

# Modelado de Sistemas Dinámicos y Educación en Ciencias e Ingeniería

Joaquín Medin Molina <sup>1</sup>

Resumen - En este ensayo se consideran algunos de los problemas en la enseñanza de Ciencias e Ingeniería, que la metodología de dinámica de sistemas puede ayudar a resolver de manera efectiva. Sostenemos que la modelación mediante dinámica de sistemas añade valor a la experiencia educativa por medio de: (a) Explicitar los modelos mentales de los estudiantes a través de la construcción de mapas conceptuales en la forma de diagramas de stocks y flujos. (b) Ser adecuada para un modo de enseñanza de taller, centrado en el que aprende y no en el maestro; (c) Reducir las barreras matemáticas para el estudio riguroso de sistemas complejos e interesantes; (d) Proveer modelos genéricos o arquetipos que promueven la transferencia del aprendizaje en un dominio a diferentes dominios; (e) Integrando la computadora y la mente en un sinergismo que hace crecer nuestras capacidades de construir y simular modelos formales; (f) Reivindicar la importancia central del tiempo como una categoría fundamental para entender la realidad. Se presentan algunos resultados para ilustrar este potencial educativo de la modelación dinámica en la enseñanza de las ciencias y la ingeniería a nivel subgraduado. Se hacen algunos señalamientos generales sobre las destrezas de pensamiento que constituyen los métodos de modelación dinámica.

Palabras claves – Dinámica de sistemas, Enseñanza centrada en el aprendizaje, Modelos

---

## Dynamic Systems Modeling and Science and Engineering Education

Abstract – Some of the problems in the teaching of science and engineering, which the methodology of dynamic modeling can help to address effectively, are considered in this essay. We submit that system dynamics modeling adds value to the educational experience by: (a) Eliciting the mental models of students through the construction of conceptual maps in the form of stock and flow diagrams; (b) Being congenial with a workshop mode of teaching, centered in the learner and not in the teacher; (c) Reducing the mathematical barriers to a rigorous study of complex and interesting systems; (d) Providing generic models or so called archetypes that promotes the transference of the learning in one domain to different domains; (e) Integrating the computer and the brain in a synergism that builds up our capacity to construct and simulate formal models; (e) Vindicating the centrality of time as a fundamental category to understand reality. Some examples are presented to illustrate this educational potential of dynamic modeling for the teaching of science at the undergraduate level. Some general remarks are made related to the thinking skills that constitute the dynamic modeling method.

Keywords – Learner-centered education, Models, System Dynamics

---

### INTRODUCCIÓN

La investigación educativa en las décadas pasadas ha llegado a conclusiones que ponen en duda la efectividad de la enseñanza tradicional en las ciencias. En relación con conceptos científicos medulares como fuerza, energía, calor, equilibrio químico, evolución biológica, los estudiantes tienden a retener sus preconcepciones aún después de la experiencia educativa<sup>2</sup>. En el caso particular de la Física los estudiantes la conciben como un agregado de formulas específicas relacionadas a problemas específicos y no como un sistema formado por un número limitado de conceptos y

principios de gran aplicabilidad y generalidad. Los estudiantes pueden aprender a resolver los problemas típicos de los libros de textos pero raramente aplican los conceptos físicos a fenómenos fuera del contexto del laboratorio o la clase. En el salón de clase los problemas cuantitativos en los que el estudiante debe sustituir números en ecuaciones para arribar al resultado correcto, dominan sobre los cualitativos en los que el estudiante debe esforzarse en conceptualizar un fenómeno a partir de sus propias ideas. De suerte que las oportunidades del estudiante para experimentar con ideas (contrastarlas y explorar sus consecuencias) son a lo sumo muy limitadas y por consiguiente la enseñanza tradicional estimula poco el

---

<sup>1</sup> Departamento de Física, Universidad de Puerto Rico en Bayamón, jmedin@uprb.edu

Note. The manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on October 20<sup>th</sup>, 2007; accepted on November 15<sup>th</sup>, 2007. This paper is part of the *Latin American and Caribbean Journal of Engineering Education*, Vol. 2, No. 1, pp. 75-82, Octubre 2007. © LACCEI, ISSN 1935-0295.

entendimiento conceptual de la ciencia. En general este modo de enseñar fomenta la imagen de la ciencia como un cuerpo de creencias proclamadas como verdaderas por los científicos y consagradas en los libros de texto. Es decir la ciencia se enseña paradójicamente como si fuera pseudociencia<sup>3</sup>.

Debido a su carácter fragmentario la educación tradicional en ciencias y en otras disciplinas se torna progresivamente irrelevante a medida que las sociedades se tornan más complejas y fuertemente acopladas. Las ciencias físicas, biológicas, sociales y las humanidades se enseñan como si fueran inherentemente diferentes unas de otras. Por ejemplo la estructura dinámica fundamental que causa que un péndulo oscile, es la misma que causa las oscilaciones de una comunidad biológica de presas y predadores, o la estructura central que causa las fluctuaciones en empleos e inventarios durante el ciclo económico. Se enseña un currículo del cual se espera que el estudiante sintetice una visión del mundo natural y social, sin embargo el marco conceptual para construir esa síntesis no suele enseñarse explícitamente. Se espera que el estudiante unifique fragmentos de su experiencia educativa que sus propios mentores no han alcanzado a unificar.

