

Uso de simulações: Um estudo sobre potencialidades e desafios apresentados pelas pesquisas da área de ensino de física

Use of simulations: a study on Potentialities and challenges presented by research in the area of physics teaching

Danay Manzo Jaime^{*1}, André Ary Leonel²

¹Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Departamento de Física, Florianópolis, SC, Brasil.

²Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências da Educação, Departamento de Metodologia de Ensino, Florianópolis, SC, Brasil.

Recebido em 19 de outubro de 2023. Revisado em 13 de novembro de 2023. Aceito em 30 de novembro de 2023.

O presente trabalho tem como objetivo apresentar um panorama geral das publicações na área de Ensino de Física que envolvem o uso de simulações computacionais. Foram selecionados trabalhos da Revista Brasileira de Ensino de Física (RBEF) e do Caderno Brasileiro de Ensino de Física (CBEF), os quais mostram as potencialidades e desafios que o uso de simulações computacionais apresenta para o Ensino de Física. Como potencialidades os trabalhos destacam que as simulações: ampliam o poder de observação e compreensão do fenômeno que está sendo trabalhado, apresentam o conteúdo de forma mais interessante para os educandos, trazem maior interação em sala de aula, levam a uma melhor visualização de conceitos abstratos e que educando se torna agente ativo em sala de aula. Os possíveis desafios elencados foram: dificuldade do processo de modelagem do fenômeno, falta de pesquisa na área, dificuldade do educador em conseguir mostrar as limitações que o modelo apresenta, necessidade das escolas estar equipadas com computadores e internet e falta de formação para o educador aprender a trabalhar tanto como modelagem, tanto com o próprio *software* de simulação.

Palavras-chave: Ensino de Física, Simulações computacionais, Potencialidades, Desafios.

The present work has as goal to present an overview on the recent literature related to Physics Teaching involving the use of computational simulations. Works from the Revista Brasileira de Ensino de Física (RBEF) and Caderno Brasileiro de Ensino de Física (CBEF) were selected, which show the potentialities and challenges that the use of computational simulations presents for Physics Teaching. As potentialities, the works highlight that simulations: expand the power of observation and understanding of the phenomenon being worked on, present the content in a more interesting way for students, bring greater interaction in the classroom, lead to a better visualization of abstract concepts and that the student becomes an active agent in the classroom. The possible challenges that were cited are: difficulty in the process of modeling the phenomenon, lack of further research in the area, the need for educators to be able to show the limitations that the model presents, the need for schools to be equipped with computers and the internet, which educators need of a preparation to learn to work both with modeling and with the simulation software itself.

Keywords: Physics Teaching, Computer Simulation, Potentialities, Challenges.

1. Introdução

Ao ministrar aulas de física, educadores frequentemente empregam representações alternativas, que vão desde descrições com texto e imagens dos fenômenos físicos a representações simbólicas e gráficas dos conceitos e princípios físicos. Representações complementares podem descrever vários aspectos de um mesmo fenômeno ou conceito físico que não poderia ser descrito por meio de uma representação única. Quando implementadas, elas trazem um entendimento mais aprofundado do sistema

que está sendo estudado. O uso de computadores oferece uma oportunidade adicional para os educadores tirarem proveito de representações dinâmicas que são usadas para descrever fenômenos e conceitos físicos que mudam no tempo e no espaço [1].

O desenvolvimento significativo da Internet nos dias de hoje torna possível a transmissão de documentos contendo texto, som e vídeo. Com a introdução de linguagens como o *Java*, pequenos programas de multimídia foram adicionados a páginas web. Sendo assim, educadores e educandos puderam se beneficiar de simulações computacionais disponíveis gratuitamente na web [2].

*Endereço de correspondência: profandrefsc@yahoo.com.br

O uso educacional de simulações computacionais oferece aos educandos a oportunidade de descobrir as propriedades de um modelo por meio da aquisição e análise de dados fornecidos por programas. Essas atividades tendem a promover habilidades de resolução de problemas nos estudantes [3]. As possibilidades de uso dos computadores como ferramenta pedagógica vêm sendo discutidas cada vez com maior frequência. Dentre essas possibilidades, a simulação de experimentos de física tem sido a mais explorada. O uso de programas de simulação permite uma melhor compreensão de alguns fenômenos físicos, uma vez que inclui elementos gráficos e animações no mesmo ambiente. Isso, juntamente com o interesse dos educandos pelas tecnologias, poderia tornar o processo de ensino-aprendizagem mais eficiente e agradável [4, 5].

