

EL PAPEL DEL LABORATORIO EN LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA, NIVEL LICENCIATURA

ANGEL MANZUR GUZMAN, LUIS MIER Y TERAN CASANUEVA, ROBERTO OLAYO GONZALEZ* HECTOR RIVEROS ROTGE**

El propósito de este artículo es describir los criterios utilizados en la planeación de las actividades experimentales para estudiantes de los primeros años de licenciatura, de carreras relacionadas con la Física. En particular, se reporta como ejemplo específico los trabajos realizados por los alumnos del área de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma Metropolitana -plantel Iztapalapa.

La determinación de los objetivos de los cursos introductorios de Física es parte de un problema más general; el de especificar los objetivos de la enseñanza profesional. A su vez, estos objetivos están definidos por lo que la sociedad espera de sus profesionistas, por lo que es necesario hacer algunas consideraciones acerca de la situación del país en que vivimos. Es muy frecuente oír hablar del problema de dependencia tecnológica en que se encuentran actualmente las naciones en vías de desarrollo y de las grandes cantidades de dinero que salen anualmente de nuestro país por ese concepto. Es cada día mayor el número de casos que sirven para ilustrar cómo adquirimos a gran precio tecnología que por obsoleta ya ha sido desechada por los países desarrollados. Armamos radios de bulbos en medio de la revolución del transistor y empezamos a producir transistores cuando los circuitos integrados los están desplazando. Más aún, el colonialismo tecnológico en que nos hayamos sumidos hace que preparemos a nuestros ingenieros para mantener la producción y controlar la calidad, pero no para establecer los métodos de producir o controlar la calidad. Aunque es muy grato saber que existen excepciones honrosas a lo anteriormente dicho, tal vez la más importante de todas sea la del desarrollo del método de reducción directa para la fabricación de hierro esponja, que se ha convertido en un ejemplo de tecnología mexicana de exportación;¹ es claro que no existen muchos más de esos casos.

Indudablemente, uno de los factores que más han influido en hacernos llegar al estado actual es nuestro sistema educativo, sobre todo a nivel profesional. Puede decirse que, en general, preparamos a nuestros técnicos e ingenieros más para la implantación y consumo de tecnología extranjera que para el desarrollo de tecnología nueva, más acorde con nuestras propias necesidades. Uno de los elementos primordiales de la educación científica y tecnológica debe ser el desarrollo de la capacidad individual de enfrentarse a problemas nuevos; por eso podemos decir que un profesionista, entre otras cosas, debe ser una persona capaz de aplicar sus conocimientos y métodos en la solución de nuevos problemas (fig. 1). Esta definición, aunque incompleta en el sentido de que no enumera las habilidades requeridas, es lo suficientemente amplia para ser aplicada a ingenieros, químicos, físicos, etc., e implica la capacidad de razonamiento de éstos para establecer procedimientos de producción o contribuir al diseño de aparatos o hacer aportaciones a la ciencia pura o aplicada.

*Respectivamente: Físico, colaborador en el Laboratorio de Polímeros en la Investigación de Rayos X, UAM-Iztapalapa; Maestro en Ciencias, colaborador en el Departamento de Física, UAM-Iztapalapa; Físico, colaborador en el Laboratorio de Polímeros en la Investigación de Rayos X, y profesor asistente de la UAM-Iztapalapa.

**Doctor en Ciencias, investigador del Instituto de Física y profesor de la Facultad de Ciencias, UNAM.

¹Véase "The Direct Reduction of Iron Ore." J. R. Miller. Scientific American. Julio de 1976.

NUEVOS METODOS DE ENSEÑANZA

No cabe duda de que, de acuerdo con lo expuesto antes, la manera ideal de introducir a los futuros profesionistas, tanto en la metodología de la solución de problemas como en el conjunto de conocimientos necesarios para atacarlos, sería una enseñanza interdisciplinaria que no dividiera a estos últimos en forma arbitraria, como se hace en los planes de estudio “por materia”, y que avanzara en una espiral, desde los conceptos y problemas más sencillos hasta los más elaborados. Sin embargo, aunque dicho método tendría la ventaja de ser “integral”, presentaría el problema, insoluble en la práctica, de encontrar profesores que dominaran una enorme cantidad de áreas relacionadas con su profesión. Es debido precisamente a esa imposibilidad práctica que se recurre normalmente a la solución parcial de elaborar planes de estudio “por materia”, en los que comúnmente se pierde toda integración (fig. 2) y en los que se suelen enumerar grandes cantidades de conocimientos con la esperanza, casi nunca justificada, de que el estudiante no sólo los aprenda, sino de que desarrolle al mismo tiempo las habilidades necesarias para aplicarlos algún día.



| MATEMATICAS | FISICA | QUIMICA | BIOLOGIA |
|-------------|--------|---------|----------|
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

FIG. 2. Planes de estudio por materia en los que se mencionan los conocimientos pero no los métodos de trabajo.

Ya dentro de los planes de estudio “por materia”, el proyectar un cierto curso requiere poner en claro su contenido, o sea, el conjunto de conocimientos que se desean transmitir; pero además es necesario especificar el conjunto de técnicas y métodos de trabajo que el estudiante debe aprender durante el curso. De hecho, es muy conveniente hacer una tabla como la de la figura 3, en la que a cada tema del contenido del curso se le hacen corresponder los métodos de trabajo y los recursos disponibles, para de esta manera, usarlos del modo más efectivo posible. Sin embargo, en el caso de un curso de física, esto presupone que el profesor tiene una versatilidad lo suficientemente grande como para poder intercalar, a cada momento, la mención de conocimientos, inducir y deducir a partir de ellos, hacer demostraciones, diseñar experimentos, su realización e interpretación, etc., según convenga a los intereses del grupo y de él mismo en un momento dado. Aunque ésta sería la manera más completa de impartir un curso, es claro que se presenta otra vez la dificultad de que, el hacerlo así, no está al alcance de todos los profesores, ya sea por razones de su formación o bien porque muchos no están dispuestos, por falta de tiempo, a darse a esa tarea. Esto ha ocasionado que se acuda a la división de las clases en las de teoría y las de laboratorio, y a la especialización correspondiente por parte de los profesores. Las clases de pizarrón se dedican primordialmente a la transmisión de conocimientos y al planteamiento y solución de problemas teóricos. En cambio el laboratorio² facilita la demostración de fenómenos, familiariza con instrumentos, enseña el manejo de datos experimentales, aclara conceptos, verifica leyes o las induce y es el lugar ideal para aprender a resolver problemas prácticos (fig. 4). No obstante, esas cualidades de las clases de laboratorio son raramente aprovechadas, pues en muchas de nuestras instituciones los cursos de física experimental se limitan a la ejecución de prácticas improvisadas, que apenas llegan al nivel de experimentos de demostración cualitativa, o bien se adoptan “métodos” como el de proporcionar al estudiante un recetario con los pasos que debe ejecutar aún sin entender porqué y sin saber a dónde le conducirán finalmente.

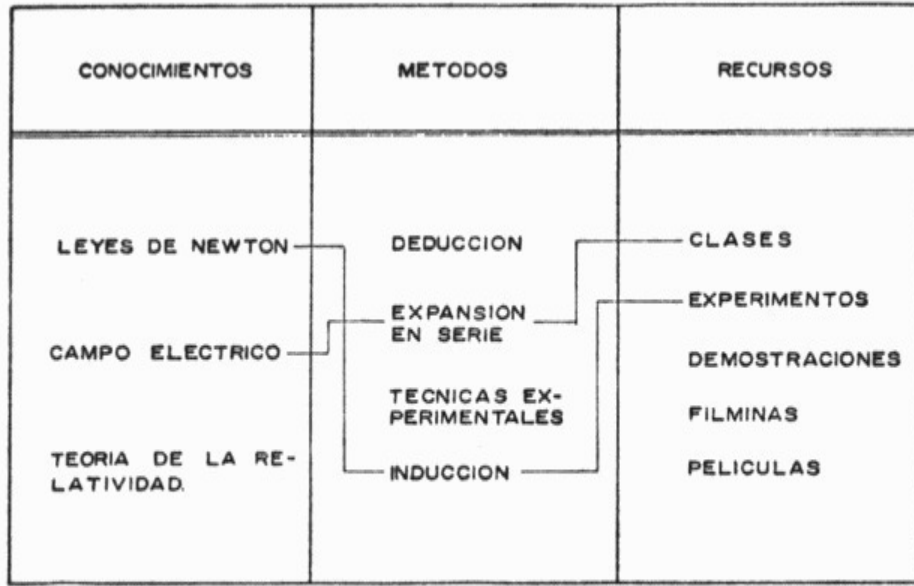


FIG. 3. *Planeación de un curso en el que se combinen conocimientos, métodos y recursos disponibles.*

Otro error que se comete frecuentemente es el de considerar al laboratorio solamente como un apoyo didáctico de las clases teóricas; tal concepción, además de olvidar que la Física es una ciencia fundamentalmente experimental, desaprovecha las cualidades antes mencionadas y, sobre todo, aquella sobre la cual queremos hacer más énfasis aquí: la del desarrollo de la capacidad individual para resolver problemas nuevos.

²Véase: "Laboratorios de aprendizaje ¿para qué?" R. Gómez, S. Reyes y H. Riveros, en Revista Mexicana de Física, 21 (1972), E 43 E 50.

