



ACADEMIA DE CIENCIAS
DE LA
REGIÓN DE MURCIA

EL ORDENADOR EN LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA

Discurso del Académico Numerario
Ilmo. Sr. D. Ernesto Martín Rodríguez
leído en la Sesión Solemne de Apertura de Curso
el día 10 de febrero de 2005

Murcia
2005

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (arts. 270 y ss. del Código Penal).

© Academia de Ciencias de la Región de Murcia, 2005
© Ernesto Martín Rodríguez

I.S.B.N.: 84-609-3903-0

Depósito Legal: MU-22-2005

Imprime: Compobell S.L., Murcia

Contenido

El Año Internacional de la Física (WYP 2005)	6
Propuestas de temas para actividades	7
La enseñanza de la Física (y campos afines)	8
Contradicciones	10
Enseñanza de las Ciencias en los niveles preuniversitarios....	11
Aspectos pedagógicos (conceptos vs. fórmulas).....	13
Modelos y simulaciones	15
El grupo CoLoS y la enseñanza de la Física	19
Herramientas desarrolladas para la enseñanza de la Física	29
Aplicación: moléculas diatómicas.....	32
Curso sobre Ondas	34
Micromundos: El xyZET	36
Laboratorios remotos	39
Entorno de aprendizaje: Colab.....	42
Los fislets.....	45
Herramientas de Autor: Modellus y Ejs	48
Modellus	48
Ejs: Easy Java Simulations	50
Conclusiones	54
Referencias.....	56

Excmas. e Ilmas. Autoridades,
Ilmos. Sres. Académicos,
Señoras y Señores:

Es para mí un gran honor, a la vez que un placer y un compromiso, el deber que me toca, más por edad que por mérito, de dar la Lección Inaugural de Curso de la Academia de Ciencias de esta Región de Murcia.

Esta Lección va a versar, como su título indica, sobre la utilización de los ordenadores en la enseñanza de la Física. Y quiero encuadrar este tema dentro de las actividades que muchas organizaciones científicas están haciendo para conmemorar el año 2005 como Año Internacional de la Física.

En esta exposición intentaré hacer un recorrido por aspectos relacionados con la enseñanza y aprendizaje de la Física, aspectos que son muy comunes a otras materias científicas, revisando de paso algunas de las contribuciones que, en este campo, ha hecho nuestro grupo de investigación. Y aprovecho esta ocasión para agradecer sinceramente a todos sus miembros, así como a los de los equipos colaboradores en los diferentes proyectos que sobre este tema hemos desarrollado, su constancia y dedicación, que han sido claves para la consecución de muchos de los avances y logros que en este campo hemos conseguido.

Mi agradecimiento, también, a todos los que de una forma u otra han contribuido a mi formación, entre los que incluyo a los compañeros del Departamento de Física y de la Facultad de Químicas en donde vivimos.

Finalmente, también deseo agradecer a los miembros de la Academia por su apoyo y por su acogida como compañero.

El Año Internacional de la Física (WYP 2005)

El 10 de junio de 2004, la Organización de las Naciones Unidas declaró este año 2005 como el Año Internacional de la Física [1].

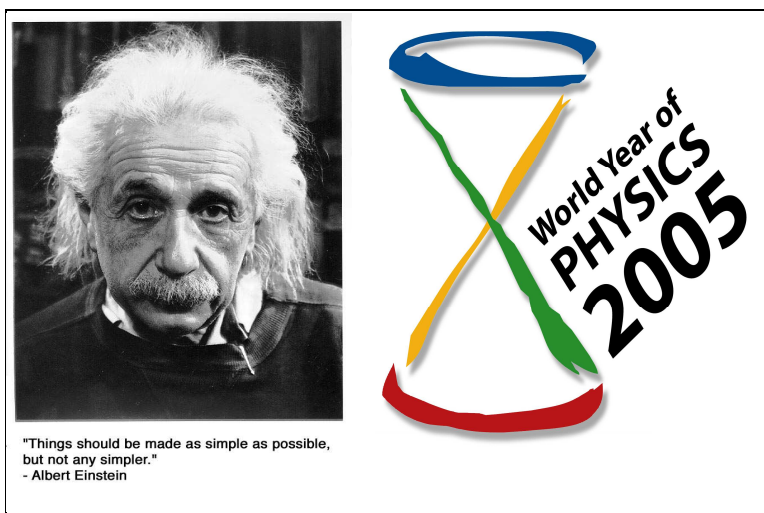


Figura 1. Einstein y el 2005 como Año Internacional de la Física.

Esta elección ha sido realizada en recuerdo de 1905, el *año de los milagros* de Einstein [2], cuando éste publicó, en menos de cuatro meses, cinco trabajos que marcaron la evolución de la Física moderna, echando por tierra diversas concepciones clásicas muy queridas y arraigadas. Hay que remontarse a Newton para encontrar un hecho semejante; tal densidad de producción científica, de tal nivel y en tan corto tiempo, no se ha dado en ninguna otra ocasión.

Los trabajos citados anteriormente trataron:

- Sobre el efecto fotoeléctrico. Ganó el Nobel (1921) por este trabajo. Introdujo la idea –complementaria a la ondulatoria– de que la energía electromagnética era

transportada en forma discontinua (por los que más adelante se llamaron fotones). Sus teorías, desarrolladas y adecuadamente elaboradas, formaron parte significativa de la fundamentación de la Mecánica Cuántica.

- Sobre la determinación de dimensiones moleculares, que también constituyó su tesis doctoral. Sigue siendo uno de sus trabajos más citados y describe, por ejemplo, cómo determinar –a partir de mediciones de presión osmótica y coeficientes de difusión– el tamaño de iones en disolución y el número de Avogadro.
- Sobre aspectos estadísticos de la teoría molecular y del movimiento browniano. Se dio en este trabajo evidencia convincente de la realidad de los átomos así como una estimación de su tamaño.
- Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento. Trabajo en que se sentaron las bases de la Relatividad.
- Sobre la relación entre la inercia de los cuerpos y su contenido energético, relación que ha quedado resumida en su célebre $E=mc^2$.

2005 es el centenario de dicho año de los milagros de Einstein y, también, el cincuentenario de su fallecimiento.

Propuestas de temas para actividades

Entre las propuestas efectuadas por diferentes organizaciones internacionales, relativas a los ejes principales por los que se deben mover las diversas actividades que se propongan durante el 2005, destacamos las dos siguientes:

- Promover la comprensión pública de la Física y de las Ciencias Físicas.
- La Física en la educación y la enseñanza de la Física.

Estas propuestas dan idea de la importancia que se da actualmente a, por una parte, la difusión al público en general de lo que es la Física y de cómo repercute en nuestra vida cotidiana y, por otra, a la enseñanza de la Física para hacerla

más atractiva y poder introducirla en la forma más eficiente posible.

Esta lección, como ya hemos comentado, va dirigida principalmente a describir algunos de los esfuerzos que se han encaminado justo hacia cómo mejorar la enseñanza de las Ciencias e Ingeniería en general y de la Física en particular, a través de la utilización de las nuevas Tecnologías de la Información y de las Comunicaciones (TICs), o, concretando más, a través del uso del Ordenador y de Internet.

La enseñanza de la Física (y campos afines)

En este apartado hacemos una breve descripción de algunos de los problemas que tiene la enseñanza de la Física, tanto desde un punto de vista externo (indicadores de la situación) como de fondo (aspectos pedagógicos), para pasar posteriormente a revisar algunas propuestas que estimamos pueden contribuir a resolverlos.

Hay claros síntomas de que algo va mal con los estudios de tipo científico en general y en particular con los de Física. Sin necesidad de detallar encuestas e informes que lo señalan, como el reciente Informe Pisa [3] o los informes TIMSS [4], fácilmente se observa lo siguiente:

- El número de estudiantes en las carreras de Ciencias ha ido cayendo sensiblemente durante las últimas décadas.
- La Física, al igual que las Matemáticas, constituyen disciplinas caracterizadas por un amplio rechazo por parte de los estudiantes de enseñanzas pre-universitarias. (En parte por su dificultad y poco atractivo y en parte porque no se conoce la repercusión social que han tenido en el desarrollo de nuestra civilización y tecnología actual. También, por el poco aprecio social que tienen los trabajadores en dichos campos).

- Los aspectos anteriores, bajo número de estudiantes y rechazo de materias de Ciencias y de Tecnología, son más acusados aún entre las mujeres. Actualmente son varios los países preocupados por el citado problema y están haciendo grandes esfuerzos para atraer a las mujeres a los estudios de Ciencias e Ingeniería.
- Los resultados que obtienen nuestros estudiantes en diferentes concursos y exámenes internacionales muestran una clara situación negativa de su formación, comparada con la de estudiantes de otros países.
- Finalmente, citaré con preocupación el desánimo que se observa a nivel general entre el profesorado de Enseñanzas Medias, desánimo que, en última instancia, proviene de una imposibilidad material de lograr sus objetivos como enseñantes.

Y con estos problemas no ocurre como, por ejemplo, con la economía de un país, campo en que determinadas acciones pueden dar resultados en plazos relativamente cortos de meses o pocos años. Se precisan décadas de esfuerzo -recuérdese que el período lectivo de un estudiante es de más de 15 años, con 100% de escolarización entre 3 y 15 años- para lograr cambios significativos que afecten a la formación y número de nuestros científicos e ingenieros. Son necesarios compromisos económicos y análisis de muy larga duración para cubrir objetivos en este campo, pues la maquinaria educativa tiene una gran inercia al cambio.

Diseñar y construir un entramado educativo nuevo, formando adecuadamente al profesorado y proporcionando los medios precisos para desarrollarlo no es tarea fácil. No obstante, estimamos que una utilización adecuada de la tecnología hoy disponible puede ayudar a conseguir mejoras significativas en plazos no muy largos.

Pero, por qué hablamos de la enseñanza de la Física como si fuera algo que precisa especial atención. A pesar de su permanente conexión con los fenómenos reales que ocurren en la Naturaleza —o quizá por ello- la Física tiene un carácter abstracto que hace de su estudio algo especial. Fijémonos en

las Leyes de Newton, por ejemplo; su enunciado puede ponerse en mitad de una cuartilla y nos sobraría espacio. Y, sin embargo, dichas Leyes contienen toda la información necesaria para desarrollar un campo tan extenso como es la Mecánica. Son el *modelo* de su funcionamiento, la representación abstracta de cómo opera la Naturaleza en lo que a fenómenos relativos al movimiento se refiere. Yo, personalmente, estudié Física pues no comprendía cómo algo tan aparentemente sencillo me fuera tan críptico y difícil de entender (especialmente la 3ª. Ley). Después resultó que realmente no me las habían explicado adecuadamente, pero todavía sigo aprendiendo de las Leyes de Newton.

Contradicciones

La situación actual de la Ciencia en España es ciertamente paradójica. Por una parte, como ya hemos dicho, la Ciencia no se muestra como un campo suficientemente atractivo como para estimular a nuestra juventud a seguirlo. Por otra parte observamos un desarrollo de la investigación científica en nuestro país cada vez mayor, de forma que, en determinados campos, los grupos de investigación españoles tienen cada vez un reconocimiento mayor y sus publicaciones - medida objetiva de su actividad- muestran una tendencia claramente alcista tanto en número como en calidad. No obstante, son numerosos los investigadores de excelencia que manifiestan repetidamente el peligro en que se encuentra el futuro de su trabajo por falta de recursos adecuados. Al mismo tiempo que observamos este panorama, vemos como una gran parte de nuestros científicos están desarrollando su labor en el extranjero y tienen enormes dificultades para reinsertarse en nuestro país.

Adicionalmente, también contrasta la indiferencia de nuestra sociedad ante el mundo científico con la proliferación de espacios de carácter científico en los medios de comunicación –nunca suficientes ni suficientemente bien diseñados- y con la multitud de ferias científicas y de museos dedicados a la ciencia que actualmente existen. Finalmente, es signo de mala salud para nuestra actividad científica y

tecnológica, la preocupación claramente insuficiente que nuestras empresas tienen por el desarrollo de la investigación.

Realmente nos movemos en un mundo de contradicciones cuyo análisis aportaría mucho beneficio al futuro de nuestro país. Uno de los problemas para este análisis es la inercia al cambio del sistema educativo, citada anteriormente, que no permite hacer una conexión directa entre la situación actual de la investigación en Ciencias con el estado presente de la educación en dicho campo. Esto puede dar lugar a una relajación de nuestras actuaciones en mejora de la calidad de la enseñanza, subestimando la importancia que ello tiene para el futuro de nuestra sociedad.

Enseñanza de las Ciencias en los niveles preuniversitarios

Desde el punto de vista educativo, tres son los campos en que podemos dividir la enseñanza de la Física y de la Ciencia en general: la Enseñanza Primaria (Infantil y Primaria), la Secundaria (ESO, Bachillerato y FP) y la Superior o Universitaria. Podría añadirse un campo extra relacionado con la formación cultural de carácter científico de la sociedad en general, pero creo que está relacionado íntimamente con los anteriores y con lo anteriormente expuesto. Y de los tres campos citados, considero que los dos primeros constituyen el punto clave donde cualquier actuación puede rendir globalmente los mayores beneficios.

