

## OS MISTÉRIOS DO MUNDO QUÂNTICO

### THE MYSTERIES OF THE QUANTUM WORLD

### LOS MISTERIOS DEL MUNDO CUÁNTICO

Angélica Anacleto de Aguiar<sup>1</sup>

**RESUMO:** O artigo aqui apresentado, busca apresentar uma análise acerca dos mistérios contidos no mundo quântico, examinar conteúdos pouco discutidos devido à sua complexidade e transformar os dados encontrados em conceitos mais atingíveis. Seu principal objetivo está na investigação dos fenômenos fundamentais da Física Quântica e suas contribuições para o entendimento da realidade e suas influências quanto ao desenvolvimento de tecnologias inovadoras, sendo para isso, estabelecidos alguns propósitos específicos para alcançá-lo, como analisar a dualidade onda-partícula, discutir a superposição, avaliar o tunelamento quântico, investigar a decoerência e examinar o princípio da incerteza de Heisenberg. A metodologia aplicada consistiu em uma análise bibliográfica a partir de publicações pertinentes ao tema proposto e na avaliação de dados obtidos a partir de fontes secundárias, tendo como intuito garantir um suporte substancial de conhecimentos de modo a explorar e sustentar as informações obtidas e o desenvolvimento das teorias principais. A partir da pesquisa realizada, pôde-se identificar que, os fenômenos quânticos possuem impacto significativo em diversas tecnologias emergentes que vão desde modernos dispositivos eletrônicos utilizados em sistemas de comunicação até aparelhos utilizados para diagnósticos médicos o que, por sua vez, permitiu a compreensão de que aprofundar o conhecimento sobre tais fenômenos é essencial para o desenvolvimento tecnológico e científico futuro. Conclui-se a partir desta investigação que, fenômenos como a dualidade onda-partícula, a superposição, o tunelamento quântico, a decoerência e o princípio da incerteza de Heisenberg possuem pressuposições profundas, influenciando não apenas o modo como os cientistas compreendem a natureza fundamental da realidade, mas também impulsionando importantes inovações tecnológicas.

1

**Palavras-chave:** Física Quântica. Superposição. Decoerência. Tunelamento Quântico. Dualidade Onda-Partícula.

**ABSTRACT:** This article aims to analyze the mysteries contained in the quantum world, examine topics that are rarely discussed due to their complexity, and transform the data found into more accessible concepts. Its main objective is to investigate the fundamental phenomena of Quantum Physics and their contributions to understanding reality and their influence on the development of innovative technologies. To achieve this, specific goals are established, such as analyzing wave-particle duality, discussing superposition, evaluating quantum tunneling, investigating decoherence, and examining Heisenberg's uncertainty principle. The methodology applied consisted of a bibliographic analysis of publications relevant to the proposed theme and the evaluation of data obtained from secondary sources, with the aim of ensuring substantial knowledge support to explore and sustain the information obtained and the development of the main theories. Based on the research conducted, it was possible to identify that quantum phenomena have a significant impact on various emerging technologies, ranging from modern electronic devices used in communication systems to equipment used for medical diagnoses. This, in turn, allowed for the understanding that deepening knowledge about such phenomena is essential for future technological and scientific development. This investigation concludes that phenomena such as wave-particle duality, superposition, quantum tunneling, decoherence, and Heisenberg's uncertainty principle have profound presuppositions, influencing not only how scientists understand the fundamental nature of reality but also driving important technological innovations.

**Keywords:** Quantum Physics. Superposition. Decoherence. Quantum Tunneling. Wave-Particle Duality.

<sup>1</sup>Graduada em Licenciatura em Física pelo Instituto Federal do Paraná, Campus Ivaiporã.

**RESUMEN:** Este artículo busca analizar los misterios del mundo cuántico, examinar temas poco abordados debido a su complejidad y transformar los datos encontrados en conceptos más accesibles. Su objetivo principal es investigar los fenómenos fundamentales de la Física Cuántica y sus contribuciones a la comprensión de la realidad, así como su influencia en el desarrollo de tecnologías innovadoras. Para ello, se establecen objetivos específicos, como el análisis de la dualidad onda-partícula, la discusión sobre la superposición, la evaluación del efecto túnel cuántico, la investigación de la decoherencia y el examen del principio de incertidumbre de Heisenberg. La metodología aplicada consistió en un análisis bibliográfico de publicaciones relevantes para el tema propuesto y la evaluación de datos obtenidos de fuentes secundarias, con el fin de asegurar un respaldo sustancial del conocimiento para explorar y sustentar la información obtenida y el desarrollo de las principales teorías. A partir de la investigación realizada, se identificó que los fenómenos cuánticos tienen un impacto significativo en diversas tecnologías emergentes, desde los dispositivos electrónicos modernos utilizados en los sistemas de comunicación hasta los equipos utilizados para el diagnóstico médico. Esto, a su vez, permitió comprender que profundizar en el conocimiento sobre dichos fenómenos es esencial para el desarrollo tecnológico y científico futuro. Esta investigación concluye que fenómenos como la dualidad onda-partícula, la superposición, el efecto túnel cuántico, la decoherencia y el principio de incertidumbre de Heisenberg tienen presuposiciones profundas que influyen no sólo en cómo los científicos entienden la naturaleza fundamental de la realidad, sino que también impulsan importantes innovaciones tecnológicas.

