





Proposta de um experimento para a compressão da meia-vida radioativa com o uso de poliedros físicos e virtuais

Proposal of an experiment for radioactive half-life comprehension using physical and virtual polyhedral

Caroline Vanessa Bauman Bertti ^{1*}, Alexandro Neves Silveira ², Aline Guerra Dytz ^{1,3}, Everaldo Arashiro ^{1,3}.

¹ Laboratório Ciência Impressa 3D, Universidade Federal do Rio Grande, Av. Itália s/n - CEP 96203-900 - Rio Grande, RS, Brasil.

² Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física - Polo 21, Universidade Federal do Rio Grande, Av. Itália s/n - CEP 96203-900 - Rio Grande, RS, Brasil.

³ Instituto de Matemática Estatística e Física (IMEF), Universidade Federal do Rio Grande, Av. Itália s/n - CEP 96203-900 - Rio Grande, RS, Brasil.

*E-mail: bauman.bertti@gmail.com

Recibido el 14 de marzo de 2023 | Aceptado el 2 de mayo de 2023

Resumo

Este trabalho foi aplicado de forma a demonstrar a meia-vida radioativa no processo de decaimento radioativo, de maneira lúdica e descontraída com uso de poliedros, contemplando tópicos de Física Moderna no Ensino Médio. Aplicado em uma escola na cidade de Rio Grande – RS, Brasil, em um sistema híbrido de ensino, com uma turma presencial e outra remota com respectivamente 14 e 12 estudantes. Simultaneamente foram realizadas simulações das curvas de decaimento radioativo utilizando conjuntos de poliedros físicos com a turma presencial e poliedros virtuais com a turma que estava on-line, através de um aplicativo de celular. Como resultado do procedimento observou-se uma interação muito produtiva dos estudantes, inesperada para encontros híbridos. Os estudantes relataram que após o experimento o comportamento exponencial ficou contextualizado devido a simulação do decaimento radioativo, o que os motivou a pesquisarem mais sobre a radioatividade.

Palavras-chave: Ensino da física moderna; Simulação com poliedros; Tempo de meia-vida; Radioatividade.

Abstract

This work was applied in order to demonstrate the radioactive half-life in the radioactive decay process, in a playful and relaxed way with the use of polyhedra, covering topics of Modern Physics in High School. Applied in a school in the city of Rio Grande – RS, Brazil, in a hybrid teaching system, with one in-person class and another remote, with 14 and 12 students, respectively. Simulations of radioactive decay curves were simultaneously conducted using physical polyhedra with the in-person class and virtual polyhedra with the online class, through a mobile app. As a result of the procedure, a highly productive interaction among the students was observed, unexpected for hybrid classes. The students reported that after the experiment, the exponential behavior became contextualized due to the simulation of radioactive decay, which motivated them to research more about radioactivity.

Keywords: Teaching modern physics; Simulation with polyhedral; Half-life time; Radioactivity.



I. INTRODUÇÃO

A Física Moderna e Contemporânea faz parte do currículo do Ensino Médio, porém, no cotidiano escolar, os conteúdos trabalhados ao longo do período letivo têm se limitado ao ensino da Física Clássica, principalmente pela falta de tempo (Moreira, 2018) devido à pouca carga horária (cerca de 2 horas-aulas por semana), e pela carência de experimentos. Fato constatado por alguns autores desde o final do século passado, no qual, citam que os conteúdos de Física Moderna, apesar de obrigatórios, não se tornam significativos para os estudantes (Terrazan, 1992; Alvetti, 1999), possivelmente pela dificuldade de contextualização por parte dos docentes e falta de práticas que possam demonstrar os conceitos ou a aplicação dos conceitos envolvidos.

Ao mesmo tempo, temos as tecnologias cada vez mais presentes no cotidiano dos estudantes, seja no ambiente escolar ou em momentos de lazer. O acesso facilitado a ferramentas online e a presença, cada vez mais constante, dos estudantes em redes sociais se mostram uma realidade, que já era uma tendência mesmo antes da pandemia e com ela acelerou e potencializou essa relação (Reis, Rivas, 2020). A abordagem para diferentes temas da física usando Arduino (Monteiro, Vilhena, Silva, Lucena, Coutinho Júnior, 2022), computadores (Medeiros, Medeiros, 2002; Fiolhais, Trindade, 2003) e smartphones (Pszybylski, Motta, Kalinke, 2020; Bauman Bertti, Arashiro, Avelaneda, Silveira, 2022) vem se tornando cada vez mais frequente nas escolas.

Assim, o uso de simuladores pode ser um recurso muito interessante para que os estudantes compreendam aspectos da Física Moderna, e no caso deste trabalho sobre a radioatividade, estando isentos dos possíveis riscos associados a manipulação de materiais radioativos (Mesquita, Dytz, 2019), que seguem legislação específica para sua manipulação (CNEN, 2014). Alguns trabalhos apresentam esse tipo de abordagem para tratar desse tema, Mesquita e Dytz (2019) propuseram o uso de um protótipo para simular um medidor de atividade que utiliza uma fonte luminosa para simular parâmetros análogos à fonte radioativa, o comportamento do decaimento radioativo tem sido ensinado com uso do simulador da Plataforma PhET (Machado, Cruz, 2020), simulação computacional (Jesse, 2003) ou através de analogias com o lançamento de moedas (Bakaç, Taçoğlu, Uyumaz, 2011), lançamento de dados físicos (Celnikier, 1980; Kowalski, 1981) ou de lançamento de poliedros de faces variadas como se fossem diferentes radioisótopos (Bauman Bertti, Silveira, Dytz, Arashiro, 2022a; Bauman Bertti, Silveira, Dytz, Arashiro, 2022b).