A riesgo de simplificar demasiado podemos decir que la dimensión temporal ha sido otra de las grandes ausentes en la educación tradicional en todos los niveles. ¿Qué causa el cambio del pasado al presente y del presente al futuro? ¿Cómo las decisiones del presente determinan el futuro hacia el cual nos dirigimos? Las respuestas a tales preguntas acerca de como las entidades cambian en el tiempo se encuentran en el comportamiento dinámico de sistemas físicos, personales y sociales. Las pautas dinámicas de conducta que son comunes a todos esos sistemas pueden enseñarse como tales y pueden ser entendidas. Las imágenes estáticas del mundo real que nos brinda la educación están en contradicción con los problemas del mundo que son dinámicos. El cerebro humano es bastante efectivo para captar relaciones estáticas, pero es muy pobre para simular por sí solo el comportamiento de sistemas interactuantes que cambian en el tiempo<sup>4</sup>. El ordenador en conjunto con los programas pertinentes son instrumentos esenciales para esa faena.

Es a partir del reconocimiento de este déficit educativo y de sus orígenes, algunos educadores hacen las siguientes propuestas:

- Desplazar el foco de la educación científica de la memorización de información o la realización de cálculos cuantitativos a la formulación y discusión cualitativa de las hipótesis que configuran nuestros modelos mentales de la realidad.
- Ofrecer a los estudiantes la oportunidad de explorar sus ideas acerca de problemas científicos relevantes y sobre maneras de abordarlos.
- Propiciar el estudio de casos realistas que involucren sistemas complejos, minimizando las dificultades y prerequisites matemáticos.
- Proveer explícitamente un marco conceptual transdisciplinario que facilite que el estudiante pueda sintetizar lo estudiado en los diferentes cursos y transferir lo aprendido.
- Incorporar el ordenador en la enseñanza como amplificador del cerebro humano pensante y orientarlo

hacia usos noveles, difíciles o imposibles de alcanzar en el modo tradicional de enseñanza.

- Vindicar el tiempo como categoría fundamental para entender la realidad, es decir reforzar las perspectivas dinámicas sobre las estáticas, el estudio de procesos sobre el estudio de eventos o estados de cosas.

### SISTEMODINAMICA COMO OPCIÓN EDUCATIVA

La construcción de modelos computarizados guiados por el enfoque de modelado de sistemas dinámicos, que designaremos por sistema-dinámica, puede contribuir significativamente a hacer realidad todas estas propuestas. En particular el modelado sistema-dinámico:

- requiere del estudiante y facilita la construcción de mapas conceptuales rigurosos del sistema estudiado
  - se ajusta naturalmente a un modo de enseñanza tipo taller, centrada en el estudiante y no en el profesor.
  - reduce considerablemente las barreras matemáticas para investigar sistemas interesantes y complejos
  - provee conceptos y arquetipos conceptuales portátiles que pueden ser transferidos a través de las disciplinas
  - requiere el uso combinado del cerebro y el ordenador para hacer lo que cada cual hace mejor: el cerebro crea o recrea los modelos y el ordenador los simula.
- pone en vigor una metodología en la que la pregunta científica fundamental no es ¿Cómo son las cosas?, sino que es ¿Cómo cambian las cosas?

La sistemodinámica es una metodología general desarrollada en los años sesenta por el profesor de ingeniería Jay Forrester<sup>1</sup> de MIT para analizar fenómenos dinámicos de cualquier índole mediante la construcción de modelos simulables con la ayuda del ordenador. La sistemodinámica propone que existe una analogía entre cualquier sistema dinámico y un sistema hidráulico de vasos comunicantes. Esto equivale a suponer que los comportamientos complejos que ocurren a nuestro alrededor pueden describirse y explicarse mediante sistemas de propiedades que forman estructuras de niveles (stocks) y flujos (flows) articulados en bucles (loops) de realimentación(ver ejemplo ilustrativo en figura 1). Los modelos de estos sistemas pueden ser siempre construidos con tres tipos de variables: variables de estado o niveles (análogas a los tanques de reservas de agua y representadas por íconos en forma de rectángulos), sus tasas absolutas de cambio o flujos (representadas por tubos con una válvula central), variables auxiliares o convertidores (representadas por círculos), y relaciones causales que se designan como conectores (representados por flechas que se originan en la variable influyente y terminan en la variable influida).

La aplicación de este modo de pensar transdisciplinario a la educación en ciencias es todavía a escala planetaria una empresa pequeña pero que recientemente da indicios de cobrar renovados bríos. La razón primordial de este auge es el desarrollo y la disponibilidad creciente de ordenadores y programas como Stella (VENSIM, POWERSIM, etc.). Bruce Hannon, en el prefacio de su libro *Dynamic Modeling*, señala: "La democratización del modelado del mundo real indica que estamos en los comienzos de una revolución en la educación y el pensamiento... que hará del modelaje un componente

integral de la educación general junto a la literacia y numeracia”