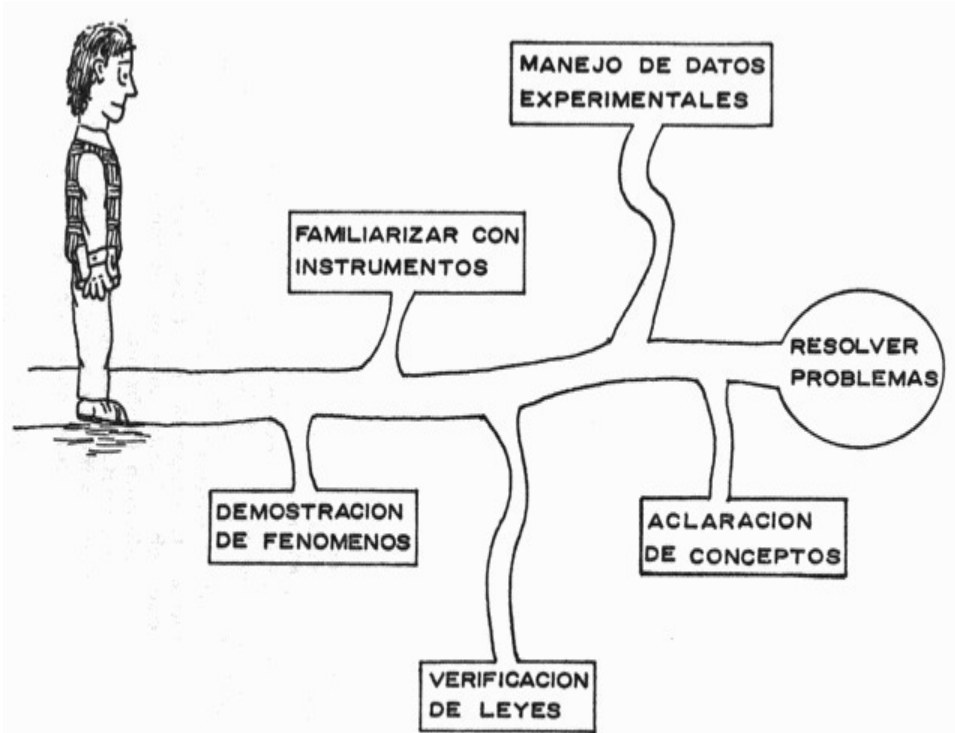


FIG. 4. El trabajo en el laboratorio se puede usar para diversos fines.

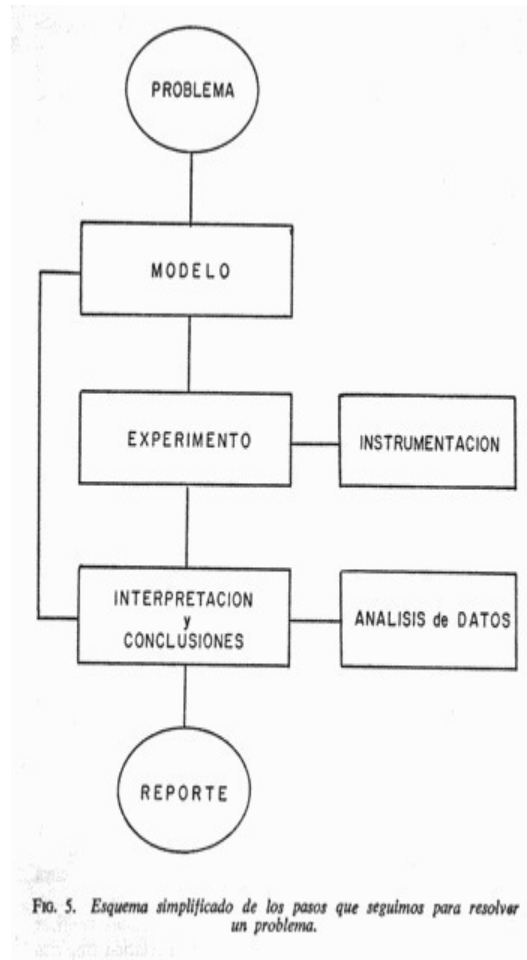
Existen también intentos de basar en el laboratorio las clases de teoría, tratando de obtener del experimento los conocimientos básicos de un curso completo de física, pero esto ha dado como resultado un proceso de aprendizaje sumamente lento. Además, como es fácil que al menos algún estudiante del grupo tenga una idea previa de lo que se quiere obtener, se tiene el inconveniente de que así se falsea el proceso de inducción asociado al experimento. Podríamos añadir que la obtención de las leyes de la física a partir de experimentos suele ser una labor que deja insatisfecho al alumno, ya que son pocos los experimentos que con el equipo y el tiempo disponibles permiten una inducción clara y directa de la ley en cuestión.

SOLUCION DE PROBLEMAS NUEVOS

La naturaleza no conoce la división arbitraria que hemos hecho al separar disciplinas como física, química, etc. Eso quiere decir que cuando nos presenta un problema científico o tecnológico complicado, muy rara vez cae éste en forma estricta en algunas de aquellas disciplinas. Es por eso que la solución de tales problemas involucran, generalmente, la conjunción de todos nuestros conocimientos y habilidades.

La figura 5 nos muestra un esquema simplificado de los pasos que seguimos en la solución de un problema. Empezamos por plantearnos un problema cuya solución sea de interés. En seguida, mediante el uso de las leyes físicas conocidas, hacemos una hipótesis con la que tratamos de identificar los efectos más importantes que intervienen en el fenómeno dado, y mediante un proceso deductivo hacemos una predicción sobre cuáles son las variables relevantes al problema y cuál es la relación matemática entre ellas; a dicha predicción se le llama muchas veces modelo. Si esta última parte no es factible, al menos quedará claro qué variables pueden quedar unidas por una relación empírica cuya forma exacta después se buscará. Ya sabiendo qué medir, podemos planear y ejecutar un experimento que nos permita verificar la predicción hecha, o en su caso, encontrar la relación empírica buscada. Para tal efecto, es necesario contar con instrumentos de medición

y técnicas experimentales que se encuentren al nivel de precisión requerido por la planeación hecha antes. El siguiente paso es el de analizar los datos obtenidos del experimento, interpretar los resultados de ese análisis y llegar a conclusiones sobre la validez de las hipótesis hechas, la calidad del experimento, etc. Una vez hecho esto, será posible decidir si se ha resuelto el problema planteado inicialmente y en qué medida las hipótesis iniciales son las adecuadas para describir al fenómeno observado. En este paso puede incluso llegarse a la conclusión de que el problema planteado al inicio no tiene sentido y que debe entonces ser planteado nuevamente. También es común que las hipótesis iniciales deban modificarse para introducir factores que no se habían incluido teóricamente y cuya influencia se sospecha pueda ser importante. Finalmente, en caso de que el problema se considere satisfactoriamente resuelto, se procederá a escribir un informe en el que se comuniquen los resultados en forma clara.



El diagrama anterior es simplista porque presenta la forma de una secuencia de pasos, casi independientes, siendo que en el proceso real cada una de esas partes está conectada casi con todas las demás y, por lo tanto, nuestro diagrama debería parecerse más a un rompecabezas (fig. 6). Así, por ejemplo, el tipo de consecuencias que se puedan extraer de los datos, puede modificar el procedimiento experimental, o bien la estimación de la incertidumbre de un cierto equipo puede hacer que se deseche su uso, o aún más, una experiencia cualitativa previa puede demostrar que la hipótesis original no funciona, etc. A pesar de esto, el diagrama tiene la ventaja de ser lo suficientemente sencillo como para que podamos, a partir de él, plantear los objetivos de un curso de física experimental. Es decir, para que después de ese curso un estudiante sea capaz de resolver problemas incluso a nivel elemental, necesita:

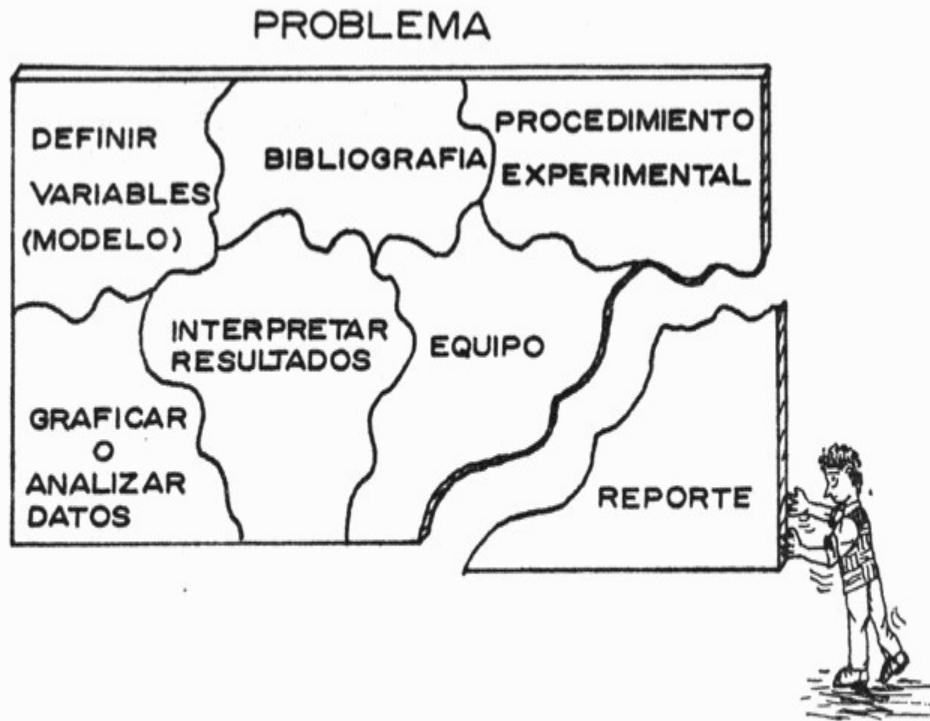


FIG. 6. *El resolver un problema se parece a un rompecabezas en que las diferentes etapas están interrelacionadas.*

