DESARROLLO DE PENSAMIENTO SISTÉMICO USANDO ECUACIONES DIFERENCIALES Y DINÁMICA DE SISTEMAS

Desarrollo de pensamiento sistémico usando
ecuaciones diferenciales y dinámica de sistemas

Rafael Ernesto Bourguet Díaz

Departamento de Ingeniería Industrial y de Sistemas

CIAP-601-i

ITESM Campus Monterrey

4 de octubre de 2005

Resumen

El propósito de este ensayo docente es exponer el uso y apreciaciones de usar un lenguaje matemático, como ecuaciones diferenciales, y un lenguaje gráfico de simulación computacional, como el propuesto por dinámica de sistemas, para desarrollar la habilidad de pensar dinámica y sistémicamente en alumnos de ingeniería industrial y de sistemas. El problema que motiva esta exploración es la necesidad de capitalizar, en el entendimiento y diseño de nuestros sistemas sociales, los conocimientos sobre estructuras de sistemas complejos que otras disciplinados han estudiado y representado matemáticamente. Se fundamenta la intersección entre los dos lenguajes mencionados. Se presenta un ejemplo a manera de ilustración, y se discuten los resultados principales observados en el proceso de aprendizaje de los alumnos. Finalmente, se mencionan los beneficios potenciales que se podrían alcanzar en otros contextos y cursos.

Palabras clave

Pensamiento sistémico, dinámica de sistemas, ecuaciones diferenciales.

Introducción

Diseñar sistemas en los cuales los propósitos individuales y colectivos, locales y globales, actuales y futuros encuentren armonía es la razón de la práctica del pensamiento sistémico. Pensamiento sistémico es una forma de percibir la realidad a través de las interacciones entre las partes y los procesos de cambios que se generan (Senge, 1990). Propiedades emergentes y comportamientos contratintuitivos de sistemas sociales son temas centrales de estudio del enfoque sistémico (Forrester, 1995), (Sterman, 2000), (Gharajedagui, 1999) y (Checkland, 1990).

Diseñar sistemas dinámicos físicos, como controles automáticos para aviones, planta químicas, satélites artificiales, entre algunos, son ejemplos en donde las representaciones matemáticas como las ecuaciones diferenciales y sus operaciones de transformadas han mostrado ser eficaces (Kailath, 1980).

Diseños de sistemas sociales desde el punto de vista sistémico y diseños de sistemas físicos como los mencionados comparten como parte central los principios de realimentación. Aún cuando los sistemas físicos diseñados artificialmente son mucho menos complejos que los sistemas sociales, estos muestran patrones de comportamientos parecidos en algunos aspectos a los físicos, lo cual sugiere la investigación sobre si podríamos diseñarlos de manera más formal y no sólo con la base de experiencia ganada en la práctica y buena intención de las personas.

Se plantea entonces una pregunta relevante para maestros y alumnos en ingeniería industrial y de sistemas: ¿seremos capaces de re-usar el conocimiento formal de los sistemas dinámicos generados por las diferentes ciencias (física, química, etc.) e ingenierías (eléctrica, mecánica, etc.) en el diseño de políticas de mejora para nuestros sistemas sociales (empresas, organizaciones, etc.)? Primeramente, se requiere un lenguaje común para el intercambio de conocimiento.

Fundamentos

El lenguaje común resulta ser la representación de variables de estado. Esta representación permite modelar sistemas realimentados, no lineales, altamente acoplados y variantes en el tiempo. Características de los sistemas complejos, tales como, nuestros sistemas sociales.

La representación de variables de estado de manera general y en su formato más elemental es: $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)$ donde $\mathbf{f}$ es una función vector no lineal de estados, $\mathbf{x}$ es el vector de estados de $n\,x1$, n representa el número de estados considerado en el sistema, $\mathbf{u}$ es el vector de entradas de $m\,x1$, m es el número de entradas, y t denota la dependencia del tiempo (Kailath, 1980) y (Slotine & Li, 1991). Se ha preferido ilustrar enseguida con un ejemplo el efecto de aprendizaje en los alumnos, en lugar de entrar en detalles técnicos de la representación, considerando el objetivo y contexto de este foro de investigación.

Ejemplo de aplicación

Se plantea en el salón de clases, la situación real sobre la reintroducción del lobo gris en parte de Estados Unidos. Se pide a los alumnos evaluar las consecuencias de esta decisión y entonces proponer alternativas si es que algún efecto no esperado y no deseado apareciera. Desde el enfoque de sistema y objetivo del curso se busca abrir la ventana de percepción de tiempo de los alumnos en este ejercicio para ilustrar el hecho de que causa y efecto no se encuentran cercanos en tiempo en sistemas complejos. El problema que se presenta aquí es la intervención del hombre en la naturaleza nuevamente para modificarla y los efectos que podrían tener estas decisiones en la interacción que tenemos con nuestro medio ambiente.

