

PHY 171

Recuento del primer curso de Física en pregrado

LUIS ADOLFO OROZCO*

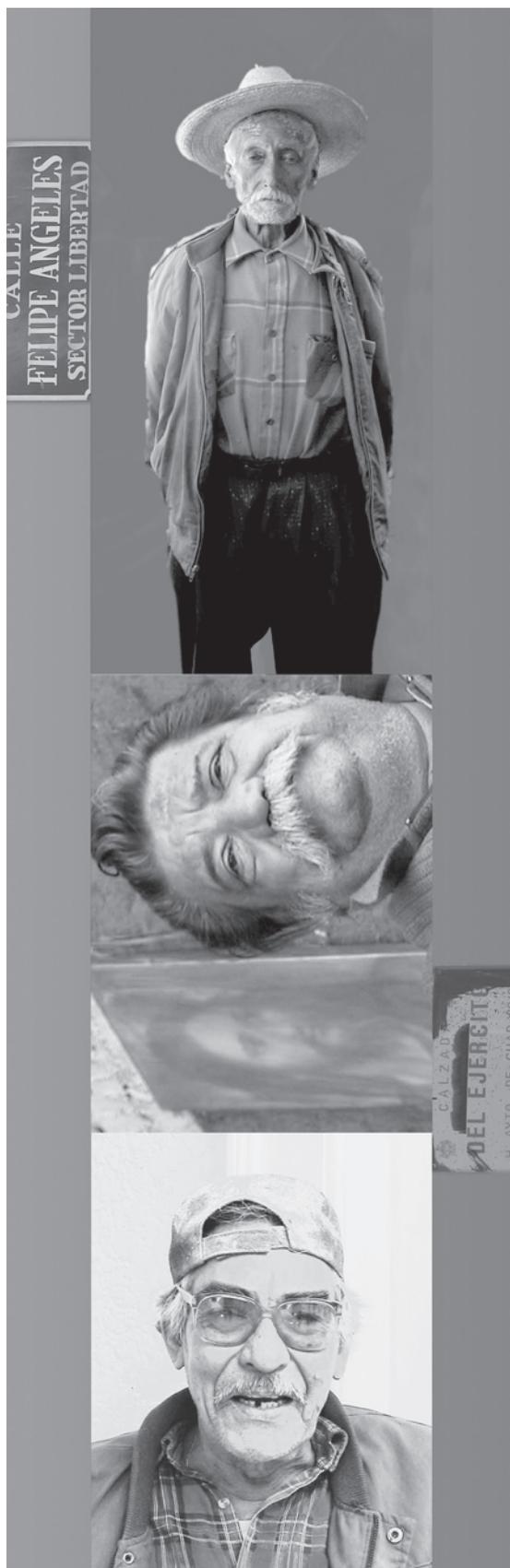
Este artículo es un recuento del primer curso de física para el bachillerato en ciencias (equivalente a la licenciatura mexicana) en física en la Universidad de Maryland. Si bien el curso fue impartido fuera de México y en inglés, la universalidad de la ciencia y la experiencia basada en nuevas aproximaciones al problema de la enseñanza efectiva de la física me alientan a compartir esta experiencia y a presentar de manera muy somera los resultados obtenidos por los estudiantes, basado en una evaluación conceptual y otra analítica. También presento los resultados generales que los estudiantes hicieron de mi desempeño como maestro. Creo que los profesores universitarios y los estudiantes de la educación científica pueden aprovechar mi experiencia para plantear en su contexto maneras más efectivas de enseñar física clásica. La mayor parte de las referencias en este artículo es a páginas electrónicas para facilitar su consulta.

El curso PHY 171 es el primer semestre del curso introductorio de física clásica para los estudiantes interesados en las ciencias físicas y para aquellos que desean una preparación rigurosa en las ciencias físicas. En el curso se utilizan cálculo diferencial e integral por lo cual los estudiantes deben tener un conocimiento previo de derivadas e integrales, y pueden llevar de manera paralela un curso formal de cálculo diferencial e integral donde se les presente con suficiente rigor matemático las bases del análisis.

