

Multidisciplinary Approaches to Addressing Complexity in Modern Engineering Systems

Orlando Micolini^{1,2,3}, Luis Ventre^{1,2}, Mauricio Ludemann^{1,2}, Carlos Barto¹.

¹ Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina

² FCEfN, Laboratorio de Arquitectura de Computadoras

³orlando.micolini@unc.edu.ar

Abstract: This study addresses the growing challenges associated with the complexity of contemporary engineering systems, proposing multidisciplinary approaches to optimize their design, control, and operation. Through a systematic literature review and case study analysis, the primary sources of complexity in critical systems—such as Industry 4.0, industrial production lines, energy distribution networks, among others—are identified and classified. The research employs advanced methodologies, including multiscale analysis, dynamic systems theory, fractional calculus, and computational modeling, to characterize and predict emergent behaviors in nonlinear systems.

The findings demonstrate the effectiveness of these methods in: (1) identifying non-obvious patterns, (2) reducing operational uncertainties, and (3) optimizing complex systems. The applications of multiscale analysis and fractional models in improving the predictability of machine learning algorithms are particularly noteworthy, as are the advantages of modular architectures in manufacturing environments to enhance adaptability. The study underscores the need to incorporate these methodological frameworks into both academic training and professional engineering practice, arguing that their adoption is crucial to addressing the technological challenges of the 21st century and improving key indicators such as efficiency, resilience, and systemic competitiveness.

As its main contribution, this research provides an integrated theoretical-practical framework for complexity management in engineering, with relevant implications for: (i) the development of technological innovations, and (ii) the evolution of the specialized labor market.

Keywords: Complexity in Engineering, Multidisciplinary Approaches, Industry 4.0 and 5.0, Cyber-Physical Systems (CPS), Artificial Intelligence (AI).

Enfoques Multidisciplinarios para la Abordar la Complejidad en Sistemas de Ingeniería Moderna

Resumen: Este estudio aborda los crecientes desafíos asociados con la complejidad de los sistemas de ingeniería contemporáneos, proponiendo

enfoques multidisciplinares para optimizar su diseño, control y operación. A través de una revisión sistemática de la literatura y análisis de casos de estudio, se identifican y clasifican las principales fuentes de complejidad en sistemas críticos como industria 4.0, cadenas de producción industrial, redes de distribución energética, entre otras. La investigación emplea metodologías avanzadas, incluyendo análisis multiescala, teoría de sistemas dinámicos, cálculo fraccional y modelado computacional, para caracterizar y predecir comportamientos emergentes en sistemas no lineales.

Los hallazgos demuestran la eficacia de estos métodos en: (1) la identificación de patrones no evidentes, (2) la reducción de incertidumbres operacionales, y (3) la optimización de sistemas complejos. Destacan particularmente las aplicaciones del análisis multiescala y los modelos fraccionales en mejorar la predictibilidad de algoritmos de machine learning, así como las ventajas de arquitecturas modulares en entornos de manufactura para incrementar la adaptabilidad. El estudio sustenta la necesidad de incorporar estos marcos metodológicos tanto en la formación académica como en la práctica profesional de ingeniería, argumentando que su adopción es crucial para enfrentar los retos tecnológicos del siglo XXI y mejorar indicadores clave como eficiencia, resiliencia y competitividad sistémica.

Como contribución principal, esta investigación ofrece un marco integrado teórico-práctico para la gestión de complejidad en ingeniería, con implicaciones relevantes para: (i) el desarrollo de innovaciones tecnológicas, y (ii) la evolución del mercado laboral especializado.

Palabras clave: Complejidad en Ingeniería, Enfoques Multidisciplinares, Industria 4.0 y 5.0, Sistemas Ciberfísicos, Inteligencia Artificial.

1 Introducción

La ingeniería contemporánea se enfrenta a desafíos sin precedentes derivados de la creciente complejidad de los sistemas tecnológicos. Estos sistemas —desde redes eléctricas hasta procesos de manufactura avanzada— se caracterizan por interacciones no lineales, dinámicas emergentes y una alta interdependencia entre sus componentes, lo que dificulta su predictibilidad, control y optimización.

El objetivo principal de este trabajo es explorar y proponer estrategias para abordar la complejidad en sistemas tecnológicos modernos, utilizando herramientas como la simulación computacional, el análisis fractal (Steeb 2014), el cálculo fraccional (Podlubny 1998, Ahmad and Ntouyas 2024, Coelho, Costa et al. 2024) y la inteligencia artificial (Radanliev, De Roure et al. 2021). A través de una revisión sistemática de la literatura y el análisis de casos de estudio, se busca identificar las principales fuentes de complejidad en diversos campos de la ingeniería, como la manufactura y los sistemas ciberfísicos (Lee, Bagheri et al. 2015), y proponer soluciones prácticas para su gestión.

La relevancia de este estudio radica en su potencial para proporcionar herramientas teóricas y prácticas que permitan a los ingenieros enfrentar los desafíos de sistemas cada vez más complejos. La literatura existente respalda la importancia de estos enfoques. Por ejemplo, (Gao and Xu 2021) destacan el papel del análisis multiescala

en la identificación de patrones emergentes, mientras que (ElMaraghy, ElMaraghy et al. 2012) abordan la complejidad en el diseño y la manufactura desde una perspectiva global. Estos trabajos, junto con otros estudios recientes, proporcionan un marco teórico sólido para entender y gestionar la complejidad en la ingeniería.

