

**Complex Systems in the Digital Age: A Systematic Review of
Interconnection and Emergency Dynamics in Complex Networks**
**Sistemas complejos en la era digital: una revisión sistemática de las
dinámicas de interconexión y emergencia en redes complejas**

Autor:

Borja-Saavedra, Myrian Cecilia Dra. Mg.
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO (ESPOCH)

Docente

Quito – Ecuador



mc_borja@espoch.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0002-2013-6338>

Contreras-Vásquez, Luis
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO (ESPOCH)

Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica

Dirección de Investigación y Desarrollo

Ambato – Ecuador



lf.contreras@uta.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-8896-8264>

Bonilla-García, Nataly
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO (ESPOCH)

Facultad de Ciencias

Riobamba – Ecuador



nbonilla@espoch.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-6089-4876>

Fechas de recepción: 24-MAR-2025 aceptación: 24-ABR-2025 publicación: 30-JUN-2025



<https://orcid.org/0000-0002-8695-5005>

<http://mqrinvestigar.com/>



Resumen

La creciente interconexión en la era digital ha incrementado la complejidad de los sistemas, lo que plantea tanto desafíos como oportunidades para comprender las dinámicas de interconexión y emergencia en redes complejas. Por lo tanto, el artículo se enfoca en analizar estas dinámicas, a partir de una revisión sistemática de la literatura científica. Se llevó a cabo una búsqueda en bases de datos como Scopus, Web of Science, Google Académico, IEEE Xplore y ScienceDirect, utilizando palabras clave y operadores booleanos para identificar estudios relevantes. Los criterios de inclusión se limitaron a artículos científicos publicados en los últimos 10 años, en inglés o español, que abordaran temas sobre sistemas complejos y dinámicas emergentes. Se excluyeron aquellos estudios que no estaban disponibles en formato completo o que no cumplían con los requisitos de pertinencia. La metodología PRISMA fue aplicada para seleccionar y extraer datos de 12 artículos relevantes. Los resultados revelan que las dinámicas de interconexión y emergencia en redes complejas en la era digital son profundamente influidas por la estructura y características específicas de las redes, por ejemplo, las redes con propiedades de "mundo pequeño" y sin escala presentan una sincronización global más eficiente, además, se evidencian avances significativos en el análisis de redes temporales y ponderadas, que permiten una mejor comprensión de cómo las redes responden a condiciones cambiantes y cómo los sistemas complejos pueden adaptarse a nuevas circunstancias. Finalmente, la integración de enfoques innovadores, como las redes neuronales convolucionales, proporciona nuevas perspectivas para modelar la evolución de las redes. Sin embargo, persisten desafíos en la comprensión completa de la robustez de control y la adaptabilidad de estos sistemas, lo que subraya la necesidad de continuar desarrollando herramientas analíticas y combinando modelos teóricos con enfoques empíricos para abordar eficazmente los desafíos asociados con las redes complejas en el contexto digital.

Palabras claves: sistemas complejos; redes complejas; interconexión; emergencia; era digital



Abstract

The growing interconnection in the digital age has increased the complexity of systems, presenting both challenges and opportunities for understanding the dynamics of interconnection and emergence in complex networks. This article focuses on analyzing these dynamics through a systematic review of the scientific literature. A search was conducted in databases such as Scopus, Web of Science, Google Scholar, IEEE Xplore, and ScienceDirect, using keywords and Boolean operators to identify relevant studies. Inclusion criteria were limited to scientific articles published in the last 10 years, in English or Spanish, addressing topics related to complex systems and emerging dynamics. Studies that were not available in full text or did not meet relevance requirements were excluded. The PRISMA methodology was applied to select and extract data from 12 relevant articles. The results reveal that the dynamics of interconnection and emergence in complex networks in the digital age are profoundly influenced by the structure and specific characteristics of the networks. For example, networks with “small-world” and scale-free properties exhibit more efficient global synchronization. Furthermore, significant advances in the analysis of temporal and weighted networks provide a better understanding of how networks respond to changing conditions and how complex systems can adapt to new circumstances. Finally, the integration of innovative approaches, such as convolutional neural networks, offers new perspectives for modeling network evolution. However, challenges remain in fully understanding control robustness and adaptability of these systems, highlighting the need to continue developing analytical tools and combining theoretical models with empirical approaches to effectively address the challenges associated with complex networks in the digital context.

