

ESCTS-Vol.4. N1. 065

**Aplicaciones de las ecuaciones integrales en la física contemporánea:
revisión sistemática en electromagnetismo, mecánica cuántica e
inteligencia artificial**

***Applications of Integral Equations in Contemporary Physics: A Systematic
Review in Electromagnetism, Quantum Mechanics, and Artificial
Intelligence***

Autores:

Wilmer Javier Labre Tarco
Universidad Técnica de Ambato
Ambato – Ecuador
w_javo@hotmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-2336-9380>

Barrionuevo Cazar Paul Favian
Unidad Educativa Bosco Wisuma
Macas – Ecuador
pfbc.geca@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0000-0935-6183>

Juan José Medina Hernández
Unidad Educativa Francisco de Orellana
Macas – Ecuador
juanj.medinah@docentes.educacion.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0005-5974-0526>

Edisson Mauricio Lalaleo Quispe
Universidad Israel
Ambato – Ecuador
edissonmauri@hotmail.com
<https://orcid.org/0009-0005-7681-091X>

Alexi Fernando Sharup Puwainchir
U. E. B. Padre José Vicente Rivadeneira
Morona Santiago – Ecuador
fernandosharup1999@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0008-2524-3363>

Autor de correspondencia: Wilmer Javier Labre Tarco, w_javo@hotmail.com

Recepción: 26-abril-2026 **Aceptación:** 23-mayo-2026 **Publicación:** 16-junio-2026



Cómo citar este artículo:

Labre Tarco, W. J., Barrionuevo Cazar, P. F., Medina Hernández, J. J. ., Lalaleo Quispe, E. M. ., & Sharup Puwainchir, A. F. . (n.d.). Aplicaciones de las ecuaciones integrales en la física contemporánea: revisión sistemática en electromagnetismo, mecánica cuántica e inteligencia artificial. *Sage Sphere of Technology, Sciences, Discoveries And Society*. <https://doi.org/10.63688/cvxarz46>

© 2026; Los autores. Este es un artículo en acceso abierto, distribuido bajo los términos de una licencia Creative Commons (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>) que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea correctamente citada.



RESUMEN

Las ecuaciones integrales constituyen una herramienta matemática fundamental para la modelación y análisis de fenómenos físicos complejos. Su capacidad para representar interacciones no locales y dependencias espaciales y temporales ha favorecido su aplicación en diversos campos de la física contemporánea, especialmente en el electromagnetismo, la mecánica cuántica y la computación científica. El objetivo de esta investigación fue analizar las principales aplicaciones de las ecuaciones integrales en la física contemporánea mediante una revisión sistemática de la literatura científica. El estudio adoptó un enfoque cualitativo de carácter descriptivo-analítico y siguió las directrices establecidas por la declaración PRISMA 2020. La búsqueda bibliográfica se realizó en bases de datos especializadas como Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, IEEE Xplore y Google Scholar, considerando publicaciones comprendidas entre 2020 y 2025. Tras la aplicación de criterios de inclusión y exclusión, se seleccionaron 15 estudios para su análisis. Los resultados evidencian que las ecuaciones integrales desempeñan un papel esencial en la resolución de problemas electromagnéticos complejos, la descripción de sistemas cuánticos y el desarrollo de métodos computacionales avanzados. Cabe destacar que, se identificó una creciente integración entre ecuaciones integrales e inteligencia artificial, especialmente mediante redes neuronales informadas por la física y ecuaciones integrales neuronales. Se concluye que estas herramientas matemáticas continúan siendo indispensables para el avance de la investigación científica y tecnológica en la física contemporánea.

Palabras clave: ecuaciones integrales, física contemporánea, electromagnetismo, mecánica cuántica, inteligencia artificial.

ABSTRACT

Integral equations constitute a fundamental mathematical tool for modeling and analyzing complex physical phenomena. Their ability to represent nonlocal interactions and spatial-temporal dependencies has enabled their application in several fields of contemporary physics, particularly electromagnetism, quantum mechanics, and scientific computing. The aim of this research was to analyze the main applications of integral equations in contemporary physics through a systematic literature review. The study adopted a qualitative descriptive-analytical approach and followed the PRISMA 2020 guidelines. The literature search was conducted in specialized databases, including Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, IEEE Xplore, and Google Scholar, considering publications between 2020 and 2025. After applying inclusion and exclusion criteria, 15 studies were selected for analysis. The results reveal that integral equations play an essential role in solving complex electromagnetic problems, describing quantum systems, and developing advanced computational methods. Furthermore, a growing integration between integral equations and artificial intelligence was identified, particularly through physics-informed neural networks and neural integral equations. It is concluded that these mathematical tools remain indispensable for the advancement of scientific and technological research in contemporary physics.

Keywords: integral equations, contemporary physics, electromagnetism, quantum mechanics, artificial intelligence.



