



# REVISTA MULTIDISCIPLINAR EPISTEMOLOGÍA DE LAS CIENCIAS

Volumen 3, Número 3  
Julio-Septiembre 2026

Edición Trimestral

CROSSREF PREFIX DOI: 10.71112

ISSN: 3061-7812, [www.omniscens.com](http://www.omniscens.com)

Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias

Volumen 3, Número 3  
julio-septiembre 2026

Publicación trimestral  
Hecho en México

La Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias acepta publicaciones de cualquier área del conocimiento, promoviendo una plataforma inclusiva para la discusión y análisis de los fundamentos epistemológicos en diversas disciplinas. La revista invita a investigadores y profesionales de campos como las ciencias naturales, sociales, humanísticas, tecnológicas y de la salud, entre otros, a contribuir con artículos originales, revisiones, estudios de caso y ensayos teóricos. Con su enfoque multidisciplinario, busca fomentar el diálogo y la reflexión sobre las metodologías, teorías y prácticas que sustentan el avance del conocimiento científico en todas las áreas.

Contacto principal: [admin@omniscens.com](mailto:admin@omniscens.com)

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación

Se autoriza la reproducción total o parcial del contenido de la publicación sin previa autorización de la Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución 4.0.



Copyright © 2026: Los autores



9773061781003

---

### Cintillo legal

Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias Vol. 3, Núm. 3, julio-septiembre 2026, es una publicación trimestral editada por el Dr. Moises Ake Uc, C. 51 #221 x 16B , Las Brisas, Mérida, Yucatán, México, C.P. 97144 , Tel. 9993556027, Web: <https://www.omniscens.com>, [admin@omniscens.com](mailto:admin@omniscens.com), Editor responsable: Dr. Moises Ake Uc. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2024-121717181700-102, ISSN: 3061-7812, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor (INDAUTOR). Responsable de la última actualización de este número, Dr. Moises Ake Uc, fecha de última modificación, 1 julio 2026.



**Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias**

**Volumen 3, Número 3, 2026, julio-septiembre**

**DOI:** <https://doi.org/10.71112/ffwncd38>

**EL HAMILTONIANO COMO HERRAMIENTA CONCEPTUAL EN MECÁNICA  
CUÁNTICA: FUNDAMENTOS, INTERPRETACIÓN Y APLICACIONES**

**THE HAMILTONIAN AS A CONCEPTUAL TOOL IN QUANTUM PHYSICS:  
FUNDAMENTALS, INTERPRETATION, AND APPLICATIONS**

**Leonardi Hernández Sánchez**

**Gabriel Efraín Villatoro Pérez**

**Noribeth Fuentes González**

**México**

## **El hamiltoniano como herramienta conceptual en mecánica cuántica: fundamentos, interpretación y aplicaciones**

**The hamiltonian as a conceptual tool in quantum physics: fundamentals,  
interpretation, and applications**

Leonardi Hernández Sánchez<sup>a,\*</sup>

[leonardi1469@gmail.com](mailto:leonardi1469@gmail.com)

<https://orcid.org/0009-0008-2648-4353>

Gabriel Efraín Villatoro Pérez<sup>a</sup>

[efrain.villatoro@inaoep.mx](mailto:efrain.villatoro@inaoep.mx)

<https://orcid.org/0000-0002-1532-488X>

Noribeth Fuentes González<sup>b</sup>

[norifug@gmail.com](mailto:norifug@gmail.com)

<https://orcid.org/0009-0000-1124-3743>

\*Autor de correspondencia: [leonardi1469@gmail.com](mailto:leonardi1469@gmail.com), <sup>a</sup>Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica, <sup>b</sup>Universidad Politécnica de Chiapas, México

### **RESUMEN**

El Hamiltoniano constituye uno de los conceptos fundamentales de la mecánica cuántica.

Tradicionalmente se introduce como el operador asociado a la energía total de un sistema; sin embargo, su papel trasciende ampliamente esta interpretación formal. El Hamiltoniano organiza la dinámica, define los observables relevantes y estructura la descripción física de los sistemas cuánticos. En este trabajo se presenta un análisis teórico del Hamiltoniano como herramienta conceptual, abordando su función en sistemas cerrados y su extensión a sistemas abiertos descritos mediante la ecuación de Lindblad. Se discuten sus implicaciones en la interpretación de la dinámica cuántica, así como su relevancia en aplicaciones contemporáneas como la óptica cuántica y los sistemas disipativos. El estudio se basa en una revisión analítica de la

literatura, destacando la importancia del Hamiltoniano no solo como operador matemático, sino como elemento central en la construcción del conocimiento físico.