1. Poder plantear un problema, identificando el modelo y sus hipótesis, o al menos, las variables cuya medición es importante.
2. Saber consultar la bibliografía.
3. Proponer un procedimiento experimental que conduzca a la respuesta.
4. Elegir el equipo de medición que sea adecuado, para lo cual es necesario saber consultar catálogos y definir las características de los instrumentos necesarios.
5. Graficar, tabular y combinar los datos que así lo requieran.
6. Interpretar los resultados en términos de los postulados originales.
7. Hacer un informe claro y conciso de los resultados obtenidos, o sea dar la respuesta al problema planteado inicialmente.

Es razonable pensar que los problemas que un estudiante de ciencias o de ingeniería puede aprender a resolver no pueden tener la complejidad de aquellos a los que se va a tener que enfrentar durante su vida profesional posterior. Sin embargo, si consideramos que el análisis cuidadoso de un problema complicado nos conduce a la separación de éste en un conjunto, que puede ser numeroso, de problemas sencillos, nos daremos cuenta de que, proporcionando al estudiante el entrenamiento mencionado, lo estaremos preparando para que participe, posteriormente, en la solución de problemas mucho más complejos (fig. 7).

De acuerdo con lo anterior, lo que necesitamos es encontrar un conjunto de problemas que sean resolubles con los conocimientos que tiene el estudiante, relacionados con los temas que está llevando en la parte teórica de la clase, en los que necesite ciertos aparatos y técnicas experimentales y que el estudiante considere relevantes para lograr motivar sus esfuerzos. Estos requisitos, que parecen triviales, son extremadamente difíciles de cumplir, por lo que seguimos buscando más problemas que los satisfagan.



De acuerdo con esto, el resultado de la planeación de la parte experimental de un curso sería un cuadro como el de la figura 8, en el que los experimentos juegan el papel fundamental de sintetizar conocimientos y preparar al estudiante a resolver problemas, ejercitando los métodos de trabajo que posteriormente utilizará en su vida profesional.

DISEÑO DEL CURSO DE LABORATORIO DE LA UAM-IZTAPALAPA

Ahora nos referiremos a la forma en que se elaboró el programa de la parte experimental de los cursos de física, que llevan los estudiantes en sus cuatro primeros trimestres de estudio en el área de Ciencias Básicas e Ingeniería en la unidad Iztapalapa de la UAM. El programa consta de experimentos, demostraciones, exhibiciones de pasillo y lecturas, coordinados en un cuadro semejante a la figura 8.

Experimentos. Para escoger los experimentos a realizar se analizó el programa de la parte teórica de los cursos, distribuyendo los temas en las semanas disponibles, suponiendo un ritmo constante y que los programas se cumplen. Dentro de estos temas se escogieron los más representativos, aproximadamente uno por semana, tratando de cubrir una variedad de tópicos; dejando libres algunas sesiones para cubrir las necesidades informativas propias de los laboratorios, tales como: métodos de trabajo, manejo de datos experimentales, y técnicas instrumentales. Estas pocas clases de pizarrón se dan en una sesión antes de la práctica en la que se comenzará a hacer uso de la información proporcionada.

| SEMANA | TEORIA | LABORATORIO | RECURSOS |
|--------|--------|-------------|-------------------------------|
| | TEMA 1 | CLASE 1 | DEMOSTRACIONES DE CLASE |
| | TEMA 2 | PROBLEMA 1 | DEMOSTRACIONES DE LABORATORIO |
| | TEMA 3 | " 2 | PELICULAS |
| | TEMA 4 | CLASE 2 | EXHIBICIONES |
| | | PROBLEMA 3 | |

FIG. 8. Esquema de la coordinación entre las clases de pizarrón y de laboratorio.

Para cada tema se propusieron varios problemas y demostraciones teóricamente posibles; pero en muchos casos la realización de los experimentos correspondientes mostró que no era posible utilizarlos debido a que: el nivel general de conocimientos no era el adecuado, los equipos básicos de medida no eran suficientemente sensibles, la interpretación de los datos demasiado sofisticada para el nivel correspondiente, o simplemente no salía el experimento por ser afectado por otros factores no controlados.

Con los experimentos que funcionaron adecuadamente se plantearon problemas con objetivos inmediatos bien definidos; para resolver el problema el estudiante debe hacer un experimento y contar con la libertad de escoger el procedimiento que considere más adecuado. Además del objetivo inmediato, se le mencionan los objetivos mediatos, o sea las técnicas y métodos que se pueden ejemplificar con el problema propuesto. Los problemas aumentan progresivamente en grado de dificultad.

Para cada trimestre existen dos instructivos de las prácticas. Uno de ellos presenta los problemas a resolver y un resumen de los temas de las clases informativas (análisis gráfico, mínimos cuadrados, etc.). El otro instructivo, disponible sólo para el profesor, contiene la información necesaria para plantear los experimentos y algunos resultados típicos, así como información sobre tratamientos adicionales o extensiones que los convierten en experimentos abiertos.

La figura 9 muestra el programa del primer trimestre y su correlación con la parte teórica. Dado que los temas de las dos primeras semanas no se prestan para plantear problemas (pero sí demostraciones), se utilizan para discutir los objetivos del laboratorio y el concepto de incertidumbre como máximo error posible cometido en una medida.

Además, en este primer trimestre el estudiante aprende a medir directa e indirectamente, a calcular la propagación de incertidumbres y a realizar análisis gráfico incluyendo el uso de papeles logarítmicos.

La figura 10 muestra el programa de los cuatro trimestres, menciona sólo los nombres de las prácticas enumeradas en forma consecutiva. El curso completo contiene temas de mecánica, ondas, fluidos, electricidad, magnetismo y óptica. En el segundo trimestre el alumno aprende el uso de la teoría de errores y el método de mínimos cuadrados para el ajuste de rectas. También aprende a manejar modelos, lo que implica estar consciente de las aproximaciones y limitaciones introducidas en las hipótesis hechas para resolver los problemas, así como a modificar las hipótesis si el análisis de los datos así lo sugiere. En los trimestres tercero y cuarto se realizan experimentos de electricidad, magnetismo y óptica; el alumno aprende a manejar aparatos electrónicos y a resolver problemas, tales como el acoplamiento de impedancias, división de voltajes, etc.

PRIMER TRIMESTRE

| <i>Sem.</i> | <i>Teoría</i> | <i>Laboratorio</i> | <i>Demostración</i> |
|-------------|---|---|--|
| 1 | Medidas y unidades Algebra vectorial | Clase: Objeto del laboratorio Incertidumbre y su propagación Práctica: Mediciones | Lab.: Metro, calibrador y balanza Teo.: Romper una cuerda con poca fuerza Ex.: Principio de Arquímedes |
| 2 | Cálculo vectorial | Práctica: Determinación de la composición de una aleación binaria, por medio de su densidad | Ex.: Columna de líquidos de diferente densidad |
| 3 | Movimiento en una dimensión | Práctica: Velocidad de evaporación del agua, a temperatura ambiente | Caída libre de pelotas en cadena Ex.: Riel de aire nivelado-Mov. uniforme |
| 4 | Movimiento en el plano | Clase: Análisis gráfico | Ex.: Chorrillos que se cruzan Pel.: Relatividad Galileana |
| 5 | Dinámica de una partícula I | Práctica: Encontrar la ecuación de la trayectoria de una gota de agua | Romper tabla delgada-periódico Romper hilo arriba o abajo de cuerpo suspendido; Pel.: Fuerzas inerciales |

| | | | |
|----|------------------------------|---|---|
| 6 | Dinámica de una partícula II | Práctica: Descomposición del movimiento de la gota, en horizontal y vertical | Centro de gravedad de barra (fricción) Balines en plato de cartón |
| 7 | Trabajo y energía | Práctica: Encontrar la tensión en una cuerda enrollada en un cilindro rotatorio | Pel.: Conversión de la energía |
| 8 | Conservación de la energía | Práctica: Medir la potencia de un brazo humano, al mover diferentes cargas | Lata que regresa; Péndulo con obstáculo; Pel.: Conservación de la energía |
| 9 | Conservación Impetu | Práctica: Optimizar la cantidad de agua, para que un cohete de agua vuele el máximo de tiempo | Pel.: Conservación del ímpetu |
| 10 | Colisiones | Energía medida | Choques con balines en canal Pel.: Dispersión de Rutherford |
| 11 | Repaso | Examen | |

FIG. 9. Programa coordinado del primer trimestre.

| | |
|---|--|
| I | III |
| <ul style="list-style-type: none"> 1. Mediciones 2. Densidad 3. Velocidad de evaporación 4. Trayectoria 5. Descripción de movimientos 6. Tensión en una cuerda 7. Energía mecánica | <ul style="list-style-type: none"> 17. Resistividad 18. Condensadores 19. Circuito RC 20. Fuerza magnética sobre una corriente 21. Ley de Ampere 22. Inducción en una bobina 23. Circuito RL 24. Curva de Histéresis |
| II | IV |
| <ul style="list-style-type: none"> 8. Aceleración de la gravedad 9. Momento de inercia 10. Péndulo de torsión 11. Sistema resorte-masa 12. Constante de amortiguamiento 13. Balanza de Cavendish 14. Viscosidad 15. Velocidad del sonido 16. Resonancia de una columna de aire | <ul style="list-style-type: none"> 25. Circuito RLC 26. Índice de refracción 27. Distancia focal 28. Instrumentos ópticos 29. Interferencia 30. Polarización 31. Práctica libre |

FIG. 10. Experimentos realizados en los cuatro trimestres del programa de Física Básica de la UAM-Iztapalapa.