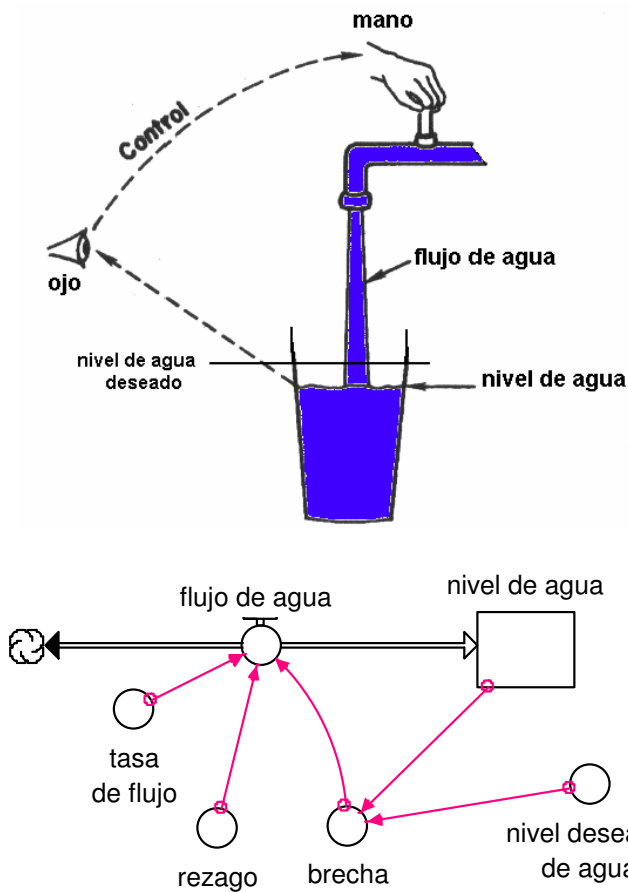


Figura 1: Elementos fundamentales del modelado sistemodinámico.

A continuación se expondrá un modo de implementar este enfoque con ejemplos tomados de la práctica de enseñanza del autor de la Física introductoria universitaria y de un curso de Sistema-dinámica diseñado y ofrecido durante los pasados seis años.

**MODELADO DINAMICO Y MAPAS CONCEPTUALES**

El modelado sistemodinámico requiere que el estudiante analice el fenómeno y desarrolle un modelo. Se introduce al estudiante a la estrategia del experto: concentrarse primero en un análisis conceptual y semi-cuantitativo del sistema. Esto se articula en un diagrama similar a un mapa conceptual que se conoce como Diagrama de Forrester. El diagrama representa gráficamente la estructura conceptual del modelo. Los conceptos pertinentes y sus relaciones vinculantes se ponen de manifiesto a través del diagrama. El programa de modelado orienta al estudiante tanto en la fase de construcción del modelo como en la de exploración de su adecuación mediante simulaciones.

En la Figura 1 se ilustran los elementos fundamentales del modelado sistemodinámico. Arriba se presenta el sistema cuyo mapa conceptual sistemodinámico (diagrama de Forrester)

aparece a la derecha del dibujo. El nivel de agua en el vaso es controlado por el flujo de agua hacia el vaso, el que a su vez es regulado por la posición del grifo, que a su vez es ajustada por la persona de acuerdo con la brecha entre el nivel de agua en el vaso y el nivel deseado. El flujo circular de información y materia constituye un bucle de realimentación o cadena circular de causas y efectos.

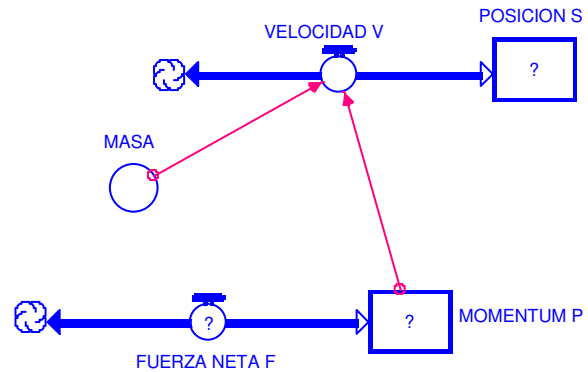


Figura 2: Estructura modular de los modelos de mecánica newtoniana.

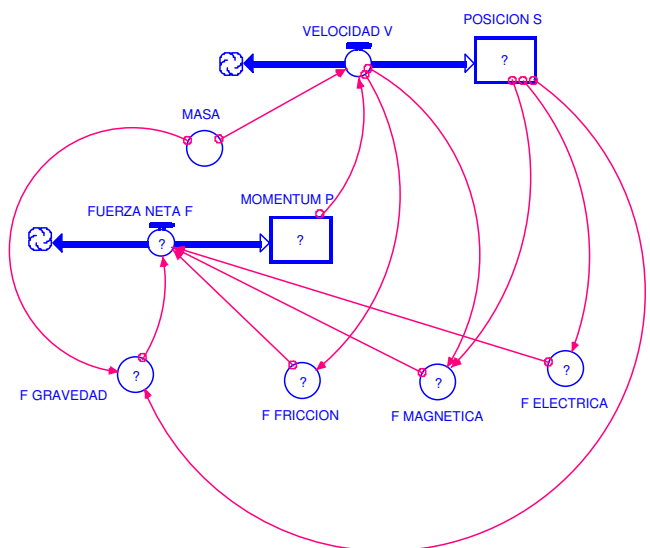


Figura 3: Bucles de retroalimentación en el modelo canónico newtoniano.

En el ámbito de la Física del movimiento los modelos tienen una estructura común que puede visualizarse fácilmente con el diagrama de Forrester, según se muestra en la figura 2. La fuerza neta ejercida sobre un objeto causa un cambio en su momentum  $dP/dt = F$  (segunda ley de Newton). La velocidad del objeto es  $V = P/M$ . La velocidad es la tasa de cambio de la posición:  $dS/dt = V$ . Los signos de interrogación (?) son puestos por el programa para indicar que es necesario especificar la fuerza y las condiciones iniciales de momentum y posición para poder hacer la simulación del modelo.

