

# Las ondas en física: desde lo clásico hasta lo cuántico

Waves in Physics: from Classical Quantum

---

Erika Lizette Arévalo Pererao<sup>1</sup>  
perera.erika@hotmail.com

Felipe Hernández Yuená<sup>1</sup>  
egalois5@gmail.com

Erik Díaz-Bautista<sup>2</sup>  
ediazba@ipn.mx  
ORCID: 0000-0002-2180-3895

1 ESTUDIANTE DEL DIPLOMADO EN FÍSICA BÁSICA MESOAMERICAN CENTRE FOR  
THEORETICAL PHYSICS

2 ESCUELA SUPERIOR DE FÍSICA Y MATEMÁTICAS INSTITUTO POLITÉCNICO  
NACIONAL, CDMX, MÉXICO

Para citar este artículo:

Díaz Bautista, E., Arévalo Perera, E. L., & Hernández Yuena, F. Las ondas en física: desde lo clásico hasta lo cuántico. *Espacio I+D, Innovación más Desarrollo*, 15(45). <https://doi.org/10.31644/IMASD.45.2026.a01>

## RESUMEN

Este reporte desarrolla sistemáticamente el tema de las ondas en física, partiendo de las ondas mecánicas clásicas y de su ecuación de onda, para luego abordar las ondas de materia según la propuesta de De Broglie y culminar con la función de onda en mecánica cuántica y la ecuación de Schrödinger. Se destacan las diferencias fundamentales entre las descripciones clásica y cuántica del fenómeno ondulatorio, enfatizando el cambio paradigmático en la interpretación física.

### Palabras clave:

*Ecuación de onda, función de onda, mecánica clásica, mecánica cuántica, movimiento ondulatorio.*

— *Abstract* —

This report systematically develops the topic of waves in physics, starting with classical mechanical waves and their wave equation, then addressing matter waves according to De Broglie's proposal, and culminating with the wave function in quantum mechanics and the Schrödinger equation. It highlights the fundamental differences between the classical and quantum descriptions of the wave phenomenon, emphasizing the paradigmatic shift in the physical interpretation.

**Keywords:**

*Wave equation, wave function, classical mechanics, quantum mechanics, wave motion.*

## 1. INTRODUCCIÓN

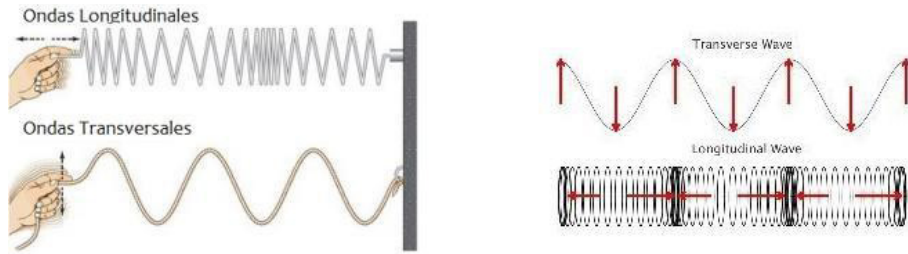
El concepto de onda es fundamental en la física, ya que describe la propagación de perturbaciones en un medio clásico o la evolución de las probabilidades en la descripción cuántica. Históricamente, surge de la necesidad de describir fenómenos naturales en los que se observa la propagación de una perturbación a través de un medio, sin que exista un transporte neto de materia. En estos casos, lo que se observa no es el desplazamiento permanente de las partículas del medio, sino un movimiento oscilatorio alrededor de una posición de equilibrio, cuya influencia se transmite de una región del espacio a otra. Además, la regularidad observada en los fenómenos ondulatorios permite identificar magnitudes periódicas, como la longitud de onda y la frecuencia, que describen la estructura espacial y temporal de la perturbación, respectivamente. Más tarde, gracias a los fenómenos observados en el estudio de la luz, la necesidad de contar con un medio físico se replantea, lo que conduce a concluir que ciertos tipos de ondas pueden existir y propagarse en el espacio vacío, más allá de la fuente que las produce.

