



Avaliação de dois Documentários sobre Física Quântica e seu Possível uso no Ensino Médio

Evaluation of two Documentaries on Quantum Physics and their possible use in High School

LUIZ HENRIQUE MARTINS ARTHURY¹

¹Instituto Federal de Santa Catarina.

Resumo

Visando subsidiar o professor para trabalhar tópicos de física moderna no ensino médio, apresentamos e avaliamos dois documentários sobre física quântica: o episódio Salto Quântico, da série A Fábrica do Cosmos, e o episódio O Pesadelo de Einstein, da série Os Segredos da Física Quântica. Para não restringir a análise a uma única leitura, realizamos uma breve pesquisa qualitativa junto a quatro licenciandos em física, buscando uma caracterização potencialmente útil para o professor desejoso em trabalhar o assunto na educação básica. Apesar de serem documentários de boa qualidade, apresentados por físicos atuantes na área, apontamos que podem levar a compreensões inadequadas caso o professor não esteja atento em como trabalhar os assuntos junto aos estudantes. A partir das respostas dos licenciandos a um questionário, sugerimos que esses recursos audiovisuais podem auxiliar o professor no trabalho do tema em turmas do ensino médio..

Palavras-chave: Física Moderna no Ensino Médio. Física Quântica no Ensino Médio. Documentários no Ensino.

Abstract

Aiming to support the teacher to work on topics of modern physics in high school, we present and evaluate two documentaries on quantum physics: the episode "Quantum Leap", from the series "The Cosmos Factory", and the episode "Einstein's Nightmare", from the series The Secrets of Quantum Physics. In order not to restrict the analysis to a single view, we carried out a brief qualitative research with four undergraduate physics students, seeking a potentially useful characterization for the teacher willing to manage the subject in basic education. Despite being good quality documentaries, presented by physicists working in the field, we point out that they can lead to inadequate understanding if the teacher is not aware of how to work the subjects with the students. Based on the students' answers to a questionnaire, we suggest that these audiovisual resources can help the teacher to work on the topic in high school classes.

Keywords: *Modern Physics in High School. Quantum Physics in High School. Documentaries in Teaching.*

I. INTRODUÇÃO

A quântica¹ é uma das teorias mais abrangentes e de maior sucesso de toda a ciência. Se por um lado os pré-requisitos para sua efetiva compreensão são vastos e distantes dos conteúdos trabalhados no ensino médio, por outro sua importância no entendimento de diversos fenômenos e aplicações tornam a quântica um tema de grande importância na educação básica. O regime quântico na natureza e todos os seus resultados no estudo de partículas, átomos, moléculas, representam uma das áreas mais tecnologicamente impactantes da física, de onde resultou boa parte de nossa moderna tecnologia eletrônica. Entrementes, a quântica tem sido associada a pseudagens² frequentes na cultura popular (CRUZ e CRUZ, 2009; SCHAPPO, 2021), e por isso seu trabalho, na educação básica, é também uma questão de educação científica, imprescindível para a constituição de sujeitos críticos e conscientes do alcance (e dos limites) do que sabemos hoje sobre a natureza e sobre o que conseguimos com ela.

Não é tarefa simples e imediata a conceituação da física quântica, particularmente para a educação básica. Mas, como defenderemos repetidamente, é algo essencial e mesmo compulsório que, em algum momento, os alunos do ensino médio sejam mobilizados em discussões sobre o tema "O que é a Teoria Quântica? Em pouquíssimas palavras, é uma teoria que concilia, de alguma maneira, aspectos contínuos (ondulatórios) e discretos (corpúsculares)" (PESSOA Jr., 2006, p. 89). Ou seja, "o que caracteriza a teoria quântica de maneira essencial é que ela é a teoria que atribui, para qualquer partícula individual, aspectos ondulatórios, e para qualquer forma de radiação, aspectos corpúsculares" (PESSOA Jr., 1997, p. 28). Outros elementos essenciais são:

¹Assim também denominaremos a Física Quântica, Mecânica Quântica ou Teoria Quântica, por simplicidade.