Algo ocurre en la Enseñanza Primaria que hace, como decía Carl Sagan, que nuestros niños, científicos por excelencia y capaces de realizar preguntas sobre la Naturaleza de una profundidad señalada, lleguen a la Enseñanza Secundaria perdiendo totalmente esa curiosidad y mostrando una clara indiferencia. Hay dignas excepciones, pero una situación común es que nuestros niños estén en la escuela como medio de entretenimiento para liberar a las familias de su cuidado. Los niños muestran, entre otras características, una imaginación que debería ser aprovechada mejor por el sistema educativo.

Por su parte, tampoco va mejor la Enseñanza Secundaria en los Institutos, o al menos es ése el sentir general de todos los que recibimos a sus alumnos cuando ingresan en la Universidad y observamos su falta de formación –sensación compartida por sus propios profesores. Quizá, en lo que a las materias de ciencia se refiere, la culpa esté en una dispersión de contenidos y en un exceso de enseñanzas teóricas, no acompañadas por la práctica precisa, que hace que dichas materias fomenten más la memorización correspondiente que la profundización en las bases conceptuales y fenomenológicas de dichas materias. A todo lo anterior se une el diseño de los currículos, que permiten que un estudiante pueda pasar por la Enseñanza Secundaria sin prácticamente haber cursado materias de Ciencias. ¿Es posible llegar a estudiar una carrera de Física sin haber cursado las necesarias asignaturas preliminares de Física y Matemáticas?

Parte del problema que estamos tratando, extensible a las Enseñanzas Universitarias, está en la masificación. No cabe duda de que hoy en día los presupuestos dedicados a la Enseñanza son realmente grandes, sobre todo si los comparamos con los existentes hace 50 años, por ejemplo. Pero los números que se manejan para medir la población estudiantil son también incomparablemente mayores. Cifras de 1955: el número de estudiantes madrileños que, tras el antiguo Bachillerato, pasaba a Preuniversitario fue de 2359. De ellos 1656 eran de letras y 703 de Ciencias. Estas cifras se multiplican por 10 en lo que a número de estudiantes se refiere en la actualidad. Para enseñanzas universitarias a nivel nacional en el 2005, la proporción entre estudiantes de Ciencia (incluyendo Ciencias de la Salud) e Ingeniería, relativa a resto de estudios (Humanidades y Ciencias Sociales y Jurídicas) es de un 33%, aproximadamente, siendo de sólo un 8% del total (1,460,000), los estudiantes de Ciencias Experimentales (104,000). Esto, teniendo en cuenta lo dicho anteriormente, significa que la mayor parte de nuestros estudiantes sólo adquieren una formación muy modesta en Ciencias y de estos saldrán seguramente la mayor parte de nuestros futuros gobernantes así como de nuestros directivos de empresas.

Aspectos pedagógicos (conceptos vs. fórmulas)

En lo que a la Física se refiere, la formación de nuestros estudiantes peca de un exceso de *formulismo* asociado al excesivo formalismo teórico, ya citado, de las enseñanzas. El alumno es capaz de resolver, en el mejor de los casos, complejos problemas en que la manipulación algebraica de diferentes ecuaciones es lo importante. Pero si se acompaña ese problema con sencillas preguntas de carácter conceptual sobre el mismo, el fallo es generalizado.

Al estudiante, que enfoca a la Física con esta perspectiva *formulística*, le es muy fácil seguir sistemáticas donde se plantean una serie de ecuaciones a las que debe *enchufar* una serie de números y obtener unos resultados. Pero cuando se trata de *pensar*, de penetrar en el plano de los conceptos, la maquinaria empieza a chirriar. Hay un ejemplo [5] de esta situación que llama la atención por lo representativo que resulta del panorama citado. A un conjunto de estudiantes que había seguido un curso intermedio de Física se le presentaron los dos problemas de circuitos que incluimos en la Figura 2 (traducido y adaptado de Redish, [6]).

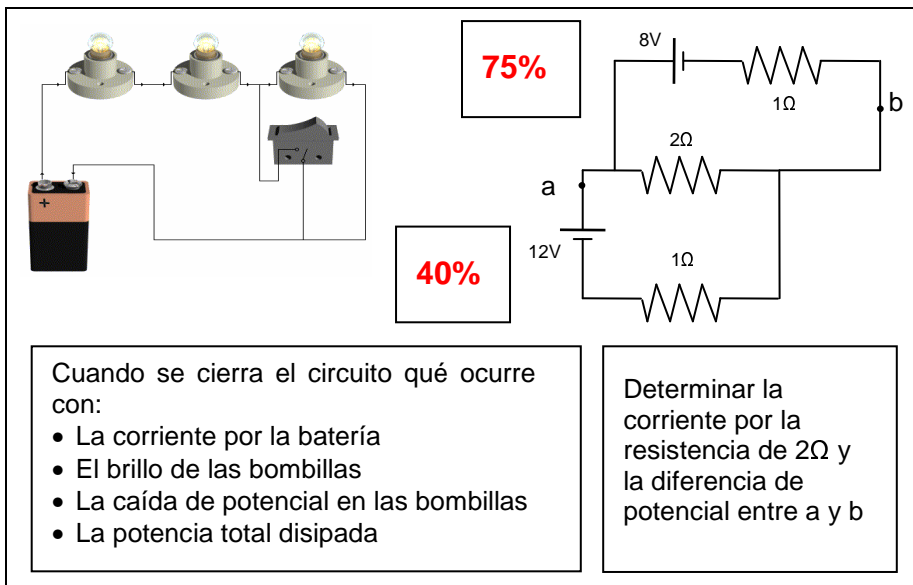


Figura 2. Enunciados de dos problemas: Conceptual y *mecánico* (Mazur).

Uno de los problemas, el de la derecha, se enunciaba en forma esquemática y requería del estudiante, para la resolución, utilizar unas leyes de aplicación sistemática (Kirchhoff) que resultan en un sistema de ecuaciones cuya resolución es también muy sistemática. Es un problema relativamente elaborado. El porcentaje de estudiantes que lo resolvió fue del 75%. El otro problema, de carácter conceptual y que exige sólo razonamientos bastante elementales, fue resuelto correctamente por sólo un 40% de los mismos estudiantes. Obsérvese que el propio enunciado de este problema está planteado de forma que al lector le resulte más fácil la comprensión del mismo.

Se antepone la *fórmula* a la Naturaleza: las piedras caen siguiendo los dictados de las Leyes de Newton. ¡Pues no!, las piedras caen como caen siguiendo los dictados de la Naturaleza. Y las Leyes de Newton, grandiosas, sí, pero sólo pretenden describir, *modestamente*, cómo caen las piedras o cómo se mueven los astros en el Universo. El estudiante enfoca los diferentes problemas de Física intentando reunir el conjunto de ecuaciones (*fórmulas*) que involucran a los datos e incógnitas del enunciado, para proceder a manipularlas algebraicamente y despejar la solución, como si de un crucigrama tedioso se tratara. Y da lo mismo que d sea la densidad del material o sea el diámetro de la bola citada en el enunciado. Podría parecer que esto es un comentario banal, pero cuando llega un estudiante con este tipo de esquemas ya profundamente asimilados, es muy difícil lograr recuperarlo al nivel necesario para que aprenda Física. A veces es preferible que llegue sin ningún conocimiento y comenzar de cero.

Cuando los recursos didácticos que utilizamos se basan exclusivamente en tiza, pizarra y lección magistral, lo fácil es rellenar la pizarra de *fórmulas*. Estamos hablando de la preparación que se da a los educadores. Es cierto que hoy en día asistimos a una formación cada vez más notable en las técnicas de enseñanza, en la pedagogía; pero lograr que nuestros profesores alcancen la deseable formación en los métodos pedagógicos y, a la vez, en el conocimiento de las materias que han de impartir es difícil tarea, pero

imprescindible si deseamos salir de la situación actual. Es preciso saber cómo enseñar, pero también es preciso conocer la materia objeto de nuestras enseñanzas. Por otra parte, es preciso, también, utilizar todos los recursos que tengamos a nuestra mano: lección magistral, experiencias de cátedra, laboratorios, ordenadores, elementos multimedia, etc. Todos ellos, sin desdeñar ninguno frente a otro, pues son complementarios, utilizados coordinadamente y con una sistemática estudiada, podrán hacer del aprendizaje de las Ciencias algo atractivo y no necesariamente de una dureza insuperable.

Por último citemos otro aspecto que consideramos de gran importancia en nuestra tarea diaria de enseñantes. Cuando nos presentamos delante de nuestro auditorio para tratar de enseñarles algo de una determinada materia es fundamental conocer, global e individualmente, cuáles son los conocimientos y dificultades de los estudiantes presentes. Para ello también sirve la tecnología, como se muestra en la metodología docente reseñada en el libro *Just in Time Teaching* [7], que posteriormente describiremos brevemente.

En el apartado siguiente presentamos algunas vías innovadoras por las que pensamos pueden venir soluciones a algunos de los problemas de la enseñanza de la Física y campos afines, haciendo dichas materias más asequibles al estudiante, a la vez que más atractivas. Estas vías parten de la utilización del ordenador e internet como recursos educativos básicos, dentro de un enfoque, el que hemos elegido, centrado en el uso de las simulaciones para aproximarnos al mundo real cuyo conocimiento es objeto de nuestro interés.

Modelos y simulaciones

La utilización de los ordenadores en la enseñanza surgió con el nacimiento mismo de los ordenadores. De hecho, algunas de las características que hacen que los ordenadores sean cada vez más *amigables* provienen de las primeras experiencias de su uso en la enseñanza. Hace ya más de 20

años se anunciaba [8] una revolución del calibre de la que propició la aparición de la Imprenta, pero ahora centrada en el Ordenador. “Hacia el año 2000 la vía principal de aprendizaje en casi todas las áreas, se hará a través del uso interactivo del ordenador”, se decía entonces, en 1981.

Sin embargo, la plena inserción de los ordenadores en el campo educativo sigue siendo un objetivo por alcanzar. Varias son las razones para la lentitud observada en la integración del ordenador en el proceso educativo, pero posiblemente la principal de ellas sea la inercia al cambio en los aspectos pedagógicos: seguimos viendo al ordenador como una prolongación de las herramientas tradicionalmente utilizadas para enseñar, eso sí, más rápida y con unas prestaciones gráficas inigualables.

Pero siendo optimistas en nuestro análisis, antes de continuar, desearía citar ya algunos ejemplos del ordenador y tecnologías de comunicación (principalmente web) que nos parecen notables. Así, por ejemplo, el esfuerzo llevado a cabo por Ogborn et al. [9], que ha dado como resultado un curso innovador de introducción a la Física, con un enfoque moderno y atractivo. También podemos destacar el curso de Física [10] puesto a punto por Ángel Franco, que se ha convertido en un *clásico*, en castellano, accesible gratuitamente vía red (web). En el primero colaboraron más de 30 profesores mientras que el segundo es una labor individual. También citemos el uso de la tecnología de los Physlets [11] que ha dado lugar a diversos cursos de Física introductoria [12]. Y, por supuesto, hay infinidad de esfuerzos individuales orientados a la preparación de materiales que los autores utilizan en sus propias clases. Bien es verdad que muchos de estos esfuerzos no son rentables en el sentido de que dichos materiales no suelen ser utilizados más que por los propios autores. En este sentido es también importante el enfoque del *hágaselo usted mismo*, en el que nuestro grupo ha sido pionero preparando herramientas de autor, como el Ejs [13, 14], que permiten a los profesores, con conocimientos no profundos en programación, la preparación de su propio material didáctico. Y en esta línea, también otro *clásico*, el Modellus [15]. Por otra parte, los autores de las

herramientas citadas han sido también pioneros en la utilización del modelado como vía pedagógica para la enseñanza de la Física, promoviendo que el estudiante elabore sus propios modelos y, al hacerlo, puedan profundizar mejor en los conceptos subyacentes en el proceso o sistema bajo estudio.

La utilización de los ordenadores en la enseñanza en general y en la enseñanza de la Física en particular pasa por formas que son bien conocidas: búsqueda de información, comunicación entre profesores y estudiantes, elaboración de informes (procesadores de texto, hojas de cálculo) y presentaciones (diapositivas), utilización de material multimedia diverso, etc. Pero quisiera llamar la atención a dos formas de utilización que constituyen las más específicas y prometedoras, a nuestro juicio, para el aprendizaje en los campos de la ciencia e ingeniería: las Simulaciones y el Modelado, ambas formas centradas sobre modelos de la realidad de los sistemas bajo estudio. Realmente la simulación es siempre la etapa final de un proceso de modelado; si he hecho distinción entre ellas es porque el estudiante puede ser mero usuario de las simulaciones o puede ser parte activa en su elaboración (modelado).

Pero, ¿qué es un modelo? Modelar es un proceso básico con el que el hombre ha tratado, desde tiempos inmemoriales, de entender la realidad; quizá uno de los procesos esenciales que caracterizan al hombre como *homo sapiens* (los números, en sí mismos, constituyen un ejemplo primitivo de este proceso de modelado). Modelar es, en esencia, hacer una representación abstracta de la realidad. Nos interesa la faceta de elaboración de modelos, especialmente modelos matemáticos, para problemas del mundo real (o de un mundo imaginario). La Física, en el sentido anterior, es la ciencia del modelado. Las Leyes de Newton, por ejemplo, no son más que modelos de cómo se mueven los cuerpos cuando interactúan mediante fuerzas con otros cuerpos.

Una vez elaborado un modelo de un sistema físico podemos implementarlo de diferentes formas. Puede constituir parte de una teoría física o puede crearse una versión del

mismo en un ordenador; en este último caso tendremos lo que denominamos una simulación del proceso o sistema analizado.

