
LA ENSEÑANZA DE PROBLEMAS-TIPO EN EL PRIMER CURSO DE INGENIERÍA Y EL APRENDIZAJE SIGNIFICATIVO DE LOS CONCEPTOS Y PRINCIPIOS FUNDAMENTALES DE LA FÍSICA^{1,2}

Jenaro Guisasola Aranzabal

Departamento de Física Aplicada I

Escuela de Ingeniería Técnica Industrial de San Sebastián

Universidad del País Vasco

San Sebastián – España

Mikel Ceberio Garate

José Manuel Almudí García

José Luis Zubimendi Herranz

Departamento de Física Aplicada I

Escuela de Ingeniería Técnica Industrial de Bilbao

Universidad del País Vasco

Bilbao – España

Resumen

El objeto de este trabajo es analizar la efectividad con relación al aprendizaje logrado de las estrategias habituales utilizadas en clase de resolución de problemas basadas, generalmente, en una concepción de los mismos como 'ejercicios de aplicación'. Para ello, se han elaborado tres situaciones problemáticas de diferentes áreas de la Física y se han analizado las estrategias utilizadas por los estudiantes al resolverlas. Se ha elaborado un estadillo de corrección que toma como referencia la correcta resolución del problema planteado y trata de recoger las principales representaciones comunes a grupos de resolventes. Los resultados parecen indicar que la enseñanza de problemas-tipo, a nivel universitario, no contribuye a que los estudiantes aprendan los conceptos y leyes de la Física.

¹ The teaching of standard problems in the engineering foundation subjects and significant learning of the fundamental concepts and principles of physics.

² *Recebido: maio de 2001.*

Aceito: novembro de 2001.

Palabras-chave: *Resolución de problemas, Física, enseñanza universitaria.*

Abstract

The objective of this study was to analyse the effectiveness, in terms of learning, of the habitual strategies used in problem-solving classes that are based, generally, on a concept of 'applied problems'. To this end, three problem situations were elaborated from different branches of physics and the strategies used by the students to solve them were analysed. A marking scheme was developed that used as a point of reference the correct solution to the given problem and attempted to bring together the main common representations to form groups of solutions. The results appear to indicate that the teaching of standard problems, at the university level, does not help the students to learn the concepts and laws of physics.

Keywords: *Problem solving, Physics, university teaching.*

I. Introducción

La investigación sobre la resolución de problemas de Física es una actividad permanente dentro del campo de la Didáctica de las Ciencias (MALONEY, 1994). Este interés viene generado por la relevancia que tiene la resolución de problemas en las clases de Física, y por el alto índice de fracaso de los estudiantes. Existen múltiples trabajos, a nivel de Enseñanza Secundaria, que ponen de manifiesto el fracaso generalizado de los estudiantes ante problemas que difieran ligeramente de los "enseñados" en clase (GIL et al., 1991; REYES, 1991).

Sin embargo, es necesario señalar que en el nivel universitario, la investigación educativa en Ciencias es sólo incipiente y no ha alcanzado el desarrollo de la Enseñanza Secundaria. Para este último nivel educativo, se ha elaborado un cuerpo de conocimientos teóricos (AA.VV. 1994) y parte de sus aportaciones se revelan fructíferas, y potencialmente transferibles al nivel universitario, para orientar la detección de problemas educativos y la construcción de hipótesis fundamentadas explicativas de los problemas detectados, así como posibles vías de superación.

Es posible avanzar hacia el cuestionamiento de visiones, muchas veces desalentadoras o derrotistas, que suelen ser aceptadas como obvias e inevitables en el nivel universitario. Como ejemplo podríamos mencionar dos de tales ideas referidas al fracaso de resolución de problemas de Física:

a) La falta de preparación de los estudiantes, debida al pobre aprendizaje logrado en el nivel de Secundaria (CALATAYUD; GIL; GIMENO, 1992). Esto crearía una dificultad añadida a la enseñanza de problemas en el primer curso universitario.

b) El fracaso generalizado de los estudiantes en la resolución de problemas de Física es “natural”, ya que la propia naturaleza de los problemas es de alta demanda cognitiva (siempre habrá “listos” y “torpes”). Sin embargo, este argumento comienza a ser alarmante cuando el fracaso en la Universidad afecta a la gran mayoría de la élite de los alumnos de Secundaria, es decir, cuando se registran altos índices de fracaso y abandono entre aquellos estudiantes de nota media, de sobresaliente y notable en Secundaria (los “listos”) (GUISASOLA, 1993).

Con visiones de esta índole, aspectos potencialmente cuestionables de la Enseñanza Universitaria pueden ser aceptados como realidades naturales e inmodificables. En este sentido, nos parece necesaria una revisión crítica de las estrategias habituales utilizadas en las clases de resolución de problemas. Éstas estrategias se basan habitualmente en concebir los problemas como ‘ejercicios de aplicación’. El profesor explica ordenadamente el problema para la que conoce perfectamente la solución, luego no hay dudas en la resolución, pues para él no es realmente un problema, aunque para los estudiantes sí lo sea. Se pretende que los estudiantes aprendan la resolución y la aplique en casos similares. Así pues, la forma de presentar los problemas y su resolución se ajusta a la estrategia descrita, presentando una serie de características comunes (DUMAS-CARRÉ; GOFFARD, 1997):

Los problemas o situaciones físicas que se presentan están totalmente modelizados. De forma que para un experto esta modelización define inmediatamente el marco teórico a utilizar. Por ejemplo: en Mecánica, es habitual que las fuerzas que intervienen estén totalmente determinadas (si hay rozamiento, si se considera la masa del muelle o cuerda,... etc.).

Las condiciones de funcionamiento (iniciales o límite) se dan explícitamente y los datos que se aportan son los justos para permitir la resolución, aunque no siempre se permite la comprensión del fenómeno analizado. Por ejemplo, si un objeto es lanzado con una velocidad inicial, se sobreentiende que el estudio a realizar excluye el análisis de la fase inicial de lanzamiento, aunque normalmente el estudiante se pregunta por esa fase inicial que permite que el objeto llegue al estado de movimiento que se pide analizar.

Las preguntas del problema están basadas en términos de magnitudes físicas a determinar o en términos de relaciones entre magnitudes físicas y sólo ocasionalmente en términos de los fenómenos físicos que suceden.

El camino de resolución es único y lineal. Cuando el camino de resolución es complejo, las preguntas intermedias imponen un camino descomponiendo el razonamiento en pasos sucesivos.

Generalmente, el profesorado aborda el tratamiento de la resolución de problemas como un asunto particular de cada tema, donde la resolución de los

problemas que afectan a un grupo de conceptos relacionados, posee claves específicas que hay que conocer para tener éxito. En este sentido, hablamos de resolución de ‘problemas-tipo’. Todavía sin considerar la necesidad de un planteamiento global que permita enfocar las resoluciones, a través de procedimientos comunes a todos los problemas de Física.

Dentro de esa estrategia, el papel de los estudiantes queda reducido a un aprendizaje propio de una actividad de ‘recepción’ (almacenamiento de la información), complementado con la oportunidad de plantear preguntas con respecto a la explicación ordenada del profesor, que es el que resuelve el problema en la pizarra.