Keywords: complex systems; complex networks; interconnection; emergence; digital age



Introducción

En la era digital, la creciente interconexión de sistemas y redes ha dado lugar a una complejidad sin precedentes, revelando patrones y comportamientos emergentes que desafían los enfoques tradicionales de análisis. Este fenómeno de complejidad es ejemplificado por las redes complejas, las cuales se caracterizan por la interrelación de numerosos nodos que interactúan de manera diversa. Estas redes poseen propiedades emergentes que no se pueden explicar simplemente a partir de las características individuales de sus componentes (Boughiu, 2019). Por lo tanto, se vuelve esencial investigar y comprender cómo se manifiestan estas dinámicas emergentes en sistemas interconectados

A medida que profundizamos en la teoría de sistemas complejos, se revela que estos sistemas se definen como redes de componentes interdependientes que generan comportamientos globales no predecibles a partir de sus partes constituyentes. La emergencia, en este contexto, se manifiesta en fenómenos tan variados como redes sociales, ecosistemas y mercados financieros, donde el comportamiento global resulta de interacciones locales y no lineales. Esta propiedad de autoorganización, que permite a los sistemas complejos formar estructuras organizadas espontáneamente, es fundamental para mantener el equilibrio dinámico en medio del desorden (Moriello, 2003).

En consecuencia, la teoría de sistemas complejos proporciona un marco robusto para entender fenómenos que emergen de interacciones no lineales a múltiples escalas. En la era digital, la integración de modelos teóricos como la ecuación de Kuramoto se convierte en una herramienta clave para estudiar la sincronización en sistemas de osciladores acoplados. La ecuación 1 de Kuramoto se expresa como:

$$1) \quad \frac{d\phi_i}{dt} = \omega_i + \frac{K}{N} \sum_{j \in V(i)} \sin(\phi_i - \phi_j)$$

Donde

- ϕ_i : Representa la fase del oscilador
- i, ω_i : Es la frecuencia natural del oscilador
- K : Es la constante de acoplamiento



- N : Es el número de osciladores
- $V_{(i)}$: Denota el conjunto de vecinos conectados al oscilador i .

Esta ecuación captura cómo la interacción local entre nodos influye en la dinámica global del sistema, destacando cómo la sincronización emergente depende de la estructura topológica de la red (Boughiu, 2019).

Además, el análisis de redes complejas involucra una comprensión formal de su estructura. Cada nodo, también denominado vértice o elemento, se representa por símbolos como $V_1, V_2, \dots, V_N$, siendo N el total de nodos en la red. La relación entre nodos, por ejemplo, entre v_i y v_j , se expresa mediante pares ordenados v_i, v_j . Matemáticamente, una red, o grafo, se define como un conjunto de nodos $V = \{V_1, V_2, \dots, V_N\}$ y un conjunto de pares ordenados $E = \{(v_i, v_j)\}$ que forman conexiones dirigidas entre nodos v_i, v_j . Una red es considerada no dirigida si para cada conexión (v_i, v_j) existe también la conexión inversa v_j, v_i . De lo contrario, se clasifica como dirigida. Los nodos directamente conectados a un nodo v_i se conocen como sus vecinos, y el número de estos vecinos, o conexiones, se denomina conectividad de v_i (Aldana, 2011; Faci, 2018). La conectividad promedio de la red, según los autores está representada por la ecuación 2:

$$2) \quad \langle k \rangle = N^{-1} \sum_{i=1}^N K_i$$

Donde:

- $\langle k \rangle$: Es la conectividad promedio
- K_i : Es el grado del nodo i .

Las redes de interconexión se pueden clasificar en estáticas o directas, caracterizadas por enlaces permanentes entre nodos, y dinámicas o indirectas, que se reconfiguran en función de la demanda. La eficiencia y el comportamiento de una red compleja dependen de varios conceptos fundamentales: el número de nodos de la red, el grado de cada nodo (número de enlaces por nodo), el diámetro (máxima distancia mínima entre dos nodos) y el ancho de bisección, que indica el número mínimo de enlaces necesarios para dividir la red en dos partes iguales. Además, el coste del mensaje, que abarca el tiempo de procesamiento en los nodos

fuelle y destino, el retardo de propagación, el tiempo de transmisión determinado por el ancho de banda, la latencia total, y el throughput o capacidad de la red para procesar paquetes por unidad de tiempo, son factores determinantes para evaluar la eficiencia operativa de la red (Cámara, s.f).