**Palabras clave:** Hamiltoniano; mecánica cuántica; sistemas abiertos; ecuación de Lindblad; interpretación física.

## ABSTRACT

The Hamiltonian is one of the fundamental concepts in quantum mechanics. It is traditionally introduced as the operator associated with the total energy of a system; however, its role extends far beyond this formal interpretation, as it organizes the dynamics, defines the relevant observables, and structures the physical description of quantum systems. This work presents a theoretical analysis of the Hamiltonian as a conceptual tool, addressing its role in closed systems and its extension to open systems described by the Lindblad equation. Its implications for the interpretation of quantum dynamics are discussed, as well as its relevance in contemporary applications such as quantum optics and dissipative systems. The study is developed through an analytical review of the literature, highlighting the importance of the Hamiltonian not only as a mathematical operator, but as a central element in the construction of physical knowledge.

**Keywords:** Hamiltonian; quantum mechanics; open systems; Lindblad equation; physical interpretation.

Recibido: 10 agosto 2026 | Aceptado: 27 agosto 2026 | Publicado: 28 agosto 2026

## INTRODUCCIÓN

La mecánica cuántica constituye uno de los pilares fundamentales de la física moderna, proporcionando el marco teórico necesario para describir sistemas a escala microscópica (Dirac, 1976; Griffiths & Schroeter, 2018; J.J.Sakurai, 2017; Landau & Lifshitz, 1981; Leslie E. Ballentine, 1998). Su desarrollo marcó una ruptura conceptual con la física clásica, al introducir una nueva forma de comprender la naturaleza de la materia y la radiación, basada en principios probabilísticos y en la estructura matemática del espacio de estados. En este contexto, el Hamiltoniano ocupa un lugar central como generador de la evolución temporal de los sistemas cuánticos.

El concepto de Hamiltoniano tiene su origen en la mecánica clásica, donde surge como una reformulación de la dinámica en términos de energía y variables canónicas. Esta estructura fue posteriormente incorporada en la mecánica cuántica, donde el Hamiltoniano se convierte en un operador que actúa sobre los estados del sistema, determinando su evolución a través de la ecuación de Schrödinger. De este modo, no solo conserva su interpretación energética, sino que adquiere un papel fundamental en la organización formal de la teoría.

Aunque tradicionalmente se presenta como el operador asociado a la energía total (John von Neumann, 1955; Richard Feynman, 1967; Werner Heisenberg, 1958), esta visión suele limitarse a su uso operativo en la resolución de ecuaciones diferenciales, lo que puede ocultar su significado más profundo. En la práctica, el Hamiltoniano no solo gobierna la evolución temporal, sino que también define la estructura del sistema físico, las interacciones presentes y los observables relevantes.

Desde una perspectiva más amplia, el Hamiltoniano puede interpretarse como una herramienta conceptual que organiza la descripción de los fenómenos cuánticos. A través de su forma, se identifican los regímenes físicos de interés, las aproximaciones válidas y los alcances del modelo, situándolo en el núcleo de la construcción del conocimiento en física.

Por otro lado, la descripción mediante un Hamiltoniano hermitiano es estrictamente válida para sistemas cerrados. Sin embargo, en la mayoría de los sistemas físicos reales, la interacción con el entorno introduce efectos de disipación y decoherencia que requieren una generalización del marco teórico. En estos casos, la dinámica se describe mediante ecuaciones maestras, como la ecuación de Lindblad, donde el Hamiltoniano continúa desempeñando un papel central, aunque ya no es suficiente por sí solo para caracterizar completamente la evolución del sistema.

El objetivo del presente trabajo es analizar el papel del Hamiltoniano desde una perspectiva teórica y conceptual, abordando tanto su formulación en sistemas cerrados como su extensión a sistemas abiertos. Se busca destacar su importancia no solo como operador matemático, sino como elemento estructurador de la teoría y herramienta fundamental en la interpretación de la dinámica cuántica.

### Fundamentos del hamiltoniano en sistemas cerrados

En mecánica cuántica, la evolución temporal de un sistema está gobernada por la ecuación de Schrödinger:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi(t)\rangle = \hat{H} |\psi(t)\rangle \quad (1)$$

donde  $\hat{H}$  representa el Hamiltoniano del sistema. Este operador contiene la información completa sobre la energía y las interacciones presentes, determinando la dinámica del estado cuántico en el espacio de Hilbert. Desde esta perspectiva, el Hamiltoniano no solo actúa como generador de la evolución temporal, sino también como el elemento central que define la estructura matemática y física del sistema.

En sistemas cerrados, el Hamiltoniano es un operador hermitiano, es decir, satisface la condición  $\hat{H} = \hat{H}^\dagger$ . Esta propiedad garantiza que sus valores propios sean reales, lo que permite interpretarlos como niveles de energía del sistema. Además, la hermiticidad asegura que la evolución temporal sea unitaria, de modo que la norma del estado se conserva en el

tiempo, cumpliendo con la interpretación probabilística de la mecánica cuántica (Dirac, 1976; Griffiths & Schroeter, 2018; Leslie E. Ballentine, 1998).