Sin embargo, algunas de las consecuencias negativas para el aprendizaje de esas estrategias basadas en una enseñanza por ‘transmisión’ (clases expositivas) de problemas-tipo, ya han sido apuntadas tanto a nivel de Secundaria (GARRET, 1987) como Universitario (HEGARTY-HAZEL; PROSSER, 1991). El objeto de éste trabajo es analizar estas deficiencias para el caso de la resolución de problemas de Física en el primer curso de Ingeniería.

II. Planteamiento del problema y emisión de hipótesis

Para el trabajo propuesto, se han tenido en cuenta los resultados de una línea de investigación en resolución de problemas, que es catalogada por Maloney (1994) como una de las líneas relevantes en estas área (p. 344). Esta línea de investigación cuestiona la forma en que los profesores y libros de texto abordan la resolución de problemas y, en lugar de poner el acento en lo que los alumnos hacen (mal) para obtener un fracaso tan elevado, se centran en las orientaciones que el profesor les da, es decir, en la propia metodología de la enseñanza de resolución de problemas. Ese modelo de resolución de problemas como investigación (GIL; MARTÍNEZ-TORREGROSA, 1983; GARRET et al., 1990; GOFFARD, 1990; FURIÓ; ITURBE; REYES, 1994) propicia un cambio metodológico en los estudiantes (¡y en el profesorado!), que supone el abandono del operativismo inicial y fomenta, por el contrario, aspectos esenciales de la forma de trabajar los científicos como la realización de planteamientos cualitativos, la emisión de hipótesis, la elaboración de posibles estrategias de resolución y el análisis de resultados. Así mismo, pone de manifiesto que los estudiantes valoren muy positivamente esa forma de abordar los problemas.

Las investigaciones mencionadas, basadas en el modelo de resolución de problemas como investigación, se han desarrollado, casi exclusivamente, en niveles de enseñanza secundaria, aunque se han llevado a cabo experiencias de introducción de este modelo de resolución de problemas a nivel universitario (ALMUDÍ et al., 1996). En ellas, se ha mostrado que es posible elaborar situaciones problemáticas abiertas, y desarrollarlas en el aula, y que los estudiantes muestran su satisfacción con la utilización de esa metodología.

Sin embargo, existen pocos trabajos a nivel universitario que muestran la influencia que ejerce la enseñanza habitual de resolución de problemas basada en la resolución de problemas-tipo sobre aspectos conceptuales. En este trabajo, trataremos de mostrar, en primer lugar, que una enseñanza universitaria basada en la resolución de problemas-tipo no cumple uno de sus objetivos principales, como es el aprendizaje significativo, por parte de los estudiantes, de los conceptos y principios fundamentales de la Física. Así pues, a título de hipótesis, supondremos que:

La enseñanza de problemas-tipo de Física en un primer curso de universidad no contribuirá a desarrollar aspectos conceptuales que, desde una concepción de "teoría aplicada", cabría esperar que se consolidaran.

Esta primera hipótesis, la concretamos en la siguiente consecuencia contrastable:

1.1. Los estudiantes enseñados con estrategias de problemas-tipo, presentarán dificultades conceptuales similares a las detectadas en la investigación de Concepciones Alternativas, no detectándose una progresión en el aprendizaje de los conceptos y leyes físicas en diferentes áreas de la Física.

En segundo lugar, los resultados obtenidos en los diferentes campos de la Física y de la Química, con el modelo de resolución de problemas como investigación (RAMÍREZ; GIL; MARTÍNEZ-TORREGROSA, 1994), muestran que los factores que afectan al éxito en la resolución de problemas son múltiples y se ejercen mutua influencia entre sí. Aceptando esta complejidad como positiva, se puede detectar que las causas de este fracaso tienen elementos conceptuales, elementos metodológicos y elementos actitudinales (LEONARD; DUFRESNE; MESTRE, 1996). Así pues, una segunda hipótesis de trabajo que parece plausible emitir es que:

La enseñanza de estrategia única que se realiza en la resolución de problemas-tipo conducirá a que los estudiantes presenten deficiencias metodológicas y actitudinales que podrían explicar el alto índice de fracaso.

Esta segunda hipótesis, la hemos concretado en las siguientes consecuencias contrastables:

2.1. Los estudiantes no realizarán un planteamiento cualitativo del problema que les permita hacerse una idea de la tarea a desarrollar, de las variables que intervienen... etc.

2.2. Los estudiantes no emitirán hipótesis que puedan guiar posibles estrategias de resolución del problema.

2.3. Los estudiantes no realizarán un análisis de resultados que permita contrastar la coherencia de los mismos con respecto al cuerpo de conocimientos y al problema planteado.

III. Diseño experimental y análisis de resultados

Para la contrastación de nuestras hipótesis, hemos supuesto que el aprendizaje significativo se dará a la medida que los estudiantes sean capaces de resolver con éxito mediante la utilización de principios y relaciones fundamentales, situaciones problemáticas acotadas del mismo nivel de complejidad que las abordadas habitualmente en clase. Como las hipótesis abarcan cualquier tema de Física y en concreto, la segunda hipótesis trata de contenidos procedimentales y actitudinales presentes en cualquier área, hemos considerado conveniente elaborar tres situaciones problemáticas de diferentes áreas, dos de mecánica y una de electromagnetismo (ver Anexo), con diverso grado de dificultad interpretativa, para que sean resueltas, en situación de examen, por estudiantes del primer curso de Ingeniería Técnica Industrial.

Dentro del curso académico para la asignatura de ‘Física General’, que tiene una duración de nueve meses de octubre a junio, el problema de mecánica que hemos denominado “muelle-masas”, se planteó para su resolución dentro de un control habitual cuando habían transcurrido siete semanas desde el inicio del curso. El problema del “cuenco”, perteneciente al primer examen parcial, se abordó transcurrida la mitad del curso, y el problema de la “corteza esférica” se propuso en el segundo examen parcial una vez finalizado el curso. Este contexto garantiza tanto el carácter individual de los resultados como el interés de los estudiantes por la correcta realización de las pruebas.

Por otra parte, el problema del “cuenco” se corresponde con un problema estándar de aplicación de la segunda ley de Newton junto a los conceptos de cinemática circular. Desde el punto de vista matemático, no conlleva ninguna dificultad especial y desde el punto de vista estratégico presenta una resolución sencilla.

El problema “muelle-masas” presenta, en primera instancia, desde el punto de vista metodológico la posibilidad de utilizar dos estrategias diferentes según la forma en que se relacionen las interacciones con el movimiento del sistema (la cinemático-dinámica o la energética). La aplicación de la segunda ley de Newton, sin embargo, resulta una vía inadecuada para la resolución debido a la presencia de fuerzas variables. Será la aplicación de la conservación de la energía mecánica, la estrategia correcta de resolución. Esta tal duplicidad estratégica, lógicamente, aumenta el grado de complejidad de la resolución.