Bajo este panorama, la aplicación de modelos como la ecuación de Kuramoto en redes complejas permite no solo analizar patrones de sincronización, sino también explorar cómo estos patrones pueden ser optimizados o controlados en redes digitales, que son la columna vertebral de los sistemas tecnológicos actuales. Este enfoque resulta fundamental para la comprensión de las dinámicas de interconexión y emergencia en redes complejas en la era digital, donde la estructura de las redes es cada vez más diversa y no uniforme.

En este contexto, la controlabilidad y la robustez son dos conceptos clave a tomar en cuenta en el análisis de redes complejas. La controlabilidad se refiere a la capacidad de una red para ser guiada desde un estado inicial a uno objetivo dentro de un período de tiempo determinado, lo cual es esencial para la manipulación y adaptación de redes complejas. Por otro lado, la robustez evalúa la habilidad de una red para recuperar su capacidad de control tras ser sometida a ataques destructivos, un aspecto crucial para mantener la estabilidad en entornos adversos (Sayama, s.f; Lou et al., 2022).

Por lo tanto, una revisión sistemática de la evidencia científica disponible es crucial para integrar y sintetizar el conocimiento actual sobre los sistemas complejos en la era digital. Este análisis permitirá identificar patrones, mecanismos y teorías que expliquen la emergencia y la adaptabilidad en redes complejas.

Material y métodos

Para la revisión bibliográfica, se aplicó la búsqueda en bases de datos científicas como Scopus, Web of Science, Google académico, IEEE Xplore y ScienceDirect con la estrategia de palabras clave como “sistemas complejos”, “redes complejas”, “interconexión”, “emergencia”, “adaptabilidad” y “era digital” junto con el empleo de operadores booleanos, como OR y AND.

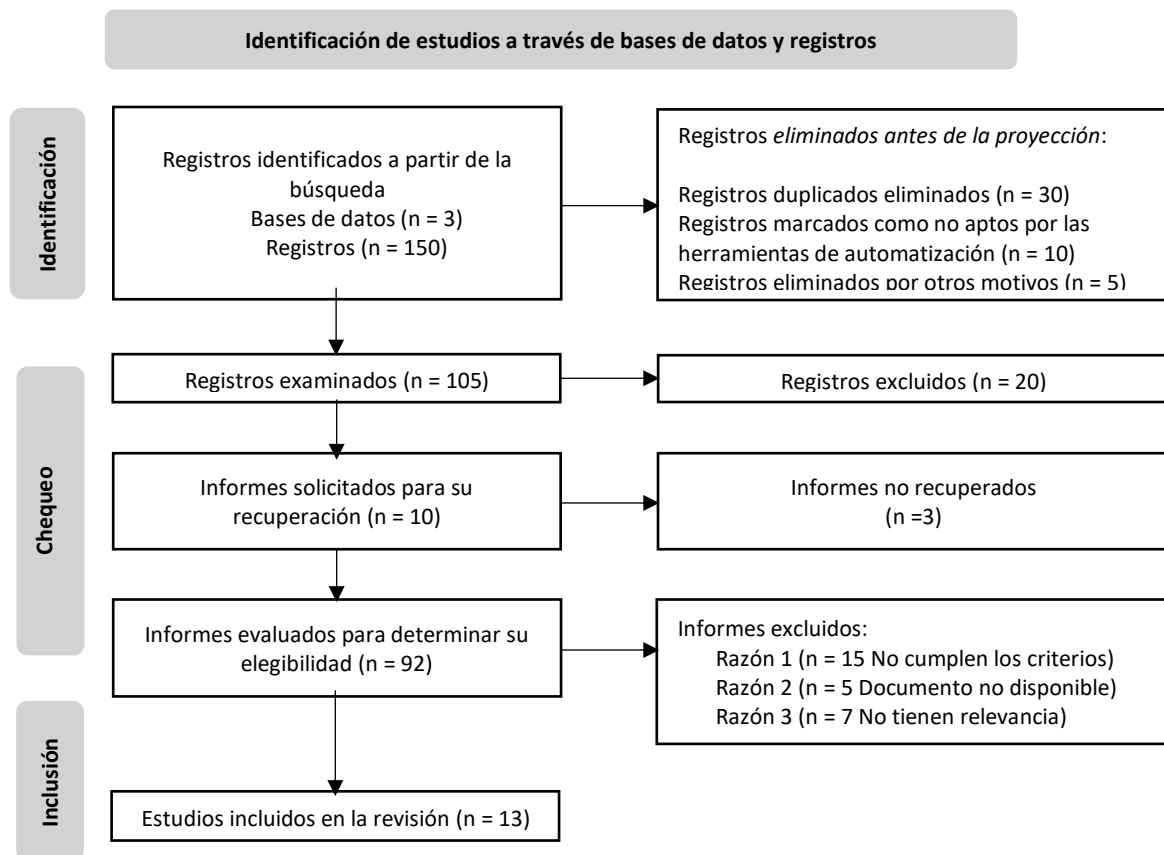
Los criterios de inclusión para la selección de estudios fueron los siguientes: artículos científicos publicados en revistas indexadas en los últimos 10 años, que abordaran temas relevantes relacionados con sistemas complejos, interconexión en redes, y dinámicas

