

LABORATORIOS INTERACTIVOS DE SIMULACION DE PROCESOS FISICOS

Eduardo Casado Revuelta. Dpto. de Física Teórica. Facultad de Física.
Universidad de La Habana.

RESUMEN

Se señalan las características y utilidad docente de los laboratorios de simulación interactivos, las que se ejemplifican con dos de estos laboratorios dedicados a temas de Mecánica.

ABSTRACT

The main features and the teaching uses of interactive laboratories of simulation are presented. As examples, two of these laboratories devoted to Mechanics are discussed.

1. INTRODUCCION.

Las computadoras personales (PC) por su disponibilidad, rapidez de cálculo, y posibilidades de visualización de los resultados, han sido utilizadas desde hace tiempo como valiosos instrumentos para la simulación de procesos físicos con fines docentes /1,2/, actividad que se ha incrementado en los últimos años (ver, por ej./3/).

La participación del estudiante en la modelación del fenómeno estudiado y en el control de la ejecución de la simulación varía dentro de un amplio rango, que tiene en su extremo inferior los softwares demostrativos (por ej./4/) en los que el estudiante únicamente observa en el monitor de la PC la evolución de un proceso físico, sin saber cómo se modeló, y puede controlar mediante el teclado algunos (pocos) parámetros característicos del fenómeno y observar su influencia en el proceso modelado. Un ejemplo típico es la simulación de la evolución de un paquete de ondas en un medio dispersivo, o del movimiento de una cuerda con condiciones iniciales dadas. Estas demostraciones en PC, aunque valiosas como ilustración animada, son poco efectivas como instrumento de enseñanza, pues la baja participación del estudiante las hacen poco atractivas, y su total desconocimiento de qué es concretamente lo que se está computando y mostrando las

convierten en una especie de "efecto especial" cinematográfico.

En el otro extremo se encuentran los trabajos docentes de simulación en los que se exige al estudiante la modelación de un fenómeno mediante la selección y uso de métodos numéricos para la solución de las ecuaciones que lo rigen, la programación del método escogido en un lenguaje de alto nivel (FORTRAN, PASCAL, etc.) y la presentación gráfica de los resultados /5, 6/. En este caso el estudiante adquiere una gran comprensión del fenómeno estudiado y buen dominio de las técnicas de simulación, pero a costa de una gran inversión de tiempo, lo que es un factor prohibitivo en la mayoría de los cursos de física, no dedicados únicamente a la física computacional. Buena parte de ese tiempo lo consume la presentación gráfica, y es por lo tanto un tiempo en que el estudiante no aprende nada útil de física ni de matemática. Por otra parte, la necesidad de conocer métodos numéricos y lenguajes de programación atenta contra el uso de la simulación en los primeros cursos universitarios.

Un punto intermedio entre estos dos extremos son los Laboratorios Interactivos de Simulación. A explicar sus características esenciales, tal como los desarrollamos nosotros, dedicamos el próximo epígrafe. En el § 3 ejemplificamos esas características basados en dos laboratorios que

hemos confeccionado. Finalmente exponemos nuestras conclusiones.

2. LABORATORIOS INTERACTIVOS DE SIMULACION.

En nuestros Laboratorios Interactivos de Simulación (LIS) al estudiante se le entrega un software que permite simular la evolución de determinado sistema físico bajo condiciones que el propio alumno establece. Éste se ve liberado así de la tarea de seleccionar el algoritmo numérico adecuado al problema que investigará y de su programación. Todo lo que debe hacer es conformar el experimento que desea realizar, determinar las magnitudes que quiere observar (mediante la selección de diferentes posibilidades que le presenta el software en forma de menú), y dar valores apropiados a las variables relevantes para el fenómeno investigado.

Con ese proceder el alumno debe ser capaz de responder preguntas y resolver problemas que se le plantean. Algunos de ellos son difíciles de resolver analíticamente, de otros no se conoce la solución exacta. Sin embargo, su estudio numérico, -es decir, basado esencialmente en operaciones aritméticas y lógicas- es relativamente simple.

Cada LIS consta, además del software, de un folleto de laboratorio en el cual se resumen las características físicas más relevantes del proceso físico que se estudia, se explican las simplificaciones hechas en la modelación que se realiza del fenómeno y los métodos numéricos que se utilizarán, se expone la forma de utilizar el software del LIS y las posibilidades que el mismo brinda y finalmente se proponen al estudiante alrededor de una docena de problemas que debe resolver mediante la simulación del proceso adecuado.