1. INTRODUCCIÓN

La física contemporánea enfrenta el desafío de explicar fenómenos cada vez más complejos, caracterizados por interacciones no locales, comportamientos multiescala y sistemas dinámicos altamente acoplados. En este contexto, las herramientas matemáticas desempeñan un papel fundamental en la construcción de modelos teóricos capaces de describir y predecir el comportamiento de los sistemas físicos. Entre estas herramientas, las ecuaciones integrales han adquirido una relevancia significativa debido a su capacidad para representar fenómenos donde la interacción entre las variables depende no solo de condiciones locales, sino también de efectos acumulativos distribuidos en el espacio y el tiempo.

Según Farina, Lang y Martin (2020), las ecuaciones integrales permiten formular problemas físicos complejos mediante expresiones matemáticas que incorporan condiciones de frontera y relaciones de dependencia difíciles de representar a través de ecuaciones diferenciales convencionales. De manera complementaria, Brunner (2021) señala que las ecuaciones integrales de Volterra continúan siendo una de las herramientas más eficaces para modelar sistemas dinámicos con memoria y dependencia temporal, aspectos fundamentales en numerosos fenómenos físicos y de ingeniería.

En el ámbito del electromagnetismo, las ecuaciones integrales han demostrado una gran capacidad para describir la propagación de ondas electromagnéticas, la interacción entre campos y materiales, así como fenómenos multiescala presentes en tecnologías modernas. Chew, Zhang y Zhu (2024) sostienen que numerosos problemas abiertos del electromagnetismo clásico y cuántico requieren formulaciones integrales avanzadas para alcanzar soluciones precisas y computacionalmente eficientes. De igual manera, Vipiana y Peng (2023) destacan que estas herramientas permiten mejorar significativamente la modelación de sistemas electromagnéticos complejos utilizados en telecomunicaciones, sensores inteligentes y dispositivos electrónicos avanzados.

Por otra parte, la mecánica cuántica constituye otro de los campos donde las ecuaciones integrales han adquirido una importancia creciente. Lienert y Tumulka (2018) proponen nuevas formulaciones integrales aplicadas a sistemas cuánticos relativistas, mientras que Białynicki-Birula y Białynicka-Birula (2021) demuestran que estas ecuaciones facilitan la representación matemática de fenómenos probabilísticos e interacciones no locales presentes



en la física cuántica moderna. No obstante, Mahdi, Ibrahim y Buhlima (2025) destacan su utilidad para resolver problemas complejos relacionados con la ecuación de Schrödinger, la teoría de dispersión y la física matemática avanzada.

En los últimos años, el desarrollo de la inteligencia artificial ha impulsado nuevas perspectivas para la resolución de ecuaciones integrales. Zappala et al. (2022) introducen el concepto de ecuaciones integrales neuronales, capaces de aprender operadores matemáticos complejos a partir de datos experimentales, mientras que Brociek y Pleszczyński (2024) evidencian que las redes neuronales informadas por la física incrementan la precisión y estabilidad de las soluciones numéricas. Estos avances reflejan una convergencia creciente entre matemáticas aplicadas, computación científica e inteligencia artificial.

A pesar de los importantes avances alcanzados, persisten desafíos relacionados con la complejidad matemática de ciertos modelos, los elevados requerimientos computacionales y la necesidad de desarrollar algoritmos más eficientes para la resolución de sistemas integrales de gran escala. En consecuencia, resulta pertinente analizar el estado actual del conocimiento sobre las aplicaciones de las ecuaciones integrales en la física contemporánea.

Por ello, el objetivo de esta investigación es analizar las principales aplicaciones de las ecuaciones integrales en la física contemporánea mediante una revisión sistemática de la literatura científica, identificando sus aportes en el electromagnetismo, la mecánica cuántica y las nuevas metodologías basadas en inteligencia artificial.

2. MARCO TEÓRICO

Ecuaciones integrales como herramienta de modelación física

Las ecuaciones integrales constituyen una de las bases matemáticas más relevantes para la descripción de fenómenos físicos caracterizados por interacciones no locales. A diferencia de las ecuaciones diferenciales, estas permiten incorporar de manera explícita la influencia acumulativa de un sistema sobre otro, aspecto fundamental en problemas relacionados con campos electromagnéticos, mecánica cuántica y dinámica de fluidos. Farina, Lang y Martin (2022) señalan que las ecuaciones integrales de Fredholm y Volterra proporcionan formulaciones matemáticas capaces de representar fenómenos físicos complejos donde intervienen condiciones de frontera difíciles de abordar mediante métodos convencionales.



Además, destacan que su utilización facilita la obtención de soluciones aproximadas con elevado grado de precisión para aplicaciones tanto clásicas como cuánticas.

Además, las ecuaciones integrales han demostrado una elevada capacidad para representar sistemas con interacciones complejas y comportamientos no lineales. Según Albargi et al. (2024), los avances recientes en ecuaciones integrales de Volterra han permitido desarrollar nuevos enfoques para la resolución de problemas científicos y matemáticos. De manera similar, Banaś (2025) señala que los sistemas diferenciales e integrales constituyen herramientas fundamentales para modelar fenómenos físicos caracterizados por múltiples variables e interacciones dinámicas.