²Pseudagem é um neologismo que vem sendo empregado para se referir, de modo sucinto, a narrativas e práticas pseudocientíficas em geral.

- a) [...] a presença de quantidades discretas, como os pacotes de energia, ou de processos descontínuos. b) [...] o papel que a probabilidade nela [na teoria] desempenha, descrevendo um mundo essencialmente indeterminista. c) [...] o princípio de incerteza, segundo o qual a posição e a velocidade de uma partícula não podem mais ser determinadas simultaneamente. d) [...] o observador não pode ser separado do objeto que está sendo observado (PESSOA Jr., 1997, p. 27).

Claro, é necessário que sejam trazidas aos alunos as situações conceituais e experimentais mais específicas que apontem para esses elementos e, como veremos adiante, os documentários podem ser uma ferramenta importante para a ilustração desses fenômenos, ao menos para formar uma imagem adequada do campo de conhecimento da quântica.

A inserção da física moderna no ensino médio é imprescindível para trazer ao aluno discussões sobre áreas científicas que praticamente determinam seu atual modo de vida, além de representar conceitos contemporâneos que chegam ao aluno via diversos canais de comunicação e redes sociais. Há décadas os pesquisadores da área de ensino têm insistido na importância de trazer a física moderna para a educação básica (OSTERMANN e MOREIRA, 2000; SILVA e ALMEIDA, 2011), ocupando espaços que, de outra forma, seriam preenchidos por pseudociência. A quântica traz diversos conceitos que foram usurpados por misticismos e charlatanismo (DIONÍSIO, 2004; CRUZ e CRUZ, 2009; PESSOA Jr., 2010; MOURA e SANTOS, 2017; SCHAPPO, 2021) que exploram o público leigo, e o professor de física não pode se furtar a chamar para si a responsabilidade de, no mínimo, fazer-se presente com o tema em suas aulas de física.

Naturalmente existem diversos desafios de transposição da quântica para o ensino médio, mas, felizmente, alguns trabalhos têm proposto possibilidades interessantes e factíveis (PAULO e MOREIRA, 2004; SALES et al., 2008; PAGLIARINI e ALMEIDA, 2016; FERNANDES et al., 2017; LIMA e RICARDO, 2019; CORRÊA e ARTHURY, 2021), e devemos aumentar os esforços para o assunto estar tão naturalizado, nas aulas de física, quanto a dinâmica ou a gravitação.

A quântica traz conceitos bastante chamativos por sua natureza revolucionária em relação a conceitos clássicos da física, ao mesmo tempo em que sua estrutura matemática está distante do que o aluno conhece no ensino médio. Mas, à semelhança do que apontam os trabalhos acima, sempre é possível trabalhar em alguma medida esses conceitos, de modo que o estudante ao menos saiba do que se trata o campo de conhecimento da quântica, o que pode ajudá-lo também a saber do que não se trata. Uma visão qualitativa está ao alcance do aluno que, com os esforços do professor, pode formar uma visão adequada do tema.

Por se tratar de um tema carregado de conceitos desafiadores à ensinagem³ de física, além de possíveis abordagens centradas em diversas propostas metodológicas (sobre as quais os trabalhos acima se destacam), consideramos importante utilizar recursos audiovisuais que possam auxiliar a exposição do professor. Neste trabalho, sugerimos a possibilidade de se abordar os elementos essenciais da quântica por meio do uso de dois documentários,

³Ensinagem é uma palavra interessante para se referir, a um mesmo tempo, ao ensino e à aprendizagem, como usado, por exemplo, em Studart, 2019.

Salto Quântico e O Pesadelo de Einstein, descritos e avaliados na sequência.

Para essa avaliação, fizemos uma breve pesquisa com estudantes formandos de um curso de licenciatura em física, que assistiram a ambos os documentários no contexto de uma disciplina de Mecânica Quântica no Ensino Médio. Apresentamos na sequência a caracterização desses documentários e a pesquisa realizada com os estudantes, constituindo uma descrição que pode ajudar o professor de física nas suas escolhas didáticas para tratar desse tema no ensino médio.

