

ANÁLISIS DE LAS DIFICULTADES CONCEPTUALES DEL MOVIMIENTO CIRCULAR A TRAVÉS DE LA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS Y LA EXPERIMENTACIÓN¹

Chiabrando, Laura¹; Kenig, Francisco²; Montino, Marisol²; Pérez, Silvia M.²; Petrucci, Diego³; Ure, José Ernesto⁴.

¹Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires. ²Instituto de Desarrollo Humano, Universidad Nacional de General Sarmiento. ³Facultad de Ciencias Exactas, UNLP y CeFIEC, FCEyN, UBA. ⁴Instituto de Ciencias, Universidad Nacional de General Sarmiento.

marisol.montino@gmail.com

RESUMEN

En este trabajo se presenta un análisis de las estrategias y las dificultades que presentan estudiantes universitarios durante la resolución de tres problemas de movimiento circular. Los problemas fueron trabajados en dos comisiones con diferentes contextos, en una se trabajó con soporte experimental y en la otra no. Por otra parte, se describe cómo es abordado este tema en los libros que se recomiendan en la materia. A partir del análisis de los datos, por medio de una metodología exploratoria y cualitativa, se identificaron las dificultades de conceptualización que presentan los estudiantes al enfrentarse a la resolución de problemas sobre movimiento circular.

Palabras clave: movimiento circular, nivel universitario, experimentación, resolución de problemas

ABSTRACT

In this paper, we present an analysis of the strategies and difficulties that University students have when solving three problems of circular motion. These problems were solved by two groups in different contexts. Only one of the groups worked using experimental support. Furthermore, we include a description on how this topic is treated by the books recommended for this subject. By analyzing the information using an exploratory and qualitative methodology, we identified the difficulties of conceptualization that students show when solving circular motion problems.

Keywords: circular motion, university level, experimentation, problem solving

INTRODUCCIÓN

Es sabido que los estudiantes tienen dificultades para relacionar los problemas abstractos que se resuelven en las clases de física con los hechos del mundo físico (Hodson, 1994; Seré, 2002; Montino et al, 2006; Montino et al, 2011), a pesar de que la física es una ciencia que intenta describir, explicar y predecir los fenómenos del mundo natural mediante la construcción de teorías. Lograr dicha relación es uno de los tantos fines que los docentes atribuyen a los Trabajos Prácticos de Laboratorio (TPL) (Hodson, 1994).

Al iniciar nuestras investigaciones sobre TPL de Física en los primeros años de la universidad, el estudio de la bibliografía nos llevó a cuestionarnos sobre sus objetivos. En este sentido coincidimos con White (1996) y Seré (2002) en que uno de los objetivos prioritarios es asistir al aprendizaje, con una profunda comprensión de hechos y explicaciones a través de razonar sobre lo concreto y visualizar los objetos y eventos que la ciencia conceptualiza y explica. Sin embargo, el formato de TPL les plantea a los estudiantes unos requerimientos que -por su complejidad- hace que este objetivo de aprendizaje quede relegado.

Con el propósito de priorizar el aprendizaje diseñamos los Espacios de Interacción Libre con el material de laboratorio (en adelante EIL), de modo de incluir la experimentación para contribuir a la comprensión de conceptos y a la resolución de problemas (Arias Regalía et al., 2011). Los EIL consisten en actividades en las que los estudiantes tienen disponible el material de laboratorio necesario para reproducir experimentalmente un problema de lápiz y papel que deben resolver. Este tipo de experimentación propuesta es cualitativa y les permite a los estudiantes manipular el material de laboratorio teniendo una participación activa pues está pensada para colaborar con la visualización de los eventos físicos involucrados.

¹ Trabajo realizado con la financiación parcial del PICTO UNGS 0084.

Por motivos que se detallan en el siguiente apartado, se decidió implementar los EIL en el tema de movimiento circular. La bibliografía encontrada sobre el aprendizaje y la enseñanza del tema movimiento circular es escasa. Escudero et al. (2005) infieren qué conceptos físicos se ponen en juego en la resolución de problemas a partir de las expresiones algebraicas que los estudiantes utilizan. Indican que no es trivial para un estudiante tener que representar la fuerza de fricción en la dirección radial, ya que la primera suele ser enseñada inicialmente en las clases y libros universitarios como contraria al sentido del movimiento (cuando es contraria al sentido en que tienden a desplazarse las superficies). Casadella y Babiloni (1985) remarcan la complejidad de la construcción histórica del concepto de fuerza centrípeta. Afirman que en la enseñanza no se considera que el común de las personas interpreta fenómenos de movimiento circular agregando una fuerza centrífuga.

A estas dificultades encontradas en la bibliografía se suma que el movimiento circular uniforme es el primer ejemplo dentro de la dinámica de la partícula donde la fuerza es perpendicular a la velocidad, por lo tanto es la primera situación de análisis que confronta fuertemente con la noción alternativa que considera proporcionales la fuerza y la velocidad (Driver et. al., 1999; Carrascosa y Gil Pérez, 1992). Si bien es cierto que en el tiro oblicuo la fuerza y la velocidad no son colineales, en los primeros cursos de física el análisis suele realizarse desde la cinemática y no desde la dinámica. Por otra parte, a pesar de que en la vida cotidiana son frecuentes los movimientos que pueden modelizarse como circulares la conceptualización y la matematización resulta más compleja.

