90 IPN ANIVERSARIO

30 ANIVERSARIO UPIITA

Memoria del

1er. COLOQUIO INTERNACIONAL

Saberes integrales en el mundo contemporáneo

24, 25 y 26 de noviembre de 2026



Educación
Secretaría de Educación Pública

Instituto Politécnico Nacional
"La Técnica al Servicio de la Patria"

PENSAMIENTO SISTÉMICO Y TEORÍA SISTÉMICA EN LA PRÁCTICA DE LA INGENIERÍA CONTEMPORÁNEA

M. en I. Román Álvarez Liebano

[1] Doctorante en Ingeniería de Sistemas
[2] Profesor de las Academias de Administración y Negocios
[1] Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Zacatenco,
Sección de Estudios de Posgrado e Investigación,
Programa de Posgrado en Ingeniería de Sistemas (IPN)
[2] Escuela Superior de Comercio y Administración, Unidad Santo Tomás (IPN)

aralvarezl@ipn.mx

RESUMEN

La ingeniería contemporánea opera en un entorno de interconexión creciente, en el que la robótica colaborativa, la inteligencia artificial generativa, los vehículos inteligentes, las redes telemáticas, los dispositivos biónicos y los sistemas ciberfísicos interactúan de forma continua. Este artículo sostiene que el pensamiento sistémico y la teoría sistémica constituyen un marco fundamental para la práctica ingenieril actual. A partir de una revisión conceptual de la Teoría General de Sistemas (von Bertalanffy, 1968), la dinámica de sistemas (Forrester, 1961; Meadows, 2008), la cibernética (Wiener, 1948; Ashby, 1956), la metodología de sistemas blandos (Checkland, 1999) y el enfoque sociotécnico (Trist & Bamforth, 1951), se presentan cuatro ideas centrales: la importancia de la estructura y las fronteras del sistema, el papel de la retroalimentación, la emergencia de propiedades globales y la anticipación de consecuencias no deseadas.

Palabras clave: Pensamiento sistémico; Teoría de sistemas; Ingeniería contemporánea; Sistemas ciberfísicos; Cibernética

ABSTRACT

Contemporary engineering operates in an increasingly interconnected environment in which collaborative robotics, generative artificial intelligence, intelligent vehicles, telematics networks, bionic devices, and cyber-physical systems interact continuously. This article argues that systems thinking and systems theory constitute a fundamental framework for contemporary engineering practice. Based on a conceptual review of General Systems Theory (von Bertalanffy, 1968), system dynamics (Forrester, 1961; Meadows, 2008), cybernetics (Wiener, 1948; Ashby, 1956), Soft Systems Methodology (Checkland, 1999), and the sociotechnical approach (Trist & Bamforth, 1951), four central ideas are presented: the importance of system structure and boundaries, the role of feedback, the emergence of global properties, and the anticipation of unintended consequences.

Keywords: Systems thinking; Systems theory; Contemporary engineering; Cyber-physical systems; Cybernetics.

1. Introducción

La Teoría General de Sistemas de von Bertalanffy (1968) muestra que los fenómenos de la naturaleza pueden estudiarse como un conjunto de elementos dentro de un sistema que operan de forma interconectada; este concepto ofrece un lenguaje común para describir sistemas biológicos, técnicos, organizacionales y sociales. Por lo tanto, al trasladar este concepto a la ingeniería, esta idea establece cambiar el análisis de la unidad y del elemento del componente al sistema en su entorno, permitiendo definir con claridad cuáles son sus fronteras, sus elementos y subsistemas, qué queda fuera de ellas y qué actores participan.

De acuerdo con Checkland (1999), esto nos lleva a distinguir y definir los problemas e identificar sus objetivos, los cuales podrían resolverse con enfoques «duros» de ingeniería, y para las situaciones problemáticas en las que intervienen diversos actores, intereses y perspectivas; para estas últimas propone la Metodología de Sistemas Blandos (Soft Systems Methodology, SSM). Su punto de partida busca identificar que, en contextos centrados en el ser humano y en las organizaciones, la definición del problema es interpretada por los participantes.

