

# “MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN COMPUTACIONAL EN LA ENSEÑANZA Y APRENDIZAJE DE LA FÍSICA”

Claudio Pérez Matzen

Departamento de Física, Universidad Metropolitana de Ciencias de la Educación

## 1. Modelamiento y simulación como estrategias de enseñanza en Física.

El modelamiento y la simulación son dos estrategias de enseñanza de antigua data en la Didáctica de la Física, muy anteriores, por cierto, a la llegada de las computadoras a las aulas, ya que en su esencia ambas estrategias están fuertemente vinculadas a la práctica del conjunto de métodos y técnicas de tratamiento de información designados con la expresión genérica “*método científico*”, y que se puede caracterizar como “*la suma de los principios teóricos, de las reglas de conducta y de las operaciones mentales y manuales que usaron en el pasado y hoy siguen usando los hombres de ciencia para generar nuevos conocimientos científicos*” (1). Desde el momento en que se acepta que la enseñanza de la Física debería incorporar la enseñanza de ese tipo particular de pensamiento y de procedimientos usados por los científicos en su trabajo, el modelamiento y la simulación, pasan a formar parte del repertorio de estrategias docentes posibles de emplear en los distintos niveles del sistema educacional.

En efecto; la formulación o construcción de modelos, es decir, de cuerpos coherentes de ideas que pretenden describir procesos o comportamientos observados en el mundo de los fenómenos físicos, es una de las actividades más distintivas del quehacer de un físico. El modelamiento se entiende entonces como la *elaboración de representaciones de las ideas de un modelo*. Estas representaciones pueden adoptar

distintas formas, algunas concretas como una maqueta o una construcción a escala, y otras - la mayoría de las veces - abstractas, como un conjunto de ecuaciones matemáticas. Aunque estas representaciones son esenciales para comunicar o difundir un modelo, ellas no se deben confundir con el modelo mismo (2).

Los modelos están constituidos por *objetos* empíricos o teóricos, así como por los *procesos* en los que tales objetos participan. Su valor científico se pondera en términos de su capacidad para explicar y predecir fenómenos naturales, y de su utilidad como guía para nuevas investigaciones.

El *modelamiento matemático* es, en esta perspectiva, la construcción de una representación de las ideas o conceptos y procesos de un modelo en lenguaje matemático (3), y se constituye en una de las etapas básicas de todo proceso de *simulación*. La simulación, a su vez, se puede definir como la *operación de la representación de un modelo*, en el sentido de una experimentación orientada a formular predicciones y extraer conclusiones sobre el fenómeno representado.

Si bien los procesos de modelamiento y de simulación, ya sea en un contexto de investigación científica o en uno de enseñanza de ciencia, se pueden practicar en muchos casos sin recursos informáticos, no cabe duda de que los notables y acelerados avances en desarrollo de hardware y software computacional han contribuido a la

revalorización del potencial educativo de dichas estrategias, tanto en el caso de la Física como en la enseñanza de las ciencias en general. Entre los factores que han influido en esta situación se pueden mencionar las crecientes capacidades de procesamiento numérico, de representación gráfica y de interacción con el usuario que ofrecen las computadoras, todo ello unido a la simplificación de la interfaz usuario-máquina y a la significativa reducción en los costos del hardware y software informático.

Pero se debe considerar también la gran oportunidad que el propio sistema educacional está ofreciendo desde hace algunos años a los profesores de ciencias, para poner a prueba la efectividad de los nuevos recursos tecnológicos de apoyo a la enseñanza en el contexto de la reforma, con su insistencia en la necesidad de propiciar el aprendizaje significativo y de otorgar mayor protagonismo a los alumnos en la construcción de sus conocimientos. Las estrategias de modelamiento y simulación, tremendamente potenciadas con el apoyo de la Informática, pueden jugar un importante papel en los nuevos escenarios educativos, tanto como facilitadoras de la enseñanza del profesor como estimuladoras del aprendizaje significativo de los alumnos.