**Palabras clave:** Física Cuántica. Superposición. Decoherencia. Efecto Túnel Cuántico. Dualidad Onda-Partícula.

## I. INTRODUÇÃO

No domínio da Física Quântica, conceitos tradicionais estabelecidos na Física Clássica são desafiados, e novas formas de compreensão da realidade são continuamente exploradas. Fenômenos como a dualidade onda-partícula ilustram essa complexidade ao indicar que partículas fundamentais, como fótons ou elétrons, manifestam-se ora como partículas discretas, ora como ondas contínuas, dependendo do tipo de observação realizada.

Outro fenômeno essencial da Física Quântica é a superposição, que sugere que um sistema quântico pode existir em múltiplos estados simultaneamente até o momento da medição. Tal propriedade é responsável por alguns dos paradoxos mais conhecidos desse campo, destacando o caráter não-intuitivo dessa teoria. Esse conceito é diretamente relacionado ao princípio da incerteza de Heisenberg, que estabelece a impossibilidade fundamental de determinar simultaneamente, com precisão absoluta, certas grandezas complementares de uma partícula, como posição e momento. O reconhecimento dessa incerteza não decorre de limitações tecnológicas ou metodológicas, mas de uma característica intrínseca da natureza.

Um outro fenômeno quântico notável, o tunelamento quântico, evidencia a capacidade das partículas atravessarem barreiras energéticas aparentemente insuperáveis segundo a Física Clássica. Essa propriedade é a base para tecnologias sofisticadas como microscópios de

tunelamento quântico e dispositivos semicondutores utilizados amplamente na eletrônica contemporânea.

No contexto quântico, o fenômeno de decoerência, também referido como enrolamento e desenrolamento quântico, é responsável por explicar a transição entre o comportamento quântico, evidente em escalas microscópicas, e a realidade clássica, observada em escalas macroscópicas. A decoerência fornece um entendimento mais profundo sobre como o universo quântico aparentemente paradoxal torna-se coerente com as percepções cotidianas.

Além de desafiar concepções prévias sobre o funcionamento do universo, a compreensão dos fenômenos quânticos tem impulsionado uma ampla gama de inovações tecnológicas. Tecnologias quânticas emergentes, como computadores quânticos, criptografia quântica e sensores extremamente precisos, prometem revolucionar diversas áreas do conhecimento humano, desde a informática até a medicina. Dessa forma, a investigação contínua dos mistérios do mundo quântico não apenas expande as fronteiras da Física teórica, mas também proporciona avanços tecnológicos significativos, contribuindo para um entendimento mais abrangente e completo da realidade física em todos os níveis.

Explorar os mistérios do mundo quântico, analisando fenômenos fundamentais que definem a física quântica, constitui o objetivo principal desta pesquisa. Dessa forma, será realizada uma investigação com o intuito de contribuir para o meio acadêmico, bem como fornecer bases adicionais para futuros estudos. Para alcançar este propósito principal e demonstrar um entendimento aprofundado sobre o tema, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

Analisar a dualidade onda-partícula e suas implicações na compreensão da natureza quântica da matéria;

Discutir o fenômeno da superposição e seu papel na interpretação do comportamento dos sistemas quânticos;

Avaliar o tunelamento quântico e suas aplicações tecnológicas atuais;

Investigar o processo de decoerência e sua importância na transição entre os mundos quântico e clássico;

Examinar o princípio da incerteza de Heisenberg e suas consequências filosóficas e científicas.

Com o intuito de cumprir as metas definidas e abordar os aspectos fundamentais, o problema de pesquisa foi delineado da seguinte maneira: Como os fenômenos fundamentais da

Física Quântica contribuem para o entendimento da realidade e influenciam o desenvolvimento de tecnologias inovadoras?

A relevância desta pesquisa se dá porque o entendimento aprofundado dos fenômenos quânticos é crucial para avanços significativos em diversas áreas do conhecimento, como Física, engenharia, computação e até mesmo filosofia, influenciando diretamente a academia, a sociedade e a indústria. Além disso, embora a Física Quântica seja amplamente estudada, ainda persistem lacunas importantes na compreensão plena dos processos de decoerência e na aplicação prática dos princípios quânticos em escalas maiores, algo que esta pesquisa busca abordar diretamente. Este estudo também explorará possíveis aplicações práticas, como na computação quântica e criptografia quântica, e discutirá implicações sociais decorrentes da disseminação de tecnologias quânticas, proporcionando uma base sólida para investigações futuras.

Nesta pesquisa, foi adotada uma revisão narrativa da literatura como metodologia, que incluiu uma análise minuciosa de textos relacionados ao tema. As informações foram obtidas por meio de consultas a renomadas bases de dados acadêmicas, como Scielo, Capes e Google Acadêmico, além de livros e periódicos científicos de relevância. Conforme Dourado e Ribeiro (2023), essa abordagem de revisão de literatura oferece uma base sólida e confiável de dados, ao agregar informações de diversas obras selecionadas, ajudando na identificação de lacunas nas pesquisas anteriores.

4

Para compilar a bibliografia, realizou-se uma análise crítica das obras, juntamente com a leitura cuidadosa dos resumos de cada documento. A seleção temporal dos materiais priorizou os últimos cinco anos, com exceções para estudos clássicos. Esse processo assegurou uma compreensão ampla e atualizada sobre o tema, estabelecendo uma base sólida para os resultados da pesquisa e enriquecendo o corpo de conhecimento científico relacionado ao assunto. Com a conclusão da pesquisa e o êxito na resolução do problema, foi compilada uma bibliografia abrangente.