Este reporte desarrolla el tema comenzando con ondas mecánicas y su descripción matemática, para luego abordar las ondas de materia y la función de onda en mecánica cuántica, destacando las diferencias conceptuales entre ambos regímenes. El estudio de las ondas proporciona un puente conceptual entre la física clásica y la mecánica cuántica, mostrando cómo conceptos matemáticamente similares adquieren significados físicos radicalmente diferentes.

## 2. MOVIMIENTO ONDULATORIO Y ECUACIÓN DE ONDA

### 2.1. Definición de una onda mecánica

En diversos fenómenos naturales se observan deformaciones y movimientos que se transmiten a lo largo del espacio conservando ciertos patrones regulares. Las ondas en la superficie del agua, así como los desplazamientos registrados en estudios sísmicos, muestran cómo una alteración inicial puede manifestarse sucesivamente en distintas regiones sin que el material en su conjunto cambie de posición permanente. Estos comportamientos han sido descritos dentro del marco de la física clásica mediante el concepto de onda (ver Figura 1).



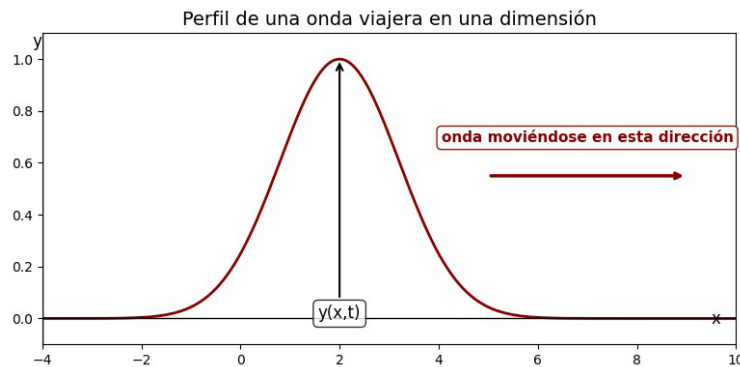
Recuperado de: <https://es-static.z-dn.net/files/d20/26c2af0d56b9f0f68efd2a6b4a7bfdbb.png>.

**Figura 1.** Ejemplos de ondas mecánicas en la vida cotidiana. Las ondas se clasifican en ondas longitudinales o transversales según ocurra la vibración del medio material respecto a la dirección en que se propaga la onda

Una onda mecánica es una perturbación que se propaga a través de un medio material elástico, transportando energía y momento sin un transporte neto de materia. Matemáticamente, podemos expresar una onda viajera unidimensional como:

$$y(x, t) = f(x \pm vt), \quad (1)$$

donde el signo positivo indica que la propagación ocurre en dirección negativa del eje  $x$  y el signo negativo indica que ocurre en dirección positiva (ver Figura 2).



**Figura 2.** Perfil de una onda viajera que se propaga en la dirección positiva del eje  $x$

## 2.2. Ecuación de onda unidimensional

Matemáticamente, la ecuación diferencial que gobierna muchas ondas mecánicas en una dimensión es la **ecuación de onda**, la cual se expresa como:

$$\frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2}, \quad (2)$$

donde:

- $y(x, t)$  es la perturbación que se propaga en algún medio elástico,

- $v$  es la velocidad de fase de la onda en el medio,
- $x$  es la posición,
- $t$  es el tiempo.