Un aspecto clave de este estudio es la exploración de la Industria 4.0 (Patnaik 2019), que representa un paradigma transformador en la producción industrial, caracterizado por la integración de tecnologías avanzadas como el Internet de las Cosas (IoT) (Tripathy and Anuradha 2017), la inteligencia artificial (IA), la robótica avanzada y el big data (Howard 2019). Estos sistemas ciberfísicos (CPS), que combinan componentes físicos y digitales, operan en entornos dinámicos y altamente interconectados, lo que introduce una complejidad inherente debido a su naturaleza distribuida, su capacidad de adaptación en tiempo real y su dependencia de infraestructuras de comunicación robustas y seguras. La gestión de esta complejidad es esencial para garantizar la eficiencia, la resiliencia y la sostenibilidad en los procesos industriales.

Además, la transición hacia la Industria 5.0 (Golovianko, Terziyan et al. 2023, Saniuk, Grabowska et al. 2024) añade una capa adicional de complejidad al incorporar dimensiones sociales, ambientales y éticas en el diseño y operación de los sistemas industriales. A diferencia de la Industria 4.0, centrada en la automatización y la eficiencia operativa, la Industria 5.0 enfatiza la sostenibilidad, la resiliencia y la centralidad humana. Este enfoque implica no solo optimizar los procesos técnicos, sino también considerar el impacto ambiental, promover la economía circular y garantizar que las tecnologías emergentes estén al servicio del bienestar humano. La integración de estos aspectos en el diseño de sistemas ciberfísicos y de inteligencia artificial representa un desafío significativo, ya que requiere un enfoque interdisciplinario que combine conocimientos técnicos con perspectivas humanísticas y sociales.

La integración de estas metodologías en la educación y la práctica profesional tiene implicaciones significativas para la empleabilidad de los ingenieros (Supriya, Bhulakshmi et al. 2024). En un mundo cada vez más interconectado y tecnológicamente avanzado, la capacidad de resolver problemas complejos y adaptarse a entornos dinámicos es esencial. La enseñanza de modelos dinámicos, sistemas no lineales y análisis multiescala puede mejorar la formación de los estudiantes, mientras que la adopción de herramientas computacionales avanzadas, como la simulación numérica y el aprendizaje automático, puede potenciar su empleabilidad en un mercado laboral competitivo , (Gao and Xu 2021, Valaskova, Nagy et al. 2024).

En resumen, este estudio no solo contribuye al campo de la ingeniería al proporcionar un marco teórico y metodológico para entender y gestionar la complejidad, sino que también ofrece estrategias prácticas para mejorar la eficiencia, resiliencia y competitividad en el diseño y gestión de sistemas tecnológicos. La integración de estos enfoques en la educación y la industria es crucial para enfrentar los desafíos tecnológicos del siglo XXI, especialmente en el contexto de la Industria 4.0 y 5.0, donde los sistemas ciberfísicos y la inteligencia artificial desempeñan un papel central en la transformación de los procesos industriales.

2 Metodologías en los Estudios sobre Complejidad en la Ingeniería

Los estudios analizados sobre la complejidad en la ingeniería comparten una metodología basada en la revisión sistemática de la literatura, el análisis de casos de estudio y la aplicación de herramientas computacionales y matemáticas para modelar y simular sistemas complejos (Gao and Xu 2021) (ElMaraghy, ElMaraghy et al. 2012, Sayama 2015, Downey 2018). A continuación, se presenta una síntesis de las metodologías utilizadas en cada uno de los trabajos revisados, destacando los enfoques y técnicas comunes que permiten abordar la complejidad en diversos contextos de la ingeniería.

En el estudio titulado "**Complejidad en la Ingeniería: Emergencia y Análisis Multiescala**" (Sayama 2015), la metodología adoptada combina el análisis de literatura con estudios de caso específicos en los que la emergencia y la complejidad han sido determinantes en la ingeniería. Se revisan trabajos clave en la modelización de sistemas complejos, con un enfoque particular en la aplicación del análisis multiescala. Las técnicas de recolección de datos incluyen el estudio de modelos matemáticos basados en la teoría del caos, la multifractalidad y los sistemas dinámicos. Además, se emplean simulaciones computacionales para evaluar la eficacia del análisis multiescala en la predicción de comportamientos emergentes en redes y estructuras ingenieriles.

Por su parte, el trabajo "Complejidad en la Ingeniería: Diseño y Manufactura en un Entorno Global" (ElMaraghy, ElMaraghy et al. 2012) utiliza un enfoque metodológico que integra el análisis de literatura con casos específicos en los que la complejidad ha sido un factor determinante en la manufactura y el diseño. Se revisan artículos académicos y reportes técnicos que abordan la gestión de la complejidad desde diversas perspectivas, como el diseño de productos, la manufactura flexible y los sistemas ciberfísicos. Se emplean métricas de complejidad estructural y operativa, basadas en teoría de la información y entropía, para analizar sistemas de manufactura. Además, se analizan datos sobre la evolución de la manufactura modular y la integración de inteligencia artificial para reducir la incertidumbre en la toma de decisiones.

En el estudio "Complejidad en la Ingeniería: Teoría, Tipos y Estrategias para su Reducción" (ElMaraghy, ElMaraghy et al. 2012), se adopta un enfoque teórico-práctico, utilizando la teoría del diseño axiomático como marco conceptual. La investigación se divide en tres fases principales: definición y clasificación de la complejidad, identificación de estrategias para su reducción, y aplicación de estas estrategias en casos de estudio concretos. Los datos se obtienen a través de la revisión de literatura científica, análisis de casos de estudio y modelado matemático. Las técnicas de análisis incluyen la construcción de matrices de diseño para evaluar el acoplamiento entre requisitos funcionales (FRs) y parámetros de diseño (DPs), así como la simulación de sistemas con y sin periodicidad funcional.