La situación es la siguiente: “A inicios de 1995, después de mucha controversia, debate público y 70 años de ausencia del lobo gris, éste fue reintroducido en el Parque Nacional de Yellowstone y en la parte central de Idaho. Desde la extinción del lobo en los 1920’s, cambios significativos habían sido registrados en las poblaciones de otros animales. Por ejemplo, la población del coyote había crecido en la ausencia de competencia. El éxito del lobo dependería de cómo influenciara y fuera influenciado por otras especies en el ecosistema.” (Zill, 1997). El modelo propuesto por (Knickerbocker, citado por Zill, 1997) es el siguiente y tiene la finalidad de mostrar algunos efectos entre las poblaciones de lobos, alces y coyotes:

$$\frac{dE}{dt} = 0.04E - 0.003EC - 0.85EW$$

$$\frac{dC}{dt} = -0.06C + 0.001EC$$

$$\frac{dW}{dt} = -0.12W + 0.005EW$$

$$E(0) = 60.0, \quad C(0) = 2.0, \quad W(0) = 0.015.$$

donde *E*, *C* y *W* representan las poblaciones de alces, coyotes y lobos en miles, respectivamente. La variable *t* representa años y es partir de 1995.

El modelo debe ser resuelto con algún paquete computacional como Maple o Matlab para poder observar y analizar las respuestas. En su lugar, se propone el uso de Vensim, paquete especialmente diseñado para desarrollar pensamiento sistémico usando dinámica de sistemas.

En clase, los alumnos construyen primeramente el modelo con el lenguaje gráfico de simulación usando lápiz y papel. El ejercicio inicia de manera individual y se continúa con un intercambio de ideas con el compañero de a lado. Esta actividad puede tomar entre 15 y 20 minutos. Inmediatamente después, se inicia la construcción del modelo en el simulador de manera grupal. Un par de alumnos implementan las aportaciones del grupo en la computadora, mientras el maestro orquesta la participación. Durante este tiempo, el modelo en construcción se proyecta frente al grupo, lo cual permite que los demás alumnos, trabajando también en pares, sigan cada unos de los pasos y construyan el modelo en sus propias “lap-tops”.

El modelo una vez traducido se muestra en la Figura 1. Los rectángulos representan niveles de acumulación y son los estados del sistema, en este caso, las poblaciones de animales. Las tuberías con válvulas representan razones de cambio de los niveles. En la figura se puede observar las interacciones de manera explícita entre las diferentes variables (arcos dirigidos). Asimismo, los dos procesos de cambio más importantes se muestran con los símbolos de balance. Estos son: (1) a mayor población de lobos, menor población de alces. A menor población de alces, menor población de lobos. El proceso (2) indica que a mayor población de coyotes, menor población de alces. A menor población de alces, menor población de coyotes.

Los alumnos en clase discuten sobre las interacciones que tienen las variables y proponen sus hipótesis para ser validadas con el simulador. La pregunta principal es ¿cuáles son los efectos en las poblaciones de alces y coyote al reintroducir nuevamente al lobo gris en el ecosistema? Los resultados de simulación se muestran en las Figuras 2, 3 y 4.

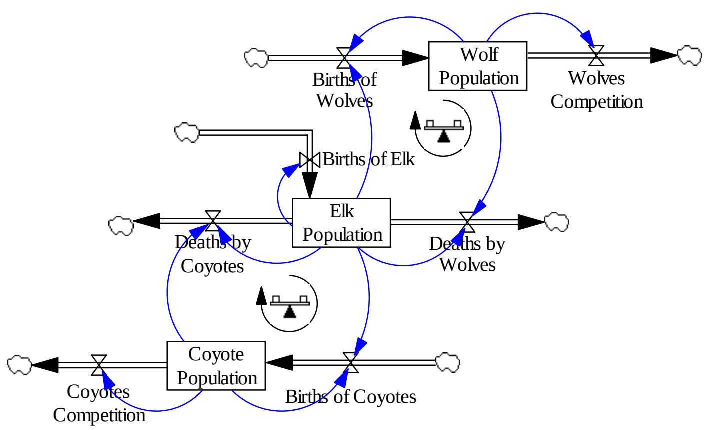

Figura 1 Diagrama de niveles y razones de cambio para el modelo de Knickerbocker

La Figura 2 muestra resultados de 10 años de programa y estos son alentadores, dado que la población de los lobos (curva inferior) crece sin afectar significativamente a la de los coyotes (curva de en medio) ni la de alces (curva superior). Aquí, se les pregunta a los alumnos si debería darse un reconocimiento a quien tomó la decisión de reintroducir al lobo gris. La mayoría responde que si. No hay cambios de políticas.