A diferencia de las demostraciones en PC el estudiante en los LIS debe seleccionar entre un gran número de opciones las adecuadas para resolver el problema que enfrenta, dar los valores numéricos convenientes a los parámetros que intervienen en el problema y determinar qué resultado quiere mostrar en el monitor. Es decir, debe conformar su experimento numérico.

Por otra parte, aunque el estudiante no programa el algoritmo numérico que utilizará, sí lo conoce.

Sabe qué está haciendo la PC y puede de esta forma interpretar con conocimiento de causa el resultado que obtiene. De hecho, algunos de los problemas que se le proponen lo llevan a explorar los límites de validez del algoritmo que utiliza y la afectación en los resultados producto de traspasar estos límites. El estudiante no tiene que confiar ciegamente en los resultados de la PC, al contrario, se le enseña a evaluar continuamente la validez de estos resultados.

En los LIS se han incluido problemas que obligatoriamente requieren del uso de la PC para su solución (por ej. interacciones de tres cuerpos, oscilaciones no lineales). Lo que muestra al estudiante la necesidad de la investigación numérica. También se le recalca la ampliación de la cantidad de fenómenos factibles de investigar al usar métodos numéricos (por ej. las oscilaciones no pequeñas de un péndulo).

El manejo masivo de resultados numéricos (por ej. al graficar las trayectorias de fase de un péndulo, o las órbitas alrededor del Sol de dos planetas con interacción mutua) permite al estudiante descubrir comportamientos nuevos en los fenómenos estudiados (como la aparición de caos determinista bajo ciertas condiciones en el péndulo), lo que le demuestra vívidamente la importancia de la experimentación numérica en la ciencia actual.

La rapidez de respuesta del software utilizado y la presentación gráfica animada de los resultados, así como la facilidad para cambiar los parámetros del fenómeno estudiado, permiten y estimulan en el estudiante la creatividad en el planteamiento de preguntas del tipo "¿Qué ocurre si...?", de las que obtiene una rápida respuesta.

3. DOS EJEMPLOS:

GALILEO y *KOPERNIK* 17,81.

Para la mejor comprensión de las características indicadas de los LIS, describiremos brevemente dos laboratorios interactivos de simulación: *Galileo*, dedicado al estudio del péndulo y las oscilaciones lineales y no lineales, y *Kopernik*, dedicado al estudio de las fuerzas centrales y las interacciones entre partículas.

En *Galileo* el software permite observar el movimiento real y en el espacio de fase de un

péndulo matemático que puede oscilar o rotar alrededor del punto de suspensión. Para ello se resuelve numéricamente mediante el método de Runge-Kutta de orden 2 el problema de Cauchy:

$$mL \frac{d^2 \Theta}{dt^2} = -mg \sin(\Theta) - bL \frac{d\Theta}{dt} + F_0 \cos(\omega t + \phi) \quad (1)$$

$$\Theta(t_0) = \Theta_0$$

$$V(t_0) = \frac{d(\Theta)}{dt}(t_0) = V_0$$

donde m y L son la masa y la longitud del péndulo, respectivamente, Θ es el ángulo que forma la varilla del péndulo con la vertical, F , ω y ϕ son la amplitud, frecuencia y fase, respectivamente de una fuerza externa tangente a la trayectoria del péndulo, t es el tiempo, y g la aceleración de la gravedad.

Mediante varios menús, el estudiante puede seleccionar la región del espacio de fase que quiere observar, determinar el número de curvas de la familia de trayectorias de fase que estudiará, fijar el valor de los parámetros que aparecen en (1), así como el del paso de iteración en el tiempo para el método de Runge-Kutta utilizado. Además puede, si lo desea, trazar la separatriz y el límite de la zona lineal en el espacio de fase, y ver en cada instante la energía total del péndulo, sus coordenadas cartesianas o polares, el ángulo y el valor del instante de tiempo para los cuales la velocidad del péndulo es nula o tiene un extremo. El tiempo transcurrido desde el instante inicial se indica en todo momento.

El estudiante puede fijar cada qué tiempo se situará el punto representativo del péndulo en el espacio de fase, y también seleccionar una opción que permite la construcción de las curvas de resonancia.

Utilizando estas posibilidades el alumno debe, entre otros problemas, determinar la dependencia del período de las oscilaciones con la amplitud del movimiento oscilatorio del péndulo, observar el proceso transiente en un péndulo con rozamiento y fuerza externa, dar valores adecuados a los parámetros para observar movimientos sub, sobre y críticamente amortiguados, y estudiar el comportamiento caótico de un péndulo sin

rozamiento pero con fuerza externa en la zona cercana a la separatriz.