## 2. FÍSICA QUÂNTICA E DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA

A Física Quântica representa um dos marcos fundamentais da ciência moderna. Ela surgiu no início do século XX como resposta à necessidade de explicar fenômenos que escapavam das descrições clássicas da Física. Este campo inovador trouxe à tona conceitos revolucionários que reformularam profundamente o entendimento humano sobre a matéria e a

energia, oferecendo uma nova abordagem sobre a estrutura da realidade física (Martins, *et al.*, 2021).

Diferente da Física Clássica, que trata os fenômenos naturais de maneira determinística, a Física Quântica introduz a probabilidade e a incerteza como elementos centrais. Segundo essa perspectiva, não é possível prever com exatidão absoluta o comportamento de sistemas microscópicos, apenas estimar probabilidades (Custodio, 2021).

Um dos conceitos mais fundamentais é a dualidade onda-partícula. Essa ideia afirma que partículas como elétrons e fótons exibem comportamentos de partículas e de ondas, dependendo do tipo de observação. A dualidade foi inicialmente sugerida pelos experimentos de Thomas Young, com a famosa experiência da fenda dupla, no início do século XIX. Essa experiência revelou padrões de interferência típicos de ondas, mesmo quando partículas eram lançadas uma a uma (Carvalho, *et al.*, 2023).

Esses resultados confrontaram diretamente a Física tradicional, que via matéria e radiação como entidades separadas. Ficou evidente a necessidade de repensar os fundamentos da Física. Posteriormente, Louis de Broglie propôs que toda partícula material teria uma onda associada, cuja extensão depende do seu momento (Carvalho, *et al.*, 2023).

Essa hipótese foi confirmada por experimentos realizados por Davisson e Germer, que observaram a difração de elétrons. Eles comprovaram que, sob certas condições, a matéria pode se comportar como uma onda. Isso consolidou a noção de que partículas não têm apenas posição e movimento definidos, mas são descritas por funções de onda que indicam a probabilidade de localização (Pires, 2024).

Além da Física experimental, a dualidade onda-partícula provocou mudanças filosóficas importantes. Na Física Clássica, as propriedades físicas existem de forma objetiva, independentemente da observação. Já na Física Quântica, o ato de observar influencia o comportamento do sistema, sugerindo uma interação essencial entre o observador e o observado (Carvalho, *et al.*, 2023).

Nesse sentido, a dualidade onda-partícula evidencia uma característica central da mecânica quântica: a existência de correlações não locais entre partículas e seus sistemas de medição. Tal fenômeno pode ser descrito da seguinte maneira:

Quando adaptada a um estudo sobre a dualidade onda-partícula do elétron e de outras partículas elementares como um fóton, comprova-se que há uma correlação não local entre essa 'partícula-onda' e um detector. Essa correlação é criada quando esses elementos estão juntos e se mantêm mesmo se forem separados a grandes distâncias. Desse modo, não se pode lidar com as partes separadas, mas com um sistema único, pois o que acontece a um deles pode interferir no outro (Neto, 2023, p. 11).

Essa concepção reforça a ideia de que, no domínio quântico, os sistemas não podem ser entendidos de forma fragmentada, mas sim como totalidades interligadas, cuja descrição depende da interação e da relação entre suas partes. Tal mudança de perspectiva desafia a noção tradicional de objetividade absoluta. Indica que a realidade física pode depender do contexto e do tipo de medição realizada. Esse aspecto ainda levanta debates e reflexões entre físicos e filósofos da ciência (Carvalho, *et al.*, 2023).

Os conhecimentos derivados da dualidade e da Física Quântica, como um todo, ampliaram consideravelmente a compreensão do comportamento da matéria em níveis subatômicos. Além disso, abriram caminho para avanços tecnológicos notáveis. Entre eles, destacam-se a computação quântica, a criptografia baseada em princípios quânticos e novas técnicas de imagem com precisão atômica (Santos; Silva, 2022).

Dessa forma, a Física Quântica e o conceito de dualidade permanecem como temas centrais na ciência contemporânea. Eles continuam inspirando pesquisas, teorias e aplicações que ultrapassam os limites do que antes era considerado possível.

### 3. SUPERPOSIÇÃO E PRINCÍPIO DA INCERTEZA DE HEISENBERG

A superposição é um dos pilares mais intrigantes da Física Quântica. Esse princípio afirma que uma partícula quântica pode existir, simultaneamente, em múltiplos estados distintos até que uma medição seja realizada. Em outras palavras, o sistema permanece em uma combinação de possibilidades, sendo apenas colapsado para um estado definido no momento da observação. Essa característica desafiadora contrasta fortemente com a lógica clássica, onde se assume que os sistemas estão sempre em estados definidos e observáveis (Souza, *et al.*, 2024).

Um exemplo amplamente utilizado para ilustrar a superposição é o experimento mental do “gato de Schrödinger”. Nessa experiência teórica, um gato é colocado em uma caixa selada com um mecanismo quântico que pode ou não matá-lo, dependendo da decomposição de um átomo radioativo. De acordo com a interpretação da superposição, o gato estaria simultaneamente vivo e morto até que alguém abra a caixa e observasse o sistema. Apesar de ser uma analogia, essa ideia serve para ilustrar os paradoxos e os desafios conceituais trazidos pelo comportamento quântico (Melo; Simões, 2024).

A superposição é também a base do funcionamento dos computadores quânticos. Neles, os bits tradicionais são substituídos por qubits, que podem representar 0, 1 ou ambos ao mesmo tempo. Isso permite que múltiplas operações sejam realizadas em paralelo, o que aumenta exponencialmente a capacidade de processamento para certos tipos de problemas (Neto, 2023).

