

O ATO DA MEDIÇÃO EM ESCALA QUÂNTICA NO ENSINO DE FÍSICA

THE ACT OF MEASUREMENT AT THE QUANTUM SCALE IN PHYSICS EDUCATION

HARA DESSANO MENEZES  ^{*1}, AISSA LIMA DE AZEVEDO  ^{†2}

¹Universidade de Brasília - UnB

²Instituto Federal de Brasília - IFB

Resumo

Comumente, os livros didáticos de Física do Ensino Médio se limitam a discutir o ato de medida apenas em escala macroscópica (Física Clássica), enquanto que uma medida realizada em escala microscópica (Física Quântica) se dá de forma totalmente diferente. Diferença esta devido a natureza probabilística e indeterminista que é intrínseca à Mecânica Quântica, totalmente oposta à natureza exata e determinista da Física Clássica. O presente trabalho tem como objetivo ampliar a noção a respeito de uma medida e distinguir consequências de medida clássica e quântica. Além de viabilizar a abordagem do tema no componente curricular Física, no Ensino Médio, lançando mão do Tabuleiro de Galton como exemplificação a fim de facilitar a apreensão do tópico.

Palavras-chave: Sobreposição de estados. Medida quântica. Tabuleiro de Galton.

Abstract

Commonly, high school physics textbooks limit discussions of measurement to macroscopic scales (Classical Physics), while measurements taken at microscopic scales (Quantum Physics) occur in a completely different manner. This difference arises from the probabilistic and indeterministic nature intrinsic to Quantum Mechanics, which is entirely opposed to the exact and deterministic nature of Classical Physics. The present work aims to expand the understanding of measurement and to distinguish the consequences of classical and quantum measurements. Additionally, it seeks to enable the inclusion of this topic in the physics curriculum at the high school level, using the Galton Board as an example to facilitate comprehension of the subject.

Keywords: Superposition state. Quantum measurement. Galton board.

*hara.dessano@ifb.edu.br

†aissa.lima.al@gmail.com

I. INTRODUÇÃO

A passagem do século XIX para o século XX foi marcada por evidenciar os limites da Física Clássica, a qual era tida como uma ciência absoluta de perfeita descrição da realidade (VARELA, 2004). O nascimento da Física Quântica trouxe novas percepções sobre a realidade que iam totalmente contra a física que já havia sido estabelecida, abalando assim a comunidade científica da época. Entre essas novas percepções, encontra-se uma nova noção do processo de mensuração de uma grandeza física, esta, quando executada em escala microscópica, envolve problemas que não são vistos ao ser realizada em escala macroscópica. O contato com esta nova percepção de medida, dentro de sala de aula, permite ao estudante maior aproximação com o mundo quântico.

Em pesquisas em livros didáticos de Ensino Médio, as obras de Pietrocola *et al.* (2016), Gaspar (2013), Doca, Bôas e Biscuola (2016), apresentam uma noção do ato da medida que está atrelada unicamente ao processo de medida em escala macroscópica. Tais obras, em comum, trazem uma definição de medida clássica e apresentam uma incerteza associada apenas à limitação instrumental.

Pesquisas em obras mais recentes, como em Bezerra (2020), Mortimer *et al.* (2020), Godoy, DellAgnolo e Melo (2020), Santos (2020), Thompson *et al.* (2020) e Amabis *et al.* (2020), nota-se a ausência de definição de medida clássica e incertezas associadas. Por outro lado, duas entre as obras citadas, Bezerra (2020) e Mortimer *et al.* (2020), apresentam uma abertura à discussão da medida quântica ao pontuar que, em escala quântica, o ato da medida interfere na própria medição.

O presente trabalho tem como objetivo ampliar a noção a respeito de uma medida e os problemas que envolvem o ato de realizá-la em escala quântica, de forma que o trabalho sirva de suporte ao professor para viabilizar a abordagem no componente curricular Física, no Ensino Médio. Se faz relevante a discussão tendo em vista a Base Nacional Comum Curricular (BNCC), pois a mesma prescreve a seguinte habilidade: "Interpretar resultados e realizar previsões sobre atividades experimentais, fenômenos naturais e processos tecnológicos, com base nas noções de probabilidade e incerteza, reconhecendo os limites explicativos da ciência"(BRASIL, 2018, p. 557). Por mais que a incerteza da medição esteja presente em escalas macroscópicas, a mesma pode ser expressivamente explorada se levada a um contexto microscópico.