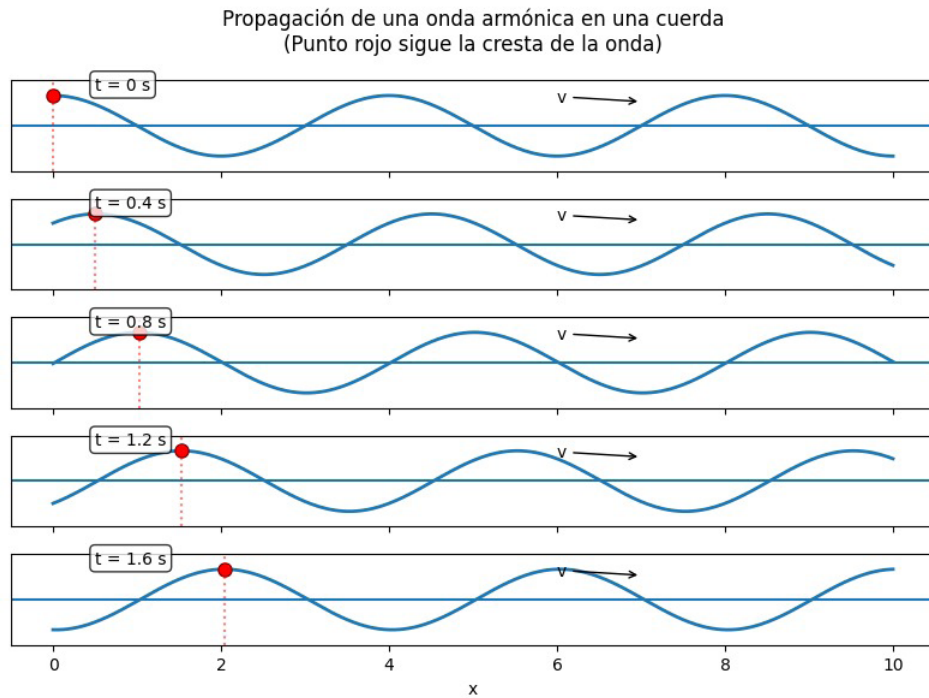
Esta ecuación se obtiene de las leyes de Newton aplicadas a elementos del medio, considerando fuerzas elásticas. Para una cuerda tensa de densidad lineal  $\mu$  (cantidad de materia por unidad de longitud) y tensión  $T$ , por ejemplo,  $v = \sqrt{T/\mu}$  (ver Figura 3).

### 2.3. Solución armónica y parámetros físicos

Una solución particularmente importante de la ecuación (2) es la llamada **onda armónica**, la cual se expresa matemáticamente como:

$$y(x, t) = A \cos(kx - \omega t + \phi_0). \quad (3)$$

Los parámetros físicos fundamentales que se pueden identificar en esta ecuación son:



**Figura 3.** Una onda en una cuerda tensa propagándose en la dirección positiva del eje  $x$

1. **Amplitud ( $A$ ):** Valor máximo de la perturbación. Está relacionada con la energía transportada por la onda, que es proporcional a  $A^2$ .

2. **Frecuencia angular ( $\omega$ ):** Relacionada con la frecuencia temporal  $f$  por  $\omega = 2\pi f$ , donde  $f$  se mide en Hertz (Hz, ciclos por segundo).
3. **Número de onda ( $k$ ):** Relacionado con la periodicidad espacial mediante  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ .
4. **Longitud de onda ( $\lambda$ ):** Distancia entre dos puntos consecutivos en fase (por ejemplo, entre dos crestas sucesivas).
5. **Velocidad de fase ( $v$ ):** Velocidad con la que se mueve un punto de fase constante (cresta, valle):

$$v = \frac{\omega}{k} = \lambda f. \quad (4)$$

6. **Constante de fase ( $\phi_0$ ):** Desfase inicial que determina el valor de la onda en  $x = 0$ ,  $t = 0$ .

La Figura 4 muestra la representación esquemática de la solución armónica, donde se identifican la amplitud, la longitud de onda y los puntos de fase característica.