emergentes en el contexto digital y se aceptaron publicaciones en inglés y español. Por otro lado, se excluyeron artículos que no cumplieran con estos criterios, incluyendo aquellos que no estuvieran disponibles en formato completo o que no tuvieran relevancia directa con el tema.

Tras aplicar los criterios de inclusión y exclusión, se llevó a cabo la selección y extracción de datos siguiendo el enfoque PRISMA, que proporciona un marco estandarizado para la ejecución de revisiones sistemáticas, asegurando que la revisión sea transparente. Se realizó una revisión inicial de títulos y resúmenes para identificar artículos relevantes, seguida de una evaluación detallada de los textos completos para confirmar su pertinencia. La figura 1 ilustra el diagrama de flujo PRISMA utilizado en esta revisión, mostrando el proceso desde la identificación inicial de estudios hasta la selección final de artículos incluidos en el análisis.

Figura 1.

Diagrama de flujo PRISMA para la selección de estudios aptos para la investigación



Elaboración: Borja (2024)

Resultados

La selección de artículos culminó con la inclusión de 12 artículos relevantes, los cuales fueron analizados y sintetizados, como se muestra en la Tabla 1.

Nº	Autor/Año	Título	Revista	Tipo de estudio	Resultados
1	Rodrigues et al., (2016)	El modelo Kuramoto en redes complejas	Physics Reports	Revisión sistemática	La sincronización en redes complejas según el modelo Kuramoto depende significativamente de la estructura de la red, mostrando que redes con características de “mundo pequeño” y sin escala favorecen una sincronización global más eficiente comparado con redes aleatorias o regulares. Se observa que el modelo puede exhibir transiciones de fase discontinuas y sincronización explosiva bajo ciertas condiciones. Además, el ruido estocástico y la inercia afectan la sincronización, con la inercia ralentizando el proceso. En redes multicapa, la sincronización se comporta de manera diferente, evidenciando la importancia de las interacciones entre capas. La aplicabilidad del modelo a sistemas reales, como redes neuronales y



					eléctricas, es destacada, aunque se identifican problemas abiertos como la necesidad de explorar más a fondo las transiciones de fase y la sincronización en redes temporales y con fluctuaciones estocásticas.
2	Benuwa et al., (2016)	Revisión de Redes Complejas	International Journal of Computer Applications	Revisión Bibliográfica	Se discuten varios enfoques y marcos para analizar el rendimiento de las RC, como modelos de distribuciones de grado, el efecto de pequeño mundo, correlaciones en la red y agrupamiento. El artículo pone un énfasis significativo en los procesos de sincronización dentro de las redes, explorando cómo ocurre la sincronización en sistemas biológicos y tecnológicos y las condiciones necesarias para lograrla. También se destaca la robustez de las redes complejas y los procesos dinámicos que ocurren dentro de ellas, incluyendo modelos de grafos aleatorios, el crecimiento de redes y mecanismos de unión especial que contribuyen a la estabilidad y funcionalidad de las redes.