2. Fundamentos de la teoría sistémica

2.1 Del componente al sistema

La Teoría General de Sistemas de von Bertalanffy (1968) muestra que los fenómenos de la naturaleza pueden estudiarse como un conjunto de elementos dentro de un sistema que operan de forma interconectada; este concepto ofrece un lenguaje común para describir sistemas biológicos, técnicos, organizacionales y sociales. Por lo tanto, al trasladar este concepto a la ingeniería, esta idea establece cambiar el análisis de la unidad y del elemento del componente al sistema en su entorno, permitiendo definir con claridad cuáles son sus fronteras, sus elementos y subsistemas, qué queda fuera de ellas y qué actores participan.

De acuerdo con Checkland (1999), esto nos lleva a distinguir y definir los problemas e identificar sus objetivos, los cuales podrían resolverse con enfoques «duros» de ingeniería, y para las situaciones problemáticas en las que intervienen diversos actores, intereses y perspectivas; para estas últimas propone la Metodología de Sistemas Blandos (Soft Systems Methodology, SSM). Su punto de partida busca identificar que, en contextos centrados en el ser humano y en las organizaciones, la definición del problema es interpretada por los participantes.

2.2 Estructura, información y retroalimentación

Un segundo pilar de la teoría sistémica puede establecerse mediante el análisis de los flujos de información y los ciclos de retroalimentación que integran los sistemas, sus subsistemas y sus elementos, los cuales, forman parte fundamental para comprender y modificar el comportamiento de un sistema a lo largo del tiempo. Este enfoque, conocido como dinámica de sistemas, fue desarrollado por Forrester (1961) para el estudio de sistemas industriales y presentado de forma integral por Sterman (2000). En este sentido, de acuerdo con Meadows (2008), la estructura de un sistema, entendida como la red de relaciones y bucles de retroalimentación que lo conforman, determina su comportamiento; por eso, intervenir en la estructura y no solo en los síntomas visibles permite un cambio efectivo y duradero.

Por otra parte, los aportes de Wiener (1948) y Ashby (1956) sobre la cibernética explican cómo los sistemas se regulan a sí mismos mediante la homeostasis. El concepto de homeostasis fue propuesto

por Cannon en 1932 y retomado por la cibernética, definiéndolo como la capacidad de mantener condiciones estables ante cambios internos o externos, es entonces que la autorregulación consiste en que los ajustes operan mediante la retroalimentación, misma que muestra los resultados y permite a los actores corregir desviaciones. Además, la ley de la variedad requerida, formulada por Ashby (1956), establece que un regulador necesita una diversidad de respuestas suficiente para enfrentar las perturbaciones del sistema que regula.

2.3 Emergencia y arquetipos sistémicos

También se reconoce que el comportamiento de un sistema no puede deducirse de la suma de sus partes: propiedades como la estabilidad o la eficiencia de una solución tecnológica emergen de las relaciones entre los componentes y de la interacción del sistema con su entorno (Ladyman & Wiesner, 2020; Maier, 1998). Ackoff (1971) definió el sistema como un conjunto de elementos interrelacionados en el que ningún subconjunto es independiente de los demás, y Ackoff (1999) añadió que todo sistema tiene propiedades esenciales que ninguna de sus partes posee por separado.

Además, Senge (1990) propuso los arquetipos sistémicos: patrones recurrentes de comportamiento que se desarrollan en cualquier tipo de organización, entre ellos destacan las «soluciones que fallan», estas indican que en las que una intervención efímera al sistema produce consecuencias que provocan la reaparición del problema inicial, por otra parte, la «transferencia de la carga», es otro arquetipo que ocurre cuando las acciones se centran en aliviar los síntomas y restan atención a las causas de fondo.