A manera de ejemplo describiremos algunas prácticas: Densidad. La figura 11 muestra la forma como se presenta este problema a los estudiantes.

DENSIDAD

Problema:

Determinar la composición (por ciento en peso) de una aleación binaria conocida mediante la medida de su densidad.

Objetivos mediatos:

1. Libertad para elegir el procedimiento que considere más adecuado.
2. Es necesario aplicar, de la teoría de errores, la propagación de incertidumbres y subrayar la importancia de determinar la incertidumbre en las medidas.

Ideas generales:

La aleación puede ser un anillo u objeto de oro comercial (generalmente CU-AU) o pedir una aleación conocida en el laboratorio. Para determinar su densidad es necesario medir su masa y volumen ($P = M/V$).

Una vez elegido el equipo que se va a usar, de acuerdo al procedimiento escogido (siendo diferentes las posibilidades para medir la densidad), se deberá evaluar la incertidumbre final en la densidad.

Sugerencias:

Es conveniente saber:

1. Con qué precisión puede medir M y V y con qué.
2. La diferencia entre mezcla y solución sólida.
3. La diferencia entre medir la concentración como una relación de volúmenes o de masa.
4. ¿Es aceptable la suposición de que la densidad (o su recíproco) es una función lineal de la concentración de la aleación?

Fig. 11. Copia del instructivo para los estudiantes de la práctica de densidad

En este experimento, que es el primero del primer trimestre, el problema consiste en determinar la masa de cada uno de los metales que forman una aleación binaria, a través de la medida de su densidad. El estudiante está en libertad de elegir el procedimiento que considere más adecuado para medir la densidad de la aleación. Además, se convence de la importancia que tiene la incertidumbre, la cual calcula tanto para la densidad como para la concentración encontrada. Una aleación binaria fácil de conseguir es soldadura sin fundente (por ejemplo, plomo-estaño). Para encontrar la relación entre la densidad de la aleación y las densidades de los metales componentes necesitamos hacer una hipótesis acerca del volumen de la aleación. Una buena suposición es que cada uno de los metales conserva su volumen total. La densidad p de la aleación es

$$p = \frac{m_1 + m_2}{v_1 + v_2}$$

y para cada componente

$$p_1 = \frac{m_1}{v_1} ; p_2 = \frac{m_2}{v_2}$$

Para aleaciones se acostumbra expresar la concentración en fracción de masa. La composición o fracción de masa se define como:

$$X_1 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} ; X_2 = \frac{m_2}{m_1 + m_2}$$

tal que $X_1 + X_2 = 1$.

Eliminando el volumen, el recíproco de la densidad puede escribirse como:

$$\frac{1}{p} = \frac{V_1 + V_2}{m_1 + m_2} = \frac{1}{p_2} + \left(\frac{1}{p_1} - \frac{1}{p_2}\right)X_1$$

De esta ecuación se calcula la concentración y su incertidumbre. El método más sencillo es construir la gráfica de la ecuación anterior, en la cual puede medirse la concentración si se conoce el recíproco de la densidad, como se muestra en la figura 12.

Se obtienen excelentes resultados determinando el volumen a través del principio de Arquímedes y usando una balanza con sensibilidad de 0.01 g.

Según sea el interés de los alumnos, la solución a este problema puede limitarse a calcular la concentración, o bien se puede profundizar más en el tema y realizar una investigación sobre si los volúmenes son realmente aditivos; esto se puede hacer experimentalmente o consultando en algún manual los valores de las densidades de aleaciones binarias de concentraciones conocidas para que, finalmente, se comparen con lo que predice la ecuación anterior. En la figura 12 se presentan los datos encontrados en diferentes manuales y rectas trazadas con la ecuación anterior; esta gráfica, tomada del instructivo del profesor, indica que para las aleaciones mostradas es una buena suposición considerar que los volúmenes son aditivos. Al consultar la bibliografía, el estudiante averigua la posible forma en que Arquímedes resolvió el problema de la corona del rey Hiero.³

³How did Archimedes solve king Hiero's crown problem?, an unanswered question." Lillian H. Hoddeson. The Physics Teacher, Vol. 10, número 1, 1972.

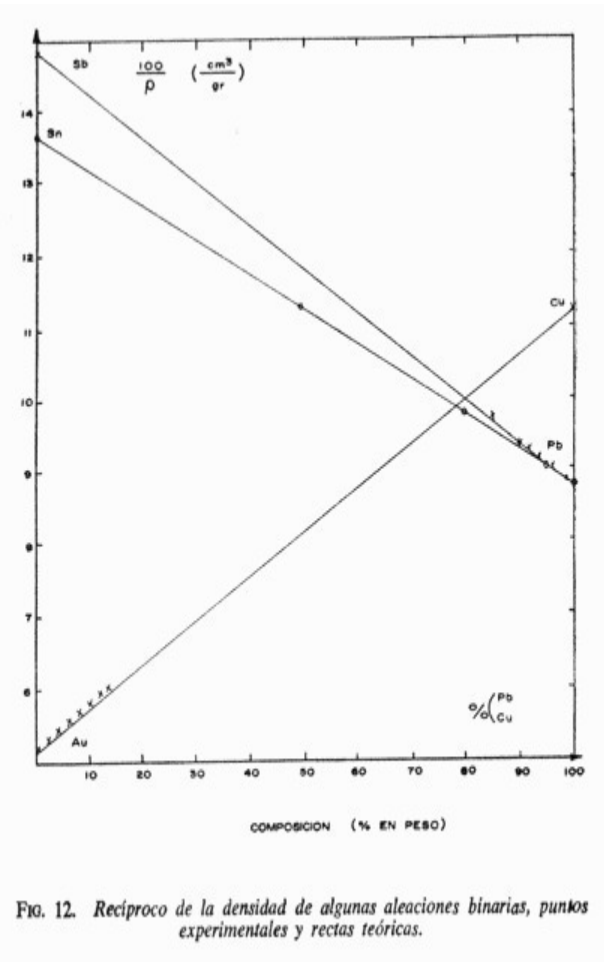


FIG. 12. Recíproco de la densidad de algunas aleaciones binarias, puntos experimentales y rectas teóricas.

ACELERACION DE LA GRAVEDAD

El problema, que se presenta como la primera práctica del segundo trimestre, consiste en determinar experimentalmente el valor de la aceleración de la gravedad, con la máxima precisión posible, empleando un péndulo simple.

En este experimento el estudiante tiene la primera oportunidad de aplicar sus conocimientos para ajustar rectas por el método de mínimos cuadrados y determinar la región de validez de un modelo.

El periodo de oscilación de un péndulo simple de longitud L está dado por:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$

donde g es la aceleración de la gravedad. Para obtener esta ecuación se hicieron las siguientes hipótesis simplificadoras:

- a) Hilo inextensible y de masa despreciable comparada con la del péndulo.
- b) Masa puntual del péndulo, o sea que las dimensiones del péndulo son pequeñas, comparadas con las del hilo.

- c) No hay fricción.
- d) La amplitud de la oscilación θ es pequeña, para que sea válida la aproximación $\sin \theta$; esta aproximación es válida hasta 11° si se mide el periodo con tres cifras significativas, o hasta 5° si se le mide con cuatro cifras significativas.

El estudiante debe escoger el material adecuado para asegurar que se satisfacen estas hipótesis simplificadoras y armar el dispositivo experimental de tal manera que se obtenga el valor de g con la máxima precisión.

Aunque el valor de g puede obtenerse a partir de una sola longitud, conviene determinar la variación del periodo con la longitud, graficando T^2 vs. L , debe obtenerse una recta que pase por el origen, de acuerdo a la predicción del modelo establecido. Si no es una línea recta significa que las condiciones experimentales no se ajustaron a las hipótesis del modelo; si es recta pero no pasa por el origen, se detecta un error sistemático en L que usualmente corresponde a medir la longitud total del péndulo y no al centro de masa.