3	Sousa (2020)	Redes complejas: una mini-revisión	Revista Brasileña de Física	Revisión Bibliográfica	El artículo destaca las redes libres de escala, caracterizadas por una distribución de grados de ley de potencia en la que unos pocos nodos tienen muchas conexiones y la mayoría tiene pocas, aunque estos modelos tradicionales a menudo no consideran la distancia euclidiana entre nodos. Examina los modelos geográficos como el de Waxman, que incorpora restricciones espaciales, pero no genera una distribución de grados de ley de potencia, limitando su aplicabilidad. Describe los modelos de red en rejilla, una forma simple con nodos dispuestos en una cuadrícula regular y conectados solo a vecinos cercanos, usados en estudios de autómatas celulares y modelos basados en agentes. Finalmente, aborda las redes temporales, donde los bordes no están continuamente activos, lo que es crucial para entender procesos como la propagación de enfermedades o la difusión de información.
---	--------------	------------------------------------	-----------------------------	------------------------	---

4	Comin et al., (2016)	Sistemas complejos: características, similitud y conectividad	Física y Sociedad	Revisión de literatura	Se identificaron seis transformaciones inmediatas y se organizaron en un catálogo de 42 posibles caminos de transformación aplicables a un sistema. La asociación permite la identificación de metodologías de diferentes áreas con posibles nuevas aplicaciones. Por ejemplo, un camino cerrado como el FSCF puede usarse para identificar la pérdida de información en la representación en red de un conjunto de datos. Además, se reveló el potencial de combinar métricas de distancia distintas con técnicas de selección de bordes, como el modelo de red Waxman definido por la distancia euclidiana seguida del criterio de selección exponencial.
5	Ahuja y Sharma (2014)	Redes complejas: una revisión	Revista Internacional de Aplicación Informática	Revisión de literatura	Las redes complejas presentan tres conceptos clave: la longitud media del trayecto, que indica la propiedad small-world; el coeficiente de agrupamiento, que mide la conectividad y la formación de clústeres; y la distribución de grados, que define la propiedad libre de escala

					permitiendo que algunos nodos tengan un alto número de conexiones. El diseño de redes busca optimizar su rendimiento y puede abordarse desde enfoques exógenos o endógenos, utilizando funciones de utilidad para calcular la optimización alcanzada. El análisis de redes complejas implica cuatro elementos principales: entender la estructura y dinámica de la red, modelado matemático y simulaciones, y la conciencia situacional para el diseño y control de la red.
6	Herrera et al., (2020)	A Review on Control and Optimisation of Multi-Agent Systems and Complex Networks for Systems Engineering	Processes	Revisión de literatura	Los avances en el análisis de redes complejas han mejorado la representación de casos reales, destacándose desarrollos en redes ponderadas y redes con características temporales variables, así como redes multiescala y redes de redes. El estudio de redes temporales, que examina cómo la topología y las características de las redes cambian con el tiempo, requiere un análisis más profundo de las series temporales asociadas. Además, la incorporación de redes neuronales

					convolucionales (CNN) en grafos, utilizando matrices de adyacencia o Laplacianas, ofrece nuevas oportunidades para investigar redes complejas. En cuanto a los sistemas multiagente, el uso de grandes volúmenes de datos y técnicas de aprendizaje supervisado, no supervisado y semi-supervisado facilitará la calibración y validación de modelos basados en agentes.
7	Holovatch et al., (2017)	Sistemas complejos: física más allá de la física	Revista Europea de Física	Revisión de literatura	La investigación ha revelado que estos sistemas se caracterizan por interacciones dinámicas y dependientes del tiempo entre sus múltiples componentes, lo que da lugar a comportamientos emergentes y no triviales. A través de un enfoque interdisciplinario, se ha demostrado que las estructuras de red multiplex co-evolutivas son fundamentales para modelar estas interacciones complejas, las cuales permiten representar múltiples tipos de relaciones entre los nodos, lo que enriquece la comprensión de cómo las dinámicas de un sistema pueden influir en su evolución.