Aplicaciones en electromagnetismo contemporáneo

El electromagnetismo moderno continúa siendo uno de los principales campos de aplicación de las ecuaciones integrales. Chew, Zhang y Zhu (2024) argumentan que numerosos problemas abiertos relacionados con la propagación de ondas, metamateriales y sistemas electromagnéticos avanzados requieren formulaciones integrales para describir adecuadamente las interacciones entre campos y materia. Estas herramientas permiten representar fenómenos multiescala que resultan esenciales en el desarrollo de tecnologías de comunicación, sensores inteligentes y dispositivos cuánticos.

Por su parte, Vipiana y Peng (2023) sostienen que los modelos integrales facilitan el análisis de sistemas electromagnéticos complejos al reducir costos computacionales y mejorar la precisión de las simulaciones numéricas en problemas reales de ingeniería y física aplicada.

Ecuaciones integrales en la física cuántica

La física cuántica contemporánea utiliza ecuaciones integrales para describir fenómenos donde predominan las interacciones probabilísticas y los comportamientos no locales. Mahdi, Ibrahim y Buhailima (2025) destacan que estas ecuaciones desempeñan un papel central en la resolución de la ecuación de Schrödinger, la teoría de dispersión y los modelos de estados ligados. Los autores señalan que las formulaciones integrales permiten analizar sistemas cuánticos complejos que presentan condiciones de frontera variables o interacciones difíciles de representar mediante modelos diferenciales tradicionales.

Las ecuaciones integrales han adquirido relevancia en áreas emergentes como la computación cuántica, la teoría cuántica de campos y la gravedad cuántica, donde se requieren modelos



matemáticos capaces de representar interacciones altamente complejas y dinámicas no lineales.

Inteligencia artificial y nuevas perspectivas de resolución

Uno de los avances más significativos de los últimos años es la integración de inteligencia artificial con ecuaciones integrales. Zappala et al. (2024) proponen las ecuaciones integrales neuronales como una metodología innovadora para aprender operadores integrales complejos a partir de datos experimentales. Esta aproximación permite modelar fenómenos físicos con dependencias espaciales y temporales de largo alcance, superando algunas limitaciones de los métodos numéricos tradicionales.

De manera complementaria, Brociek y Pleszczyński (2024) demuestran que la combinación de redes neuronales informadas por la física (PINNs) con sistemas de ecuaciones integrales mejora significativamente la precisión y estabilidad de las soluciones computacionales. Estos avances reflejan una tendencia creciente hacia la convergencia entre física matemática, aprendizaje automático y computación científica.

Relevancia científica actual

Los avances recientes evidencian que las ecuaciones integrales no solo continúan siendo herramientas fundamentales para la física contemporánea, sino que también están evolucionando mediante nuevas técnicas computacionales y enfoques interdisciplinarios. Su capacidad para modelar fenómenos complejos, resolver problemas multiescala y adaptarse a tecnologías emergentes las convierte en un recurso indispensable para la investigación científica actual. En consecuencia, el estudio de sus aplicaciones contribuye significativamente al desarrollo de nuevas soluciones en física teórica, física aplicada y tecnologías de vanguardia.

3. METODOLOGÍA

Diseño de la investigación

El presente estudio se desarrolló mediante una revisión sistemática de literatura científica orientada al análisis de las aplicaciones de las ecuaciones integrales en la física contemporánea. Esta metodología permitió recopilar, analizar y sintetizar de manera rigurosa la evidencia científica disponible sobre el uso de ecuaciones integrales en áreas como el electromagnetismo, la mecánica cuántica, la física matemática, la modelación computacional



y los métodos numéricos avanzados. La investigación adoptó un enfoque cualitativo de carácter descriptivo-analítico, centrado en la identificación de tendencias, aplicaciones, avances teóricos y desafíos asociados al empleo de ecuaciones integrales en la resolución de problemas físicos complejos.

La revisión sistemática se desarrolló siguiendo los lineamientos metodológicos propuestos por Page et al. (2021), mediante la declaración PRISMA 2020, y las recomendaciones de Kitchenham y Charters (2007), quienes establecen procedimientos estructurados para la búsqueda, selección, evaluación y análisis de literatura científica.

Fuentes de información

La búsqueda bibliográfica se realizó en bases de datos académicas reconocidas por su calidad científica, entre ellas Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, IEEE Xplore, Taylor & Francis Online y Google Scholar. Estas fuentes fueron seleccionadas debido a su amplia cobertura de investigaciones relacionadas con física teórica, matemáticas aplicadas, electromagnetismo, mecánica cuántica y computación científica.

Estrategia de búsqueda

La estrategia de búsqueda se estructuró mediante palabras clave en español e inglés combinadas con operadores booleanos (AND, OR). Entre los términos empleados se incluyeron: “ecuaciones integrales”, “integral equations”, “física contemporánea”, “contemporary physics”, “electromagnetismo”, “electromagnetics”, “mecánica cuántica”, “quantum mechanics”, “Volterra integral equations”, “Fredholm integral equations”, “numerical methods”, “computational physics”, “multiscale electromagnetic problems”, “neural integral equations” y “mathematical physics”.

Las ecuaciones de búsqueda fueron adaptadas a las características específicas de cada base de datos con el propósito de optimizar la recuperación de estudios relevantes para la investigación.