Zacharia e Anderson [6] defendem um Ensino de Física que leve os educandos a uma compreensão conceitual do fenômeno que está sendo tratado. Eles mencionam que o uso de simuladores pode e deve auxiliar em sala de aula, com o objetivo de fomentar experiências interativas com o fenômeno físico que está sendo trabalhado. Vale destacar que, mesmo diante desses benefícios, devemos ser cautelosos, deixando claras as limitações relacionadas ao modelo que está por trás da simulação que está sendo utilizada. É primordial explicar para os educandos que os sistemas reais são extremamente complexos e que as simulações são desenvolvidas baseadas em modelos que já apresentam simplificações e aproximações da realidade [7].

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo obter um panorama geral das publicações na área de Ensino de Física que envolvem o uso de simulações computacionais, a partir da Revista Brasileira de Ensino de Física (RBEF) e do Caderno Brasileiro de Ensino de Física (CBEF), com foco nas potencialidades e desafios elencados nos trabalhos analisados.

2. Metodologia da Pesquisa

A pesquisa atual propõe obter um panorama das publicações dos últimos anos sobre o uso de simulações no Ensino de Física, buscando assim entender suas potencialidades e limitações enquanto recurso didático e com isto suas possibilidades de uso como recurso pedagógico. Sendo assim, analisaremos um conjunto de artigos publicados na RBEF e no CBEF por serem as revistas mais antigas na área de Ensino de Física no Brasil.

A RBEF surgiu devido ao crescimento dos diversos grupos de ensino no Brasil, o que levou à criação de um veículo próprio onde pudessem aprofundar e dar a conhecer os trabalhos e conhecimentos relacionados à área de Ensino de Física. Assim, no ano de 1979 foi criada a Revista de Ensino de Física (REF), revista mais antiga editada no Brasil e dedicada com exclusividade ao Ensino de Física. A partir do ano de 1992, a REF

passou a se chamar Revista Brasileira de Ensino de Física, nome que é mantido até a atualidade [8, 9]. Ainda no século XX, especificamente no ano 1984, foi criado o Caderno Catarinense de Ensino de Física (CCEF) pelos professores do Departamento de Física da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), com objetivo de apresentar um instrumento que permitisse a troca de experiências educacionais entre todos os professores de Santa Catarina. No ano de 2002 o nome dessa revista foi mudado para Caderno Brasileiro de Ensino de Física, dando a ela um caráter mais nacional [8, 9].

Para fazer a análise dos trabalhos encontrados será utilizada a “Análise de conteúdo” [10], que é uma análise de dados qualitativos. Para aplicarmos a metodologia mencionada, devemos seguir três etapas: pré-análise, exploração do material e tratamento dos resultados, a interferência e interpretação. A primeira etapa tem como objetivo a escolha dos documentos que tratam do tema a ser estudado, a formulação das hipóteses, os objetivos do trabalho e a elaboração de indicadores que encaminhem à interpretação final. A segunda etapa consiste em codificar ou enumerar os trabalhos selecionados e a terceira etapa consiste em tratar os resultados de maneira a serem significativos e válidos.

3. Uso de Simulação no Ensino de Física

As últimas décadas trouxeram uma ascensão do uso das tecnologias alinhado ao avanço da ciência, devido ao desenvolvimento de computadores, a disseminação do seu uso, a invenção da Internet e em específico ao desenvolvimento de softwares especializados. A tendência do dia a dia é o uso de diferentes ferramentas e dispositivos tecnológicos na sociedade. O sistema educacional não tem sido imune a essa evolução, pelo contrário, por maior que seja a defasagem no ambiente escolar em relação à integração, diversos estudos apontam para o crescimento do uso dessas novas tecnologias no processo de ensino-aprendizagem, gerando com isso mudanças no papel do educador e do educando em sala de aula [11–14].