Além disto, a Organização das Nações Unidas (ONU) proclamou 2025 como o Ano Internacional da Ciência e das Tecnologias Quânticas, em alusão aos 100 anos do estabelecimento das bases formais da Mecânica Quântica através do abandono de trajetórias contínuas das partículas, por uma mecânica matricial, introduzida por Heisenberg, em 1925 (HEISENBERG, 1925). Tal comemoração ajuda a promover a divulgação de avanços e aplicações relacionados ao tema, além de incentivar pesquisadores, tanto na área acadêmica, quanto na de ensino, a comunicarem seus trabalhos para a sociedade, de uma maneira geral.

Este trabalho foi estruturado da seguinte maneira. Na Seção , será feita uma discussão introdutória sobre a medida clássica e suas possíveis interferências. Posteriormente, na Seção , abordaremos as consequências em realizar uma medida num sistema de escala microscópica, utilizando os fundamentos da Mecânica Quântica para justificar os resultados. O tabuleiro de Galton será proposto como um material didático, para ilustrar o colapso da

função de onda, no ensino de Física. Por fim, a Seção trará nossa conclusão e percepção acerca desta discussão em uma sala de aula.

II. INTERFERÊNCIA DA MEDIDA CLÁSSICA

Medir é comparar uma quantidade de uma grandeza física com um padrão estabelecido (Pietrocola *et al.*, 2016). Porém, não é possível determinar o valor exato dessa quantidade de grandeza física, pois o ato de medir traz consigo incertezas provenientes do instrumento de medida, do manuseio do instrumento, das condições em que a medida está submetida, da amostra, e até de uma leitura subjetiva da medição.

A amostra representa apenas o subconjunto de elementos retirados de um objeto de estudo, logo, o resultado será generalizado. Os instrumentos de medida têm capacidade limitante de precisão (alguns mais precisos que outros, mas nunca com precisão absoluta), enquanto que o manuseio do instrumento depende da habilidade do manuseador. Portanto, se faz necessário realizar uma sequência de medições da grandeza desejável para alcançar um resultado confiável. Tais limitações estão associadas a uma medida clássica, de natureza macroscópica.

Porém, outro fator que pouco é abordado em sala de aula é a noção de medida enquanto um fator de interferência no sistema, para além de apenas uma comparação de um padrão estabelecido à grandeza. O observador (aparelho de medida) e o objeto (aquilo que se quer medir) são dois sistemas físicos particulares, e ao realizar a medição, o observador e o objeto estarão em interação. Ambos os sistemas são compostos por partículas, e a interação entre si resulta na mudança do estado de movimento dos sistemas.

Tal interferência não é perceptível a nível macroscópico, no entanto, ainda ocorre. Por exemplo, para medirmos a temperatura de um corpo com um termômetro de mercúrio é necessário que ocorra o contato entre o corpo e o termômetro, constituindo então duas problemáticas: o termômetro não indica diretamente o valor da temperatura do corpo, mas de si mesmo, valor este que é resultado de uma troca de calor entre o corpo e o termômetro. Mesmo assim, ainda é possível determinar a temperatura inicial do corpo θ_C através das leis da termodinâmica, considerando a conservação de energia entre a soma do calor absorvido Q_T (termômetro) e o calor cedido Q_C (corpo), isto é,

$$Q_T + Q_C = 0 \quad (1)$$

Conhecendo a temperatura inicial e final do termômetro, respectivamente, θ_T e θ'_T , de capacidade térmica C_T e a capacidade térmica do corpo C_C , temos que:

$$\theta_c = \theta'_C + (C_T/C_C)(\theta'_T - \theta_T) \quad (2)$$

Percebe-se que, sendo a capacidade térmica do corpo C_C expressivamente superior à capacidade térmica do termômetro C_T , a soma da Eq. (2) torna-se insignificante, resultando em uma mesma temperatura inicial e final do corpo. Dessa forma, podemos assumir que o valor indicado no termômetro é de fato o valor da temperatura inicial do corpo, mesmo ocorrendo uma troca de calor no processo de medida.

É importante destacar que o processo de medida de fato modificou a informação que

se queria obter, neste caso, a temperatura do corpo. Porém, a informação perdida ou modificada pôde ser negligenciada. Logo, realizar uma medição em escala macroscópica, ou em outras palavras, interferir em sistemas de escala macroscópica, abarca problemas que são solucionáveis ou desprezíveis.