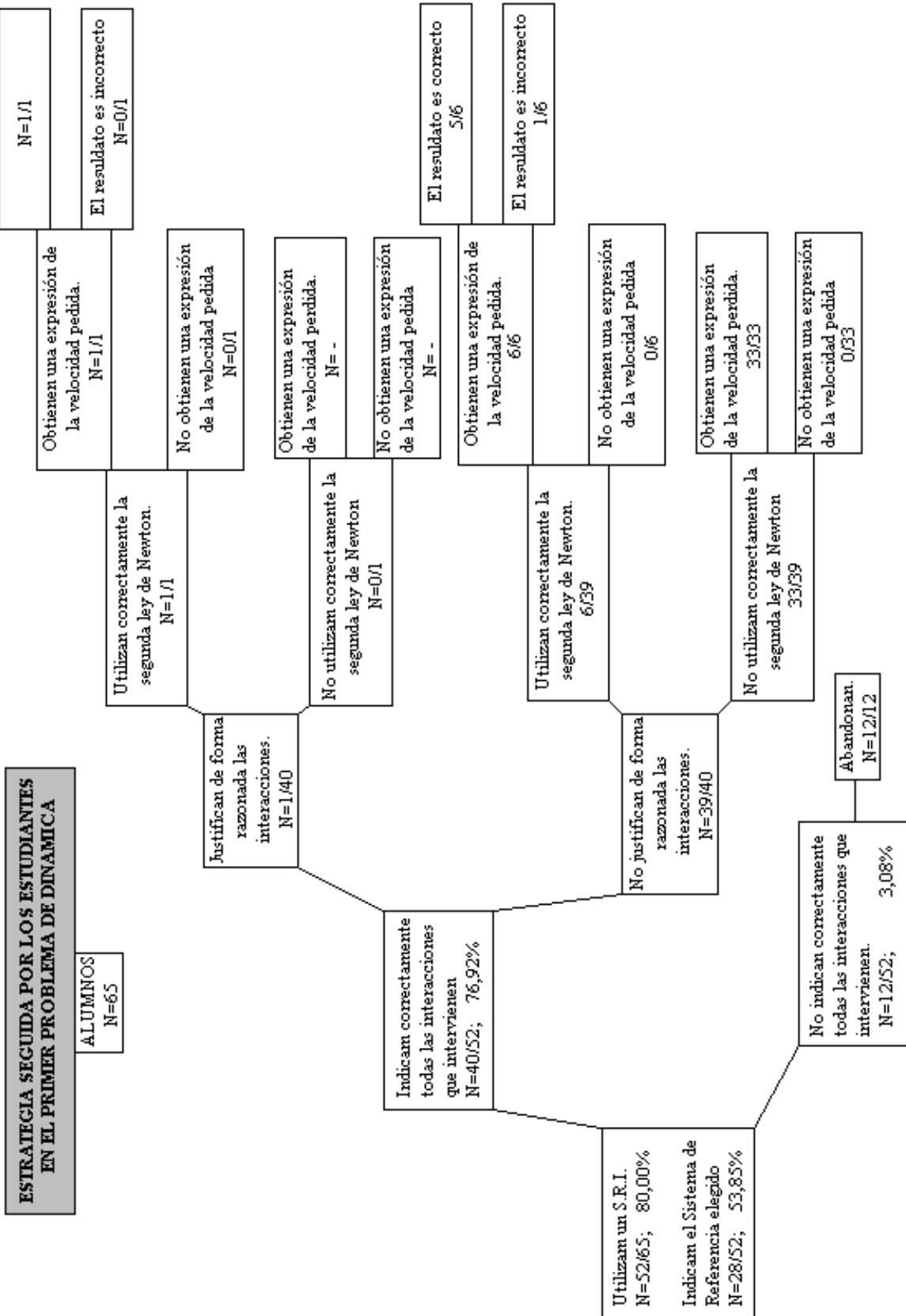
En el problema que hemos llamado “corteza esférica”, se plantea una interacción eléctrica producida por una carga puntual a través del vacío y en un medio conductor. Su resolución requiere interpretar el comportamiento de un material conductor ante la interacción eléctrica y aplicar el teorema de Gauss, por lo que conlleva una exigencia cognitiva elevada en un campo de la Física, la electrostática, mucho menos familiar para los estudiantes que la mecánica. El grado de dificultad conceptual y estratégico supera, por lo tanto, al de las situaciones anteriormente descritas.

El diseño utilizado para la valoración de las resoluciones realizadas por los estudiantes, ha consistido en un estudio semicuantitativo en base a estadillos diseñados para el análisis de respuestas escritas (COOK; REICHARDT, 1986). Este análisis se ha realizado desde una perspectiva secuencial de las estrategias operativas seguidas por los estudiantes (REYES, 1991; LEFÈVRE; ALLEVY, 1998), lo que nos ha permitido identificar las características conceptuales y metodológicas de las principales etapas de resolución. En este sentido, se entiende por estrategia de resolución el conjunto de procedimientos que permite relacionar entre sí los recursos operativos y conceptuales del resolvente, en el intento de alcanzar un resultado.

Resulta obvio que un problema puede dar lugar a esquemas diferentes para el análisis de su resolución, en función de qué aspectos se resalten. Es por ello que, los esquemas secuenciales que recogen las principales fases del proceso de resolución, y que nos permiten averiguar en la aplicación de qué conceptos y principios se dan las mayores dificultades, así como detectar posibles deficiencias metodológicas, se han elaborado en base a un estadillo de corrección que toma como referencia la correcta resolución del problema planteado (ver en el anexo la resolución del problema 'cuenco') y tratan de recoger las principales representaciones comunes a grupos de resolventes. Los esquemas resultantes han sido, a su vez, sometidos al juicio de tres expertos que han mostrado un alto grado de coincidencia y acuerdo en dichos esquemas. En este artículo, por la necesaria brevedad del mismo, incluimos sólo a título de ejemplo el realizado para el problema del 'cuenco' (ver la Fig.1). Así mismo, en la presentación de los resultados indicamos, en primer lugar, con detalle los obtenidos para el problema del 'cuenco' y en segundo lugar, añadiremos algunos resultados de los otros dos problemas de forma que podamos ver la convergencia de los mismos en los tres problemas.

III.1. Deficiencias conceptuales detectadas en las resoluciones realizadas por los estudiantes

El análisis secuencial de la Fig.1 para el problema del 'cuenco' muestra que un elevado número de estudiantes aplican, de manera incorrecta, conceptos y principios fundamentales durante la resolución del problema. Así, una cuarta parte del alumnado (26%) no indica correctamente, de acuerdo con el sistema de referencia elegido, todas las fuerzas que intervienen. De ellos, el 82% señala la fuerza de rozamiento en sentido contrario al que corresponde.



De los 48 estudiantes que en la resolución del problema del “cuenco” han indicado correctamente todas las interacciones que intervienen, 39 (81%) no aplican correctamente la segunda ley de Newton a las condiciones del problema. El 26% (10 de 39) señala en el diagrama de fuerzas de la partícula la aceleración normal dirigida hacia el centro del cuenco, en vez de hacia el centro de la circunferencia descrita por la partícula, y escriben, por lo tanto, las ecuaciones en consonancia con esa apreciación. Otros, 28 de los 39, (72%), a pesar de señalar correctamente el vector aceleración normal en el esquema de fuerzas, introducen en la expresión matemática de dicha aceleración el valor del radio del cascarón en lugar del radio de la circunferencia descrita por la partícula. En definitiva, 38 de 48 (79 %) emplean erróneamente el concepto de aceleración normal. Éstos errores ponen de manifiesto la limitada comprensión que los estudiantes logran obtener de un concepto básico, como el de aceleración normal, a pesar de que reiteradamente se viene utilizando en gran número de problemas de cinemática y de dinámica.

Se observa para el problema del ‘cuenco’, que la mayoría de los estudiantes indican de forma incorrecta las interacciones entre las distintas partes del sistema y se aplican incorrectamente conceptos (aceleración normal) y leyes (segunda ley de Newton). A continuación, expondremos algunos resultados de los otros dos problemas que muestran que las deficiencias conceptuales mencionadas para el problema del ‘cuenco’ también aparecen en los otros dos problemas planteados a pesar de pertenecer a otras partes de la Física.