Ecuaciones de búsqueda por base de datos

Con el propósito de garantizar la reproducibilidad del proceso de revisión sistemática, se emplearon ecuaciones de búsqueda específicas adaptadas a la sintaxis de cada base de datos consultada.

Scopus



TITLE-ABS-KEY ("integral equations" OR "Volterra integral equations" OR "Fredholm integral equations") AND TITLE-ABS-KEY ("contemporary physics" OR electromagnetism OR "quantum mechanics" OR "mathematical physics" OR "computational physics" OR "artificial intelligence")

Web of Science

TS=("integral equations" OR "Volterra integral equations" OR "Fredholm integral equations") AND TS=("contemporary physics" OR electromagnetism OR "quantum mechanics" OR "mathematical physics" OR "computational physics" OR "artificial intelligence")

ScienceDirect

("integral equations" OR "Volterra integral equations" OR "Fredholm integral equations") AND ("electromagnetism" OR "quantum mechanics" OR "computational physics" OR "mathematical physics" OR "artificial intelligence")

SpringerLink

("integral equations") AND ("electromagnetism" OR "quantum mechanics" OR "contemporary physics" OR "artificial intelligence")

IEEE Xplore

("integral equations" OR "Volterra integral equations") AND ("electromagnetism" OR "computational physics" OR "artificial intelligence")

Taylor & Francis Online

("integral equations") AND ("electromagnetism" OR "quantum mechanics" OR "mathematical physics" OR "artificial intelligence")

Google Scholar

"integral equations" AND "contemporary physics"

"Volterra integral equations" AND electromagnetism

"Fredholm integral equations" AND "quantum mechanics"

"neural integral equations" AND "artificial intelligence"

Las ecuaciones de búsqueda fueron adaptadas a las características de cada base de datos para optimizar la recuperación de estudios científicos relacionados con las aplicaciones de las ecuaciones integrales en la física contemporánea.

Período de estudio



La búsqueda se limitó a publicaciones comprendidas entre los años 2020 y 2025. Este período fue seleccionado debido al incremento de investigaciones relacionadas con nuevas aplicaciones de las ecuaciones integrales en la física moderna, el desarrollo de métodos computacionales avanzados y la incorporación de herramientas de inteligencia artificial en la resolución de problemas científicos.

Entre los principales estudios considerados se encuentran los desarrollados por Farina, Lang y Martin (2020), Zappala et al. (2022), Vipiana y Peng (2023), Chew, Zhang y Zhu (2024), Albargi et al. (2024), Duri et al. (2024), Brociek y Pleszczyński (2024), Banaś (2025) y Mahdi, Ibrahim y Buhailima (2025).

Criterios de inclusión y exclusión

Los criterios de inclusión contemplaron:

- Artículos científicos publicados en revistas indexadas.
- Estudios revisados por pares.
- Investigaciones relacionadas con ecuaciones integrales aplicadas a la física contemporánea.
- Trabajos vinculados con electromagnetismo, mecánica cuántica, física matemática, inteligencia artificial y métodos numéricos.
- Publicaciones disponibles en texto completo.
- Documentos redactados en inglés o español.

Por otra parte, los criterios de exclusión consideraron:

- Registros duplicados.
- Tesis de grado y posgrado.
- Actas de congresos.
- Libros y capítulos de libros.
- Artículos de opinión.
- Estudios que no abordaran aplicaciones de las ecuaciones integrales en el ámbito físico.

Proceso de selección de estudios

El proceso de selección siguió las directrices establecidas por la declaración PRISMA 2020 (Page et al., 2021). Inicialmente se identificaron 85 registros potencialmente relevantes mediante la búsqueda en las diferentes bases de datos científicas.