Assim, a integração das Tecnologias Digitais da Informação e da Comunicação (TDIC) no processo educacional pode trazer mudanças no processo de ensino-aprendizagem e vários pesquisadores da área têm se dedicado a estudar e compartilhar suas concepções sobre esses artefatos [13, 15, 16]. Neste sentido, a escola, sendo um dos principais espaços de formação e transformação, precisa problematizar o controle e as implicações que as TDIC podem exercer sobre nossas vidas, a fim de promover um uso consciente, de forma crítica e criativa [13].

Especificamente na área da Física, onde trabalha-se com conceitos técnicos e abstratos, o uso de computadores e de simulações especificamente, oferecem um auxílio importante para a aprendizagem dos mesmos. As simulações computacionais podem trazer maior liberdade para explorar, observar e analisar um determinado fenômeno [17].

O Ensino de Física em escolas e universidades tem sido uma tarefa difícil para a maioria dos educadores. Dentre as razões para isso temos que a Física lida com conceitos que precisam uma dose alta de abstração e que ao mesmo tempo são apresentados utilizando uma linguagem matemática. Conceitos como o de partículas subatômicas, propriedades do espaço-tempo em altas velocidades e outros processos de elevada complexidade escapam da intuição vinda da nossa experiência diária. Esses tipos de situações fazem com que, em certas ocasiões, o educando sintam-se entediado e até frustrado por não conseguir compreender o conteúdo apresentado [18].

Neste contexto, simulações computacionais podem ser de grande utilidade, pois elas vão muito além de simples animações permitindo a geração e o estudo de dados que hipoteticamente descrevem um determinado problema. Isso permite, no educando, o desenvolvimento de uma espécie de intuição ou conhecimento primário que se encontra na base da compreensão de qualquer fenômeno físico [19]. Esse processo, promovido pela interação com simulações computacionais, que trazem situações diversas através do *input* de parâmetros escolhidos pelo educador ou pelo próprio educando, fazem com que tenhamos dentro da mesma simulação situações diversas sendo representadas.

É importante ressaltar que toda simulação se baseia num modelo matemático que “descreve” uma situação real, modelo que depois é matematizado e processado pelo computador, com a finalidade de apresentar uma animação. Sendo assim, toda simulação computacional está necessariamente baseada na existência de um modelo que dá suporte e valida a ideia apresentada. Muitas são as vantagens das simulações serem utilizadas em sala de aula no processo de ensino-aprendizagem. Dentre os principais benefícios citados pela literatura, cabem destaque:

- Alto nível de interatividade dos educandos;
- Maior interesse do educando na sala de aula;
- Teste de diversas hipóteses;
- Tornar conceitos abstratos mais concretos;
- Promover habilidades de raciocínio crítico;
- Compreensão mais aprofundada do fenômeno físico.

No entanto, é importante observar que, embora as simulações computacionais sejam um trunfo no processo de ensino-aprendizagem de Física, elas não são uma garantia de sucesso total. Apesar dos muitos benefícios do uso da simulação, também existem alguns desafios que precisam ser enfrentados. Um dos principais desafios é que as simulações podem ser complexas e difíceis de usar, o que pode dificultar o entendimento dos educandos sobre o tema a ser tratado.

É importante destacar que o sistema real é frequentemente complexo demais e a simulação que o descreve está baseada em simplificações e aproximações da realidade. Dependendo da modelagem do sistema físico a ser representado, a simulação se torna mais ou menos

“realista” [20]. Esses pressupostos que estão contidos nas simplificações do modelo, passam frequentemente despercebidos pelos educandos e às vezes até são de difícil compreensão para os educadores.

Modelo no nosso contexto seria uma representação idealizada e simplificada da realidade, construída para descrever, prever e/ou explicar um determinado fenômeno. Em física são utilizados modelos matemáticos, onde as variáveis representam propriedades físicas e com elas são estabelecidas relações que permitem descrever, prever e explicar um determinado fenômeno que se pretende estudar.

Durante a modelização são realizadas escolhas, simplificações, aproximações e idealizações imprescindíveis ao processo, já que devido à complexidade do sistema real, seria impossível tratar todas as características presentes e estabelecer relações entre elas. Isto não desqualifica, nem faz com que o processo de modelização seja comprometido, devido às dificuldades matemáticas e instrumentais. O grau de precisão do modelo é definido por quem está realizando o processo de modelização, dependendo do que se deseja mostrar, são decididas as simplificações e aproximações, o que vai limitando o quanto o modelo vai reproduzir o que observamos no sistema real.