DEMOSTRACIONES

En un curso de física general es difícil obtener un panorama completo de la materia sólo a través de los libros o de las pláticas de pizarrón; se requiere un contacto directo con los fenómenos, y para ello se realizan experimentos. Sin embargo, debido a las usuales limitaciones de tiempo, el número de experimentos en el laboratorio es reducido y surge la necesidad de realizar experimentos de demostración, que ayuden a los estudiantes a entrar en contacto con diversos fenómenos de la naturaleza.

El propósito de una demostración es resaltar un concepto físico y dejar en los estudiantes una impresión, tan memorable como sea posible, de cómo opera algún principio físico que se usa para explicar el fenómeno observado. Una demostración no debe ser considerada como un sustituto de un experimento que tiene objetivos bien definidos; debe realizarse cuidadosamente en el laboratorio.

La experiencia indica que los experimentos de demostración son necesarios para hacer ver a los estudiantes que la física es una ciencia natural, y que cada teoría debe finalmente basarse en las respuestas que la naturaleza proporciona a las preguntas formuladas adecuadamente a través de los experimentos.

Algunas de las ventajas que se obtienen con las demostraciones en el salón de clase son las siguientes:

1. Comunicación

Se establece forzosamente una comunicación entre el profesor y los alumnos cuando, antes de hacer la demostración, se pregunta: “¿qué suponen ustedes que suceda si. . . ?” La demostración que deberá seguir a tal pregunta debe ser clara y concisa para que el alumno pueda encontrar la respuesta.

2. Ilustración de conceptos

Existe la tendencia a usar principalmente demostraciones cualitativas, simples y de poca duración, de tal manera que se ilustre un concepto físico bien definido.

3. Motivación

Una demostración sirve de motivación para estudiar un fenómeno. También sirve de ejemplo para que el alumno se vea tentado a diseñar o idear demostraciones con equipo y material lo más sencillo posible o de fácil adquisición. El alumno se da cuenta que con equipo casero puede realizar experimentos.

A continuación describimos algunas de las demostraciones.⁴

Romper cuerda con poca fuerza

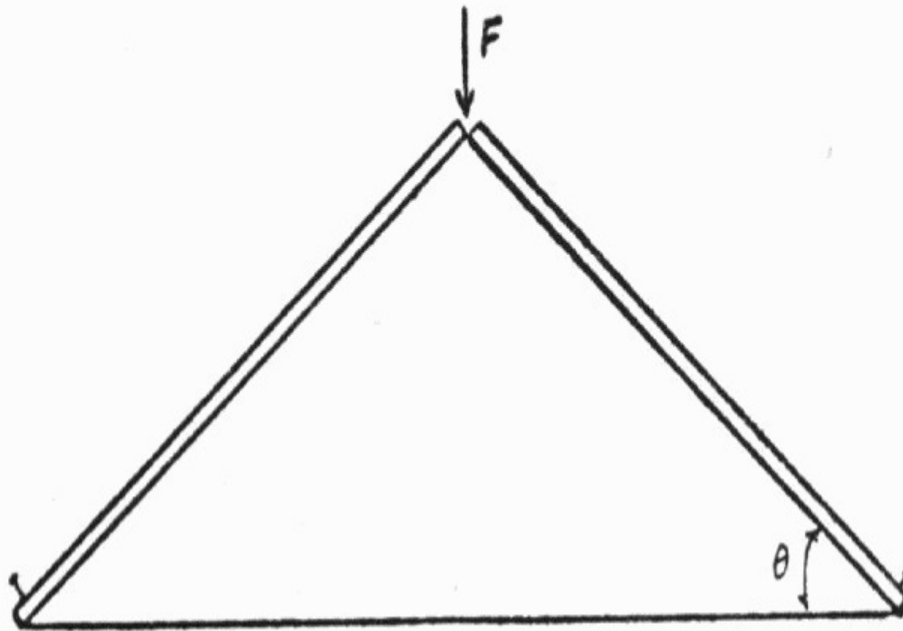
Este experimento sirve para demostrar la aplicación de fuerzas y para hacer una discusión de vectores.

El dispositivo incluye dos tablas unidas por una bisagra, cuyos extremos libres tienen una ranura por donde se pasa una cuerda que sirve para formar un triángulo con las tablas.

Se aplica una fuerza vertical en la bisagra hasta que la cuerda se rompa; cuando el ángulo entre la cuerda y las tablas es pequeño, la fuerza necesaria es pequeña.

La fuerza T producida en la cuerda por la fuerza aplicada F está dada por:

$$T = \frac{F}{2 \tan \theta}$$



Aceleración lineal y aceleración angular

Si se dejan caer dos tablas, una con sus extremos libres y la otra con un extremo fijo, ¿en cuál es mayor la aceleración?

Con este experimento se demuestra que la tabla con un extremo fijo cae con mayor aceleración que la que cae libremente. Se coloca la tabla formando un ángulo θ con la mesa, en el extremo libre se coloca una canica y cerca de ésta un vaso. Como la aceleración de la tabla es mayor que la de la canica, el vaso recibe la canica.

Respecto al extremo fijo, la aceleración angular es:

$$\ddot{\theta} = \frac{3g}{2L} \cos \theta$$

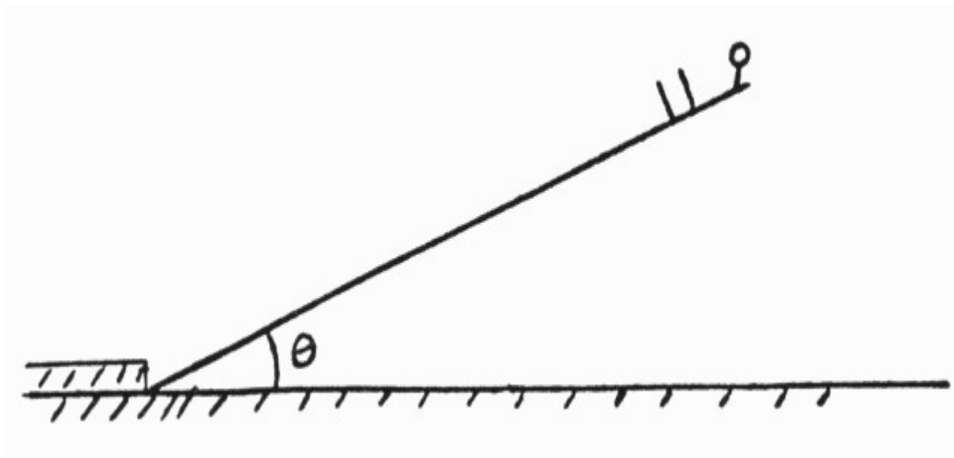
donde L es la longitud de la tabla. La aceleración lineal del extremo de la tabla es:

$$\ddot{S} = \frac{3}{2}g \cos \theta$$

y la componente vertical de esta aceleración es:

$$\ddot{y} = \frac{3}{2}g \cos^2 \theta$$

Obsérvese que \ddot{y} es mayor que g sólo para ángulos menores de 35° .



Precesión

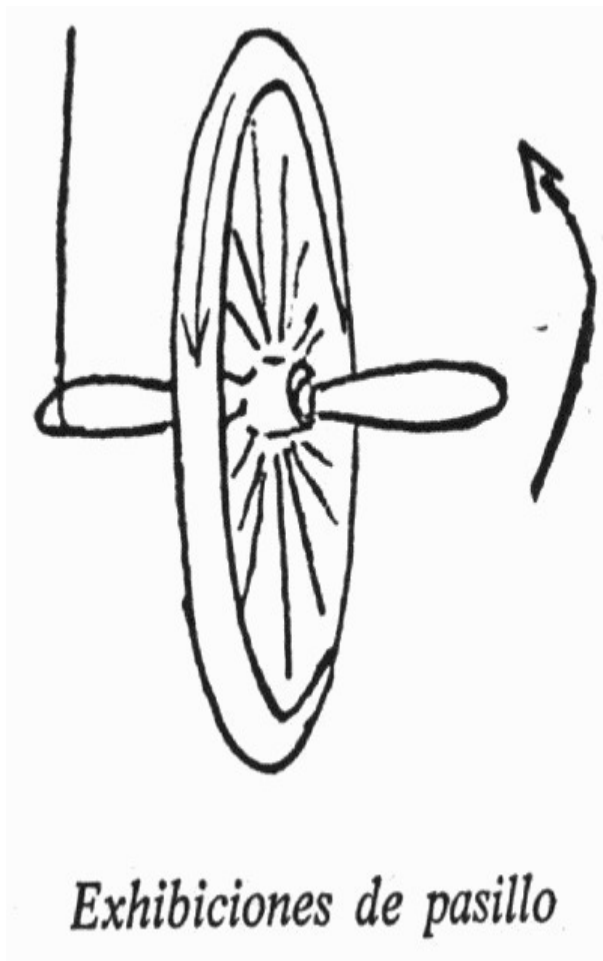
Con una rueda de bicicleta (fig. 13) se puede observar el movimiento de precesión del eje de la rueda. Olvidándonos de las fuerzas de fricción, la única fuerza de magnitud grande es la producida por la gravedad; esta fuerza da origen a una torca perpendicular al eje de la rueda y, desde luego, su magnitud depende del punto de soporte. Si el punto de soporte está lo más cercano (lejano) posible del centro de la rueda, la torca produce un movimiento de precesión del eje de rotación y la velocidad de precesión es pequeña (grande).



