, pero las manos levantadas habrían revelado una mayoría aplastante de respuestas correctas. Por lo tanto, habría invertido sólo unos pocos minutos en explicar la respuesta correcta antes de proseguir con el siguiente tema.

El aumento de las respuestas correctas y de la confianza de los estudiantes es mucho más pronunciada que en el ejemplo mostrado en la fig. 1⁸. Volver a preguntar a los estudiantes después de los períodos de instrucción por pares sistemáticamente revela notablemente mayor proporción de respuestas correctas. Parece que los estudiantes, para quienes los conceptos son naturales, son capaces de explicarlos a los otros más eficientemente que sus instructores. Los estudiantes que entienden los conceptos cuando la pregunta es dada, recién han dominado la idea. Debido a esto, ellos aún están conscientes de las dificultades que se tienen para captar ese concepto en particular. Consecuentemente, ellos saben precisamente en qué hacer énfasis en su explicación. Similarmente, expositores con experiencia saben que la primera presentación de un curso nuevo es frecuentemente su mejor exposición. Su presentación inicial del material está marcada por la claridad y frescura frecuentemente ausente en las versiones más ‘pulidas’. Las razones fundamentales es la misma: a medida que el tiempo pasa y uno está continuamente expuesto al material las dificultades conceptuales parecen desaparecer.

En este nuevo formato de clases, las pruebas conceptuales toman cerca de un tercio del tiempo total de cada clase. Esto necesariamente significa menos tiempo disponible para clases directas. Uno tiene por lo tanto dos opciones: (a) discutir sólo parte del material en las clases, o (b) reducir la cobertura general del material en el curso. Mientras que (b) puede al final ser la opción preferible, yo he optado por la opción (a) No cubro todo el material en clase – después de todo, los detalles están siempre disponibles en el libro o en las notas. Empiezo por descartar casi todas las derivaciones y todos los problemas de ejemplo (sí, me comprendió bien). Como lo he mantenido, los estudiantes obtienen poco beneficio con ver a los profesores manipular las ecuaciones de todas formas. Para compensar la omisión de estos aspectos más mecánicos del curso, solicito a los estudiantes *que lean el material antes de las clases*. Mientras que esto podrá sonar sorprendente para un curso de ciencias, los estudiantes están acostumbrados a las tareas de lecturas en muchos otros cursos. De este modo, puedo continuar con la cobertura de la misma cantidad de material que antes. Más aún, la atención de los estudiantes está más enfocada en los principios subyacentes. Los estudiantes aún pueden aprender a resolver problemas en las clases semanales. Además, las tareas para la casa consisten en la mitad para problemas tradicionales y la mitad para preguntas tipo ensayo.

8 Por lo general la mejora es la mayor cuando el porcentaje inicial de respuestas correctas es cerca del 50%. Si es mucho más elevada (como en el caso del cuadro 1), hay muy poca posibilidad para la mejora. Si es mucho menor, hay muy pocos estudiantes en el grupo capaces de convencer a otros de la respuesta correcta. Ver también cuadro 5.

Resultados

Antes de entrar en las guías específicas, que proporcionan más detalles en la implementación de la *instrucción entre pares*, permítanme primeramente resumir algunos de los resultados, que he obtenido con este método en mis cursos. Resultados, que debería enfatizar, son respaldados por los resultados de otras instituciones donde la observación entre pares ha sido implementada.⁹

Las ventajas de la *Instrucción entre Pares* son numerosas. Los periodos de discusión rompe la monotonía de las clases pasivas. He encontrado que la discusión entre los estudiantes siempre es remarcablemente animada. Además, los estudiantes no simplemente asimilan el material presentado; ellos deben pensar por sí mismos y deben poner sus pensamientos en palabras. Los datos recopilados en los últimos tres años demuestran que después de periodos de instrucción entre pares, la confianza de los estudiantes, así como la proporción de respuestas correctas, incrementa dramática y sistemáticamente.