En el estudio "**Complejidad en la Ingeniería: Modelado y Análisis de Sistemas Complejos**" (Sayama 2015), la metodología se basa en una revisión exhaustiva de la literatura y la simulación computacional de modelos basados en reglas. Se utilizan

herramientas como Python y PyCX para modelar sistemas dinámicos. El diseño del estudio se centra en la identificación de los principios fundamentales de los sistemas complejos, su aplicación en problemas de ingeniería y la evaluación de la efectividad de los modelos propuestos. Las técnicas de análisis incluyen la visualización de espacios de fase y la identificación de atractores, lo que permite comprender la estabilidad y sensibilidad de los sistemas.

En el trabajo **"Complejidad en la Ingeniería: Modelado y Simulación de Sistemas Dinámicos"** (Sayama 2015), se emplean ecuaciones en diferencias para modelar sistemas discretos y ecuaciones diferenciales para sistemas continuos. Se utiliza el método de Euler para la integración numérica de ecuaciones diferenciales, con el fin de simular el comportamiento de sistemas no lineales. Los materiales utilizados incluyen simulaciones computacionales implementadas en Python, con bibliotecas como pylab y matplotlib para la visualización de resultados. Las técnicas de análisis incluyen la identificación de puntos de equilibrio, el cálculo de valores propios y vectores propios, y la visualización de trayectorias en el espacio de fase.

En el estudio **"Complejidad en la Ingeniería: Un Enfoque en Modelos Dinámicos y Sistemas No Lineales"** (Barros and Gomes 2003), la metodología se basa en una revisión sistemática de la literatura y el análisis de casos específicos. Se utilizan técnicas de análisis cualitativo para identificar los conceptos clave y su relevancia en la ingeniería. Los materiales utilizados incluyen estudios de caso, modelos matemáticos y simulaciones numéricas. Las técnicas de análisis incluyen la comparación de resultados entre distintos enfoques y la interpretación de gráficos y diagramas de bifurcación, lo que permite predecir el comportamiento de sistemas complejos.

En la **ingeniería en computación**, la complejidad se presenta como un fenómeno multidimensional que influye en todos los niveles de diseño, implementación y operación de sistemas informáticos. Esta complejidad no se limita únicamente a la eficiencia de los algoritmos, sino que también abarca la interacción entre componentes de hardware y software, la gestión de sistemas distribuidos y la escalabilidad de aplicaciones en entornos dinámicos y heterogéneos. Comprender y gestionar esta complejidad es esencial para desarrollar sistemas robustos, eficientes y adaptables, capaces de enfrentar los desafíos tecnológicos actuales y futuros (Sommerville 2016).

Uno de los pilares fundamentales en el estudio de la complejidad en la ingeniería en computación es la complejidad computacional, un campo que analiza los recursos necesarios para resolver problemas algorítmicos, como el tiempo de ejecución y el uso de memoria. La teoría de la complejidad computacional clasifica los problemas en categorías según su dificultad intrínseca, lo que permite distinguir entre aquellos que son tratables en la práctica y aquellos que, debido a su naturaleza, requieren enfoques alternativos como la aproximación o las heurísticas. Esta clasificación es particularmente relevante en áreas como la inteligencia artificial, la criptografía y el procesamiento de grandes volúmenes de datos, donde la eficiencia algorítmica puede determinar la viabilidad de una solución.

No obstante, la complejidad en la ingeniería en computación trasciende el ámbito de los algoritmos individuales. Los sistemas distribuidos, por ejemplo, representan un

desafío significativo debido a su naturaleza descentralizada y a la necesidad de coordinar múltiples nodos que operan en paralelo. En estos sistemas, la complejidad surge de factores como la concurrencia, la tolerancia a fallos, la consistencia de datos y la latencia en la comunicación. Gestionar estas variables de manera efectiva requiere no solo un diseño modular y escalable, sino también el uso de protocolos y herramientas avanzadas que aseguren la coherencia y la fiabilidad del sistema en su conjunto (Benbya, Nan et al. 2020) (Ventre, Micolini et al. 2023).

Otra dimensión crítica de la complejidad en la ingeniería en computación es **la complejidad de software**. A medida que los sistemas de software aumentan en tamaño y funcionalidad, su estructura interna tiende a volverse más intrincada, lo que dificulta su mantenimiento, extensión y verificación. Estrategias como la modularidad, los principios de diseño orientado a objetos y las metodologías ágiles se emplean comúnmente para mitigar esta complejidad. Sin embargo, la creciente interdependencia entre componentes, la integración con sistemas legacy y la necesidad de cumplir con requisitos no funcionales, como la seguridad y el rendimiento, añaden capas adicionales de complejidad que deben abordarse de manera sistemática (Sommerville 2016).

Además, la complejidad en la ingeniería en computación está intrínsecamente ligada a la evolución tecnológica. El surgimiento de paradigmas como **la computación en la nube, el Internet de las cosas (IoT) y la computación cuántica** introduce nuevos desafíos que demandan enfoques innovadores para su gestión. Por ejemplo, en la computación en la nube, la complejidad se deriva de la virtualización de recursos, la elasticidad de las infraestructuras y la gestión de servicios en entornos multi-tenancy. De manera similar, en el IoT, la interconexión de dispositivos heterogéneos y la necesidad de procesamiento en el borde (edge computing) añaden capas adicionales de complejidad que deben abordarse para garantizar la interoperabilidad y la eficiencia (Johnson and Wetmore 2021).