FIG. 13. *Giróscopo de rueda de bicicleta precesiendo alrededor de un eje vertical.*

Si se invierte la dirección de la rotación respecto al eje, la precesión también será en dirección contraria; esto se logra al modificar el sentido de la torca cambiando el punto de apoyo al otro lado de la rueda.

Lo que sucede con el momento angular es que su magnitud es constante, pero la dirección está cambiando debido a la torca gravitacional.



Cada semana se instala un experimento en una vitrina que se encuentra estratégicamente localizada en uno de los pasillos del edificio de laboratorios. Análogamente a las demostraciones, estas exhibiciones tienen una duración muy corta, de tal manera que la persona que se detenga a observar el fenómeno no invierta más de cinco minutos. Se montan de tal forma que funcionen por sí solas; no necesita de personal que realice el experimento.

Estas exhibiciones tienen el propósito de crear un interés en el espectador y hacerlo pensar; en algunos casos se crea una duda que el estudiante interesado después discute con su profesor.

Generalmente los temas de las exhibiciones se escogen para que en el estudiante se forme una imagen vívida de un fenómeno. Estos temas están relacionados de alguna manera con experimentos de alguno de los cuatro trimestres. Por ejemplo, una semana antes de que se realice el experimento de densidad (ya descrito), se instala en la vitrina una exhibición que muestra el principio de Arquímedes. Así se proporciona al alumno los elementos necesarios para que pueda escoger el procedimiento adecuado en el momento de realizar su práctica.

LECTURAS

Generalmente el tiempo disponible es insuficiente para que el profesor pueda profundizar en el tema que está analizando, mencionar las posibles aplicaciones o simplemente relatar los aspectos históricos que ilustran la evolución de la física, así como su conexión con otras ciencias. Es por esto que ha surgido la necesidad de disponer de un conjunto de lecturas que complementen la labor del profesor, para que el alumno, por sí mismo y/o con la guía del profesor (al menos inicialmente), satisfaga su curiosidad.⁵

Todos los artículos que aparecen en esta colección están relacionados con los temas de los experimentos.

ANÁLISIS DEL CURSO

El objeto de este análisis, hecho dos años y medio después de que se iniciaron los cursos mencionados, es evaluar si los diferentes experimentos forman un conjunto que permita introducir gradualmente al estudiante al manejo del método experimental, entendido como el conjunto de habilidades necesarias para resolver problemas de modo independiente.

Como base del análisis consideramos el diagrama de bloques simplificado, mostrado anteriormente en la figura 5, que indica el procedimiento que se sigue al resolver un problema. En el primer paso se plantea el problema cuya solución es de interés. En el segundo bloque se identifican las variables relevantes y, haciendo uso de todos sus conocimientos, se llega a una relación matemática entre ellas; a esta relación le llamamos modelo. En el siguiente bloque se planea y ejecuta un experimento, en el que se miden las variables relacionadas por el modelo. Para ello es necesario tomar en cuenta las condiciones impuestas por el modelo, lo cual a su vez, implica que los aparatos tengan la precisión requerida. A continuación deben analizarse los datos obtenidos en el experimento, para después interpretar los resultados del análisis de los datos y llegar a conclusiones sobre la validez del modelo propuesto. De ser válido, se habrá resuelto el problema originalmente planteado, y sólo resta escribir el reporte correspondiente. De no ser válido, habrá que modificar, o desechar por completo, el modelo propuesto usando como pistas para las nuevas elucubraciones los resultados experimentales obtenidos; se inicia, entonces, un nuevo experimento o ciclo de razonamiento.

Para analizar cómo el estudiante llega a dominar los diferentes aspectos que se muestran en el diagrama de bloques, cada práctica fue calificada según el grado de dificultad de: plantear el modelo, diseñar el experimento - según los instrumentos usados-, las técnicas de análisis de datos y la interpretación necesaria para llegar a las conclusiones.

La figura 14 muestra los grados de dificultad asociados al bloque experimento y que se usaron para calificar a las prácticas del curso. Esto fue hecho por tres profesores de modo independiente; la figura 15 muestra el promedio de los resultados obtenidos: en el eje vertical está el grado de dificultad asociado al experimento cuyo número se coloca en el eje horizontal. Los números de cada práctica están tomados de la figura 10. Las líneas punteadas verticales indican la separación entre trimestres.

⁵Lecturas de Física. Material seleccionado por Angel Manzur. UAM-Iztapalapa, 1976.

EXPERIMENTO

El estudiante:

1. Percibe la necesidad de medir;
2. aprende a medir indirectamente;
3. percibe la necesidad de realizar un experimento.

El estudiante con ayuda del profesor:

4. Elige las variables relevantes;
5. arma el dispositivo experimental y elige el instrumento de medición;
6. plantea un procedimiento experimental.

El estudiante por sí mismo:

7. Arma el dispositivo experimental;
 8. elige el instrumento de medición;
 9. elige las variables relevantes;
 10. plantea el procedimiento experimental.
-

FIG. 14. Escala de grados de dificultad del experimento usada para calificar las prácticas.

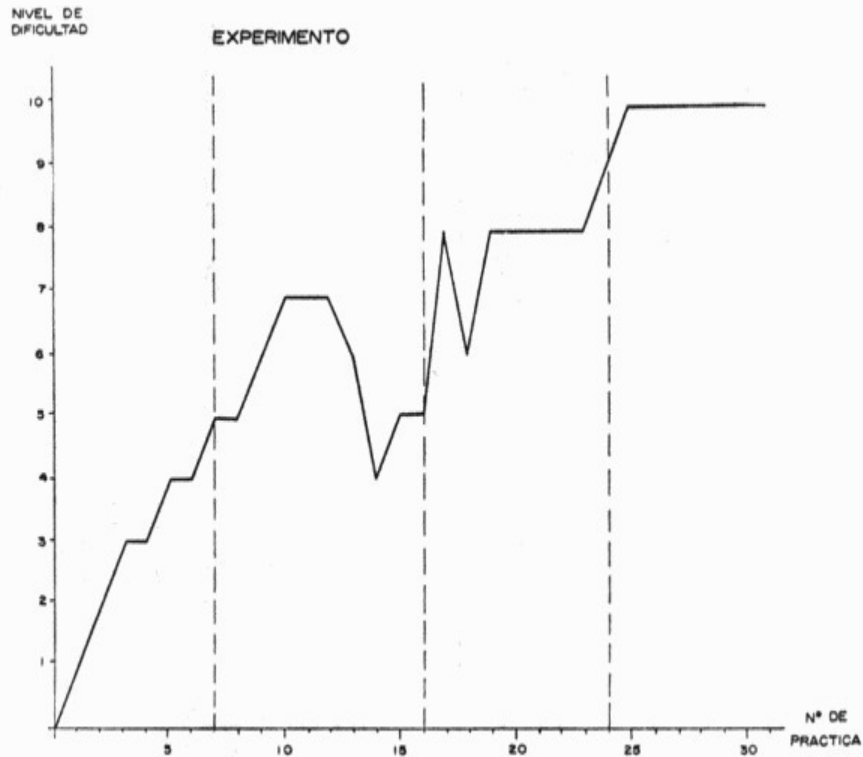


FIG. 15. Calificación de las prácticas, bajo el punto de vista del bloque experimento. Las prácticas están numeradas según la figura 10. Las líneas verticales corresponden a la separación entre trimestres.

De la gráfica se observa que el alumno llega a dominar este bloque a principio del cuarto trimestre. También se ve una tendencia a crecer en el fin del segundo trimestre, con fluctuaciones que indican unas prácticas cuyo procedimiento experimental es difícil, y en las cuales el profesor tiene que proporcionar bastante información. Sin embargo, estas prácticas se siguen haciendo, porque hacen hincapié en otros aspectos del diagrama de bloques.

El mismo tipo de gráfica se hizo para cada uno de los bloques del diagrama. En la gráfica correspondiente al análisis de datos, figura 16, se observa que crece rápidamente en el primer trimestre y la primera mitad del segundo, indicando que nuestro énfasis mayor en el análisis de datos está en este intervalo. A principios del tercer trimestre vuelve a crecer, debido a que el estudiante empieza a trabajar con tres variables, como en la práctica de resistividad. Se considera que este bloque lo domina el estudiante cuando puede decidir por sí mismo el tipo de análisis que conviene aplicar a sus datos.