El estudiante puede reproducir fácilmente esta estructura modular cuando se enfrenta a nuevos problemas. Su esfuerzo debe concentrarse en precisar las fuerzas sobre el cuerpo en una situación determinada. Las fuerzas pueden ser constantes (peso), o depender de la posición (gravitación), la velocidad

(fricción) o del tiempo, pero siempre se preserva la estructura medular (ver figura 3).

El estudiante tiene que seguir siempre el mismo principio: hallar las fuerzas, encontrar de que éstas dependen y luego sumarlas para hallar la fuerza neta. La misma estructura medular aplica a un péndulo, paracaidista, un meteorito, un planeta, un ión en un espectrómetro de masas y a una partícula alfa dispersada por un núcleo. Afortunadamente existen estructuras conceptuales medulares en virtualmente todos los ámbitos de la Física que se pueden visualizar efectivamente con diagramas de Forrester. El estudiante puede internalizar que la Física es “fácil” en el sentido de que muchas situaciones diferentes pueden explicarse con un pequeño arsenal de instrumentos conceptuales. Un análisis equivalente podría hacerse de dominios importantes de la Química (Vg. Cinética química), de la Biología (Vg. Teoría darwiniana de la evolución), de la Psicología humana (Vg. Dinámica del “burnout”), de la Economía (Vg. Teoría del ciclo económico), Sociología (Vg. Dinámica de migraciones y movilidad social), Historia (Vg. Colapso de una civilización: Maya), Filosofía de la ciencia (Vg. Modelo Kuhniano del desarrollo de las teorías científicas), y la simulación de procesos dinámicos en la literatura de ficción (Vg. Dinámica del deseo de venganza de Hamlet).

#### LA SISTEMODINAMICA AYUDA A INVESTIGAR FENÓMENOS COMPLEJOS

Con la ayuda de las herramientas de la sistemodinámica pueden examinarse muchos efectos interesantes de la vida real que suelen ser excluidos de los cursos. Esto se refiere a lo siguiente:

- El trabajo difícil y tedioso de resolver (integrar) las ecuaciones matemáticas es asumido por el programa. La tarea del estudiante consiste en formular las ecuaciones, en vez de resolverlas.
- El diagrama de Forrester provee una visión gráfica de conjunto que muestra las interrelaciones entre las cantidades más directamente que lo que puede hacerlo un conjunto de ecuaciones. Esto es particularmente importante al estudiar fenómenos complejos con muchas propiedades interdependientes. (ver figura 3 y 4, caída en paracaídas y caída de meteorito).
- Los modelos de sistemas complejos pueden construirse a partir de modelos simples por una secuencia de extensiones locales, sin que importe el orden particular de la secuencia. (ver figuras 3 y 4)
- Los nombres de las variables pueden cambiarse en cualquier momento, para aclarar su significado puesto que todas las ecuaciones afectadas se alteran automáticamente.

Al intentar modelar situaciones realistas y complejas en las que las soluciones estándar fallan, el estudiante se percata de que es esencial entender cualitativamente los conceptos y principios físicos aplicables.

El modelo del paracaidista se puede extender fácilmente a la caída de un meteorito. El cambio central es la adición de un segundo bucle de retroalimentación que conecta la densidad del aire con la altura (ver figura 4). En el paracaídas la

densidad del aire se considera constante. La masa y la densidad del meteorito se modelan como parámetros separados para poder calcular las secciones transversales de meteoritos de diferentes materiales (hierro y pétreos).

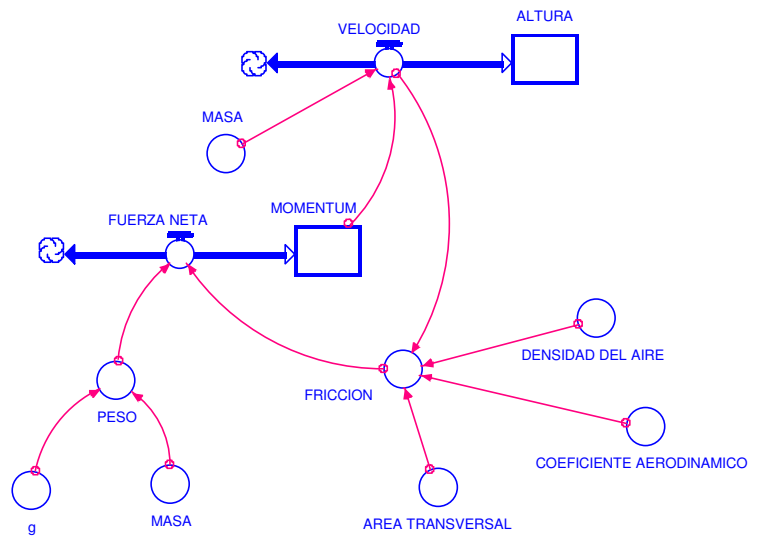


Figura 4: Salto en paracaídas. La parte superior consiste del modelo modular. Sobre el paracaidista actúan dos fuerzas: peso y fricción. El bucle de retroalimentación demuestra que la fricción es afectada por la velocidad.