Si bien el presente trabajo inicialmente tuvo el fin de indagar cómo la experimentación influye en el aprendizaje de la física a través de la implementación del EIL, el análisis de los datos con las características propias de una metodología exploratoria nos ha permitido concluir que no aparecen diferencias significativas entre los estudiantes que resuelven problemas en una situación de EIL con los que resuelven los mismos problemas sin experimentar. Sin embargo el aspecto más relevante de los datos analizados fue poner en evidencia las dificultades de conceptualización que tienen los estudiantes en la resolución de problemas de movimiento circular. Este cambio de mirada nos llevó también a analizar cómo es presentado el tema en los libros de física. Por lo tanto, el trabajo que se presenta tiene por objetivo analizar las dificultades que tienen los estudiantes para comprender el movimiento circular y relacionarlas con la forma que tratan el tema los libros de texto utilizados.

Elección del tema

Se eligió el tema movimiento circular porque mediante el análisis de parciales y entrevistas informales a los docentes fue identificado como el tema en que los estudiantes evidencian mayores dificultades de los que se enseñan en Física General, primera materia de física en la Universidad Nacional de General Sarmiento. Con el objetivo de recabar información respecto de sus pareceres sobre los temas enseñados en la materia se tomó una encuesta (ver Anexo I). Se realizó de forma escrita y voluntaria a 107 estudiantes de Física General cuando terminaron la materia. Entre sus resultados se destacan:

- el 38% (41 estudiantes) eligió el tema “Leyes de Newton” como el que más les gustó, la siguiente opción más elegida fue “Trabajo y energía” con el 26% (28 estudiantes). Los temas “Movimiento circular”, “Movimiento relativo” y “Fuerza elástica” fueron los menos elegidos con el 4.5% (5 estudiantes cada tema).
- el 42% (45 estudiantes) eligió el tema “Movimiento circular” como el que menos les gustó, la siguiente opción más elegida fue “Ninguno” 14% (15 estudiantes)
- el 55% (59 estudiantes) eligió el tema “Movimiento circular” como el más difícil de entender, le sigue “Trabajo y energía” con el 11% (12 estudiantes)

Estos resultados ratificaron nuestra idea de que movimiento circular es un tema especialmente complejo para los estudiantes. Muy pocos estudiantes justificaron sus elecciones, quienes lo hicieron afirmaron que les disgusta movimiento circular porque es el tema más difícil de entender dado que tiene “una excesiva cantidad de ecuaciones y fórmulas”, “se da rápido” y hay “poca práctica” y “ejercitación”.

ANTECEDENTES

En el año 2011 se trabajó con EIL en el tema movimiento circular en la materia Física General. Se utilizaron tres problemas de la guía de ejercicios de la materia que fueron modificados y para los que se construyeron dispositivos experimentales que representan las situaciones planteadas en dichos problemas (Anexo II). En un artículo previo se presentaron las características de los EIL y los criterios para la selección y modificación de los problemas (Arias Regalía et. al., 2011)

Los problemas utilizados pueden caracterizarse, según la clasificación de Perales (1998), como heurísticos (por el procedimiento seguido para su resolución), cerrados (por el tipo de solución) y cualitativos y cuantitativos (por las tareas requeridas), es decir son problemas típicos de libro y de cursos con metodología tradicional.

Si bien los enunciados de los problemas contenían toda la información necesaria para la resolución, el objetivo del EIL era que los alumnos pudieran, a través de la interacción con el dispositivo experimental, entender el sentido de las preguntas y el comportamiento de los objetos de estudio en forma cualitativa, de modo de darle significado a los procedimientos de resolución y a los resultados obtenidos. La implementación fue realizada cuando los estudiantes estaban en el proceso de aprendizaje del tema movimiento circular.

Las observaciones de clase realizadas en aquella oportunidad indicaron que los estudiantes trabajaron activamente en grupos durante toda la actividad. El tema movimiento circular les resultó complejo y realizaron muchas consultas, sin embargo, interactuaron poco con el material experimental. Esto indicaría que no consideraron la experimentación como una posible ayuda al intentar resolver las dudas o controversias que surgían en el seno de los grupos a medida que avanzaban con la resolución.

En el tiempo de clase disponible resolvieron sólo el primero de los tres problemas propuestos. A pesar de la gran cantidad de consultas realizadas y de lo dificultosa que les resultó la actividad, las resoluciones de ese problema entregadas por cada grupo fueron correctas.

A partir de estos resultados consideramos que el EIL de movimiento circular superaba las posibilidades de resolución para estudiantes de Física General que estaban aprendiendo el tema. No parecía resultar de mucha ayuda dado que el tipo de preguntas que tenían los alumnos eran más básicas que las que pueden surgir al intentar resolver los problemas propuestos, es decir, todavía no estaban lo suficientemente inmersos en el tema como para poder encarar la actividad. A raíz de ello consideramos pertinente realizar el EIL de movimiento circular en las primeras clases de repaso en la materia siguiente, llamada Mecánica Clásica que incluye un repaso de mecánica de la partícula, mecánica del cuerpo rígido, sistemas no inerciales, órbitas y ondas mecánicas. Los alumnos que cursan dicha materia han aprobado los trabajos prácticos de Física General, incluso algunos han rendido el final.

METODOLOGÍA Y TEORÍA

En el enfoque de la teoría enraizada (Glasser y Strauss, 1999) la teoría se genera progresivamente a partir del análisis de los datos, por lo tanto las categorías no son determinadas a priori. La metodología utilizada en este trabajo puede caracterizarse como exploratoria y cualitativa. Presentaremos a continuación los aspectos más salientes que aparecieron al realizar la primera inmersión en los datos, quedando pendiente para futuros trabajos su categorización.

En esta implementación se utilizaron los problemas presentados en el Anexo II y los dispositivos que permiten reproducirlos experimentalmente.