A existência de estados sobrepostos em sistemas quânticos foi confirmada por diversos experimentos, incluindo testes com interferômetros, armadilhas de íons e estados de coerência em circuitos supercondutores. Esses experimentos demonstram que, em níveis microscópicos, a natureza se comporta de maneira contraintuitiva e não-determinista, desafiando a visão clássica de causalidade direta e previsibilidade (Rocha, 2021).

Outro conceito central na Física Quântica é o princípio da incerteza de Heisenberg. Esse princípio estabelece que é impossível determinar simultaneamente, com precisão absoluta, certas grandezas físicas complementares de uma partícula, como sua posição e seu momento linear. Quanto mais precisamente se conhece uma dessas propriedades, menos se sabe sobre a outra. Essa limitação não é resultado de imperfeições nos instrumentos de medição, mas sim uma característica intrínseca da natureza quântica (Silva; Barros, 2021).

O princípio da incerteza não apenas redefine a forma como se observa o mundo microscópico, mas também tem implicações filosóficas profundas. Ele sugere que existe um limite fundamental ao conhecimento sobre a realidade, independentemente da sofisticação dos métodos científicos utilizados. Assim, a natureza quântica introduz uma fronteira epistemológica que contrasta com a idealização clássica de conhecimento total e exato (Bueno, 2023).

7

Além disso, a incerteza desempenha um papel essencial na estabilidade do átomo. Sem essa limitação, os elétrons colapsariam em direção ao núcleo, tornando a existência da matéria como a conhecemos inviável. Portanto, essa aparente limitação se revela também como uma garantia da estrutura estável da matéria e do universo físico (Oliveira, 2021).

A combinação entre superposição e incerteza revela o caráter probabilístico e indeterminado da Física Quântica. Esses dois princípios, entrelaçados, moldam a base teórica que sustenta os avanços recentes em tecnologias emergentes, desde sensores ultraprecisos até algoritmos de segurança em criptografia quântica. Ao mesmo tempo, continuam instigando questões fundamentais sobre a natureza da realidade, o papel da consciência e os limites da compreensão humana (Souza, *et al.*, 2024).

Em conclusão, os conceitos de superposição e incerteza compõem o núcleo da Física Quântica Moderna. Eles não apenas oferecem explicações para fenômenos antes inexplicáveis, como também impulsionam a inovação tecnológica e desafiam a visão tradicional do universo. Sua investigação contínua é essencial para aprofundar o entendimento sobre o mundo quântico e ampliar suas aplicações no cotidiano humano.

#### 4. TUNELAMENTO QUÂNTICO

O tunelamento quântico não é apenas um conceito teórico, mas possui aplicações práticas bem estabelecidas. Uma das primeiras aplicações foi observada em dispositivos semicondutores, especialmente nos diodos de tunelamento, que operam com base nesse efeito. Além disso, a microscopia de tunelamento por varredura (STM, na sigla em inglês) utiliza esse princípio para obter imagens em escala atômica. Nesse tipo de equipamento, uma agulha extremamente fina é posicionada muito próxima da superfície de um material, permitindo que elétrons tunelizem entre a amostra e a ponta, revelando a estrutura atômica com grande precisão.

Outro campo onde o tunelamento tem relevância crucial é na física nuclear. A fusão de núcleos leves, processo que alimenta o Sol e outras estrelas, também depende desse fenômeno. Mesmo que as cargas positivas dos núcleos deveriam se repelir fortemente, o tunelamento permite que eles se aproximem o suficiente para que a força nuclear forte entre em ação e cause a fusão. Sem o tunelamento quântico, as temperaturas exigidas para iniciar reações nucleares no interior das estrelas seriam muito mais elevadas do que as observadas, tornando o universo como o conhecemos inviável (Nahas; Imd, 2021).

Além disso, o tunelamento está presente em processos de decaimento radioativo, como no caso do decaimento alfa. Nessa situação, uma partícula alfa presa no núcleo atômico atravessa uma barreira de potencial, escapando do núcleo sem energia suficiente para romper essa barreira de forma clássica. Esse comportamento reforça a natureza probabilística da física quântica e demonstra que partículas podem apresentar comportamentos inesperados sob determinadas condições (Campos, *et al.*, 2023).

Apesar de suas aplicações e confirmações experimentais, o tunelamento quântico ainda levanta discussões teóricas importantes. A ideia de que uma partícula possa estar simultaneamente em dois lados de uma barreira desafia a lógica clássica de causa e efeito. Esses debates continuam sendo explorados em pesquisas que buscam compreender os limites entre o comportamento quântico e o mundo macroscópico (Fernandes, *et al.*, 2024).

O estudo do tunelamento também tem implicações em áreas emergentes, como a computação quântica. Em certos tipos de qubits, o tunelamento pode ser explorado para acelerar transições de estado, otimizando a performance de algoritmos quânticos. Por isso, compreender esse fenômeno é essencial para o avanço de tecnologias de ponta (Araújo, *et al.*, 2025).

Portanto, o tunelamento quântico exemplifica de forma notável como a física quântica rompe com as expectativas intuitivas da experiência cotidiana. Sua existência e aplicabilidade reforçam o papel essencial das leis quânticas na estrutura da realidade, mostrando que, mesmo diante de barreiras aparentemente intransponíveis, a natureza possui caminhos invisíveis que só se revelam em escalas microscópicas.