La solución formal de la ecuación de Schrödinger puede expresarse mediante el operador de evolución temporal:

$$|\psi(t)\rangle = e^{-i\hat{H}t/\hbar}|\psi(0)\rangle \quad (2)$$

lo cual pone de manifiesto que el Hamiltoniano genera transformaciones unitarias en el espacio de estados. Esta formulación resalta su papel como generador de la dinámica, análogo al papel que desempeña el Hamiltoniano clásico en la evolución de sistemas dinámicos.

Un aspecto fundamental del Hamiltoniano es su estructura espectral. Si se consideran los estados propios definidos por la ecuación:

$$\hat{H}|n\rangle = E_n|n\rangle \quad (3)$$

se obtiene una base natural en la cual la evolución temporal adquiere una forma particularmente simple. En esta representación, cada componente del estado evoluciona mediante un factor de fase dependiente del tiempo, lo que permite identificar claramente la contribución de cada nivel de energía al comportamiento dinámico del sistema. Esta propiedad es clave para el análisis de sistemas físicos, ya que conecta directamente la estructura matemática con magnitudes observables como frecuencias de transición y espectros de emisión.

El Hamiltoniano también determina el conjunto de observables relevantes del sistema. En particular, aquellos operadores que conmutan con  $\hat{H}$  corresponden a cantidades conservadas, lo que refleja simetrías fundamentales del sistema físico. Esta relación entre simetrías y leyes de conservación constituye uno de los pilares de la física teórica, reforzando el papel del Hamiltoniano como elemento organizador de la teoría.

Ejemplos paradigmáticos incluyen el oscilador armónico cuántico, donde el Hamiltoniano conduce a una estructura discreta de niveles de energía igualmente espaciados,

y el átomo de dos niveles, ampliamente utilizado en óptica cuántica para modelar la interacción entre luz y materia (Gardiner & Zoller, 2004; Glauber, 1963; Marlan O. Scully & Muhammad Suhail Zubairy, 1997; Walls & Gerard J. Milburn, 2008). En ambos casos, la forma del Hamiltoniano permite identificar de manera directa las características dinámicas y espectrales del sistema.

Más allá de su interpretación energética, el Hamiltoniano establece la formulación completa del problema físico, determinando las bases en las que se describe el sistema, las aproximaciones aplicables y los regímenes de interés. De este modo, puede entenderse no solo como un operador matemático, sino como una herramienta conceptual que estructura la descripción de los sistemas cuánticos y guía la interpretación de los fenómenos físicos.

### **Extensión a sistemas cuánticos abiertos**

En los sistemas físicos reales, la interacción con el entorno es prácticamente inevitable, lo que da lugar a procesos irreversibles como disipación, difusión y pérdida de coherencia cuántica. Estas contribuciones no pueden describirse adecuadamente mediante la ecuación de Schrödinger para estados puros, ya que dicha formulación supone una evolución unitaria y reversible. Por esta razón, para sistemas abiertos resulta más conveniente emplear el formalismo de la matriz densidad, el cual permite representar tanto estados puros como mezclas estadísticas y describir de manera efectiva la influencia del entorno (Carmichael Howard, 1993; Heinz-Peter Breuer & Francesco Petruccione, 2002; Maximilian Schlosshauer, 2006; Rivas & Huelga, 2011).

La forma más general de una ecuación maestra markoviana, homogénea en el tiempo, completamente positiva y preservadora de la traza, está dada por la ecuación de Gorini--Kossakowski--Sudarshan--Lindblad (Gorini et al., 1976; Lindblad, 1976; Manzano, 2020):

$$\frac{d\hat{\rho}}{dt} = -\frac{i}{\hbar} [\hat{H}, \hat{\rho}] + \sum_{\mu} \gamma_{\mu} \left( \hat{L}_{\mu} \hat{\rho} \hat{L}_{\mu}^{\dagger} - \frac{1}{2} \{ \hat{L}_{\mu}^{\dagger} \hat{L}_{\mu}, \hat{\rho} \} \right), \quad (4)$$

donde  $\hat{\rho}$  es la matriz densidad del sistema,  $\hat{H}$  representa el Hamiltoniano que gobierna la parte coherente de la dinámica,  $\hat{L}_\mu$  son los operadores de salto o colapso asociados a los distintos canales disipativos, y  $\gamma_\mu \geq 0$  son las tasas que cuantifican la intensidad de cada proceso de interacción con el entorno. El primer término del lado derecho describe la evolución unitaria del sistema aislado. El segundo término incorpora los efectos no unitarios producidos por el acoplamiento con el medio externo. En particular, la contribución  $\hat{L}_\mu \hat{\rho} \hat{L}_\mu^\dagger$  representa la acción del canal disipativo sobre el estado, mientras que el término anticomutador  $\{\hat{L}_\mu^\dagger \hat{L}_\mu, \hat{\rho}\}$  garantiza que la evolución preserve la traza de la matriz densidad y mantenga una interpretación física consistente.