2.4 Otros enfoques sistémicos

El campo sistémico es más amplio. El enfoque sociotécnico nació del estudio de minas de carbón por Trist y Bamforth (1951), quienes analizaron cómo un cambio tecnológico transformó la organización social del trabajo, y sentó la idea de que lo técnico y lo social deben diseñarse en conjunto, que la ingeniería de sistemas retomó después (Baxter & Sommerville, 2011). El Modelo de Sistemas Viables de Beer (1985) aplica la lógica de Ashby al diseño de organizaciones capaces de sobrevivir en entornos cambiantes.

3. El enfoque sistémico en los sistemas tecnológicos contemporáneos

Los sistemas ciberfísicos ejemplifican la integración de procesos computacionales y físicos a través de enlaces de retroalimentación continuos, de modo que su funcionamiento abarca el software, el hardware y el proceso físico (Lee, 2015; Lee & Seshia, 2017). De manera similar, en la robótica colaborativa, la seguridad y la productividad dependen de la interacción entre el robot, el operador, la tarea y el entorno de trabajo (Villani et al., 2018).

A este contexto, la inteligencia artificial generativa introduce una capa adicional de complejidad al entorno, pues la operación y sus efectos resultan de la interacción entre el modelo, los datos empleados para su entrenamiento y funcionamiento, los usuarios, las instituciones que la regulan o adoptan, y las prácticas derivadas de su uso, las cuales inciden en sus aplicaciones futuras (National Institute of Standards and Technology [NIST], 2023, 2024; Selbst et al., 2019). Por lo tanto, el enfoque sociotécnico sostiene que la tecnología no debe evaluarse de manera aislada de las personas y organizaciones que la utilizan (Baxter & Sommerville, 2011).

4. Ejemplos contemporáneos de análisis sistémico

4.1 Ingeniería Mecatrónica:

En la robótica colaborativa, trabajadores y robots comparten el espacio de trabajo, de modo que la seguridad forma parte de la interacción entre ambos. La revisión de Villani et al. (2018) señala la interacción segura, las interfaces intuitivas y los métodos de diseño de tareas como ejes de la colaboración humano-robot en entornos industriales, en consonancia con la visión de una industria centrada en las personas, sostenible y resiliente propuesta por Breque et al. (2021). Desde la teoría, la seguridad es una propiedad emergente que no puede verificarse analizando el robot por separado (Leveson, 2011; Maier, 1998).

4.2 Ingeniería Biónica: prótesis de miembro con interfaz neural

Las prótesis actuales pueden moverse con destreza, pero muchas no son percibidas por sus usuarios como parte de su propio cuerpo. En un artículo de perspectiva, Farina et al. (2023) argumentan que el desempeño de los miembros biónicos está limitado, en buena medida, por la interfaz entre el dispositivo robótico y la persona, y que deben aprovecharse en conjunto la fijación de la prótesis mediante osteointegración, la amplificación de señales neurales mediante reinervación muscular dirigida, los sensores musculares implantados con algoritmos avanzados de control y los electrodos en nervios periféricos para devolver sensación, junto con rediseños mecánicos y un entrenamiento de rehabilitación adecuado. La prótesis deja así de ser un artefacto aislado y puede entenderse como un sistema de lazo cerrado que conecta cuerpo, sensores, control y usuario, el tipo de retroalimentación que estudió la cibernética (Wiener, 1948).

4.3 Robótica espacial: el rover Perseverance en Marte

El rover Perseverance de la NASA es un robot que explora Marte con autonomía parcial, pues la señal tarda varios minutos en llegar, el equipo en la Tierra planifica la ruta con imágenes orbitales y envía las instrucciones con un día de anticipación. Durante el trayecto, el sistema AutoNav del robot percibe el terreno mediante sensores y, con ello, evita obstáculos y ajusta la ruta por sí mismo (Verma et al., 2023). Además, diferentes limitaciones, como la energía, la comunicación y la capacidad de procesamiento, condicionan sus decisiones, por lo que el rover, el software y el equipo humano deben funcionar de manera coordinada. En términos sistémicos, es la autonomía local, que aumenta la variedad de respuestas del regulador frente a perturbaciones que no pueden atenderse a distancia a tiempo (Ashby, 1956).