Quando um átomo emite algum tipo de radiação é dito que o elemento químico sofreu um decaimento ou desintegração radioativa. O processo de decaimento radioativo além de ser uma transmutação da matéria, pois o elemento decaído geralmente é diferente do elemento emissor da radiação, também é um processo espontâneo e probabilístico. O tempo médio em que metade dos átomos de uma certa amostra decaem é conhecido como tempo de meia-vida e tem um comportamento exponencial.

Entendendo a inserção da tecnologia na sala de aula e a necessidade de experimentações no tema que não envolvesse o uso de materiais radioativos e permitisse uma comparação fidedigna com o processo estatístico do decaimento radioativo, este trabalho trata de uma simulação do decaimento radiativo usando poliedros físicos e, através de aplicativo de celular, de poliedros virtuais, ambos com um número específico de faces.

A escola que foi aplicada a prática contava com sistema de ensino presencial e remoto, durante o retorno gradual das atividades pós-pandemia da COVID-19, essa dinâmica possibilitou testar mais de uma forma de aplicação da atividade. Com isso foi sugerido que o grupo presencial utilizasse os poliedros de 6 faces e os estudantes que estavam no sistema remoto utilizassem poliedros de 10 faces. Com isso surgiu a possibilidade de entendimento de elementos com meias-vidas distintas. A probabilidade de um determinado tipo de elemento radioativo decair após um certo período de tempo pode ser simulada estudando o processo probabilístico como no caso de lançamentos subsequentes de poliedros com eliminação dos que possuem um pré-determinado valor de face a cada jogada simultânea.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A atividade prática envolvendo o conhecimento de decaimento radioativo é proposta para uma situação de sala de aula onde o professor instrui o estudante a explorar a questão do decaimento radioativo utilizando recursos em que ele, com auxílio dos colegas, busca a solução para o entendimento da situação problema: como os átomos decaem? A intervenção do professor é importante para conduzir não apenas as discussões, mas também o experimento proposto para que o grupo possa interagir buscando o conhecimento acerca do tema. A solução deve ser vista como um indicativo de seu desenvolvimento mental. Neste caso, para Vygotsky (2007), o que o estudante consegue fazer com a ajuda dos outros, pode ser de alguma maneira, muito mais indicativo de seu desenvolvimento mental do que o que consegue fazer sozinho.

Assim o papel do professor está focado na construção de novos conhecimentos do estudante, de forma a orientá-lo, incentivá-lo e estimulá-lo com ações que potencialize sua aprendizagem e, conseqüentemente, seu desenvolvimento. Nos trabalhos em grupo, o professor pode abrir canais de comunicação que despertem o interesse

dos estudantes (Silva, Villani, 2009). Permite que os estudantes se organizem e apresentem os conhecimentos ou informações sobre conteúdos e conceitos ampliando as discussões, permitindo que os conteúdos ou conceitos trabalhados possam ser corrigidos (caso as informações prévias sejam conhecimentos populares ou empíricos) ou otimizados (de forma a reforçar e ampliar informações relevantes no conhecimento). Assim, compete ao professor favorecer a operatividade do grupo sem limitar a sua criatividade e incentivar as discussões que permitam aos estudantes um amadurecimento dos conteúdos e conceitos apresentados para o trabalho em grupo.

Vygotsky atribui uma grande relevância à interação social, que no caso deste trabalho compreendemos ser a as discussões que foram realizadas em grupo, pois a atividade prática pode ocorrer tanto de forma individual (no caso dos participantes de forma remota) como em grupo (no caso dos participantes de forma presencial). A interação dos estudantes que favoreceu ampliar as discussões e o entendimento sobre o conceito de meia-vida radioativa no processo de construção das funções psicológicas humanas, a partir do entendimento do conceito de Zona de Desenvolvimento Proximal (ZDP), que é a distância entre o nível de desenvolvimento real e o nível de desenvolvimento potencial. *“Aquilo que é ZDP hoje será o nível de desenvolvimento real amanhã, ou seja, aquilo que uma criança pode fazer com assistência hoje, ela será capaz de fazer sozinha amanhã”* (Vygotsky, 2007).

Com isso o aprendizado desperta processos de desenvolvimento que aos poucos vão fazendo parte das funções psicológicas do indivíduo. Na atividade prática, o trabalho em grupo também desperta discussões sobre o assunto e contextualização do tema com fatos e situações reais, além de motivar os estudantes a pensar e entender as relações propostas na atividade. Permite o entendimento de situações em que as informações são meros conhecimentos populares ou empíricos, mostrando as diferenças entre fatos cientificamente comprovados. No caso deste trabalho, os estudantes discutiram o tema enfatizando informações e questionando cenas da série sobre o acidente de Chernobyl transmitida pela HBO (que reproduz o acidente na usina nuclear de Chernobyl). As bases da teoria em relação ao decaimento permitem ensinar sobre as partículas e radiação eletromagnética, contextualizando um tema que pode constar em alguma questão de provas (no caso de estudantes de ensino médio, provas que permitam ingresso em universidades).

Na desintegração radioativa, o núcleo de um átomo emite espontaneamente uma partícula α (composta por dois prótons e dois nêutrons, tendo a mesma estrutura do núcleo do átomo de hélio) uma partícula β (um elétron ou pósitron) e/ou um raio γ (um fóton), tendo assim uma configuração mais estável.