La ganancia a largo plazo es aun más sorprendente. En los últimos años he usado una prueba de diagnóstico, *El inventario del concepto de fuerza* desarrollado por Hestenes¹⁰, para evaluar la comprensión de los conceptos subyacentes por parte de mis alumnos. Esta prueba ha sido utilizada en un número de estudios en todo el país para determinar la efectividad de la instrucción en física. Los datos obtenidos mi clase en 1990 y 1991 permiten comparar la efectividad relativa de la instrucción por pares y de las propuestas tradicionales. Los resultados se muestran en las figuras 2 y 3. La figura 2 muestra un incremento dramático en el desempeño de los estudiantes usando el método de instrucción por pares. Después de la instrucción sólo el 4% de los estudiantes están debajo de la línea de corte identificada por Hestenes como el umbral de la comprensión de la mecánica newtoniana. Note también que las calificaciones están fuertemente desplazadas hacia la más alta calificación (29 sobre 29). En cambio, con la propuesta tradicional usada el año anterior (1990), la mejora fue mucho menor, acorde con lo que Hestenes encontró en otras instituciones.

Mientras la mejora en la comprensión conceptual es innegable, uno podría preguntar cuán efectiva es la *Instrucción entre Pares* en la enseñanza de las habilidades de resolución de problemas requeridas en las evaluaciones tradicionales. Después de todo, la reestructuración de las clases y el énfasis en el material conceptual es alcanzada a expensas del tiempo dedicado a la resolución de problemas. Para contestar a esta pregunta, les di a mis estudiantes el mismo examen final en 1991 que el que les di en 1985. La figura 4 muestra la distribución de las calificaciones del examen final para los dos años. Dada la mejora en los estudiantes en la comprensión conceptual, habría estado satisfecho si la distribución fuese la misma. En cambio, hay una verdaderamente marcada mejora en la media, así como en también la línea de corte en el final de la curva.

⁹ Ver Sheila Tobias, *Revitalizing Undergraduate Science Education: Why Some Things Work and Most Don't*, Research Corporation: Tucson, AZ (1992).

¹⁰ D. Hestenes, M. Wells, G. Swackhamer, *The Physics Teacher* 30, 141 (1992)

Convirtiendo las clases del modo antiguo al nuevo formato

En los siguientes párrafos trataré de describir lo que he hecho con mi propio material en los últimos años para cambiar del estilo de la clase tradicional al estilo de *instrucción entre pares*. Debo recalcar que aún utilizo mis viejas notas de clases. -¡no es necesario reescribir las notas de uno completamente!- Espero que esta descripción por lo tanto les sirva como guía para convertir su material para la clase de instrucción entre pares.

1. *Tareas de lectura*. Debido a que las pruebas de concepto toman tiempo de las clases, no habrá tanto tiempo para clases directas como había antes. Como mencioné, yo he eliminado por completo todos los problemas de ejemplos y muchas derivaciones de mis clases. A pesar de que esto podrá ser sorprendente para muchos, la literatura abunda en indicaciones que los estudiantes obtienen poco o ningún beneficio viendo a alguien resolver problemas. Además, los resultados muestran lo arriba indicado que la habilidad de los estudiantes para resolver problemas no es afectada por la omisión de ejemplos y/o derivaciones.

Les digo a mis estudiantes el primer día de clases que no voy a dictar clases directamente de mis notas o de los libros de texto y que espero que ellos lean el material relevante (notas y libros) de antemano. Para asegurarme de que en realidad cumplieron con la tarea de lectura, les proporciono algo de incentivo¹¹. Como resultado, aún soy capaz de cubrir la misma cantidad de material que antes de implementar *la instrucción por pares*

En efecto, en la primera clase distribuyo a los estudiantes un programa de clases que les proporciona la tarea de lectura para el semestre entero, y me apego rigurosamente al programa – mucho mejor que antes. Si una clase va más rápido de lo anticipado (un evento raro), los estudiantes tienen el receso más temprano; nadie queda descontento. Si una clase va más lentamente que lo planeado (usualmente porque una prueba de concepto muestra dificultades con el material), me salto las partes menos importantes y me baso en (a) la lectura que han hecho los estudiantes, (b) en las sesiones de discusión semanales, y (c) en las tareas para la casa. En algunos casos uso parte de la siguiente clase para reforzar puntos importantes o para otra prueba de concepto. En cualquier caso, siempre planeo una clase de revisión en la mitad de primer semestre que permita compensar estas dificultades.