4.4 Ingeniería en Sistemas Automotrices: vehículos autónomos y movilidad inteligente

Un vehículo autónomo combina cámaras, sensores, inteligencia artificial y sistemas de control para interpretar el entorno y decidir, pero no opera solo, este forma parte de un sistema de movilidad que incluye peatones, otros vehículos, infraestructura vial, semáforos y normas de tránsito. Por eso, su seguridad se evalúa mediante un caso de seguridad que combina varias metodologías; en 7.1 millones de millas sin conductor, el servicio de Waymo registró cerca del 80 % menos choques con lesiones reportadas que la referencia humana, aunque esa muestra no permite concluir sobre fatalidades y los autores pertenecen a la empresa (Kusano et al., 2024).

Conclusiones

El pensamiento y la teoría sistémicos dan a las ramas de la ingeniería contemporánea una manera de entender sistemas en los que la interacción de sus partes explica su comportamiento. Los cuatro pilares revisados, la estructura y las fronteras del sistema, la retroalimentación, la aparición de propiedades globales y la previsión de consecuencias no deseadas, dan una base para analizar y diseñar que la ingeniería usa hoy en sistemas tecnológicos. Esto se ve en la robótica colaborativa, las prótesis biónicas, la exploración robótica de Marte y los vehículos autónomos.

La ingeniería moderna utiliza varios principios de la teoría de sistemas. Relaciona cada concepto con un ejemplo concreto. El ingeniero no solo debe responder por el artefacto tecnológico, sino también por los efectos en lo social, lo económico y el ambiente donde vive la gente.

Referencias

[1] Ackoff, R. L. (1971). Towards a system of systems concepts. Management Science, 17(11), 661–671. https://doi.org/10.1287/mnsc.17.11.661

[2] Ackoff, R. L. (1999). Re-creating the corporation: A design of organizations for the 21st century. Oxford University Press.

[3] Ashby, W. R. (1956). An introduction to cybernetics. Chapman & Hall.

[4] Baxter, G., & Sommerville, I. (2011). Socio-technical systems: From design methods to systems engineering. Interacting with Computers, 23(1), 4–17. https://doi.org/10.1016/j.intcom.2010.07.003

[5] Beer, S. (1985). Diagnosing the system for organizations. John Wiley & Sons.

[6] Breque, M., De Nul, L., & Petridis, A. (2021). Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry. European Commission, Directorate-General for Research and Innovation. https://research-and-innovation.ec.europa.eu/knowledge-publications-tools-and-data/publications/all-publications/industry-50_en

[7] Cannon, W. B. (1932). The wisdom of the body. W. W. Norton.

[8] Checkland, P. (1999). Systems thinking, systems practice: Includes a 30-year retrospective. John Wiley & Sons.

[9] de Weck, O. L., Roos, D., & Magee, C. L. (2011). Engineering systems: Meeting human needs in a complex technological world. MIT Press.

[10] Farina, D., Vujaklija, I., Brånemark, R., Bull, A. M. J., Dietl, H., Graimann, B., Hargrove, L. J., Hoffmann, K.-P., Huang, H. H., Ingvarsson, T., Janusson, H. B., Kristjánsson, K., Kuiken, T., Micera, S., Stieglitz, T., Sturma, A., Tyler, D., Weir, R. F. ff., & Aszmann, O. C. (2023). Toward higher-performance bionic limbs for wider clinical use. Nature Biomedical Engineering, 7(4), 473–485. https://doi.org/10.1038/s41551-021-00732-x

[11] Forrester, J. W. (1961). Industrial dynamics. MIT Press.