Uma fonte radioativa contém átomos e não há maneira de dizer quando um dado núcleo irá desintegrar. No entanto, em média, pode-se prever que após um certo intervalo de tempo, chamado meia-vida $t_{1/2}$, metade dos átomos terá se desintegrado. Na próxima meia-vida, metade dos átomos remanescentes irá sofrer decaimento, e assim sucessivamente. Cada isótopo radioativo possui um tempo de meia-vida diferente (Okuno, Caldas, Chow, 1986). Esse período de tempo pode ser expresso em segundos, minutos, horas, dias ou anos.

Na figura 1a é mostrado o gráfico de comportamento geral de número de núcleos presentes ao longo do tempo de uma amostra radioativa, nele também estão identificados os tempos de meia-vida. O tipo de curva apresentado na figura 1a é um decaimento exponencial com o tempo. Isso é um indicativo que a desintegração radioativa é de natureza estatística. Cada núcleo em uma amostra radioativa possui uma certa probabilidade de desintegração, mas não há um meio de se conhecer, antecipadamente, qual núcleo se desintegrará em determinado intervalo de tempo.

Uma forma de representar matematicamente o decaimento radiativo foi definida experimentalmente por Rutherford e Soddy (1902) e depois deduzida por Ergon von Schweidler (Kaplan, 1983) a partir de considerações estatísticas, é através da equação,

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1)$$

onde N_0 é o número de átomos inicialmente presentes, N o número de átomos que ainda não se desintegraram após um intervalo de tempo t , e é a base dos logaritmos naturais ou neperianos, e λ é a constante de decaimento que é a probabilidade, por unidade de tempo, de que um núcleo desintegre, ou ainda, ela caracteriza a velocidade de desintegração de uma substância.

Se for aplicado o logaritmo neperiano em ambos os lados da equação 1, será obtido a equação,

$$\ln(N) = \ln(N_0) - \lambda t \quad (2)$$

sendo assim, se com os mesmos resultados da figura 1a, for feito um gráfico semi-logarítmico em que a escala vertical é logaritmo neperiano e a horizontal linear (figura 1b), em vez de se ter uma curva, irá se ter uma reta, cujo coeficiente angular é a constante de decaimento λ .

A relação entre a constante de decaimento λ e a meia-vida $t_{1/2}$ pode ser obtida sabendo-se que, para $t = t_{1/2}$, N será igual a $N_0/2$, e utilizando a equação 1, tem-se

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}} \quad (3)$$

Uma vez que N_0 é diferente de zero, pode ser simplificado, e calculando o logaritmo neperiano de ambos os lados da equação obtém-se

$$\ln 2 = \lambda t_{1/2}, \quad (4)$$

sendo assim, o tempo de meia-vida é inversamente proporcional à constante de decaimento,

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}. \quad (5)$$

Quanto maior for a constante de decaimento, mais rápida será a desintegração radioativa do radioisótopo e, portanto, menor será o tempo necessário para reduzir o número de átomos à metade.

Nas equações 1 à 3, o número de partículas pode ser substituído pela massa, número de mols, atividade ou pela porcentagem do material radioativo, já que todas essas grandezas são diretamente proporcionais entre si (Okuno, Yoshimura, 2010).

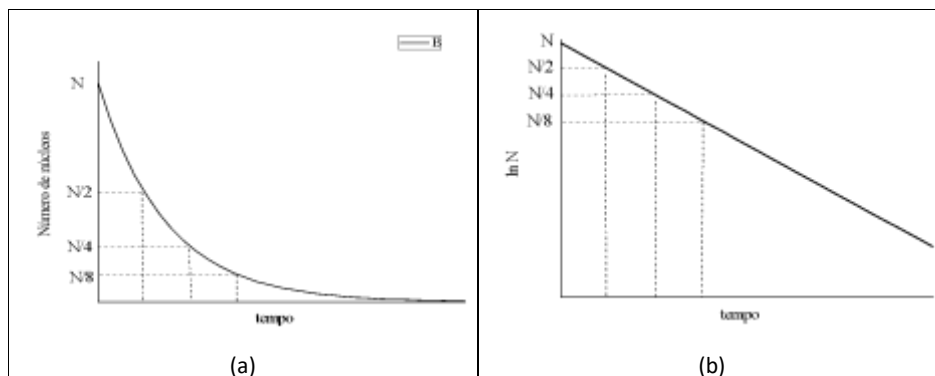


FIGURA 1. (a) Gráfico do número de núcleos ao longo do tempo, com escalas lineares. (b) Gráfico do número de núcleos ao longo do tempo, com a escala do número de núcleos em logaritmo neperiano e a escala do tempo linear (gráfico semi-logarítmico).

O comportamento do decaimento radioativo pode ser simulado fazendo uso de poliedros. A probabilidade de um átomo específico decair após um certo período pode ser simulada estudando o processo aleatório de lançar poliedro. A cada lançamento elimina-se um determinado valor de face pré-definido pelo professor ou pelo grupo de estudantes que participar da prática.

III. MÉTODOS E MATERIAIS

Para simular as probabilidades de um átomo decair lançando os poliedros, cada estudante ou grupo de estudantes recebeu um conjunto de 100 poliedros de mesmo número de faces (figura 2a), juntamente com a face designada como o número de "decaimento" (no caso foi escolhido a face 1), ou seja, o número voltado para cima em que se o poliedro cair deve ser retirado após o lançamento simultâneo de todos os poliedros.

Além da contagem da quantidade de poliedros, supondo que os poliedros utilizados sejam todos iguais, é possível com auxílio de uma balança de culinária determinar a massa dos poliedros remanescentes (figura 2b), e assim demonstrar aos estudantes que se pode usar a equação 1 trocando a quantidade de poliedros por massa.