Se indican de forma incorrecta las interacciones entre las distintas partes del sistema.

El 22% del total de estudiantes que trata de resolver el problema “muellemasas” omite alguna interacción, aumentando esta proporción a uno de cada tres entre los alumnos que han optado por la vía cinemático-dinámica de resolución. Estas deficiencias detectadas son convergentes con concepciones alternativas, ampliamente investigadas en el ámbito de la mecánica (CARRASCOSA; GIL, 1992; DUIT, 1993).

Por otro lado, en el análisis de la resolución del problema de la corteza esférica, se aprecia que 33 estudiantes (51%) interpretan de forma errónea el fenómeno de inducción que, debido a la carga eléctrica puntual, se da en el material conductor. Así, 11 alumnos (33%) proponen que la carga puntual $+q$ se desplaza desde del centro de la corteza esférica a la superficie del conductor, bien sea a la superficie interior $r = a$ (5 estudiantes), a la exterior $r = b$ (3 estudiantes) o al volumen ocupado por el material conductor $a < r < b$ (3 estudiantes). Otros 11 alumnos (33%) indican que una cierta carga sin especificar claramente cuál, si $+q$ o la carga por ella inducida, se distribuye por el material conductor. En cualquier caso, la carga $+q$ tras cumplir su cometido inductor, no se tiene más en cuenta de modo que a la hora de estudiar el campo en el hueco esférico de radio a , consideran que la carga encerrada por la superficie gaussiana es nula y, en consecuencia, el campo también. Esa grave dificultad de los estudiantes en interpretar la interacción eléctrica a través de un medio material, es convergente con

otras investigaciones en el campo de las concepciones alternativas (GALILI, 1992; VIENTO, 1996).

Se establecen incorrectamente las condiciones de un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado.

En el problema “muelle-masas”, 14 de los 18 estudiantes (78%) que llegan a obtener una expresión para la aceleración del sistema (ya sea correcta o incorrecta) consideran que el movimiento resultante es un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado (M.R.U.A), a pesar de que la expresión matemática obtenida para la aceleración muestra una clara variación de esta magnitud con la posición.

Se aplican de forma incorrecta las leyes y principios fundamentales de la Física implicadas en la resolución del problema.

A) Segunda ley de Newton

Parece también significativo que, de los 23 alumnos que en el problema “muelle-masas” optan por la segunda ley de Newton con vistas a la resolución, 11 (48%) lo hagan de forma incorrecta. De ellos, más de un tercio (36%) realizan el análisis dinámico en una supuesta situación de equilibrio con aceleración nula, a pesar de que el problema pide $v(x)$.

B) Principio de conservación de la energía mecánica

Resulta alarmante el hecho de que 23 de los 27 estudiantes (85%), que en el problema “muelle-masas” siguen la estrategia energética y han considerado correctamente todas las interacciones, cometan errores en la aplicación operativa del balance energético. Errores que, aunque desde una perspectiva matemática sólo se reflejan en algún signo cambiado, una lectura física de esta expresión conlleva interpretaciones como que el trabajo de la fuerza de rozamiento contribuye a que el sistema se acelere, o que sea el muelle el que active el movimiento del sistema y no la acción del peso, por citar algunas de las más recurrentes. Estos resultados son convergentes con otras investigaciones en el campo de la enseñanza/aprendizaje de la energía (SOLBES; TARÍN, 1998; DOMÉNECH et al., 2001).

C) Ley de Gauss

En el problema de la corteza esférica, de los 32 estudiantes que indican correctamente la distribución de carga, sólo 7 (22%) aplican correctamente el teorema de Gauss con objetivo de obtener el campo en las diferentes regiones. En la mayoría de los casos (52%), el motivo de la incorrecta utilización estriba es que, a pesar de haber

indicado correctamente la distribución de carga, cuando consideran la carga encerrada por la superficie gaussiana elegida para cada región, utilizan otra distinta, resurgiendo de nuevo el error anteriormente descrito de que la carga interior para $r < a$ es nula, y/o que la carga se reparte en todo el volumen correspondiente a la corteza $a < r < b$. En otros casos, (27%) los estudiantes consideran que la corteza esférica, debido a su forma, debe comportarse como una carga puntual en lo que se refiere al campo eléctrico que crea en su entorno, realizando una simplificación inadecuada de las condiciones del problema. Este resultado es convergente con investigaciones sobre dificultades de los estudiantes en el aprendizaje de la ley de Gauss (KAPRAS; ALVES; CARVALHO, 2000; GUISASOLA et al., 2001).

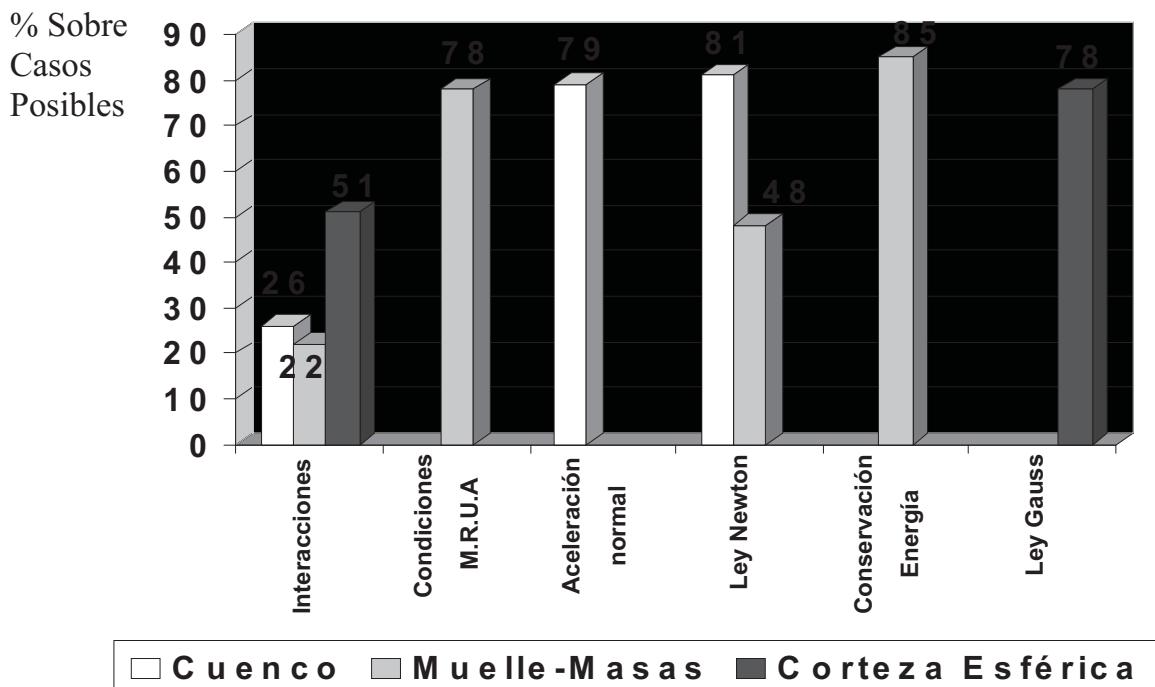
En el gráfico 1, se resumen algunas de las deficiencias conceptuales de los estudiantes y que son convergentes con las investigaciones en el campo de las concepciones alternativas.