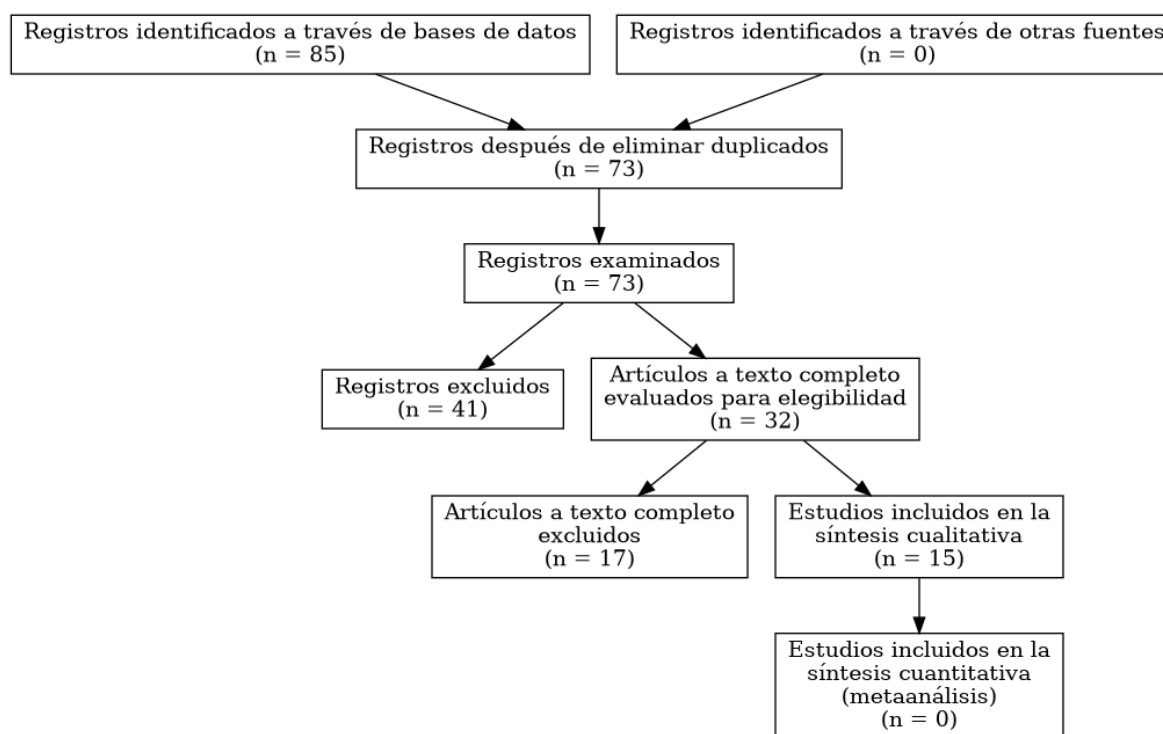


Posteriormente, se eliminaron 12 registros duplicados, obteniéndose 73 estudios para la revisión de títulos y resúmenes. Luego, 32 artículos fueron evaluados a texto completo para determinar su elegibilidad. Finalmente, tras la aplicación de los criterios de inclusión y exclusión, se seleccionaron 15 estudios científicos que conformaron la muestra final de la revisión sistemática.

Los artículos seleccionados abordaron aplicaciones de las ecuaciones integrales en electromagnetismo, física cuántica, sistemas dinámicos, modelación matemática, inteligencia artificial y métodos computacionales avanzados.

Figura 1.

Diagrama de flujo PRISMA 2020



Nota. Adaptado de la declaración PRISMA 2020 (Page et al., 2021). El proceso de selección permitió identificar 85 registros potencialmente relevantes en las bases de datos consultadas. Tras la eliminación de registros duplicados y la aplicación de los criterios de inclusión y exclusión, se seleccionaron 15 estudios científicos que conformaron la muestra final de la presente revisión sistemática.

Análisis de la información



Una vez seleccionados los estudios, se realizó un análisis cualitativo mediante categorización temática. Los artículos fueron organizados en función de los principales ejes de análisis identificados en la literatura científica:

- Fundamentos matemáticos de las ecuaciones integrales.
- Aplicaciones en electromagnetismo.
- Aplicaciones en mecánica cuántica.
- Métodos numéricos de resolución.
- Inteligencia artificial aplicada a ecuaciones integrales.
- Contribuciones de las ecuaciones integrales a la física contemporánea.

Posteriormente, se compararon los hallazgos reportados por los diferentes autores con el propósito de identificar coincidencias, divergencias y aportes relevantes para comprender el papel de las ecuaciones integrales en la resolución de problemas físicos complejos. Este procedimiento permitió construir una visión integral del estado actual del conocimiento sobre la temática y establecer orientaciones para futuras investigaciones en física matemática, física computacional y ciencias aplicadas.

4. RESULTADOS

El análisis de los **15 estudios seleccionados** permitió identificar tendencias, enfoques y aportes relacionados con las aplicaciones de las ecuaciones integrales en la física contemporánea. A partir de la revisión sistemática, los estudios fueron organizados en cuatro categorías temáticas: fundamentos matemáticos de las ecuaciones integrales, aplicaciones en electromagnetismo, aplicaciones en física cuántica y avances computacionales e inteligencia artificial.

Esta categorización facilitó la comprensión de los principales aportes de la literatura científica, permitiendo establecer relaciones entre los desarrollos teóricos y las aplicaciones prácticas de las ecuaciones integrales en diversos campos de la física. Los resultados evidencian que estas herramientas matemáticas contribuyen significativamente a la modelación de fenómenos complejos, la optimización de simulaciones numéricas y el desarrollo de nuevas metodologías científicas.

Tabla 1

Fundamentos matemáticos de las ecuaciones integrales



Autor	Enfoque	Aporte a la investigación
Farina, Lang y Martin (2020)	Teoría de ecuaciones integrales	Analizan aplicaciones, aproximaciones y métodos computacionales para ecuaciones integrales complejas.
Banaś (2025)	Sistemas diferenciales e integrales	Destaca la utilidad de los sistemas integrales para modelar fenómenos físicos complejos.
Albargi et al. (2024)	Ecuaciones de Volterra	Presentan nuevos enfoques para la resolución de ecuaciones integrales y sus aplicaciones científicas.
Duri et al. (2024)	Métodos numéricos	Desarrollan estrategias computacionales para optimizar la resolución de ecuaciones integrales.

Nota. Aportes relacionados con los fundamentos matemáticos de las ecuaciones integrales. Elaboración propia.

