

## Complejidad e Ingeniería

Agradezco la invitación de la Revista INGENIERÍA de la Universidad Distrital al otorgarme el honor de ser el primer invitado a escribir la editorial de este prestigioso medio. En efecto, éste es un espacio privilegiado para proponer distintas visiones sobre la ingeniería y sobre la formación ingenieril que propicien la reflexión y el debate, por lo que la invitación se convierte en una oportunidad única para presentar puntos de vista personales, tal vez (y ojalá) controvertibles. Un tema que me inquieta y que me gustaría traer en esta ocasión es la inclusión formal de los conceptos propios de la complejidad en los programas de formación en ingeniería.

Ciertamente, la «Ciencia de la Complejidad», como se le ha llamado, no es una teoría única que se pueda enseñar en clase como la teoría de circuitos, la teoría de la evolución o la teoría de la relatividad. Se trata más bien de un conjunto de teorías que abarcan un amplio rango de disciplinas, incluyendo la mecánica estadística (donde se originó), la biología, la economía, la ecología, la sociología y la administración, entre muchas otras. Cada una de ellas, desde su perspectiva particular, ha hecho aportes importantes a la comprensión del comportamiento de sistemas que evolucionan y se adaptan, generando fenómenos emergentes como la autoorganización cerca de puntos críticos, donde se presentan transiciones de fase en las que la dinámica del sistema puede volverse caótica (SOC/EOC – *Self-Organized-Criticality/Edge-Of-Chaos*). Lo más interesante es que los grandes productos tecnológicos de la ingeniería empiezan a presentar características semejantes cuando se diseñan para la robustez ante los cambios previsible en el ambiente en que se desempeñarán (HOT – *Highly Optimized Tolerance*). A manera de ejemplo, las redes modernas de comunicaciones se caracterizan por topologías físicas y lógicas libres de escala, fractalidad en las trazas de tráfico, leyes de potencia en el tamaño de la información que transfieren y en la duración de las sesiones que se establecen a través de ellas, potencial comportamiento caótico en la dinámica de los protocolos, etc. Sin embargo estas características, comunes con tantos otros sistemas complejos que se estudian en otras disciplinas, aunque pueden explicarse a la luz de la teoría de la información y de la teoría de control de sistemas dinámicos no lineales, no son producto de la voluntad de los

ingenieros diseñadores de las redes sino que constituyen un fenómeno emergente que sorprende a sus mismos creadores.

Implícitamente, la praxis de la ingeniería reconoce estas condiciones de los sistemas tecnológicos modernos cuando involucra, cada vez más, diseños basados en inteligencia computacional (redes neuronales, lógica difusa, computación evolutiva, inteligencia de enjambre, etc.). Sin embargo, este reconocimiento tácito no se ha visto explícitamente reflejado en nuestros planes de estudio, que a veces parecen un monumento al reduccionismo mecanicista ya que seguimos limitándonos a la descomposición modular como única metodología ingenieril: pareciera que creemos más en el precepto de «divide y vencerás» que en la verdad holística de que «el todo es mayor que la suma de las partes». Volviendo al ejemplo de las redes de comunicaciones, no podemos seguir enseñando dogmáticamente los principios de la transparencia y la independencia entre las capas de una jerarquía funcional de protocolos cuando la práctica del diseño de redes inalámbricas se basa en una alta interacción entre las diferentes capas para alcanzar niveles de desempeño que aprovechen adecuadamente los escasos recursos de potencia y ancho de banda (*cross-layer design*).

Es mi opinión (y espero abrir el debate) que debemos formalizar desde la academia un nuevo enfoque que permita conciliar la praxis y la teoría del diseño en ingeniería, donde la modularidad tradicional se entienda con la necesidad de percibir el ambiente para adaptarse a él. Mientras la modularidad es necesaria para asegurar la posibilidad de estandarización y, por consiguiente, la proliferación económica de las innovaciones tecnológicas, la percepción y la adaptabilidad requieren violar los principios de modularidad para asegurar un uso adecuado de los recursos disponibles con niveles de desempeño aceptables. Los ingenieros debemos aprender a movernos con agilidad malabarista sobre la cuerda floja que se extiende entre estos dos conceptos. Creo que la introducción de la ciencia de la complejidad en el *currículum* ingenieril no sólo compensaría esta necesidad sino que abriría las puertas de las tan deseadas inter- y transdisciplinariedad con que siempre hemos soñado.

Marco Aurelio Alzate Monroy