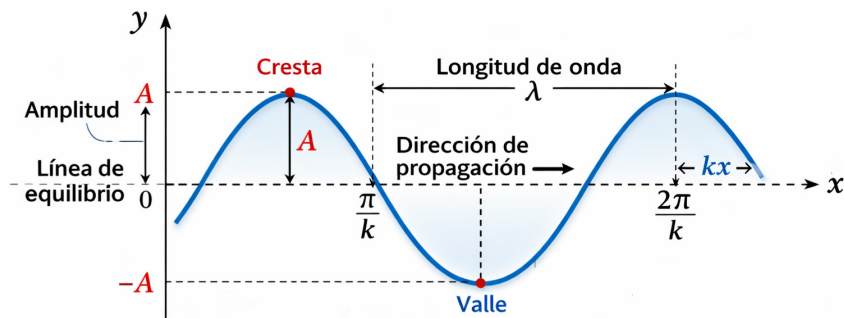


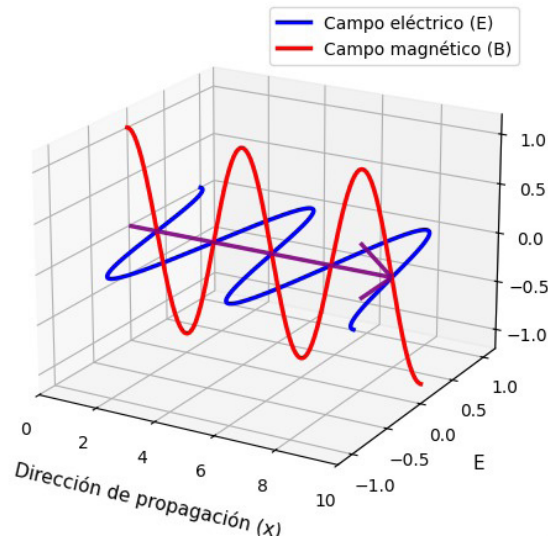
Figura 4. Representación de una onda armónica  $y(x, t) = A \cos(kx - \omega t + \phi_0)$

### 3. LIMITACIONES DE LA TEORÍA ONDULATORIA CLÁSICA

#### 3.1. Ondas electromagnéticas

El desarrollo de la teoría ondulatoria clásica permitió explicar con gran éxito numerosos fenómenos en mecánica y óptica. La formulación matemática de la ecuación de onda proporcionó un marco coherente para describir la propagación de perturbaciones, y las ecuaciones de Maxwell extendieron este formalismo al mostrar que la luz podía entenderse como una onda electromagnética (EM), es decir, como campos eléctricos y magnéticos que, al variar en el tiempo, pueden propagarse a largas distancias retroalimentándose entre sí (ver Figura 5).

### Onda electromagnética plana

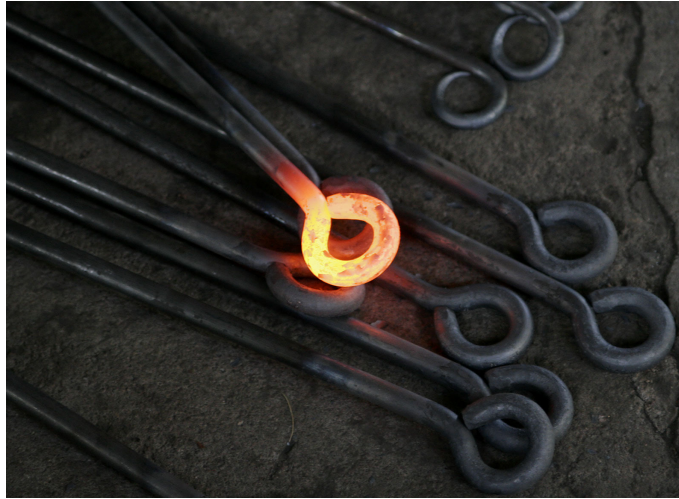


**Figura 5.** Representación esquemática de una onda electromagnética

En este contexto, la óptica y el electromagnetismo lograron una profunda interrelación, permitiendo explicar fenómenos como la interferencia, la difracción y la polarización dentro de un mismo esquema teórico. Además, este avance llevó a demostrar experimentalmente que estas ondas **no requieren de un medio material para propagarse**, sino que pueden hacerlo en el vacío, en clara diferencia con las ondas mecánicas. Aunque inicialmente se postuló la existencia del éter como medio de propagación de la luz, los resultados experimentales —en particular el experimento de Michelson y Morley— debilitaron dicha hipótesis y condujeron a su abandono.