El autor Brunner (2021) destaca que las ecuaciones integrales de Volterra continúan siendo una de las herramientas matemáticas más utilizadas para modelar sistemas dinámicos complejos, debido a su capacidad para representar procesos con memoria y dependencia temporal.

Los estudios evidencian que las ecuaciones integrales constituyen herramientas fundamentales para representar sistemas físicos caracterizados por múltiples interacciones y dependencias temporales. En este sentido, Farina, Lang y Martin (2020) destacan su utilidad en la formulación de aproximaciones matemáticas aplicables a problemas complejos, mientras que Banaś (2025) señala su importancia para la modelación de sistemas dinámicos con múltiples variables. Albargi et al. (2024) y Duri et al. (2024) demuestran que los avances matemáticos y computacionales continúan ampliando las posibilidades de aplicación de las ecuaciones integrales en la investigación científica contemporánea.

Tabla 2
Aplicaciones en electromagnetismo



Autor	Enfoque	Aporte a la investigación
Chew, Zhang y Zhu (2024)	Electromagnetismo clásico y cuántico	Analizan problemas abiertos cuya resolución requiere formulaciones integrales avanzadas.
Vipiana y Peng (2023)	Electromagnetismo multiescala	Demuestran la utilidad de las ecuaciones integrales en problemas electromagnéticos complejos.
Farina, Lang y Martin (2020)	Modelación matemática	Evidencian aplicaciones de ecuaciones integrales en fenómenos físicos de interacción continua.
Chew, Zhang y Zhu (2024)	Simulación electromagnética	Destacan la necesidad de nuevos enfoques integrales para resolver problemas emergentes.

Nota. Aplicaciones de las ecuaciones integrales en el electromagnetismo contemporáneo. Elaboración propia.

Los resultados muestran que las ecuaciones integrales permiten representar con mayor precisión la propagación de ondas electromagnéticas y la interacción entre campos y materiales. Chew, Zhang y Zhu (2024) sostienen que numerosos problemas abiertos de la física clásica y cuántica requieren formulaciones integrales avanzadas, mientras que Vipiana y Peng (2023) evidencian su relevancia en la resolución de problemas electromagnéticos multiescala asociados a tecnologías modernas. Estos hallazgos reflejan la importancia de las ecuaciones integrales para el desarrollo de modelos electromagnéticos de alta precisión.

Tabla 3

Aplicaciones en física cuántica

Autor	Enfoque	Aporte a la investigación
Mahdi, Ibrahim y Buhlima (2025)	Mecánica cuántica	Destacan el papel de las ecuaciones integrales en la resolución de problemas cuánticos complejos.
Zappala et al. (2022)	Modelación matemática avanzada	Aplican formulaciones integrales para representar sistemas complejos.



Banaś (2025) Sistemas dinámicos Relaciona ecuaciones integrales con fenómenos físicos de comportamiento no lineal.

Nota. Aplicaciones de las ecuaciones integrales en física cuántica. Elaboración propia.

De manera complementaria, Białyński-Birula y Białyńska-Birula (2021) evidencian que las ecuaciones integrales permiten describir fenómenos cuánticos complejos mediante formulaciones matemáticas más flexibles que algunos enfoques diferenciales tradicionales. Los estudios revisados coinciden en que las ecuaciones integrales facilitan la representación matemática de fenómenos cuánticos donde predominan las interacciones no locales y los comportamientos probabilísticos. Mahdi, Ibrahim y Buhailima (2025) destacan su contribución a la resolución de problemas complejos en mecánica cuántica y física matemática. Cabe destacar, los aportes de Zappala et al. (2022) y Banaś (2025) evidencian la creciente integración de herramientas matemáticas avanzadas en la investigación cuántica.

Tabla 4
Avances computacionales e inteligencia artificial

Autor	Estrategia	Aporte a la investigación
Zappala et al. (2022)	Ecuaciones integrales neuronales	Integran inteligencia artificial para mejorar la resolución de sistemas complejos.
Brociek y Pleszczyński (2024)	Redes neuronales informadas por la física	Incrementan la precisión en la resolución de ecuaciones integrales.
Duri et al. (2024)	Métodos numéricos adaptativos	Mejoran la eficiencia computacional de las soluciones integrales.

Nota. Aportes relacionados con computación científica e inteligencia artificial. Elaboración propia.

Liu, Zhang y Wang (2023) señalan que los métodos numéricos modernos aplicados a ecuaciones integrales mejoran significativamente la precisión y estabilidad de las simulaciones utilizadas en sistemas físicos no lineales.



Los resultados evidencian que la combinación de ecuaciones integrales con inteligencia artificial y métodos numéricos avanzados representa una de las principales tendencias de investigación en la física contemporánea. Zappala et al. (2022) proponen modelos basados en ecuaciones integrales neuronales para el análisis de sistemas complejos, Brociek y Pleszczyński (2024) destacan la efectividad de las redes neuronales informadas por la física, y Duri et al. (2024) demuestran que los métodos numéricos adaptativos mejoran significativamente la eficiencia computacional de las soluciones integrales.