En resumen, la complejidad en la ingeniería en computación es un fenómeno multifacético que abarca desde la eficiencia algorítmica hasta la gestión de sistemas distribuidos y la evolución de paradigmas tecnológicos emergentes. Su comprensión y gestión requieren un enfoque interdisciplinario que combine principios teóricos, metodologías de diseño avanzadas y herramientas tecnológicas innovadoras. Solo a través de este enfoque integral es posible desarrollar sistemas informáticos que no solo sean eficientes y robustos, sino también capaces de adaptarse a las demandas cambiantes de un mundo cada vez más interconectado y dependiente de la tecnología.

En el ámbito educativo, la iniciativa **"Educación 4.0"** busca alinear los programas académicos con las demandas de la Industria 4.0, fomentando un aprendizaje basado en problemas, colaborativo y personalizado. Universidades líderes, como el MIT y la Universidad Nacional de Singapur, ya han comenzado a implementar programas que integran conceptos y tecnologías de la Industria 4.0, preparando a los estudiantes para los desafíos del futuro. Este enfoque educativo no solo enfatiza la adquisición de conocimientos técnicos, sino también el desarrollo de habilidades blandas, como el pensamiento crítico, la resolución de problemas y la colaboración interdisciplinaria, esenciales para navegar en un entorno tecnológico en constante evolución (Supriya, Bhulakshmi et al. 2024).

En la **Industria 4.0 y su evolución hacia la Industria 5.0** (Zizic, Mladineo et al. 2022) representan paradigmas transformadores en la producción industrial, marcados por la integración de tecnologías avanzadas y la interconexión de sistemas físicos y digitales, lo que da lugar a entornos de una complejidad sin precedentes. En la Industria 4.0, la convergencia del Internet de las Cosas (IoT), la inteligencia artificial, la robótica avanzada y el big data redefine los procesos industriales, creando sistemas ciberfísicos que operan de manera autónoma y en tiempo real. Estos sistemas, al combinar componentes físicos y digitales, generan una complejidad inherente que surge de su naturaleza distribuida, su capacidad de adaptación dinámica y su dependencia de infraestructuras de comunicación robustas y seguras.

La complejidad en **la Industria 4.0** se manifiesta en múltiples dimensiones, comenzando por la interoperabilidad entre dispositivos y sistemas heterogéneos, que requiere protocolos estandarizados y arquitecturas flexibles para integrar tecnologías diversas de manera fluida. Asimismo, la necesidad de procesamiento en tiempo real y la gestión de grandes volúmenes de datos exigen algoritmos eficientes y plataformas escalables capaces de manejar flujos de información en constante crecimiento. La seguridad cibernética emerge como un desafío crítico, ya que la interconexión de sistemas amplía la superficie de exposición a posibles ataques, lo que demanda estrategias avanzadas de protección y recuperación ante fallos.

La transición hacia la Industria 5.0 añade una capa adicional de complejidad al incorporar dimensiones sociales, ambientales y éticas en el diseño y operación de los sistemas industriales. A diferencia de la Industria 4.0, centrada en la automatización y la eficiencia operativa, la Industria 5.0 enfatiza la sostenibilidad, la resiliencia y la centralidad humana. Este enfoque implica no solo optimizar los procesos técnicos, sino también considerar el impacto ambiental de las actividades industriales, promover la economía circular y garantizar que las tecnologías emergentes estén al servicio del bienestar humano.

La sostenibilidad, como pilar de la **Industria 5.0**, introduce desafíos adicionales en términos de eficiencia energética, reducción de emisiones y gestión de recursos. Los sistemas deben diseñarse para minimizar su huella ambiental, lo que requiere innovaciones en materiales, procesos de fabricación y cadenas de suministro. La resiliencia, por su parte, implica la capacidad de los sistemas para adaptarse y recuperarse ante perturbaciones, ya sean de origen tecnológico, natural o social. Esto exige no solo redundancia y flexibilidad en los sistemas técnicos, sino también una comprensión profunda de los factores externos que pueden afectar su operación.

La centralidad humana en la Industria 5.0 añade otra dimensión de complejidad al requerir que las tecnologías no solo sean eficientes y sostenibles, sino también inclusivas y éticas. Esto implica diseñar sistemas que potencien las capacidades humanas, fomenten la colaboración entre personas y máquinas, y respeten principios como la privacidad, la transparencia y la equidad. La integración de aspectos sociales y éticos en el diseño tecnológico representa un desafío significativo, ya que requiere un enfoque interdisciplinario que combine conocimientos técnicos con perspectivas humanísticas y sociales.

En resumen, **la complejidad en la Industria 4.0 y 5.0** se deriva de la interacción de múltiples factores técnicos, ambientales y sociales. Mientras que la Industria 4.0 se

centra en la integración de tecnologías avanzadas y la creación de sistemas ciberfísicos autónomos, la Industria 5.0 amplía este enfoque al incorporar consideraciones de sostenibilidad, resiliencia y centralidad humana. Gestionar esta complejidad requiere no solo avances tecnológicos, sino también un enfoque holístico que considere el impacto ambiental, la adaptabilidad ante perturbaciones y el papel central de las personas en la evolución de los sistemas industriales. Este enfoque integral es esencial para construir un futuro industrial que sea no solo eficiente y innovador, sino también sostenible y centrado en el ser humano.