Un punto clave de esta manera es hacer que los estudiantes realicen algo del trabajo antes de tiempo. Desafortunadamente la mayoría de los libros no son ideales; proporcionan tanta información que los estudiantes no son capaces de determinar qué es relevante y qué no. Por esto parte de la lectura es de las notas de clase.

¹¹ Al inicio de la clase, proporciono a los estudiantes un examen de conceptos llamado Pregunta de Bono el cual les permite obtener un mayor número de créditos hacia su puntaje final. Esta pregunta se diferencia de las otras ya que el material no se discute de manera anticipada y los estudiantes *tienen* que leer el material antes de venir a la clase. Adicionalmente las respuestas son recogidas inmediatamente y los estudiantes las discuten entre ellos.

2. *Conceptos clave.* En algunas clases, después de omitir los problemas y las derivaciones, sorprendentemente queda poco material. Esto, sin embargo, es el material ‘central’ de la clase y contiene los conceptos claves. Después de retirar los problema de ejemplo y las derivaciones de mis presentaciones, lo siguiente que hago es determinar cuáles son los cuatro o cinco puntos clave que quiero enseñar a mis alumnos. También frecuentemente consulto el libro de Arnold Aron *A Guide to Introductory Physics Teaching*, para consejos adicionales sobre dónde esperar más dificultades. Al final queda un esqueleto del plan de clase que consiste de cuatro o cinco puntos claves.

3. *Las pruebas de concepto.* En este punto, es importante desarrollar un número de buenas preguntas conceptuales para evaluar la comprensión de cada concepto clave del plan de clase. Esto constituye tal vez la cantidad más grande de trabajo en la conversión de las clases. La importancia de esta tarea no debe ser subestimada, el éxito del método depende en gran manera de la calidad y la relevancia de estas preguntas. Fuentes (de inspiración) para tales preguntas están enumeradas en la siguiente sección.

Mientras que no hay reglas rígidas y rápidas para las pruebas de conceptos, estas deberían por lo menos satisfacer un número de criterios básicos. Específicamente, deberían:

- 1) Concentrase en un sólo concepto
- 2) Su solución no debe basarse directamente en ecuaciones
- 3) Tener un número adecuado de respuestas de opciones múltiples
- 4) No ser ambiguas
- 5) No ser ni muy fáciles ni muy difíciles

Los primeros tres ítems son los más importantes porque afectan directamente a la retroalimentación de la información para el instructor. Si más de un concepto está involucrado en la pregunta, será más difícil interpretar los resultados de la pregunta y valorar la comprensión de los estudiantes. Similarmente, si los estudiantes pueden llegar a la respuesta basados en las ecuaciones, entonces la respuesta de los estudiantes no reflejará adecuadamente su comprensión. La elección de las respuestas proporcionadas es otro punto importante. Idealmente, las respuestas erróneas deben reflejar los preconceptos más comunes de los estudiantes. En el presente, las respuestas incorrectas para cada pregunta de concepto ha sido formulada con este criterio en mente, pero la fuente más importante para las respuestas alternativas (distractores) debe ser los mismos estudiantes. Por ejemplo, colocando una pregunta de concepto en el formato *rellene el espacio* y luego contando las respuestas incorrectas más frecuentes, se puede generar una prueba de concepto que refleja los preconceptos comunes.