Sin ánimo de generalizar y a los efectos que a nosotros nos interesan, un modelo físico es una visión simplificada, generalmente utilizando lenguaje matemático, de nuestro sistema de interés (usualmente algo que es real). Una simulación de ordenador es la implementación del modelo mediante una pieza de software que permite su ejecución (interactiva) en el ordenador, ofreciendo resultados en forma de tablas de datos, gráficos o animaciones gráficas. Para efectos docentes es esta última forma la que ofrece un interés especial.

La construcción de modelos matemáticos pasa por un estudio del objeto o sistema de interés y por su descripción en un lenguaje matemático. La ventaja de esta descripción es que puede ser analizada en términos de la teoría matemática adecuada y expresada mediante algoritmos. La descripción del modelo generalmente entraña la definición de unas variables descriptivas del estado del sistema así como de una serie de parámetros de configuración del mismo. Adicionalmente, una serie de relaciones entre las diferentes partes del modelo, o de estas partes con el mundo exterior, que serán las que regirán el comportamiento del mismo.

La utilidad del ordenador en la implementación de modelos ha venido dada en función de su rapidez de cálculo y de sus prestaciones gráficas. Además, cara a la construcción de simulaciones, la eficacia del ordenador y la posibilidad de simular modelos de sistemas complejos ha sido dada gracias a la disponibilidad de multitud de métodos numéricos, como los algoritmos de Runge-Kutta para la integración de ecuaciones diferenciales o las transformadas rápidas de Fourier para el procesamiento de datos.

El uso de simulaciones por parte del estudiante le permite cubrir una faceta que consideramos esencial en el proceso de aprendizaje: la familiarización con el fenómeno de interés. Con las simulaciones el estudiante puede observar la evolución del sistema bajo estudio, cambiar los parámetros que caracterizan al sistema y volver a observar su comportamiento o cambiar las circunstancias en que se encuentra el sistema (condiciones

iniciales o ambientales, por ejemplo) y de nuevo ver cómo influyen en su evolución. Además, como en todo proceso científico, la utilización de una simulación permite valorar predicciones relativas al fenómeno analizado, que previamente no eran contrastables.

El modelado, es decir, el proceso de elaboración de un modelo y su plasmación en una simulación, tiene otros valores pedagógicos añadidos que estimamos son del mayor interés, pues entraña varios aspectos muy adecuados para el estudiante. En primer lugar, el profundizar seriamente en el fenómeno bajo estudio hasta llegar a coger la confianza precisa para elaborar un modelo del mismo. En segundo lugar, seleccionar la descripción más adecuada de dicho modelo para poder implementarlo en el ordenador, teniendo en cuenta algo muy importante y es que el ordenador es realmente implacable con la ejecución de lo que se quiera que realice –no admite errores- lo que exige del estudiante una claridad grande sobre lo que realmente quiere hacer y una precisión exquisita en su implementación. Es verdad que la elaboración de la simulación le exige un conocimiento técnico relativo a lenguajes de programación, pero es para este propósito para el que herramientas como el Modellus y el Ejs son de gran utilidad, facilitando grandemente la labor.

La mera ejecución de una simulación –y no digamos su construcción- hace que el estudiante se implique activamente en su proceso de aprendizaje. Está investigando, descubriendo nuevos resultados e influyendo interactivamente en su obtención. Está siguiendo el camino que utiliza normalmente el científico.

El grupo CoLoS y la enseñanza de la Física

Quiero en este apartado hacer una mención especial del grupo en que nuestra actividad se ha encuadrado desde hace ya una docena de años. Este grupo CoLoS [16], cuyas siglas corresponden a “Conceptual Learning of Science”, nació en

1988 promovido por Zvonko Fazarinc, profesor de la Universidad de Stanford (CA, USA) y por aquel tiempo trabajando en “hp Labs”. Su principal objetivo: utilizar el potencial de la tecnología actual para mejorar el conocimiento y la comprensión de los conceptos básicos en ciencia y tecnología, con un especial énfasis en las aproximaciones intuitivas y cualitativas, aspectos que detallaremos posteriormente. Desde sus comienzos, patrocinados inicialmente por un proyecto europeo (COMMET), el grupo estuvo dirigido por Hermann Haertel, profesor, hoy en día retirado, del Instituto IPN de Kiel (Alemania), dedicado a la investigación de técnicas pedagógicas en el campo de la enseñanza. El grupo, que nació como consorcio europeo, hoy en día se mantiene como un grupo de universitarios dedicados a la utilización de las nuevas tecnologías de la información y las comunicaciones en la enseñanza de la Ciencia e Ingeniería. Se ha ido ampliando con miembros de todas partes del mundo, sin dejar por ello de ser un grupo relativamente reducido y compacto.

En el seno de este grupo CoLoS se han desarrollado herramientas de todo tipo siempre orientadas a poder proporcionar una mejor aplicación de los ordenadores en el campo educativo, pero, desde sus comienzos, el factor propulsor de este grupo fue la preocupación constante por utilizar los ordenadores y tecnologías adyacentes de la mejor forma posible. Ello llevó no sólo al desarrollo de aplicaciones sino al debate profundo sobre aspectos pedagógicos, que son los que quiero centrar en este apartado.

Pasemos ahora a dichos aspectos pedagógicos que han formado el núcleo del enfoque propugnado por el grupo CoLoS. El ordenador, como ya se ha citado, tiene multitud de aplicaciones en la enseñanza, muchas unidas a las posibilidades actuales de búsqueda de información en la red así como a la comunicación entre personas y otras ligadas principalmente a la posibilidad de *modelar* los sistemas físicos mediante simulación de su comportamiento. Es a esta faceta a la que queremos dirigir nuestra atención no sin asumir que estamos reduciendo aparentemente nuestro interés a una parte

muy básica del extensísimo campo de posibilidades que el ordenador ofrece. Generalmente, los sistemas físicos cuya comprensión es objeto de nuestro interés, suelen poder modelarse en términos de un conjunto de ecuaciones integro-diferenciales que se prestan a ser tomados por el profesor como punto de partida de sus clases de pizarra o como base para elaborar simulaciones de ordenador. El problema es que, frecuentemente, ambos caminos son idénticos: se integra la ecuación o las ecuaciones, se obtienen soluciones y se hace una representación gráfica de las mismas. Por supuesto que con ordenadores, las clases se hacen más vistosas, con presentaciones animadas e inigualables. Se abren, además, nuevas posibilidades cuando el ordenador se pone en manos del alumno, como ya se ha citado, ofreciéndole la facilidad de experimentar y entrenarse familiarizándose con el fenómeno bajo estudio mediante planteamiento de diferentes situaciones o cambiando los parámetros característicos del sistema. Por otra parte, la utilización del ordenador facilita también el análisis de problemas difícilmente abordables en clase de pizarra, por el nivel matemático que tendrían las herramientas precisas para la integración de los modelos (piénsese en los sistemas no-lineales, por ejemplo). Pero, no obstante, los beneficios en la enseñanza son pocos en comparación con las expectativas que teníamos puestas en el uso del ordenador en dicho campo.

Regresemos, con objeto de dar un enfoque más interesante, al planteamiento de cómo funciona la Física. Habíamos dicho que esta disciplina intentaba modestamente explicar cómo ocurren los fenómenos naturales. Añadimos aquí, en contraposición con cómo suelen ser nuestras clases y el uso que damos a los ordenadores, que *la Naturaleza no resuelve ecuaciones*. Realmente es metafísico preguntarnos sobre cómo funciona la Naturaleza, si resuelve o no ecuaciones, pero es muy atractivo pensar que la Naturaleza funciona con un conjunto muy reducido de reglas que coinciden con lo que normalmente denominamos los Principios Básicos. Podemos tener un método para determinar cuáles son dichos principios, método que, además, debe ser el seguido cuando se investiga un fenómeno. Seleccionemos diversos sistemas y

preguntémonos por el *por qué* de tal o cual aspecto de su comportamiento; generalmente encontraremos la respuesta en algo preliminar, más básico, sobre lo cuál podremos, a su vez, preguntarnos el *por qué* correspondiente. Cuando, siguiendo con este proceso de reducción, lleguemos a un factor para el que no existe respuesta al *por qué*, entonces habremos dado con uno de los Principios Básicos antes citados. El problema reside en que, cuando resolvemos ecuaciones, ya sea mediante el sistema clásico o mediante el ordenador, ayudamos –y eso es de por sí importante- a responder preguntas del tipo de *qué ocurre si...*, pero no ayudamos a responder preguntas del tipo de *por qué...* No vamos al núcleo importante del aprendizaje de los conceptos subyacentes en un fenómeno dado, pues la ecuación que utilizamos, por muy rico que sea su contenido, normalmente está muy distante de los Principios que permiten llegar a ella. Es el aprendizaje de dichos conceptos el que realmente nos permitirá superar el punto de sólo poder resolver problemas análogos a otros que ya nos hayan resuelto, para pasar al estadio de poder abordar problemas nuevos. Afirmamos que, entender la Naturaleza, no reside en saber resolver ecuaciones (pues Ella tampoco las resuelve) sino en poder aprehender –que es algo más que aprender de memoria- las reglas básicas de funcionamiento que constituyen sus Principios de operación. Cómo llegar a encontrar dichos Principios ya se ha dicho. Analicemos diferentes fenómenos naturales y vayamos intentando recorrer el árbol de arriba abajo intentando encontrar respuestas cada vez más básicas a los diferentes aspectos de su comportamiento. Cuando lleguemos al tronco en que no queden más ramas que recorrer habremos encontrado uno de los Principios que buscábamos. En el estudio de las interacciones también podemos seguir un análisis reduccionista del mismo tipo. Siguiendo esta sistemática podemos identificar los siguientes Principios e Interacciones básicas (listados sin ánimo de ser exhaustivos): Conservación de la Energía, del Momento y de la Carga; leyes de fuerza eléctrica (Coulomb) y gravitatoria (Newton); Principios de la Relatividad, de Exclusión, Incertidumbre; etc.

La utilización directa de dichos Principios, por parte del profesor en la enseñanza de fenómenos complejos, sería difícil, en su actividad diaria, por la lentitud que impondría a sus explicaciones, o imposible por la complejidad de los sistemas bajo estudio; pero el uso del ordenador puede aliviar grandemente el proceso, como pretendemos mostrar con el siguiente ejemplo.

Imaginemos el estudio del comportamiento electrostático de un metal o conductor. Cuando se conecta a una batería adquiere una cierta carga y queda todo él equipotencial. En todo el espacio se establece un campo eléctrico cuyo estudio es de nuestro interés. Normalmente este estudio se lleva a cabo resolviendo la ecuación de Laplace para el potencial, sometida a la condición de contorno impuesta por el metal. Esta ecuación de Laplace es una ecuación en derivadas parciales cuya solución analítica es posible pero sólo en contados casos; en general se ha de recurrir al uso del ordenador para encontrar soluciones numéricas aproximadas (he aquí un uso interesante del ordenador, quizá el más extendido en la investigación en ciencias).

Un enfoque alternativo -que es el que propugnamos- es el siguiente: Partimos del metal como cuerpo que posee gran cantidad de electrones libres de moverse sin salirse de él; esta característica es la que explica el que los metales sean tan buenos conductores de la electricidad. Se simula entonces el metal cargado con el siguiente modelo (damos sólo los aspectos básicos relevantes): una región en que la carga en exceso se puede mover libremente sin salirse del contorno que delimita dicha región. Estas cargas se mueven, libremente, como ya hemos dicho, sometidas a las fuerzas coulombianas debidas a las restantes cargas (ley conocida y cálculo fácilmente realizable por el ordenador, aunque muy laborioso si se tuviera que hacer *a mano*). Se deja que el sistema evolucione integrando para ello la ecuación de movimiento dada por la segunda Ley de Newton (ley también básica y cuya integración también puede hacer fácilmente el ordenador).

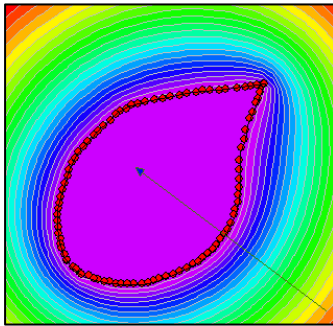


Figura 3. Equipotenciales para un metal cargado. Se incluye también el campo eléctrico en un punto.

Cuando se deja que el sistema de cargas evolucione sometido a las condiciones anteriormente expuestas, la distribución de cargas que se obtiene en el estacionario tiene (vease la Figura 3) las siguientes propiedades:

- Toda la carga extra se va a la superficie del cuerpo, sin quedar nada en el interior
- El campo producido por dicha distribución es cero en el interior del cuerpo; es decir, el metal queda como una región equipotencial
- El campo en las proximidades externas del metal es perpendicular a la superficie (no tiene componente tangencial)
- Dicho campo es tanto más intenso donde mayor concentración de cargas se observa
- La carga se concentra preferentemente donde la superficie presenta curvatura acusada (efecto puntas).

Se obtienen, pues, todas las características básicas del comportamiento metálico -y alguna más- y para la simulación sólo hemos empleado la 2ª Ley de Newton y una ley de fuerzas dada por la expresión de Coulomb. Además, si se ha resuelto el problema del campo mediante un proceso de integración numérica de la ecuación de Laplace, el resultado que se obtienen es coincidente.