II. DOCUMENTÁRIOS NO ENSINO DE CIÊNCIAS E BREVE DESCRIÇÃO DAS OBRAS ANALISADAS

Vivemos uma era da informação, onde os recursos audiovisuais são ferramentas de comunicação praticamente onipresentes nos mais diversos contextos sociais. Os documentários audiovisuais voltados a uma narrativa de não ficção surgiram na década de 1920 (PENAFRIA, 1999) e, entre autores e produtores,

ficou definido que, no documentário, é absolutamente essencial que as imagens do filme digam respeito ao que tem existência fora dele. Esta é a principal e primeira característica do documentário. A segunda, já em estúdio, é a organização das imagens obtidas in loco [...]. O documentarista, por seu lado, é cúmplice das características enunciadas (PENAFRIA, 1999, p. 39).

Na educação, existem propostas de uso de documentários desde o surgimento desse tipo de recurso audiovisual (JESUS, 2008; VIEIRA e MARTINS, 2017). Contudo, seu uso ocorre normalmente frente a uma substituição do professor, sendo uma extensão da aula tradicional, onde o aluno passivamente apreende (se é que apreende) a informação.

Os vídeos possuem a potencialidade de motivar, ilustrar, orientar, demonstrar e tantas outras possibilidades de aproximação, porém, apesar de estarem muito presentes no cotidiano das pessoas, não são discutidos na escola na mesma proporção, se restringindo na maioria das vezes em um reflexo da aula tradicional (VIEIRA e MARTINS, 2017).

Isso se torna um problema particularmente quando, ao considerarem como fontes fidedignas da realidade (VIDAL e REZENDE FILHO, 2010), os próprios professores não possuem conhecimento adequado para avaliar criticamente os documentários utilizados de modo a contornar trechos mais conjecturais ou subjetivos.

Somado a isso, a física quântica, ao mesmo tempo em que é uma das áreas mais importantes da ciência moderna, também foi tomada por grupos de pensamento esotérico ou mesmo charlatões (CRUZ e CRUZ, 2009; PESSOA Jr., 2010; MOURA e SANTOS, 2017; SCHAPPO,

2021). Ao fazer uma pesquisa descompromissada na internet, um aluno desavisado tem uma chance bastante grande de se aproximar desse uso indébito da quântica, com produtos, técnicas de meditação, dicas de autoajuda e até mesmo terapias alternativas que podem ser um grande problema de saúde pública.

Já nos deparamos até mesmo com trabalhos acadêmicos usando trechos de vídeo de um Doutor Quantum, um personagem animado que explica alguns fenômenos associados à quântica. Apesar de algumas falas desse personagem estarem de acordo com as discussões feitas sobre, por exemplo, o experimento de fenda dupla, essa animação faz parte de um (pseudo)documentário pseudocientífico, traduzido no Brasil para Quem Somos Nós? (ARNTZ, 2004). Esse documentário traz diversas afirmações totalmente às margens da ciência (apesar de se travestir justamente de ciência, o que é típico e esperado das pseudociências), como a alegação de que o pensamento por si só poderia modificar o estado físico de uma substância ou mesmo atrair boaventuras.

Felizmente existem obras mais sérias, visualmente bem mais competentes e apresentadas por divulgadores com formação e expertise na área⁴. Dentre diversos vídeos existentes na internet sobre o tema, escolhemos dois específicos para nossa avaliação em relação ao seu uso no ensino médio, por serem obras profissionais de divulgação científica de produtoras consolidadas, com exibição em canais importantes e de grande circulação.

O primeiro documentário é o episódio Salto Quântico, da série A Fábrica do Cosmos (GREENE, 2011) apresentada pelo físico e divulgador da ciência norte-americano Brian Greene. O segundo documentário é o episódio O Pesadelo de Einstein, da série Os Segredos da Física Quântica (AL-KHALILI, 2014), apresentado pelo também físico e divulgador da ciência iraquiano Jim Al-Khalili (naturalizado britânico). Ambos os documentários são obras de divulgação com uma qualidade visual bastante atraente, o que pode ser de grande valia para seu uso junto à educação básica.