En el Departamento de Física de la UMCE se han incorporado en los últimos 3 años recursos de modelamiento y simulación computacional, y se está iniciando una línea de trabajo en torno a la clarificación de las fortalezas y debilidades de este tipo de estrategias para el mejoramiento del aprendizaje en la formación inicial de docentes de esta especialidad.

## 2. Software de Modelamiento y simulación para enseñanza de la Física.

Existe hoy en día una variada oferta de programas informáticos de modelamiento y

simulación, tanto de tipo comercial como de dominio público (freeware). Entre los de tipo comercial uno de los más difundidos es "Interactive Physics" (4), que permite desarrollar la simulación de sistemas dinámicos mediante la manipulación de objetos virtuales en un entorno gráfico interactivo y con animación. Entre los de dominio público se pueden mencionar "Modellus" (5), el curso "Física con Ordenador" (6) y "Easy Java Simulations" (7), sobre los cuales se centra la atención de este trabajo.

"Modellus", creado por el Dr. Vitor Duarte Teodoro y un equipo de colaboradores de la Facultad de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nueva de Lisboa, Portugal (8), es fruto de los esfuerzos de investigación y desarrollo acerca del empleo de computadoras para modelar y simular procesos en ciencias y en matemática, iniciado en la década de los 80. Sus autores lo consideran como *"una herramienta computacional que permite a estudiantes y profesores realizar experimentos conceptuales usando modelos matemáticos expresados como funciones, derivadas, tasas de cambio, ecuaciones diferenciales y ecuaciones de diferencias"* (5).

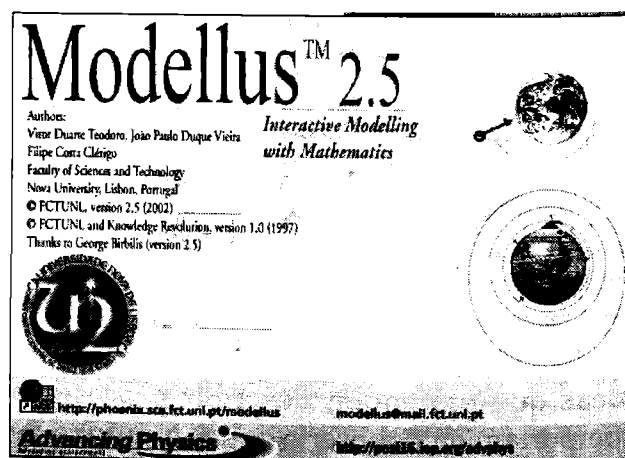


Fig.1: Ventana de identificación de Modellus 2.5.

Este software, disponible en la actualidad como freeware en su versión 2.5 en español, se puede considerar como un micromundo basado en una metáfora de no-programación, es decir, que no requiere que el usuario aprenda un nuevo lenguaje para programar instrucciones para interactuar con el software. Proporciona una ventana en la que el usuario puede introducir, tal como lo haría sobre un papel, las expresiones matemáticas de representación de un modelo (por lo general, un modelo del tipo *sistema dinámico*, en el cual se pueden establecer relaciones matemáticas entre magnitudes físicas y el tiempo, considerado como variable independiente). Por ejemplo, la Fig. 2 muestra el contenido de la ventana con la representación matemática del modelo de la superposición de dos movimientos oscilatorios armónicos simples en el plano:

Fig. 2: Ventana Modelo con ecuaciones de la superposición de 2 oscilaciones simples perpendiculares.

$$x = Ax \times \cos(\omega x \times t + \phi x)$$

$$y = Ay \times \sin(\omega y \times t + \phi y)$$

$$v_x = \frac{dx}{dt}$$

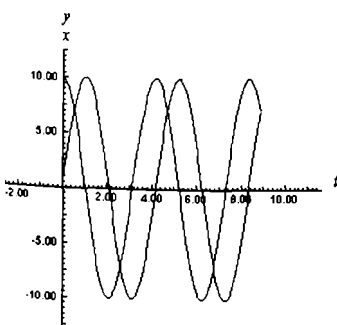
$$v_y = \frac{dy}{dt}$$

$$v = \sqrt{(v_x^2 + v_y^2)}$$

$$a_x = \frac{dv_x}{dt}$$

$$a_y = \frac{dv_y}{dt}$$

El modelo en estudio se puede trabajar con diferentes formas de representación: analítica (por medio de ecuaciones, como en la Fig. 2), gráfica (Fig. 3, donde se muestra la variación de las elongaciones de cada oscilación en el tiempo) y analógica (Fig. 4, donde se aprecian, además de la trayectoria resultante, los valores instantáneos de varias de las magnitudes físicas del modelo, como



las amplitudes y frecuencias de cada oscilación).