Siguiendo con nuestro ejemplo, uno puede investigar algunos hechos adicionales que tienen mayor calado aún. Una de las mejores formas de penetrar conceptualmente en una ley básica consiste en cambiar algún aspecto y observar qué

resultados produce. Esto es algo que difícilmente puede hacerse en un laboratorio y constituye otro factor positivo a considerar en las aplicaciones del ordenador. En nuestro caso, uno de los parámetros que puede cambiarse es el exponente 2 en la Ley de Coulomb, por cierto, una de las constantes físicas determinadas con mayor precisión. Pues bien, utilizando un campo coulombiano de la forma:

$$\vec{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r^{(2+\epsilon)}} \vec{u}_r$$

podremos jugar con el parámetro ϵ y ver qué consecuencias tiene el separarnos del 0. Cuando se hace esto, las observaciones principales son:

- El campo eléctrico deja de ser nulo en el interior del metal (que ya no es, pues, equipotencial).
- La carga puede residir, en equilibrio, en el interior del metal (lo cual indicaría que se incumple uno de los teoremas más interesantes de la Electrostatica, el de Earnshaw).
- Sigue cumpliéndose que el campo en las proximidades externas del metal es perpendicular a la superficie.

Precisamente la primera de las observaciones expuestas constituye uno de los procedimientos clásicos para determinar el “2” en la Ley de Coulomb, determinando el grado de anulación del campo eléctrico en el interior de un metal (ver Jackson [17] para una discusión interesante de los diferentes métodos experimentales para acotar ϵ).

Las características que hemos encontrado dan utilidad al ordenador en la enseñanza de la Física y campos afines, son, en resumen:

- El ordenador tiene unas prestaciones gráficas sin precedentes.
- Permite hacer cálculos con velocidades extraordinarias.
- Posibilitan el uso de las simulaciones en un modo que mimetiza la forma en que queremos crear opera la

Naturaleza, partiendo de un conjunto reducido de Principios fundamentales.

Todo ello facilita, además, una aproximación pedagógica interesante: permitir que el estudiante se familiarice con el fenómeno bajo estudio ocultando en una primera instancia el formalismo matemático. Este formalismo podrá recuperarse a posteriori, para que el estudiante cuente con las herramientas precisas que le posibiliten el progreso, en forma y tiempo adecuados, en la materia de interés.

Para ilustrar lo anterior vamos a coger un ejemplo muy utilizado por el prof. Fazarinc [18], la Difusión. Consideremos la difusión de una sustancia, caracterizada por su concentración C , en un medio de coeficiente de difusividad D . Este proceso viene descrito matemáticamente por una ecuación como la siguiente:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla C)$$

que admite solución analítica en determinados casos sencillos, aunque normalmente hay que acudir a soluciones numéricas con ayuda de ordenador. Una solución, para condición inicial de tipo impulsional (δ de Dirac) en 1-D toma la forma de una Gaussiana que se va ensanchando con el tiempo:

$$C(x, t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}}$$

Pero tanto la ecuación diferencial como la solución particular anterior están muy alejadas de los mecanismos básicos que subyacen en un proceso de difusión, que radican en las interacciones entre las partículas que constituyen el medio que se difunde (entre ellas y con las del medio donde se difunden).

Desde un enfoque conceptual (CoLoS) podemos utilizar una simulación de ordenador presentando la interacción entre un número reducido de partículas que inicialmente están agrupadas en una pequeña región, con velocidades aleatorias.

Cuando se deja que el sistema evolucione se observa cómo las partículas se difunden en todas las direcciones. Inicialmente las partículas se mueven en trayectorias rectilíneas y sufren choques con las partículas vecinas cambiando de velocidad y de dirección de movimiento en forma casi aleatoria. La situación a que se tiende es aquella en que hay igualdad de probabilidad de difusión en todas las direcciones (aunque el número de partículas que, en un momento dado, se alejan de la región de mayor concentración es superior al número de partículas que tienden a aproximarse a ella, justamente porque dicho número, a igualdad de probabilidades, es mayor en las zonas de mayor concentración).

Presentamos a continuación un estado de la simulación y el histograma de posición de partículas en una dirección en dos instantes diferentes.

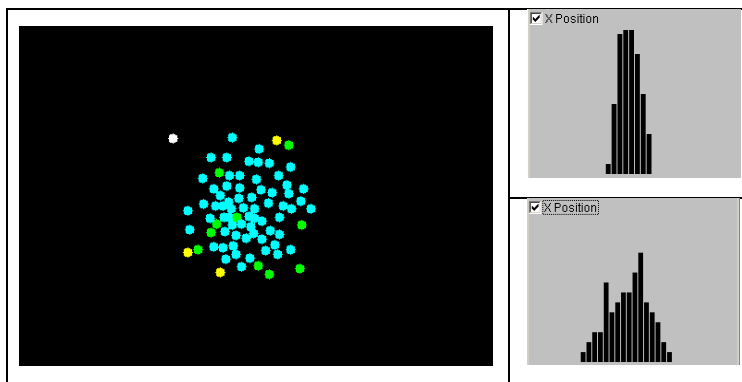


Figura 4. Difusión e histogramas correspondientes (el superior en el instante inicial y el inferior transcurrido un cierto tiempo).

Destaquemos que en la simulación sólo se utilizan los principios de conservación de la energía y del momento. Mediante la simulación el estudiante puede familiarizarse con el fenómeno de difusión y, mediante la orientación adecuada puede quedarse con el hecho de que en 1D, en cualquier instante, la tendencia es a que una fracción de las partículas situadas en una zona tengan igual probabilidad para irse hacia la zona próxima por su izquierda o por su derecha. La generalización a 2 o 3D es inmediata. Partiendo de este hecho

se puede recuperar fácilmente la ecuación diferencial que gobierna el fenómeno de difusión siguiendo un planteamiento en diferencias que se hace finalmente tender al límite (véase la Figura 5).

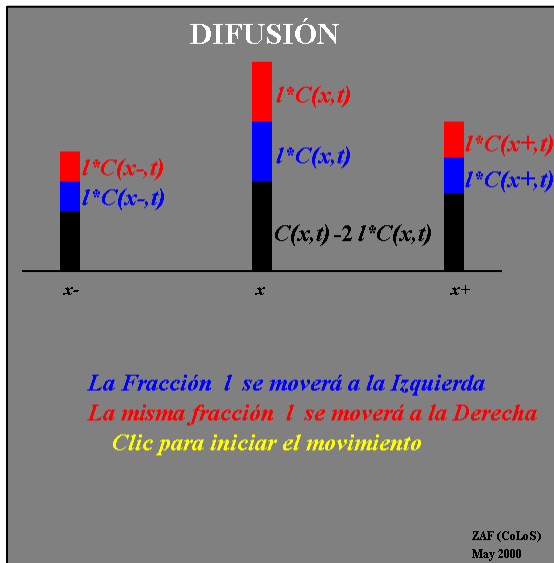


Figura 5.
Difusión: Se muestra un cuadro de la animación utilizada para la recuperación del formalismo.

Pueden aplicarse también fuerzas externas y se observa como la gaussiana, a la vez que va ensanchándose y reduciéndose se va desplazando en la dirección de la fuerza. De hecho los procesos de difusión están en el corazón de gran cantidad de fenómenos físico-químicos y de interés biológico. La fuerza citada anteriormente puede aplicarse en sentido vertical, hacia abajo, y podríamos observar situaciones como la correspondiente a la distribución de concentraciones en la atmósfera en función de la altura y explicar hechos como el que en una región cerrada la parte superior esté más caliente que la inferior. Estamos metidos de lleno con el tema del transporte (de partículas, de calor, transporte de cargas, etc.). Basta con situar cargas de forma apropiada e introducir un campo eléctrico aplicado para poder explicar las bases de la conducción en semiconductores, por ejemplo.

Resumimos los aspectos esenciales de lo que acabamos de analizar. En la enseñanza tradicional (incluso utilizando el

ordenador), partimos de las ecuaciones a que la observación del comportamiento de nuestro sistema nos conduce y las resolvemos (bien sea analítica o numéricamente con ayuda del ordenador). De esta forma, mediante cambio en los parámetros incluidos en las ecuaciones citadas, podemos llegar a reproducir cómo funciona nuestro sistema y responder a preguntas del tipo *qué ocurre si* En la utilización que propugnamos del ordenador, partimos, como siempre, de la observación de nuestro sistema e intentamos mimetizar cómo actúa la Naturaleza mediante la simulación de los procesos involucrados acudiendo a los principios básicos. Con ellos, y del conocimiento último de la estructura de nuestro sistema, podemos llegar a construir modelos de ordenador cuya resolución aporta mayor riqueza que la mera resolución de ecuaciones. De esta forma podemos profundizar más en los conceptos subyacentes y aprender a responder preguntas del tipo *por qué sucede* A su vez, no resulta en general difícil poder obtener finalmente el formalismo o modelo matemático (preciso para poder progresar en el conocimiento avanzado de la materia bajo estudio).

Herramientas desarrolladas para la enseñanza de la Física

Haremos aquí un recorrido por algunas de las herramientas desarrolladas por miembros del grupo CoLoS, citando sólo aquéllas que consideramos tienen mayor interés en relación al contenido de esta lección.

Es difícil hacer una clasificación de los recursos disponibles puesto que su forma y contenido son muy diversos. En atención a su complejidad podríamos ir desde simulaciones de propósito específico, para introducir un determinado fenómeno, a herramientas de autor que permiten construir (programando) simulaciones en cualquier campo científico, pasando por micromundos que posibilitan implementar (sin programar) modelos de sistemas en campos muy diversos. Además, tanto las simulaciones de propósito específico

(elaboradas generalmente por un informático asociado a un científico), como las elaboradas por científicos (con conocimientos no muy importantes de informática, auxiliados por herramientas de autor diseñadas para ello), generalmente van acompañadas por un texto explicativo. Dicho texto permite al usuario ir trabajando con la simulación en una forma semi-orientada, generalmente bajo la directriz de aprender investigando.

El conjunto (simulación mas texto guía) constituye una *unidad didáctica*, de carácter generalmente autónomo, que permite al usuario aprehender los conceptos básicos subyacentes en el fenómeno bajo estudio. También se han elaborado conjuntos de simulaciones coordinadas sobre un mismo tema que, con los textos guías correspondientes, han dado lugar a *cursos* más o menos completos sobre el fenómeno o campo de interés.

Finalmente citemos la tecnología *Physlets* (o *Fislets* en castellano, correspondiente a applets de Física), en que se utiliza un reducido conjunto de applets configurables mediante javascript, para construir en forma modular simulaciones muy diversas en determinados campos de la Física (“Animator” para mecánica, “EField” para electricidad, “BField” para magnetismo, “Optics” para el campo de la óptica geométrica, etc.). Con ellos se pueden elaborar cursos completos en muy diversas áreas de la Física. Nos detendremos en ellos más adelante.

La interactividad precisa para un uso eficiente de las unidades didácticas se logra mediante el control de la simulación desde el texto guía asociado. Hoy en día esto se logra fácilmente mediante la utilización de páginas html con javascript que controlan applets java que admiten las órdenes contenidas en los scripts (órdenes o conjunto de órdenes incluidas en una pieza de código en el texto html, que son entendidas por la aplicación java a la que se dirigen). En épocas previas a la introducción del lenguaje Java, se desarrolló un sistema de comunicación entre aplicaciones escritas en cualquier lenguaje y los correspondientes scripts contenidos en las páginas html.

Hasta ahora hemos citado como recurso base las simulaciones. Estas simulaciones pueden en algún caso corresponder también a experiencias que comúnmente se llevarían a cabo en un laboratorio. Tendríamos así los *laboratorios virtuales*. Pero queremos introducir también los *laboratorios remotos*; en ellos lo que se hace es conectar vía red a un experimento real y controlarlo desde nuestro ordenador. También en este campo el grupo CoLoS ha sido pionero, poniendo las bases de lo que hoy en día se ha convertido en un recurso de mucho interés.

Para la construcción de simulaciones podemos optar por dos soluciones. Caso de disponer de un informático en el grupo de desarrollo, será él, con la dirección de un científico, el que pueda construir las simulaciones precisas. No obstante, esta situación no suele darse con frecuencia y a veces el profesor ha de recurrir a simulaciones elaboradas por otros. En este sentido existen *colecciones de simulaciones* como las desarrolladas por el miembro del grupo CoLoS Fu-Kwun Hwang [19] o las desarrolladas por Walter Fendt (a cuya traducción al español también hemos colaborado) [20]. Pero es frecuente que los profesores o bien sean reacios a utilizar las simulaciones elaboradas por otros o bien precisen de simulaciones específicas que no se pueden adaptar de las disponibles en la red. Para tales casos nuestro grupo se ha volcado en el desarrollo de las ya mencionadas herramientas de autor. Se inició esta andadura con el xDev (por X-Developments, un entorno desarrollado bajo XWindow en sistemas Unix) y finalmente se ha concluido con el desarrollo de una herramienta multiplataforma, ya citada, denominada Ejs (por Easy Java Simulations) [13, 14], construida por F. Esquembre. En este campo de las herramientas para la elaboración de simulaciones, destacaremos también la puesta a punto, bajo la dirección del profesor Vitor Duarte, del Modellus [15], ya citado, que hoy en día constituye una aplicación de referencia sobre la que se han desarrollado múltiples simulaciones en campos no sólo de la Física sino también de las Matemáticas y otros.