Este curso fue diseñado hace ya varios años y cubre los siguientes temas: cinemática, las leyes de Newton, energía y trabajo, *momentum* (cantidad de movimiento) linear y angular, temperatura y presión, la ley ideal de los gases y relatividad especial. No va acompañado de una sesión de laboratorio con experimentos relevantes para el curso. Si bien hay una sesión de laboratorio, ésta es independiente y tiene el propósito de introducir los problemas de medición en la experimentación científica con particular atención en la cuantificación de los errores aleatorios y sistemáticos.

Hay diferentes problemas en la preparación del material para la materia, pues coexiste una serie de metas que se deben haber cumplido al finalizar el curso. Primero, ya que estos estudiantes son los que quieren estudiar física como profesión, los físicos debemos poner el mayor esfuerzo para prepararlos. Segundo, el curso es el primer paso en una carrera intensa donde la preparación del estudiante así como sus habilidades innatas son importantes; esta materia funciona como un primer filtro para seleccionar a quienes continuarán la carrera. Tercero, el material por cubrir es extenso y la mayor parte fue desarrollada por los físicos de los siglos XVIII y XIX. Muchos de los tópicos que se deben tratar no son intuitivos y las matemáticas se complican con rapidez. Cuarto, algunas escuelas pedagógicas instan a hacer hincapié en los conceptos, otras apuntan a llevar al alumno a descubrir el concepto con base en puras observaciones empíricas;

** Ingeniero Industrial por el ITESO. Cuenta con un doctorado en Física por la Universidad de Texas. Actualmente es profesor del Departamento de Física de la Universidad de Maryland, Estados Unidos.*



una más insiste en la necesidad de asegurar en el alumno la suficiente versatilidad en las matemáticas para poder resolver toda clase de problemas. Finalmente, los alumnos deben incrementar su capacidad de observación y asombro ante los fenómenos físicos y no quedar frustrados por el material incomprensible del curso.

El grupo Educación de la física del departamento de física de la Universidad de Maryland es uno de los líderes en el estudio sobre la efectividad de la enseñanza de la física en los primeros semestres de las diferentes carreras, tanto las científicas y técnicas, como las de medicina y humanidades. Han desarrollado métricas para conocer si, en efecto, se ha suscitado un cambio en los conceptos del estudiante al terminar un curso de física.¹ Estas pruebas están diseñadas, por ejemplo, para ver si el alumno ha entendido el concepto de inercia y cómo el estado de movimiento de un cuerpo se modifica sólo si se le aplica una fuerza. Sus descubrimientos son asombrosos, uno que para mí en lo particular ha sido impresionante, es el hecho de que no existe correlación alguna entre las evaluaciones de los alumnos a sus maestros y su habilidad de entender los conceptos que les fueron presentados en el curso. Eso tiene que ver mucho más con variables subjetivas que con una autoevaluación crítica del alumno sobre si está entendiendo los conceptos.

Así pues, planear e impartir un curso de este tipo presenta múltiples caminos y retos para alcanzar un mismo objetivo: que el alumno conozca los fundamentos de la mecánica al finalizar el curso y sepa resolver problemas conceptuales y analíticos de mecánica.

Organización del curso

El curso constó de cuatro clases magisteriales por semana. Lunes a viernes, excepto miércoles, de 9:00 a 9:50 am en un salón para 50 alumnos con buena dotación de auxiliares audiovisuales además de acceso a la Internet. Los jueves por la tarde de 14:00 a 16:00 pm había una sesión de problemas.

A principios del semestre presenté a los alumnos un calendario específico con los temas que trataríamos cada día, los días asignados para los exámenes y los días asignados para las discusio-



nes de problemas conceptuales. La información referente a la organización del curso está disponible en la Internet.² Comenzaron el curso veinticinco alumnos y lo terminaron diecisiete; todos habían tomado algún curso de física. De los alumnos, 10% era de mujeres y tres de los alumnos, un policía, un soldado y un repartidor de paquetería, tenían una edad muy superior al promedio y sólo llevaban este curso pues trabajaban tiempo completo.