Conforme classificação de Nichols (2005), existem basicamente seis tipos ou gêneros de documentários: poético, expositivo, observativo, participativo, reflexivo e performático (NICHOLS, 2005, p. 135). Esses tipos não são excludentes, podendo aparecer em uma mesma obra. De modo geral, as características dominantes darão estrutura ao filme, mas elas não ditam ou determinam todos os aspectos de sua organização. Resta uma considerável margem de liberdade (NICHOLS, 2005, p. 136). Segundo essa classificação, os documentários avaliados aqui se caracterizam principalmente por obras expositivas. Neste tipo de documentário há o agrupamento de

fragmentos do mundo histórico numa estrutura mais retórica ou argumentativa do que estética ou poética, [dirigindo-se] ao espectador diretamente, com legendas ou vozes que propõem uma perspectiva, expõem um argumento ou recontam a história (NICHOLS, 2005, p. 142).

Ainda, como em ambos os documentários temos a participação ativa dos apresentadores, também é possível caracterizá-los como participativos, ainda que o perfil geral seja a

⁴Esperamos que apenas essas informações já bastem para que nenhum trabalho acadêmico volte a usar o Doutor Quantum.

exposição histórica e argumentativa.

Em se tratando particularmente de um tema um tanto árido, utilizar-se de documentários pode ser uma opção interessante para o professor ilustrar conceitos e fenômenos da quântica, cuidando com as analogias apresentadas, conforme discutiremos. Dentre diversas funções possíveis de um recurso audiovisual no ensino de ciências (ROSA, 2000), destacamos o uso desses documentários para possibilitar uma experiência mais visual e dinâmica para assuntos normalmente tidos como complexos, embora o professor continue ocupando uma posição central no processo, como repetidamente insistiremos. O uso dos documentários ainda pode modificar positivamente a mesmice de sala de aula, desde que incorporados em estratégias didáticas por parte do professor (VASCONCELOS e LEÃO, 2012; BERK e ROCHA, 2019), contribuindo para situações mais ativas de aprendizagem (STUDART, 2019).

Quando assistidas e discutidas em grupo, estas mídias se tornam excelente opção de recurso didático para ser utilizado tanto em formação de professores quanto no ensino escolar devido ao seu conteúdo ilustrativo, contextualizado e reflexivo (BARBOSA e BAZZO, 2013, p. 154).

Em relação ao conteúdo tratado pelos dois documentários analisados, há uma sobreposição natural de temas. Ambos tratam dos fundamentos da quântica, dos quais destacamos: as propriedades ondulatórias e corpusculares da radiação eletromagnética, com ilustrações interessantes para os experimentos da dupla fenda e do efeito fotoelétrico, a noção básica de quantização, o emaranhamento entre partículas, a interpretação local e realista de Einstein para o emaranhamento e a interpretação corrente do time da quântica (interpretação de Copenhague) apontando como algo efetivamente corroborado.

Para subsidiar o professor interessado no uso desses documentários em suas aulas, elencamos no quadro 1, a seguir, o que cada documentário trata, de modo sintético⁵ e cronológico. Logo a seguir, fazemos uma síntese do que cada tema significa de modo não-rigoroso.

Max Planck e a radiação de corpo negro se refere às contribuições do físico Planck na explicação do espectro da radiação emitida por objetos aquecidos, com a importante e histórica proposição de que a energia trocada entre a radiação e a matéria é quantizada, ou seja, assume apenas múltiplos inteiros de um valor fundamental indivisível, que está justamente no cerne do que chamamos de quantização; o **efeito fotoelétrico** é um dos fenômenos que explicitam essa quantização, apontando que elétrons de um material absorvem energia de uma radiação eletromagnética incidente apenas de modo quantizado, mais especificamente um múltiplo inteiro do produto entre uma constante (a constante de

⁵Naturalmente os tópicos citados se correlacionam nas narrativas dos documentários, aparecendo também em outros momentos. Indicamos no quadro 1 a ordem em que aparecem em cada documentário, sendo que, no geral, cada um desses tópicos é efetivamente apresentado como elemento do campo conceitual da física quântica. Cada documentário aborda esses itens à sua maneira, usando ilustrações, analogias e narrativas participativas dos apresentadores, em um grande número de situações ao longo da exposição. Por isso nossa síntese do que cada tema significa, apresentada na sequência, visa tão somente situar o professor em relação a cada uma, mas convidamos os possíveis professores interessados no trabalho com a quântica no ensino médio a efetivamente conhecer as obras analisadas.