Los dos últimos puntos son difíciles de medir de antemano, a pesar de sonar enteramente infalibles. Me ha sorprendido muchas veces que las preguntas que parecen ser completamente claras y no ambiguas, fueron mal interpretadas por muchos estudiantes. Estas ambigüedades sólo pueden ser eliminadas en las clases. Para el nivel de dificultad, la figura 5 muestra el porcentaje de respuestas correctas después de la discusión versus el porcentaje antes de la misma para todas las preguntas durante un semestre completo. Note que todos los puntos yacen arriba de una línea de pendiente 1 (puntos en o abajo esa línea corresponderían a una discusión totalmente inútil). Como se esperaría, las mejoras son mayores cuando el porcentaje inicial de respuestas correctas está alrededor del 50% (el cual suele oscilar de 40% a 90%). Considero que un porcentaje entre 50% y 80% de respuestas correctas es óptimo.

4. *Plan de clases.* Una vez que las preguntas han sido elaboradas, reviso de nuevo mis notas de clases y decido en qué punto del material restante poner las preguntas. Al mismo tiempo, planifico que demostración incluir. A veces puedo incluir una demostración con una pregunta, una lleva a la otra.

5. *La clase.* La clase es mucho menos rígida que antes. Es necesario mantener una cierta cantidad de flexibilidad para responder los resultados inesperados de las pruebas de concepto. A veces descubro que ahora improviso más que antes. Mientras que esto podría parecer una situación molesta, podría decir que la flexibilidad añadida hace la enseñanza más fácil que antes. Durante el periodo de silencio (cuando los alumnos están pensando) tengo un descanso -un minuto más o menos para recobrar el aliento y reformular mis pensamientos-. Durante los periodos de discusión, frecuentemente participo en algunas de las discusiones para tener un idea de lo que pasa por las mentes de los estudiantes. Esto ayuda a enfocarme mejor en los problemas que están enfrentando y me mantiene 'en contacto' con la clase.

Debería también mencionar que el nuevo formato de clase promueve hacer más preguntas de los estudiantes de las que había encontrado antes. Frecuentemente estas preguntas van al punto y son profundas, y trato de responder tantas como puedo.

Conclusión

De este modo, con un esfuerzo relativamente pequeño y sin inversión de dinero es posible mejorar grandemente el desempeño de los estudiantes en los cursos introductorios de ciencias. Para alcanzar los logros mencionadas, simplemente incluí un número de preguntas de concepto en mis clases. Para mis clases restantes utilicé mis notas existentes. Omití los problemas de ejemplo y las derivaciones, asignándolos a mis estudiantes como lectura. A pesar del tiempo reducido dedicado a la solución de problemas, los resultados muestran convincentemente que la comprensión conceptual mejora el desempeño de los estudiantes en las evaluaciones tradicionales. Finalmente, las encuestas de los estudiantes muestran que la satisfacción de los estudiantes – un indicador importante del éxito del estudiante- se incrementa grandemente.

Apéndice 1: Fuentes de preguntas de concepto

Crear y compilar preguntas de concepto es una tarea importante, debido a que son la parte central del método. Para hacer esta tarea más fácil, espero desarrollar una red informal de personas que compartan tales preguntas. En el transcurso de los últimos dos años hemos desarrollado preguntas para todos los conceptos cubiertos en los cursos introductorias de física¹²

Hay un buen número de fuentes de ambos preguntas e inspiración. Las preguntas de *final de capítulo* (opuestas a problemas o ejercicios) en la mayoría de los textos introductorios de física pueden ser un punto de partida útil. *The American Journal of Physics* publica muchos artículos los cuales pueden ser de ayuda para crear nuevas pruebas de concepto. Además los libros listados abajo enfatizan los conceptos fundamentales y contienen numerosas preguntas que están diseñadas para aislar conceptos y ayudar a los estudiantes a captarlos exponiéndolos a sus preconceptos más comunes sobre el material. Esta lista no es exhaustiva, pero representa la fuente que más utilizo.

Arnold B. Arons, *A Guide to Introductory Physics Teaching*, John Wiley & Sons, New York (1990).