### 3.2. Interacción luz-materia

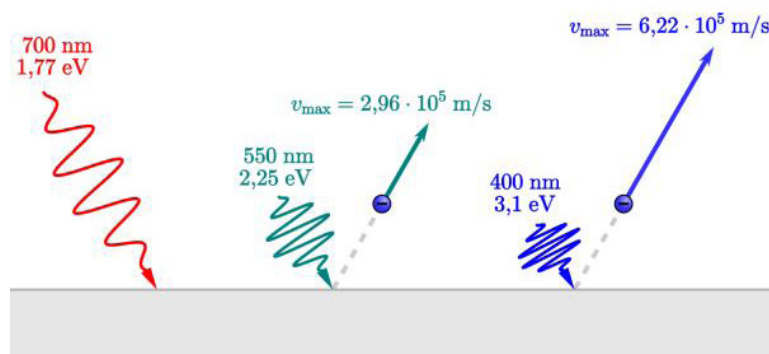
Sin embargo, comenzaron a surgir otras dificultades al estudiar más a profundidad la interacción entre la radiación y la materia. Por ejemplo, la teoría clásica asumía que la energía asociada a la radiación se intercambiaba de manera continua; no obstante, fenómenos como la radiación del cuerpo negro o el efecto fotoeléctrico (ver Figuras 6 y 7) mostraron que este supuesto no era suficiente. La situación se superó al proponer que la energía asociada a la radiación se emite y absorbe en unidades discretas conocidas como **fonones**. La necesidad de explicar estos resultados condujo a una revisión profunda de los fundamentos clásicos y abrió el camino hacia una nueva manera de entender la naturaleza: la mecánica cuántica.



Recuperado de: <https://fefino.com/wp-content/uploads/2014/05/hot-metalwork.jpg>.

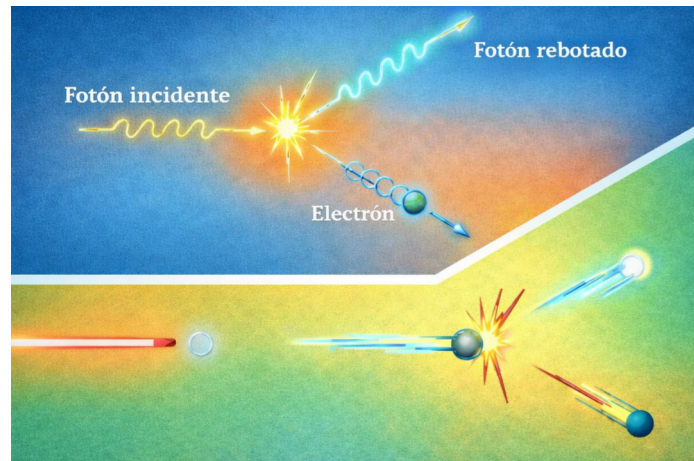
**Figura 6.** Cuando los objetos se calientan, emiten radiación electromagnética cuya longitud de onda depende de la temperatura del objeto y se perciben de un determinado color. Objetos con una temperatura relativamente baja, como el trozo de hierro de la imagen, aparecen rojos, mientras que objetos de mayor temperatura, como la superficie del sol, aparecen amarillos o blancos

Un fenómeno decisivo que condujo a un entendimiento más profundo de la luz fue el efecto Compton, el cual consiste en el aumento de la longitud de onda de un fotón (rayos X o gamma) tras chocar con un electrón libre, perdiendo parte de su energía y dispersándose. Este fenómeno demostró la naturaleza corpuscular de la luz, evidenciando que los fotones actúan como partículas con momento y energía (ver Fig. 8).