Aunque la ecuación anterior es la forma más general dentro del régimen markoviano, la manera concreta en que aparece la temperatura del entorno depende del sistema físico considerado. En muchos problemas de óptica cuántica y teoría de sistemas abiertos, la temperatura se incorpora a través del número promedio de excitaciones térmicas del baño (Carmichael H. J., 2008; Gardiner & Zoller, 2004; Heinz-Peter Breuer & Francesco Petruccione, 2002). Para un modo bosónico de frecuencia  $\omega$  acoplado a un reservorio térmico, la ecuación maestra puede escribirse como:

$$\frac{d\hat{\rho}}{dt} = -\frac{i}{\hbar} [\hat{H}, \hat{\rho}] + \gamma(\bar{n} + 1) \left( \hat{a} \hat{\rho} \hat{a}^\dagger - \frac{1}{2} \{ \hat{a}^\dagger \hat{a}, \hat{\rho} \} \right) + \gamma \bar{n} \left( \hat{a}^\dagger \hat{\rho} \hat{a} - \frac{1}{2} \{ \hat{a} \hat{a}^\dagger, \hat{\rho} \} \right), \quad (5)$$

donde  $\hat{a}$  y  $\hat{a}^\dagger$  son los operadores de aniquilación y creación del modo bosónico, respectivamente,  $\gamma$  es la tasa de acoplamiento con el entorno, y  $\bar{n}$  es el número promedio de fotones térmicos del baño, dado por la distribución de Bose-Einstein:

$$\bar{n} = \frac{1}{e^{\hbar\omega/(k_B T)} - 1}, \quad (6)$$

siendo  $k_B$  la constante de Boltzmann y  $T$  la temperatura del entorno.

La ecuación (5) contiene dos contribuciones disipativas claramente diferenciadas. El término proporcional a  $\gamma(\bar{n} + 1)$  describe el proceso de emisión o pérdida de excitaciones del

sistema hacia el entorno. Incluso cuando  $T = 0$ , este término no desaparece, ya que persiste la emisión espontánea asociada al vacío cuántico. Por otro lado, el término proporcional a  $\gamma\bar{n}$  representa la absorción de excitaciones desde el baño térmico hacia el sistema, proceso que se vuelve relevante cuando la temperatura del entorno es distinta de cero.

Desde el punto de vista físico, esta forma de la ecuación maestra muestra que la dinámica de un sistema abierto resulta de la competencia entre la evolución coherente impuesta por el Hamiltoniano y los procesos irreversibles inducidos por el entorno. En el límite de temperatura nula,  $\bar{n} = 0$ , la ecuación se reduce al caso usual de decaimiento puramente disipativo. En cambio, para temperatura finita, la presencia simultánea de pérdida y absorción modifica de manera sustancial la evolución del sistema, afectando tanto las poblaciones como las coherencias.

Aun en este escenario más general, el Hamiltoniano mantiene un papel central. Aunque ya no contiene por sí solo toda la información dinámica, continúa determinando la estructura energética del sistema y la parte coherente de la evolución. En muchos tratamientos también resulta útil definir un Hamiltoniano efectivo no hermitiano,

$$\widehat{H}_{\text{eff}} = \widehat{H} - \frac{i\hbar}{2} \sum_{\mu} \gamma_{\mu} \widehat{L}_{\mu}^{\dagger} \widehat{L}_{\mu}, \quad (7)$$

el cual permite describir la evolución condicional entre eventos de salto cuántico (Carmichael Howard, 1993; Hernández-Sánchez, Bocanegra-Garay, et al., 2025). Esto pone de manifiesto que, incluso en sistemas abiertos y a temperatura finita, el Hamiltoniano sigue funcionando como un elemento estructurador de la teoría y como una herramienta conceptual indispensable para interpretar la dinámica cuántica.

## Interpretación del hamiltoniano como herramienta conceptual

El Hamiltoniano no solo define la evolución temporal de un sistema cuántico, sino que también organiza la forma en que se construye la teoría y se interpretan los fenómenos físicos. Su estructura encapsula las interacciones fundamentales del sistema, permitiendo identificar los términos relevantes, los regímenes físicos de interés y las aproximaciones que pueden aplicarse en cada caso. De este modo, el Hamiltoniano actúa como un punto de partida para la formulación de modelos físicos coherentes.

Desde una perspectiva formal, el Hamiltoniano determina la dinámica del sistema a través de su acción sobre el espacio de estados. Sin embargo, su papel va más allá de esta función operativa, ya que define las bases naturales en las cuales el sistema puede ser descrito. En particular, la diagonalización del Hamiltoniano permite identificar los estados estacionarios y establecer una representación en la cual la evolución temporal adquiere una forma simple. Esta propiedad facilita la interpretación de los procesos físicos en términos de transiciones entre niveles de energía.