Lewis Carroll Epstein, *Thinking Physics*, Insight Press, San Francisco (1990).

Paul G. Hewitt, *Conceptual Physics*, Scott, Foresman and Company, Boston (1989). Jearl Walker, *The Flying Circus of Physics*, John Wiley & Sons, New York (1977).

¹² Por lo general entre dos y cinco conceptos fundamentales son introducidos en cada clase, para un total de 150 como estándar para un texto introductorio de física. Hemos desarrollado un conjunto completo de preguntas y se han obtenido estadísticas detalladas sobre el desempeño del estudiante para cada una de ellas. Están disponibles una vez sean solicitadas.

Apéndice 2: Métodos de retroalimentación.

Una de las grandes ventajas del método de instrucción por pares es que proporciona retroalimentación inmediata sobre el nivel de la comprensión de los estudiantes; sin embargo, requiere que uno lleve un registro de las respuestas de los estudiantes a las pruebas de concepto. El registro de estas respuestas puede ser llevado a cabo mediante varios métodos, dependiendo del escenario y del propósito. Tres métodos que nosotros hemos usado son:

- 1) Indicación por levantamiento de manos
- 2) Formularios de escaneo (scanning forms)
- 3) Computadoras de mano *Hand-Held*

El método más sencillo de recopilación de datos es pedir que los estudiantes levanten las manos después de los periodos de instrucción entre pares. Este método no requiere de ninguna tecnología nueva o inversión, pero aún así cumplirá las metas de la instrucción entre pares. Dará una idea del nivel de comprensión de la clase y permite al profesor decidir el paso de la clase acordemente. La única desventaja es que se pierde exactitud, en parte porque algunos estudiantes dudan en levantar la mano, en parte por la dificultad de estimar la distribución de las respuestas. Otro problema menor es que no se tiene un registro permanente (a menos que se conserve los datos en clase) y la carencia de cualquier tipo de datos antes de discusión de la instrucción entre pares.

Debido a que estaba realmente interesado en cuantificar la efectividad de la instrucción entre pares tanto a largo plazo como a corto plazo, he utilizado ampliamente formularios que fueron escaneados después de clases. En estos formularios, que están reproducidos en las páginas 50-51, los estudiantes marcaban sus respuestas y la seguridad que tenían en estas respuestas, antes y después de la discusión. Este método produce una gran cantidad de datos sobre la asistencia de los estudiantes, comprensión, mejora y sobre la efectividad a corto plazo de la instrucción por pares. La desventaja de este método, sin embargo, es que es laborioso y que la retroalimentación no es inmediata: los datos están disponibles sólo después de que los formularios han sido escaneados. Por este motivo, siempre solicito que los estudiantes indiquen su respuesta levantando la mano (además de marcar las respuestas).

Hace un año instalamos un sistema de respuesta computacional interactivo llamado *ClassTalk*, realizado por *Better Education, Inc.* El sistema permite a los estudiantes indicar sus respuestas de las preguntas de concepto y su nivel de seguridad sobre la respuesta en computadores de mano, los cuales pueden compartir en grupos pequeños de tres o cuatro estudiantes. Sus respuestas son transmitidas al profesor a una pantalla de computador y pueden ser proyectadas de tal forma que los estudiantes las puedan ver también. La ventaja principal del sistema es que el análisis de los resultados está disponible inmediatamente. Hay muchas características y ventajas: La información del estudiante (nombre, y ubicación del asiento) también está disponible, haciendo que salones numerosos sean más personales; también hemos encontrado que compartir estos equipos estimula la interacción entre los estudiantes. Las potenciales desventajas son que el sistema requiere una cierta cantidad de inversión y que aumenta la complejidad de la clase.

Leyenda de los Gráficos

Gráfico 1. Análisis de datos de la pregunta de concepto acerca del principio de Arquímedes mostrado en el texto. Las respuestas iniciales de los estudiantes y su nivel de seguridad están mostrados en la izquierda. Las respuestas post discusión de los estudiantes y su nivel de seguridad están mostrados en la derecha. El gráfico inferior a la izquierda muestra como los estudiantes cambiaron su opinión como resultado de la discusión.