8	Yu et al., (2016)	Caída del sistema como dinámica de redes complejas	Actas de la Academia Nacional de Ciencias	Estudio experimental y teórico	Se observa que la dinámica de colapso de sistemas puede ser influenciada por acciones individuales basadas en información local, lo que lleva a patrones inesperados de evolución del sistema antes de un colapso. En particular, se destaca el modelo KQ-cascade, que utiliza dos parámetros clave: el grado crítico (k_s) y el coeficiente de tolerancia a la pérdida (q). Los resultados muestran que diferentes redes, como Orkut y YouTube, exhiben niveles variados de resiliencia y fragilidad, con Orkut mostrando una fuerte resistencia y YouTube siendo más frágil. Además, se identificó que la aparición de un "cluster vulnerable gigante" puede ser un precursor de un colapso repentino, donde la acumulación de nodos vulnerables puede llevar a una cascada de salidas que resulta en el colapso del sistema.
9	Chengqing et al., (2019)	Análisis de redes de dinámicas caóticas en dominios	Simposio Internacional IEEE 2019	Estudio experimental y teórico	La implementación digital de sistemas caóticos puede degradar significativamente sus propiedades dinámicas beneficiosas debido a la discretización del tiempo, el

		digitales de precisión fija	sobre Circuitos y Sistemas (ISCAS)		espacio y el valor en formato binario. Se destaca la importancia de medir la complejidad dinámica de estos sistemas utilizando redes de mapeo de estados y métricas establecidas como el exponente de Lyapunov y la entropía, lo que es esencial para comprender cómo las limitaciones digitales afectan al caos. Además, se revelan relaciones intrínsecas entre el caos digital y las redes complejas, y se demuestra cómo aplicar este marco teórico en la práctica mediante el análisis del mapa Logístico en una computadora de precisión fija.
10	Lakemond et al., (2024)	Digital Transformation in Complex Systems	IEEE Transactions on Engineering Management	Estudio longitudinal	La digitalización en sistemas complejos ha evolucionado desde experimentos iniciales hasta la integración crítica de funcionalidades. Esto ha incrementado la complejidad, la funcionalidad y la integración de los sistemas, con un enfoque en la generatividad y el control crítico para asegurar propiedades esenciales como la seguridad. La importancia de los objetos de frontera en modelado y simulación es crucial para gestionar la



					complejidad que excede la cognición humana, y se requiere investigación adicional sobre su impacto en la inteligencia artificial y otros sistemas complejos.
11	Yang et al., (2023)	Red Dinámica Compleja, Explorando los Algoritmos de Evolución Diferencial desde Otra Perspectiva	Matemáticas	Estudio experimental	La capacidad de exploración de un algoritmo evolutivo mejora cuando su estructura de red se asemeja a la distribución de Poisson (red aleatoria), mientras que la capacidad de explotación aumenta si la estructura se aproxima a la distribución de ley de potencia (red sin escala). La calidad del algoritmo no debe evaluarse únicamente por su distribución de probabilidad sino por la interacción entre diseño y adaptación de la estrategia. Algoritmos con diseños deficientes pueden mostrar buen desempeño en casos específicos, pero generalmente no son adecuados para problemas diversos.
12	Lou et al., (2022)	Controllability and robustness of Henneberg-growth	IEEE Access	Estudio experimental y teórico	1) La robustez de control en redes con estructuras de múltiples lazos se incrementa, lo que sugiere que estas configuraciones son más resistentes a perturbaciones. 2) Las redes con polígonos de más lados

		complex networks			muestran una mayor robustez de control, lo cual es crucial para la adaptabilidad en redes complejas. 3) Existe una correlación débil entre la robustez de control y la robustez de conectividad, indicando que la optimización de una no necesariamente mejora la otra.
--	--	------------------	--	--	---

Discusión

La revisión sistemática ha puesto en evidencia que los sistemas complejos en la era digital se caracterizan por una variedad de enfoques que enriquecen nuestra comprensión de sus dinámicas de interconexión y emergencia. En primer lugar, los hallazgos de Rodrigues et al., (2016) destacan la importancia del modelo de Kuramoto, que revela que redes con características de “mundo pequeño” y sin escala favorecen una sincronización global más eficiente que se manifiesta en transiciones de fase discontinuas y sincronización explosiva, lo que subraya el impacto del ruido estocástico y la inercia en el proceso de sincronización. Además, la comparación con redes aleatorias o regulares resalta cómo la estructura de la red influye directamente en su comportamiento sincrónico.