Fig.3: Ventana de gráficos de elongaciones horizontal y vertical en función del tiempo.

La disponibilidad de representaciones alternativas de la información es un atributo muy apreciado de Modellus, ya que está de acuerdo con una de las prescripciones de las teorías sobre aprendizaje significativo, particularmente en relación con el manejo de abstracciones.

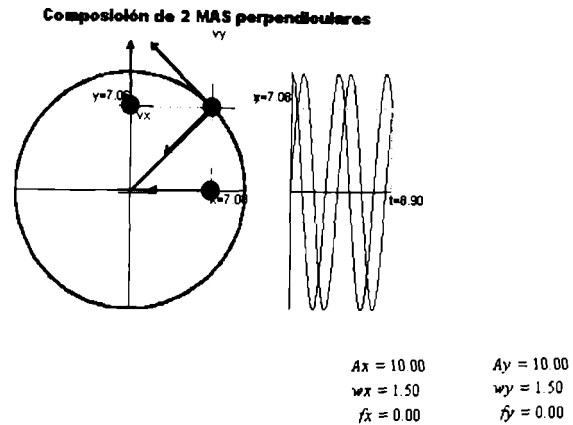


Fig. 4: Ventana de animación, incluyendo medidores digitales para 6 magnitudes del modelo.

En particular, la representación de animaciones es otra prestación muy apreciada de Modellus para la enseñanza y aprendizaje de la Física, ya que permite visualizar movimientos prescritos por la representación analítica del modelo en estudio, pudiéndose modificar la escala de tiempo, hacer pausas y avanzar o retroceder a voluntad en la animación para observar estados y valores particulares de las magnitudes físicas. Realizando cambios en uno o más de los parámetros del sistema, se pueden observar de inmediato los efectos en los gráficos, animaciones y valores de los medidores digitales (Fig. 5).

Si bien las representaciones analógicas (gráficos y animaciones) en Modellus son más bien simples desde el punto de vista estético, en comparación con Interactive Physics u otros softwares de simulación, este programa tiene, en cambio, ventajas como su facilidad de uso gracias a su interfaz sencilla e intuitiva. Al requerir, para la elaboración de la representación analítica de un modelo, que el usuario

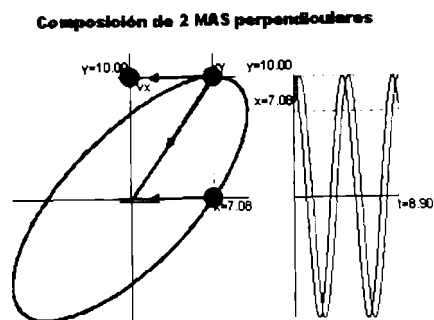


Fig. 5: Modificación de representaciones del modelo por cambio de valores de parámetros

$A_x = 10.00$	$A_y = 10.00$
$\omega_x = 1.50$	$\omega_y = 1.50$
$f_x = 0.00$	$f_y = 0.79$

proporcione las ecuaciones pertinentes, este software posee el potencial para elevar el nivel de los procesos cognitivos (formulación de conceptos, establecimiento de relaciones, etc.), para estimular a los alumnos a definir en forma precisa sus ideas acerca de un modelo, y para proveer oportunidades para poner a prueba la representación construida, detectando y corrigiendo posibles inconsistencias (5).