Y como nivel superior, en complejidad, a lo ya apuntado anteriormente, se han desarrollado también *entornos de*

aprendizaje que contienen tanto las herramientas para la construcción de simulaciones como las precisas para la elaboración de los textos guía, incluyendo en su caso el acceso a laboratorios remotos, en ambientes que podrían ser incluso de tipo colaborativo en que los estudiantes se asocian en grupos reducidos para trabajar sobre objetivos científicos comunes, ayudando tanto al aprendizaje de sus compañeros como al suyo propio. Como proyecto de referencia citaremos en este apartado el Colab que presentaremos posteriormente.

De todos estos tipos de recursos vamos a seleccionar algunos concretos para mostrar la diversidad de enfoques y aplicaciones disponibles:

- Aplicaciones (simulaciones) de propósito específico: la ya citada orientada a aprender sobre el concepto de metal o la que mostraremos sobre *Moléculas Diatómicas*.
- Cursos sobre un determinado campo de interés: curso sobre *Ondas*.
- Micromundos que permiten elaborar simulaciones en campos muy diversos: el “xyZET” y el “Jacobs”.
- Laboratorios Remotos: Varios incluidos en “Colab”.
- Entorno de aprendizaje: “Colab”.
- Applets de Física configurables: “Fislets”.
- Herramientas de autor para la elaboración de simulaciones o unidades didácticas: el “Modellus” y el “EJS”.

Donde hemos dejado para el final los recursos que en este momento estimamos como más prometedores.

Veamos a continuación algunas características de los recursos citados.

Aplicación: moléculas diatómicas

Esta simulación constituye un ejemplo del camino que normalmente se sigue para el desarrollo de un recurso educativo. Habiendo trabajado sobre el modelado de gases

ideales, pieza clave para explicar gran cantidad de conceptos básicos en termodinámica y en teoría cinética, se disponía de soluciones muy robustas para la colisión entre partículas esféricas rígidas, que constituye la base de su análisis. Aparte de poder confirmar su comportamiento como gas ideal, el gas de moléculas diatómicas ofrece algunas características añadidas que enriquecían el campo conceptual en que nos movíamos: permite estudiar la mezcla de gases mono y diatómicos con resultados de interés como el de la Ley de las Presiones Parciales y, sobre todo, permite el estudio del Principio de Equipartición de la Energía y el análisis de aspectos tan interesantes como el de los calores específico de gases mono y di-atómicos. Y todo ello dejando aparte que el sistema de moléculas diatómicas es altamente caótico y permite una profundización en conceptos tales como la entropía y la dirección de la flecha del tiempo. Es de destacar como el disponer de una nueva simulación ensancha el número de campos en que se facilita una profundización conceptual.

Nuestro primer movimiento fue en el sentido de ver lo que había de información sobre nuestro problema: colisiones entre moléculas diatómicas, que pretendíamos modelar como sistemas formados por dos bolas unidas rígidamente por una varilla. La falta de información sobre el particular nos hizo plantearnos el problema desde cero y, partiendo como siempre de principios básicos (leyes de Newton y conservación del momento y de la energía), logramos resolver el problema [21] con carácter general entre dos cuerpos rígidos (en 2D). Una vez dispusimos de las expresiones que gobernaban el proceso de colisiones, lo particularizamos para el sistema de dos discos unidos rígidamente por una varilla y diseñamos una simulación interactiva que permitía experimentar con conjuntos de tales moléculas diatómicas en 2D. Finalmente, tomando como punto de partida la simulación desarrollada, diseñamos algunas unidades didácticas [22] para el aprendizaje en los campos que anteriormente citábamos. Mostramos a continuación (véase la Figura 6) una instantánea de la simulación utilizada para introducir el Principio de Equipartición de la Energía.

Se han puesto unas 30 moléculas, inicialmente con una energía de rotación que superaba a la de traslación. En esta

simulación 2D las moléculas tienen un grado de libertad para la rotación (respecto al eje perpendicular al plano que contiene al sistema) y dos grados de libertad para la traslación (los ejes horizontal y vertical, por ejemplo). Entonces, el Principio de Equipartición de la Energía nos dice que la energía tenderá a distribuirse por igual entre los distintos grados de libertad; así pues, la evolución del sistema corresponderá a intercambiar energías de rotación y traslación hasta que, en promedio, la de traslación duplique a la de rotación.

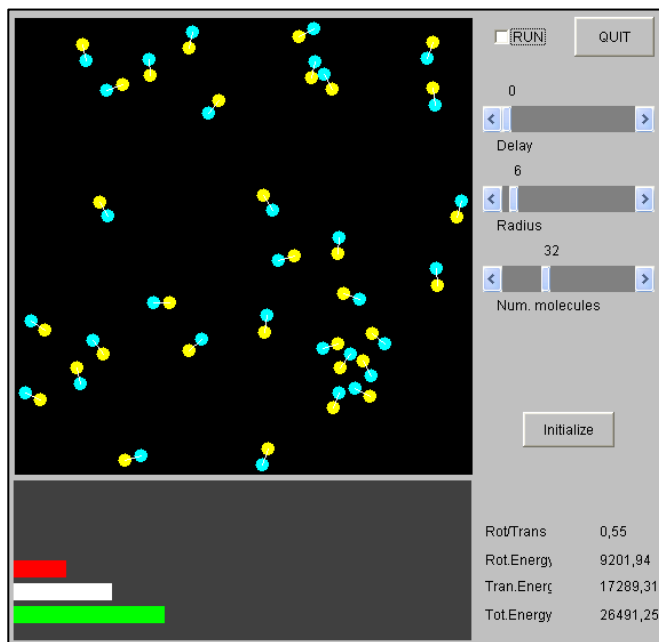


Figura 6. Moléculas Diatómicas: Mostrando el Principio de Equipartición de la Energía

Curso sobre Ondas

Incluimos aquí un pequeño curso [23] introductorio sobre ondas, que permite al estudiante familiarizarse con diversos aspectos básicos sobre la propagación de las mismas y, al mismo tiempo, recuperar la matemática correspondiente a la *ecuación de ondas*. Se recorren asimismo algunos fenómenos como la superposición e interferencia de ondas en 1D, y las ondas estacionarias.

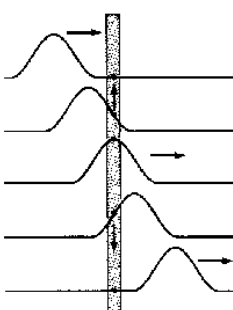
El diseño del curso se ha hecho centrado en una aplicación básica, relativa a la propagación de ondas, combinada con páginas html desde las que, mediante javascript, se va guiando al estudiante para que, por ejecución de los comandos apropiados, vaya aprendiendo los aspectos que se han considerado más relevantes en relación con el tema.

1. CONCEPTO DE ONDA

EXPERIENCIA 1.1: Perturbación en una cuerda tensa

Para estudiar la onda como propagación de una perturbación, partimos de una cuerda en equilibrio sometida a cierta tensión por lo que todos sus puntos están inicialmente en línea recta.

Presione aquí



Si sobre un punto, tal como su extremo izquierdo, provocamos un desplazamiento vertical introducimos una *perturbación* que se transmite debido a las propiedades elásticas de la cuerda. En consecuencia se produce desplazamiento en los puntos adyacentes. Posteriormente este punto vuelve a su estado inicial a la vez que los puntos siguientes después de alcanzar el máximo hacen lo mismo y así sucesivamente.

Observamos que el movimiento realizado por el punto inicial se repite en cada punto de la cuerda, o lo que es equivalente, la perturbación original se propaga sin retorno al suponer una longitud indefinida.

Para analizar el mecanismo responsable de esta propagación seleccionemos un *elemento de cuerda* con su tensión en ambos extremos y veamos cómo realiza el movimiento

Figura 7. Curso sobre Ondas.

El curso (Figura 7) se ha estructurado en *capítulos*. Cada capítulo se inicia resumiendo el contenido del tema y puntualizando los objetivos que trata de conseguir. A continuación se introduce la teoría básica que se completa en las experiencias propuestas. En cada *experiencia*, además del texto explicativo, hay una *simulación* base. Al final de la experiencia se proponen una serie de *tareas* para realizar. En ellas se recomienda repetir o indagar en determinados aspectos, con ayuda de los controles de la simulación o con lápiz y papel, a fin de afianzar lo aprendido en texto y simulación. Para darnos una indicación del grado de comprensión adquirido en cada experiencia se incluye una

autoevaluación consistente en una serie de preguntas tipo test. Los aciertos y fallos aparecen recogidos en una tabla resumen.

Micromundos: El *xyZET*

Durante años ésta fue la aplicación más representativa del grupo CoLoS. Fue desarrollada en Kiel [24] por un único programador, Michael Ludke, bajo la dirección del Dr. Hermann Haertel. Incluimos *xyZET* como micromundo por su versatilidad en la simulación de fenómenos en campos muy diferentes de la Física, que van desde la cinemática más elemental hasta problemas complejos de electromagnetismo, siendo así que sólo incluye partículas, con diferentes tipos de interacciones, y acciones externas en forma de campos eléctrico, magnético y gravitatorio. Su interés en el campo de la enseñanza de la Física ha sido premiado en diferentes concursos internacionales entre los que destaca el "*European Academic Software Award 1994*" para Física y haber sido también ganador del "*CiSE Software Contest 1999*" de la revista americana "*Computing in Science & Engineering*".

Basándose en *xyZET*, y mediante mecanismos de control de aplicaciones desarrollados en nuestro grupo CoLoS de Murcia, se han elaborado (html) un curso completo de Mecánica (H. Haertel), un curso introductorio de Electricidad y otro que versa sobre la Resonancia en sistemas mecánicos (E. Martín).

Para destacar la variedad de campos en que esta aplicación es utilizable, he seleccionado tres ejemplos sacados dos de ellos del campo de la Mecánica (colisiones y oscilaciones) y otro del campo del Electromagnetismo.

El primer ejemplo es realmente una cuestión, basada en un artilugio muy conocido, el de Newton, que da bastante que pensar. En el artilugio citado hay un conjunto de bolas iguales alineadas y en contacto. Cuando se desplaza un número dado de ellas y se deja que colisionen por un extremo con el resto, se observa que salen por el otro extremo un número igual de bolas, manteniéndose en reposo las restantes (incluyendo las bolas incidentes causantes del proceso). La solución del problema suele darse en términos de la conservación del

momento y de la energía. Y, efectivamente, ambas cantidades se conservan. Supongamos (Figura 8) que se lanzan 2 bolas; se observa como salen emergiendo por el otro extremo las dos bolas finales y las demás quedan en reposo. La pregunta es: ¿Qué pasaría si se lanzara una sola bola, del mismo tamaño que las restantes pero de masa doble?

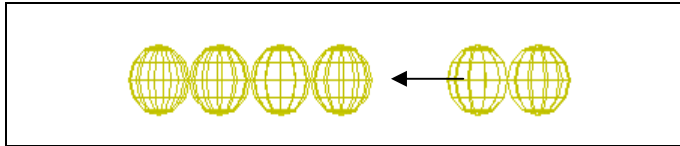


Figura 8. Simulación del Artilugio de Newton.

Pasemos a otro campo diferente. Las oscilaciones y la resonancia en cuerdas vibrantes. Estas cuerdas se han modelado como partículas unidas entre sí mediante resortes. Basta un número relativamente pequeño de partículas (21 en nuestro ejemplo) para lograr resultados muy ajustados a los que se obtendrían con un modelo de cuerda elástica continuo.

En la Figura siguiente se presenta una composición de un estado de vibración del modo fundamental de la cuerda excitada por su zona central a una frecuencia dada, mostrada por su período en el panel incluido en la composición.

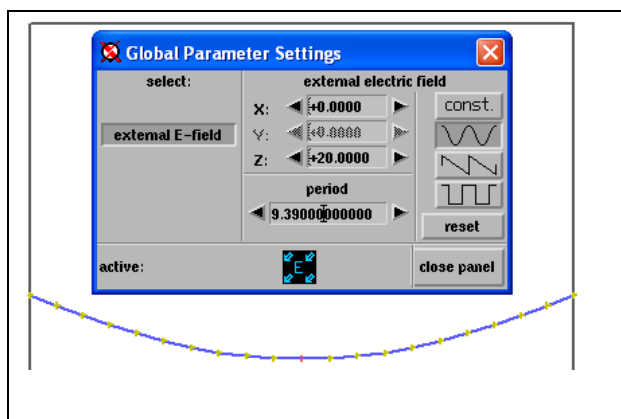


Figura 9. Cuerda Vibrante: Modo fundamental.

En la Figura 10 se muestra el resultado de excitar la misma cuerda, exactamente en la misma forma pero a una frecuencia 3 veces superior (período un tercio del anterior). El resultado es que se excita el tercer modo de resonancia en dicha cuerda.

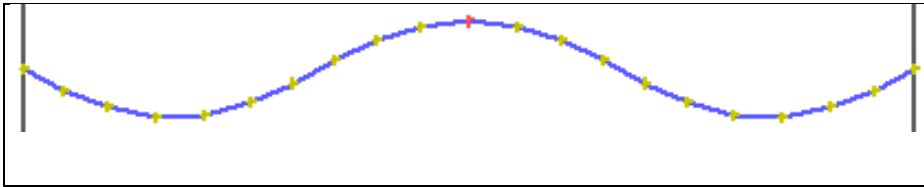


Figura 10. Cuerda Vibrante: Armónico Superior.