É importante entender que uma animação nunca é uma cópia fiel da realidade. A modelagem precisa estar clara para educadores e educandos, os limites de validade do modelo precisam ser discutidos, caso contrário as simulações podem causar mais danos no processo de ensino-aprendizagem do que frutos.

4. Revisão Bibliográfica

No presente trabalho, o processo inicial corresponde a uma pré-análise, onde são levantados os artigos publicados no CBEF e na RBEF. A palavra-chave utilizada na pesquisa no CBEF foi “simulações” e com isto foram encontrados 27 trabalhos ao todo. Quando utilizada a mesma metodologia de busca na RBEF foi reportado somente um trabalho, demandando uma modificação no caminho para a seleção dos trabalhos nesta revista. Primeiramente a pesquisa foi realizada manualmente para cada ano, foram lidos os títulos dos trabalhos reportados, separando assim todos os trabalhos que tratavam o tema de simulações ou recursos computacionais, resultando um total 101 trabalhos. Após separados os trabalhos encontrados, no caso do CBEF, os títulos e os resumos de cada trabalho foram lidos. Com esse segundo passo, de 27 trabalhos encontrados inicialmente, 18 trabalhos estavam diretamente vinculados com o tema da nossa pesquisa. Os trabalhos foram divididos por área de conhecimento da Física à que faziam referência, esses dados se encontram reportados no Quadro S1, disponível como material suplementar.

No caso da RBEF, dos 101 trabalhos reportados inicialmente, 54 abordavam especificamente o tema de

uso de simulações computacionais no Ensino de Física. Logo, eles foram divididos também por área de conhecimento da Física à que faziam referência, esses dados se encontram reportados no Quadro S2, também como material suplementar. Vale destacar que o total de trabalhos no quadro Quadro S2 é de 55, isso se deve a que o trabalho RBEF38 traz a discussão de duas áreas do conhecimento, sendo elas: Mecânica e Física Nuclear.

Tanto no CBEF quanto na RBEF os trabalhos que foram desconsiderados traziam a palavra simulação para experimentos que simulavam algum aspecto da realidade, mas eram desenvolvidos de forma manual. Outro motivo para desconsiderar trabalhos foi que alguns traziam a palavra simulação no texto, porém não traziam nada sobre programas utilizados para resolver algum problema da área da Física ou sobre o uso desse recurso no Ensino de Física. Também existia uma grande quantidade de trabalhos que usavam as simulações para resolver equações matemáticas sem focar no conteúdo abordado e/ou no processo de ensino-aprendizagem da Física.

Concluindo, foram considerados um total de 18 trabalhos no CBEF e de 54 trabalhos na RBEF, após terem sido descartados os artigos que não se encaixavam ao objetivo desta pesquisa. Esses trabalhos foram divididos por área do conhecimento da Física à que faziam referência. O Quadro S3, do material suplementar, apresenta o quantitativo total por área, incluindo as duas revistas.

Após os trabalhos terem sido divididos por área do conhecimento da Física à que faziam referência, todos eles foram codificados e organizados nos Quadros S4 e S5 do material suplementar, com os respectivos links, para facilitar o acesso.

5. Potencialidades e Desafios Apresentados Pelos Trabalhos Selecionados

Nessa seção serão discutidas as concepções apresentadas pelos trabalhos selecionados tanto no CBEF quanto na RBEF, com foco nas potencialidades e desafios que o uso de simulações traz como recurso didático para ser utilizado em sala de aula. Em Manzo [21], são apresentadas as principais características de cada um dos trabalhos selecionados. Neste artigo, por conta da limite de página, pretendemos apresentar uma síntese trazendo as principais potencialidades e desafios que os mesmos pontuam quando se trata do uso de simulações computacionais no Ensino de Física.

É trazido pelos autores dos artigos CBEF1, CBEF2 e CBEF11 que o uso de simulações computacionais pode fazer com que o educando apresente um ganho significativo no processo de ensino-aprendizagem, aumentando a sua compreensão sobre os fenômenos tratados, os tornando mais curiosos, interessados e agentes ativos em sala de aula. Isto também se deve, segundo os autores do CBEF5, a que numa mesma simulação diversos

parâmetros podem ser variados, melhorando o entendimento do educando sobre o tópico abordado. É trazido nos artigos CBEF3 e CBEF6 que com a inclusão da modelagem, a aprendizagem se torna mais sólida, uma vez que, na maioria dos casos, são os próprios educandos que modelam o processo físico e é nesse processo de fazer escolhas e aproximações que as discussões vão os levando a um maior ganho conceitual sobre o tema.