Se trabajó en dos comisiones de la materia Mecánica Clásica, en una comisión se implementó el EIL de movimiento circular y en la otra comisión se trabajaron los tres problemas sin los dispositivos experimentales. Con la implementación en la comisión sin experimentación se buscó indagar en una situación distinta para no relacionar ingenuamente el uso de los dispositivos experimentales con las dificultades en la conceptualización, ni los “éxitos” en la resolución.

Además se analizó cómo es abordado el tema de movimiento circular en los libros recomendados en los programas de la materia y que estuvieran disponibles para los estudiantes, con el objetivo de conocer cómo se aborda la enseñanza del tema y qué relación puede tener esto con las dificultades en el aprendizaje.

Para el análisis se utilizaron los siguientes registros:

- las resoluciones escritas que entregaron los grupos (5 grupos en cada comisión),
- la observación no participante y con registro escrito de uno de los investigadores sobre el trabajo de uno de los grupos que realizó el EIL,
- la observación participante de uno de los investigadores que ofició de ayudante durante las clases en ambas comisiones,
- 11 libros que tratan el tema, recomendados en el programa de la materia y disponibles en la biblioteca de la UNGS.

IMPLEMENTACIÓN

El EIL se realizó en una clase de repaso de 2 horas en la Comisión I de la materia Mecánica Clásica. Se pidió que trabajaran en grupos de 4 o 5 estudiantes y que al finalizar la clase la resolución de los problemas fuera entregada por escrito de manera anónima.

La consigna de trabajo para los alumnos consistió en pedir la resolución de los problemas sin indicaciones sobre cómo y cuándo utilizar los dispositivos experimentales.

El trabajo con el problema 1 se planificó como una instancia de explicitación de las analogías entre el dispositivo experimental y la situación planteada en el enunciado del problema.

Luego de mostrar el funcionamiento del dispositivo, se preguntó a los estudiantes: ¿Cuáles son los puntos que podríamos contestar usando el dispositivo? (ítems b y f), ¿Qué podríamos hacer para contestarlos utilizando el dispositivo? Además de contestar las preguntas los estudiantes propusieron situaciones diferentes. Se utilizó el dispositivo para mostrar cada situación. Durante el resto de la clase el dispositivo experimental se dejó a disposición de los grupos para que lo utilizaran en caso de considerarlo necesario.

Por otra parte, cada grupo disponía de los dispositivos experimentales correspondientes a los problemas 2 y 3. Durante la resolución de estos problemas los estudiantes tenían a su disposición a los docentes para realizarles consultas. Éstos recorrían los grupos para ofrecerles ayuda y trataban de no responder directamente las preguntas planteadas sino de orientarlos en la resolución.

En la otra comisión de Mecánica Clásica, Comisión II, se trabajó con los 3 problemas del EIL de movimiento circular pero sin los dispositivos experimentales. Los estudiantes trabajaron en grupos de 4 o 5 y entregaron la resolución de los problemas. También en este caso la resolución de los problemas fue guiada por los docentes de la materia.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados se organizaron en tres grandes grupos: las dificultades en la resolución de los problemas, el rol de la experimentación en la comisión que se implementó el EIL y cómo es presentado el tema movimiento circular en los libros que se recomiendan en el programa de la materia disponibles en la biblioteca.

La resolución de problemas

Si bien una comisión trabajó con el EIL y la otra sólo con los problemas de lápiz y papel, las resoluciones entregadas por los grupos no difieren en forma significativa.

En la Comisión I, con el EIL, cuatro grupos llegaron a resolver todos los problemas y un grupo sólo los dos primeros; en la Comisión II, sin el EIL, un grupo resolvió todos los problemas y cuatro grupos sólo los dos primeros.

De los datos surgieron cuatro temáticas que se discutirán a continuación:

1. Confusión entre los conceptos

Tanto en las consultas realizadas en clase como en las resoluciones entregadas por escrito se evidenció una confusión entre conceptos. Desde un comienzo de la actividad los estudiantes se encontraron con la dificultad de no poder distinguir claramente entre período, frecuencia y velocidad angular. Esto aparece de manifiesto también en las resoluciones por escrito donde, a pesar de interpretar erróneamente los datos dados en el enunciado del problema, terminan reemplazando de manera correcta en las ecuaciones. Por ejemplo se daba como dato el período y los estudiantes anotaban ese dato como una frecuencia, pero luego lo utilizaban correctamente. Éste tipo de confusión no impidió que avanzaran en la resolución del problema.

Por otra parte, al pedir valores de velocidad angular, fue frecuente que contestaran calculando el valor de la velocidad tangencial; e incluso aquellos que calculaban el valor de la velocidad angular como paso intermedio calculaban la velocidad tangencial, a pesar de no ser necesario. Tal vez el concepto de velocidad angular no es lo suficientemente claro como sí parece serlo el de velocidad tangencial. En algunos casos encontramos que confunden la velocidad tangencial y angular: *"como Geraldine esta ubicada a un radio mayor (con respecto al centro de la calesita) aumentará más rápidamente su ω y por ende su velocidad tangencial ($v=\omega.r$). al tener mayor velocidad tangencial se "romperá" antes su fuerza centrípeta (y se desliza primero)"* Grupo 5 – Comisión II sin EIL