No entanto, se considerarmos a medição da temperatura de uma gota de água ainda com o termômetro de mercúrio, haverá uma soma perceptível na Eq. (2), pelo fato da capacidade térmica do termômetro ser maior que a capacidade térmica da gota de água. Consequentemente, o ato da medida modificou significativamente o sistema que deveria ser preservado para a mensuração da temperatura.

III. INTERFERÊNCIA DA MEDIDA QUÂNTICA E O TABULEIRO DE GALTON

Ao aprofundarmos cada vez mais o contexto da medida para uma escala microscópica, a interferência toma proporções cada vez maiores. Consequentemente, a interferência da medida não poderá ser negligenciada como na utilização do termômetro em um corpo, de contexto macroscópico, de escala relativamente grande. Um fator para maiores interferências em sistemas quânticos está associado a algo que não é observado em escala macroscópica: uma natureza indeterminista.

Através da segunda lei de Newton, isto é,

$$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt} \quad (3)$$

sendo $\mathbf{F}$ a força e $d\mathbf{p}/dt$ a derivada temporal do momento linear $\mathbf{p}$, é possível obter equações de movimento de sistemas macroscópicos que resultam em previsões exatas do futuro. Ao arremessar uma bola, por exemplo, saberemos com exatidão onde a mesma irá se localizar, bem como sua respectiva velocidade, conhecendo somente a posição inicial, a velocidade inicial e as forças nas quais a mesma está sujeita (Varela, 2004). Ao realizar uma verificação experimental, os resultados conferem com as previsões matemáticas. Este recurso de poder prever estados de fenômenos físicos acaba moldando uma percepção e uma intuição fortemente determinística sobre a realidade física, que pode parecer ilógico considerar uma natureza que se apresente de forma contrária a este cenário. Entretanto, dentro dos domínios quânticos, mesmo conhecendo as configurações iniciais do sistema, não obteremos uma única previsão.

O estado de um sistema quântico fechado é definido por um vetor de estado normalizado $|\Psi\rangle$. O termo "estado" caracteriza o sistema através da propriedade do observável físico, seja posição, momento, energia etc (Roditi, 2005). A evolução temporal de $|\Psi(t)\rangle$ pode ser encontrada através da equação de Schrödinger, na notação de Dirac, dada por,

$$i\hbar \frac{d}{dt} |\Psi(t)\rangle = \hat{H} |\Psi(t)\rangle \quad (4)$$

onde i é a unidade imaginária, $\hbar$ é a constante de Planck, $6,63 \times 10^{-34}$ m²kg/s e o hamiltoniano $\hat{H}$ é o operador hermitiano associado à energia total do sistema.

A equação de Schrödinger está para a escala microscópica assim como as leis de Newton estão para a escala macroscópica. No entanto, a equação de Schrödinger resulta na obtenção

do vetor de estado $|\Psi\rangle$, que por sua vez, auxilia na previsão das probabilidades futuras de um sistema, em vez de obter uma única solução que evolui com o tempo, como é realizado classicamente. De forma análoga, é como se o artifício matemático, que descreve a bola que foi arremessada, resultasse em probabilidades de onde a mesma iria cair. Em vez de precisamente prever que a bola cairá no ponto x , a previsão pode ser de 50% em x e 50% em y , por exemplo.

A impressão que se pode ter a respeito do formalismo da Mecânica Quântica é que ela é limitante para descrever fenômenos quânticos, já que não nos fornece uma única previsão. Contudo, tal circunstância nada mais é que a própria realidade quântica, sua natureza probabilística. Retomando a analogia da bola que foi arremessada, se a arremessássemos 100 vezes com a mesma configuração inicial, não necessariamente verificaríamos que a bola foi 50 vezes para o ponto x , e as outras 50 vezes para y . Porém, aumentando progressivamente o número de lançamentos, os resultados se aproximariam cada vez mais da probabilidade de 50% para ambas posições. Consequentemente, estabelece-se uma natureza indeterminista, pois não temos certeza se irá cair em x ou em y , até que a medida seja realizada. Logo, em escala quântica, é possível que a mesma configuração inicial resulte em diferentes estados, já em escala macroscópica, isto não ocorre.