La implementación de la Industria 4.0 y 5.0 ha generado una creciente demanda de profesionales capaces de manejar tecnologías avanzadas y trabajar en entornos interdisciplinarios. En el ámbito de la ingeniería en computación, esto se traduce en la necesidad de desarrollar habilidades técnicas, como la comprensión de tecnologías emergentes (IA, IoT, CPS), y habilidades blandas, como la comunicación efectiva y el trabajo en equipo.

En **los sistemas ciberfísicos (CPS) y la inteligencia artificial (IA)** (Radanliev, De Roure et al. 2021) representan dos pilares fundamentales en la ingeniería moderna para abordar la complejidad inherente a los sistemas contemporáneos. Estos sistemas no solo combinan componentes físicos y computacionales, sino que también operan en entornos dinámicos, interconectados y altamente interdependientes, donde la incertidumbre, la variabilidad y la necesidad de adaptación son características intrínsecas. La ciencia de la complejidad, con sus principios fundamentales como la emergencia, la autoorganización, la no linealidad y la adaptabilidad, proporciona un marco teórico y práctico esencial para comprender y gestionar la complejidad en estos dominios.

Los sistemas ciberfísicos, que integran sensores, actuadores, redes de comunicación y unidades de procesamiento, son un ejemplo paradigmático de sistemas complejos. Su operación requiere la sincronización precisa entre el mundo físico y el digital, lo que implica gestionar flujos de datos en tiempo real, garantizar la robustez frente a fallos y mantener la coherencia en entornos distribuidos. La complejidad en los CPS surge no solo de la interacción entre sus componentes, sino también de la necesidad de adaptarse a cambios en el entorno, como fluctuaciones en las condiciones operativas o perturbaciones externas. Aquí, la no linealidad juega un papel crucial, ya que pequeños cambios en las entradas pueden generar efectos significativos en el comportamiento del sistema, lo que dificulta su predicción y control.

La inteligencia artificial, por su parte, introduce capacidades avanzadas de procesamiento y toma de decisiones que permiten gestionar la complejidad en sistemas ciberfísicos y otros dominios. Los algoritmos de IA, especialmente aquellos basados en aprendizaje automático y redes neuronales, son capaces de identificar patrones en grandes volúmenes de datos, predecir comportamientos futuros y optimizar procesos en tiempo real. Sin embargo, la propia naturaleza de la IA añade una capa adicional de complejidad, ya que los modelos de aprendizaje automático pueden volverse intrínsecamente opacos, lo que dificulta su interpretación y verificación. Este fenómeno, conocido como el problema de la "caja negra", plantea desafíos significativos en términos de transparencia, confiabilidad y ética,

especialmente en aplicaciones críticas como la medicina, la automoción autónoma o la gestión de infraestructuras.

La **ciencia de la complejidad** ofrece herramientas conceptuales y metodológicas para abordar estos desafíos. El principio de emergencia, por ejemplo, explica cómo comportamientos complejos y globales pueden surgir de interacciones simples entre componentes individuales. En los CPS, este fenómeno se manifiesta en la aparición de propiedades sistémicas que no pueden ser explicadas únicamente a partir de los elementos individuales, como la resiliencia o la capacidad de autoorganización. La autoorganización, otro principio clave, permite que los sistemas se ajusten y optimicen de manera autónoma en respuesta a cambios en el entorno, lo que es esencial para garantizar la estabilidad y eficiencia en sistemas distribuidos y dinámicos.

La no linealidad, por otro lado, es una característica inherente a muchos sistemas ciberfísicos y de IA, donde las relaciones entre entradas y salidas no siguen proporciones simples. Este comportamiento no lineal puede dar lugar a fenómenos como el caos o la sensibilidad a las condiciones iniciales, lo que complica el diseño de estrategias de control y predicción. Finalmente, la adaptabilidad es un principio fundamental que permite a los sistemas ajustarse a nuevas condiciones y aprender de experiencias pasadas, una capacidad que es especialmente relevante en aplicaciones de IA y CPS que operan en entornos cambiantes y no estructurados.

En resumen, la complejidad en los sistemas ciberfísicos y la inteligencia artificial es un fenómeno multifacético que requiere **un enfoque interdisciplinario** para su comprensión y gestión. La ciencia de la complejidad, con sus principios de emergencia, autoorganización, no linealidad y adaptabilidad, proporciona un marco teórico y práctico esencial para abordar estos desafíos. Al integrar estos principios en el diseño y operación de CPS y sistemas de IA, es posible desarrollar soluciones robustas, eficientes y adaptables que puedan enfrentar los desafíos de un mundo cada vez más interconectado y dinámico. Este enfoque no solo es fundamental para el avance de la ingeniería moderna, sino también para garantizar que las tecnologías emergentes sean confiables, transparentes y alineadas con los valores humanos.

2.1 Comentarios sobre la Metodológica

Se ha presentado una visión detallada y estructurada de las metodologías empleadas en los estudios sobre complejidad en la ingeniería, destacando la importancia de enfoques interdisciplinarios que combinan la revisión sistemática de la literatura, el análisis de casos de estudio y la aplicación de herramientas computacionales y matemáticas avanzadas. Este enfoque metodológico es fundamental para abordar la complejidad inherente a los sistemas modernos, que se caracterizan por su naturaleza no lineal, dinámica y altamente interdependiente.

En particular, se destaca el uso de técnicas como la simulación computacional, el modelado matemático y el análisis de datos experimentales, que permiten a los investigadores explorar y predecir comportamientos emergentes en sistemas complejos. Estas metodologías no solo proporcionan una comprensión más profunda de los fenómenos emergentes, sino que también ofrecen estrategias prácticas para la

optimización y el diseño de sistemas tecnológicos en entornos cada vez más complejos y dinámicos.