2. Cambios de marcos de referencia en el transcurso de la resolución de los problemas

Al realizar los diagramas de cuerpo libre los estudiantes agregaban una fuerza “centrípeta” en sentido opuesto a la fuerza de interacción que actúa en dirección radial y hacia el centro de manera de compensarlas -vale aclarar que en todos los problemas trabajados existe sólo una fuerza de interacción en dirección radial-. De alguna manera los estudiantes estaban analizando la situación desde un marco de referencia no inercial solidario a la calesita y confundiendo la fuerza centrípeta con la centrífuga. Según Carrascosa y Gil Pérez (1992) las fuerzas inerciales aparecen como *“una exigencia de la preconcepción según la cual todo cuerpo se mueve siempre en la misma dirección que la fuerza resultante que actúa sobre el mismo”*. Por ejemplo, en el caso del problema 1 “compensaban” la fuerza de rozamiento con la fuerza centrípeta argumentando que no había movimiento de los chicos respecto del suelo de la calesita, confundiendo reposo con equilibrio y sin considerar la trayectoria circular que mantenían. Cabe aclarar que no habían estudiado todavía sistemas no inerciales. Consultaron con los docentes en reiteradas oportunidades esta cuestión, y es por ello que en lo entregado por escrito aparece bien planteado el diagrama de cuerpo libre. Sin embargo aparecen contradicciones cuando deben justificar sus respuestas. Es importante señalar que las cuentas terminan siendo las mismas ($F_{\text{cent}}=F_{\text{roz}}$) tanto si lo están resolviendo correctamente como si están pensando en una fuerza resultante igual a cero en la dirección radial. Al momento de tener que justificar aparecen respuestas que indicarían que los estudiantes están pensando en dos fuerzas opuestas “compitiendo”; por ejemplo, *“Los chicos giran en vez de deslizarse porque la Fuerza centrípeta no vence a la Fuerza de rozamiento estática”* (Grupo 2 – Comisión I con EIL).

3. Conflictos debido a que la fuerza y la velocidad no son colineales

Como se mencionó en el punto anterior los estudiantes consideraban que al no haber movimiento en la dirección radial la fuerza resultante en dicha dirección debería ser cero. Sin embargo, ningún grupo propuso una fuerza en la dirección de la velocidad tangencial, como sería esperable según las nociones alternativas si lo consideraran como un problema más de dinámica, tal vez porque al analizar el problema desde el marco de referencia rotante dicha fuerza carecería de sentido.

Los estudiantes se han habituado a relacionar el movimiento circular con la existencia de una fuerza centrípeta, tal vez por ello al resolver los problemas ponían énfasis en ubicar la fuerza centrípeta primero y luego realizaban el diagrama de cuerpo libre si es que el enunciado lo solicitaba. Esto indicaría que para los estudiantes lo característico del movimiento circular es la fuerza centrípeta y no lo consideran necesariamente como un caso más de la dinámica de la partícula. Incluso en la encuesta realizada, mencionada anteriormente, el tema “Leyes de Newton” fue el que los estudiantes señalaron como el que más les gustó -38%- y el tema “Movimiento circular” como el que menos les gustó -42%-, indicando que para los estudiantes existe una desconexión entre ambos, sin advertir que uno incluye al otro.

Por otra parte, se observó que los estudiantes relacionan mediante la ecuación matemática la fuerza centrípeta con la velocidad tangencial sin inconvenientes. Pero el significado de esa relación parece no ser claro, en la observación con registro escrito realizada en la comisión con EIL un estudiante preguntó a sus compañeros *“la velocidad tangencial es para el costado, la fuerza de rozamiento es para el centro ¿cómo puede ser que tengan una conexión”*. E incluso en las resoluciones entregadas por escrito aparece en forma recurrente la idea de que *“los chicos irán junto a la calesita en lugar de deslizarse debido a que la velocidad tangencial no llega a romper a la fuerza centrípeta”* Grupo 5 – Comisión II sin EIL.

4. Dificultades para establecer condiciones

Los estudiantes tuvieron dificultades para decidir si la fuerza de rozamiento estática es la máxima o no y determinar cuáles son las magnitudes que no varían al modificar alguna condición del sistema analizado.

En la resolución del primer problema la mayoría de los grupos consultó a los docentes si la fuerza de rozamiento que ejerce la calesita sobre los chicos era la estática máxima. Si bien todos los grupos pudieron calcular esta fuerza de rozamiento y la fuerza de rozamiento estática máxima en cada caso, se encuentra en una de las resoluciones escritas que consideran que los chicos *“quedan pegados a la calesita porque existe un rozamiento (fuerza centrípeta) con μ_e ”* Grupo 2 – Comisión II sin EIL. Esto podría sugerir que en algún punto siguen considerando la fuerza de rozamiento estática máxima, a pesar de realizar correctamente los cálculos.

El siguiente problema propone dos situaciones que ponen en evidencia la segunda dificultad mencionada. Cuando se pregunta cómo varía la velocidad angular si el cuerpo tiene una trayectoria circular con mayor radio, un grupo responde: *“la velocidad debe ser menor. Porque el radio es denominador en $\omega=v/r$, entonces a mayor radio menor velocidad”* Grupo 2 – Comisión II sin EIL. En este tipo de respuestas parece indicar que los estudiantes no pudieron reconocer que la comparación debe establecerse a partir de la tensión, que es la misma en ambas configuraciones (porque la masa en equilibrio que cuelga no se modifica); es decir, suponen que la velocidad tangencial es lo que permanece constante. Una dificultad similar se puede encontrar cuando deben considerar cómo se modificaría la velocidad angular si se aumenta la masa del cuerpo que describe la trayectoria circular. En las resoluciones entregadas otro grupo determina que *“como la velocidad angular no depende de la masa la ω será igual al caso anterior”* Grupo 3 – Comisión I con EIL, lo que parece suponer que nuevamente sólo consideran la relación entre velocidad tangencial, velocidad angular y radio.