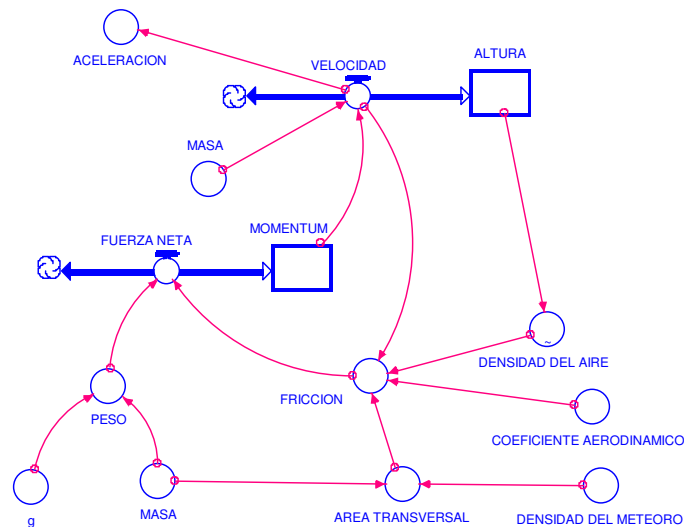


Figura 5: Diagrama de Forrester de la caída de un meteorito.

El Apéndice I contiene las ecuaciones del modelo del meteorito, organizadas según el programa sistemodinámico STELLA. Antes de simular el modelo se le pide al estudiante que trate de anticipar los resultados de la simulación en lo referente a la velocidad y a la aceleración del meteorito. Los resultados de simular este modelo son sorprendentes (ver figuras 6 y 7): A los estudiantes les resulta estimulante desarrollar y simular este modelo pues hay incertidumbre sobre los resultados de la simulación. En la enseñanza convencional este fenómeno está excluido de los cursos introductorios debido a la complejidad de su descripción matemática. La dinámica de sistemas rompe

con esa limitación y extiende el alcance de la enseñanza mas allá de la caída libre en el vacío.

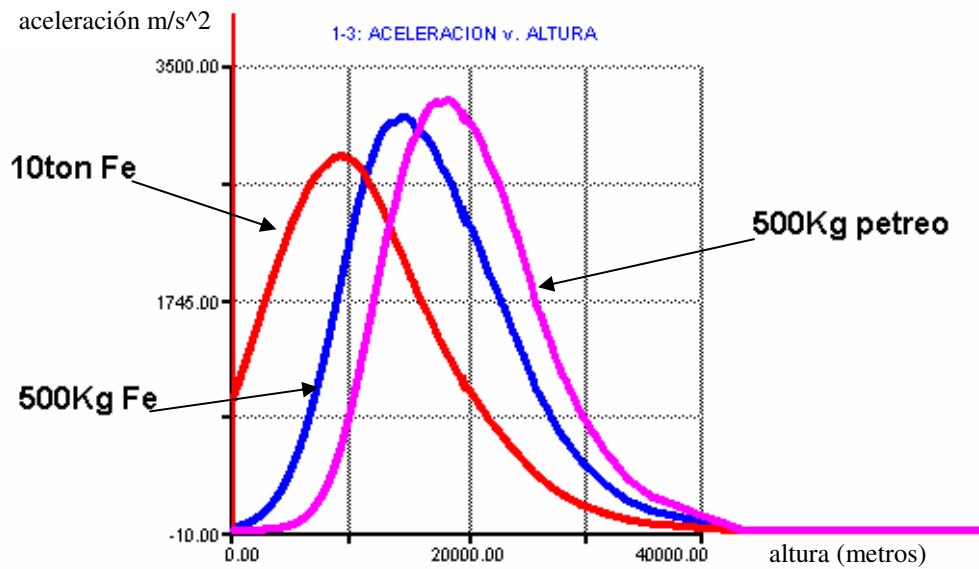


Figura 6: Deceleración de diferentes tipos de meteoros predichas por el modelo. Compárese con la aceleración de caída libre de  $-10\text{m/s}^2$ . A un meteorito de piedra de 500kg le corresponde la curva más a la derecha de la gráfica, a un meteorito de hierro de 500kg le corresponde la curva del medio y a un meteorito de hierro de 10 ton la curva más a la izquierda. La aceleración tiene un pico de varios centenares de g. Esto explica porque la mayoría de los meteoros se desintegran en la atmósfera debido a la influencia de la fuerza de fricción.