Di sesiones de asesoría (conocidas como “horas de oficina” en el sistema universitario de Estados Unidos) después de cada clase durante una hora y para los alumnos que no pudiesen en ese horario, estuve dispuesto a darles una cita a otra hora. Algunos alumnos me enviaron preguntas por correo electrónico y traté de contestarlas de inmediato pues siempre se referían a los problemas de la tarea que debían resolver en ese momento. Tuve como asistente del curso a un alumno extranjero de posgrado, con un conocimiento adecuado del inglés, que estaba encargado de corregir las tareas escritas y participar en la sesión semanal de problemas.

El libro de texto asignado fue *Physics for Scientists and Engineers*, 5ª ed., vol.1, Tipler & Mosca (W.H. Freeman & Co). Es un texto tradicional que cubre de manera razonable todos los tópicos que se deben estudiar y tiene una selección aceptable de problemas. Incorpora a lo largo de los capítulos aplicaciones y ejemplos contemporáneos, donde los principios estudiados ayudan a comprender el comportamiento de tales sistemas, por ejemplo, tiene una discusión extensa sobre cohetes. El tratamiento de relatividad especial no es suficientemente riguroso, de modo que yo desarrollé notas basadas en el texto alternativo de T. Moore y en el libro de electricidad y magnetismo de Griffiths que puse en la página de Internet del curso.

Les designé los libros, *Six Ideas that Shaped Physics*, vols. C, N y R, de T. Moore (McGraw Hill), como un texto auxiliar alternativo. Los volúmenes están dedicados a las leyes de conservación (C); las leyes de Newton (N) y la relatividad (R). Estos libros tienen una aproximación más conceptual a la mecánica y son muy amenos. Contienen muchas referencias a la vida real y los utilicé a menudo para aclarar algunos tópicos. El tomo dedicado a la rela-

tividad especial de Einstein incluye un tratamiento formal, pero no complicado, de la geometría no euclidiana y las medidas en un espacio de Minkowsky, incluyendo la relación entre ángulos hiperbólicos y la relatividad espacial. Copias de este texto están disponibles en la biblioteca y en la sala de alumnos de pregrado en el departamento.

La evaluación

La evaluación final del curso estuvo basada en tres exámenes parciales con problemas analíticos (45%), tareas tanto analíticas como conceptuales (15%), problemas conceptuales (15%) y el examen final (25%). Tres de los diecisiete alumnos reprobaron el curso, mientras que otros tres obtuvieron la calificación más alta (“A” en el sistema estadounidense). No se puede presentar examen extraordinario en este curso; en caso de reprobarlo, hay que tomarlo de nuevo.

Las tareas semanales constaban de dos partes: diez problemas que se debían resolver utilizando un sitio de la Internet,³ donde los problemas eran corregidos de forma automática y por tanto los alumnos recibían retroalimentación inmediata; y dos problemas analíticos que los estudiantes entregaban por escrito y eran corregidos por el ayudante del curso. Dentro de los diez problemas asignados cada semana, dos o tres de ellos eran conceptuales y los otros analíticos.

El sitio de la Internet permite al profesor seguir el proceso para la solución de la tarea: cuántas veces los alumnos han intentado resolver un problema, cuáles problemas no han logrado resolver, cuál es el promedio y la desviación estándar en las calificaciones. Esta información permite al maestro dar una explicación del concepto o del problema en clase, cuando recibe la información de los estudiantes antes de la sesión.

Cada jueves por la tarde, el auxiliar del curso y yo estuvimos disponibles durante dos horas, en un salón de clases para ayudar a los alumnos con los problemas de la tarea que debían entregar al día siguiente. Un grupo constante de alumnos, aproximadamente un tercio de los alumnos inscritos en el curso, asistían de manera regular. Durante la sesión uno de ellos resolvía en el pizarrón un



problema, mientras los otros opinaban y nosotros guiábamos la discusión. La mayor parte de los alumnos que sacaron las calificaciones más altas asistía con regularidad.