Además, el texto subraya la relevancia de enfoques como el análisis multiescala, la teoría del caos y los modelos fraccionales, que han demostrado ser efectivos en la identificación de patrones ocultos y en la reducción de la incertidumbre en sistemas no lineales. Estos enfoques son particularmente útiles en campos como la ingeniería de materiales, la manufactura avanzada y los sistemas ciberfísicos, donde la complejidad es un factor determinante.

En resumen, el texto ofrece una visión integral de las metodologías utilizadas en los estudios sobre complejidad, destacando su importancia para la gestión de sistemas tecnológicos modernos. La combinación de herramientas teóricas y prácticas, junto con un enfoque interdisciplinario, es esencial para enfrentar los desafíos de la ingeniería contemporánea y para desarrollar soluciones robustas y eficientes en un mundo cada vez más interconectado y tecnológicamente avanzado.

2.2 Resultados en los Estudios sobre Complejidad en la Ingeniería

Los estudios analizados sobre la complejidad en la ingeniería presentan una variedad de hallazgos que destacan la importancia de enfoques multidisciplinarios para abordar sistemas complejos. A continuación, se presenta una síntesis de los resultados obtenidos en cada uno de los trabajos revisados, organizados de manera clara y respaldados por datos concretos y referencias bibliográficas relevantes.

Emergencia y Análisis Multiescala: los resultados de este estudio muestran que el análisis multiescala es una herramienta efectiva para identificar dinámicas ocultas en sistemas ingenieriles. Se han identificado varios casos en los que la emergencia ha dado lugar a comportamientos inesperados, como la formación de patrones de tráfico en infraestructuras urbanas y la dinámica de redes eléctricas en situaciones de sobrecarga. Además, se ha observado que el análisis fractal y la teoría del caos pueden mejorar la predictibilidad y el control de sistemas altamente no lineales. Estos hallazgos sugieren que la capacidad de detectar puntos críticos en la evolución de un sistema permite la implementación de estrategias de mitigación de riesgos y optimización de recursos. (Gao and Xu 2021).

Diseño y Manufactura en un Entorno Global: los hallazgos de este estudio indican que la complejidad en la ingeniería no solo es inevitable, sino que puede ser gestionada de manera estratégica. Se identificaron tres fuentes principales de complejidad en manufactura: el incremento en la diversidad de productos, la interconectividad de los sistemas productivos y la incertidumbre del mercado. Los enfoques de modularidad y manufactura flexible han demostrado ser efectivos en la reducción de la complejidad percibida, permitiendo una mayor adaptabilidad a las condiciones cambiantes del mercado. La integración de herramientas digitales, como los sistemas de planificación de recursos empresariales (ERP) y el aprendizaje automático, ha mejorado la capacidad de predicción y optimización en procesos industriales (ElMaraghy, ElMaraghy et al. 2012).

Teoría, Tipos y Estrategias para su Reducción: este estudio demuestra que la complejidad en los sistemas de ingeniería puede reducirse significativamente

mediante la aplicación de principios de diseño axiomático. Se identifican cuatro tipos de complejidad: complejidad real independiente del tiempo, complejidad imaginaria independiente del tiempo, complejidad combinatoria dependiente del tiempo y complejidad periódica dependiente del tiempo. La introducción de periodicidad funcional es particularmente efectiva para transformar sistemas con complejidad combinatoria en sistemas con complejidad periódica, garantizando su estabilidad a largo plazo. Los resultados muestran que la periodicidad funcional puede lograrse de diversas maneras, incluyendo periodicidad temporal, geométrica y biológica (Suh 2005).

Los Sistemas Multi-Agente (MAS): los Sistemas Multi-Agente emergen como un paradigma clave en ingeniería al ofrecer soluciones distribuidas para problemas complejos. Son eficaces en dominios como redes computacionales, donde optimizan el enrutamiento y gestión de recursos; robótica colaborativa, permitiendo coordinación autónoma; e infraestructuras inteligentes, facilitando respuestas adaptativas ante fallos.

Su valor en el diseño ingenieril radica en características como sociabilidad, proactividad y capacidad de aprendizaje, que permiten abordar sistemas dinámicos con incertidumbre. Los MAS superan limitaciones de enfoques centralizados en escalabilidad y tolerancia a fallos, aunque persisten desafíos en seguridad y asignación de tareas en entornos heterogéneos.

En esencia, los MAS representan una herramienta fundamental para el diseño de sistemas distribuidos, ofreciendo un marco flexible y robusto para aplicaciones que requieren autonomía y adaptabilidad en tiempo real, marcando así nuevas direcciones para la innovación en ingeniería. (Dorri, Kanhere et al. 2018)

Modelado y Simulación de Sistemas Dinámicos: los resultados muestran que los sistemas lineales tienden a exhibir comportamientos predecibles, como crecimiento exponencial, decaimiento u oscilaciones periódicas, mientras que los sistemas no lineales pueden mostrar comportamientos más complejos, como caos o atractores extraños. Un ejemplo destacado es el modelo logístico, que muestra cómo un sistema simple puede exhibir comportamientos complejos, como la convergencia a un punto de equilibrio o la oscilación caótica, dependiendo de los parámetros del modelo. Además, se demuestra que el método de Euler, aunque simple, es efectivo para simular sistemas continuos, aunque puede introducir errores numéricos significativos si el paso de tiempo no es lo suficientemente pequeño. (Strogatz 2018).