A su vez, los estudios de Benuwa et al., (2016) discuten cómo el rendimiento de las redes complejas se puede analizar a través de diversos marcos teóricos y metodológicos, como los modelos de distribuciones de grado y el efecto de pequeño mundo. La robustez de estas redes y los procesos dinámicos que ocurren dentro de ellas se destacan, lo cual es esencial para entender la sincronización en sistemas biológicos y tecnológicos. En complemento a estos hallazgos, Sousa (2020) proporciona una revisión de redes libres de escala y modelos geográficos, observando diferencias clave en sus distribuciones de grados y restricciones espaciales. Este análisis también incluye redes temporales, esenciales para entender la propagación de enfermedades y la difusión de información.



En otro aspecto, Comin et al., (2016) identifican y organizan transformaciones aplicables a sistemas complejos, revelando el potencial de combinar diferentes métricas de distancia y técnicas de selección de bordes para modelar mejor las redes. En este punto, Ahuja y Sharma (2014) destacan tres conceptos clave en el análisis de redes complejas: la longitud media del trayecto, el coeficiente de agrupamiento y la distribución de grados, los cuales son fundamentales para optimizar el rendimiento de las redes.

Por otra parte, Herrera et al., (2020) abordan los avances en el análisis de redes complejas mediante el uso de redes ponderadas, redes con características temporales variables y redes multiescala. La incorporación de redes neuronales convolucionales en grafos también ofrece nuevas oportunidades para investigar redes complejas, mientras que Holovatch et al., (2017) enfatizan la importancia de las estructuras de red multiplex co-evolutivas para modelar interacciones dinámicas entre componentes de un sistema.

Además, Yu et al., (2016) examinan la dinámica de colapso de sistemas complejos, identificando patrones inesperados de evolución y el papel de un “cluster vulnerable gigante” como precursor del colapso del sistema. Chengqing et al., (2019) exploran cómo la discretización digital afecta la complejidad dinámica de sistemas caóticos y destacan la importancia de medir esta complejidad para entender las limitaciones digitales.

Finalmente, Lakemond et al., (2024) discuten la evolución de la digitalización en sistemas complejos, enfatizando la necesidad de manejar la complejidad que supera la cognición humana y la importancia de los objetos de frontera en el modelado y simulación. Lou et al., (2022) revelan que la robustez de control en redes con estructuras de múltiples lazos se incrementa, mientras que la relación entre la robustez de control y la robustez de conectividad es débil.

Conclusiones

La revisión sistemática de la literatura sobre sistemas complejos en la era digital revela una comprensión profunda de cómo las redes emergen y evolucionan. Los estudios analizados destacan la influencia crucial de la estructura de las redes en la sincronización y robustez de los sistemas complejos. En particular, los modelos como el de Kuramoto demuestran que redes con características de pequeños mundos y sin escala favorecen una sincronización



global más eficiente, lo que subraya la importancia de considerar la topología de las redes para entender sus dinámicas emergentes y su capacidad de adaptación a cambios en el entorno.

Además, la incorporación de enfoques más recientes, como las redes temporales y los modelos de redes ponderadas, ofrece una visión más completa de cómo los sistemas complejos responden a condiciones cambiantes. Dichos avances permiten una evaluación más precisa de la dinámica de los sistemas y proporcionan herramientas valiosas para modelar la evolución de redes bajo distintas condiciones, así, la integración de redes neuronales convolucionales y el análisis de redes con características temporales demuestran ser enfoques prometedores para mejorar la comprensión y predicción de comportamientos complejos en estos sistemas.

Por último, aunque se ha logrado un progreso significativo en la comprensión de las dinámicas de interconexión y emergencia, es evidente que aún queda mucho por explorar. La robustez de control y la adaptabilidad de los sistemas complejos siguen siendo áreas clave de investigación. En consecuencia, la combinación de modelos teóricos con enfoques empíricos y el desarrollo continuo de nuevas herramientas analíticas serán fundamentales para avanzar en la investigación de redes complejas para desentrañar mejor los mecanismos subyacentes y ofrecer soluciones innovadoras para gestionar los desafíos de las redes en la era digital.