## 5. DECOERÊNCIA (ENROLAMENTO E DESENROLAMENTO) E A TRANSIÇÃO PARA O MUNDO MACROSCÓPICO

A decoerência quântica é um dos conceitos mais relevantes e, ao mesmo tempo, mais desafiadores da física contemporânea. Ela representa o processo pelo qual um sistema quântico perde suas propriedades características, como a superposição e o emaranhamento, ao interagir com o ambiente externo. Por meio desse fenômeno, torna-se possível compreender por que os efeitos puramente quânticos não são observados no mundo cotidiano, caracterizado por objetos macroscópicos com comportamentos bem definidos (Velásquez-Toribio, 2022).

Na mecânica quântica, um sistema pode existir em uma sobreposição de estados, com diferentes possibilidades coexistindo até o momento da medição. No entanto, na prática, observa-se que sistemas mais complexos ou em interação com o ambiente colapsam rapidamente para um estado clássico. A decoerência é o mecanismo responsável por esse colapso aparente, não sendo fruto de uma intervenção externa consciente, mas sim de um acoplamento incontrolável com os inúmeros graus de liberdade do meio ao redor (Leite, 2024).

Esse processo ocorre de forma extremamente rápida e contínua, fazendo com que as fases relativas entre os estados sobrepostos se percam. Em outras palavras, as interferências que caracterizam os sistemas quânticos deixam de ser observadas, e o sistema passa a apresentar apenas um dos possíveis estados, tal como previsto pela Física Clássica. A decoerência não elimina os outros estados possíveis, mas os torna inacessíveis à observação, pois suas contribuições interferenciais se cancelam devido à perda de coerência (Souza, 2022).

O estudo da decoerência tornou-se crucial para a compreensão da fronteira entre o mundo quântico e o macroscópico. Sistemas quânticos isolados, como átomos ou fótons, podem manter a coerência por períodos significativos, permitindo a observação de fenômenos como o entrelaçamento e a interferência. Entretanto, em sistemas compostos por muitos corpos ou em temperaturas elevadas, a decoerência atua de maneira quase instantânea, tornando os efeitos quânticos imperceptíveis (Pinto, 2023).

Uma das analogias frequentemente utilizadas para explicar a decoerência é a do “enrolamento e desenrolamento” das fases quânticas. Em um sistema coerente, as fases dos estados mantêm um alinhamento ordenado, permitindo a formação de padrões de interferência. Quando o sistema interage com o ambiente, esse alinhamento se desorganiza, como se os fios de um novelo se desenrolassem e se entrelaçassem de maneira desordenada. A perda de coerência é, assim, equivalente ao desaparecimento da estrutura ordenada que sustenta os efeitos quânticos observáveis (Nahas; Imd, 2021).

Esse fenômeno tem implicações diretas no desenvolvimento de tecnologias quânticas. Em computadores quânticos, por exemplo, a manutenção da coerência dos qubits é essencial para a realização de cálculos com alta eficiência. A decoerência representa uma das principais barreiras para a escalabilidade desses sistemas, pois qualquer interação não controlada com o ambiente pode comprometer o resultado dos algoritmos. Por isso, grande parte da pesquisa em computação quântica é dedicada ao isolamento dos qubits e à correção de erros causados pela perda de coerência (Pinto, 2023).

Além da computação, a decoerência também é estudada em experimentos de óptica quântica, interferometria e emaranhamento. Esses estudos buscam identificar os mecanismos e as condições que favorecem a preservação da coerência, bem como estratégias para retardar ou até reverter os efeitos da interação com o ambiente. Em algumas abordagens, propõe-se o uso de estados protegidos topologicamente ou o controle dinâmico do sistema para mitigar os efeitos da decoerência (Delgado, 2023).

10

No campo da filosofia da ciência, a decoerência tem sido utilizada como uma ponte interpretativa para o colapso da função de onda, um dos principais enigmas da mecânica quântica. Ainda que a decoerência por si só não resolva completamente o problema da medição, ela fornece uma explicação mecanicista para o desaparecimento das superposições em escalas maiores. Isso permite uma transição natural entre a descrição probabilística da física quântica e a aparência determinista do mundo clássico (Velásquez-Toribio, 2022).

Dessa forma, a decoerência desempenha um papel fundamental na estrutura da realidade física. Ela explica por que os fenômenos quânticos são raramente observados no cotidiano, apesar de regirem o comportamento de todas as partículas fundamentais. Ao mesmo tempo, evidencia os desafios práticos enfrentados no desenvolvimento de tecnologias baseadas em princípios quânticos. Compreender e controlar esse processo é, portanto, uma das chaves para a próxima revolução científica e tecnológica, conectando os domínios microscópico e macroscópico de forma cada vez mais precisa e eficaz (Nahas; Imd, 2021).

## 6. IMPORTÂNCIA E APLICAÇÕES DA FÍSICA QUÂNTICA: AVANÇOS TECNOLÓGICOS E COMPREENSÃO DA REALIDADE

A física quântica não apenas reformulou os fundamentos teóricos da ciência, como também impulsionou uma série de inovações tecnológicas que hoje fazem parte do cotidiano e moldam o futuro da humanidade. Sua importância vai muito além do campo acadêmico, estendendo-se a aplicações práticas que abrangem desde dispositivos eletrônicos modernos até sistemas de comunicação avançados e técnicas de diagnóstico médico. Além disso, a Física Quântica oferece ferramentas conceituais que desafiam e enriquecem a compreensão da realidade em múltiplas escalas (Martins, *et al.*, 2021).