FIGURA 2. (a) Poliedros físicos de 6 faces, dados convencionais. (b) Balança de culinária para medição da massa dos poliedros remanescentes.

A cada lançamento de poliedros, pode-se montar uma coluna com os poliedros removidos do montante de cada lançamento fazendo com que os próprios poliedros já indiquem a curva exponencial que resultará da prática (figura 3). Na simulação esses poliedros retirados são considerados a atividade radioativa do elemento simulado/estudado. O procedimento foi repetido até a retirada de todos os poliedros.

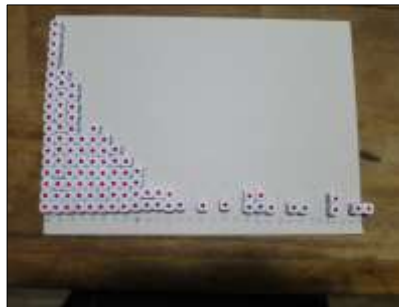


FIGURA 3. Poliedros decaídos em função do número de jogadas simultâneas de um dos grupos.

Aproveitando que o acesso a *smartphones* tem se tornado mais frequente, estando presentes no convívio da grande parte dos estudantes quanto dos professores, é possível usar algum dos vários aplicativos que simulam o lançamento de poliedros (figura 4a). Neste trabalho, foi utilizado o aplicativo Mighty Dice (figura 4b), disponível na loja de aplicativos Google Play e App Store, por ser gratuito, apresentar uma interface simples e fácil de usar. O uso de poliedros virtuais possui a vantagem de poder usar facilmente outros números de faces que podem ser entendidos como radioisótopos diferentes, consequentemente com constantes de tempo e meias-vidas distintos. Além disso, pode ser utilizado como um recurso extraclasse ou atividade extra para comparação de elementos radioativos com meias-vidas distintos.

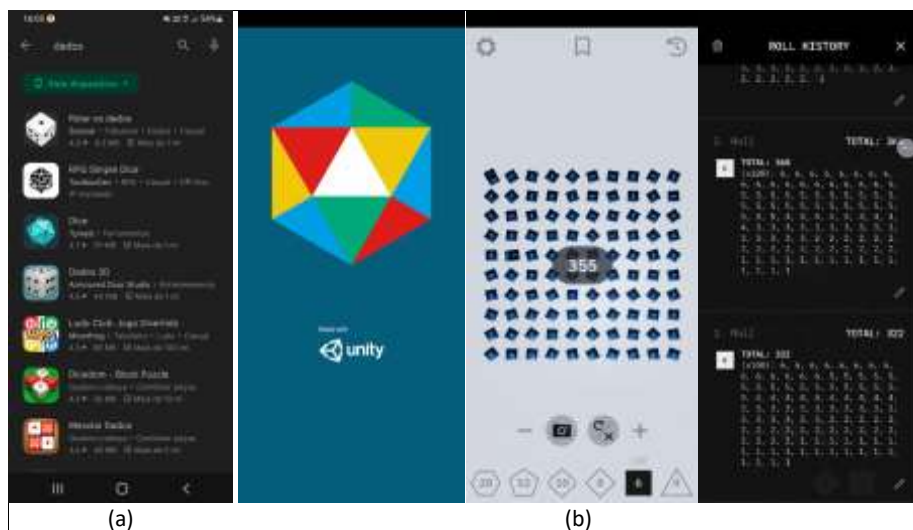


FIGURA 4. (a) Imagem de algumas das diversas opções de aplicativos de lançamento de poliedros disponíveis no Google Play. (b) Imagens do aplicativo de celular, Mighty Dice, selecionado para a realização da atividade.

Posteriormente, com as informações coletadas montaram-se gráficos que mostram o comportamento exponencial da atividade proposta, podendo-se fazer a analogia com a curva do decaimento radioativo para comparar e entender o processo do decaimento radioativo e do tempo de meia-vida. O decaimento radiativo e o tempo de meia-vida para poliedros de mesmo número de faces não dependem da quantidade inicial de poliedros utilizados, no entanto, quanto maior a quantidade inicial mais claramente visível será o decaimento exponencial e a meia-vida. E por ser uma analogia a unidade da meia-vida nesse experimento não será o tempo e sim o número de jogadas simultâneas dos poliedros.

Obviamente uma exponencial pode ter outras aplicações (Correia, Cazorla, 2021), mas o intuito da aplicação serviu como exemplo para a contextualização, assim este procedimento de uso de poliedros pode auxiliar em outras áreas da ciências como a geologia, arqueologia, medicina nuclear e química ou temas específicos como a lei de resfriamento de Newton, datação radiológica, atenuação de um feixe de radiação monoenergética, descarga de um capacitor em um circuito RC, intensidade luminosa e reações químicas de primeira ordem.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A atividade foi aplicada em uma turma do terceiro ano do Ensino Médio do Colégio Sagrado Coração de Jesus, Rio Grande - RS, Brasil, no retorno gradual pós-pandemia da COVID-19. A escola tinha adotado um retorno híbrido com 12 estudantes participando de maneira remota (figura 5a), e 12 estudantes participando de maneira presencial. Isso possibilitou testar mais de uma forma de aplicação da atividade com a utilização de poliedros físicos para a turma que estava participando de forma presencial (figura 5b) e poliedros virtuais através de aplicativo de celular para a turma que estava participando de forma remota.