El espectro del Hamiltoniano está directamente relacionado con magnitudes observables, como niveles energéticos, frecuencias de transición y estabilidad del sistema. En muchos casos, la información relevante de un sistema puede extraerse directamente de su estructura espectral, sin necesidad de resolver explícitamente la dinámica completa. Esto pone de manifiesto que el Hamiltoniano no solo describe cómo evoluciona un sistema, sino también cuáles son sus propiedades físicas fundamentales.

Otro aspecto central es la relación entre el Hamiltoniano y las simetrías del sistema. Cuando un operador conmuta con el Hamiltoniano, la magnitud asociada se conserva en el tiempo, lo que refleja una simetría subyacente. Esta conexión entre simetrías y leyes de conservación constituye uno de los principios organizadores más importantes de la física

teórica, situando al Hamiltoniano como el eje alrededor del cual se estructuran dichas relaciones.

Desde un punto de vista epistemológico, el Hamiltoniano puede entenderse como una representación del sistema físico, más que como una entidad directamente observable. Su forma depende del nivel de descripción adoptado, de las variables consideradas relevantes y de las aproximaciones introducidas. En este sentido, distintos Hamiltonianos pueden describir el mismo sistema bajo diferentes condiciones o escalas, lo que resalta su carácter como herramienta de modelado.

Además, el Hamiltoniano permite separar la información dinámica de las condiciones iniciales, facilitando el análisis de sistemas complejos. Una vez especificado, la evolución temporal queda determinada de manera general, mientras que las condiciones iniciales definen únicamente la trayectoria particular dentro del espacio de estados. Esta separación resulta fundamental para comprender la estructura de la teoría y su capacidad predictiva.

En este contexto, el Hamiltoniano puede interpretarse como un lenguaje que articula la descripción de los fenómenos cuánticos, conectando la formulación matemática con la interpretación física. A través de él, se traducen conceptos abstractos en predicciones observables, permitiendo establecer un puente entre la teoría y el experimento.

Finalmente, en el marco de sistemas abiertos, esta interpretación adquiere una dimensión adicional. Aunque el Hamiltoniano ya no describe completamente la dinámica, sigue proporcionando la estructura sobre la cual se incorporan los efectos disipativos. Esto refuerza la idea de que su papel no se limita a generar la evolución temporal, sino que constituye un elemento central en la organización conceptual de la mecánica cuántica.

## Aplicaciones en física cuántica moderna

El uso del Hamiltoniano como herramienta conceptual es especialmente evidente en diversas áreas de la física cuántica moderna, donde permite establecer modelos efectivos que capturan la esencia de fenómenos físicos complejos. En particular, en la óptica cuántica, el Hamiltoniano describe la interacción entre luz y materia, proporcionando una base para el análisis de sistemas como cavidades ópticas, átomos acoplados a campos electromagnéticos y dispositivos fotónicos.

Uno de los modelos más representativos es el modelo de Jaynes—Cummings (Jaynes & Cummings, 1963), cuyo Hamiltoniano puede escribirse como:

$$\hat{H} = \hbar\omega\hat{a}^\dagger\hat{a} + \frac{\hbar\omega_0}{2}\hat{\sigma}_z + \hbar g(\hat{a}\hat{\sigma}_+ + \hat{a}^\dagger\hat{\sigma}_-), \quad (8)$$

donde  $\hat{a}$  y  $\hat{a}^\dagger$  son los operadores de aniquilación y creación del campo,  $\hat{\sigma}_z$  describe el sistema de dos niveles, y  $g$  es la constante de acoplamiento. Este modelo permite describir fenómenos como las oscilaciones de Rabi, el intercambio de excitaciones entre átomo y campo, y la formación de estados entrelazados (Haroche & J.-M. Raimond, 2006; Marlan O. Scully & Muhammad Suhail Zubairy, 1997).

A través de la estructura del Hamiltoniano, es posible identificar distintos regímenes físicos (Bocanegra-Garay et al., 2024; Hernández-Sánchez, Ramos-Prieto, et al., 2025), como el régimen resonante y el no resonante, así como el régimen de acoplamiento fuerte y débil. Estas distinciones no solo tienen significado matemático, sino que determinan el comportamiento observable del sistema, lo que ilustra el papel del Hamiltoniano como guía en la interpretación física.

En sistemas con cavidades ópticas, el Hamiltoniano permite describir la confinación del campo electromagnético y su interacción con sistemas atómicos o cuánticos. Estos modelos son fundamentales en experimentos de electrodinámica cuántica de cavidades (cavity QED)

(Carmichael H. J., 2008; Haroche & J.-M. Raimond, 2006), donde se estudian fenómenos como la emisión espontánea modificada y la coherencia cuántica en sistemas controlados.