No campo tecnológico, uma das áreas mais impactadas é a da computação. Os computadores quânticos, ainda em fase de desenvolvimento, prometem revolucionar a forma como se lida com grandes volumes de dados e problemas computacionais complexos. Utilizando qubits em vez de bits clássicos, esses dispositivos podem processar múltiplas informações simultaneamente, graças à superposição e ao entrelaçamento quântico. Tarefas que exigiriam milhares de anos de processamento em supercomputadores clássicos poderão ser resolvidas em tempo viável por máquinas quânticas, o que representa um marco para áreas como criptografia, modelagem molecular, otimização e inteligência artificial (Campos, *et al.*, 2023).

11

Outro campo relevante é o da criptografia quântica. Os princípios da mecânica quântica, como o entrelaçamento e o princípio da incerteza, permitem a criação de sistemas de comunicação absolutamente seguros. A criptografia quântica garante que qualquer tentativa de interceptação ou espionagem de um canal de comunicação modifique automaticamente o estado das partículas envolvidas, revelando a presença de um intruso. Essa propriedade abre caminho para uma nova era de segurança na transmissão de dados, particularmente importante em tempos de ameaças cibernéticas crescentes (Araújo, *et al.*, 2025).

Na medicina, a Física Quântica também tem exercido um papel significativo. Equipamentos como os aparelhos de Ressonância Magnética Nuclear (RMN) e Tomografias por Emissão de Pósitrons (PET) são baseados em princípios quânticos. Essas tecnologias permitem diagnósticos mais precisos e menos invasivos, aumentando a eficácia dos tratamentos e a qualidade de vida dos pacientes. Além disso, pesquisas em biofísica quântica têm explorado a influência de fenômenos quânticos em processos biológicos, como a fotossíntese e a percepção olfativa, abrindo novas fronteiras na compreensão da vida (Neto, 2023).

A nanotecnologia é outro exemplo de área diretamente dependente dos fundamentos quânticos. O comportamento das partículas em escalas nanométricas não pode ser descrito

adequadamente pelas leis da física clássica. Assim, o controle e a manipulação de átomos e moléculas em escala quântica têm possibilitado o desenvolvimento de novos materiais, medicamentos, sensores e dispositivos eletrônicos com propriedades únicas e desempenho superior.

No âmbito mais teórico, a Física Quântica continua desafiando a noção de realidade objetiva e determinista. Os fenômenos de superposição, emaranhamento e decoerência questionam a independência entre o observador e o observado, sugerindo uma interconexão profunda entre consciência e matéria. Esse aspecto filosófico da teoria tem implicações significativas para áreas como a epistemologia, a metafísica e até mesmo a psicologia, instigando debates sobre a natureza da existência, do tempo e da causalidade (Martins, *et al.*, 2021).

Além disso, a Física Quântica tem influenciado áreas do conhecimento aparentemente distantes, como a economia, a teoria da informação e a sociologia. Modelos inspirados no comportamento probabilístico e não determinista dos sistemas quânticos têm sido utilizados para explicar flutuações de mercado, processos de tomada de decisão e padrões sociais complexos. Essa interdisciplinaridade reforça a abrangência e a relevância da teoria quântica para além das ciências naturais (Campos, *et al.*, 2023).

O impacto da Física Quântica no mundo macroscópico também se manifesta na concepção de novas tecnologias de sensores. Sensores quânticos, capazes de medir variações extremamente sutis em campos gravitacionais, magnéticos e elétricos, têm sido aplicados em áreas como a geofísica, a astronomia e a engenharia civil. Esses dispositivos ampliam a capacidade de observação do universo e da Terra, contribuindo para avanços em monitoramento ambiental, exploração espacial e previsão de desastres naturais (Araújo, *et al.*, 2025).

Por fim, a Física Quântica oferece uma nova perspectiva sobre a unificação das forças fundamentais da natureza. Pesquisas em teoria das cordas, gravitação quântica e física de partículas buscam integrar os princípios quânticos com a relatividade geral, na tentativa de formular uma teoria unificada que descreva todos os fenômenos do universo. Esse objetivo representa um dos maiores desafios científicos do século XXI e poderá, no futuro, revelar novas leis naturais ainda desconhecidas (Neto, 2023).

## 7. INTERPRETAÇÕES DA MECÂNICA QUÂNTICA: REFLEXÕES SOBRE O SIGNIFICADO DA REALIDADE

Apesar de seu sucesso experimental e da solidez matemática, a mecânica quântica permanece cercada de debates conceituais, especialmente no que se refere à interpretação de

seus princípios fundamentais. Diferentemente das teorias clássicas, cujos elementos possuem correspondência direta com entidades físicas mensuráveis, a mecânica quântica apresenta uma estrutura formal cuja ligação com a realidade empírica é menos evidente. Isso levou ao surgimento de diversas interpretações filosóficas que tentam responder à pergunta: o que, de fato, a mecânica quântica nos diz sobre o mundo? (Velásquez-Toribio, 2022).

A interpretação mais tradicional é a de Copenhague, proposta principalmente por Niels Bohr e Werner Heisenberg. De acordo com essa visão, a função de onda representa apenas o conhecimento que se tem sobre o sistema e não uma realidade objetiva. A medição é considerada um processo especial que interrompe a evolução da função de onda, colapsando-a em um único estado observável. Essa interpretação coloca o observador em uma posição central, sugerindo que a realidade só adquire propriedades definidas no momento da observação (Leite, 2024).