El proyecto Galileo liderado por Eric Mazur en Harvard desarrolló una serie de preguntas conceptuales accesibles en la Internet.⁴ Estas preguntas son de elección múltiple y están diseñadas para presentar al alumno un problema donde se trata de ver si un concepto, por ejemplo la caída libre, ha sido comprendido correctamente. Un problema conceptual de caída libre es el siguiente: si una pelota de 10 kg de plomo y una de 1 g de corcho se sueltan de una misma altura y si se ignora la fricción: a) las pelotas llegan al piso de manera simultánea, b) la pelota de plomo llega primero al piso, c) la pelota de corcho llega primero.

Yo utilicé las preguntas conceptuales en lecciones y exámenes rápidos (llamados *quiz*) en una sesión de clase completa. Una sesión, siguiendo las indicaciones de Mazur, transcurrió de la siguiente forma: al empezar la clase entregué diez preguntas sobre los temas que habíamos estudiado en las cinco semanas anteriores. Los alumnos tuvieron quince minutos para responderlas de forma individual. Luego se juntaron en grupos de dos o tres para discutir sus respuestas. Tras otros quince minutos yo procedí a preguntar a todos los alumnos quiénes favorecían cada respuesta y anoté en el pizarrón el número de votantes, inmediatamente asigné a un alumno de entre los que escogían cada respuesta a exponer sus razones y defenderlas ante los otros alumnos que representaban las otras respuestas. Las discusiones eran acaloradas y mostraban el proceso intelectual y conceptual de los alumnos. La metodología favorecida por mi colega David Hammer exige al maestro no dar la respuesta correcta a las preguntas, pues argumenta que lo más importante en esta sesión es que hace pensar a los alumnos y al darles el maestro la respuesta se interrumpe ese proceso inquisitivo; deben buscar e investigar la respuesta más allá de la clase. Yo opté por una solución intermedia, si me daba cuenta de que había un error en la mayoría y la discusión no aclaraba el punto, en los días posteriores a la sesión de problemas conceptuales yo regresaba sobre el asunto y les mostraba el concepto de nuevo con la

esperanza de aclarar cualquier problema.

La mayoría de los alumnos disfrutó mucho estas sesiones, casi todos expresaban su entusiasmo al final de la clase y esperaban ansiosos la siguiente sesión. Yo también aprendí mucho, pues me daba cuenta con exactitud, cuando argumentaban unos y otros, cuáles eran los problemas conceptuales que yo debía aclarar. Tuvimos tres sesiones de problemas durante el semestre y el único requisito para obtener el crédito correspondiente era su asistencia a la sesión.

Los exámenes

Hubo tres exámenes parciales y uno final. Los parciales consistieron en tres problemas analíticos donde los alumnos debieron utilizar un concepto para poder resolver el problema; para solucionarse se requería, además, tener conocimientos de cálculo y cuidado con las unidades de las variables. Los exámenes se realizaron durante las horas de clases.

Los alumnos podían utilizar calculadora para las operaciones numéricas pero no tenían acceso a una lista de fórmulas o constantes necesarias. Para compensar los posibles lapsos de pérdida de memoria de los alumnos, durante los últimos quince minutos podían abrir el libro de texto para consultar lo que quisieran. Esto fue una solución intermedia, una vez más, pues como físico por lo general empiezo a trabajar de memoria, pero cuando quiero afirmar los detalles consulto los libros o artículos relevantes.

El examen final constó de dos partes. La primera con treinta preguntas conceptuales y la segunda con tres problemas analíticos. La duración total fue de dos horas y durante los últimos quince minutos los alumnos tuvieron oportunidad de consultar su libro de texto.

Materiales auxiliares

Demostraciones

Cada semana, por lo general los viernes, la clase comenzó con una demostración en vivo. Estas demostraciones han sido desarrolladas por el departamento de física y es posible acceder al



menú en la Internet.⁵ Están diseñadas para causar un efecto en los estudiantes. Antes de realizarlas preguntaba qué comportamiento esperaban ver. El efecto pedagógico es mucho más fuerte si las observaciones no concuerdan con las expectativas. Las demostraciones sobre rotaciones y *momentum* angular fueron por mucho las que causaron un efecto mayor, en seguida hubo algunas de choques y los efectos de la inercia en un globo inflado con helio causaron asombro.