A turma estava prestes a fazer o Exame Nacional do Ensino Médio, ENEM, que é uma prova nacional brasileira de admissão à educação superior e devido a isso tinham notas altas e chegaram ao quarto bimestre na etapa pós-ENEM desmotivados de participar da continuidade das aulas tradicionais. Entretanto a turma recebeu a atividade de maneira muito positiva, pois se interessaram na metodologia diferenciada para o entendimento do processo de decaimento radioativo, inclusive relataram sobre as diversas discussões sobre as questões relacionadas a radioatividade, e alguns estudantes relataram e indagaram sobre o acidente nuclear de Chernobyl uma vez que assistiram a série Chernobyl transmitida pelo canal HBO.



FIGURA 5. (a) Imagem da atividade ocorrendo simultaneamente com a turma presencial e com a turma remota, ao fundo o monitor com os estudantes participando de maneira remota. (b) Um dos grupos realizando a atividade proposta.

Cada grupo presencial lançava uma quantidade determinada de poliedros físicos e os estudantes que participavam de maneira remota trabalhavam com lançamentos virtuais de poliedros com o aplicativo de celular. A partir do procedimento definido em Materiais e Métodos montaram-se as tabelas registrando o número do lançamento, a quantidade de poliedros decaídos naquele lançamento e a quantidade de poliedros remanescentes. Os poliedros que foram retirados, foram organizados em colunas de forma que no final dos lançamentos, a figura gerada com as colunas de poliedros assemelha-se a uma curva exponencial, como mostrado na figura 3. A partir das tabelas foram construídos os gráficos que relacionam o número de poliedros não decaídos pelo número de jogadas simultâneas. Com o gráfico pode-se discutir e marcar graficamente a meia-vida para os valores coletados. No caso dos estudantes que participaram na sala de aula, também foi solicitado a medição das massas dos poliedros remanescentes em cada lançamento (figura 5b), assim como o seu gráfico.

A figura 6 mostra os gráficos com os resultados coletados pelos estudantes de um dos grupos que participaram presencialmente com os poliedros de 6 faces. Na figura temos o número de poliedros não decaídos (figura 6a) e a sua massa (figura 6b) em função do número de jogadas simultâneas, nele também estão identificados os tempos de meia-vida e a curva de decaimento teórica obtida através da equação 1. Quando os gráficos foram analisados pelos estudantes, os mesmos comentaram ficar impressionados com a semelhança da figura gerada a partir dos poliedros excluídos (figura 3) em cada jogada com a figura dos gráficos elaborados (figura 6), relatando a importância do processo de construção e análise dos gráficos e enfatizando que este procedimento fez que com que entendessem as curvas e seu significado. Alguns comentaram que sabiam como construir um gráfico, mas que não fazia muito sentido até relacionarem com este experimento, onde fizeram uma simulação do processo de decaimento radioativo.

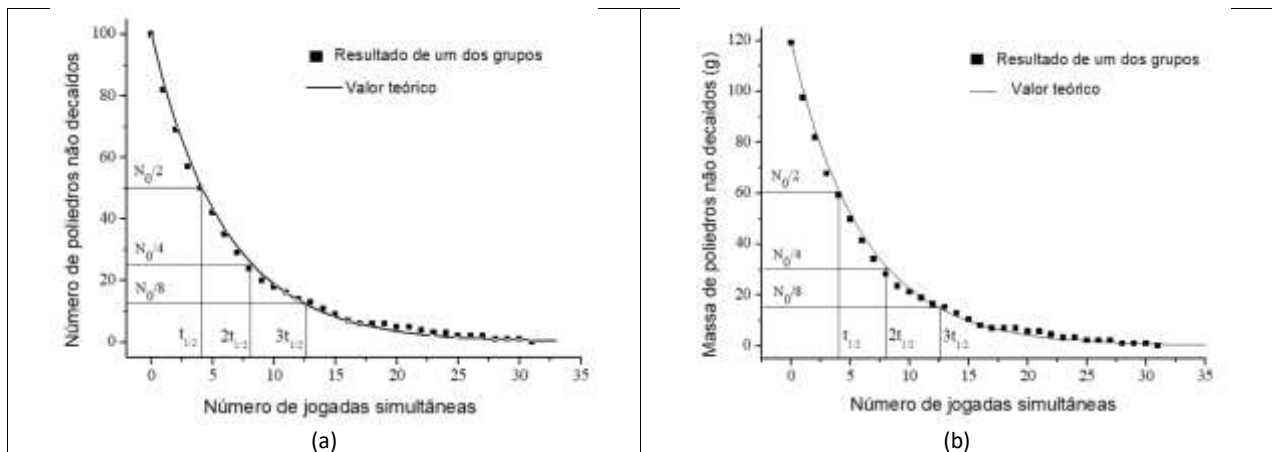


FIGURA 6. (a) Gráfico do número de poliedros de 6 faces não decaídos em função do número de jogadas simultâneas. (b) Gráfico da massa de poliedros de 6 faces não decaídos em função do número de jogadas simultâneas.

Na figura 7 são mostrados os mesmos resultados da simulação apresentada na figura 6, mas com o logaritmo neperiano do número de poliedros não decaídos (figura 7a) e a sua massa (figura 7b) em função do número de jogadas simultâneas. O coeficiente angular forneceu a constante de decaimento $\lambda = 0,163$, e usando a Eq. (5) tem-se que a meia-vida é próximo de $t_{1/2} = 4,25$ jogadas simultâneas. Alguns estudantes ficaram surpresos que a evolução temporal do número poliedros não decaídos e a sua massa para mesma simulação trazem resultados similares. Foi aproveitado esse momento para explicar que na equação 1 pode-se trocar o número de partícula (poliedros) por sua massa, isso porque os poliedros utilizados são todos iguais entre si tanto em número de faces como em massa. E um dos estudantes concluiu que nem precisaria então realizar a contagem dos poliedros a cada lançamento, bastaria realizar a medição da massa dos poliedros não decaídos, o que seria mais rápido, mas sem prejudicar a atividade.