Uma forma de abordar essa natureza probabilística do sistema quântico para alunos do ensino médio é através do tabuleiro de Galton, utilizado no ensino de Matemática (Santos, 2008) e de Física (Hoering, Massoni e Hadjimichef, 2021). O tabuleiro de Galton consiste em uma placa vertical na qual esferas são lançadas na parte superior do tabuleiro. As mesmas colidem com fileiras de pinos intercaladas e têm suas trajetórias constantemente variadas até se encaixarem em algum vão na parte inferior, obedecendo ao triângulo de Pascal (Lira, 2021). Ao final, as esferas formam um padrão aproximado de uma distribuição gaussiana entre os vãos, sendo depositadas mais esferas na parte central, e cada vez menos ao se aproximarem das extremidades, como mostrado na Figura 1.

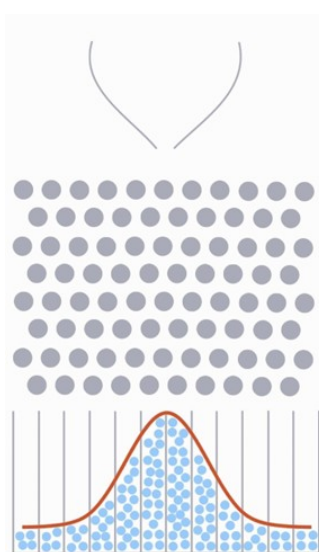


Figura 1: ilustração do tabuleiro de Galton com esferas formando distribuição gaussiana. Fonte: autoria própria.

Podemos utilizar um simulador online¹ (Probabilidade Plinko, 2024) para lançar uma esfera por vez e visualizar como o padrão se forma gradativamente. A princípio, observa-se que as esferas produzem um padrão aleatório. Porém, aumentando gradualmente os lançamentos, o conjunto das esferas se aproxima cada vez mais do padrão previsto, mostrado na Figura 2.

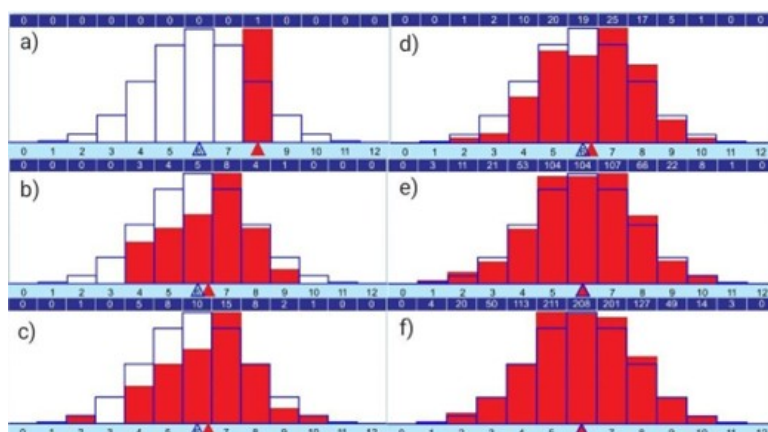


Figura 2: padrão formado ao lançar: a) 1 esfera; b) 25 esferas; c) 50 esferas; d) 100 esferas; e) 500 esferas; f) 1000 esferas. Fonte: adaptado pelo autor; Probabilidade Plinko (2024).

De forma semelhante ocorre em medidas quânticas, onde os resultados de uma sequência de medidas se aproxima cada vez mais da previsão probabilística, quão maior for o número de medições.

Devido às probabilidades de resultados futuros, é conveniente representar um estado quântico, antes da medida, com o que chamamos de "estado de superposição". O estado de superposição corresponde ao sistema sendo descrito simultaneamente por todos os estados possíveis, ou seja, o sistema não é definido por um único estado, mas é descrito por todas as suas possibilidades.

Para o exemplo em questão, podemos fazer uma analogia e imaginar que o tabuleiro foi tampado. Ao lançar a esfera, não podemos afirmar sua localização, já que não está sendo observada, sendo a única informação plausível a probabilidade de resultados possíveis, visto que as esferas obedecem uma distribuição gaussiana. Podemos representar o sistema em estado de superposição como

$$|\Psi\rangle = \sum_{i=0}^{12} c_i |\psi_i\rangle \quad (5)$$

onde cada termo da soma representa a probabilidade da esfera cair em um respectivo vão, sendo $|\psi_1\rangle$ o estado da esfera posicionada no primeiro vão e assim por diante. As constantes c_i estão associadas às amplitudes de probabilidade correspondentes aos estados $|\psi_i\rangle$. Neste momento, assume-se que a esfera se encontra em todos os vãos simultaneamente. Apenas ao realizarmos a medição (destampar o tabuleiro e observar) que a esfera adotará uma única posição definida. O sistema admite um entre os estados sobrepostos, deixando de ser