Por outro lado, simulações computacionais trazem vários novos desafios em sala de aula. Para seu uso é importante, segundo os artigos CBEF2 e CBEF12, que o educador consiga escolher a simulação adequada para cada conteúdo que será apresentado e faça a mediação correta durante o processo de ensino/aprendizagem. Os artigos CBEF12 e RBEF9 mencionam que o educador deve conhecer a ferramenta que será utilizada, saber suas limitações, quais as aproximações que foram realizadas na construção do modelo. Além disso, o educador deve saber explorar o simulador para que assim os educandos não apresentem dificuldades de compreensão desse novo recurso didático e entendam suas limitações, o que pode ser realizado com um estudo prévio do simulador a ser trabalhado. Outro ponto destacado pelos autores dos artigos CBEF4, CBEF18 e RBEF47 é a necessidade de termos mais pesquisas na área, com trabalhos que tragam o estudo do uso dessa ferramenta e suas implicações no processo de ensino/aprendizagem de Física. Também são trazidos problemas que dizem respeito aos recursos com os quais as escolas contam, os artigos CBEF12, CBEF15 e RBEF17 mencionam que para a utilização de simuladores é preciso de computadores e de uma internet que dê suporte para conseguir fazer com que o recurso usado funcione de forma correta. Existe na atualidade uma grande diferença entre escolas quanto aos recursos que elas contam, escolas do interior carecem de computadores e laboratórios preparados para realização de aulas que utilizem simulações computacionais. Devido a isto, é sempre colocado em pauta a necessidade da utilização de recursos variados, para assim conseguir fazer com que o educando consiga, com metodologias diferentes, um conhecimento mais sólido dos conteúdos que serão tratados. Outro ponto importante a ser destacado é que, o fato da escola contar com Laboratórios de Informática equipados não garante a utilização de simulações computacionais em aulas de Física, muito menos o uso qualificado destes recursos. Os educadores precisam de uma formação permanente que contribua com o uso crítico e criativo desses recursos.

6. Considerações Finais

O objetivo deste trabalho foi obter um panorama das publicações que tinham como base o uso de simulações computacionais no Ensino de Física. A metodologia utilizada para essa etapa foi a análise de conteúdo, iniciada com o levantamento dos trabalhos publicados na Revista Brasileira de Ensino de Física e no Caderno

Brasileiro de Ensino de Física. Para a primeira revista a pesquisa foi realizada manualmente, enquanto que para a segunda foi possível utilizar o motor de busca da revista, considerando o termo “simulações”. Após o levantamento dos trabalhos, foi lido o resumo de cada um deles e desconsiderados aqueles que apresentavam o termo simulação, mas não contemplavam o escopo deste artigo. Com esse processo, foi considerado um total de 18 trabalhos do CBEF e de 54 trabalhos da RBEF.

Após a análise dos trabalhos, conseguimos fazer um levantamento das possíveis potencialidades e desafios relacionados ao uso de simuladores. Como potencialidades é destacado que: ampliam o poder de observação e compreensão do fenômeno que está sendo trabalhado, o conteúdo se apresenta mais interessante para os educandos, maior interação em sala de aula, visualização de conceitos abstratos e potencial para tornar o educando como sujeito ativo em sala de aula. Com relação aos desafios, vale destacar: dificuldade do processo de modelagem do fenômeno, falta de pesquisa na área, dificuldade do educador saber mostrar as limitações que o modelo apresenta, necessidade das escolas estar equipadas com computadores e internet e falta de formação para que o educador possa aprender a trabalhar tanto como modelagem como com o próprio *software* de simulação.