É possível verificar que com os resultados que tinham, conseguiram com boa eficiência determinar a constante de decaimento λ e a meia-vida $t_{1/2}$ do radioisótopo simulado pelo lançamento de poliedros, que para o caso de 6 faces, seriam respectivamente $\lambda = 1/6$ (que é a probabilidade de uma determinada face de um dado de 6 faces cair com o número virado para cima) e $t_{1/2} = 4,16$ jogadas simultâneas.

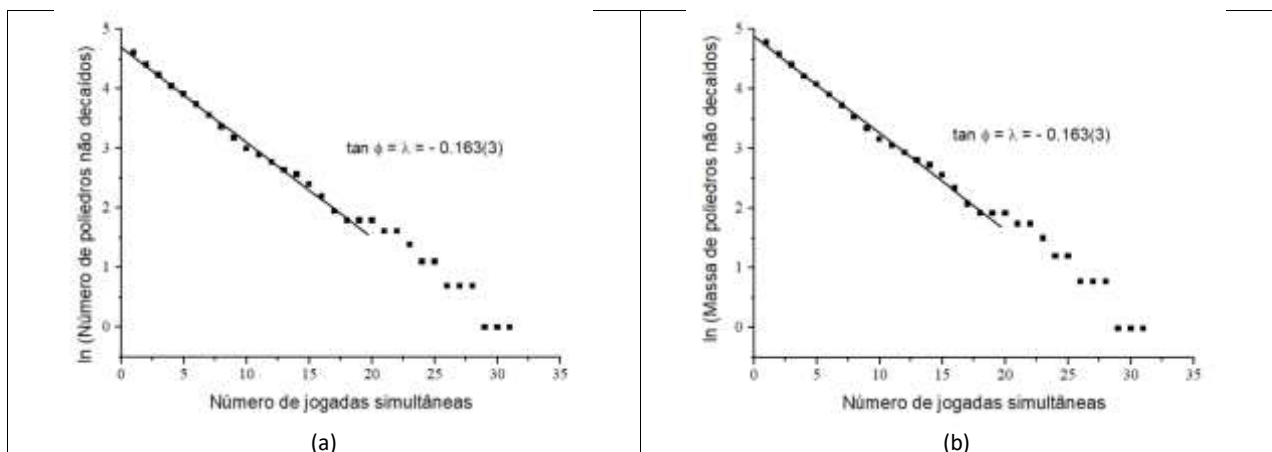


FIGURA 7. (a) Gráfico do logaritmo neperiano do número de poliedros de 6 faces não decaídos em função do número de jogadas simultâneas. (b) Gráfico do logaritmo neperiano da massa de poliedros de 6 faces não decaídos em função do número de jogadas simultâneas.

A figura 8 mostra os gráficos produzidos com os resultados coletados por um dos estudantes que participou de maneira remota, porém o fez através do lançamento de poliedros virtuais de 10 faces usando o app Mighty Dice. De modo geral, os estudantes que participaram remotamente acharam divertido usarem os seus celulares para realizarem o experimento, e um deles comentou que já conhecia o aplicativo por usá-lo em jogos de tabuleiro de RPG (Role Playing Game) e nunca tinha imaginado que o usaria para fazer uma atividade de Física. Na figura 8a tem-se o número de poliedros não decaídos em função do número de jogadas simultâneas e na figura 8b é mostrado os mesmos resultados, mas com o logaritmo neperiano do número de poliedros não decaídos em função do número de jogadas simultâneas, e o coeficiente angular forneceu a constante de decaimento $\lambda = 0,103(1)$, tendo conseqüentemente a

meia-vida próximo de $t_{1/2} = 6,7$ jogadas simultâneas. Os resultados estão dentro do esperado para um poliedro de 10 faces, que tem a probabilidade de uma determinada face ser sorteada de 0,10 e, conseqüentemente, meia-vida de 6,93 jogadas simultâneas.

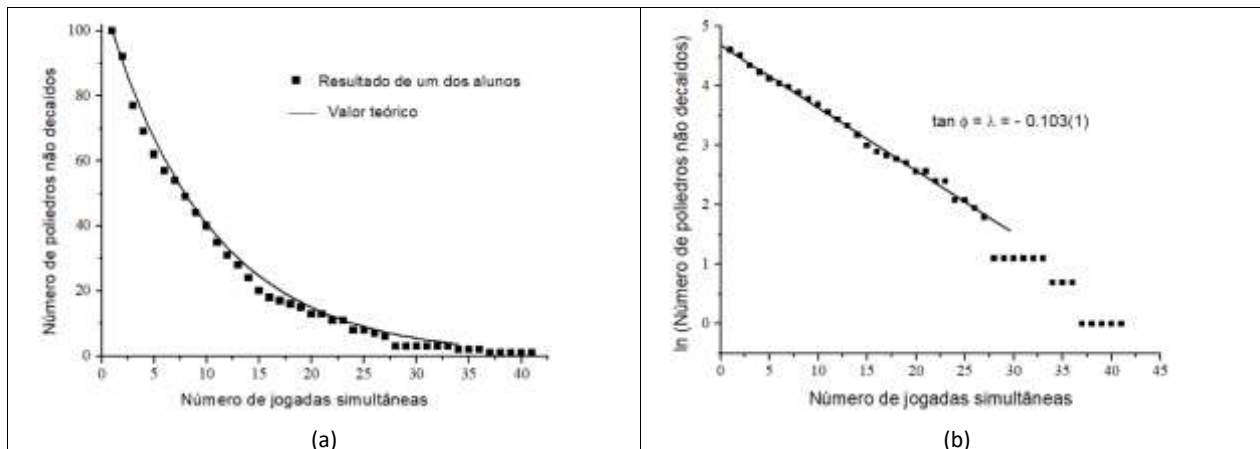


FIGURA 8. (a) Gráfico de número de poliedros de 10 faces não decaídos em função do número de jogadas simultâneas. (b) Gráfico do logaritmo neperiano do número de poliedros de 10 faces não decaídos em função do número de jogadas simultâneas, sendo que o seu coeficiente angular fornece a constante de decaimento igual a 0,103(1).