III.2. Deficiencias metodológicas y actitudinales detectadas en las resoluciones realizadas por los estudiantes

Ya hemos señalado anteriormente que existe una estrecha interrelación entre los diferentes aspectos conceptuales, metodológicos y actitudinales que intervienen en el éxito de la resolución de problemas. Es por ello que el análisis de resultados deba completarse haciendo mención a las graves deficiencias metodológicas detectadas en las estrategias de resolución de los estudiantes, que, en nuestra opinión, tienen una incidencia directa en la escasa eficacia lograda. Al igual que en el apartado anterior, empezaremos por indicar las deficiencias metodológicas detectadas en el problema del ‘cuenco’ para, posteriormente, describir algunas de las encontradas en los otros dos problemas.

De acuerdo con el análisis secuencial de la Fig.1 para el problema del ‘cuenco’, el estudio de los esquemas muestra que a pesar del papel fundamental que el análisis cualitativo desempeña en el desarrollo de este problema, el 48% de los estudiantes no justifica la elección del sistema de referencia elegido. La elección del sistema de referencia hace percibir la situación de manera muy distinta: mientras que para el observador inercial la partícula describe un movimiento circular y uniforme, para el no inercial (girando con el cuenco) se encuentra en reposo, y además, la fuerza que en cada caso habrá que considerar, centrípeta (interacción real) o centrífuga (fuerza de inercia), también es diferente.

Gráfico 1. Principales errores conceptuales detectados



Hemos señalado antes que el 82% de los alumnos que indican mal las interacciones ha considerado para la fuerza de rozamiento estática el sentido contrario al que corresponde. Teniendo en cuenta que 69% de los estudiantes no justifica de forma razonada el sentido de esa fuerza, cabe pensar que este error tiene una estrecha vinculación con la escasa importancia que se le da al análisis cualitativo de la situación planteada y a la tendencia a iniciar rápidamente los aspectos puramente operativos del problema.

Cuanto a las estrategias de resolución que emplean los estudiantes, el 79% de los que indican correctamente las interacciones, al aplicar la segunda ley de Newton considera la aceleración normal dirigida hacia el centro del cuenco en vez de hacia el centro de la circunferencia descrita por la partícula. El alumno ha aprendido el modelo en el que la aceleración normal se dirige hacia “el centro”, pero cuando se encuentra con dos “centros” muestra no haber comprendido dicho modelo.

Se ha observado en el análisis de este problema que, el hecho clave para la resolución del problema de que la fuerza de rozamiento estática se pueda considerar igual al coeficiente de rozamiento por la normal porque se trata de su valor máximo (consecuencia de la velocidad pedida), no lo explica ningún estudiante. Esto sugiere que el alumno identifica la fuerza de rozamiento con el coeficiente de rozamiento por la normal, sin considerar que en situación estática la fuerza de rozamiento puede ser menor o igual que el mencionado producto.

Cuanto a la actitud de los estudiantes ante la resolución del problema, no se da abandono en el intento de resolución. Esto se puede comprender teniendo en cuenta que, una vez planteada la segunda ley de Newton, correcta o incorrectamente, en ella figura la velocidad angular máxima pedida, y, para obtenerla no hay más que despejar, es decir, no existe dificultad matemática o estratégica añadida. Sin embargo, el hecho de que 88% de las soluciones sean incorrectas sugiere que lo importante para los alumnos es llegar a una solución numérica, sea lógica o absurda, tenga sentido físico o no lo tenga. Queda claro que el resultado que se obtiene no es objeto de ningún análisis que ponga a prueba su coherencia con la situación física que se aborda.

Así pues, nos encontramos con que los estudiantes no realizan un planteamiento cualitativo y presentan ‘fijaciones’ a determinadas estrategias, sean válidas o no, en el problema que se está resolviendo. Así mismo, muy pocos estudiantes realizan un análisis del resultado mostrando una actitud que vaya más allá de lograr la búsqueda de un resultado de cualquier forma. A continuación, vamos a mostrar brevemente que estas deficiencias metodológicas también se presentan en los otros dos problemas propuestos a pesar de estar contextualizados en otro tema de física diferente.

– No se realiza un planteamiento cualitativo de la situación problemática a resolver.

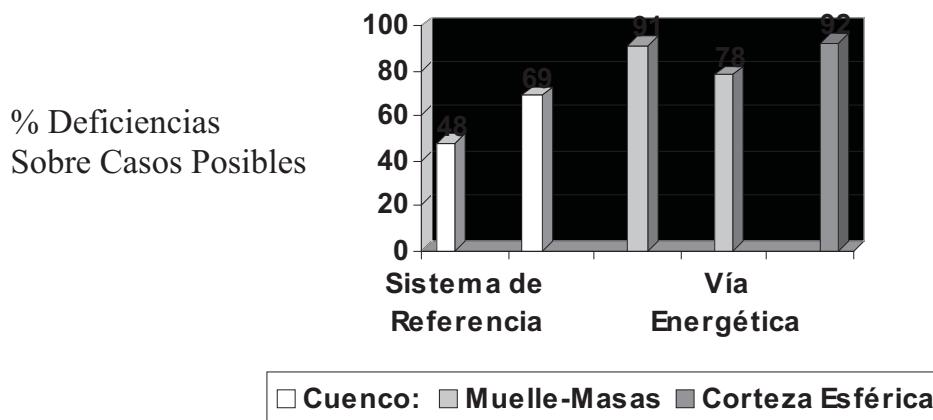
En el problema “muelle-masas”, los resultados son netamente mejores para los alumnos que han optado por la vía energética. Esto es así, en este caso, por la propia naturaleza del problema que al incluir una fuerza variable con la posición, la fuerza elástica, complica el análisis cinemático del mismo. Así pues, la elección de una vía de resolución u otra es crucial en este ejercicio y, por lo tanto, el análisis cualitativo del problema previo a la propia resolución juega un papel casi determinante. Sin embargo, únicamente 9 de los 60 resolventes (15%) realizan algún planteamiento explícito del problema, es decir, el 91% de los que optan por la vía dinámica y el 78% de los de la vía energética no realizan planteamiento alguno.

Análogamente, cuando es el propio enunciado del problema el que obliga a realizar una descripción cualitativa del fenómeno presentado, como en el caso de la inducción en el problema de la “corteza esférica”, se ha detectado que aquellos que justifican adecuadamente el por qué de la distribución de carga que proponen, llegan en su mayoría a un resultado correcto, mientras que únicamente 15% de los que, incluso indicando correctamente cuál es la distribución de carga en el equilibrio electrostático, no la justifican (92% no lo hace), llegan a un resultado correcto.

Resumimos en el gráfico 2 algunas de las deficiencias metodológicas relativas al planteamiento cualitativo del problema:

Gráfico 2. Deficiencias metodológicas

Planteamiento Cualitativo



– *Las estrategias de resolución parecen ser reproducidas a partir de un modelo aprendido aunque no bien comprendido.*

Hemos señalado anteriormente que, en el problema “muelle-masas”, 14 de los 18 estudiantes (78%) que llegan a obtener una expresión para la aceleración del sistema (ya sea correcta o incorrecta) consideran que el movimiento resultante es un M.R.U.A, a pesar de que la aceleración obtenida es variable. Muestran, por lo tanto, una clara fijación al emplear la estrategia aplicar la ley de Newton, obtener aceleración constante, aplicar leyes cinemáticas para el M.R.U.A, obtener velocidad, lo que puede atribuirse a una metodología de enseñanza que no fomenta la reflexión crítica ni la utilización de estrategias alternativas. Esta forma de razonamiento que hemos detectado en los estudiantes, coincide con una de las formas de razonamiento detectadas en la bibliografía como fijación funcional. La fijación funcional consiste en el aprendizaje memorístico de relaciones (conceptos y reglas), que impiden la reflexión y el pensamiento creativo ante situaciones reconocidas por el sujeto cognitivo (ANDERSON, 1990; FURIÓ et al., 2000).