[12] International Council on Systems Engineering. (2023). INCOSE systems engineering handbook: A guide for system life cycle processes and activities (5th ed.). John Wiley & Sons.

[13] Jackson, M. C. (2019). Critical systems thinking and the management of complexity. John Wiley & Sons.

[14] Kusano, K. D., Scanlon, J. M., Chen, Y.-H., McMurry, T. L., Chen, R., Gode, T., & Victor, T. (2024). Comparison of Waymo rider-only crash data to human benchmarks at 7.1 million miles. Traffic Injury Prevention, 25(sup1), S66–S77. https://doi.org/10.1080/15389588.2024.2380786

[15] Ladyman, J., & Wiesner, K. (2020). What is a complex system? Yale University Press.

[16] Lee, E. A. (2015). The past, present and future of cyber-physical systems: A focus on models. Sensors, 15(3), 4837–4869. https://doi.org/10.3390/s150304837

[17] Lee, E. A., & Seshia, S. A. (2017). Introduction to embedded systems: A cyber-physical systems approach (2nd ed.). MIT Press.

[18] Leveson, N. G. (2011). Engineering a safer world: Systems thinking applied to safety. MIT Press. https://doi.org/10.7551/mitpress/8179.001.0001

[19] Maier, M. W. (1998). Architecting principles for systems-of-systems. Systems Engineering, 1(4), 267–284. https://doi.org/10.1002/(SICI)1520-6858(1998)1:4%3C267::AID-SYS3%3E3.0.CO;2-D

[20] Meadows, D. H. (2008). Thinking in systems: A primer. Chelsea Green Publishing.

[21] National Institute of Standards and Technology. (2023). Artificial intelligence risk management framework (AI RMF 1.0) (NIST AI 100-1). U.S. Department of Commerce. https://doi.org/10.6028/NIST.AI.100-1

[22] National Institute of Standards and Technology. (2024). Artificial intelligence risk management framework: Generative artificial intelligence profile (NIST AI 600-1). U.S. Department of Commerce. https://doi.org/10.6028/NIST.AI.600-1

[23] Selbst, A. D., boyd, d., Friedler, S. A., Venkatasubramanian, S., & Vertesi, J. (2019). Fairness and abstraction in sociotechnical systems. In Proceedings of the Conference on Fairness, Accountability, and Transparency (pp. 59–68). Association for Computing Machinery. https://doi.org/10.1145/3287560.3287598

[24] Senge, P. M. (1990). The fifth discipline: The art and practice of the learning organization. Doubleday/Currency.

[25] Sterman, J. D. (2000). Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world. Irwin/McGraw-Hill.

[26] Trist, E. L., & Bamforth, K. W. (1951). Some social and psychological consequences of the longwall method of coal-getting. Human Relations, 4(1), 3–38. https://doi.org/10.1177/001872675100400101

[27] Verma, V., Maimone, M. W., Gaines, D. M., Francis, R., Estlin, T. A., Kuhn, S., Rabideau, G. R., Chien, S. A., McHenry, M. M., Graser, E. J., Rankin, A. L., & Thiel, E. R. (2023). Autonomous robotics is driving Perseverance rover's progress on Mars. Science Robotics, 8(80), Article eadi3099. https://doi.org/10.1126/scirobotics.adi3099

[28] Villani, V., Pini, F., Leali, F., & Secchi, C. (2018). Survey on human–robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications. Mechatronics, 55, 248–266. https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2018.02.009

[29] von Bertalanffy, L. (1968). General system theory: Foundations, development, applications. George Braziller.

[30] von Foerster, H. (2003). Understanding: Essays on cybernetics and cognition. Springer.

[31] Wiener, N. (1948). Cybernetics: Or control and communication in the animal and the machine. Hermann & Cie; The Technology Press.