En *Kopernik* se muestra el movimiento de hasta tres cuerpos puntuales, siendo la fuerza F_i sobre el cuerpo i -ésimo, con masa m_i y vector de posición \vec{r}_i , del tipo

$$\vec{F}_i = -K_1 \frac{m_i}{r_i^{q_1}} \hat{r}_i - K_2 \frac{m_i}{r_i^{q_2}} \hat{r}_i + \quad (2)$$

$$\vec{F}_H = \sum_{j=1, j \neq i}^3 K_I \frac{m_i m_j}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|^{q_i+1}} (\vec{r}_i - \vec{r}_j)$$

donde las K , las q y \vec{F}_H son parámetros que fija el estudiante, quien además determina la región del espacio en que estudiará el movimiento de los cuerpos, sus masas, las posiciones y velocidades iniciales de los mismos y la utilización o no de varias variantes, entre las que se encuentran: mostrar el movimiento del centro de masa, la energía total del sistema, el módulo de la cantidad de movimiento angular del sistema, las coordenadas del cuerpo que desee, las coordenadas y tiempo en que la distancia de cada cuerpo al centro de fuerzas alcanza un extremo local, el tiempo y la distancia entre dos cuerpos cuando se produce un acercamiento máximo entre ellos, así como mostrar el movimiento desde un sistema de referencia ubicado en cualquiera de los cuerpos o en el centro de masa del sistema.

También debe fijar el paso de iteración en el tiempo que será utilizado en la solución numérica de la ecuación de movimiento, la cual se obtiene usando (2) y la Segunda Ley de Newton. El método *multi-step* que se utiliza se le explica al estudiante en el folleto de laboratorio en forma simple.

Dadas estas posibilidades, se le pide al alumno, entre otras tareas, que modele y estudie el movimiento alrededor del Sol de diferentes planetas con y sin interacción entre ellos, que determine los parámetros de las órbitas que obtiene de su simulación para varios planetas y los confronte con los valores conocidos, que investigue cómo se afectan la conservación de la energía y la forma de la órbita al seleccionar

diferentes pasos de iteración, que observe el movimiento de una partícula en un campo de fuerzas centrales que no varíe con el inverso del cuadrado de la distancia al centro de fuerzas, que estudie el efecto que provoca una fuerza pequeña perpendicular a la órbita de un planeta sobre dicha órbita, que investigue el movimiento que realizarían Marte, Júpiter y el Sol si Júpiter tuviera una masa 10 o 100 veces mayor.

CONCLUSIONES.

Hemos señalado las características de los Laboratorios Interactivos de Simulación (LIS) y su utilidad en la docencia de la Física, y las hemos ejemplificado con dos laboratorios concretos.

Los LIS permiten al estudiante profundizar en los fenómenos estudiados en los cursos clásicos de la física universitaria y descubrir nuevos fenómenos, hasta ahora no tratados en estos cursos. El estudiante adquiere un conocimiento visual del comportamiento de los sistemas que estudia. Todo esto se logra con un mínimo de tiempo del estudiante, lo que permite la inclusión de los LIS como prácticas de laboratorio numérico en los cursos universitarios habituales, o como tareas que los alumnos deben resolver fuera de clases.

Los LIS introducen al estudiante en la Física Computacional, actividad que cada día cobra más importancia en la investigación contemporánea en Física, y debe estar por lo tanto presente en los

currículum actuales. La habilidad en el cálculo numérico y su aplicación en la solución de problemas físicos está llegando a ser tan importante como el uso del cálculo diferencial e integral, por lo que los cursos universitarios deben preparar al estudiante para esto. En este sentido los LIS son herramientas prometedoras.

Todo aquel interesado en recibir un DEMO de *Galileo* y *Kopernik*, lo recibirá a vuelta de correo si nos envía un diskette y su dirección.

REFERENCIAS.

M. T. Frank y E. Kluk: *Phys. Teacher*, 308, (May 1980).

A. Bork et al.: *Science NECC*, 179 (1981).

R. Erlich et al: *Computers in Physics* 6, 90 (1992).

R. Martínez: Software "Q-Onda", TNSoft, La Habana (1991).

J. V. Kinderman: *Am. J. Phys.* 58, 568 (1990).

G. L. Kotkin: "Modelación de Procesos y Fenómenos Físicos" (en ruso). NGU, Novosibirsk 1989.

E. Casado: Preprint ISCTN CB-93-1, La Habana, 1993.

E. Casado: Preprint ISCTN CB-93-2, La Habana, 1993.