As figuras 6 a 8 foram feitas com software livre SciDAVis (2022), mas considerando que não se tenha acesso a um computador, para se determinar a constante de decaimento terá que usar o recurso de linearização (Monsanto, 2017) fazendo um gráfico manualmente. Neste caso será preciso usar um papel em escala mono-log para fazer um gráfico do número de poliedros restantes em função do número de lançamentos simultâneos.

Os estudantes que participaram presencialmente da aula tiveram a oportunidade de trabalharem em grupos, o que promoveu o engajamento dos estudantes para a realização da atividade. Já os estudantes que participaram remotamente, devido à dificuldade de interagirem entre si, trabalharam individualmente usando o aplicativo de poliedros virtuais. No entanto, por ser uma atividade que promoveu a participação mais ativa dos estudantes, mesmo os que trabalharam de maneira remota sentiram-se motivados para a realização individual da atividade e nas discussões dos resultados com os demais colegas, integrando os saberes e opiniões. Esta constatação foi devido aos comentários feitos pelos estudantes, tanto no sistema remoto como no presencial, quando relataram não ter acreditado, inicialmente, na potencialidade do experimento, mas que se surpreenderam com a clareza e facilidade de contextualização do assunto enquanto realizavam o experimento e construía as curvas de decaimento radioativo. Um comentário que surgiu foi que eles tiveram a oportunidade de testemunhar como os conhecimentos da matemática são aplicados na física, contextualizando funções que não pareciam ter aplicação lógica ou cotidiana e como os ensinamentos sobre física moderna são mais interessantes que os conteúdos de física da forma que são trabalhados no Ensino Médio. Outra colocação relevante feita por um estudante foi que o decaimento radioativo também tinha sido abordado durante as aulas de química, e que achava isso estranho. Foi aproveitada essa colocação para enfatizar que o decaimento radioativo é um tema comum às duas disciplinas e que a ciência é interdisciplinar e, portanto, muitos tópicos científicos envolvem a colaboração de diferentes áreas de estudos que se complementam para uma maior compreensão.

Antes da atividade proposta foi realizada uma aula para apresentar os conceitos de radioatividade, mas após a atividade a discussão foi muito engrandecedora para os estudantes, pois relataram que realmente entenderam a meia-vida de um elemento radioativo, concluindo o motivo pelo qual alguns materiais radioativos demoram tanto tempo para deixarem de ter uma emissão significativa, trazendo novamente a discussão sobre o que aconteceu em Chernobyl e a razão para que certas áreas permaneçam inabitáveis por milhares de anos.

V. CONCLUSÕES

O trabalho propôs um experimento para compreensão de meia-vida radioativa com o uso de poliedros físicos e virtuais de maneira simples, acessível e principalmente com baixo custo, sendo possível realizá-la mesmo remotamente usando aplicativo de celular, ou ainda como uma atividade extracurricular. É necessário ressaltar que o experimento realizado é uma analogia do decaimento radiativo, em um material radioativo o núcleo pode decair a qualquer instante; mas nessa atividade o decaimento pode acontecer em eventos discretos, ou seja, em cada jogada simultânea dos poliedros.

Houve uma receptividade positiva culminando numa discussão, acima do esperado, sobre as aplicações dos conceitos de radioatividade e meia-vida. Esta receptividade pode ter ocorrido devido a interação dos estudantes na prática proposta e nas relações que foram abordadas com base na série sobre Chernobyl, despertando assim, o interesse em entender tanto sobre o acidente que houve na usina nuclear de Pripyat, como sobre as consequências que afetam esta região de Chernobyl.