Cuando se consideran efectos de disipación, el Hamiltoniano se combina con términos no unitarios provenientes de la ecuación de Lindblad, lo que da lugar a una descripción más realista de los sistemas experimentales. En este contexto, el uso de Hamiltonianos efectivos no hermitianos permite capturar aspectos de la dinámica en presencia de pérdidas, facilitando el análisis de sistemas abiertos y no hermitianos (Hernández-Sánchez et al., 2023, 2026; Hernández-Sánchez, Hernández-Sánchez, et al., 2024; Hernández-Sánchez, Ramos-Prieto, et al., 2024a, 2024b; Prosen, 2008).

Más allá de la óptica cuántica, el Hamiltoniano desempeña un papel central en áreas como la computación cuántica (Nielson et al., 2010), donde define las operaciones lógicas sobre qubits, y en la física del estado sólido, donde determina la estructura de bandas y las propiedades electrónicas de los materiales (Kittel & McEuen, 2005; Supriyo Datta, 1996). En todos estos casos, el Hamiltoniano no solo describe la dinámica, sino que también permite diseñar y controlar sistemas físicos con aplicaciones tecnológicas.

En conjunto, estas aplicaciones muestran que el Hamiltoniano actúa como una herramienta unificadora que conecta modelos teóricos con fenómenos observables, permitiendo interpretar, predecir y, en muchos casos, controlar el comportamiento de sistemas cuánticos en contextos tanto fundamentales como aplicados.

## METODOLOGÍA

El presente trabajo se desarrolló mediante un enfoque teórico y analítico, basado en la revisión sistemática de literatura especializada en mecánica cuántica, teoría de sistemas abiertos y óptica cuántica. El objetivo principal fue analizar el papel del Hamiltoniano desde una doble perspectiva: como operador matemático que genera la dinámica del sistema y como herramienta conceptual que estructura la interpretación de los fenómenos físicos.

La metodología se organizó en tres etapas principales. En la primera etapa, se realizó una recopilación de fuentes bibliográficas fundamentales, incluyendo textos clásicos de mecánica cuántica y trabajos contemporáneos en sistemas abiertos. En esta fase se identificaron las formulaciones matemáticas clave, tales como la ecuación de Schrödinger, la estructura espectral del Hamiltoniano y la ecuación maestra de Lindblad.

En la segunda etapa, se llevó a cabo un análisis comparativo de estas formulaciones en distintos contextos físicos, abarcando tanto sistemas cerrados como sistemas abiertos. Este análisis permitió examinar cómo el Hamiltoniano interviene en la descripción de la dinámica, así como su relación con conceptos como coherencia, disipación y estabilidad del sistema.

En la tercera etapa, se integraron los resultados obtenidos en un marco conceptual unificado, con el propósito de resaltar el papel del Hamiltoniano como elemento organizador de la teoría. En esta fase se priorizó la interpretación física de los resultados, estableciendo conexiones entre la formulación matemática, los modelos teóricos y sus aplicaciones en la física cuántica moderna.

Finalmente, el enfoque adoptado permitió vincular la estructura formal de la mecánica cuántica con su significado epistemológico, proporcionando una visión integral que articula tanto el desarrollo teórico como su interpretación dentro del contexto de la ciencia contemporánea.

## DISCUSIÓN

El análisis desarrollado a lo largo de este trabajo pone de manifiesto que el Hamiltoniano trasciende su definición formal como operador asociado a la energía, constituyéndose como un elemento estructurador de la teoría cuántica. En sistemas cerrados, su papel es completo, ya que determina tanto la dinámica como la estructura espectral del sistema. Sin embargo, incluso al extender el marco hacia sistemas abiertos, donde la evolución deja de ser unitaria, el Hamiltoniano conserva su relevancia como referencia fundamental para la descripción de la parte coherente de la dinámica.

Esta persistencia sugiere que el Hamiltoniano no debe entenderse únicamente como una herramienta de cálculo, sino como un componente esencial en la organización del conocimiento físico. En particular, su capacidad para definir modelos, identificar regímenes físicos y establecer conexiones entre magnitudes observables lo convierte en un elemento central dentro del lenguaje de la mecánica cuántica.

No obstante, el estudio de sistemas abiertos también revela una limitación importante: el Hamiltoniano por sí solo no es suficiente para describir completamente la dinámica cuando existe interacción con el entorno. La necesidad de incorporar términos disipativos mediante ecuaciones maestras indica que la descripción del sistema requiere una ampliación conceptual, en la cual el Hamiltoniano se integra dentro de un marco más general. Esta observación refuerza la idea de que los modelos físicos no son descripciones absolutas de la realidad, sino representaciones dependientes del contexto y de las condiciones bajo las cuales se estudia el sistema.