Salto Quântico Brian Greene	O pesadelo de Einstein Jim Al-Khalili
Espectros de emissão; átomo de Bohr; níveis energéticos quantizados; experimento da dupla fenda; dualidade de fótons e elétrons; função de onda; densidade de probabilidade; debate de Einstein-Bohr; emaranhamento; desigualdade de Bell e os experimentos de Clauser e Aspect; teleport quântico; computação quântica; incerteza; superposição.	Max Planck e a radiação do corpo negro; efeito fotoelétrico; dualidade da luz; debate de Einstein-Bohr; experimento da dupla fenda; dualidade dos elétrons; ondas de probabilidade; incerteza; emaranhamento; paradoxo EPR; superposição; desigualdades de Bell e os experimentos de Clauser e Aspect

Quadro 1: Lista cronológica dos temas abordados pelos documentários. Fonte: Próprio autor

Planck) e a frequência da radiação incidente; **espectros de emissão** são as frequências da radiação eletromagnética emitidas pelos átomos, onde cada frequência está relacionada a uma dada transição eletrônica; **átomo de Bohr** é o modelo proposto por Niels Bohr para o átomo de hidrogênio, que relaciona os conceitos de quantização de Planck e Einstein com as transições dos elétrons entre os **níveis energéticos quantizados**, justamente trazendo uma explicação física para os espectros de emissão; o **experimento da dupla fenda** é um aparato experimental que mostra a natureza ondulatória da radiação eletromagnética e de partículas como elétrons, demonstrando também aspectos corpusculares de modo que apenas um ou outro comportamento pode ser experienciado, a depender da configuração do experimento; **dualidade de fótons e elétrons** é justamente esse comportamento dual, onde ambos podem apresentar características corpusculares ou ondulatórias a depender do tipo de experimento realizado e nunca ambos ao mesmo tempo; **função de onda** se refere à equação de Schrödinger, usada para prever fenômenos quânticos como, por exemplo, a posição dos elétrons nos átomos; essa posição nunca é obtida de modo determinístico, e sim de modo probabilístico, com a equação de Schrödinger possibilitando obter uma **densidade de probabilidade**, ou seja, regiões mais prováveis de se encontrar os elétrons, o que denota as **ondas de probabilidade** no caso do experimento da dupla fenda, por exemplo; a **incerteza** também está relacionada a esse estado não-determinístico, que resulta na impossibilidade de conhecermos, ao mesmo tempo e com a mesma precisão, diferentes atributos como tempo e energia ou posição e velocidade de uma partícula; o **debate Einstein-Bohr** se refere às argumentações de ambos os cientistas em relação ao entendimento dos aspectos gerais da teoria quântica, com Einstein assumindo uma posição mais realista que advoga pela incompletude da teoria quântica em representar a natureza a nível atômico e Bohr assumindo a posição de completude, porém, de excludência: precisamos de ambos os aspectos da dualidade para retratar a natureza, mas cada um só pode ser experienciado em detrimento do outro; **emaranhamento** é um estado de relação entre duas partículas

(como o somatório de seus spins) que pode se manter à distância e, segundo interpretação de Bohr, mesmo fazer com que a modificação de uma partícula incorra na modificação da outra, de modo instantâneo, o que é denotado por não-localidade; as **desigualdades de Bell e os experimentos de Clauser e Aspect** se referem a aspectos teóricos e experimentais associados ao chamado **paradoxo EPR**, que efetivamente mostra a possibilidade de uma partícula atuar instantaneamente sobre outra, o que pode ser entendido também como um **teleporte quântico** que possibilitaria o envio de propriedades das partículas à distância, e, em um limite conjectural, até mesmo a cópia de um sistema físico qualquer; a **computação quântica** é uma forma de mobilizar praticamente os fundamentos da quântica para fins de computação, com o uso de diferentes estados de uma partícula como elementos fundamentais de informação; a **superposição** é um conceito dos mais curiosos da quântica, que interpreta seus resultados como sendo uma possibilidade dentre outras possíveis que supostamente coexistiriam em um somatório de possibilidades, sendo que uma medida experimental incorreria numa decoerência, ou seja, na determinação de um desses estados.