Referencias bibliográficas

- Ahuja, M., & Sharma, K. (2014). Redes complejas: una revisión. *Revista Internacional de Aplicación Informática*, 101(15), 31-35. Obtenido de <https://research.ijcaonline.org/volume101/number15/pxc3898882.pdf>
- Aldana, M. (2011). Redes Complejas: Estructura, Dinámica y Evolución. 1-26.
- Aya, L. (2020). Aportes de los sistemas y redes complejas para la transformación social. *Revista Logos Ciencia & Tecnología*, 12(1), 204-216. doi:10.22335/rlct.v12i1.1066
- Benuwa, B., Ghansah, B., & Wornyo, D. (2016). Review of Complex Networks. *International Journal of Computer Applications*, 141(5), 33-43.



- Boughiu, C. (2019). *Sincronización explosiva y percolación en redes complejas*. Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza. Obtenido de <https://zaguan.unizar.es/record/86826/files/TAZ-TFM-2019-325.pdf?version=1>
- Cámara, J. (s.f). *Redes de Interconexión*. Universidad de Burgos. Obtenido de https://riubu.ubu.es/bitstream/handle/10259/3684/Tema_3_redes_de_interconexi%C3%B3n.pdf?sequence=1
- Chengqing, L., Jinhu, L., & Guanrong, C. (2019). Análisis de redes de dinámicas caóticas en dominios digitales de precisión fija . *Simposio Internacional IEEE 2019 sobre Circuitos y Sistemas (ISCAS)*, 1-5. doi:10.1109/ISCAS.2019.8702232
- Comin, C., Peron, T., Silva, F., Amancio, D., Rodrigues, F., & Fontoura, L. (2016). Sistemas complejos: características, similitud y conectividad. *Física y Sociedad*, 1-61. doi:1606.05400v1
- Faci, S. (2018). *Estructura y dinámica de redes complejas con signo*. Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza. Obtenido de <https://zaguan.unizar.es/record/76313/files/TAZ-TFM-2018-204.pdf?version=1>
- Herrera, M., Pérez, M., Kumar, A., & Izquierdo, J. (2020). A Review on Control and Optimisation of Multi-Agent Systems and Complex Networks for Systems Engineering. *Processes* , 8(312), 1-28. doi:10.20944/preprints202001.0282.v1
- Holovatch, Y., Kenna, R., & Thurner, S. (2017). Sistemas complejos: física más allá de la física. *Revista Europea de Física*, 38(2), 023002. doi:10.1088/1361-6404/aa5a87
- Lakemond, N., Holmberg, G., & Pettersson, A. (2024). Digital Transformation in Complex Systems. *IEEE Transactions On Engineering Management*, 71, 192-204. doi:10.1109/TEM.2021.3118203
- Lou, Y., Yang, D., Wang, L., Tang, C., & Chen, G. (2022). Controllability robustness of Henneberg-growth complex networks. *IEEE Access*, 10, 69734-69744. doi:10.1109/ACCESS.2022.3141011
- Moriello, S. (2003). Sistemas complejos, caos y vida artificial. *Red Científica Ciencia, Tecnología y Pensamiento*. Obtenido de <https://www.redcientifica.com/doc/doc200303050001.html>

- Rodrigues, F., Perón, T., Ji, P., & Kurths, J. (2016). El modelo Kuramoto en redes complejas. *Physics Reports*, 610, 1-98. doi:10.1016/j.physrep.2015.10.008
- Sayama, H. (s.f). Sistemas complejos en pocas palabras. En *Introducción al Modelado y Análisis de Sistemas Complejos (Sayama)*. Binghamton University, State University of New York. Obtenido de <https://espanol.libretexts.org/@go/page/115827?pdf>
- Sousa, A. (2020). Complex Networks: a Mini-review. *Brazilian Journal of Physics*, 50, 658-672. doi:10.1007/s13538-020-00772-9
- Yang, Y., Tao, S., Yang, H., Yuan, Z., & Tang, Z. (2023). Red Dinámica Compleja, Explorando los Algoritmos de Evolución Diferencial desde Otra Perspectiva. *Matemáticas (Dinámica de redes complejas)*, 11(2), 2979. doi:10.3390/math11132979
- Yu, Y., Xiao, Gaoxi, Zhou, J., Wang, Y., Wang, Z., . . . Schellnhuber, H. (2016). Caída del sistema como dinámica de redes complejas. *Actas de la Academia Nacional de Ciencias*, 113(42), 11726-11731. doi:0.1073/pnas.1612094113

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés posible.

Financiamiento:

No existió asistencia financiera de partes externas al presente artículo.

Nota:

El artículo no es producto de una publicación anterior.