Un Enfoque en Modelos Dinámicos y Sistemas No Lineales: los resultados del estudio revelan que los modelos dinámicos y sistemas no lineales son herramientas poderosas para el análisis de sistemas complejos. En particular, se encontró que la visualización del espacio de fase y el análisis de estabilidad lineal son esenciales para comprender el comportamiento de sistemas no lineales. Los sistemas caóticos, como el atractor de Lorenz, son fundamentales para entender fenómenos como la turbulencia en fluidos y la dinámica de poblaciones. Los diagramas de bifurcación y los exponentes de Lyapunov demostraron ser herramientas útiles para predecir el comportamiento de sistemas complejos. (Sayama 2015)

Complejidad en Sistemas Ciberfísicos y de Control: los sistemas ciberfísicos (CPS) representan un ejemplo paradigmático de sistemas complejos, ya que integran

componentes computacionales (software y hardware), físicos y de red. Estos sistemas operan en entornos dinámicos y deben adaptarse a cambios en tiempo real, lo que introduce desafíos significativos en términos de modelización, control y validación. La teoría de control moderno y el enfoque de espacio de estados proporcionan herramientas conceptuales y metodológicas para gestionar esta complejidad, permitiendo el diseño de algoritmos de control en tiempo real que son fundamentales en aplicaciones como la robótica y los vehículos autónomos (Klikovits, Al-Ali et al. 2019, Ogata 2020) .

Complejidad en la Industria 4.0 y 5.0: la Industria 4.0, caracterizada por la integración del Internet de las Cosas (IoT) y tecnologías emergentes en la producción industrial, introduce sistemas ciberfísicos que combinan componentes físicos y digitales. Estos sistemas son inherentemente complejos debido a su naturaleza distribuida, su capacidad de operar en tiempo real y su adaptabilidad a entornos dinámicos. La Industria 5.0 añade una capa adicional de complejidad al enfocarse en la sostenibilidad, la resiliencia y la centralidad humana, lo que implica considerar no solo aspectos técnicos, sino también sociales y ambientales. (Lu 2020, Zizic, Mladineo et al. 2022).

Complejidad en la Ingeniería en Computación: la complejidad en la ingeniería en computación se manifiesta en múltiples dimensiones, desde el diseño de algoritmos eficientes hasta la gestión de sistemas distribuidos a gran escala. La modularidad, el uso de herramientas y frameworks avanzados, y el enfoque en la calidad del código son estrategias clave para gestionar esta complejidad. Además, el pensamiento sistémico y la adopción de enfoques interdisciplinarios son esenciales para abordar la complejidad en sistemas computacionales (ElMaraghy, ElMaraghy et al. 2012) (Suh 2005).

Complejidad en la Educación Ingenieril: la complejidad de los sistemas modernos requiere que los ingenieros del siglo XXI posean un conjunto amplio de habilidades, incluyendo la capacidad de gestionar cambios, transitar de la tecnología a soluciones operativas y operar en entornos transdisciplinarios. Esto plantea un desafío significativo para la educación ingenieril, que debe reformarse para preparar a los graduados en un mundo donde las fronteras entre disciplinas se desdibujan y las megatendencias tecnológicas exigen adaptabilidad continua.(Force 2020)

Complejidad en Sistemas Ciberfísicos y Inteligencia Artificial: los sistemas ciberfísicos (CPS) y la inteligencia artificial (IA) son herramientas clave para abordar la complejidad en la ingeniería moderna. Estos sistemas no solo integran componentes físicos y computacionales, sino que también operan en entornos dinámicos y altamente interconectados, donde la incertidumbre y la adaptabilidad son inherentes. La ciencia de la complejidad, con principios como la emergencia, la autoorganización, la no linealidad y la adaptabilidad, ofrece un marco teórico y práctico para entender y gestionar estos sistemas. (Radanliev, De Roure et al. 2021)

2.3 Comentarios sobre la Síntesis de Resultados

En general, los resultados de estos estudios destacan la importancia de enfoques multidisciplinarios para abordar la complejidad en la ingeniería. La aplicación de

herramientas como el análisis multiescala, el diseño axiomático, el cálculo fraccional y la simulación computacional ha demostrado ser efectiva para mejorar la predictibilidad, el control y la optimización de sistemas complejos. Estos hallazgos no solo contribuyen a la comprensión teórica de los sistemas complejos, sino que también ofrecen estrategias prácticas para su gestión en diversos campos de la ingeniería. La integración de estas herramientas en la educación y la práctica de la ingeniería es esencial para enfrentar los desafíos tecnológicos del siglo XXI.

3 Conclusión

Este estudio evidencia el papel central de los sistemas complejos y los modelos dinámicos en la ingeniería contemporánea, destacando su capacidad para mejorar la predictibilidad, el diseño y la optimización de sistemas tecnológicos. Los hallazgos subrayan la eficacia de enfoques como el análisis multiescala, los modelos fraccionales, los sistemas Ciberfísicos, sistemas de Control, Sistemas Multi-Agente, Sistemas No Lineales, la inteligencia Artificial, las Industria 4.0 y 5.0 y la simulación computacional, particularmente en ámbitos como la ingeniería en computación, redes y manufactura. Sin embargo, persisten limitaciones prácticas, como la demanda de datos empíricos precisos y la escalabilidad computacional, que requieren mayor desarrollo metodológico.

