



Sesión Tutorial TL03
Modelado Matemático en Ingeniería
De los Simple a lo Complejo
Marco Aurelio Alzate Monroy, PhD

4 de junio de 2014, 2:00 a 6:00 pm
Universidad de los Andes

Resumen

Desde hace cerca de 30000 años, el ser humano ha sido explícito en la formulación y utilización de modelos mentales para interpretar la realidad. Entre los distintos tipos de modelos mentales se encuentran los modelos científicos, que se basan en la idea de que la naturaleza obedece a leyes fundamentales que se pueden expresar matemáticamente. Si bien este tipo de modelos científicos pueden remontarse a miles de años atrás, la rigurosidad de su método se estableció formalmente hace pocos cientos de años: obtener generalizaciones empíricas a partir del análisis de las observaciones del mundo, e inducir teorías explicativas de las que se puedan deducir hipótesis, las cuales se pueden verificar mediante experimentación. La ciencia ha sido muy exitosa en construir con este método teorías que explican el mundo. Y la ingeniería ha sido muy exitosa en aplicar creativamente estas teorías para diseñar, construir y operar estructuras, máquinas o procesos que resuelvan problemas que la humanidad enfrenta. El uso de modelos matemáticos permite al ingeniero conocer el comportamiento de su diseño bajo condiciones específicas de operación y, por tanto, satisfacer criterios estrictos de funcionalidad, desempeño, economía y seguridad.

Así pues, la ciencia y la ingeniería tienen en común la formulación, evaluación y aplicación de modelos matemáticos que permiten una abstracción conceptual de la realidad concreta con que tratan. Esta abstracción conceptual implica, necesariamente, una simplificación adecuada a la pregunta que se desea responder sobre el sistema real o al problema concreto que se quiere resolver. Entonces, el proceso de modelado matemático consiste en abstraer de una realidad compleja los aspectos más relevantes asociados con un objetivo particular de estudio, y formularlos en el contexto formal y riguroso de las matemáticas. Al operar con el modelo así formulado, se obtendrán conclusiones que podrían remitirse directamente al sistema bajo estudio. La utilidad de estas conclusiones para comprender o controlar el sistema bajo estudio determinará la validez del proceso de modelado matemático.

De manera muy general, los pasos de este proceso de abstracción-conceptualización-simplificación son los siguientes: (1) Identificación de componentes, (2) determinación de variables descriptivas de esos componentes, (3) identificación de reglas de interacción entre componentes y (4) determinación de parámetros descriptivos de esas interacciones. Por supuesto, para una misma realidad, puede haber tantos modelos válidos como preguntas se quieran responder sobre ella, o como objetivos de estudio se quieran formular, y todos ellos pueden ser modelos muy diferentes aunque se refieran al mismo sistema real. Una vez formulado de esta manera, el modelo puede evaluarse por técnicas analíticas, técnicas numéricas, técnicas de simulación o inclusive técnicas experimentales. Cada una de ellas es apenas una alternativa para la evaluación de un modelo matemático, con ventajas y desventajas comparativas entre ellas. En general, la escala que va de lo analítico a lo numérico, a la simulación y a lo experimental tendría que ver con la escala que va de la mayor comprensión conceptual a la mayor aplicación práctica, aunque estas relaciones han ido cambiando con la complejidad misma de las realidades que queremos analizar como científicos o diseñar como ingenieros.

En efecto, el principio original de la ciencia y, por ende, de la ingeniería, era la del reduccionismo mecanicista, según el cual las propiedades y los comportamientos globales de un sistema se pueden deducir o explicar a partir de las propiedades y los comportamientos de las partes que lo componen. En este contexto se hace muy apropiado el principio de superposición propio de los sistemas lineales. En la misma línea se encontraba el principio del determinismo, según el cual la incertidumbre se limita a la presencia de errores en las mediciones, en cuyo caso la distribución Gaussiana resulta muy apropiada. Sin embargo, la linealidad y la gaussianidad son, en realidad, poco comunes en la naturaleza, como lo reconocieron desde el principio los grandes científicos y los grandes ingenieros. Pero, sin computadores, sólo se contaba con métodos analíticos de evaluación de modelos matemáticos, o métodos numéricos calculados manualmente. Los primeros, en general, casi siempre existen para sistemas lineales y gaussianos pero casi nunca existen para sistemas no-lineales y no-gaussianos. Los segundos requieren un número tan exagerado de cálculos que resultan inútiles sin computadores automáticos.

Fue la introducción del computador la que permitió evaluar modelos matemáticos no-lineales y no-gaussianos, redescubriendo fenómenos fascinantes que ya grandes pensadores habían intuido, como el caos, la fractalidad y la emergencia. Con semejante herramienta, la ciencia y la ingeniería pudieron abordar problemas mucho más complejos al permitirse incluir la no-linealidad y la no-gaussianidad en sus modelos matemáticos evaluados numéricamente o mediante simulación. Eso explica el vertiginoso desarrollo científico y tecnológico de las últimas décadas.