Gráfico 2. Histogramas de las calificaciones en *el Inventario del Concepto de Fuerza* obtenido en 1991 en el primer día de clases (izquierda) y después de dos meses de instrucción con el método instrucción por pares (derecha) La máxima calificación en la prueba era 29 (sobre 29). Las medias de las distribuciones fueron 19.8 y 24.6

Gráfico 3. Histogramas de las calificaciones en *el Inventario del Concepto de Fuerza* obtenido en 1990 después de dos meses de instrucción tradicional (derecha). Para efectos de la comparación los datos obtenidos en el primer día de clases en 1991 están mostrados a la izquierda. Las medias de las distribuciones son 19.8 y 22.3

Gráfico 4. Histogramas al final del los resultados obtenidos en el examen final en 1985 (izquierda) y en 1991 (derecha). En ambos casos el examen fue el mismo. E 1985 el curso fue enseñado de manera tradicional; en 1991 el método de enseñanza por pares fue utilizado. Las medias de las distribuciones son 62.7 y 69.4 de 100 puntos máximos en 1985 y 1991 respectivamente.

Gráfico 5. Porcentajes de respuestas correctas después de la discusión versus respuestas correctas antes de la discusión (izquierda) y la misma información comparada con la 'confianza' de los estudiantes.

1. Dictado de clases sobre el concepto 1 (Incluyendo demostraciones, etc.)	7-10 min.
Prueba de concepto 1: ¿los estudiantes entienden el concepto 1?	5 min.
Si es no: ¡regrese al paso 1!	Varía
Si es sí: continúe	
2. Dictado de clases sobre el concepto 2 (Incluyendo demostraciones, etc.)	7-10 min.
Prueba de concepto 2: ¿los estudiantes entienden el concepto 2?	5 min.
Si es no: ¡regrese al paso 2!	Varía
Si es sí: continúe	
3 Dictado de clases sobre el concepto 3 (Incluyendo demostraciones, etc.)	etc. etc.

Tabla 1. Plan general para una clase que introduce tres (o más) conceptos nuevos. Un plan para cada *Prueba de Concepto* se muestra en la tabla 2.

1. Se plantea una pregunta conceptual simple	1 min.
2. Silencio: se da a los estudiantes tiempo para pensar	1 min.
3. Los estudiantes registran sus respuestas (opcional)	
4. Caos: se invita a los estudiantes a `convencer a' sus vecinos	1 min.
5. Los estudiantes registran sus respuestas (opcional)	
6. Retroalimentación para el instructor: Conteo de respuestas	
7. Explicación de la respuesta a la pregunta	2+ min.

Tabla 2. Formato de una *prueba de concepto*

-
1. Definición de la presión
 2. Presión en función de la profundidad
 3. Principio de Arquímedes
 4. Principio de Pascal
-