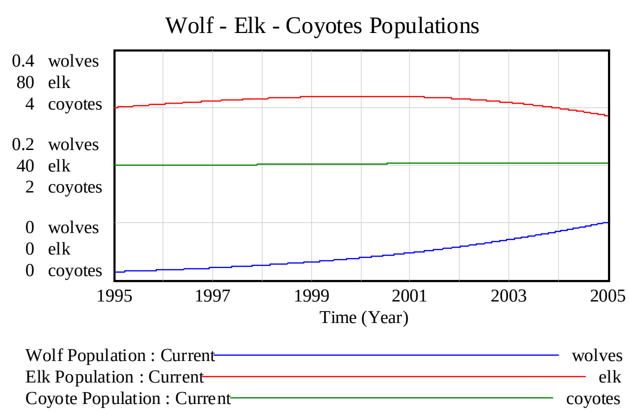

Figure 2 Poblaciones despúes de 10 años

En la Figura 3, se muestran los resultados después de 50 años de programa, sin modificaciones a la política original. Aquí se observa que el sistema está a punto de colapsarse.

La mayoría de los alumnos no esperaban este efecto. Se comenta que el nuevo administrador había seguido los pasos de su antecesor, dado que había sido exitoso: si había trabajado antes, porqué no entonces ahora. “Lo que ha de haber pasado es que no seguí bien los pasos de mi antecesor”. Se comenta que si bien la persona a cargo se le considera la responsable, la estructura construida con la política inicial está provocando este patrón de comportamiento. Posiblemente, en el debate antes de 1995, algunas personas habían percibido este escenario, por lo que no deseaban la reintroducción del lobo. Es decir, el debate se presentaba en las discusiones de los efectos de corto y largo plazo.

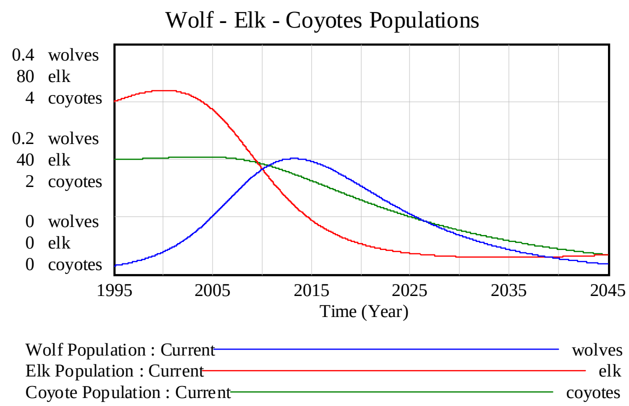

Figura 3 Poblaciones después de 50 años

En la Figura 4, se muestra ahora el comportamiento de las poblaciones después de 200 años sin modificar la política original. Se observa un comportamiento cíclico, el cual tampoco lo esperaban los alumnos. Se observa la desaparición del coyote de ese territorio, quedando únicamente los lobos y los alces. Es decir, se observa un efecto no deseado y no esperado. En este punto, se les pide a los alumnos generar un plan de acción. Algunas de las propuestas que surgen es abrir temporadas de caza de lobos, tener control de natalidad de los lobos, etc.

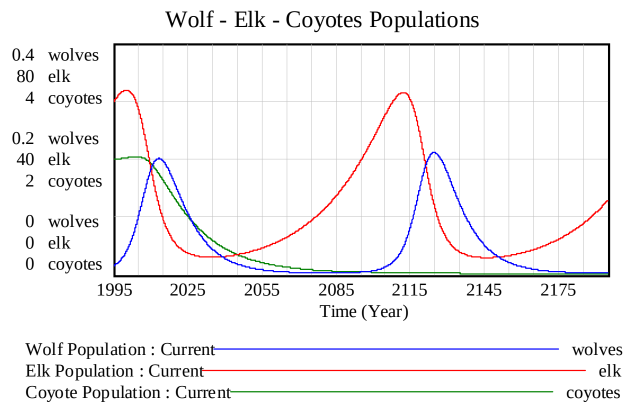

Figura 4 Poblaciones después de 200 años

Un resultado valioso del ejercicio es que empiezan los alumnos a darse cuenta que los efectos de las decisiones o cambios en políticas que se tomen, muy probablemente no las verá quien las propuso o accionó: causa y efecto no están cercanos en espacio y tiempo cuando se habla de sistemas complejos.

Una vez terminado el ejercicio, se reflexiona sobre las acciones en los sistemas que nos rodean, por ejemplo, los cambios de programas en cada sexenio por cambio de presidente. Otros, son las obras de hacer más atractivas las grandes ciudades, lo cual hace que cada vez llegue más gente y se hagan más difíciles los problemas, problemas de industrialización y contaminación, entre algunos.