Para sus autores, dos características esenciales de Modellus son la *representación múltiple* (mencionada anteriormente) y la *manipulación directa* de objetos matemáticos. El usuario puede manipular directamente, sin necesidad de programar, objetos que se presentan en la pantalla del monitor. Estos elementos tienen el carácter de *objetos concreto-abstractos*, por cuanto son manipulables por el usuario no obstante tratarse de representaciones de constructos matemáticos. Estas características del software lo tornan especialmente atractivo para trabajar en la erradicación de preconceptos en la enseñanza de la Física, en línea con los enfoques constructivistas contemporáneos.

Por otra parte, entre los recursos disponibles gratuitamente en Internet para la enseñanza de la Física apoyada con simulaciones computacionales, destaca el completísimo trabajo del Dr. Angel Franco García, de la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Indus-

trial de Eibar, Universidad del País Vasco, con su curso "Física con Ordenador" (6).

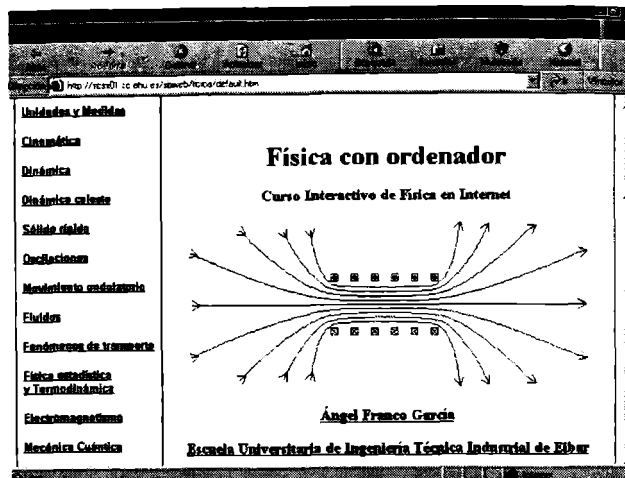


Fig. 6: Página inicial del curso "Física con Ordenador".

El Dr. Franco comenzó a desarrollar su curso interactivo de Física en Internet en 1998, y desde entonces no ha cesado en su permanente actualización, mediante la programación en lenguaje Java para desarrollar applets insertados en las páginas web del curso, y complementados con detalladas y muy claras explicaciones de la teoría e instrucciones de uso para sus destinatarios, profesores y estudiantes de Física a nivel de la educación superior.

El curso "Física con Ordenador" proporciona síntesis teóricas y simulaciones interactivas para una gran variedad de temas de Física, desde la Metrología y la Mecánica de la Partícula hasta la Dinámica Celeste, la Física Estadística y la Mecánica Cuántica, contando a la fecha más de 300 applets Java de simulaciones. En cada caso, el usuario puede repasar la teoría y después simular procesos o realizar experimentos simulados, interactuando con los applets por la vía de la modificación de valores de los parámetros de las representaciones analíticas de los respectivos modelos.

Se trata en este caso de utilizar el material elaborado por el autor, quien ha realizado la programación de cada uno de los applets en len-

guaje Java, para luego integrarlos en sus respectivas páginas web con las síntesis teóricas y guías de uso. La interacción con el usuario ocurre, como se indicó anteriormente, por medio de la modificación de los valores de los parámetros de los applets y la observación de los resultados al poner a operar las simulaciones. Por ejemplo, las Figs. 7 y 8 muestran una de las imágenes estáticas de la síntesis teórica sobre osciladores acoplados y la ventana de la simulación correspondiente.

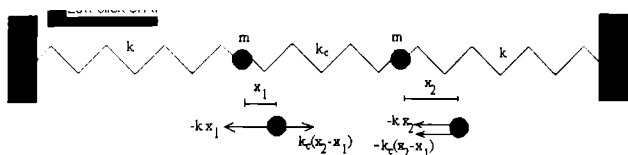


Fig. 7: Representación gráfica estática de 2 osciladores acoplados.