Asimismo, la introducción de Hamiltonianos efectivos no hermitianos en ciertos enfoques, como el de trayectorias cuánticas, pone de manifiesto que el concepto de Hamiltoniano puede extenderse más allá de su definición tradicional. Esto sugiere que su papel no está restringido a una interpretación estrictamente energética, sino que puede adaptarse

como herramienta para describir fenómenos más complejos, incluyendo procesos irreversibles y dinámicas no unitarias.

Desde una perspectiva más amplia, los resultados discutidos permiten identificar al Hamiltoniano como un puente entre la formulación matemática y la interpretación física. Su estructura no solo determina la dinámica, sino que también orienta la forma en que se construyen y comprenden los modelos teóricos. En este sentido, su estudio no solo es relevante desde el punto de vista técnico, sino también desde una perspectiva epistemológica, ya que contribuye a entender cómo se organiza y se valida el conocimiento en física cuántica.

En conjunto, estos elementos sugieren que el Hamiltoniano debe considerarse como una herramienta conceptual fundamental, cuyo alcance va más allá de su uso operativo, desempeñando un papel clave en la interpretación, formulación y aplicación de la teoría cuántica en contextos tanto ideales como reales.

## CONCLUSIONES

El análisis desarrollado en este trabajo permite establecer que el Hamiltoniano constituye mucho más que un operador asociado a la energía en la mecánica cuántica. Su papel como generador de la evolución temporal se complementa con una función más amplia como elemento estructurador de la teoría, capaz de organizar la descripción de los sistemas físicos y orientar la interpretación de los fenómenos cuánticos.

A lo largo del estudio se ha mostrado que, en sistemas cerrados, el Hamiltoniano contiene la información completa de la dinámica, mientras que en sistemas abiertos su papel se mantiene como núcleo de la evolución coherente, aun cuando la descripción requiere la incorporación de términos disipativos adicionales. Esta extensión pone de manifiesto tanto su alcance como sus limitaciones, resaltando su integración dentro de marcos más generales de descripción.

Asimismo, se ha evidenciado que el Hamiltoniano desempeña un papel central en la construcción de modelos físicos, la identificación de regímenes dinámicos y la conexión entre formulaciones matemáticas y observables experimentales. En este sentido, puede entenderse como una herramienta conceptual que articula el lenguaje de la mecánica cuántica y facilita la transición entre teoría y experimento.

Finalmente, este trabajo subraya la importancia de abordar el Hamiltoniano desde una perspectiva integral, que combine su formulación matemática con su significado físico y epistemológico. Esta visión no solo permite una mejor comprensión de la teoría cuántica, sino que también abre la posibilidad de explorar nuevas formas de describir sistemas complejos, particularmente en el contexto de sistemas abiertos y dinámicas no unitarias.

### **Declaración de conflicto de interés**

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de interés relacionado con la presente investigación.

### **Declaración de contribución a la autoría**

Todos los autores declaran haber contribuido de manera equitativa en la conceptualización, desarrollo metodológico, redacción del borrador original, así como en la revisión y edición del presente artículo.

### **Declaración de uso de inteligencia artificial**

Los autores declaran que el presente trabajo es original, no contiene plagio y no ha sido publicado previamente en ninguna fuente. Asimismo, se reconoce que el uso de herramientas de inteligencia artificial se limitó exclusivamente a la corrección de aspectos gramaticales y de estilo, sin intervenir en el contenido científico del manuscrito.

## Agradecimientos

Leonardi Hernández-Sánchez agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el otorgamiento de la beca posdoctoral (CVU No. 736710).

## REFERENCIAS

- Bocanegra-Garay, I. A., Hernández-Sánchez, L., Ramos-Prieto, I., Soto-Eguibar, F., & Moya-Cessa, H. M. (2024). Invariant approach to the driven Jaynes-Cummings model. *SciPost Physics*, 16(1), 007. <https://doi.org/10.21468/SCIPOSTPHYS.16.1.007>
- Breuer, H.-P., & Petruccione, F. (2002). *The theory of open quantum systems*. Oxford University Press.
- Carmichael, H. J. (1993). *An open systems approach to quantum optics*. Springer.
- Carmichael, H. J. (2008). *Statistical methods in quantum optics 2: Non-classical fields*. Springer.
- Datta, S. (1996). *Electronic transport in mesoscopic systems*. Cambridge University Press.
- Dirac, P. A. M. (1976). *Principles of quantum mechanics* (4th ed.). Oxford University Press.
- Feynman, R. P. (1967). *The character of physical law*. The MIT Press.
- Gardiner, C. W., & Zoller, P. (2004). *Quantum noise* (3rd ed.). Springer.
- Glauber, R. J. (1963). The quantum theory of optical coherence. *Physical Review*, 130(6), 2529–2539. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.130.2529>
- Gorini, V., Kossakowski, A., & Sudarshan, E. C. G. (1976). Completely positive dynamical semigroups of N-level systems. *Journal of Mathematical Physics*, 17(5), 821–825. <https://doi.org/10.1063/1.522979>
- Griffiths, D. J., & Schroeter, D. F. (2018). *Introduction to quantum mechanics* (3rd ed.). Cambridge University Press.