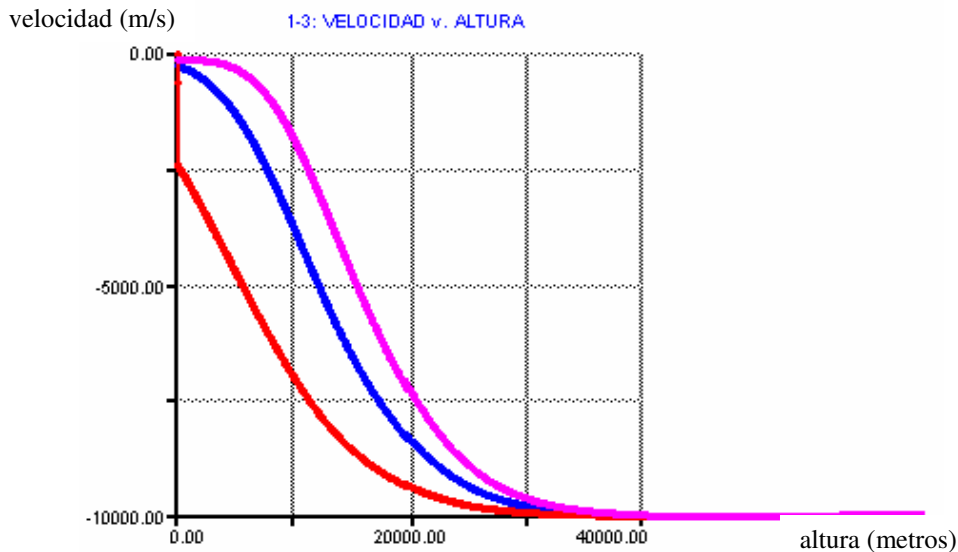


Figura 7: Velocidades de diferentes tipos de meteoros, de izquierda a derecha: 10ton de Fe, 500kg de Fe y 500Kg. de piedra. El meteorito de piedra cae casi a velocidad cero al llegar a la superficie. El meteorito grande golpea la tierra con un impacto enorme.

**LA DINÁMICA DE SISTEMAS FOMENTA UN APRENDIZAJE CENTRADO EN EL ESTUDIANTE**

El aprendizaje es un proceso activo de construcción por el alumno de esquemas conceptuales. Esta perspectiva, llamada constructivista se ha convertido en el paradigma dominante sobre los procesos de aprendizaje. El profesor no puede transferir información a la mente del estudiante. Todo lo que el puede hacer es crear un ambiente adecuado de

aprendizaje en el que el estudiante tenga la oportunidad y motivación de desarrollar sus ideas. Si queremos que el estudiante entienda (construya) ideas científicas debemos crear ambientes que fomenten este logro. La sistemodinámica ayuda a crear estos ambientes porque requiere que el alumno se involucre en un análisis cualitativo del problema (orientado por principios e hipótesis) antes de que pueda trabajar con las ecuaciones y datos numéricos (calibración del modelo según la terminología de la dinámica de sistemas). Las cantidades

pertinentes se deben definir y la estructura conceptual del modelo se debe formular previamente a la definición de relaciones funcionales. De esa forma se introduce al estudiante a la estrategia que suelen utilizar los expertos.

En el proceso de construcción del modelo los estudiantes ponen de manifiesto sus ideas. Transfieren sus modelos mentales internos a modelos externos. La sistemodinámica reta al estudiante a que precise sus ideas, de modo que estas puedan discutirse con propiedad. El diagrama de Forrester propicia la discusión en clase o en grupos más pequeños acerca de las ideas subyacentes a este mapa conceptual gráfico.

El modelaje sistemodinámico con ordenador permite experimentar con ideas. Los supuestos teóricos se visualizan mediante representaciones icónicas. Se clarifican las consecuencias de esos supuestos en relación con el comportamiento del sistema. La confrontación entre sus ideas intuitivas y las ideas validadas por la ciencia puede ayudar al estudiante a adquirir conciencia de la diferencia y a rectificar sus preconcepciones informales erróneas.

#### **DESTREZAS DE PENSAMIENTO CONSTITUTIVAS DE LA SISTEMODINAMICA**

¿Qué destrezas de pensamiento configuran el pensamiento sistemodinámico? Barry Richmond (2000), el creador del programa STELLA identifica seis destrezas de pensamiento constitutivas de la sistemodinámica (SD): pensamiento dinámico, pensamiento generalista, pensamiento sistémico, pensamiento estructural, pensamiento en bucles, pensamiento operativo y pensamiento científico. Todas ellas se articulan en la sistemodinámica para constituir un paradigma que se opone al paradigma de pensamiento dominante en nuestra cultura: pensamiento estático, especialista, individualista, desestructurado, factorial, pasivo y anticientífico.

#### **Pensamiento Dinámico Versus Pensamiento Estático**

Reaccionar a estados de cosas o a eventos se ha convertido en el modo dominante de actuar de nuestras instituciones políticas, educativas y en el foco de atención predominante de los medios de comunicación. Esto refleja un pensamiento congelado en un punto del tiempo (estados), dos puntos del tiempo (eventos) o un tiempo indeterminado (sucesión de estados de equilibrio) que designamos por pensamiento estático. La SD, en cambio, nos convoca a centrar nuestro pensamiento sobre procesos: trayectorias en el tiempo que manifiestan el devenir del objeto estudiado. Los estados del sistema se explican como los resultados en instantes particulares de los procesos presentes en el sistema. Los estados de equilibrio en particular representan balances alcanzados en esos procesos o flujos y no su cesación, lo que implica una renovación o sustitución constante de los ítems que componen las variables de nivel o de estado del sistema.

#### **Pensamiento Generalista versus Pensamiento Especialista**

Es sabido que en nuestra cultura se sobrevalora la especialización y se menosprecia al generalismo, de quien

muchos piensan es una especie extinta o en vías de extinción a raíz de la explosión histórica de la información de toda índole. La sistemodinámica apuesta al generalismo y reclama que todavía existe un nicho para ella en el espacio cultural, desde el cual debería ser justipreciada nuevamente. Metafóricamente el pensamiento generalista alcanza una concepción definida del “bosque”, aunque sea en virtud de o a expensas de una concepción borrosa de los “árboles”: una visión en lontananza y de conjunto del sistema en vez de una visión detallada y particularizada. En todo caso lo que se busca es potenciar la mirada del generalista y no la del especialista.