Foi solicitado um relatório para analisar como os estudantes entenderam o experimento com poliedros, e quando feito a sua correção, todos eles apresentaram detalhes pouco discutidos em sala de aula devido a proposta ter sido realizada em apenas 2 aulas, sendo perceptível o entendimento e interesse que os estudantes demonstraram na atividade. Conforme exposto pelos estudantes que participaram desta atividade e conforme o exposto nos relatórios dos estudantes, foi possível ampliar a compreensão que: (a) o decaimento radioativo é um processo probabilístico; (b) mas que é possível, em média, prever que após um dado intervalo de tempo, chamado meia-vida ($t_{1/2}$) metade dos núcleos terá se desintegrado; (c) que cada radioisótopo tem uma meia-vida característica e; (d) um radioisótopo com uma meia-vida longa decai mais lentamente do que aquele com uma meia-vida curta.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- Alveti, M. A. S. (1999). *Ensino de Física Moderna e Contemporânea e a revista Ciência Hoje*. [Dissertação de Mestrado em Educação, Universidade Federal de Santa Catarina]. <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/80580>
- Bakaç, M., Taşoğlu, A. K., & Uyumaz, G. (2011). Modeling radioactive decay. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 15, 2196-2200. doi:10.1016/j.sbspro.2011.04.079
- Bauman Bertti, C. V., Arashiro, E., das Neves Avelaneda, V., Neves Silveira, A. (2022). Determinação da aceleração da gravidade em um experimento de lançamento horizontal usando o detector de som de um smartphone. *Revista do Professor de Física*, 6(2), 10-24. doi: 10.26512/rpf.v6i2.43178
- Bauman Bertti, C. V., Silveira, A. N., Dytz, A. G., Arashiro, E. (2022a). Comparação do comportamento do decaimento radioativo através de lançamentos de poliedros. *Revista do Professor de Física*, 6(Especial), 27-34. doi: 10.26512/rpf.v1i1.45925
- Bauman Bertti, C. V., Silveira, A. N., Dytz, A. G., Arashiro, E. (2022b). Comparação do comportamento do decaimento radioativo através de lançamentos de poliedros. In M. Ferreira, V. A. Carvalho, O. Silva Filho, I. J. C. Paulo, M. A. Moreira (Eds.), *Fundamentos, pesquisas, contemporaneidades e tendências no Ensino de Física no Brasil* (43-54). São Paulo, Brasil: Livraria da Física.
- Celnikier, L. M. (1980). Teaching the principles of radioactive dating and population growth without calculus. *American Journal of Physics*, 48(3), 211-213. doi:10.1119/1.12307
- CNEN (2014). Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica. CNEN NN 3.01. Recuperado de <http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm301.pdf>
- Correia, G. S., Cazorla, I. M. (2021). A função exponencial na pesquisa em Educação Matemática: como dialoga com a BNCC? *Em Teia - Revista de Educação Matemática e Tecnológica Iberoamericana*, 12(4), 1-25. doi: 10.51359/2177-9309.2021.249017
- Fiolhais, C., Trindade, J. (2003). Física no computador: o computador como uma ferramenta no ensino e na aprendizagem das ciências físicas. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 25, 259-272. doi: 10.1590/S1806-11172003000300002
- Jesse, K. E. (2003). Computer Simulation of Radioactive Decay. *The Physics Teacher*, 41(9), 542-543. doi:10.1119/1.1631626

- Kaplan, I. (1983). *Física Nuclear (2ª ed.)*, Rio de Janeiro: Guanabara Dois.
- Kowalski, L. (1981). Simulating radioactive decay with dice. *The Physics Teacher*, 19(2), 113. doi:10.1119/1.2340711
- Machado, N. A., Cruz, F. A. de O. (2020). Estudo do Decaimento Radioativo com o Uso da Plataforma PhET: uma Proposta para EaD. *EaD Em Foco*, 10(1), e925. doi: 10.18264/eadf.v10i1.925
- Medeiros, A., Medeiros, C. F. D. (2002). Possibilidades e limitações das simulações computacionais no ensino da Física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 24, 77-86. doi: 10.1590/S0102-47442002000200002
- Mesquita, D. G., Dytz, A. G. (2019). Simulador de Medidor de Atividade para Práticas de Ensino. *Revista Brasileira de Física Médica*, 13(3), 53-59. doi: 10.29384/rbfm.2019.v13.n3.p53-59.
- Monsanto, S. D. A. (2017). *Física experimental*. São Carlos: Coleção UAB-UFSCar. Recuperado de http://livresaber.sead.ufscar.br:8080/jspui/bitstream/123456789/2697/1/EA_Monsanto_FisicaExperimental.pdf
- Monteiro, J., Vilhena, M., Silva, F., Lucena, I., Coutinho Júnior, A. (2022). Arduino no Ensino de Física: uma Revisão Sistemática de Literatura de 2011 a 2021. *Amazônia: Revista de Educação em Ciências e Matemáticas*, 18(40), 177-190. doi:<http://dx.doi.org/10.18542/amazrecm.v18i40.12175>
- Moreira, M. A. (2018). Uma análise crítica do ensino de Física. *Estudos Avançados*, 32(94), 73–80. doi:10.1590/s0103-40142018.3294.0006
- Okuno, E., Caldas, I. L., Chow, C. (1986). *Física para ciências biológicas e biomédicas*, São Paulo: Harbra.
- Okuno, E., Yoshimura, E. M. (2010). *Física das radiações (1a ed.)*, São Paulo: Oficina de Textos.
- Pszybylski, R. F., Motta, M. S., Kalinke, M. A. (2020). Uma revisão sistemática sobre as pesquisas realizadas em programas de mestrado profissional que versam sobre a utilização de smartphones no ensino de Física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 37(2), 406-427. doi: 10.5007/2175-7941.2020v37n2p406
- Reis, D. S.; Rivas, S. C. (2020). *Ensinar digital: estratégias de ensino para a potencialização de sessões remotas (1a ed.)*. Salvador: Trama Educacional.
- Rutherford, E., Soddy, F. (1902). The cause and nature of radioactivity. *Philosophical Magazine*, 4(21), 370-396, 1902.
- SciDAVis. Versão 2.9.2. Miquel Garriga, Arun Narayanankutty, Dmitriy Pozitron, Russell Standish, 2022.
- Silva, G. S. F., Villani, A. (2009). Grupos de aprendizagem nas aulas de física: as interações entre professor e alunos. *Ciência & Educação*, 15(1), 21-46. doi: 10.1590/S1516-73132009000100002
- Terrazzan, E. A. (1992). A inserção da física moderna e contemporânea no ensino de Física na escola de 2º grau. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 9(3), 209-214.
- Vigotski, L. S. (2007). *A formação social da mente: o desenvolvimento dos processos psicológicos superiores*. Michael Cole et al. (Org.). Tradução de José Cipolla Neto; Luís Silveira Menna Barreto e Solange Castro Afeche. São Paulo: Martins Fontes, 1984 (1930).