Recuperado de: [https://cdn0.ecologiaverde.com/es/posts/1/9/2/formulas\\_del\\_efecto\\_fotoelectrico\\_6291\\_3\\_600.jpg](https://cdn0.ecologiaverde.com/es/posts/1/9/2/formulas_del_efecto_fotoelectrico_6291_3_600.jpg)

**Figura 7.** En el efecto fotoeléctrico, cuando sobre un metal incide radiación electromagnética es posible extraer electrones del material. Contrario a la concepción clásica, la energía y el número de electrones liberados del metal no dependen de la intensidad de la radiación ni del tiempo de exposición, sino de la longitud de onda (y color) de la luz incidente



**Figura 8.** En el efecto Compton se pone en evidencia el comportamiento corpuscular de la radiación, pues las trayectorias que siguen un electrón y un fotón dispersados son iguales a las que seguirían dos partículas microscópicas con sus mismas energías

De esta manera, se estaría planteando una **dualidad onda-partícula** para la radiación electromagnética.

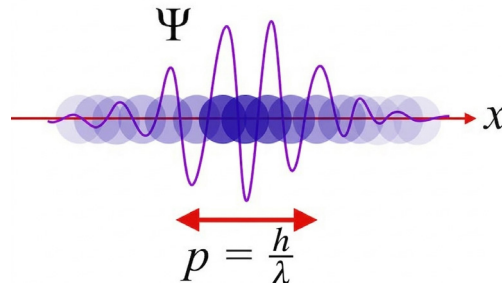
#### 4. ONDAS DE MATERIA Y FUNCIÓN DE ONDA

##### 4.1. Longitud de onda de De Broglie

En este contexto de tensiones conceptuales y resultados experimentales difíciles de explicar dentro del marco clásico, surgió una idea que transformaría profundamente la comprensión de la materia. En su tesis doctoral de 1924, Louis de Broglie propuso una extensión radical de la dualidad onda-partícula: “Si la luz podía comportarse como partícula, entonces las partículas materiales podían comportarse como ondas”. Propuso que a toda partícula con momento  $p$  le corresponde una **onda de materia** de longitud de onda (ver Figura 9):

$$\lambda = \frac{h}{p}, \quad (5)$$

donde  $h = 6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$  J s es la **constante de Planck**.



**Figura 9.** Representación esquemática de la onda de materia que acompaña a una partícula en movimiento. El momento lineal  $p$  de la partícula y la longitud de onda  $\lambda$  de la onda están relacionados mediante la propuesta de De Broglie

#### 4.2. Función de onda en la mecánica cuántica

La hipótesis de De Broglie introdujo una idea revolucionaria: si las partículas materiales poseen una longitud de onda asociada, entonces su comportamiento no puede describirse únicamente mediante las leyes clásicas del movimiento. Sin embargo, la relación  $\lambda = h/p$  por sí sola no constituía una teoría dinámica completa. Era necesario formular una ecuación que describiera la evolución temporal de estas ondas de materia y que permitiera incorporar de manera sistemática la energía y el potencial del sistema. Este paso fue dado por Erwin Schrödinger en 1926, quien desarrolló una ecuación de onda capaz de describir matemáticamente el comportamiento cuántico de las partículas, dando origen a la mecánica cuántica ondulatoria.

##### 4.2.1. Definición e interpretación probabilística

En la mecánica cuántica, la llamada **función de onda**  $\Psi(x,t)$  describe el estado cuántico de una partícula o sistema. A diferencia de una onda mecánica,  $y(x,t)$ ,  $\Psi$  no representa una perturbación física medible directamente. Max Born propuso en 1926 una interpretación probabilística:

El cuadrado del módulo de la función de onda,  $|\Psi(x,t)|^2$ , es la **densidad de probabilidad** de encontrar la partícula en la posición  $x$  en el tiempo  $t$ .