Respecto al bloque de modelo, figura 17, su gráfica comienza a subir a la mitad del primer trimestre y se estabiliza en el segundo, indicando que en estas prácticas se hace énfasis en el uso de modelos. En este trimestre se realiza el experimento de determinación de la aceleración de la gravedad, haciendo hincapié en las aproximaciones introducidas. También se presenta un caso en que los resultados experimentales no concuerdan con el modelo sencillo, que se presenta para el sistema resorte-masa. Un primer modelo desprecia la masa del resorte, lo que introduce una desviación sistemática de los valores experimentales. Es fácil mejorar el modelo tomando en cuenta la energía asociada con el movimiento de la masa del resorte, y concluir que se necesita modificar el modelo original como si su masa hubiera aumentado en un tercio de la masa del resorte. Cabe mencionar que mejorando la precisión de las medidas se detecta otra desviación sistemática, la cual puede ser explicada si se considera al resorte como un sistema de osciladores armónicos acoplados. Esta última explicación está al alcance de estudiantes de los últimos años o de maestría.⁶

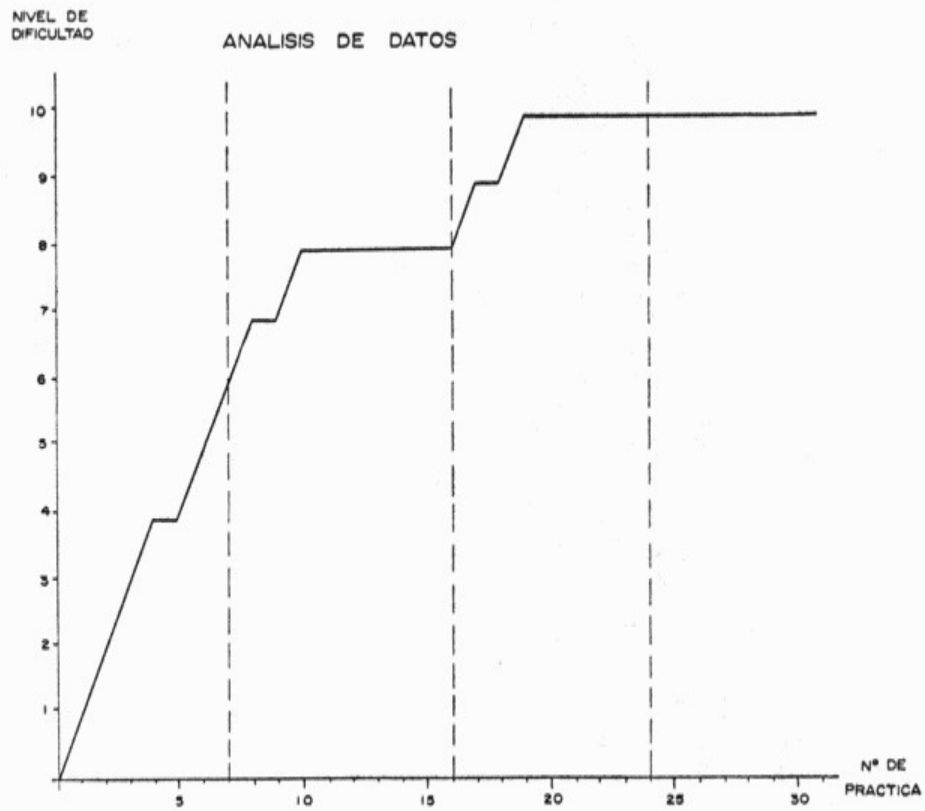


FIG. 16. Calificación de las prácticas, bajo el punto de vista del bloque análisis de datos.

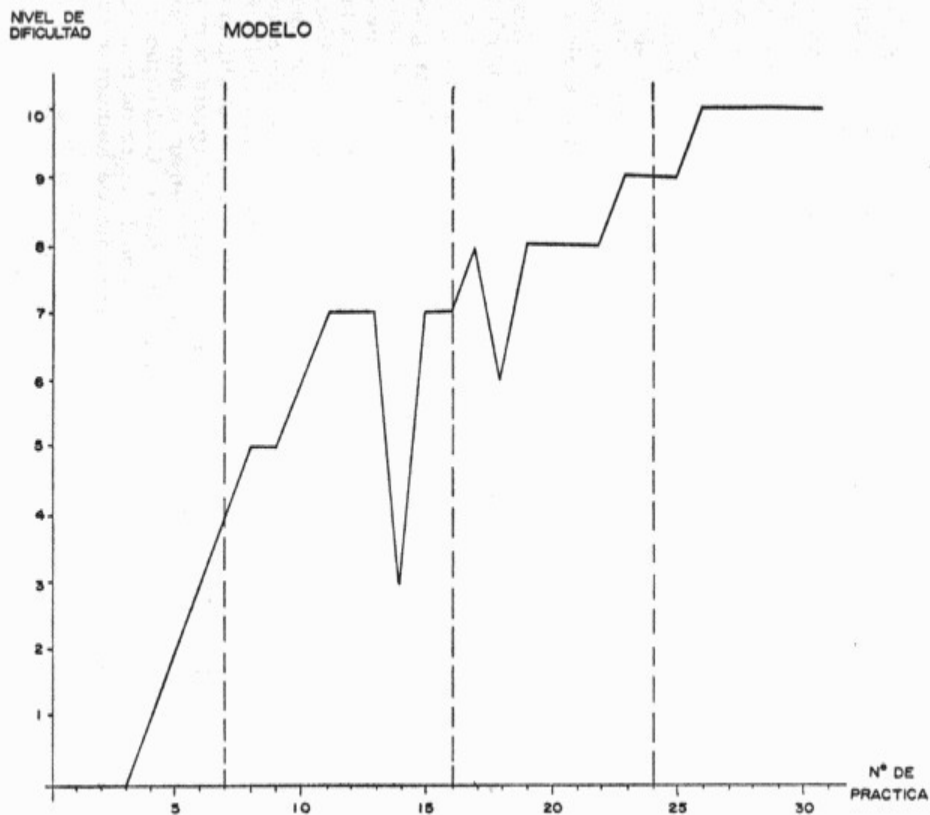


FIG. 17. Calificación de las prácticas, bajo el punto de vista del modelo.

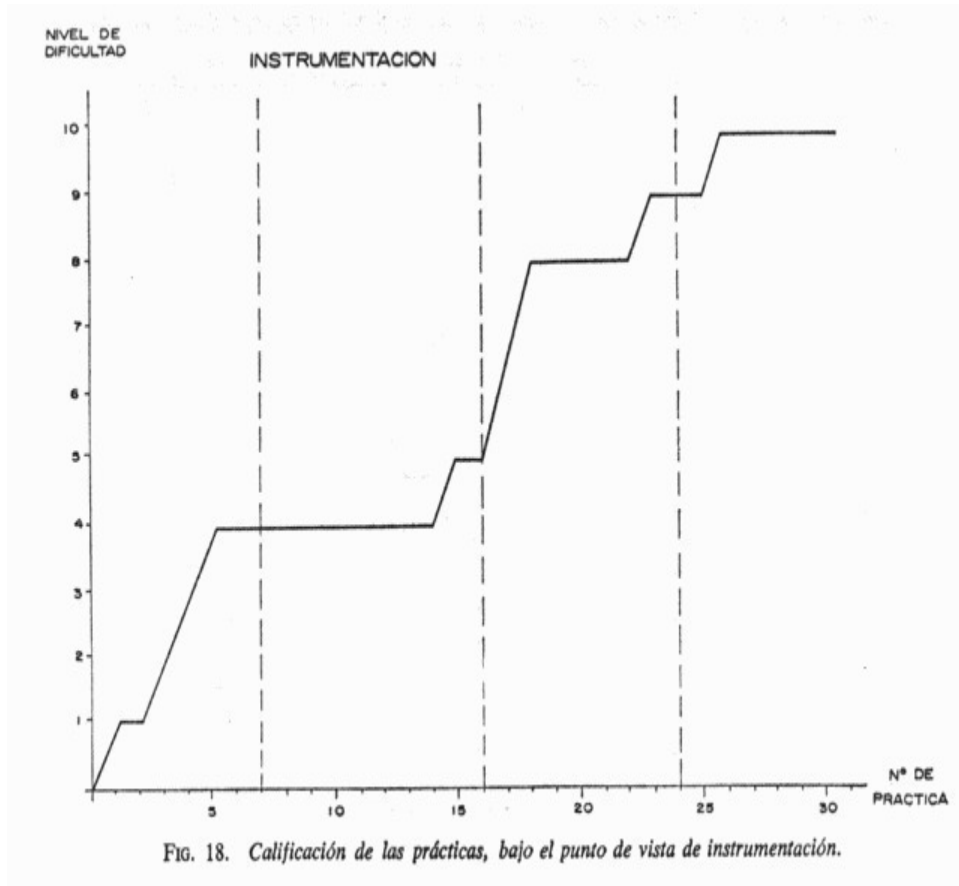
La gráfica correspondiente a instrumentación, figura 18, se caracteriza por dos crecimientos: uno en el primer trimestre, que es cuando se aprende a usar instrumentos sencillos como el calibrador, el tornillo micrométrico, la balanza, etc., y el otro en el tercer trimestre, cuando se aprende a usar los instrumentos electrónicos tales como el osciloscopio, el generador de señales, puente de impedancias, etc. Se busca que el estudiante, además de conocer la manipulación de los instrumentos, conozca sus características tales como impedancias, sensibilidades, calibraciones, limitaciones en frecuencia, etc. Esto último lo necesita si quiere decidir cuál es el equipo adecuado para cierta medida. Un ejemplo de esta necesidad lo tenemos en la práctica de carga y descarga de un condensador, ya que con un problema aparentemente sencillo se lleva al estudiante a establecer la influencia que ejerce la impedancia de sus aparatos en sus medidas.

La gráfica correspondiente a interpretación y conclusiones, figura 19, presenta un crecimiento casi uniforme hasta principios del tercer trimestre, en éste se hace énfasis en las conclusiones, aprovechando que el estudiante casi domina los bloques de modelo y análisis de datos. En este sentido, las prácticas de magnetismo permiten que el estudiante se extienda en sus conclusiones.