También, en este mismo problema, el 85% de los estudiantes que, tras señalar correctamente todas las interacciones optan por la vía energética, aplican mal este principio. Una lectura física de las ecuaciones que plantean nos hace percibir que, para estos estudiantes, el principio de conservación de la energía mecánica es una estrategia tipo, cuyo significado físico no logran comprender.

En el problema de la “corteza esférica”, al aplicar la ley de Gauss para $r < a$ aparece la idea, insistentemente reiterada en clase y en los libros de texto, de que el campo eléctrico en el interior de un conductor en equilibrio electrostático es cero, que al generalizarla acríticamente sin tener en cuenta las condiciones del problema, lleva a los estudiantes (51%) a no considerar la carga $+q$ introducida en el interior de la corteza conductora. Así pues, surge una de las características de la metodología de “sentido

común" (GIL; CARRASCOSA, 1985) que consiste en realizar generalizaciones acríticas a partir de situaciones particulares; en este caso, al concepto de campo eléctrico en el interior de un conductor se le asigna un grado de generalizabilidad que sobrepasa su rango de aplicación.

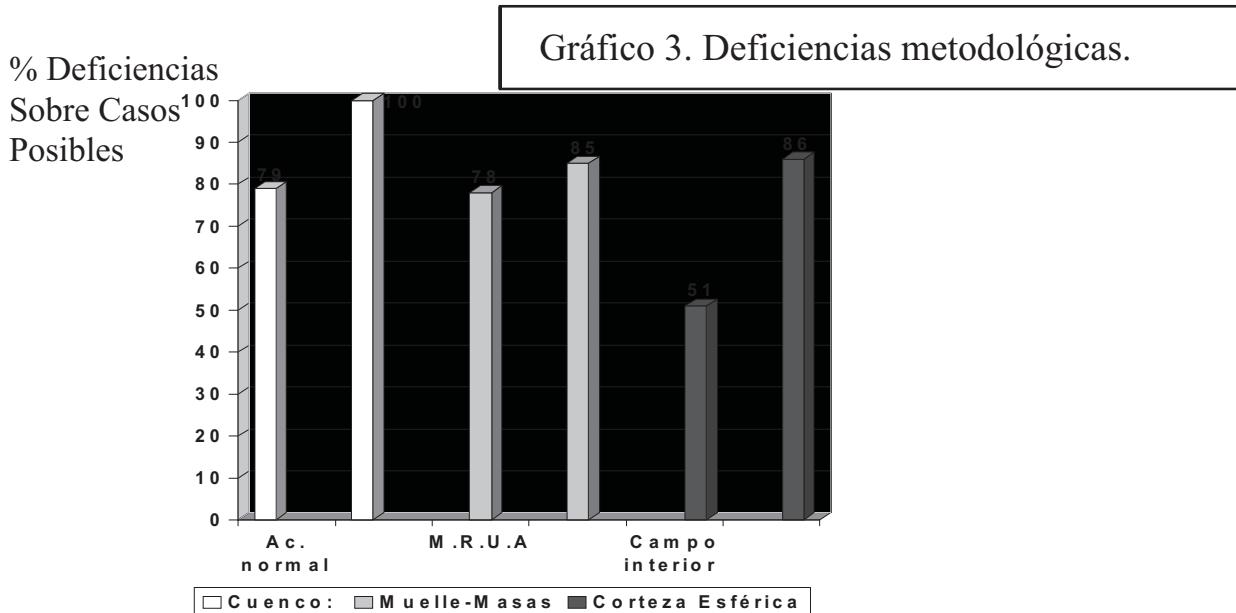
Otra laguna metodológica detectada en la resolución de este problema se refiere a la utilización algorítmica que los estudiantes hacen del teorema de Gauss, pues el 86% de los alumnos que aplican correctamente el citado teorema, no da cuenta, de forma explícita, de aspectos capitales para su correcta utilización, como las condiciones de simetría del campo y la superficie gaussiana elegida.

En el gráfico 3 se agrupan esquemáticamente estos resultados.

– *El objetivo es alcanzar un resultado (componente actitudinal), del que se aceptan como válidas todas las soluciones independientemente de su coherencia y racionalidad.*

En el problema "muelle-masas", sólo un pequeño porcentaje (7%) abandona por la vía energética y es que, una vez encaminado por energías, no presenta dificultad alguna para obtener la velocidad. Sin embargo, la mayoría de los estudiantes (90%) indican, sin ningún análisis, resultados incorrectos e incoherentes con la situación física que se describe.

Lo anterior es coherente con la ausencia, ya descrita, de un planteamiento cualitativo inicial del problema que permita emitir conjeturas acerca de la situación planteada (hipótesis), que posteriormente puedan ser contrastadas con los resultados. Si no se elabora esta etapa inicial, no se espera nada sobre la posible solución y, por lo tanto, no se analiza el resultado obtenido.



IV. Conclusiones

De los resultados obtenidos se puede deducir que el número de alumnos que es capaz de desarrollar una estrategia globalmente correcta de cara a la resolución de las situaciones problemáticas planteadas es muy reducido: 14% en el problema del “cuenco” y 11% en los problemas “muelle-masas” y “corteza esférica”. Todo ello nos permite afirmar, de acuerdo con nuestra primera hipótesis, que los estudiantes no alcanzan a comprender de forma significativa los conceptos, leyes y principios fundamentales que se imparten en las clases de teoría y se pretenden reforzar con la realización de problemas tipo, y que las dificultades que aparecen son convergentes con las ya indicadas en las investigaciones sobre Concepciones Alternativas.

Por otro lado, de acuerdo con nuestra segunda hipótesis, hemos confirmado que los estudiantes tienden a utilizar los datos del problema como si de la composición de un puzzle se tratara, y que actúan en base a un operativismo mecánico en el que no se definen las condiciones del problema, no se justifica la utilización de leyes, principios y conceptos y no se contrastan los resultados. Esta manera de proceder explica, en gran medida, las dificultades que presentan los estudiantes en su intento de resolución de problemas habituales de Física. Así, la no-realización de un análisis cualitativo del problema a resolver, que explice las condiciones de partida y rzone las definiciones operativas a utilizar, permite comprender errores conceptuales posteriores como la no-consideración de todas las interacciones sobre el sistema o la incorrecta aplicación de leyes y principios. De la misma manera, el que las estrategias de resolución seguidas por gran parte de los estudiantes sean una reproducción rígida e irreflexiva de un algoritmo aprendido, que no induce a plantearse modificaciones de actuación respecto a lo que recuerdan, nos aclaran el por qué de tanta utilización incorrecta de conceptos y principios, así como el que jamás se dude de la verosimilitud y plausibilidad del resultado.