Finalmente, todos los grupos que resolvieron el tercer problema pudieron reconocer que si al juego del parque de diversiones se sube otra persona la velocidad angular mínima no cambia porque ésta no depende de la masa. Es necesario señalar que en esta situación los estudiantes no necesitaron establecer relaciones porque la expresión de la velocidad angular mínima es dada en el enunciado.

Para los estudiantes, reconocer condiciones que caracterizan la situación propuesta en un problema (condiciones de vínculo, condiciones iniciales y condiciones de mínimo y máximo) y expresarlas en lenguaje matemático puede ser una tarea compleja (Dibar Ure, 1995). Se supone que este tipo de dificultades no son exclusivas del movimiento circular ya que no están directamente relacionadas con conceptos involucrados en este tema sino que están presentes en la resolución de problemas en general.

El rol de la experimentación

En este apartado se analizará el rol de la experimentación en la Comisión I, donde fue implementado el EIL. Ya se ha mencionado que la resolución de los problemas no difirió significativamente entre ambas comisiones, sin embargo la utilización de los dispositivos experimentales permitió algunas discusiones que no fueron posibles en la Comisión II.

En la resolución escrita entregada por los grupos apareció una sola referencia a la experimentación. Frente a la pregunta *“Si la calesita empieza a girar cada vez más rápido (es decir, aumenta su velocidad angular) ¿Cuál de los dos chicos desliza primero? Discutir y justificar la respuesta”* los estudiantes señalan que *“por observación, podemos concluir que la persona más alejada del centro (Geraldine) se va a deslizar primero”* Grupo 2 – Comisión I con EIL. Cabe destacar que no es una referencia trivial sobre la experimentación, sino que utilizan lo observado experimentalmente como justificación suficiente en la respuesta. Por otra parte, es apropiado aclarar que los dispositivos permitían responder en forma directa muy pocas preguntas de los problemas.

Los grupos interactuaron de manera diferente con los dispositivos experimentales de cada problema. Respecto del primer dispositivo ningún grupo lo utilizó luego de la demostración realizada por el docente. Todos los grupos utilizaron el dispositivo del problema 2 e interactuaron con el dispositivo del problema 3, incluso aquellos grupos que no llegaron a resolver el problema pidieron utilizar el dispositivo antes de retirarse de la clase.

La experimentación jugó un rol importante en la resolución del problema 1. Ya se ha mencionado que en la resolución de los problemas se evidencia un cambio continuo y no consciente entre marcos de referencia inerciales y no inerciales. Al resolver el problema 1 varios estudiantes sostenían fuertemente que los chicos o las fichas no se movían, sin poder notar la trayectoria circular que describían, es decir, analizaban el problema “parados” en la calesita. Trabajar con el dispositivo experimental permitió que “vieran” que las fichas realizaban una trayectoria circular a pesar de no deslizar sobre el piso sobre el que estaban apoyadas. La experimentación permitió que los estudiantes expresaran sus ideas respecto del movimiento y pudieran debatirlas.

La interacción con el dispositivo experimental del problema 2 permitió generar un debate sobre la idealización. Algunos grupos consultaron respecto del movimiento de la masa 2 (la que cuelga) ya que al experimentar observaban que no sólo subía o bajaba, sino que también realizaba un movimiento pendular o de péndulo cónico, y preguntaban cómo considerar eso en la resolución del problema. Esto fue aprovechado por los docentes (habituales del curso e investigadores) para discutir las diferencias entre la situación ideal planteada en el enunciado del problema y el dispositivo real. Otra inquietud que surgió fue el movimiento oscilatorio que presentaba la masa 1 al llegar al centro del disco antes de detenerse –dado que en la situación real no era una masa puntual sino una esfera-. Esta posibilidad de que los estudiantes pudieran contrastar la situación real con la ideal no hubiera aparecido sin la experimentación. Un grupo intentó explicitar la discusión en sus respuestas, frente a la consigna de describir el movimiento de las masas cuando se sueltan desde el reposo o se le imprime una velocidad a la masa 1, contestaron:

(Soltando el sistema desde el reposo) *"ambas masas describen un movimiento lineal, la masa 1 en dirección horizontal, la masa 2 en dirección vertical ... (cuando se le imprime una velocidad a la masa 1) ideal: la masa 1 realiza un movimiento circular, mientras que la masa 2 describe un movimiento pendular cónico por las irregularidades del sistema. Debería permanecer en equilibrio."* Grupo 5 – Comisión I con EIL.

A pesar de que no todos los grupos llegaron a resolver el problema 3, la interacción con el dispositivo experimental correspondiente pareció resultar significativa porque permitió que los estudiantes observaran experimentalmente que un cuerpo puede "sostenerse" contra una pared sin un piso en el cual apoyarse. En este sentido, la experimentación colaboró con la visualización dado que los estudiantes pudieron ver una situación que no es habitual en la vida cotidiana pero no por ello deja de ser posible.

El movimiento circular en los libros de física

Se realizó un análisis comparativo de 11 libros universitarios de Física recomendados en el programa de Mecánica Clásica. Entre los libros seleccionados algunos tratan el tema de manera conceptual mientras que otros presentan un enfoque analítico, estos últimos suelen ser los más utilizados por los estudiantes. Se analizó cómo es presentado el tema movimiento circular con el objetivo de poder identificar si existe alguna relación entre la presentación del tema y las dificultades que aparecen en el aprendizaje del mismo.