Y también pueden estudiarse sistemas más complejos, como el de una membrana vibrante (Figura 11) simulada también en términos de partículas unidas elásticamente a las vecinas más próximas.

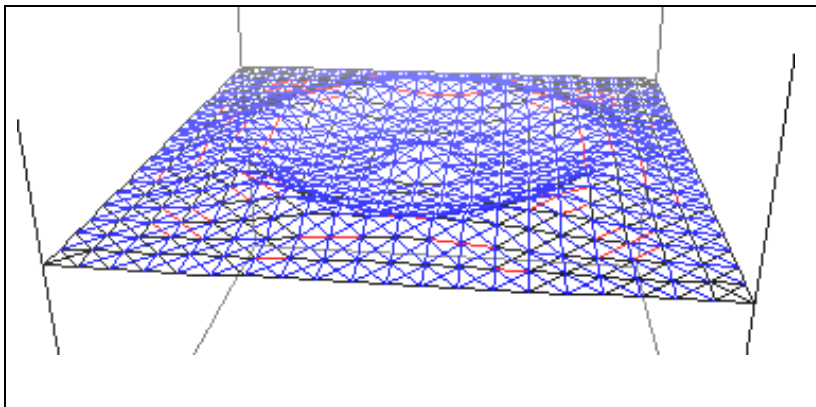


Figura 11. Simulación de una membrana vibrante.

Finalmente presentamos un sistema seleccionado en el campo del Electromagnetismo. En la Figura 12 mostramos la radiación de una partícula cargada en movimiento circular a velocidades próximas a la de la luz.

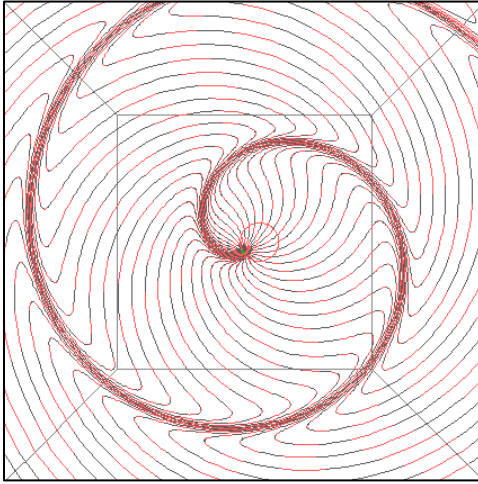


Figura 12. Radiación Sincrotrón.
La circunferencia central
corresponde a la trayectoria de la
carga.

Se observa, mediante dibujo de las líneas de campo, la denominada radiación sincrotrón. Con el xyZET se ha resuelto el problema de visualización dinámica del campo de radiación de una partícula cargada en movimiento arbitrario. Para ello se ha hecho uso de un modelo extraído de las teorías de emisión de Page [25], teorías cuya validez y ortodoxia hemos tenido que comprobar previamente desde el punto de vista teórico en lo que a su coherencia con las leyes del Electromagnetismo y de la Relatividad se refiere.

Dentro de los *micromundos* no queremos dejar de citar el Jacob [26] desarrollado por el grupo CoLoS de Eslovenia bajo la dirección del prof. Vojko Valencik, desafortunadamente fallecido a edad temprana sin que pudiera ver terminada su labor en este campo. Esta aplicación, disponible en Java, permite construir sin necesidad de programación alguna, por métodos gráficos, sistemas eléctricos adaptables al estudio de muy diversos fenómenos de la Electricidad y el Magnetismo.

Laboratorios remotos

Los entornos de simulación facilitan el desarrollo de laboratorios virtuales que permiten que el estudiante se familiarice con los fenómenos de interés *casi* como si

estuvieran en un laboratorio real. No obstante, estos laboratorios virtuales no deben pensarse como alternativa a los laboratorios reales en que la labor experimental del estudiante es insustituible. Estos laboratorios virtuales han de entenderse como complemento a los reales en lo que a familiarización del estudiante con lo que va a encontrarse en el laboratorio real se refiere. Como valor añadido se encuentra la posibilidad de variar fácilmente las características del sistema estudiado, cosa que en el laboratorio real puede ser muy complicado o imposible; además, en el laboratorio virtual se facilita la posibilidad de explorar el comportamiento de sistemas que pueden ser sólo observables (no cambiables ni en sus características ni en sus condiciones de observación) en el mundo real. Una característica notable de los laboratorios virtuales es que no precisan de mantenimiento y que son fácilmente modificables y adaptables a diferentes tipos de necesidades.

La distancia entre el laboratorio real y el virtual puede acortarse con los laboratorios remotos, en que el alumno accede a un montaje real controlado remotamente, en línea vía internet, desde su propio ordenador. En este laboratorio el alumno puede incluso disponer de una vista en tiempo real de lo que está ocurriendo en el laboratorio real mediante una *webcam*, o puede descargar a posteriori un video con la historia visual del comportamiento del sistema que él ha controlado. Seguimos con el handicap de que el estudiante sigue sin *hacer manos* en el laboratorio real, pero indudablemente lo acercamos más a los problemas que en dicho laboratorio puede encontrar. Una de las ventajas de los laboratorios remotos es que pueden ponerse a disposición de muchos usuarios equipos que por su coste –piénsese en un microscopio electrónico o en un telescopio- sólo pueden estar en laboratorios de investigación especializados. También, en la misma línea, pueden ponerse a disposición de colegios conjuntos de prácticas que por diversas razones no hayan podido montarse en el centro.



Figura 13. Laboratorio remoto: Un invernadero de mesa.

De entre los laboratorios remotos en que hemos colaborado, presentamos a continuación el Invernadero de Mesa (Figura 13) preparado dentro del proyecto Colab por el grupo de la Universidad de Amsterdam (Amstel Instituut). Su fabricación es sencilla, prácticamente se ha elaborado con una pecera, puesta al revés sobre una plancha de metacrilato, a la que se le han practicado sistemas de ventilación y de introducción de cableado para diferentes sensores.

En particular, el usuario puede tomar medidas de CO_2 , O_2 , humedad, iluminación y temperatura. Además, puede regularse el grado de iluminación, la temperatura y la ventilación, registrándose los efectos de las acciones que el usuario ordene, sobre los parámetros medidos del sistema, en una base de datos que se puede ir analizando en línea o dejarse para ulterior estudio.

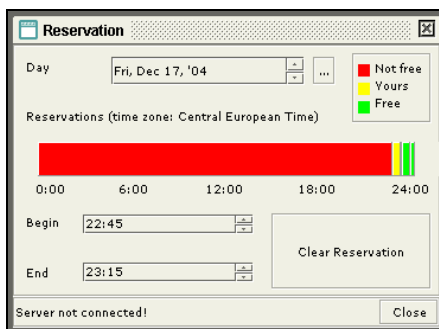


Figura 14. Reserva de tiempo de experimentación para un laboratorio remoto

En general en todos los laboratorios remotos es preciso instalar un sistema de acceso o reserva de tiempo. En el caso mostrado esto es imperativo por la larga duración de los experimentos (para ver el efecto que un aumento de iluminación tiene sobre la cantidad de CO₂, por ejemplo, es preciso dejar transcurrir muchos minutos e incluso horas). En la Figura 14 se muestra el panel de reserva utilizado en este laboratorio.

Otros laboratorios remotos desarrollados dentro del proyecto Colab han estado dedicados al estudio del vaciado/llenado de recipientes, resonancia en sistemas mecánicos, carga y descarga de condensadores [27], etc.

Entorno de aprendizaje: *Colab*

Colab [28] (Colaborative Laboratories for Europe) es un proyecto del 5º Programa Marco de la Unión Europea en el que se ha creado un nuevo tipo de entorno informatizado para permitir a los estudiantes desarrollar conocimientos flexibles en áreas científicas y aptitudes para recolectar y sintetizar información. Esto se propicia mediante procesos de *aprendizaje colaborativo* en que el alumno se ve impulsado a la búsqueda de dicha información mediante procesos activos de interrogación (“collaborative inquiry learning”).

En la Figura 15 se muestra una imagen de la interfaz de Colab, una vez pasada la ventana de entrada al entorno (“login” en un edificio específico, uniéndose a un grupo de estudiantes dado). Colab utiliza una metáfora tipo edificio, que permite distribuir a los estudiantes entre los diferentes módulos relativos al tema de estudio seleccionado (diferentes edificios equivale a diferentes temas; diferentes plantas de un edificio equivale a distintos contenidos relacionados con un mismo tema base o a diferentes niveles de dificultad del mismo. En cada planta el estudiante tiene cuatro habitaciones: un distribuidor, una sala de reuniones, un laboratorio y una sala de teoría). En cada momento la Sesión está coordinada por uno de los estudiantes del grupo, que tiene control sobre los elementos principales del entorno. Cualquiera de los componentes del grupo puede solicitar al líder que le ceda el

control, pero, aún sin él, hay multitud de acciones sobre las cuales cada miembro tiene protagonismo (puede navegar por la información libremente o adherirse a la navegación que vaya haciendo el líder; puede visualizar los datos que prefiera en las tablas o en los gráficos, puede utilizar la pizarra, el chat, etc.).

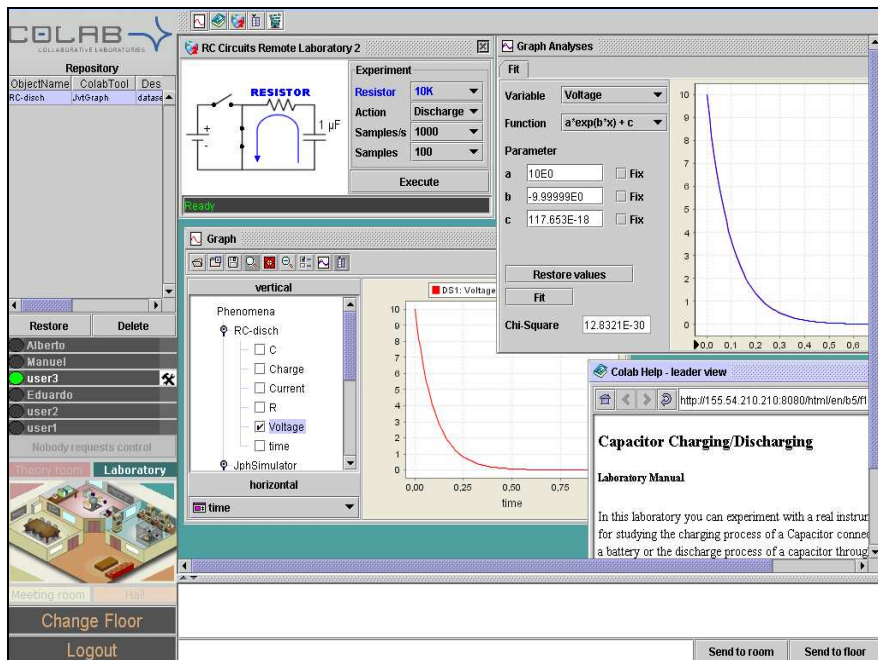


Figura 15. Interfaz principal del entorno Colab

Los temas de estudio actualmente incluidos en Colab (denominados *demostradores*, dada su utilidad como tales dentro del proyecto) tratan de:

- Edificio 1: Introducción, con dos plantas dedicadas a una guía de utilización del entorno Colab y un tutorial sobre Sistemas Dinámicos.
- Edificio 2: Gestión de Agua, con plantas dedicadas a una física básica de fluidos, a las presas, acción de la lluvia, etc.

- Edificio 3: Efecto invernadero, con plantas dedicadas a la física básica de los procesos de calentamiento, el cuerpo negro, modelo de balance energético del efecto invernadero, etc.
- Edificios 4 y 5: correspondientes a dos mini-demostradores (“showcases”) sobre resonancia en sistemas mecánicos y carga y descarga de condensadores, respectivamente.

Pero conviene resaltar que el entorno no está limitado para ser utilizado sólo en los campos de trabajo anteriormente reseñados y que dispone de una opción para configurar nuevos contenidos.

Por otra parte, el entorno de aprendizaje aúna herramientas para la colaboración, experimentación y modelado. Una vez que el alumno se ha unido a un grupo dado, se le ofrece una información básica sobre el tema de interés para el grupo en cuestión. También se le indica un objetivo básico a cubrir. Para conseguirlo el alumno puede consultar documentación, o discutir mediante una pizarra y un “chat” con los colegas con quienes colabora, o ir al laboratorio y experimentar (en un laboratorio virtual o en un laboratorio remoto como los que ya hemos mostrado).

Siguiendo un proceso análogo al que un investigador realiza en la vida real, tras familiarizarse con el fenómeno investigado el alumno discute con sus colaboradores un modelo para el sistema analizado. Dicho modelo puede implementarlo en la sala dedicada a teoría. Tras cada elaboración, el estudiante puede comparar los resultados con los obtenidos en el laboratorio (almacenados en un *repositorio*) y podrá ir refinando el modelo hasta que vaya logrando ajustarlo a los datos experimentales. Como este proceso no es lineal, el estudiante en cada momento puede ir a consultar información a la Biblioteca o regresar al Laboratorio, etc.