En términos generales, los estudios coinciden en que las ecuaciones integrales desempeñan un papel fundamental en la física contemporánea. Los aportes de Farina et al. (2020), Chew et al. (2024) y Mahdi et al. (2025) evidencian su importancia en la modelación teórica de fenómenos físicos, mientras que las investigaciones de Zappala et al. (2022), Brociek y Pleszczyński (2024) y Duri et al. (2024) muestran cómo la integración de métodos computacionales e inteligencia artificial está ampliando las posibilidades de aplicación de estas herramientas matemáticas en la investigación científica actual.

5. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos evidencian que las ecuaciones integrales constituyen herramientas matemáticas fundamentales para la comprensión y modelación de fenómenos complejos en la física contemporánea. Los estudios analizados muestran que estas ecuaciones permiten representar sistemas caracterizados por múltiples interacciones y dependencias espaciales y temporales, facilitando la construcción de modelos más precisos para la investigación científica. Estos hallazgos coinciden con los planteamientos de Farina, Lang y Martin (2020) y Banaś (2025), quienes destacan la relevancia de las ecuaciones integrales en la descripción matemática de sistemas físicos complejos y en el desarrollo de métodos analíticos y computacionales avanzados.

Desde la perspectiva del electromagnetismo, los resultados evidencian que las ecuaciones integrales continúan desempeñando un papel esencial en el análisis de la propagación de ondas, la interacción entre campos electromagnéticos y la simulación de fenómenos multiescala. En este sentido, Chew, Zhang y Zhu (2024) sostienen que numerosos problemas abiertos de la física clásica y cuántica requieren formulaciones integrales avanzadas para su adecuada comprensión, mientras que Vipiana y Peng (2023) destacan su utilidad en la



resolución de problemas electromagnéticos presentes en tecnologías modernas de comunicación, sensores y sistemas electrónicos.

Por otra parte, la revisión demuestra que las ecuaciones integrales poseen una estrecha relación con el desarrollo de la física cuántica contemporánea. Los estudios analizados indican que estas herramientas permiten representar interacciones no locales y fenómenos probabilísticos difíciles de abordar mediante métodos diferenciales convencionales. En esta línea, Mahdi, Ibrahim y Buhailima (2025) destacan la importancia de las ecuaciones integrales para la resolución de problemas avanzados en mecánica cuántica y física matemática. destacan su importancia para la resolución de problemas avanzados en mecánica cuántica y física matemática.

Por otra parte, los resultados ponen de manifiesto el creciente impacto de la inteligencia artificial y la computación científica en el estudio de las ecuaciones integrales. Zappala et al. (2022) evidencian que las ecuaciones integrales neuronales permiten modelar sistemas complejos con elevados niveles de precisión, mientras que Brociek y Pleszczyński (2024) demuestran que las redes neuronales informadas por la física mejoran significativamente la resolución de ecuaciones integrales e integro-diferenciales. De igual manera, Duri et al. (2024) destacan que los métodos numéricos adaptativos contribuyen a optimizar los tiempos de cálculo y la eficiencia computacional en problemas de gran escala.

A pesar de los avances identificados, la literatura también evidencia desafíos relacionados con la complejidad matemática de ciertos modelos, la necesidad de recursos computacionales de alto rendimiento y la búsqueda de algoritmos más eficientes para la resolución de sistemas integrales complejos. Estas limitaciones representan oportunidades para futuras investigaciones orientadas al desarrollo de nuevas metodologías matemáticas y computacionales aplicadas a la física contemporánea.

No obstante, los estudios analizados presentan diferencias metodológicas significativas. Mientras las investigaciones centradas en electromagnetismo emplean principalmente formulaciones integrales orientadas a la simulación numérica y resolución de problemas multiescala, los estudios relacionados con mecánica cuántica priorizan la representación de interacciones no locales y fenómenos probabilísticos mediante modelos matemáticos más abstractos. Por su parte, las investigaciones vinculadas con inteligencia artificial integran redes neuronales informadas por la física y ecuaciones integrales neuronales para



optimizar la resolución de sistemas complejos. Sin embargo, persisten limitaciones asociadas al elevado costo computacional, la necesidad de recursos de procesamiento avanzados y la dificultad para validar experimentalmente algunos modelos teóricos. Asimismo, se identifican vacíos científicos relacionados con la escasa aplicación de estas metodologías en sistemas físicos altamente no lineales y en problemas interdisciplinarios emergentes. En consecuencia, futuras investigaciones deberían orientarse al desarrollo de algoritmos más eficientes, métodos híbridos de inteligencia artificial y estrategias de validación que permitan ampliar el alcance práctico de las ecuaciones integrales en la física contemporánea.

En síntesis, la evidencia analizada permite afirmar que las ecuaciones integrales constituyen una herramienta indispensable para el desarrollo de la física actual, al facilitar la modelación de fenómenos complejos, mejorar la precisión de las simulaciones científicas y favorecer la integración de nuevas tecnologías basadas en inteligencia artificial y computación avanzada.

6. CONCLUSIONES

La revisión sistemática realizada permite concluir que las ecuaciones integrales representan una herramienta matemática fundamental para la física contemporánea, debido a su capacidad para modelar fenómenos complejos que involucran múltiples variables e interacciones espaciales y temporales.