Atualmente os educandos vem mostrando um desinteresse maior pelas aulas de Física, fato que está ligado às poucas horas aula que são dedicadas à disciplina no Ensino Médio, à falta de recursos que existem nas escolas para a realização de atividades experimentais que aumentem o interesse e engajamento da turma e ao fato da disciplina, na maioria das vezes, ser apresentada desconexa da realidade [22]. A partir deste estudo, podemos inferir que as simulações apresentam potencial para reverter essa situação. Contudo, não é a mera inclusão destes recursos na aula de Física que irá resolver o problema.

É necessário que aos educadores e educadoras que ensinam Física seja disponibilizada uma estrutura adequada para que possam fazer pesquisas, planejar suas aulas e assim explorar todo potencial das TDIC, incluindo as simulações. Também é necessário que a formação inicial promova o uso destas tecnologias de forma crítica e criativa e que haja oferta de formação permanente para promover e qualificar o uso das mesmas.

Material suplementar

O seguinte material suplementar está disponível online:

Quadro S1: Número de trabalhos reportados para cada área de conhecimento da Física no CBEF.

Quadro S2: Número de trabalhos reportados para cada área de conhecimento da Física na RBEF.

Quadro S3: Número de trabalhos reportados para cada área de conhecimento da Física na RBEF e no CBEF.

Quadro S4: Publicações do CBEF.

Quadro S5: Publicações da RBEF.

Referências

- [1] R. Ploetzner, S. Lippitsch, M. Galmbacher, D. Heuer e S. Scherrer, *Computer in Human Behavior* **25**, 56 (2009).
- [2] A.J. Martins, C. Fiolhais e J. Paiva, *Revista Brasileira de Informática na Educação* **11**, 1 (2003).
- [3] H.C. Liu, T. Andre e T.J. Greenbowe, *Journal of Science Education and Technology* **17**, 466 (2008).
- [4] Y. Ding e H. Fang, in *Anais do International Workshop on Education Technology and Computer Science* (IEEE, Wuhan, 2009).
- [5] E. Sengel e M.Y. Ozden, *Eurasian Journal of Education Research* **39**, 191 (2010).
- [6] Z.C. Zacharia e O.R. Anderson, *American Journal of Physics* **71**, 618 (2003).
- [7] S. Yeo, R. Loss, M.G. Zadnik, A. Harrison e D.F. Treagust, *American Journal of Physics* **72**, 1351 (2004).
- [8] R. Nardi, *Ensino de Ciências da Natureza na América Latina* **2**, 13 (2014).
- [9] F.L.A. Pena, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **31**, 4101 (2009).
- [10] L. Bardin, *Análise de Conteúdo* (Edições 70, São Paulo, 2011), v. 1.
- [11] R.A. Terini e M.A. Cavalcante, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **11**, 33 (1994).
- [12] A. Medeiros e C.F. Medeiros, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **24**, 77 (2002).
- [13] A. Leonel, *Formação continuada de professores de física em exercício na rede pública estadual de Santa Catarina: lançando um novo olhar sobre a prática*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis (2015).
- [14] E.S. Araújo, J.L.B. Nascimento, J.C. Silva e C.F. Andrade, *Revista de Ensino de Ciências e Matemática* **12**, 1 (2021).
- [15] J.A. Macêdo, A.G. Dickman e I.S.F. Andrade, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **29**, 562 (2012).
- [16] E.C. Gomes, X.L.S.O. Franco e A.S. Rocha, *Uso de Simuladores para potencializar a aprendizagem do Ensino de Física* (EDUFT, Araguaína, 2020), v. 1.
- [17] W. Reusch, em: *Proceedings of the GIREP-ICTP International Conference: New Ways of Teaching Physics* (Ljubjana, Slovenia, 1996).
- [18] M. Trampus e G. Velenje, em: *Proceedings of the GIREP-ICTP International Conference: New Ways of Teaching Physics* (Ljubjana, Slovenia, 1996).
- [19] B. Gaddis, *Learning in a Virtual Lab: Distance Education and Computer Simulations*. Tese de Doutorado, University of Colorado, Springs (2000).
- [20] L. Bergqvist, *Monte Carlo Simulations of Ferromagnetic Quasi Two Dimensional Spin Model Systems*. Tese de Doutorado, Uppsala University, Uppsala (2000).
- [21] D.M. Jaime, *O uso de simulações no Ensino de Física: uma sequência didática para o estudo de gases*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis (2023).
- [22] M.A. Moreira, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **43**, e20200451 (2021).