En cuanto a la estructura que los libros con un enfoque analítico (Alonso y Finn, 1999; Gettys et al., 2005; Ingard y Kraushaar, 1984; Sears et al., 2004; Serway y Jewett, 2005, Kittel et al., 1999 y Tipler y Mosca, 2005) el tema suele ser presentado como un subcapítulo dentro del de Aplicaciones de las Leyes de Newton; como excepción se puede mencionar que en el libro de la serie de Berkeley movimiento circular aparece dentro del capítulo introductorio de Vectores. En su mayoría, los libros comienzan refiriéndose a una partícula moviéndose en movimiento circular uniforme y se menciona que su aceleración es centrípeta y está dada por la relación:

$$a_c = \frac{v^2}{r} \quad (1)$$

Esta expresión sólo es citada ya que ha sido obtenida, en capítulos anteriores, a partir de la cinemática. Luego es reemplazada en la segunda ley de Newton con el objetivo de llegar a la expresión de la fuerza resultante en el eje radial:

$$\Sigma F = m \frac{v^2}{r} \quad (2)$$

Suele aclararse que la fuerza centrípeta no es una fuerza de interacción, sino que así se denomina a la fuerza resultante en la dirección radial. Finalmente se resuelven los ejercicios típicos: auto en una curva, curva con peralte, péndulo cónico, etc.

En los otros libros (Arons, 1996; Hecht, 1987; Hewitt, 1999 y Feynman et al., 1998) el tema es tratado conceptualmente. Hewitt (1987) aborda el tema casi sin mencionar ecuaciones y una variedad de ejemplos conceptuales. Hecht (1987) explica desde un contexto histórico y resumidamente, mediante consideraciones geométricas, cómo Newton probó que la segunda Ley de Kepler implica la existencia de una fuerza central. Feynman et al. (1998) deducen brevemente la relación entre la velocidad angular y la velocidad tangencial; el tema aparece incluido brevemente dentro del capítulo "El Oscilador Armónico" donde trabajan la equivalencia entre el movimiento armónico y la proyección del movimiento circular. Arons (1996) sólo menciona la ecuación de fuerza centrípeta sin deducirla y, muy distinto al resto de los libros, aborda el tema haciendo hincapié en la mención de los "preconceptos" que tienen las personas y que dificultan la enseñanza del movimiento circular.

CONCLUSIONES

En cuanto a las dificultades de los estudiantes al resolver los problemas de movimiento circular se pueden señalar ciertas coincidencias con lo encontrado en los libros. Resulta significativo que los libros más utilizados por los estudiantes son aquellos con enfoque analítico, que por lo general presentan el tema de movimiento circular como un subcapítulo en la unidad referida a la dinámica de la partícula donde se pone el énfasis en definir la fuerza centrípeta. Se le asigna entonces un status diferente al movimiento circular dado que al analizar la dinámica de la partícula no se lo trabaja como un movimiento más, sino que recibe un tratamiento especial. Esto probablemente contribuye a la distinción que hacen los estudiantes entre las “Leyes de Newton” y el “Movimiento circular”, también es concordante con la tendencia de asociar el movimiento circular a una fuerza centrípeta primero y luego analizar cuales son las fuerzas de interacción al resolver un problema. Por otro lado, se encuentra que en los libros de texto mencionan la frecuencia angular y la velocidad angular de forma indistinta, lo que podría ser un aporte para la confusión entre los conceptos que se manifiesta en los estudiantes.

Al resolver los problemas, los estudiantes se imaginaban dentro del sistema rotante, por ello les resultó dificultoso desprenderse de la necesidad de agregar una fuerza centrífuga (a la que ellos llamaban centrípeta), las vivencias cotidianas refuerzan dicha necesidad. En este sentido, los libros no parecen contribuir a que los estudiantes piensen los movimientos circulares desde un marco inercial dado que no tratan el tema detalladamente.

En un comienzo, la indagación estuvo focalizada en la resolución de problemas en el contexto de un EIL y al no encontrar diferencias significativas en la resolución de los problemas en ambos contextos se redefinió el objetivo del presente trabajo. Si bien en las resoluciones entregadas las dificultades para comprender el movimiento circular resultan similares, es necesario destacar que en la comisión donde se implementó el EIL surgieron interesantes discusiones a partir de los dispositivos experimentales que no parecerían ser posibles en la otra comisión. La experimentación permitió que los estudiantes visualizaran las situaciones planteadas, expresaran sus ideas sobre el movimiento y discutieran respecto de la idealización. La posibilidad de reproducir el problema experimentalmente permitió que los estudiantes pudieran conectar la situación real con la situación idealizada en el enunciado del problema, como ya hemos comentado al comienzo de este trabajo suele ser dificultoso lograr dicha conexión. Por lo tanto, la utilización cualitativa de dispositivos experimentales claramente relacionados con una situación problemática a resolver parece ser un buen camino para comenzar a crear una conexión entre el mundo real y los problemas abstractos de las clases de física. Por otra parte, genera una oportunidad de interacción en clase que permite que los estudiantes pongan de manifiesto sus ideas y puedan debatirlas, colaborando a superar las dificultades conceptuales y de resolución de problemas.