¹A utilização do simulador é suficiente para a proposta do trabalho, contudo, para um tabuleiro físico, recomenda-se a leitura de Lira (2021).

descrito por $\sum c_i |\psi_i\rangle$ e passando a ser descrito $|\psi_i\rangle$, ocorrendo uma “redução do vetor de estado” ou “colapso da função de onda”, como é majoritariamente conhecida para os casos de medições em base contínua (Halliday, Walker, Resnick, 2016).

Suponhamos que ao destampar o tabuleiro, a esfera seja medida na posição representada pelo estado $|\psi_1\rangle$, isto é, foi observada no espaço 1. Assim, é válido questionar qual era a posição da esfera antes da medição. Várias abordagens se propõem a trazer uma resposta e interpretação física. Griffiths (2011) discute a respeito de três interpretações, as quais eram as mais adotadas no início da construção da Teoria Quântica, a interpretação agnóstica, a realista e a ortodoxa.

A interpretação agnóstica parte do princípio de que é ilógico questionar a posição inicial da esfera, já que qualquer informação que se pode ter, depende de uma medição que irá informar o estado. Isto é, não faz sentido perguntar onde estava a partícula por que essa pergunta só pode ser respondida após a medida.

Entretanto, a interpretação realista defende que se a esfera foi encontrada no estado $|\Psi_1\rangle$, então ela já se encontrava nesse estado, independentemente da medida. Classicamente, adotaríamos a interpretação realista para representar a posição da esfera, e conseqüentemente, passa a ser conveniente adotar tal interpretação para descrever a realidade quântica. No entanto, no caso clássico, a medida sempre retornará o mesmo resultado quando várias medições forem feitas nas mesmas condições iniciais, o que não ocorre no domínio quântico. No mundo microscópico, podemos obter resultados diferentes ao repetir a mesma medida, mantendo as mesmas condições iniciais. A Mecânica Quântica se propõe a prever qual a probabilidade de encontrar um determinado resultado. Desta maneira, a interpretação realista acaba por desconsiderar a natureza quântica probabilística e indeterminista, já que a esfera sempre estaria no local em que foi detectada.

A linha interpretativa mais aceita pela comunidade científica é a interpretação ortodoxa, conhecida também como interpretação de Copenhague. Ela exprime que a esfera não possui posição definida até que a medida seja feita, logo, quebra-se a percepção da existência de propriedades quânticas independentes da medida. Portanto, esta linha de pensamento prediz que a esfera está num estado de superposição de todas as posições possíveis, conforme descrito pela Eq. (5).

Classicamente, há apenas descrições únicas e bem definidas de sistemas físicos. Na analogia do tabuleiro, foi justamente por tentar medir a posição final da esfera que a forçou a adotar um vão², e como consequência, todo o sistema passa a se comportar semelhantemente a um sistema clássico. O ato da medição interfere na própria forma como a natureza quântica se manifesta. Essa interação é chamada de observação e é a essência de uma medição na Mecânica Quântica, que conecta a função de onda com observáveis clássicos, como posição e momento.

É importante salientar que a Teoria Quântica é bem sucedida, pois as previsões, mesmo que probabilísticas, concordam com as experimentações (Cohen-Tannoudji, Diu, Laloë, 1977). Porém, interpretar a realidade quântica é um impasse por se tratar de um universo extremamente pequeno, se comparado a nossa realidade, o qual se mostra de forma contrainintuitiva. E, uma vez que a maneira de verificar qualquer interpretação se dá através de um

²Vale ressaltar que a analogia estabelecida tem a intenção exclusiva de aproximar o aluno da Física Quântica, não devendo ser levada a descrever todos os efeitos quânticos, principalmente a interferência entre os estados.

experimento, e o problema da medição está relacionado exatamente ao ato de experimentar algo, torna-se cada vez mais difícil filtrar interpretações com o potencial de serem mais consistentes”. Isto justifica o fato de ainda existirem diversas linhas interpretativas da Mecânica Quântica (Pessoa Jr., 2006).