En la ventana de la simulación (Fig. 8) el usuario puede observar una animación de los osciladores acoplados, la que obedece a los valores de los parámetros incluidos en las celdas de la parte inferior, los que se pueden modificar a voluntad. Es muy importante constatar que la construcción de la representación analítica (matemática) del modelo del fenómeno ha sido realizada por el autor del curso. Si el usuario quisiera construir su propia representación analítica, para luego elaborar el applet de la simulación, tendría que aprender programación en lenguaje Java. Para tal eventualidad, el autor ha incluido en su sitio web un curso de lenguaje Java y de procedimientos numéricos en dicho lenguaje.

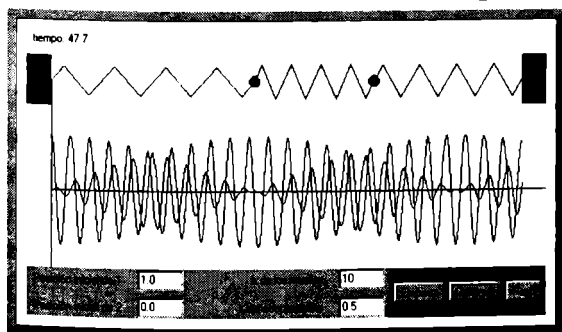


Fig. 8: Ventana de la simulación de los 2 osciladores acoplados (applet).

Las motivaciones del Dr. Franco para el desarrollo de su curso interactivo en Internet incluyen el aprovechamiento del potencial de las nuevas tecnologías de la información y de la comunicación (NTIC) para la enseñanza y aprendizaje de conceptos abstractos, permitiendo el estudio al ritmo de cada quien, la navegación según las necesidades individuales gracias a la estructura hipertextual de la información y la realización de tareas o actividades de aprendizaje con los applets de las simulaciones, más allá de la mera visualización pasiva de las animaciones.

El autor ha prestado especial atención a los temas considerados más difíciles en los cursos de Física de pregrado; a la resolución de problemas clásicos de los textos y a la simulación de experimentos también clásicos, pero que suelen ser muy difíciles de implementar en el laboratorio por requerir de materiales de los que no siempre se dispone para la docencia. El propósito del autor no es el de sustituir la clase presencial del docente ni el laboratorio de Física, sino más bien complementarlos combinando eficazmente esas estrategias con los recursos tecnológicos que se pueden disponibilizar a través de las redes informáticas.

En una comparación de las dos herramientas informáticas mencionadas, se puede ver que el curso "Física con Ordenador" entrega al usuario un gran volumen de información sobre una amplia variedad de contenidos de Física, con guías para el desarrollo de actividades de aprendizaje apoyadas por los applets interactivos que constituyen las simulaciones, todo ello en un ambiente integrado y utilizable tanto en modalidad online como off-line (se puede descargar el curso completo y sin ningún costo). El curso está concebido como un complemento de las clases presenciales y trabajos de laboratorio, y el contenido de sus páginas web y de las simulaciones no puede ser modificado por el usuario, el cual tampoco encuentra en el curso

mismo herramientas para generar en forma sencilla y rápida sus propios applets. En todo caso, un usuario interesado en crear sus propias simulaciones a partir del material de este curso, puede estudiar el lenguaje de programación Java y llegar finalmente a producir sus applets y a generar sus propias páginas web de contenido empleando cualquier editor de páginas web.

Por su parte, Modellus – si bien proporciona acceso a gran cantidad de muestras (samples) de representaciones de modelos de muchos temas de Física en su sitio web (aunque sin mayor información teórica) – apunta más bien a su uso como *herramienta de autoría*, es decir, como recurso para la creación de representaciones de modelos por sus usuarios, sean estos profesores o estudiantes. Y es en este aspecto donde radica una de sus mayores fortalezas, al desafiar al usuario para la formulación precisa de la representación analítica del modelo, para la selección de adecuadas condiciones iniciales y valores de parámetros y para la construcción de formas analógicas o digitales de visualización que faciliten la comprensión y la predicción, todo ello sin necesidad de programación computacional y con herramientas sencillas en un entorno gráfico modesto pero funcional. En este contexto cabe destacar la posibilidad de entregar a Modellus los datos experimentales que se pueden obtener con sensores en tiempo real, o que se pueden extraer de fotografías estroboscópicas o de videos de experimentos, para representarlos gráficamente y luego construir una representación analítica que se ajuste a la información e ilumine la formulación de un modelo compatible con el experimento.