REFERENCIAS

- Alonso, M. y Finn, E. J. (1999). Dinámica de una partícula. En *Física. Volumen I: Mecánica (pp. 178-182)*, México: Addison Wesley Longman.
- Arias Regalía, D., Chadwick, G., Kenig, F., Montino, M., Pérez, S. M. y Ure, J. E. (2011). Un espacio de interacción libre con el material de laboratorio como apoyo para la comprensión de conceptos y resolución de problemas de movimiento circular. *XVII Reunión Nacional de Educación de la Física*, Editado en CD. Córdoba, octubre de 2011.
- Arons, A. B. (1996). Motion in two dimensions. En *Teachings Introductory Physics (pp. 119-126)*, Canadá: Jhon Wiley & Sons, Inc.
- Carrascosa Alís, J. y Gil Pérez, D. (1992). Concepciones alternativas en mecánica. Dinámica: Las fuerzas como causa del movimiento. Selección de cuestiones elaboradas para su detección y tratamiento. *Enseñanza de las Ciencias*, 10 (3), pp. 314-328.
- Casedellà Reig, J. y Babiloni Matos, L. (1985). La construcción histórica del concepto de fuerza centrípeta en relación con las dificultades de su aprendizaje. *Enseñanza de las Ciencias*, 3 (3), 217-224.
- Dibar Ure, M. C. (1995). Comentarios y un ejemplo sobre la dificultad de aprender a usar la matemática en la modelización. *Propuesta educativa*, 12, 45-47.
- Driver, R., Guesne E. y Tiberghien, A. (1999). *Ideas científicas en la infancia y la adolescencia*. Ediciones Morata, España.
- Escudero, C., González, S. y Jaime, E. (2005). El análisis de conceptos básicos de física en la resolución de problemas como fuente generadora de nuevas perspectivas. Un estudio en dinámica del movimiento circular. *Revista Educación y Pedagogía*, 17(43), 63-78.

- Feynman, R. P., Leighton, R. B. y Sands, M. (1998). El oscilador armónico. En *Física. Volumen I: Mecánica, radiación y calor (1ª Reimpresión en México, pp. 21.3)*, México: Addison Wesley Longman de México S. A.
- Gettys, W. E., Keller, F. J. y Skove, M. J. (2005). Aplicaciones de las leyes de Newton para el movimiento. En *Física para ingenierías y ciencias Volumen I (2ª Ed., pp. 118-121)*, México: Mc Graw Hill.
- Glaser, B. Y Strauss, A. (1999). *The Discovery of Grounded Theory: Strategies for Qualitative Research*. New York: Aldine.
- Hecht, E. (1987). *Física en perspectiva*. Estados Unidos: Addison Wesley Iberoamericana S. A.
- Hewitt, P. G. (1999). Movimiento circular. En *Física conceptual (3ª Ed., pp. 122-135)*, México: Addison Wesley Longman.
- Hodson, D. (1994). Hacia un enfoque más crítico del trabajo de laboratorio. *Enseñanza de las Ciencias*, 12 (3), 299-313.
- Ingard, W. y Kraushaar, W. L. (1984). Ejemplos de fuerzas y movimiento. En *Introducción al estudio de la mecánica, materia y ondas (pp. 135-142)*, Buenos Aires: Editorial Reverté S.A.
- Kittel, C., Knight, W.D., Ruderman, M.A., Helmholz, A.C. y Moyer, B.J. (1999). Vectores. En: *Mecánica (pp. 30-60)*, Barcelona: Reverté
- Montino, M., Petrucci, D., Ure, J. E., Aleman, Ma. A. y Pérez, S. M. (2011). Una propuesta de trabajos prácticos de laboratorio que favorece el aprendizaje de conceptos. *Revista Ciência & Educação*. Volumen 17, Nº 4, 823-833.
- Montino, M., Petrucci, D. y Ure J. (2006). ¿Magia o Física? Los estudiantes universitarios y los trabajos prácticos de laboratorio. *Memorias del 8vo SIEF*. Editado en CD. Gualeguaychú, octubre de 2006. 367-375.
- Perales Palacios, F. J. (1998) La resolución de problemas. *Didáctica de las Ciencias Experimentales*. Vol X (1), Nº 21, 119-144.
- Sears, F. N., Zemansky, M. W., Young, H. D. y Freedman, R. A. (2004). Aplicación de las leyes de Newton. En *Física universitaria volumen 1 (11ª Ed., pp. 181-188)*, México: Pearson Educación.
- Séré, M. G. (2002). La enseñanza en el laboratorio. ¿Qué podemos aprender en términos de conocimiento práctico y de actitudes hacia la ciencia? *Enseñanza de las Ciencias*, 20 (3), 357-368.
- Serway R. A y Jewett Jr., J. W. (2005). Movimiento circular y otras aplicaciones de las leyes de Newton. En *Física para ciencias e ingenierías. Volumen 1 (6ª Ed., pp. 151-158)*, México: Thomson Editores S.A.
- Tipler, P. A. y Mosca, G. (2005). Aplicaciones de las leyes de Newton. En *Física para la ciencia y la tecnología volumen I (5ª Ed., pp. 119-123)*, España: Editorial Reverté S. A.
- White, R. T. (1996). The link between the laboratory and learning. *International Journal of Science Education*, 18 (7), 761-774.

ANEXO I

Encuesta realizada a los estudiantes de Física General

Esta es una encuesta que preparamos para conocer tus impresiones sobre la dificultad de los temas de Física General. Gracias por tu tiempo.

Edad: _____

¿Es la primera vez que cursás la materia? _____

A continuación se listan los temas tratados en Física General:

- MRU
- MRUV
- Movimiento relativo
- Movimiento circular uniforme
- Leyes de Newton
- Rozamiento
- Fuerza elástica
- Plano inclinado
- Movimiento circular
- Trabajo y energía
- Cantidad de movimiento
- Choques

De éstos temas:

- 1- ¿Hay alguno que te haya gustado en especial? ¿cuál? ¿por qué?
- 2- ¿Hay alguno que te haya disgustado en especial? ¿cuál? ¿por qué?
- 3- ¿Cuál es el tema que más te costó entender?
- 4- ¿Hay algo que quieras agregar?