#### **Pensamiento Sistémico Versus Pensamiento Individualista**

Cuando pensamos que son las interacciones entre los componentes y no los componentes en sí mismos lo que determina el comportamiento del objeto estudiado, estamos pensando sistémicamente. En SD se suele decir que la estructura y en particular su estructura de bucles (ver más adelante) determina la dinámica. Lo que esto quiere decir es que a través del modelo se busca una representación del objeto en la que la estructura interna del sistema (conjunto de relaciones causales o funcionales entre las variables) produzca los cambios del sistema. Por ende no son tampoco las condiciones iniciales del sistema, ni factores exógenos los responsables de lo que sucede. Como el sistema es el “culpable”, cambiar el sistema es la solución, si se precisa una solución; y la solución debe buscarse al interior del sistema mediante cambios de su estructura o parámetros internos.

#### **Pensamiento En Bucles Versus Pensamiento Factorial**

La tendencia espontánea de muchos aficionados o expertos al tratar de entender comportamientos en sistemas que rebasan cierto mínimo de complejidad es a pensar buscar una lista de factores, relacionados o no entre sí, que inciden causalmente sobre la variable de estudio. Desde la perspectiva sistemodinámica el pensamiento multifactorial suele ser una acometida inmadura del problema, por que se pierde de vista un hecho fundamental de los sistemas dinámicos complejos: la existencia de bucles de re-alimentación. Los bucles son cadenas circulares de relaciones causales o funcionales entre variables. Para la SD, la estructura de bucles de re-alimentación del sistema es donde debe buscarse la explicación cualitativa más certera y fecunda de su dinámica.

#### **Pensamiento Estructural versus Pensamiento Desestructurado**

La SD concibe que todo sistema dinámico, irrespectivo de su naturaleza concreta, tiene un estado conformado por sus propiedades acumulativas (acervos), expresables por variables de nivel. Los cambios de estados se deben a procesos expresables mediante variables de flujos. Llamaremos pensamiento estructural a la representación de un sistema como un conjunto articulado de niveles y flujos, complementados con variables auxiliares (convertidores) que representan variables intermediarias y parámetros del sistema. Determinar los niveles y flujos pertinentes de un sistema

equivale a encontrar la estructura dinámica medular del sistema. El pensamiento estructural puede extenderse a los llamados sistemas blandos, que son aquellos que tienen propiedades de difícil o imposible medición, en contraposición de los sistemas duros en los que sus variables son todas operacionalizables en principio. Los niveles y sus flujos son los constituyentes esenciales de cualquier bucle de realimentación. El bucle canónico de longitud mínima se configura con un nivel y su flujo correspondiente. Pensar un sistema en términos de flujos y niveles es pues la destreza de pensamiento sistemodinámica fundamental. Habitarse a pensar de esta manera requiere práctica y esfuerzo sostenido para domar nuestro impulso natural hacia un pensamiento desestructurado que no reconoce la posibilidad de estructurar en niveles y flujos cualquier clase de sistema dinámico.

### Pensamiento Operativo versus Pensamiento Pasivo

Desde sus orígenes vinculados a la ingeniería y a la administración de empresas la SD no solo pretende entender como se comporta el sistema pasivamente (sin interferir con él), sino que también se plantea como alterar ese comportamiento operando sobre la estructura y parámetros del sistema. Por eso al simular el sistema se generan escenarios alternativos y se estudia la sensibilidad del sistema a cambios con el fin de identificar aquellos parámetros llamados de apalancamiento (leverage), que al variarse dentro de un margen razonable, alteran significativamente el devenir del sistema. Pensar operativamente conlleva hacerse las preguntas: ¿Qué hubiese sucedido si .....?; ¿Qué podría suceder si .....?

### Pensamiento Científico versus Pensamiento Acientífico

Finalmente, y no por ello menos importante, la Sistemodinámica es un componente del pensamiento científico que por su naturaleza hipergeneral tiene una intersección no nula con la ontología y epistemología de la ciencia. Por consiguiente los modelos SD deben ser contrastables empíricamente y conceptualmente. Esto significa que los

modelos SD deben confrontar sus escenarios con los datos empíricos disponibles para su validación o refutación empírica y buscar su compatibilidad con el mejor conocimiento que nos brinda la ciencia natural o social.

### REFLEXIÓN FINAL

Es plausible plantear que el mundo que hemos creado como consecuencia del modo de pensamiento que ha dominado hasta el presente ha generado problemas insolubles al pensamiento que lo suscitó. En la medida que ese pensamiento dominante está en oposición al pensamiento SD, cabe al menos especular sobre el valor potencial que tendría la difusión masiva de ese pensamiento a través de todo el sistema educativo formal desde el nivel preescolar hasta el nivel universitario posgraduado. Esa fue y es la utopía realizable no solo de J. Forrester, fundador de la SD; sino de muchos de los que creemos como Martí que ser maestro es “dar vuelo a las alas de la razón”.

### REFERENCIAS

- Forrester, J. (1991), System Dynamics and the Lessons of 35 Years, Chapter for *The Systemic Basis of Policy Making*, edited by Kenyon B. De Greene, M.I.T. Press.
- Duit, R. y Pfundt, H. (1991), *Alternative Frameworks and Science Education*, Third edition. Kiel, Institute for Science Education.
- Medín, J. y Nuñez, E. (2000), Pseudociencia y Cultura de Masas Partes 1 y 2, *Milenio*, Vol. 4, p 9-59.
- Forrester, J. (1994), Learning through System Dynamics as Preparation for the 21<sup>st</sup> Century, Keynote Address for *Systems Thinking and Dynamic Modeling Conference for K-12 Education*,. Ver en INTERNET las siguientes direcciones: <http://www.hps-inc.com> y [WWW.SYSDYN.MIT.EDU](http://WWW.SYSDYN.MIT.EDU).
- Richmond, B. (2000), *The Thinking in Systems Thinking*, Pegassus Communications.