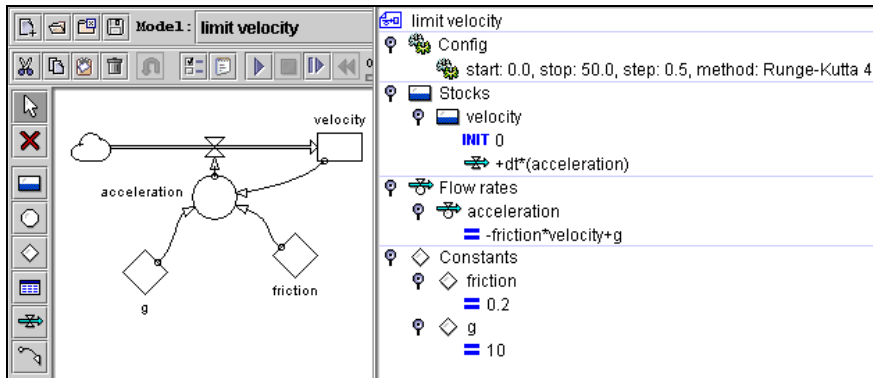


Figura 16. Herramienta de modelado tipo Sistemas Dinámicos.

El proceso de modelado se lleva a cabo con una herramienta al estilo de las utilizadas en el estudio de los Sistemas Dinámicos, como la mostrada en la Figura 17. Esta herramienta es similar a Estella [29] o Powersim [30], con la diferencia de que está disponible (gratuitamente) en Java y, al estar desarrollada por nuestro grupo (M. Celdrán), se dispone de todo el control sobre su funcionamiento y posibilidades.

Actualmente el proyecto Colab ha finalizado y se continúa con un proyecto relacionado (Recoil: Resources for Collaborative Inquiry Learning [31]) en que se está coordinando el entorno Colab con otros entornos de enseñanza como son el Viten (Noruega) y el ModelingSpace (Grecia).

Los Fislets

Los **Fislets** (Physlets en inglés), **applets** de Física, son applets de Java pequeños y flexibles que pueden ser incluidos en documentos distribuidos a través de la red (www) y utilizados como soporte pedagógico eficaz para la enseñanza de la Física. Estos applets fueron creados para la enseñanza de la Física en el Davidson College [11] y actualmente son utilizados por una amplia comunidad científica, que ha contribuido a su difusión aportando una cantidad enorme de ejemplos desarrollados con ellos. En la comunidad de habla española también están siendo difundidos, especialmente desde la publicación de un libro en castellano [12] orientado a los profesores de Física de Bachillerato, que incluye un temario

básico de Física que recorre desde tópicos muy elementales de Mecánica hasta contenidos avanzados de Electromagnetismo. En él se recogen también algunos aspectos pedagógicos relativos a la utilización de los Fislets y una sección dedicada a los que quieran hacerse sus propias simulaciones.

Hay un número pequeño de Fislets, cada uno de los cuales puede dar lugar a gran cantidad de simulaciones diferentes mediante un proceso de “scripting” desde las páginas html que los incluyen. Veamos a continuación, en la parte izquierda de la Figura 17, uno de los más completos, el “Animator”, utilizado en este caso para mostrar un movimiento en dos dimensiones. Se incluyen además sendos paneles que reciben los datos del animator y los registran gráficamente. Tanto la configuración del sistema como la conexión de datos y los controles de puesta en marcha de la simulación, paro, etc., van incluidos en la página html que a su vez contiene la descripción de la física subyacente y las actividades que, interactivamente, debe realizar el estudiante.

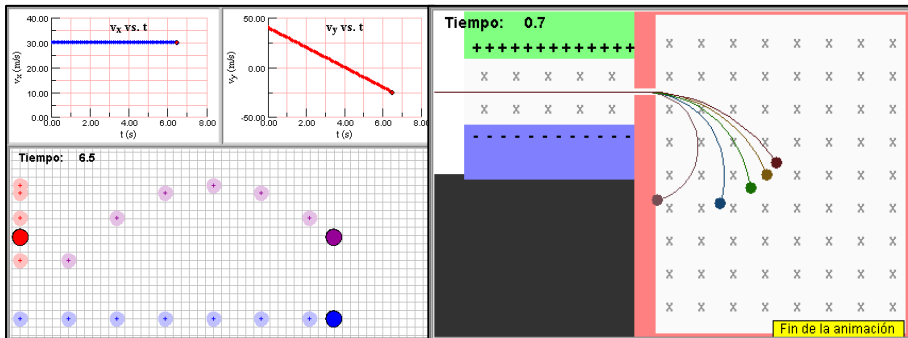


Figura 17.- Fislet “Animator” utilizado en dos simulaciones diferentes

En la parte derecha de la misma Figura mostramos el mismo Fislet pero utilizado ahora para describir la operación de un espectrómetro de masas. En este caso se incluyen, adicionalmente, las acciones de campos eléctrico y magnético cruzados en la parte de selección de velocidades y la de un campo magnético -preciso para dar movimiento circular (de radio dependiente de la masa del ión)- en la parte derecha de la animación.

Finalmente presentamos el Fislet “Poisson”, utilizado para estudiar un problema de potencial con sistema que incluye tanto metales como dieléctricos.

El sistema estudiado es un condensador, conectado a una batería, en el que se ha introducido un dieléctrico de alta permitividad. Pueden observarse las equipotenciales (mostradas en la Figura) o el campo en diagrama vectorial. También aparece información sobre la distribución de carga libre en las superficies de los electrodos metálicos.

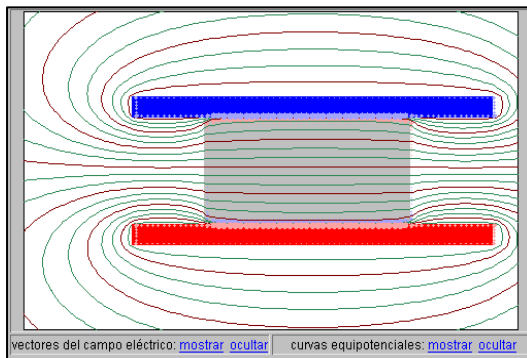


Figura 18. El Fislet Poisson utilizado para el estudio de condensadores. Se muestran las líneas equipotenciales y las cargas en las placas

Los Fislets se han utilizado ampliamente en muy diferentes formas. Una de ellas, que ha demostrado ser muy eficaz, puede verse analizada en el libro ya citado sobre Just in Time Teaching (JiTT) [7], donde se muestra la combinación de técnicas de aprendizaje activo con tecnología web. JiTT es una metodología de enseñanza-aprendizaje diseñada para involucrar a los estudiantes en dicho proceso. En esencia, se utiliza la información obtenida en tareas previas a la clase (todo el proceso vía web) para ajustar las lecciones de aula de forma que su contenido esté sintonizado con las características del auditorio al que se dirige, al tiempo que los estudiantes encuentran pronta respuesta a sus interrogantes. Este método pretende sustituir al tradicional en que los estudiantes reciben clases genéricas que pueden o no estar en línea con lo que ellos precisan.

Herramientas de autor: *Modellus* y *Ejs*

Veamos a continuación dos aplicaciones diseñadas para facilitar la elaboración de simulaciones: *Modellus* y *Ejs*. Para utilizar cualquiera de ellas el usuario debe tener conocimientos elementales de programación.

La primera de ellas es posiblemente una de las herramientas de autor más sencillas de utilizar y, puesta en manos de un profesor o de un estudiante, le permite, en el curso de una sesión de una hora, tener completa una simulación no muy compleja, con elaboración tanto de un modelo como de la animación gráfica precisa para ver la evolución del sistema seleccionado.

La segunda, el *Ejs*, requiere de un mayor esfuerzo de programación, pero es mucho más potente en lo que a complejidad de las simulaciones que con ella pueden construirse se refiere. Otra diferencia entre ellas radica en que las simulaciones construidas con *Modellus* han de verse siempre dentro del entorno de desarrollo, mientras que las simulaciones elaboradas con *Ejs* están listas para utilizarse autónomamente como aplicaciones o como applets a incluir en páginas web (html).

Modellus

Como hemos avanzado, es un entorno de desarrollo enormemente sencillo de utilizar. El entorno *Modellus* [15] consta, básicamente, de un editor de ecuaciones donde puede construirse el modelo y de un conjunto de ventanas para ligar los resultados de la simulación a animaciones, tablas, gráficos, etc.

En el ejemplo que se muestra a continuación se ha descrito el modelo (1D) de un coche acelerado en términos de la ecuación diferencial correspondiente a la 2ª Ley de Newton, que se ha desdoblado en dos ecuaciones diferenciales de primer orden.

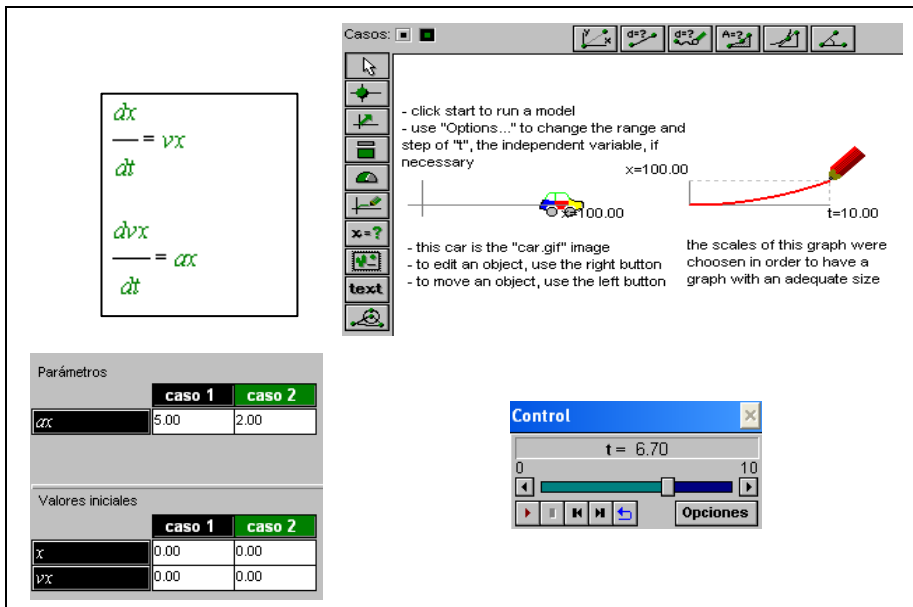


Figura 19. Modellus: ventanas de edición, casos, animación y control

Al solicitar a la aplicación que interprete el modelo, automáticamente se abre un panel donde hemos de dar los valores de las condiciones iniciales y de los parámetros del modelo, pudiendo definirse diferentes casos o situaciones. Los resultados pueden presentarse en forma de gráficos convencionales o de animaciones, tablas, etc.

El Modellus añade, a los elementos estándar citados, la posibilidad de herramientas de medición (tiempo, ángulos, distancias, etc.) e incorpora también la presentación de vídeos de forma que pueden analizarse fenómenos reales que se tomarán como base para la subsiguiente elaboración de los modelos correspondientes. En la Figura 20 se muestra un ejemplo de esta posibilidad. En la parte de la izquierda se muestra el vídeo, sobre el que pueden tomarse medidas de posiciones y tiempo, mientras que en la derecha se muestra, sobre una copia del fondo tomada de una instantánea del vídeo, los resultados de la simulación resultante del modelo elaborado.

Modellus constituye una herramienta ampliamente probada que, a nuestro juicio, puede utilizarse tanto en

Con esta situación de partida, Ejs ha sido diseñado para permitir a una persona que quiere crear una simulación, concentrar la mayor parte de su tiempo en escribir y refinar los algoritmos del modelo científico de interés (que es en lo que realmente es experta) y dedicar el menor tiempo posible a las técnicas de programación. Y, aún así, obtener un producto final independiente, de altas prestaciones y preparado para su uso en Internet.

La elección de Java como lenguaje de desarrollo se justifica por su gran aceptación por la comunidad internacional de Internet y por el hecho de que está soportado por diferentes plataformas de software. Esto significa que Ejs, y las simulaciones creadas con él, pueden usarse como programas independientes en diferentes sistemas operativos, o ser distribuidas por Internet y ejecutadas en páginas Web por los navegadores más conocidos.

Dado que existe un valor educativo añadido en el proceso de creación de una simulación, Ejs puede también ser utilizado como una herramienta pedagógica. Con él, se puede pedir a los estudiantes que creen una simulación por sí mismos, quizá siguiendo algunas líneas directrices previas dadas por el profesor. De esta manera, Ejs puede ayudar a los estudiantes a que hagan explícitos sus conocimientos y conceptos. Usado en grupos, también puede servir para mejorar las capacidades de los alumnos para discutir y comunicarse sobre cuestiones científicas.

En la Figura 21 presentamos una imagen de la interfaz del Ejs. En ella destacan las opciones de *Introducción*, *Modelo* y *Vista* que constituyen el núcleo básico de esta herramienta. En la *Introducción* se facilita al usuario un editor de páginas html con el que podrá elaborar material didáctico para acompañar a la simulación que elabore; dicho material podrá incluir no sólo información sobre el fenómeno bajo estudio sino propuesta de actividades y un pleno control de la simulación. La opción correspondiente a la *Vista* es quizá la que mayor descarga de trabajo supone para un usuario no interesado en programación; con ella se facilita grandemente la elaboración de la interfaz que incluirá todos los elementos precisos para *contener* los

aspectos de presentación visual de la evolución del fenómeno simulado, a la vez que los elementos necesarios de control de la simulación y cambio de los parámetros descriptivos del modelo. Finalmente, la opción correspondiente a *Modelo* es la que nos permite programar el modelo con el que pretendemos simular el fenómeno bajo estudio; en la construcción de este modelo es en el que el usuario desea realmente invertir su tiempo pues comprende la descripción física del fenómeno de interés en que se supone que es experto.