IV. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo ampliar a noção de medida para além da executada em escala macroscópica, de forma que professores do Ensino Médio possam trazer a discussão para sala de aula, assimilando uma medida quântica com o tabuleiro de Galton. Mediante a noção do ato da medição em escala microscópica, o aluno passa a adquirir mais artifícios para aprofundar a compreensão de como se comporta a natureza quântica, tendo em vista que a mesma se apresenta de forma que contraria a intuição construída de uma realidade clássica, proveniente de um contexto macroscópico, dificultando assim a assimilação de uma realidade totalmente diferente.

O contato deste tipo de pensamento dentro de sala de aula permite ao estudante uma primeira aproximação com o mundo quântico, contribuindo com o seu letramento científico e diminuindo sua vulnerabilidade intelectual frente às diversas armadilhas pseudocientíficas existentes em meios de comunicação acessíveis a ele.

Editora Responsável: Maria de Fátima da Silva Verdeaux

REFERÊNCIAS

AMABIS, J. M.; MARTHO, G. R.; FERRARO, N. G.; PENTEADO, P. C. M.; TORRES, C. M. A.; SOARES, J.; CANTO, E. L.; LEITE, L. C. C. *Moderna Plus: ciências da natureza e suas tecnologias*. 1. ed. São Paulo: Moderna, 2020.

BEZERRA, L. M. *Ser protagonista: ciências da natureza e suas tecnologias*. 1. ed. São Paulo: Edições SM, 2020.

BRASIL. *Base Nacional Comum Curricular*. Brasília, DF: Ministério da Educação, 2018.

COHEN-TANNOUDJI, C.; DIU, B.; LALOË, F. *Quantum Mechanics*. Wiley, 1977. (A Wiley - Interscience publication, v. 1).

DOCA, R. H.; BÔAS, N. V.; BISCUOLA, G. J. *Física*. 3. ed. São Paulo: Saraiva, 2016.

GASPAR, A. *Compreendendo a física*. 2. ed. São Paulo: Ática, 2013.

GODOY, L. P.; DELLAGNOLO, R. M.; MELO, W. C. *Multiversos: ciências da natureza*. 1. ed. São Paulo: FTD, 2020.

GRIFFITHS, D. *Mecânica Quântica*. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

HALLIDAY, D.; WALKER, J.; RESNICK, R. *Fundamentos de física: óptica e física moderna*. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

HEISENBERG, W. Quantum-theoretical re-interpretation of kinematic and mechanical relations. *Z. Phys*, v. 33, p. 879-893, 1925.

HOERNIG, A. F.; MASSONI, N. T.; HADJIMICHEF, D. Física Quântica na Escola Básica: investigações para a promoção de uma Aprendizagem Conceitual, Histórica e Epistemológica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 43, p. e20210044, 2021.

LIRA, D. F. *Triângulo de Pascal e a Meritocracia: uma sequência didática com o uso do tabuleiro de Galton*. f. 98. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-graduação em Matemática, Universidade Federal Rural do Semi-árido, 2021.

MORTIMER, E.; HORTA, A.; MATEUS, A.; MUNFORD, D.; FRANCO, L.; MATOS, S.; PANZERA, A.; GARCIA, E.; PIMENTA, M. *Matéria, energia e vida: uma abordagem interdisciplinar*. 1. ed. São Paulo: Scipione, 2020.

PESSOA JR., O. *Física: Estudos filosóficos e históricos*. AFHIC, 2006.

PIETROCOLA, M.; POGIBIN, A.; ANDRADE, R. de; ROMERO, T. R. *Física em contextos*. 1. ed. São Paulo: Editora do Brasil, 2016.

PROBABILIDADE PLINKO. Disponível em: [link](#). Acesso em: 13 ago. 2024.

RODITI, I. *Dicionário Houaiss de Física*. Rio de Janeiro: Objetiva, 2005.

SANTOS, G. M. *Conceitos estatísticos no desenvolvimento de metodologias interdisciplinares de ensino*. f. 168. Dissertação (Mestrado) Pós-graduação em Estatística e Experimentação Agropecuária, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

SANTOS, K. C. *Diálogo: ciências da natureza e suas tecnologias*. 1. ed. São Paulo: Moderna, 2020.

THOMPSON, M.; RIOS, E. P.; SPINELLI, W.; REIS, H.; SANTANNA, B.; NOVAIS, V. L. D.; ANTUNES, M. T. *Conexões: ciências da natureza e suas tecnologias*. 1. ed. São Paulo: Moderna, 2020.

VARELA, J. *O século dos quanta*. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 2004.