Entre las herramientas que el computador ayudó a desarrollar para evaluar modelos matemáticos no-lineales y no-gaussianos están los métodos bio-inspirados (redes neuronales artificiales, algoritmos genéticos, inteligencia de enjambre, sistemas inmunes artificiales, sistemas difusos, etc.). Todos ellos han sido muy útiles en la solución de complejos problemas de optimización, regresión o clasificación, fundamentales en el diseño de nuevas soluciones a problemas complejos. La inclusión de estos métodos, entonces, ha permitido extender la aplicabilidad de los modelos matemáticos en ingeniería, especialmente al facilitar la inclusión de requerimientos de robustez (el sistema debe seguir operando satisfactoriamente en un amplio rango de condiciones) y su forma extendida, la adaptabilidad (el sistema debe poder ajustar automáticamente sus parámetros de acuerdo a los cambios en el ambiente). Los grandes avances que estos modelos han permitido alcanzar en materia de comunicaciones, también han permitido incluir una característica formidable en los diseños de ingeniería: Los sistemas distribuidos, en los que la información local se distribuye para tomar decisiones colectivas en busca de un objetivo global. También estos modelos matemáticos de sistemas robustos, adaptables y distribuidos han contribuido al fascinante mundo tecnológico de hoy.

Así pues, a medida que crece la complejidad de los fenómenos que la ciencia estudia y de los problemas que la ingeniería aborda, crece también la versatilidad de los modelos matemáticos que ellas usan. Hoy, la experiencia ingenieril con sistemas bio-inspirados y la comprensión científica sobre la organización de muchos sistemas naturales, han permitido explorar también otros fenómenos comunes en la naturaleza y otras formas de plantear soluciones de ingeniería a mayores problemas de la humanidad: La auto-organización y la emergencia.

Efectivamente, en física, biología, ciencias sociales y ciencias de la computación, entre muchas otras áreas, se ha venido comprendiendo que los comportamientos complejos observados a cierta escala surgen como fenómenos emergentes de procesos de auto-organización a escalas menores, casi siempre mediados por interacciones simples. Esta comprensión indica que la ingeniería puede enfrentar nuevos problemas básicos de la humanidad, en los ámbitos ambiental, tecnológico, biológico, económico y político, si extiende los nuevos modelos matemáticos que capturan estos fenómenos para lograr “diseñar, construir, operar y controlar aparatos, procesos y estructuras que resuelvan problemas de la humanidad”, como dijimos anteriormente. Pero estos aparatos, procesos y estructuras serán fundamentalmente diferentes en un sentido básico: Sus

partes deberán percibir el mundo, aprender de él, decidir autónoma e inteligentemente comportamientos apropiados, comunicarse entre ellas, al menos en un ámbito local, y, de manera colectiva, permitir la emergencia de patrones funcionales, temporales o espaciales que resuelvan el problema que se trata. A estos nuevos modelos matemáticos en ingeniería se les ha llamado “modelos de inteligencia colectiva”, “modelos de auto-organización guiada”, “modelos de sistemas dinámicos cognitivos”, etc. Estos modelos matemáticos ya no buscan que el ingeniero diseñe la solución del problema sino que diseñe el sistema complejo adaptivo que sea capaz de emerger mediante auto-organización la solución del problema, pues el problema mismo cambia dinámicamente en un ambiente complejo. De hecho, el desarrollo de estos modelos matemáticos va difuminando la frontera entre ciencia e ingeniería, pues además de permitir el diseño del sistema de ingeniería, permite proponer explicaciones a los fenómenos emergentes de la naturaleza.

Contenido

1. Evolución del modelado matemático en ingeniería
2. Proceso de modelado matemático en ingeniería
3. De lo lineal a lo no-lineal
4. De lo Euclidiano a lo fractal
5. De lo Gaussiano a lo no-Gaussiano
6. De lo simple a lo complejo
7. Ingeniería de Sistemas Complejos
8. Conclusiones

Conferencista



Marco Aurelio Alzate Monroy es ingeniero electrónico de la Universidad Distrital, Magíster en ingeniería eléctrica de la Universidad de los Andes y Doctor en Ingeniería de la Universidad de los Andes. Ha sido investigador del Instituto Tecnológico de Electrónica y Comunicaciones (ITEC – Telecom), asistente de investigación en el Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Computadores de la Universidad de Maryland y científico investigador en el Laboratorio de Sistemas de Información de la Universidad del Sur de la Florida. Actualmente es profesor titular de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital. Es miembro senior de IEEE y de sus sociedades de comunicaciones y de procesamiento de señales. Sus áreas de interés son el procesamiento de señales, el control de sistemas dinámicos, la teoría de la información y la teoría de sistemas complejos, tanto en sus aspectos teóricos como en su aplicación al modelado de redes modernas de comunicaciones. Tiene más de 20 años de experiencia evaluando, enseñando y desarrollando modelos matemáticos en ingeniería de sistemas simples y complejos.