Ahora bien, a medio camino entre herramientas como Modellus y como el curso “Física con Ordenador”, han surgido en el último tiempo algunos programas que permiten construir simulaciones interactivas en forma de applets Java con un mínimo de

programación, pero requiriendo del usuario el trabajo reflexivo de construcción de la representación analítica del modelo respectivo, todo ello en un entorno de autoría con una interfaz gráfica orientada a objetos. Un excelente ejemplo de este tipo de herramientas es el software “Easy Java Simulations” (Ejs), producido por el Dr. Francisco Esquembre, de la Universidad de Murcia (7), disponible como freeware pero íntegramente en inglés.

### 3. Experiencia en uso de “Modellus” y del Curso “Física con Ordenador” en el Dpto. de Física de la UMCE.

Tanto “Modellus” como el curso “Física con Ordenador” se han integrado gradualmente como recursos de apoyo a la enseñanza y al aprendizaje en la Facultad de Ciencias Básicas de la UMCE, y en particular en su Departamento de Física, desde hace un par de años. Los Dres. Vitor Duarte Teodoro y Angel Franco García han sido ilustres visitantes de la universidad en el contexto del Proyecto de Fortalecimiento de la Formación Inicial Docente, contribuyendo eficazmente a la difusión del potencial didáctico de estas herramientas tecnológicas entre los académicos y estudiantes del Departamento.

La versión freeware 2.1 de Modellus en inglés se ha utilizado principalmente en cursos de Mecánica, de Introducción a la Física Nuclear y de Ondas y Acústica de la carrera de Licenciatura en Enseñanza de la Física y Pedagogía en Física y Ciencias Naturales, para la enseñanza y el aprendizaje de conceptos de esas materias. También se lo ha incorporado en los cursos de Didáctica de la Física y en el Taller Didáctico Multimedial, donde se busca ampliar el repertorio de estrategias metodológicas y de recursos didácticos para la enseñanza de la Física en educación media.

El autor de este trabajo, en conjunto con su colega Tatiana Urzúa, recurrieron

intensivamente a Modellus durante el desarrollo del curso de Ondas y Acústica en su versión del primer semestre del presente año, en especial para el estudio de las oscilaciones armónicas unidimensionales, paralelamente con otras herramientas tecnológicas tales como "Interactive Physics" (4) y "Data Studio" (9), tratando de ayudar a los estudiantes a descubrir por sí mismos las fortalezas y debilidades de cada software tanto desde la perspectiva del que aprende como desde la del que enseña con apoyo de las NTIC. La facilidad de uso de Modellus permitió generalizar su aprendizaje en el curso y emplearlo incluso para desarrollar varios de los ítem de evaluación de la unidad de oscilaciones.

A su vez, el curso "Física con Ordenador" es ya un recurso conocido y frecuentado por muchos de los docentes y alumnos de la carrera, quienes han ido apreciando su utilidad para complementar los contenidos de las clases y de los textos, así como para simular experimentos, en materias como Mecánica, Electromagnetismo, Ondas y Acústica y Física Moderna. También se lo ha incorporado a las asignaturas de Didáctica de la Física y de Taller Didáctico Multimedial, e incluso varios de sus applets han ayudado a alumnos practicantes a clarificar conceptos frente a sus cursos en la educación media.

Modellus y Física con Ordenador se han convertido, además, en excelentes complementos de otro poderoso recurso tecnológico con que cuentan los profesores y estudiantes de la Facultad de Ciencias Básicas, que consiste en un Aula Interactiva dotada de equipamiento analógico y digital para adquisición de datos en tiempo real por medio de interfases y sensores, y para el procesamiento inmediato de la información con el software "Data Studio". Es justo decir, incluso, que las facilidades informáticas disponibles en el Aula Interactiva (computadoras multimedia con acceso a

Internet y a la Intranet de la universidad), han facilitado grandemente la familiarización de los docentes y del alumnado con todos los programas computacionales mencionados.