Se aprecia entonces que el modelo matemático que en un principio parecía estar fuera del entendimiento común puede ahora discutirse, generar polémica y finalmente ayudar a estructurar una discusión para encontrar un plan de corto y largo plazo para este sistema.

Conclusiones

Se ha presentado el uso de dos lenguajes, uno con ecuaciones diferenciales y otro con símbolos para simulación por computadora para desarrollar pensamiento sistémico. El ejemplo mostrado, inicialmente fue un proyecto de clase. Los resultados fueron presentados por un equipo de alumnos en formato de póster en el primer congreso latinoamericano de Dinámica de Sistemas en 2003. Ahora forma parte de un ejercicio de clase.

Se concluye que los dos lenguajes, junto con el lenguaje a través de palabras son complementarios. Si bien el lenguaje con palabras es muy rico y muchos lo entienden queda a expensas de interpretaciones, generando ambigüedad. El lenguaje simbólico elimina parte de la ambigüedad y habilita el pensamiento circular representado en ciclos, sin embargo, menos personas lo entienden y deberá enseñarse para entender el mensaje. El lenguaje numérico de las ecuaciones elimina por completo la ambigüedad, sin embargo, menos personas lo entiende dado que el mensaje está altamente codificado.

El desarrollo entonces de pensamiento sistémico requiere de estos tres lenguajes. Los alumnos de dan cuenta de esto y valoran entonces los modelos de su libro de ecuaciones diferenciales. De hecho, pueden ahora ver en moviendo todas las funciones matemáticas que estuvieron estudiando en su curso de ecuaciones diferenciales.

Capitalización

Actualmente, el ejemplo de aplicación expuesto es usado por otra profesora de Dinámica de Sistemas en sus cursos de maestría y profesional. Asimismo, este trabajo motivó la investigación del proceso inverso, es decir, pasar modelos de pensamiento sistémico a ecuaciones diferenciales. Los resultados de esta investigación se expusieron a la crítica en el trabajo “Estructuras matemáticas de arquetipos sistémicos” (Bourguet & Pérez, 2003) en el congreso internacional número 21 de Dinámica de Sistemas.

Así como se empleo un ejemplo de ecosistemas, se pueden utilizar modelos de cadenas de suministro, de cadenas de formación de recursos humanos, de problemas de física, de química, de negocios y administración.

Si bien en este ensayo se trató un modelo matemático traducido a un modelo de simulación, lo inverso también es de gran utilidad. Generar modelos de simulación que representen situaciones problemáticas y después obtener el modelo matemático correspondiente. Es decir, usando el lenguaje gráfico de simulación se pueden entonces formular hipótesis y buscar leyes que expliquen el comportamiento de sistemas sociales.

Ciertamente, estamos aún lejos de poder diseñar nuestros sistemas sociales, sin embargo si adquiriremos una mayor conciencia de nuestras responsabilidades al percibir las causas-efectos lejanas en tiempo y espacio.

Referencias

Bourguet, R. E. y Pérez, G. (2003). On Mathematical Structures of Systems Archetypes. En *Proceedings of the 21st International System Dynamics Conference*. Nueva York, E.U.A.: System Dynamics Society.

Checkland, P. & Scholes (1990). The developed form of soft systems methodology. En *Soft systems methodology in action*. (Cap. 2, 18-27). Estados Unidos de América: John Wiley & Sons Ltd.

Gharajedagui, J. (1999). Systems Principles. En *Systems thinking: managing chaos and complexity: a platform for designing business architecture*. (Cap. 2, 45-55). Estados Unidos de América: Butterworth/Heinemann.

Forrester, J. W. (1995). *Counterintuitive behavior of social systems*. Road Map D-4468-2. Recuperado el 28 de agosto de 2005, de http://sysdyn.clexchange.org/road-maps/rm-toc.html

Kailath, T. (1980). *Linear Systems*. Estados Unidos de América: Prentice-Hall.

Senge, P. (1990). Prisioners of the system, or prisioners of our thining. En *The fifth discipline: the art and practice of the learning organization*. (Cap. 3, 27-54). Estados Unidos de América: Doubleday.

Slotine, J-J. E. & Li, W. (1991). *Applied nonlinear control*. Estados Unidos de América: Prentice-Hall, Inc.

Sterman, J. D. (2000). Learning in and about complex systems. En *Business dynamics: system thinking and modeling for a complex world*. (Cap. 1, 5-10). Estados Unidos de América: Irwin/McGraw-Hill.

Zill, D. G. 1997. *A First Course in Differential Equations*. 5th edition. Brooks/Cole Publishing.