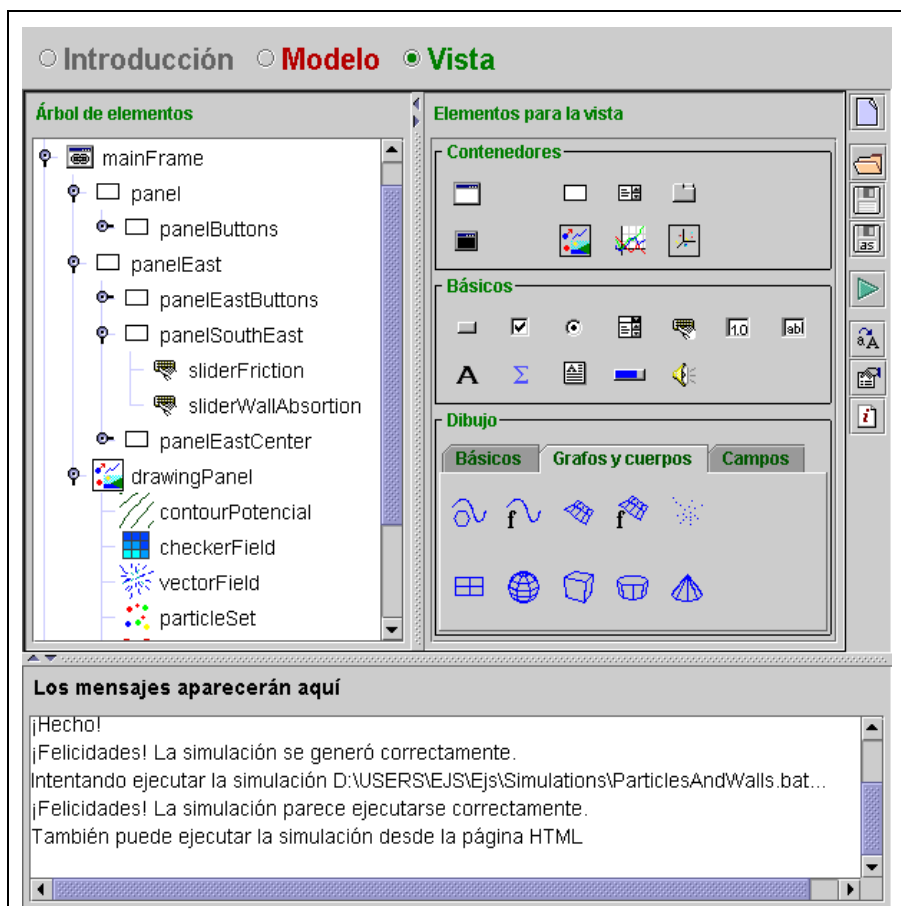


Figura 21: Interfaz del Ejs mostrando la opción *Vista*.

Centrándonos en el *Modelo* y en la *Vista*, es de destacar que ambos se pueden construir independientemente y, para ambos, Ejs suministra herramientas que facilitan la labor del desarrollador. Así, en la Figura 22 mostramos el modelo de evolución de una masa sometida a una fuerza:



Figura 22. Modelo e interfaz gráfica de un sistema masa-resorte.

Se presenta el *modelo* básico en términos de las ecuaciones diferenciales que rigen su evolución. Y Ejs dispone de los motores de integración apropiados para que el usuario no tenga que preocuparse de programar los algoritmos correspondientes. En particular, el modelo presentado puede corresponder a una masa m unida a un resorte de constante k .

Por otra parte, presentamos también una posible *vista* del sistema masa resorte. Posteriormente lo que hemos de hacer es enlazar las variables del *modelo* a las propiedades de los objetos incluidos en la *vista*. Así, por ejemplo, en el caso que presentamos uniremos la variable x del modelo a la posición vertical de la imagen de la Tierra que hemos incluido para representar a la masa m (así como al extremo inferior del resorte a que va unida la masa). Observamos que en la interfaz presentada se incluyen no sólo los objetos que adquirirán animación, a medida que se permita que el sistema evolucione, sino también los botones de control de la simulación y los deslizadores para dar valores a los parámetros del modelo (m y

k en nuestro caso). Esta interfaz básica incluye también un botón para lanzar un registrador gráfico en el que se presentan las curvas de posición y velocidad frente a tiempo en la forma usual.

No queremos terminar esta breve descripción del Ejs sin citar algunas características que estimamos hacen de él una herramienta única. En primer lugar su carácter abierto que le permite ser utilizado para construir simulaciones en campos muy variados y de diversa complejidad. También su cuidada documentación, que incluye no sólo manual de uso y de referencia sino un cuidado libro [14] con multitud de ejemplos, en el cual no sólo podremos aprender a utilizar Ejs en forma eficiente sino que también podremos profundizar en multitud de aspectos conceptuales relativos al mundo de las simulaciones. También destaca la posibilidad de enlazarlo con otras herramientas de uso generalizado en la comunidad científica como son Matlab y Simulink. Y, finalmente, pero no por ello menos importante, Ejs es gratuito, puede descargarse libremente desde la página de su autor [13].

Conclusiones

Hemos tratado de hacer en esta lección una breve revisión de los problemas que la enseñanza de la Física presenta actualmente y una propuesta de soluciones de acuerdo con la experiencia que a lo largo de los últimos años ha logrado recoger nuestro grupo de investigación.

El Ordenador y las Tecnologías de la Información y de las Comunicaciones en general, ofrecen vías por donde la enseñanza de las Ciencias y de la Ingeniería encuentra posibilidades de mejoras muy interesantes. Las diferentes administraciones son sensibles a estas tendencias, como lo muestran los diferentes portales educativos [33], [34] así como las inversiones que en dichas materias se están realizando en centros escolares. Contrasta esto con la dificultad de participar en convocatorias de proyectos locales y nacionales sobre dicha temática. Por el contrario, es de destacar el esfuerzo que a

escala europea se está haciendo, puesto de manifiesto en las convocatorias de proyectos hechas sobre el particular, donde venimos participando desde hace ya varios años en forma continuada. Son muestra de estos proyectos, los ya citados Colab [28] y CoLoS [16]; también el Smisle [35] y su sucesor el Servive [36] del que se obtuvo un entorno, Simquest, que ha recibido reconocimiento internacional (European Academic Software Award, 2000). Actualmente participamos en los proyectos Recoil [31], ya citado, y Supercomet 2 [37], ambos también orientados a la utilización de las TICs en la enseñanza de las Ciencias.

Pero considero que aún se está en la fase de experimentación y elaboración de propuestas alternativas y complementarias a las vías tradicionales de enseñanza. Para llegar a una situación donde estas alternativas, hoy por hoy estimo que sólo prometedoras, sean realmente soluciones a los problemas que tiene la enseñanza en los campos científicos y de ingeniería, es preciso un esfuerzo adicional de los profesionales de dichos campos junto con los correspondientes a los de las ciencias de la computación y a los de la pedagogía, reunidos en grupos interdisciplinarios, que podríamos denominar de *tecnología de la educación*, para tratar de ir centrando soluciones óptimas y eficaces a los problemas planteados.

La actividad investigadora en este campo debe ir encaminada a lograr un doble objetivo: hacer las Ciencias más atractivas a los estudiantes y facilitar su comprensión por los mismos. Para lograr el primer objetivo es claro que el ordenador se presenta como herramienta ideal por sus prestaciones de cálculo, gráficas y multimedia en general. Para el segundo objetivo, es preciso una investigación más profunda que estimamos debe ir orientada a nuevas formas de utilización del ordenador (y TICs en general), que tengan en cuenta al estudiante como protagonista de su propio aprendizaje y que pongan énfasis en la introducción de los conceptos más relevantes en cada campo de la Ciencia. Es en esta línea donde consideramos que viene a colación la frase de Einstein incluida en la Fig. 1, al principio de esta lección: *Hacer las cosas tan sencillas como sea posible, pero no más allá.*

Referencias¹

1. Resolución de las Naciones Unidas sobre el Año Mundial de la Física (WYP): <http://www.wyp2005.org/iyp.pdf>
2. John Stachel, *Einstein's Miraculous Year: Five Papers That Changed the Face of Physics*, Princeton University Press, Princeton, NJ, 1998.
3. Informe Pisa.- Learning for Tomorrow's World: First results from PISA 2003. Puede encontrarse en la web de la OCDE: <http://www.oecd.org>
4. TIMSS.- Trends in International Mathematics and Science Studies: <http://timss.bc.edu/>
5. E. Mazur, *Peer Instruction: A User's Manual* (Prentice Hall, 1997).
6. Redish, E. F.: Plenary talk presented at the International Conference on Physics Teaching; Guilin, China, August 19-23, 1999. <http://www2.physics.umd.edu/~redish/Papers/Guilin.pdf>
7. Novak G. et al., *Just-In-Time Teaching: Blending Active Learning with Web Technology*, Prentice Hall (1999).
Véase también <http://webphysics.iupui.edu/jitt/jitt.html>
8. Bork, A., *Learning with Computers*, Digital Press, Bedford Mass., 1981
9. J. Ogborn, M. Whitehouse, *Advanced Subsidiary (AS) Course & Advanced Level (A2) Course*. Institute of Physics Publishing. (2000)
10. A. Franco, *Curso Interactivo de Física en Internet*, <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/default.htm>
11. *Página oficial de los Physlets*:
<http://webphysics.davidson.edu/Applets/Applets.html>

¹ Sabemos de la volatilidad de las referencias a direcciones de red. Sin embargo, consideramos que, incluyéndolas, aportamos un conjunto de fuentes que pueden ser de ayuda para los interesados en esta materia.

12. Esquembre, F. et al.; *Fislets: Enseñanza de la Física con material interactivo*. Pearson Ed.- Prentice may, 2004.- <http://fem.um.es/Fislets/>
13. Página oficial del Ejs: http://fem.um.es/Ejs/Ejs_es/index.html
14. F. Esquembre, *Creación de Simulaciones Interactivas en Java*, Pearson Ed., Nov 2004.
<http://fem.um.es/Ejs/LibroEjs/index.html>
15. Página oficial del Modellus: <http://phoenix.sce.fct.unl.pt/modellus/>
16. Página oficial del grupo CoLoS: <http://www.CoLoS.org/>
17. J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, 3rd. Ed. Wiley 1998.
18. Z. Fazarinc, *A Promising Paradigm Shift in the use of Computers for Science Instruction*, Eurocon 2003, Ljubljana, Slovenia.
19. Página oficial de Fu-Kwun Hwang:
<http://www.phy.ntnu.edu.tw/ntnujava/>
20. Página oficial de Walter Fendt: <http://www.walter-fendt.de/ph14s/>
21. Martín E., Chicón R., *Collisions (2D) between Diatomic molecules*. Invited paper to: *Frontiers in Education*, pp. 684-7, Utah (USA) Nov. 6-9, 1996.
<http://fie.engrng.pitt.edu/fie96/papers/256.pdf>
22. Utilización de la simulación sobre moléculas diatómicas:
http://colos1.fri.uni-lj.si/~CoLoS/COLOS/TUTORIALS/JAVA/THERMODYNAMICS/THERMO_UK/HTML/SpHeat.html
23. Hernández M^a A., Zamarro J.M., Martín E., *Introducing Waves Using Simulations Controlled from Html Files*, *Computers and Education in the 21st Century*, 211-216. M. Ortega and J. Bravo (eds.). Kluwer Academic Publishers. ISBN 0-7923-6577-1. (2000).- *Curso de Ondas en la web*:
<http://CoLoSsrv.fcu.um.es/ondas/cursoondas.htm>
24. *Página oficial del xyzET*:
http://www.ipn.uni-kiel.de/persons/michael/xyzet/xyzethome_eng.html
25. L. Page, *The Emission Theory of Electromagnetism*, *Trans. Academy of Arts and Sciences*, Vol. 26, 1924, pp. 213-243.

26. Página oficial del *Jacob: Electricity and Magnetism by Virtual Experiments*.- <http://jacob.fe.uni-lj.si/eng/>
27. Laboratorio RC: <http://colos.fcu.um.es/rlab/>
28. Página oficial de Colab: <http://colab.edte.utwente.nl/>
29. Página oficial de Stella: <http://www.iseesystems.com/>
30. Página oficial de Powersim: <http://www.powersim.com/>
31. Página oficial del Proyecto Recoil: <http://www.recoil.nl/>
32. Teodoro, V. D. (2003). *Modellus: Learning Physics with Mathematical Modelling*. Unpublished PhD Thesis, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
http://phoenix.sce.fct.unl.pt/modellus/vdt_PhD_Thesis/vdt_PhD_thesis.htm
33. Portal educativo del Ministerio de Educación y Ciencia: <http://www.pntic.mec.es/>
34. Portal Educativo de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia: <http://www.educarm.es/>
35. Proyecto Smisle:
<http://colos.fcu.um.es/colos/projects/SMISLE/SMISLE.html>
36. Proyecto Servive (SimQuest):
<http://www.simquest.to.utwente.nl/simquest/>.
European Academic Software Award, 2000:
<http://www2000.easa-award.net/>
37. Página oficial del proyecto Supercomet:
<http://www.supercomet.no/>