Los pobres resultados obtenidos en el aprendizaje de los estudiantes nos llevan a asumir el fracaso de una enseñanza universitaria de resolución de problemas concebida como ‘ejercicios de aplicación’ y basada en ‘problemas-tipo’, que no resuelve los problemas de aprendizaje que tienen los estudiantes. Esta enseñanza de resolución de problemas no contribuye a que los estudiantes aprendan de forma significativa los conceptos, leyes y principios más básicos de la Física.

Hemos visto que una de las razones principales de este fracaso está relacionada con cuestiones metodológicas y actitudinales a la hora de plantear la resolución de un problema. Será pues necesario plantearse críticamente las estrategias de enseñanza habitualmente utilizadas en clase que llevan a los estudiantes universitarios a un enfoque de la resolución de problemas muy alejado de la metodología científica. Habrá que considerar un cambio en la enseñanza universitaria que haga frente a la necesidad que tienen los estudiantes de aprender habilidades de la metodología científica (planteamiento cualitativo, análisis de variables, emisión de

hipótesis, etc.) para afrontar con éxito la resolución de problemas, y la utilización significativa de leyes y conceptos. Afortunadamente a la hora de plantearnos el cambio de enseñanza en la Universidad, tenemos un amplio conjunto de resultados de investigaciones en resolución de problema en Secundaria (MALONEY, 1994; PERALES, 2000) que pueden ayudarnos a diseñar estrategias de enseñanza a nivel universitario. Estas estrategias deberán favorecer que los estudiantes practiquen habilidades y capacidades propias de la metodología científica. El diseño de estas estrategias de enseñanza y su puesta en práctica en cursos universitarios de introducción a la Física será el objeto de nuestros próximos trabajos.

V. Bibliografía

ANDERSON, J. R. **Cognitive Psychology and its implications.** New York: W. H. Freeman and company, 1990.

AA.VV. **Handbook of Research on Science Teaching and Learning.** Edited by D. L. Gabel, 1994.

ALMUDÍ, J. M.; CEBERIO, M.; GUISASOLA, J.; ZUBIMENDI, J. M.. Una experiencia de resolución de problemas abiertos de Física en el primer curso de Ingeniería Técnica Industrial. In: CONGRESO UNIVERSITARIO SOBRE INNOVACIÓN EDUCATIVA EN LAS ENSEÑANZAS TÉCNICAS, I, 1996, Zaragoza. Actas.

CALATAYUD, M. L.; GIL, D.; GIMENO, J. V. Cuestionando el pensamiento docente espontáneo del profesorado universitario: las deficiencias de la enseñanza como origen de las dificultades de los estudiantes. **Revista Interuniversitaria de Formación del profesorado**, v. 14, 1992.

CARRASCOSA, J.; GIL, D. Concepciones alternativas en mecánica. **Enseñanza de las Ciencias**, v. 10, n. 3, p. 314-328, 1992.

COOK, T. H.; REICHARDT, C. H. **Métodos cualitativos y cuantitativos en investigación educativa.** Madrid: Morata, 1986.

DOMÉNECH J. L.; GIL D.; GRAS A.; MARTÍNEZ-TORREGROSA J.; GUISASOLA J.; SALINAS J. La enseñanza de la energía en la educación secundaria, un análisis crítico. **Revista de Enseñanza de la Física**, v. 14, n. 1, p. 45-60, 2001.

DUIT, R. Research on student's conceptions-developments and trends. Paper presented at the "Third International Seminar on Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics". Cornell, Ithaca, 1993.

DUMAS-CARRÉ, A.; GOFFARD, M. **Rénover Les activités de résolution de problèmes en physique.** Armand Colin: París, 1997.

FURIÓ, C.; CALATAYUD, M. L.; BÁRCENA S.; PADILLA D. H. Functional fixedness and functional reduction as common sense reasoning in chemical equilibrium and geometry and polarity of molecules. **Science Education**, v. 84, p. 545-565, 2000.

FURIÓ, C.; ITURBE, J.; REYES, V. Contribución de la resolución de problemas como investigación al paradigma constructivista del aprendizaje de las ciencias. **Investigación en la Escuela**, v. 24, p. 88-99, 1994.

GALILI, I. Mechanics background influences student's conceptions in electromagnetism. **International Journal in Science Education**, v. 17, n. 3, p. 371-387, 1995.

GARRET, R. M. Issues in Science Education: problem-solving, creativity and originality. **International Journal of Science Education**, v. 1, p. 26-33, 1987.

GIL, D.; MARTINEZ-TORREGROA, J. A model for problem solving in accordance with scientific methodology. **European Journal of Science Education**, v. 5, n. 4, p. 447-455, 1983.

GIL, D.; CARRASCOSA, J. Science learning as a conceptual and methodological change. **European Journal of Science Education**, v. 5, p. 70-81, 1985.

GIL, D.; MARTÍNEZ-TORREGROSA, J.; SENENT, F. El fracaso en la resolución de problemas de Física: una investigación orientada por nuevos supuestos. **Enseñanza de las Ciencias**, v. 6, n. 12, 1988.

GIL. D.; CARRASCOSA, J.; FURIÓ, C.; MARTINEZ-TORREGROSA, J. La Enseñanza de las Ciencias en la Educación secundaria. I. C. E. de la Universidad de Barcelona-HORSORI. Barcelona, 1991.

GOFFARD, M. **Modes de travail pedagogique et résolution de problèmes de physique**, 1990. Tesis doctoral – Universidad París VII, Paris.

GUIASOLA, J. La enseñanza-aprendizaje de la Física: un proceso complejo necesitado de fundamentación teórica. In: JORNADAS SOBRE LA ENSEÑANZA EN LAS ESCUELAS UNIVERSITARIAS DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL, I, 1993, Bilbao. Actas. p. 241-252.

GUIASOLA J.; SALINAS, J.; ALMUDÍ, J. M.; VELAZCO S. Dificultades de los estudiantes universitarios en la comprensión y utilización de las leyes de Gauss y de Ampère en Electromagnetismo. **Enseñanza de las Ciencias**, Número Extra, 2001.

HEGARTY-HAZEL, E.; PROSSER, M. Relationship between student's conceptual knowledge and study strategies. Part I: student learning Physics. **Handbook of Research on Science Teaching and Learning**. Edited by D. L. Gabel, 1991.

KAPRAS S.; ALVES F.; CARVALHO L. R. Modelos mentais e a lei de Gauss, **Inves-tigações em Ensino de Ciências**, v. 5, n. 1, 2000.

LEFÈVRE, R.; ALLEVY, P. Raisonnements simples d'étudiants et de lycéens à propos du plan incliné. **Didaskalia**, v. 13, p. 81-112, 1998.

LEONARD W. J.; DUFRESNE R. J.; MESTRE J. P. Using qualitative problem-solving strategies to highlight the role of conceptual knowledge in solving problems. **American Journal of Physics**, v. 64, n. 12, p. 1495-1503.

MALONEY, D. P. Research on Problem Solving: Physics. **Handbook of Research on Science Teaching and Learning**. Edited by D. L. Gabel, 1994.

PERALES F. J. La resolución de problemas. **Didáctica de las Ciencias Experimentales**. Marfil: Alcoy, España, 2000.

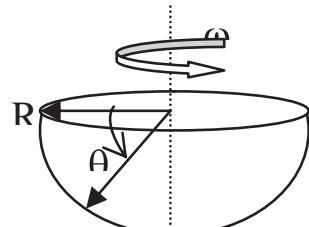
RAMÍREZ, J. L.; GIL, D.; MARTINEZ-TORREGROSA, J. La resolución de problemas de Física y Química como Investigación. CIDE. Centro de Publicaciones del Ministerio de Educación y Ciencia, España, 1994.