Tabla 3. Plan de clases sobre estática de fluidos

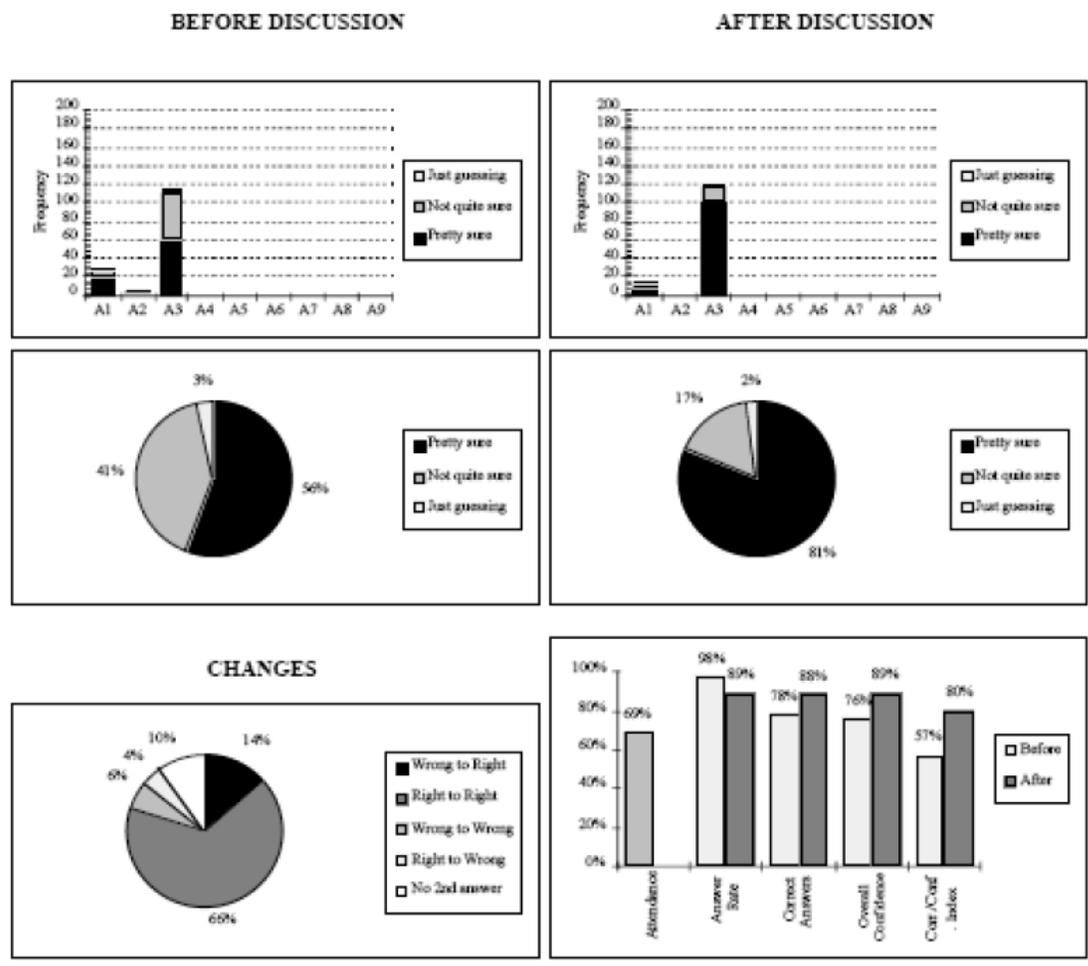


Figura 1

1991 results: peer instruction method

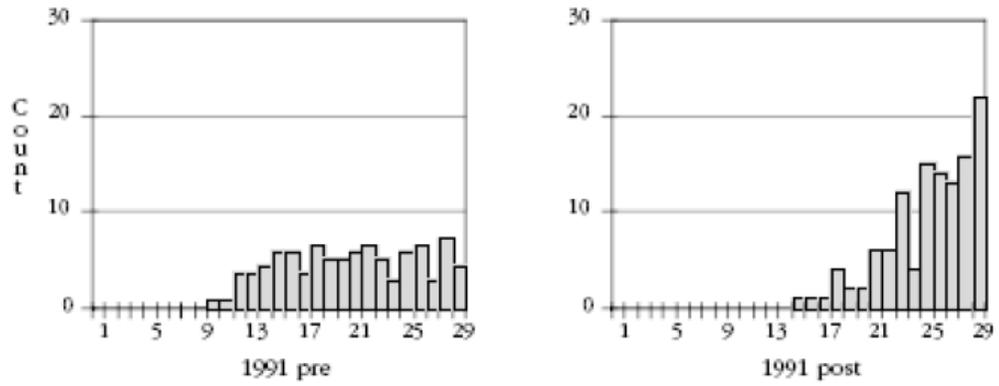


Figura 2