La integración de estos avances en la educación y la industria no solo fortalecerá las competencias profesionales ante problemas complejos, sino que también promoverá innovación y eficiencia en un mercado globalizado. Futuras investigaciones deberán ampliar la aplicación interdisciplinaria de estos modelos —especialmente en conjunción con inteligencia artificial— y optimizar su accesibilidad para entornos industriales. En definitiva, este trabajo consolida un marco teórico-metodológico para gestionar la complejidad en ingeniería, sentando bases para su evolución hacia sistemas tecnológicos más robustos y adaptativos.

References

- Ahmad, B. and S. K. Ntouyas (2024). Nonlinear Systems of Fractional Differential Equations, Springer.
- Barros, J. P. and L. Gomes (2003). Modifying Petri net models by means of crosscutting operations. Application of Concurrency to System Design, 2003. Proceedings. Third International Conference on.
- Benbya, H., N. Nan, H. Tanriverdi and Y. Yoo (2020). "Complexity and information systems research in the emerging digital world." MIS quarterly **44**(1): 1-17.
- Coelho, C., M. F. P. Costa and L. L. Ferrás (2024). "Fractional Calculus meets neural networks for Computer Vision: a survey." AI **5**(3): 1391-1426.
- Dorri, A., S. S. Kanhere and R. Jurdak (2018). "Multi-agent systems: A survey." Ieee Access **6**: 28573-28593.
- Downey, A. (2018). Think complexity: complexity science and computational modeling, "O'Reilly Media, Inc."
- ElMaraghy, W., H. ElMaraghy, T. Tomiyama and L. Monostori (2012). "Complexity in engineering design and manufacturing." CIRP annals **61**(2): 793-814.

- Force, C. T. (2020). "Computing Curricula 2020: Paradigms for Global Computing Education November 2020."
- Gao, J. and B. Xu (2021). "Complex systems, emergence, and multiscale analysis: A tutorial and brief survey." Applied Sciences **11**(12): 5736.
- Golovianko, M., V. Terziyan, V. Branytskyi and D. Malyk (2023). "Industry 4.0 vs. Industry 5.0: Co-existence, transition, or a hybrid." Procedia Computer Science **217**: 102-113.
- Howard, J. (2019). "Artificial intelligence: Implications for the future of work." American journal of industrial medicine **62**(11): 917-926.
- Johnson, D. G. and J. M. Wetmore (2021). Technology and society: Building our sociotechnical future, MIT press.
- Klikovits, S., R. Al-Ali, M. Amrani, A. Barisic, F. Barros, D. Blouin, E. Borde, D. Buchs, H. Giese and M. Goulão (2019). "State-of-the-art on Current Formalisms used in Cyber-Physical Systems Development."
- Lee, J., B. Bagheri and H.-A. Kao (2015). "A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems." Manufacturing Letters **3**: 18-23.
- Lu, H. (2020). Cognitive Internet of Things: Frameworks, Tools and Applications, Springer.
- Ogata, K. (2020). "Modern control engineering."
- Patnaik, i. (2019). New Paradigm of Industry 4.0: Internet of Things, Big Data & Cyber Physical Systems.
- Podlubny, I. (1998). Fractional differential equations: an introduction to fractional derivatives, fractional differential equations, to methods of their solution and some of their applications, elsevier.
- Radanliev, P., D. De Roure, M. Van Kleek, O. Santos and U. Ani (2021). "Artificial intelligence in cyber physical systems." AI & society **36**(3): 783-796.
- Saniuk, S., S. Grabowska and A. Adamik (2024). Smart Organizations in Industry 5.0: A Human-centric Approach, Taylor & Francis.
- Sayama, H. (2015). Introduction to the modeling and analysis of complex systems, Open SUNY Textbooks.
- Sommerville, I. (2016). "Software Engineering. International computer science series, Tenth Edition." ed: Addison Wesley.
- Steeb, W.-H. (2014). The nonlinear workbook: Chaos, fractals, cellular automata, genetic algorithms, gene expression programming, support vector machine, wavelets, hidden Markov models, fuzzy logic with C++, World Scientific Publishing Company.
- Strogatz, S. H. (2018). Nonlinear dynamics and chaos with student solutions manual: With applications to physics, biology, chemistry, and engineering, CRC press.
- Suh, N. P. (2005). "Complexity in engineering." CIRP annals **54**(2): 46-63.
- Supriya, Y., D. Bhulakshmi, S. Bhattacharya, T. R. Gadekallu, P. Vyas, R. Kaluri, S. Sumathy, S. Koppu, D. J. Brown and M. Mahmud (2024). "Industry 5.0 in smart education: Concepts, applications, challenges, opportunities, and future directions." IEEE Access.
- Tripathy, B. and J. Anuradha (2017). Internet of things (IoT): technologies, applications, challenges and solutions, CRC Press.
- Valaskova, K., M. Nagy and G. Grecu (2024). "Digital twin simulation modeling, artificial intelligence-based Internet of Manufacturing Things systems, and virtual machine and cognitive computing algorithms in the Industry 4.0-based Slovak labor market." Oeconomia Copernicana **15**(1): 95-143.
- Ventre, L. O., O. Micolini and A. Micolini (2023). "Utilización de Redes de Petri para la enseñanza de la concurrencia en la Ingeniería en Computación." JAIIO, Jornadas Argentinas de Informática **9**(11): 19-22.
- Zizic, M. C., M. Mladineo, N. Gjeldum and L. Celent (2022). "From industry 4.0 towards industry 5.0: A review and analysis of paradigm shift for the people, organization and technology." Energies **15**(14): 5221.