Naturalmente todos esses conceitos e terminologias, alguns bastante desafiadores, precisam ser bem ilustrados aos alunos para formar uma imagem adequada da quântica, e pensamos que os documentários que apontamos neste trabalho podem representar um recurso valioso nesse sentido, particularmente em se tratando de educação básica. Mas apesar de serem bastante próximos em relação ao conteúdo, existem diferenças claras de abordagem e identidades visuais. Para não nos repetirmos aqui, preferimos trazer essas características conjuntamente aos dados obtidos na pesquisa com os estudantes, conforme discutido na sequência.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Buscando avaliar as possibilidades de uso dos dois referidos documentários na educação básica, realizamos uma breve pesquisa qualitativa, inicialmente com seis alunos de fases finais de um curso de Licenciatura em Física de um Instituto Federal do sul do Brasil. Nesse tipo de pesquisa, o enfoque recai nos aspectos qualitativos das informações coletadas via observação, questionário ou entrevista, de modo a se compreender seus significados frente ao que se propõe (RICHARDSON, 1999). No nosso caso, a proposta foi obter uma caracterização dos documentários discutidos, de modo a compor possíveis sugestões a respeito de seu uso na educação básica.

Os estudantes, sujeitos dessa pesquisa, assistiram a ambos os documentários de modo individual, no contexto de uma disciplina sobre Mecânica Quântica no Ensino Médio, voltada para discussões sobre a essência da quântica e possibilidades didáticas junto à educação básica. Essa disciplina é normalmente cursada por estudantes em fases finais da licenciatura, com um número tipicamente pequeno de participantes (no presente caso desta pesquisa, seis alunos). Além dos conteúdos tratados na própria disciplina, os alunos participantes costumam ter contato com elementos de física quântica na disciplina de Ótica e Física Moderna, equivalente às habituais Física 4 ou Física D.

Os alunos tiveram duas semanas para assistir aos documentários e organizar uma apresentação sobre um comparativo entre eles, com questões previamente colocadas para esse fim. Essas questões foram: 1. Como você vê a qualidade geral dos documentários?

Você destacaria a qualidade de algum em relação ao outro? 2. De modo geral e comparativo, como você caracteriza cada um dos documentários? 3. Quais são, ao seu ver, as principais limitações dos documentários para um uso didático em sala de aula? 4. Como você avalia as analogias empregadas nos documentários? Você tem alguma sugestão a respeito do uso dessas analogias nas aulas de física? 5. Como você avalia o possível uso do trecho sobre teleporte quântico (Greene) junto a alunos do ensino médio? 6. Como você preferiria utilizar os documentários em relação à sua exibição em sala? 7. Você exibiria integralmente os documentários?

Dos seis alunos participantes, excluímos de nossa análise dois que apresentaram muitas lacunas em suas respostas e outras respostas monossilábicas de pouca contribuição às discussões. Apresentamos a seguir as respostas dos quatro demais alunos, que denominaremos aqui por A1, A2, A3 e A4. Naturalmente essas respostas por si já podem auxiliar o professor em suas escolhas didáticas⁶, mas faremos também alguns complementos para apresentar melhor as características de cada documentário. Ao final discutiremos, em síntese, as potencialidades de uso desses documentários visando sua possível contribuição para o professor de física interessado em trabalhar esse tema no ensino médio.