1990 results: traditional instruction method

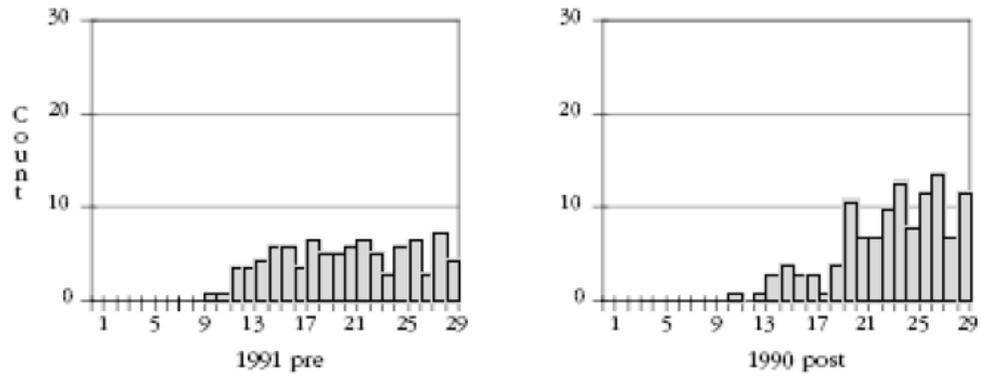


Figura 3

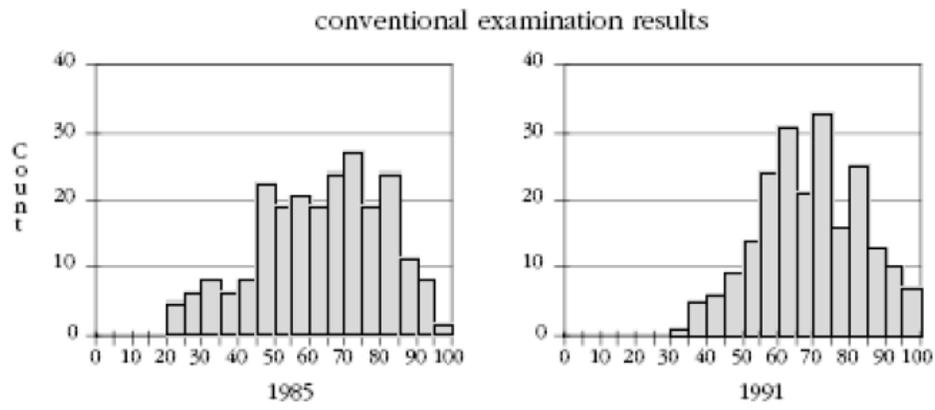


Figura 4

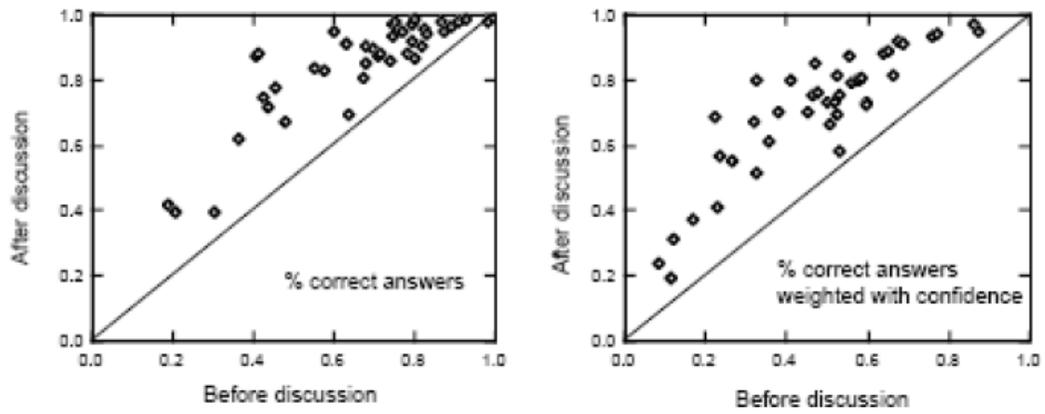


Figura 5