Han proliferado las demostraciones basadas en simuladores por computadora. Existen muchos sitios de la Internet donde se pueden bajar *applets* y otros programas como ayuda para las clases. Sin embargo, yo no utilicé ninguna de tales demostraciones, pues considero que los alumnos han crecido con los videojuegos y me parece muy importante que vean con pelotas, ruedas, giróscopos y planos inclinados reales las demostraciones. Una parte importante en su educación es ver que en ocasiones las demostraciones no funcionan tan bien como uno quisiera. Ahí está la dificultad experimental y la agudeza en la observación para poder abstraer con claridad las variables relevantes y descubrir su relación, es decir, destilar el concepto físico esencial del experimento.

Cuando traté las leyes de Kepler y luego la ley de la gravitación universal me pareció muy importante relacionar de forma directa las primeras con la segunda. Esto es relativamente sencillo a excepción de la demostración de que los planetas siguen órbitas elípticas con el sol ubicado en uno de sus focos. Los libros de texto tradicionales simplemente lo dicen, pero no lo demuestran. La demostración requiere un gran conocimiento de cálculo integral y puede resultar demasiado confusa en este nivel. Siguiendo la metodología que Richard Feynmann usó en su curso cuando trató este tema, opté por presentar a los alumnos la solución numérica del problema.⁶ Presenté en una hoja de cálculos la solución y la grafiqué. Con el proyector de la computadora les mostré como, en efecto, la solución dependía de las condiciones iniciales de velocidad, y la posición del planeta y las órbitas eran elípticas cuando éste tenía la energía cinética apropiada para quedar capturado. Los alumnos entendieron bien la solución numérica

pues las ecuaciones de diferencias son mucho más intuitivas que el cálculo diferencial. Antes de comenzar les expliqué el método de Euler para resolver numéricamente tales problemas.

Oportunidades en el curso

Uno de los elementos más importantes para mí como físico profesional al impartir el curso fue plantear problemas, sucesos o desarrollos contemporáneos. De esa manera podía mostrar a los alumnos cómo los conceptos aprendidos en clase eran relevantes.

La primera oportunidad que se presentó fue con el paso de uno de los huracanes de la temporada en Florida. La NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) tenía en su página de la Internet imágenes animadas de la trayectoria del huracán.⁷ En ellas se veía con claridad la dirección del viento y cómo la velocidad del ojo del huracán se sumaba a la de la rotación en el lado este del ojo y se restaba en el lado oeste del ojo. Para entender tal diferencia se requiere manejar el concepto de adición de velocidades como vectores y puede significar la diferencia entre la vida y la muerte en caso de tener que decidir hacia dónde escapar.

La segunda oportunidad se presentó con la concesión del premio Nobel de física al grupo de tres científicos que descubrieron la libertad asintótica de la cromodinámica cuántica que explica por qué los *quarks* resienten una fuerza mayor mientras más separados están entre ellos.⁸ Aproveché la oportunidad para mostrarles que eso es equivalente a que las dos partículas estuvieran unidas por una cinta elástica. Conforme más se ensancha la cinta elástica mayor es la fuerza: una manifestación de la ley de Hooke.

Después de tratar el problema de las órbitas estelares y planetarias descubrí los resultados del seguimiento durante más de diez años de una estrella en el centro de la galaxia. Cuando Andrea Ghez era estudiante de posgrado, convenció al comité de asignación de tiempo en el observatorio Keck de Hawai de seguir el movimiento de esa estrella, pues podía dar información sobre el hoyo negro en el centro de nuestra galaxia. Era necesario



observar en el infrarrojo ya que el polvo en el centro de la galaxia obstruye completamente la luz en el espectro visible. Los resultados son espectaculares: gracias a la órbita de esa estrella, a sus ejes mayor y menor, en conjunto con el periodo de su órbita sabemos que el hoyo negro tiene una masa de más de dos y medio millones de masas solares. En la página de la Internet del Instituto Max Planck dedicada al centro de la galaxia se encuentra una imagen animada que muestra el centro de la galaxia que permite el cálculo de los parámetros de la órbita.⁹

Finalmente la otra actividad importante durante el semestre fue una visita a mi laboratorio de óptica cuántica y enfriamiento de átomos. Mis alumnos de doctorado prepararon las trampas de átomos de manera que se pudiera ver la fluorescencia de los átomos cuya temperatura es mucho menor a un grado Kelvin. Aproveché la oportunidad para recordarles la expansión balística, la transferencia de momentum lineal y angular por la luz cuando interactúa con los átomos y les demostré las propiedades de polarización de la luz.