### APÉNDICE: ECUACIONES DEL MODELO DE METEORO USANDO EL PROGRAMA STELLA

Para las ecuaciones del meteoro, los datos de la relación entre densidad y altura graph (altura) se toman del “Handbook of Physics”.

```

ALTURA(t) = ALTURA(t - dt) + (VELOCIDAD) * dt
INIT ALTURA = 100000 {metros, aproximadamente el borde de la atmósfera}
INFLOWS:
VELOCIDAD = MOMENTUM/MASA { metros/seg}
MOMENTUM(t) = MOMENTUM(t - dt) + (FUERZA_NETA) * dt
INIT MOMENTUM = -10000{velocidad inicial en kg/seg}*MASA { masa del meteoro en kilogramos}
INFLOWS:
FUERZA_NETA = PESO+FRICCION { newton}
ACELERACION = DERIVN(VELOCIDAD,1){ Metros/seg^2}
AREA_TRANSVERSAL = (3*MASA/(4*PI*DENSIDAD_DEL_METEORO))^(2/3)*PI { metro^2}
COEFICIENTE_AERODINAMICO = 2 { Adimensional}
DENSIDAD_DEL_METEORO = 8000 {kg/m^3;hierro [ piedra:3500 kg/m^3]}
FRICCION =
.5*DENSIDAD_DEL_AIRE*COEFICIENTE_AERODINAMICO*AREA_TRANSVERSAL*VELOCIDAD*ABS(VELOCIDA
D){ fricción con aire es antiparalela a la velocidad y es proporcional al cuadrado de la velocidad}

```

$g = -9.78$  {aceleración de gravedad en metros/seg<sup>2</sup>}

MASA = 500 { masa del meteoro en kilogramos }

PESO = MASA\*g { newton }

DENSIDAD\_DEL\_AIRE = GRAPH(ALTURA)

(0.00, 1.23), (2000, 1.01), (4000, 0.819), (6000, 0.66), (8000, 0.526), (10000, 0.414), (12000, 0.312), (14000, 0.228), (16000, 0.166), (18000, 0.122), (20000, 0.089), (22000, 0.065), (24000, 0.047), (26000, 0.0315), (28000, 0.0211), (30000, 0.0142), (32000, 0.0095), (34000, 0.006), (36000, 0.004), (38000, 0.003), (40000, 0.0019), (42000, 0.001), (44000, 0.00), (46000, 0.00), (48000, 0.00), (50000, 0.00)

## APÉNDICE II: PRONTUARIO DE SISTEMODINAMICA

I. TITULO Y CODIFICACION: CIBERNETICA INTD 4045

II. CREDITOS: TRES (3)

III. PREREQUISITOS: PRECALCULO

IV. DESCRIPCION :

El curso introduce al participante al método interdisciplinario conocido como Dinámica de Sistemas (Sistema-dinámica) para elaborar, calibrar, simular, analizar y presentar modelos dinámicos sobre sistemas sean estos de índole física, biológica, psicológica o social. Los estudiantes aprenderán a elaborar y simular modelos de interés disciplinario y multidisciplinario utilizando el programa STELLA (Structural Thinking Experiential Learning Laboratory with Animation) que implementa el enfoque sistema-dinámico. Se analizarán los éxitos y límites del enfoque y su trasfondo filosófico e histórico. Se presenta la Sistema-dinámica como una de las herramientas más fecundas para sintetizar conocimientos, surgida en las postrimerías del siglo XX.

V. TEXTOS DEL CURSO:

1. An Introduction to System Thinking, B. Richmond, HPS, 2002.
2. Modeling Dynamic Systems, B. Hannon and M. Ruth, 2ed, Springer, 2001.
3. Materiales Distribuidos por el Profesor.

VI. OBJETIVOS DEL CURSO:

Al completar el curso, el estudiante deberá ser capaz de hacer lo siguiente:

1. Identificar los cuatro elementos constitutivos de todo sistema dinámico según la sistema-dinámica: NIVEL, FLUJO, CONVERTIDOR Y CONECTOR.
2. Comprender los supuestos fundamentales del modo sistema-dinámico de pensar la realidad.
3. Construir un DIAGRAMA DE FORRESTER( mapa conceptual icónico de un sistema dinámico )
4. Analizar cualitativamente la estructura de retroalimentación de un Diagrama de Forrester con la ayuda de STELLA.
5. Calibrar un Diagrama de Forrester de un sistema dinámico.
6. Simular y ejecutar análisis exploratorios de un modelo sistema-dinámico calibrado.
7. Ejecutar un Análisis de Sensibilidad del comportamiento dinámico de los modelos.
8. Construir un Panel de Simulaciones (“simulador de vuelo”) de un modelo dinámico
9. Reconocer la posibilidad y ventajas de integrar el modelaje sistemodinámico al estudiar sistemas dinámicos, irrespectivamente de su naturaleza física, biológica, psicológica o social.