REYES, J. V. **La resolución de problemas de Química como Investigación: una propuesta didáctica basada en el cambio metodológico**. 1991. Tesis doctoral – Universidad del País Vasco, 1991.

SOLBES, J.; TARÍN F. Algunas dificultades en torno a la conservación de la energía. **Enseñanza de las Ciencias**, v. 16, n. 3, p. 387-397, 1998.

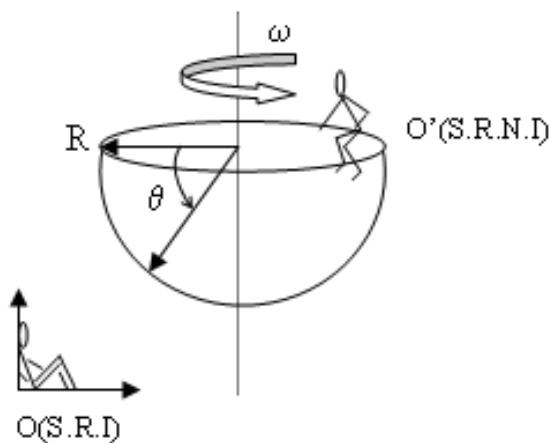
VIENNOT L. **Raisonneer en physique**. De Boeck Université, París, 1996.

ANEXO



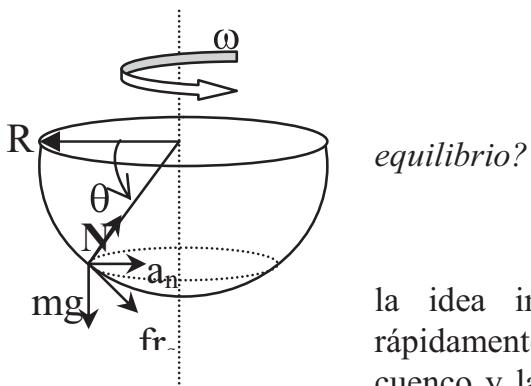
Problema CUENCO: En el interior de una semiesfera hueca de radio R , que gira con velocidad ω constante, se encuentra una partícula como indica la figura. Si el coeficiente de rozamiento estático entre las dos es μ y el ángulo θ es también conocido, determinar la ω_{\max} a la que puede girar el cuenco para que la partícula no se mueva respecto de la superficie semiesférica.

¿Cuál es el estado de movimiento que nos plantea el problema?



Un observador no inercial (S.R.N.I) como el indicado en la figura, girando con el cuenco, vería la partícula en reposo, mientras que un observador inercial (S.R.I) no-acelerado, la vería girando con la misma ω que el cuenco. El problema, entonces, nos plantea el equilibrio de una partícula puntual respecto al cuenco semiesférico hueco que gira con velocidad constante.

¿Qué fuerzas actúan sobre la partícula?



El diagrama de cuerpo libre será:

¿Cómo influyen estas interacciones en la ω de equilibrio?

Mediante el análisis de las fuerzas se confirma la idea intuitiva de que, si el sistema gira “muy rápidamente”, la partícula tiende a subir por la pared del cuenco y la fr_s opuesta a dicha tendencia la empuja hacia abajo; si la velocidad angular es “muy baja”, sin embargo, la tendencia es a caer y la fr_s empujará hacia arriba. Debemos considerar, entonces, que hay dos valores límites de la velocidad angular, ω_{\max} y ω_{\min} , entre los cuales tendrá que estar acotada dicha velocidad para que se dé el equilibrio relativo al cuenco, es decir: $\omega_{\min} \leq \omega \leq \omega_{\max}$

Centrándonos en uno de ellos, ω_{\max} pedido en el enunciado, las fuerzas reales que actúan sobre la partícula son: P , N , y fr_s con la dirección y sentidos indicados en la figura anterior. Estas fuerzas son las que deben dar lugar a una aceleración normal, a_n , que el observador inercial aprecia para la partícula.

Si el problema se analiza desde un punto de vista de un S.R.N.I, este observador, que no aprecia la a_n relacionada con ω , deberá considerar una fuerza de

inercia (fuerza centrífuga) que no es real en el sentido de que no se debe a ninguna interacción con el entorno.

En cualquiera de los dos casos, inercial o no inercial, utilizaríamos como estrategia de resolución las leyes de Newton, cuya aplicación nos llevaría a la obtención de la ω pedida.

Resolución:

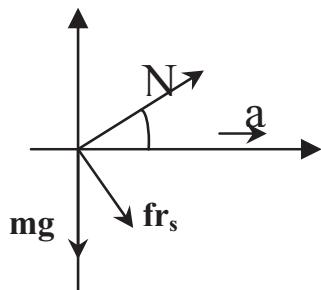


Fig. d

$$\text{S.R.I.: } \sum F = ma;$$

$$x: N\cos\theta + fr_s \sin\theta = m\omega^2 R \cos\theta \quad (1)$$

$$y: N\sin\theta - fr_s \cos\theta - mg = 0 \quad (2)$$

En el límite, cuando está a punto de deslizar, para $\omega = \omega_{\max}$, se cumple que:

$$fr_s = \mu_s N \quad (3)$$

De (1), (2) y (3) se obtiene:

$$N = \frac{mg}{\sin\theta - \mu_s \cos\theta} \quad (4)$$

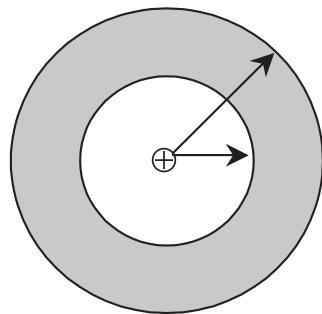
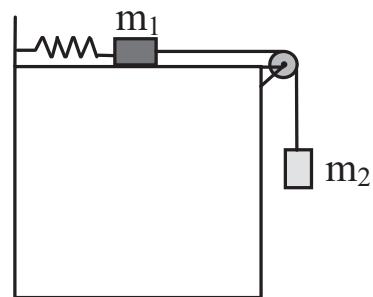
De (4) y (1) queda:

$$\omega_{\max} = \sqrt{\frac{g(1 + \mu_s \operatorname{tg}\theta)}{R(\sin\theta - \mu_s \cos\theta)}}$$

Análogamente, para la velocidad mínima, cambiando el sentido de f_r , se obtiene:

$$\omega_{\min} = \sqrt{\frac{g(1 - \mu_s \tan \theta)}{R(\sin \theta + \mu_s \cos \theta)}}$$

Problema Muelle-Masas: El bloque de masa m_1 de la figura, que se encuentra sobre una mesa rugosa, se conecta a un resorte de constante k , y por medio de una cuerda ligera e inextensible que pasa por una polea sin rozamiento y de masa despreciable, se une a otro bloque de masa m_2 . Si el sistema se libera a partir del reposo cuando el resorte no está estirado, ¿Cuál es la velocidad del sistema cuando el muelle se ha alargado una distancia x ?



Problema CORTEZA ESFÉRICA: Un conductor esférico hueco, inicialmente descargado, posee radios interno a y externo b . En el centro de la cavidad esférica existe una carga puntual $+q$.

- Justificar cuál será la distribución de carga una vez alcanzado el equilibrio.
- Obtener el campo eléctrico en puntos de las regiones exterior a b , entre a y b , e interior a a .