Para obtermos uma primeira imagem mais geral da avaliação dos estudantes a respeito dos documentários, inicialmente perguntamos: Como você vê a qualidade geral dos documentários? Você destacaria a qualidade de algum em relação ao outro?. Todos os alunos destacaram a boa qualidade geral, sendo que A3 e A4 mencionaram a superioridade do segundo, apresentado por Al-Khalili⁷. Consideramos que esse documentário apresenta um cuidado maior com elementos históricos e de contextualização, com analogias também mais didáticas. Em contrapartida, o primeiro documentário, apresentado por Brian Greene, apresenta uma arte gráfica mais trabalhada. A3 destacou exatamente essa diferenciação geral: "Eu prefiro a abordagem do Al-Khalili com seus exemplos e analogias, porém existe a parte de CGI do documentário do Greene que pode auxiliar na visualização de alguns conceitos"(A3). A4 concorda, mencionando que o segundo (Al-Khalili) é mais organizado. A1 destacou a questão da formação dos apresentadores, o que ajuda na qualidade final:

A qualidade dos dois documentários é muito boa, sendo que cada um apresenta a Física Quântica de um ponto de vista diferente, mas de modos muito interessantes. Destaco que [com] o fato dos apresentadores serem físicos, a credibilidade das informações apresentadas ganha ainda mais peso (A1).

Consideramos isso um elemento importante, frente ao possível uso desses documentários no ensino. Conforme mencionamos anteriormente, não é difícil encontrar, numa busca descompromissada na internet, documentários praticamente pseudocientíficos que facilmente podem se passar por obras científicas sérias. Conhecer os sujeitos envolvidos na

⁶Consideramos que, por serem estudantes das fases finais de um curso de graduação, suas visões contribuem para um parecer fundamentado das obras analisadas.

⁷Preferiremos indicar o nome do apresentador principal para denotar cada documentário. Pensamos que isso facilita a identificação, particularmente para quem tiver assistido a ambos, uma vez que os títulos usados se confundem naturalmente em função do tema em comum.

obra é imprescindível (o que não é o mesmo que suficiente⁸) para se selecionar filmes com uma qualidade mínima de conteúdo.

Pensamos que a forma é importante e nisso os dois documentários analisados se destacam, particularmente o do Greene se formos relevar mais os aspectos visuais. Mas sem que haja um conteúdo de qualidade, naturalmente nenhuma forma pode ser usada como compensação. Por isso consideramos relevante mencionar que chegamos a sondar a possibilidade de incluir um terceiro documentário na análise (e nas discussões com a turma), apresentado pelo astrofísico e divulgador científico norte-americano Neil deGrasse Tyson em sua série "Cosmos: Mundos Possíveis" (TYSON, 2020), episódio 9, justamente sobre física quântica. Consideramos essa série, de modo geral, bastante importante e com diversas possibilidades de uso junto à educação básica, principalmente a primeira série, composta a partir do documentário original de Carl Sagan (SAGAN, 1980). Contudo, esse episódio 9 é muito metafórico, com uma didática confusa⁹ e mal contextualizada.

Para uma avaliação ainda geral, mas buscando uma diferenciação entre as obras, na sequência perguntamos: De modo geral e comparativo, como você caracteriza cada um dos documentários?. Tivemos uma percepção bastante concordante dos alunos, como se pode ver pelas respostas:

O que os difere são os exemplos e as analogias utilizadas para explicar os conceitos, um utiliza mais animações (The Fabric of the Cosmos: Quantum Leap) [Greene] e o outro (The Secrets of Quantum Physics, Einstein's Nightmare) [Al-Khalili] exemplos experimentais concretos (A2).

O documentário do Al-Khalili possui um enfoque mais histórico com ótimas analogias, enquanto o do Greene possui o uso de tecnologias para exemplificação e também aborda questões mais atuais da física quântica (A3).

O primeiro [Greene], na minha opinião, tem animações e analogias mais claras, enquanto o outro tem uma progressão histórica melhor e experimentos (e não só simulações) legais sobre (A4).

Consideramos a resposta de A1 bastante completa e relevante para a caracterização de ambas as obras, do que reproduzimos integralmente:

⁸Alguns documentários se baseiam no livro A Física da Alma (GOSWAMI, 2015), por exemplo. Seu autor, Amit Goswami, apesar de físico aposentado, tem se dedicado a extrapolações pseudocientíficas da teoria quântica, sendo responsável por boa parte do fenômeno cultural do misticismo quântico (PESSOA Jr., 2010).