Las dificultades

La sección con más dificultades en el curso fue indudablemente el estudio de rotaciones y de momento angular. Para animar un poco a mis estudiantes les hice ver que si la rotación fuese algo que evolutivamente hubiésemos heredado, habría más de algún animal con ruedas y eso no es así. Es necesario no sólo entender y observar con atención la dinámica de los cuerpos en rotación, sino que los alumnos deben poder calcular sin dificultad el producto cruz entre dos vectores y entender que el vector resultante es perpendicular al plano definido por los dos vectores multiplicandos.

Este curso es la primera introducción de los alumnos a la relatividad especial y dedicamos dos semanas a ello. La poca relación con la intuición euclidiana que tenemos dificulta mucho la comprensión de los principios básicos de la relatividad. Si bien preferiría utilizar muchos fenómenos de la electricidad y el magnetismo para aclarar los conceptos, no era posible pues los alumnos no han llevado un curso con ese material. El uso de

geometría hiperbólica no ayudó a hacer más transparentes las cosas a la mayoría de los alumnos.

Algunos alumnos que se retrasaron al principio del curso no pudieron recuperarse pues el ritmo de tareas y exámenes era rápido. No había mucho tiempo para repasar los conceptos anteriores pues el edificio de la mecánica clásica necesita de todas las piezas para funcionar. En cuanto introducía un concepto y les mostraba su utilización analítica éste entraba a formar parte del acervo para entender el siguiente concepto. El curso no está diseñado para alumnos que no quieren trabajar intensamente.

Evaluación del curso por los alumnos

Diez de los diecisiete alumnos llenaron el cuestionario de evaluación del curso. Éste consiste en diecisiete preguntas de selección múltiple donde se evalúan no sólo cuestiones pedagógicas sino el respeto mostrado por el maestro a los alumnos. La calificación que me dieron en cada pregunta está por arriba del promedio del departamento y por arriba del promedio de las otras clases similares. Les gustó mi estilo de dar clases, les pareció justa la manera en que los calificué y entre otras cosas mi escritura en el pizarrón fue legible. Con la única pregunta que mostraron reservas fue en la referente a la calidad del texto y creo que tienen razón.

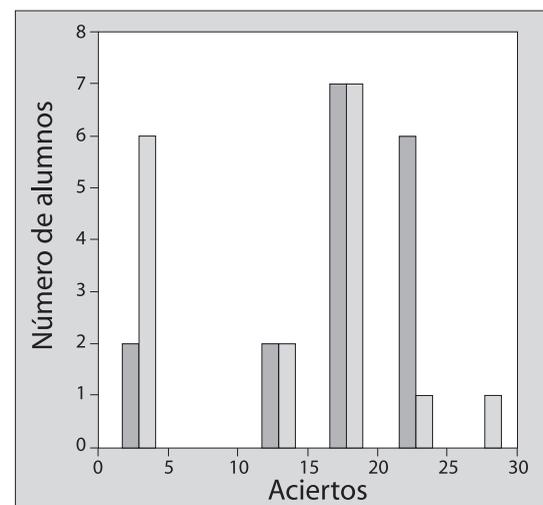


Figura 1. Histograma con los resultados del examen final. Las dos secciones del examen tenían un máximo de 30 puntos. Las barras oscuras son los resultados de la sección analítica, mientras que las claras son los resultados de la sección conceptual.