Em contraponto, a interpretação de Muitos Mundos, defendida inicialmente por Hugh Everett III, rejeita o colapso da função de onda. Em vez disso, propõe que todas as possibilidades previstas pela função de onda se realizam em universos paralelos que coexistem. Cada vez que uma medição ocorre, o universo se ramifica, gerando múltiplas realidades independentes. Embora essa proposta resolva o problema do colapso, ela levanta questões sobre a testabilidade empírica e a ontologia dessas múltiplas realidades (Melo; Simões, 2024).

13

Outra alternativa é a teoria de De Broglie-Bohm, também chamada de interpretação de variáveis ocultas ou teoria piloto. Nessa abordagem, partículas possuem posições bem definidas, guiadas por uma onda piloto que evolui segundo a equação de Schrödinger. Essa interpretação restaura uma forma de determinismo ao mundo quântico, embora exija a aceitação de não-localidade, ou seja, a possibilidade de que eventos distantes influenciem-se instantaneamente (Bueno, 2023).

O emaranhamento quântico é, nesse contexto, um dos aspectos mais intrigantes e fundamentais da teoria. Schrödinger destacou sua importância ao afirmar:

Quando dois sistemas – dos quais sabemos os estados por seus respectivos representantes – entrarem em interação física temporária devido a forças conhecidas entre eles e quando, depois de um tempo de influência mútua, os sistemas se separarem novamente, eles não podem mais ser descritos da mesma maneira. Eu não chamaria isso de um, mas de o traço característico da mecânica quântica: aquele que reforça sua inteira saída das linhas clássicas de pensamento. Pela interação, os dois representantes se emaranham (Schrödinger, 1935, p. 55).

Há ainda interpretações baseadas na teoria da informação quântica, que consideram a função de onda como uma ferramenta matemática para codificar e manipular informações sobre sistemas físicos. Nesse contexto, a realidade não é algo objetivo a ser descrito, mas uma

estrutura que emerge da relação entre o sistema e o observador. Essa abordagem tem ganhado destaque, especialmente no desenvolvimento de tecnologias quânticas e no debate sobre os limites do conhecimento científico (Carvalho, *et al.*, 2023).

Todas essas interpretações partem dos mesmos princípios matemáticos, mas propõem leituras distintas sobre o que está ocorrendo fisicamente. Essa diversidade reflete não apenas incertezas epistemológicas, mas também a profundidade com que a mecânica quântica desafia as intuições humanas sobre causalidade, tempo, espaço e existência (Velásquez-Toribio, 2022).

A pluralidade de interpretações não é um sinal de fragilidade da teoria, mas sim de sua complexidade e riqueza. Ela revela que, mais do que uma simples ferramenta de cálculo, a mecânica quântica é uma janela para dimensões mais profundas da realidade, ainda em processo de compreensão. Refletir sobre essas interpretações é essencial não apenas para físicos teóricos, mas também para filósofos, cientistas cognitivos e todos aqueles que buscam entender os fundamentos últimos do universo (Bueno, 2023).

Em última análise, o estudo das interpretações da mecânica quântica oferece não apenas alternativas explicativas, mas também uma oportunidade de reconsiderar os limites entre o real, o observável e o concebível. Em um cenário onde a ciência se entrelaça com a filosofia, pensar o significado da física quântica é também pensar o lugar do ser humano no cosmos (Melo; Simões, 2024).

## 8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o objetivo de alcançar os resultados esperados, esta análise buscou esclarecer o tema em investigação relacionado aos mistérios do mundo quântico, utilizando uma pesquisa bibliográfica minuciosa e criteriosa. As obras selecionadas ofereceram uma visão abrangente sobre o assunto e possibilitaram uma avaliação aprofundada das evidências obtidas.

Ao final do estudo, constatou-se que fenômenos como a dualidade onda-partícula, a superposição, o tunelamento quântico, a decoerência e o princípio da incerteza de Heisenberg possuem implicações profundas, influenciando não apenas a maneira como os cientistas compreendem a natureza fundamental da realidade, mas também impulsionando importantes inovações tecnológicas.

A dualidade onda-partícula desafia conceitos clássicos ao revelar que partículas podem se comportar como ondas e partículas simultaneamente, dependendo do contexto experimental. A superposição amplia essa complexidade ao mostrar que estados múltiplos podem coexistir, oferecendo a base conceitual para tecnologias como a computação quântica. O tunelamento

quântico demonstrou ter aplicações práticas significativas na eletrônica moderna, especialmente em componentes semicondutores.

A decoerência, por sua vez, esclarece a transição entre o universo quântico microscópico e o mundo clássico cotidiano. Por fim, o princípio da incerteza de Heisenberg sublinha as limitações intrínsecas à medição simultânea de determinadas grandezas físicas, impactando profundamente a epistemologia da Física. Dessa forma, esses fenômenos confirmam a suposição inicial de que compreender e explorar esses aspectos da Física Quântica é crucial tanto para o progresso científico fundamental quanto para o avanço tecnológico contemporâneo.

Entretanto, é importante destacar que são necessárias investigações adicionais para aprimorar o entendimento existente e expandir o debate sobre o tema, especialmente em relação à aplicação prática desses fenômenos no mundo macroscópico e na resolução das questões fundamentais ainda em aberto no campo da Física Quântica.

## REFERÊNCIAS

ARAÚJO, Gilmar da Silva; et al. Além do horizonte digital: o fascínio da computação quântica. Revista ARACÊ, v. 7, n. 2, p. 8015-8030, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.56238/arev7n2-202>. Acesso em: 10 dezembro 2025.