#### 4. Reflexiones y propuestas.

El modelamiento y la simulación, estrategias potenciadas ahora tremendamente con los recursos de las NTIC, parecen llamadas a asentarse con "equilibrio estable" en el terreno de la didáctica de la Física, y cada día crece la cantidad de herramientas de este tipo en la gigantesca red de redes que es Internet, muchas de ellas accesibles en forma totalmente gratuita. Como se ha intentado describir en las secciones precedentes, estas herramientas parecen poseer con creces el potencial para concretar muchas de las prescripciones del aprendizaje significativo en contextos constructivistas tan en boga hoy en día en el mundo de la educación, en particular en la enseñanza de las ciencias.

Pero hay todavía muchas incógnitas que despejar, como por ejemplo: ¿podrán estas herramientas ayudar a docentes y estudiantes a sortear eficazmente los múltiples obstáculos que enfrenta a diario la enseñanza en el sistema educacional, donde subsisten limitaciones de tiempo para dedicar al aprendizaje significativo y de recursos para la práctica del constructivismo?; ¿podrán ayudar a abrir paso a la innovación metodológica en la formación inicial de docentes de ciencias?; ¿será igual el potencial de estas herramientas realizable o convertible en aprendizaje significativo de la Física en todo tipo de estudiantes?; ¿podremos desarrollar un modelo eficiente de selección de recursos didácticos tecnológicos, que considere adecuadamente las distintas variables de los procesos de la enseñanza y del aprendizaje?; ¿cómo se puede optimizar cada una de las modalidades posibles de uso didáctico de estas herramientas, tanto por separado como en su integración sinérgica?. En fin, son

muchas las interrogantes que se presentan en el camino del profesor de Física frente a este repertorio de recursos en constante expansión, y que requieren respuestas fundadas en la investigación.

Es necesario sistematizar experiencias y validar constructos teóricos que subyacen al desarrollo de estas nuevas herramientas. Para ello nada mejor que la investigación y la cooperación entre los practicantes de estas artes y afanes, recurriendo a las facilidades que entregan las redes de información y comunicación, y aprovechando la extraordinaria disposición al trabajo colaborativo de autores como Vitor Duarte, Angel Franco, Francisco Esquembre y muchos otros en distintos países, más cercanos ahora en el mundo virtual, donde las barreras de distancia y tiempo se han desvanecido.

## Referencias

- (1) Pérez Tamayo, R. (1998). "Existe el método científico?". Colección Ciencia para Todos. Fondo de Cultura Económica, México. Disponible en <http://lectura.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/161/htm/metodo.htm>
- (2) Cartier, N.; Rudolph, J.; Stewart, J. (2001). "The nature and structure of scientific models". The national Center for Improving Student Learning and Achievement in Mathematics and Science. Wisconsin Center for Education Research. Madison.
- (3) Salett, M; Hein, N. (2000). "Modelagem matemática no ensino". Editora Contexto, Sao Paulo.
- (4) MSC Software. Education Group. California. Sitio web en español: <http://www.interactivephysics.com/spanish/home.html>
- (5) Teodoro, Vitor Duarte. (1998). From formulae to conceptual experiments: interactive modelling in the physical sciences and in mathematics. International CoLos Conference New Network-Based Media in education. Maribor, Slovenia. Sitio web: <http://phoenix.sce.fct.unl.pt/modellus/>
- (6) Franco, A. (1998-2002). "Física con ordenador". Curso interactivo de Física en Internet: <http://scsx01.sc.ehu.es/sbweb/fisica/>
- (7) Esquembre, F. (2002). "Easy Java Simulations": <http://fem.um.es/Ejs/>
- (8) Teodoro, V. D.; Vieira, J. P.; Clerigo, F. C. (1997). "Modellus. Interactive modelling with mathematics". San Mateo, CA: Knowledge Revolution.
- (9) Pasco Scientific, Roseville CA, USA. Sitio web en español: [http://www2.pasco.com/spanish2/home\\_2.html](http://www2.pasco.com/spanish2/home_2.html)  
Santiago; diciembre de 2002.-