Matemáticamente, dicha probabilidad de encontrar la partícula en un intervalo  $dx$  alrededor de  $x$  es:

$$dP(x,t) = |\Psi(x,t)|^2 dx. \quad (6)$$

Dado que la partícula debe estar en algún lugar del espacio, la función de onda debe estar normalizada, lo cual se expresa como:

$$\int_{\text{todo el espacio}} |\Psi(x,t)|^2 dx = 1. \quad (7)$$

Dicho de otra manera, esta interpretación sugiere que las ondas de materia son perturbaciones de un campo de probabilidades que —como las ondas clásicas— pueden extenderse por todo el espacio interfiriendo entre sí, pero que —a diferencia de las ondas clásicas— adoptan valores complejos en cada punto en el espacio. Entre mayor sea el módulo cuadrado de tales valores complejos, será más probable encontrar a una partícula en una posición dada.

#### 4.2.2. Ecuación de Schrödinger

Las ondas de materia —a diferencia de las ondas mecánicas— no requieren de un medio material para propagarse, no se rigen por el determinismo de la mecánica clásica y son un indicio del comportamiento ondulatorio de la materia, el cual puede ser descrito, matemáticamente, por la función de onda cuántica  $\Psi(x, t)$ .

El entendimiento de lo que es realmente la función de onda ha llevado a discusiones y al surgimiento de diversas corrientes (o interpretaciones) en la mecánica cuántica. Por ejemplo, la descripción probabilística propuesta por Born, citada anteriormente, forma parte de la interpretación de Copenhague.

Ahora bien, la llamada ecuación de Schrödinger proporciona un marco en el que la evolución temporal de  $\Psi$  es siempre ondulatoria, mientras que el carácter corpuscular emerge exclusivamente en el proceso de medición, donde la distribución de resultados individuales sigue la distribución  $|\Psi|^2$ . Así, la evolución temporal de  $\Psi$  para una partícula en un potencial  $V(x)$  se rige por la **ecuación de Schrödinger dependiente del tiempo**:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x) \right] \Psi, \quad (8)$$

donde  $\hbar = h/(2\pi)$  es la constante de Planck reducida. Esta ecuación pone en evidencia una diferencia matemática importante entre las ondas mecánicas, que satisfacen la ecuación (2) para  $y(x, t)$ , y la función de onda  $\Psi(x, t)$ , pues la variación espacial de cada función se relaciona de manera distinta con su variación temporal.

Para estados estacionarios, es decir, aquellos para los que su energía  $E$  es constante, podemos escribir  $\Psi(x, t) = \psi(x)e^{-iEt/\hbar}$ , obteniendo la **ecuación de Schrödinger independiente del tiempo**:

$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x) \right] \psi(x) = E \psi(x). \quad (9)$$

#### 4.2.3. Comparación con la ecuación de onda clásica

La ecuación de Schrödinger (8) difiere fundamentalmente de la ecuación de onda clásica (2) en los siguientes aspectos:

1. **Orden en el tiempo:** La ecuación de Schrödinger es de **primer orden en el tiempo**, mientras que la ecuación de onda clásica es de segundo orden.
2. **Naturaleza de la solución:** La ecuación de Schrödinger está definida en los **números complejos** por lo que sus soluciones son funciones de onda complejas. La ecuación clásica generalmente describe cantidades reales.
3. **Relación de dispersión:** Para una partícula libre, es decir, que no interactúa con ningún otro objeto o sistema ( $V = 0$ ), la función de onda  $\Psi = Ae^{i(kx - \omega t)}$ , con A un número diferente de cero. Si esta propuesta se sustituye en (8), obtenemos la siguiente igualdad:

$$\hbar\omega = \frac{\hbar^2 k^2}{2m},$$

la cual conduce a que la velocidad de fase sea

$$v = \frac{\omega}{k} = \frac{\hbar k}{2m} = \frac{p}{2m},$$

que **no** es la velocidad de la partícula, como en el caso clásico. Por el contrario, la velocidad de grupo se calcula como:

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{\hbar k}{m} = \frac{p}{m},$$

que sí corresponde a la velocidad clásica de la partícula.