Los resultados evidencian que estas ecuaciones poseen aplicaciones significativas en áreas como el electromagnetismo, la mecánica cuántica, la física matemática y la computación científica. Su utilización contribuye a mejorar la comprensión de fenómenos físicos complejos y fortalece la capacidad predictiva de los modelos empleados en la investigación científica.

Se identificó que las ecuaciones integrales continúan siendo un recurso esencial para la resolución de problemas electromagnéticos y cuánticos, permitiendo representar procesos que difícilmente pueden abordarse mediante otros enfoques matemáticos tradicionales. Esto demuestra su vigencia y relevancia dentro de los avances científicos actuales.

De igual manera, la revisión destaca que la incorporación de inteligencia artificial, redes neuronales informadas por la física y métodos numéricos adaptativos está transformando las formas de resolver ecuaciones integrales, incrementando la precisión de los resultados y reduciendo los costos computacionales asociados a las simulaciones complejas.



Finalmente, se concluye que las ecuaciones integrales seguirán desempeñando un papel estratégico en el desarrollo de la física contemporánea, especialmente en áreas relacionadas con la simulación computacional, la modelación matemática avanzada y la inteligencia artificial aplicada a la ciencia. Se recomienda impulsar futuras investigaciones orientadas al diseño de algoritmos más eficientes y al desarrollo de nuevas aplicaciones interdisciplinarias que permitan ampliar el alcance de estas herramientas matemáticas en la investigación científica y tecnológica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albargi, A. H., Alghamdi, M. A., Alakhras, A. M., Alsubaie, A. A., Almutairi, N. M., & Alharbi, M. S. (2024). Integral equations: New solutions via generalized best proximity point results and applications to Volterra integral equations. *Axioms*, 13(7), 467. <https://doi.org/10.3390/axioms13070467>
- Banaś, J. (2025). Infinite systems of differential and integral equations. *Symmetry*, 17(4), 575. <https://doi.org/10.3390/sym17040575>
- Białyński-Birula, I., & Białyńska-Birula, Z. (2021). Integral equations in quantum physics and their applications. *Physical Review A*, 103(5), 052204. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.103.052204>
- Brociek, R., & Pleszczyński, M. (2024). Physics-informed neural networks for solving integral and integro-differential equations. *Symmetry*, 16(12), 1619. <https://doi.org/10.3390/sym16121619>
- Brunner, H. (2021). Volterra integral equations: Recent developments and applications. *Mathematics*, 9(18), 2283. <https://doi.org/10.3390/math9182283>
- Chew, W. C., Zhang, B., & Zhu, J. (2024). Some selected unsolved problems in classical and quantum electromagnetics. *Progress In Electromagnetics Research*, 180, 79–87. <https://doi.org/10.2528/PIER24072910>
- Duri, J. A., Moyo, T., et al. (2024). Efficient numerical solutions of integral equations using adaptive quadrature and iterative solvers. *International Journal of Applied Mathematics and Computing*.



Farina, L., Lang, G., & Martin, P. A. (2020). Love–Lieb integral equations: Applications, theory, approximations, and computation. *arXiv*.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.11052>

Kitchenham, B., & Charters, S. (2007). *Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering* (EBSE Technical Report EBSE-2007-01). Keele University and Durham University.

Liu, Y., Zhang, X., & Wang, J. (2023). Numerical methods for solving nonlinear integral equations in physical systems. *AIMS Mathematics*, 8(6), 13820–13839.
<https://doi.org/10.3934/math.2023705>

Mahdi, M. A., Ibrahim, A. A., & Buhailima, A. M. (2025). Applications of integral equations in quantum mechanics and mathematical physics. *Al Qalam Journal of Medical and Applied Sciences*, 8(1), 45–58.

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71.
<https://doi.org/10.1136/bmj.n71>

Vipiana, F., & Peng, Z. (2023). *Integral equations for real-life multiscale electromagnetic problems*. Institution of Engineering and Technology.

Zappala, E., Fonseca, A. H. O., Caro, J. O., Eivazi, H., Psaros, A. F., & Karniadakis, G. E. (2022). Neural integral equations. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2209.15190>

Conflicto de Intereses: Los autores afirman que no existen conflictos de intereses en este estudio y que se han seguido éticamente los procesos establecidos por esta revista. Además, aseguran que este trabajo no ha sido publicado parcial ni totalmente en ninguna otra revista.

FINANCIAMIENTO

Los autores no recibieron financiamiento para el desarrollo de esta investigación.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA:

Nombres de autores e iniciales: Yan Carla Antelo Vaca Diez (YCAVD).



1. Conceptualización: (YCAVD)
2. Curación de datos: (YCAVD)
3. Análisis formal: (YCAVD)
4. Adquisición de fondos: (YCAVD)
5. Investigación: (YCAVD)
6. Metodología: (YCAVD)
7. Administración del proyecto: (YCAVD)
8. Recursos: (YCAVD)
9. Software: (YCAVD)
10. Supervisión: (YCAVD)
11. Validación: (YCAVD)
12. Visualización: (YCAVD)
13. Redacción – Borrador original: (YCAVD)
14. Redacción – Revisión y edición: (YCAVD)