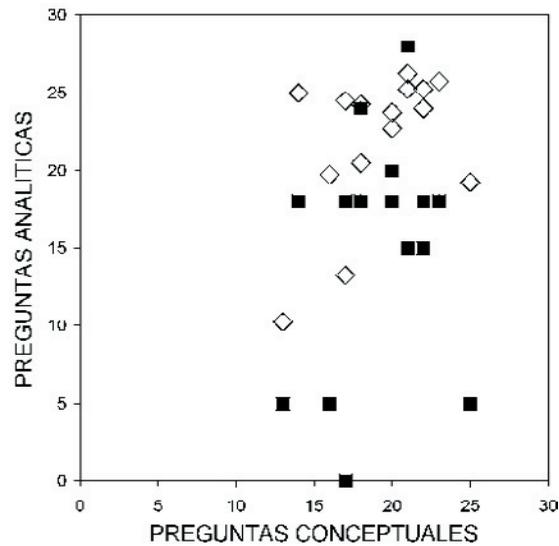
Resultados de la evaluación

El examen final consistió de dos partes. Treinta preguntas conceptuales y tres problemas para resolver sobre la última parte del curso. Les asigné una calificación por las primeras y otra por las segundas. La figura 1 presenta los histogramas de las calificaciones en una escala de treinta para las dos partes de examen final. Si bien la muestra no es muy grande está claro que la distribución no se acerca a una gaussiana, más bien indica la existencia de una distribución bimodal para ambas clases de preguntas.

La figura 2 presenta el coeficiente de correlación (r) entre los resultados para las preguntas conceptuales del examen final y el promedio de las preguntas analíticas en los tres exámenes parciales y la parte correspondiente del final es de 0.47. El coeficiente de correlación en el examen final entre las preguntas conceptuales y las analíticas es mucho menor, pues sólo alcanza 0.22.

Conclusión

El primer curso de física en la carrera profesional es una oportunidad única para poner en contacto a los estudiantes con su capacidad de observación y asombro ante la naturaleza; condición necesaria para una vida científica productiva. Es necesario desarrollar las herramientas conceptuales y analíticas que permitan al alumno entender y resolver problemas de una manera efectiva. La combinación de ambos tipos de preguntas en tareas, sesiones de problemas y exámenes es importante y la efectividad de las sesiones de preguntas conceptuales con el método de Mazur es muy alta. Los resultados dentro del grupo, limitado estadísticamente a sólo diecisiete alumnos, no muestran correlación entre las habilidades conceptuales y las analíticas de los alumnos al resolver el examen final. A manera anecdótica también se puede decir que los alumnos disfrutaron el curso, pero la mayoría no aprendió los conceptos básicos de mecánica clásica. El uso de oportunidades pedagógicas durante el curso fue provechoso y los alumnos entendieron mejor los conceptos y los problemas analíticos cuando utilicé un ejemplo inmediato para explicarlo.



Notas

1. Universidad de Maryland. (2005). Recuperado el 17 de enero de 2005, de <http://www.physics.umd.edu/perg/>
2. Orozco, L. A. (2005). *Curso Phys 171*. Recuperado el 17 de enero de 2005, de <http://www.physics.umd.edu/courses/Phys171/Orozco/describe.html> y <http://www.physics.umd.edu/courses/Phys171/Orozco/syllabus-s04.html>
3. Universidad del Estado de Carolina del Norte. (2005). Recuperado el 17 de enero de 2005, de <http://www.webassign.net/>
4. Harvard y National Science Foundation. (2005). *Project: Galileo*. Recuperado el 17 de enero de 2005, de <http://galileo.harvard.edu/>
5. Universidad de Maryland. (2005). Recuperado el 17 de enero de 2005, de <http://www.physics.umd.edu/lecdem/>
6. Feynmann, R. P., Leighton, R. B. y Sands, M. (1963). *Feynmann Lectures of Physics*, vol.1. Addison Wesley: Reading MA.
7. NOAA. (2005). Recuperado el 17 de enero de 2005, de <http://www.noaa.gov/> y el centro de huracanes (2005). Recuperado el 17 de enero de 2005, de <http://www.nhc.noaa.gov/>
8. Nobelprize (2005). Recuperado el 17 de enero 2005, de <http://nobelprize.org/physics/>
9. Max Panch-Institute (2005). Recuperado el 17 de enero de 2005, de <http://www.mpe.mpg.de/ir/GC/index.php> y Universidad de California. (2005). Recuperado el 17 de enero de 2005, de <http://www.astro.ucla.edu/~jlu/gc/index.shtml>