ANEXO II

Problemas y diseños experimentales

Problema 1

Francisco y Geraldine, ambos de 50 kg, están parados en una calesita a 1m y 2m del centro respectivamente. La calesita gira dando una vuelta cada 15 segundos.

- Halle la velocidad angular de la calesita expresada en radianes por segundo (rad/s).
- ¿Quién recorre mayor distancia durante una vuelta completa, Francisco o Geraldine?
- Hallar la velocidad tangencial de Francisco y la de Geraldine.
- Hallar la fuerza de rozamiento estático máximo entre el piso y las zapatillas de cada uno de los chicos si $\mu_e = 0,5$.
- Realizar el diagrama de cuerpo libre para cada uno de los chicos indicando los pares de interacción ¿Cuánto vale la fuerza centrípeta en cada caso? ¿Por qué los chicos giran junto con la calesita en lugar de deslizarse? ¿Cuánto vale la fuerza de rozamiento entre el piso y las zapatillas de cada uno de los chicos?
- Si la calesita empieza a girar cada vez más rápido (es decir, aumenta su velocidad angular) ¿Cuál de los dos chicos desliza primero? Discutir y justificar la respuesta.
- Calcular a qué velocidad angular debe girar la calesita para que deslice Geraldine y para que deslice Francisco.

Dispositivo Experimental Problema 1

Consta de una plataforma giratoria de acrílico, forrada de goma EVA para aumentar su rozamiento, sobre la que se colocan monedas. El dispositivo permite controlar la velocidad angular de la plataforma, de manera tal que al colocar las monedas a diferentes distancias del centro del disco es posible visualizar cuál sale expulsada primero.



Problema 2

Un cuerpo de masa $m_1 = 100$ g está unido al extremo de un hilo sobre una mesa sin rozamiento. La mesa posee un orificio en el centro por donde pasa el hilo (ver figura), y de él cuelga otro cuerpo de masa $m_2 = 200$ g.

a. Si el sistema se suelta desde el reposo, describa el movimiento de ambos cuerpos.

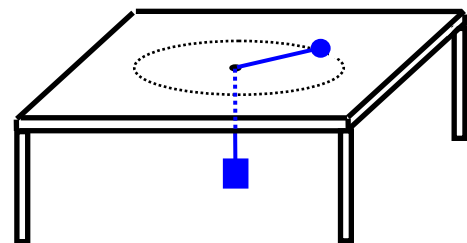
Si ahora mediante un golpe se imprime al cuerpo 1 una velocidad inicial perpendicular al hilo describa qué movimiento realizan las masas cuando:

- la velocidad inicial del cuerpo 1 es grande
- la velocidad inicial del cuerpo 1 es pequeña

b. ¿Cuáles son las fuerzas que actúan sobre el cuerpo 1? ¿Qué fuerzas actúan sobre el cuerpo 2? Realizar el diagrama de cuerpo libre para cada uno de los cuerpos indicando los pares de interacción.

c. Uno de los posibles movimientos del sistema es intermedio entre las situaciones I y II. En este caso el cuerpo 1 gira describiendo un círculo, mientras que el cuerpo 2 no sube ni baja. Para este caso:

- Escribir las ecuaciones de Newton. ¿Qué rol cumple la tensión en el movimiento del cuerpo 1?
- Si el radio de giro del cuerpo 1 es de 30 cm ¿Cuál es la velocidad angular que debe tener para lograr este movimiento?
- Si queremos que el cuerpo 1 describa un círculo de radio mayor que en el caso anterior ¿su velocidad angular deberá ser mayor o menor? Discutir y justificar la respuesta. Calcularla para el caso en que el radio de giro sea de 90 cm.



Dispositivo Experimental Problema 2

Consta de un círculo de acrílico con un pequeño orificio en el centro. A través del orificio cruza un hilo de coser en cuyo extremo superior se ata una esfera de madera y en el extremo inferior otro cuerpo. El dispositivo se fija entre dos mesas de modo que el cuerpo inferior quede colgando.



Problema 3

Un juego de un parque de diversiones se compone de un gran cilindro vertical que gira en torno a su eje. El piso del cilindro puede bajar. El cilindro puede girar lo suficientemente rápido como para que una persona en su interior se soporte contra la pared cuando baja el piso. El coeficiente de fricción estático entre la persona y la pared es μ_e y el radio del cilindro es R .



a) Realizar el diagrama de cuerpo libre para el chico indicando los pares de interacción y escribir las ecuaciones de Newton. ¿Cuál de las fuerzas juega de fuerza centrípeta?

b) Muestre que la velocidad angular mínima de revolución para que la persona no caiga es $\omega = \sqrt{\frac{g}{R\mu_e}}$

c) Si Juan de 40 kg se sube al juego, obtener el valor numérico para ω si $R=4\text{m}$ y $\mu_e=0.4$. Calcular el período T .

d) Si luego se sube el papá de Juan de 80 kg ¿cuál deber ser la frecuencia mínima de revolución?

Dispositivo Experimental Problema 3

Consta de un motor al que se le ha pegado un envase plástico de 1 litro de capacidad; para que el envase no se incline hacia los costados al girar se agregó en su base una plataforma realizada con palitos de helado. Además se utiliza algún cuerpo liviano como una pelotita de telgopor o un cubito de papel que permanece separado del fondo del envase cuando este gira con una velocidad angular suficiente.