- Haroche, S., & Raimond, J.-M. (2006). Exploring the quantum world: Atoms, cavities, and photons. Oxford University Press.
- Heisenberg, W. (1958). Physics and philosophy: The revolution in modern science. Harper & Brothers.
- Hernández-Sánchez, L., Bocanegra-Garay, I. A., Flores-Rosas, A., Ramos-Prieto, I., Soto-Eguibar, F., & Moya-Cessa, H. M. (2026). Numerical solution of the Lindblad master equation using the Runge-Kutta method implemented in Python. *Revista Mexicana de Física E*, 23(1), Article 010214. <https://doi.org/10.31349/REVMEXFISE.23.010214>
- Hernández-Sánchez, L., Bocanegra-Garay, I. A., Ramos-Prieto, I., Soto-Eguibar, F., & Moya-Cessa, H. M. (2024). Effects of classical drivings on the power broadening of atomic lineshapes. *Journal of the Optical Society of America B*, 41(8), C68–C73. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.522587>
- Hernández-Sánchez, L., Bocanegra-Garay, I. A., Ramos-Prieto, I., Soto-Eguibar, F., & Moya-Cessa, H. M. (2025). Effective non-Hermitian formulation of the Lindblad equation for interacting quantized fields at finite temperature. *Physical Review A*, 112(2), Article L021702. <https://doi.org/10.1103/gwzr-cjp6>
- Hernández-Sánchez, L., Ramos-Prieto, I., Soto-Eguibar, F., & Moya-Cessa, H. M. (2023). Exact solution for the interaction of two decaying quantized fields. *Optics Letters*, 48(20), 5435–5438. <https://doi.org/10.1364/OL.503837>
- Hernández-Sánchez, L., Ramos-Prieto, I., Soto-Eguibar, F., & Moya-Cessa, H. M. (2024a). Discriminando superposiciones de estados coherentes mediante formas de línea. *Revista Mexicana de Física*, 70(1), Article 011302. <https://doi.org/10.31349/REVMEXFIS.70.011302>

- Hernández-Sánchez, L., Ramos-Prieto, I., Soto-Eguibar, F., & Moya-Cessa, H. M. (2024b). Effects of squeezing on the power broadening and shifts of micromaser lineshapes. *Photonics*, 11(4), Article 371. <https://doi.org/10.3390/PHOTONICS11040371>
- Hernández-Sánchez, L., Ramos-Prieto, I., Soto-Eguibar, F., & Moya-Cessa, H. M. (2025). Dynamics of the interaction between two coherent states in a cavity with finite temperature decay. *Dynamics*, 5(1), Article 4. <https://doi.org/10.3390/DYNAMICS5010004>
- Jaynes, E. T., & Cummings, F. W. (1963). Comparison of quantum and semiclassical radiation theories with application to the beam maser. *Proceedings of the IEEE*, 51(1), 89–109. <https://doi.org/10.1109/PROC.1963.1664>
- Kittel, C. (2005). *Introduction to solid state physics* (8th ed.). Wiley.
- Landau, L. D., & Lifshitz, E. M. (1981). *Quantum mechanics: Non-relativistic theory* (3rd ed., Vol. 3). Pergamon Press.
- Leslie, E. B. (1998). *Quantum mechanics: A modern development*. World Scientific.
- Lindblad, G. (1976). On the generators of quantum dynamical semigroups. *Communications in Mathematical Physics*, 48(2), 119–130. <https://doi.org/10.1007/BF01608499>
- Manzano, D. (2020). A short introduction to the Lindblad master equation. *AIP Advances*, 10(2), Article 025106. <https://doi.org/10.1063/1.5115323>
- Nielsen, M. A., & Chuang, I. L. (2010). *Quantum computation and quantum information* (10th anniversary ed.). Cambridge University Press.
- Prosen, T. (2008). Third quantization: A general method to solve master equations for quadratic open Fermi systems. *New Journal of Physics*, 10(4), Article 043026. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/10/4/043026>
- Rivas, A., & Huelga, S. F. (2011). *Open quantum systems: An introduction*. Springer.

- Sakurai, J. J., & Napolitano, J. (2017). Modern quantum mechanics (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Schlosshauer, M. (2007). Decoherence and the quantum-to-classical transition. Springer.
- Scully, M. O., & Zubairy, M. S. (1997). Quantum optics. Cambridge University Press.
- von Neumann, J. (1955). Mathematical foundations of quantum mechanics. Princeton University Press.
- Walls, D. F., & Milburn, G. J. (2008). Quantum optics (2nd ed.). Springer.