BUENO, Sinésio Ferraz. De Heisenberg a Hegel: reflexões metafísicas sobre a física quântica. Griot: Revista de Filosofia, v. 23, n. 2, p. 35-53, 2023. Disponível em: <https://www3.ufrb.edu.br/index.php/griot/article/view/3234>. Acesso em: 07 janeiro 2025.

CAMPOS, Rodrigo, et al. Evidenciando as Diferenças e Benesses do uso do Quantum em Relação ao Sistema Binário. Revista Brasileira em Tecnologia da Informação, v. 5, n. 1, p. 19-34, 2023. Disponível em: <https://www.fateccampinas.com.br/rbti/index.php/fatec/article/view/48>. Acesso em: 09 janeiro 2025.

CARVALHO, Alexandre Tadeu Gomes de; et al. A linguagem, a epistemologia e o ensino conceitual da dualidade onda-partícula. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 45, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2022-0339>. Acesso em: 15 dezembro 2025.

CUSTODIO, Rogério. Mecânica Quântica: conceitos e desenvolvimentos iniciais. Revista Chemkeys, v. 3, p. e021001-e021001, 2021. Disponível em: <https://econtents.bc.unicamp.br/inpec/index.php/chemkeys/article/view/15466>. Acesso em: 10 dezembro 2025.

DELGADO, Paola Carolina Moreira. Introdução à cosmologia quântica. Cadernos de Astronomia, v. 4, n. 2, p. 98-III, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v4n2.41563>. Acesso em: 07 dezembro 2025.

DOURADO, Simone; RIBEIRO, Ednaldo. Metodologia qualitativa e quantitativa. p. 12, 2023.

FERNANDES, Ellen Martins; et al. Efeitos da Inicialização na Formação de Emaranhamento Quântico em Qubits de Carga. 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/45021>. Acesso em: 09 janeiro 2025.

LEITE, Lucas Bezerra de Oliveira. A medição na Mecânica Quântica. 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/77254>. Acesso em: 14 dezembro 2025.

MARTINS, Paulo Djalma; et al. Importância da Física Quântica para despertar o interesse pela Ciência. Research, Society and Development, v. 10, n. 16, p. e414101624105-e414101624105, 2021. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/24105>. Acesso em: 12 dezembro 2025.

MELO, Maxwell DB de; SIMÕES, Eduardo. O antirrealismo ortodoxo na aurora da mecânica quântica. Revista Desafios, v. 11, n. 3, 2024. Disponível em: [https://www.academia.edu/download/113649007/O\\_Antirrealismo\\_Ortodoxo\\_na\\_Aurora\\_da\\_Mecanica\\_Quantica.pdf](https://www.academia.edu/download/113649007/O_Antirrealismo_Ortodoxo_na_Aurora_da_Mecanica_Quantica.pdf). Acesso em: 07 janeiro 2025.

NAHAS, Antonio Ricardo; IMD, Dnm E. Ph. Biologia Quântica. Clube de Autores, 2021.

NETO, Manoel Ferreira Borges. Informação Quântica. Curitiba: Editora Appris, 2023.

OLIVEIRA, Abmael Rodrigues de. Princípio da incerteza estendido a partir de primeiros princípios. 2021. Disponível em: <https://repositorio.unilab.edu.br/jspui/handle/123456789/3607>. Acesso em: 13 janeiro 2025.

PINTO, Douglas Franco. Emaranhamento, medidas quânticas gerais e instrumentos quânticos. 2023. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/28056>. Acesso em: 10 dezembro 2025.

PIRES, Catarina Teslenko Cristineli Castro. Explorando o conceito de ondas em vários contextos: ondas eletromagnéticas, dualidade onda-partícula, ondas gravitacionais. 2024. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/33a98b0c-ea89-4a93-a379-7fdd41fied8d>. Acesso em: 22 dezembro 2025.

ROCHA, Luiz Célio Souza. Apresentação: o risco da incerteza. Recital – Revista de Educação, Ciência e Tecnologia de Almenara/MG, v. 3, n. 2, p. 8-12, 2021. Disponível em: <https://recital.almenara.ifnmg.edu.br/recital/article/download/250/84>. Acesso em: 17 dezembro 2025.

SANTOS, Giovanna Ferreira dos; SILVA, Oberlan. O uso de simuladores no ensino de física: explorando a dualidade onda-partícula. 2022. Disponível em: <https://repositorio.ifpe.edu.br/xmlui/handle/123456789/594>. Acesso em: 27 dezembro 2025.

SCHRÖDINGER, Erwin. Discussion of probability relations between separated systems. Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, Cambridge, v. 31, p. 555-563, 1935.

SILVA, Henrique César da; BARROS, Mayara de Almeida. O princípio da incerteza de Heisenberg pelo texto teatral Copenhagen. *Ciência & Educação* (Bauru), v. 27, p. e21005, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1516-731320210005>. Acesso em: 15 janeiro 2025.

SOUZA, André Tanus Cesário de. Medida de complexidade estatística quântica. 2022. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1843/51921>. Acesso em: 03 janeiro 2025.

SOUZA, Rafaelle da Silva; REIS, Gabriel Adriano de Jesus; HORA, Gustavo Mota Bispo da. O estado da arte das pesquisas relacionadas à divulgação científica sobre a Física Quântica entre os anos 2010 e 2022. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 46, p. e20240052, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2024-0052>. Acesso em: 10 dezembro 2025.

VELÁSQUEZ-TORIBIO, Alan M. Teoria da medida, decoerência e a interpretação de Montevideu da mecânica quântica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 44, p. e20210384, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2021-0384>. Acesso em: 07 janeiro 2025.