Finalmente, para tener un panorama de conjunto, se hizo una gráfica promedio de todos los bloques, figura 20, normalizándola para hacerla comparable con las demás. Como era de esperarse, esta gráfica no presenta los saltos bruscos que indican las gráficas por separado. Como en las gráficas anteriores, se observa que el alumno en el cuarto trimestre está capacitado para realizar todo el experimento, desde diseñarlo hasta llevarlo a sus últimas consecuencias. Se ve que hay un mínimo, que se interpreta como la existencia de una práctica que está fuera de lugar o que no tiene el nivel adecuado para estar en esa posición. Dado que el

⁶El sistema resorte masa." A. Alonso, et al. Revista Mexicana de Física. Sup. de Enseñanza. Por publicarse.

tema se necesita para mantener la conexión con la clase de teoría, lo más adecuado es cambiar la pregunta de modo de aumentar su grado de dificultad.



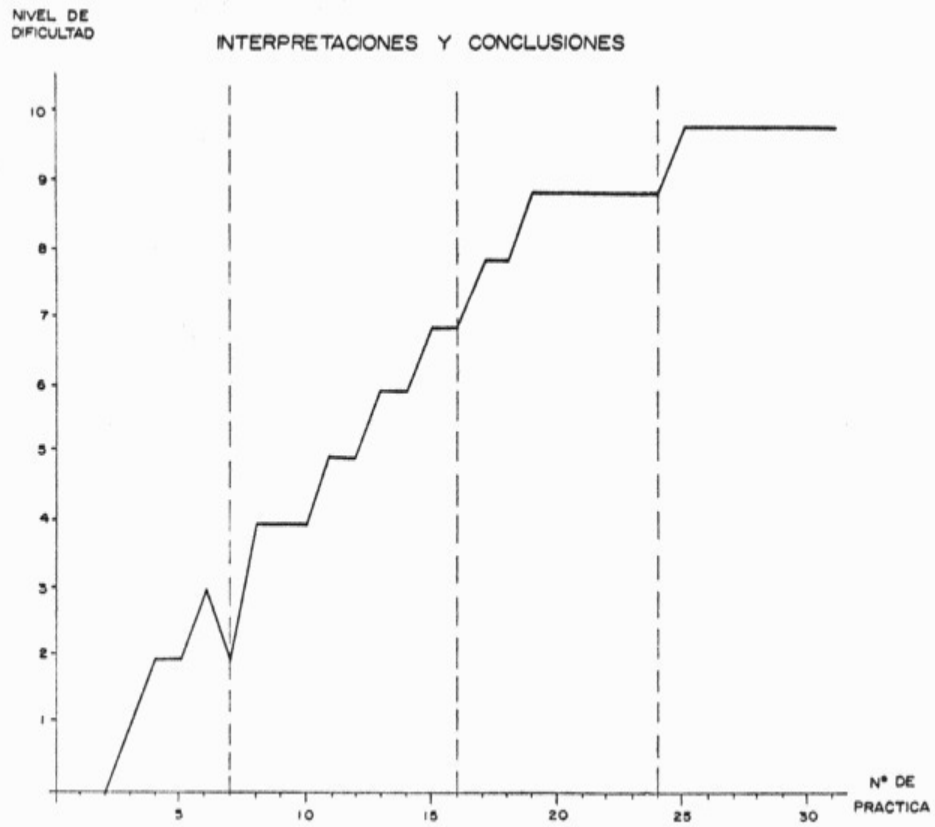


FIG. 19. Calificación de las prácticas, bajo el punto de vista de interpretación y conclusiones.

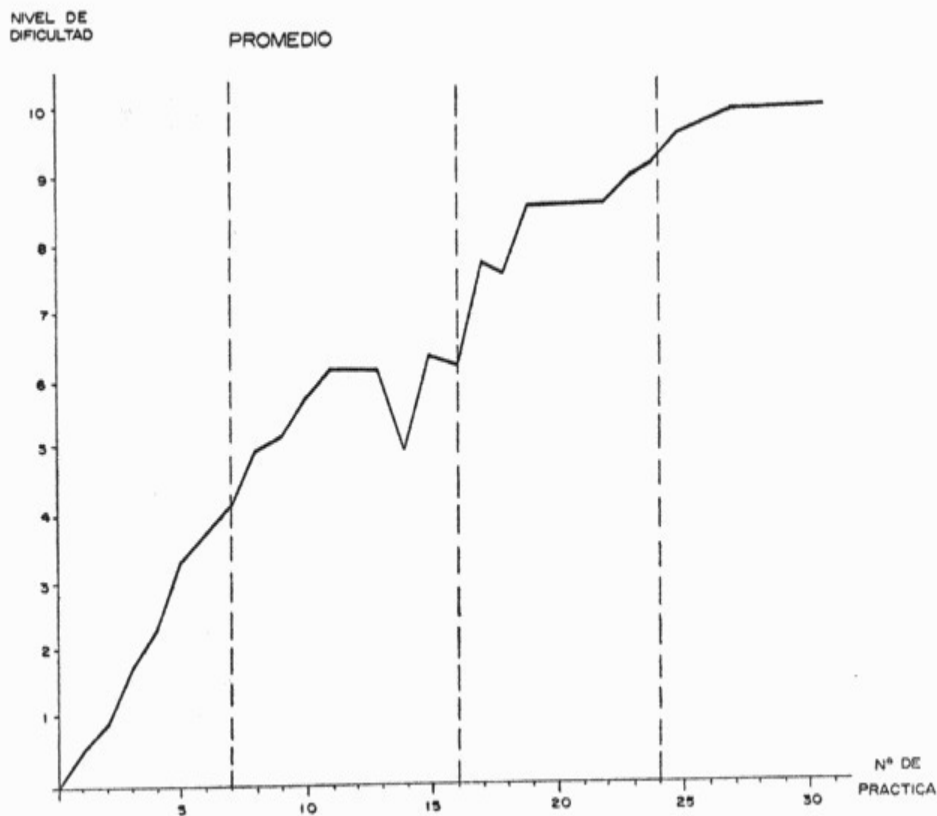


FIG. 20. Calificación de las prácticas, sacando el promedio de las figuras 17 a 20.

CONCLUSIONES

Después de casi tres años de uso del curso aquí descrito, se puede decir que el aspecto formativo de los cursos experimentales se manifiesta mejor cuando el estudiante resuelve problemas en el laboratorio; especialmente cuando se logra encontrar problemas de tipo abierto, que dan origen a nuevos problemas, y que sean de interés para el estudiante. Dado que el número de problemas que se pueden resolver es pequeño, es necesario desarrollar una serie de actividades complementarias tales como demostraciones, exhibiciones de pasillo, películas y lecturas que sirvan de motivación tanto a la clase de teoría como a la de laboratorio.

Se requieren clases de pizarrón para cubrir el aspecto informativo asociado a los trabajos experimentales, tales como análisis de datos y manejo de ciertos instrumentos.

El calificar a las prácticas de acuerdo a su grado de dificultad presenta varias ventajas, tales como permitir unificar los criterios de los profesores, establecer la información para los nuevos profesores, la detección de prácticas que no funcionen adecuadamente ya sea por su colocación o por su nivel de dificultad. También permite la incorporación de nuevas prácticas, de un modo natural, ya que se les puede pedir que tengan grados de dificultad semejantes.

Uno de los defectos del curso es su falta de flexibilidad, en el sentido de que no hay alternativas para un tema dado. La solución a este problema es la búsqueda de un segundo juego de problemas que cubran material semejante al actual. De hecho, este proceso comenzó desde el primer trimestre de funcionamiento, pero se comenzó por substituir a las prácticas que no funcionaban adecuadamente. Actualmente se trabaja en la

elaboración de nuevas prácticas, que permitan que profesores y alumnos escojan sus problemas de acuerdo a sus motivaciones. Por otra parte, el profesor que lo prefiera puede hacer prácticas más convencionales usando el equipo comprado para hacer demostraciones.

Otro problema que presenta es el de la sincronización con el ritmo de la clase de teoría, pero éste es un problema que se presenta en todo curso coordinado. La única solución sería que el mismo profesor diera ambos aspectos del curso.

La inversión en equipo no es demasiado grande; aunque se compró equipo de medida de buena calidad, se evitó la compra de equipos costosos para una sola práctica. Esto hace que sea sencillo el cambiar el programa ya que sólo es necesario cambiar pequeños dispositivos auxiliares.

Cabe mencionar que el curso aquí reportado es fruto de los esfuerzos de muchas gentes, las cuales diseñaron y realizaron los experimentos propuestos, diseñaron y construyeron cierto número de equipos especiales; y siguen haciéndolo. Los profesores están adscritos a los departamentos de Física y Química, e Ingeniería, y el personal técnico a los departamentos de Servicios de Laboratorios y de Instrumentación y Talleres. Por lo tanto, agradecemos la colaboración de Dolores Ayala, Horst Blasig, Manuel Carrillo, Martín Chávez, Emilio Cortés, Enrique Fernández, Fernando Hernández, Pablo Lonngi, Rafael Mantilla, Bernardo Mireles, José Manuel Ramos, Lorenzo Razo, Rogelio Rodríguez, Lucía Rosas y Bernardo Silva.