#### 4.3 Diferencias fundamentales entre ondas mecánicas y la función de onda

El estudio de las ondas en física abarca desde la descripción clásica de las perturbaciones en medios materiales hasta la función de onda en la mecánica cuántica. Mientras las ondas mecánicas se rigen por la ecuación de onda y describen fenómenos colectivos medibles directamente, las ondas de materia y la función de onda representan una evolución conceptual profunda: la naturaleza ondulatoria de partículas individuales y una descripción probabilística de la realidad física.

La ecuación de Schrödinger, que es lineal y está definida en los números complejos, difiere esencialmente de la ecuación de onda clásica, reflejando el carácter no intuitivo del mundo cuántico. La interpretación probabilística de Born, donde  $|\Psi|^2$  representa densidad de probabilidad, marca un quiebre epistemológico con la física clásica, donde las ondas representan perturbaciones físicas directas.

**Cuadro 1***Comparación entre las ondas mecánicas y la función de onda cuántica*

| Aspecto                          | Onda mecánica                                                                                                 | Función de onda cuántica                                                                                                   |
|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Naturaleza física</b>         | Perturbación en un medio material medible directamente                                                        | Amplitud de probabilidad (entidad matemática abstracta)                                                                    |
| <b>Representación matemática</b> | Función real $y(x, t)$                                                                                        | Función compleja $\Psi(x, t)$                                                                                              |
| <b>Interpretación</b>            | Descriptiva directa del movimiento del medio                                                                  | Probabilística: $ \Psi ^2$ = densidad de probabilidad                                                                      |
| <b>Ecuación gobernante</b>       | $\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$<br>(2º orden en tiempo) | $i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + V\Psi$<br>(1º orden) |
| <b>Transporte</b>                | Transporta energía y momento a través del medio                                                               | Describe evolución de probabilidad; la “partícula” puede estar localizada                                                  |
| <b>Energía</b>                   | Proporcional al cuadrado de la amplitud: $E \propto A^2$                                                      | Valor esperado: $\langle E \rangle = \int \Psi^* \hat{H} \Psi dx$                                                          |
| <b>Medio de propagación</b>      | Requiere medio material (excepto ondas EM en el vacío)                                                        | No requiere medio; es una propiedad intrínseca de la materia                                                               |
| <b>Cuantización</b>              | No necesariamente cuantizada (excepto en las ondas estacionarias)                                             | Surge naturalmente de condiciones de contorno (niveles discretos de energía)                                               |
| <b>Superposición</b>             | Principio de superposición lineal                                                                             | Principio de superposición e interferencia de amplitudes de probabilidad                                                   |

Las ondas de De Broglie unifican conceptualmente la descripción de la materia y la radiación, aunque con interpretaciones físicas diferentes. Mientras que la física clásica proporciona descripciones deterministas, la mecánica cuántica ofrece predicciones probabilísticas, limitadas por el **principio de incertidumbre de Heisenberg**.

Este recorrido desde las ondas mecánicas hasta la función de onda cuántica ilustra la evolución del pensamiento físico y la capacidad de las matemáticas para describir realidades cada vez más abstractas y contraintuitivas.

## REFERENCIAS

1. **Griffiths, D. J.** (2017). *Introduction to Electrodynamics*. Cambridge University Press.
2. **Griffiths, D. J.** (2018). *Introduction to Quantum Mechanics*. Cambridge University Press.
3. **French, A. P.** (1971). *Vibrations and Waves*. W.W. Norton & Company.
4. **Eisberg, R., Resnick, R.** (1985). *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles*. John Wiley & Sons.
5. **de Broglie, L.** (1924). *Recherches sur la théorie des quanta*. Tesis doctoral, Universidad de París.
6. **Schrödinger, E.** (1926). An Undulatory Theory of the Mechanics of Atoms and Molecules. *Physical Review*, 28(6), 1049-1070.
7. **Born, M.** (1926). Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge. *Zeitschrift für Physik*, 37(12), 863-867.