⁹Sua tentativa de apresentar o fenômeno de emaranhamento entre partículas, por exemplo, não esclarece que tipo de relação existe entre as partículas mostradas, e a arte visual empregada também não permite saber exatamente de que partículas se está falando. Não temos dúvidas de que as intenções dos produtores (incluindo o Tyson) são as melhores possíveis, mas a entrega efetiva facilmente pode produzir uma má compreensão do que se está discorrendo.

O primeiro documentário (A fábrica do Cosmos) [Greene] é uma viagem para o mundo quântico, ou seja, o conteúdo é apresentado como se também fôssemos quânticos e pudéssemos observar a olho nu o que acontece no micro das coisas que nos cercam. Este documentário traz uma série de animações para ilustrar os conceitos que estão sendo apresentados. Há também várias analogias que auxiliam a "visualizar" o que acontece no nível quântico. Apesar de ser um documentário muito bom, ele aborda os conteúdos sem uma introdução, então no meu entender é um vídeo para ser assistido após algum tipo de introdução do aluno ao estudo da quântica. Este é um documentário que busca abordar as questões mais curiosas que envolvem a quântica. Já o segundo documentário (os segredos da física quântica) [Al-Khalili], por sua vez, constrói uma linha do tempo apresentando todos os pensamentos de época que os cientistas tinham, demonstrando experimentos utilizados pelos físicos para a construção dos conceitos até que se chegasse a uma teoria quântica. São também apresentadas diversas analogias para explicar os conceitos, aliadas algumas vezes a animações gráficas. Penso que a forma como este documentário é apresentado é adequada para a introdução do aluno no mundo quântico, pois além de ser muito didático, o vídeo traz diversos aspectos da natureza e da história da ciência (A1).

Como sintetizaremos mais ao final, a depender do uso dos documentários em sala, trechos de um ou outro podem ser mais bem aproveitados. O apresentado por Greene traz animações gráficas muito boas para serem usadas em partes em uma aula expositiva do professor, enquanto o apresentado por Al-Khalili pode ser trabalhado em trechos maiores de exibição, por ter uma narrativa mais voltada ao desenvolvimento contextualizado das ideias da quântica.

Justamente visando seu uso junto a estudantes da educação básica, na sequência perguntamos: "Quais são, ao seu ver, as principais limitações dos documentários para um uso didático em sala de aula?". Os estudantes A1 e A2 citaram a duração dos documentários, que pode ser um limitante para sua exibição integral em sala. A1 menciona também os riscos com as analogias empregadas: "Um ponto que devemos, como professores, ficar atentos, são as analogias e comparações utilizadas nos documentários, para que não contribuamos para a formação de concepções demasiadamente simplificadas da quântica" (A1). Pensamos que isso é essencial, claro. Por isso insistiremos, mais ao final, em sugestões mais gerais a respeito do uso dessas obras na educação básica.

Apesar de o documentário de Al-Khalili ser avaliado como o mais bem contextualizado, A3 alerta para que pode ser mais difícil de os estudantes acompanharem, em função de trazer uma narrativa menos ilustrada. Sinal para que o professor o utilize de modo complementar, e não de modo exclusivo, apesar, claro, de que é o professor quem decidirá por diferentes metodologias de trabalho. Nada impede de o professor exibir a obra completa, por exemplo, para depois revisitar trechos e melhor significar pontos mais áridos ao aluno de ensino médio.

A4 cita as legendas¹⁰ como possível limitador e traz uma consideração bem pertinente

¹⁰Existem diferentes fontes na internet, incluindo dubladas. Mas, pela efemeridade (e pessoalidade) de

a respeito de como afirmações mais "soltas" podem levar o estudante a formar uma visão inadequada, "como por exemplo não deixar claro que observar a partícula quer dizer interagir com ela, e não vê-la de fato e afetá-la por isso" (A4). A influência do observador é um dos tópicos utilizados por narrativas pseudocientíficas, que costumam mencionar que o simples ato de observar modifica o comportamento de partículas. De certo modo é uma afirmação procedente, mas, como lembra A4, observar sistemas quânticos implica em inevitavelmente interagir com os mesmos. O simples comentário do professor, utilizando-se, por exemplo, do interferômetro virtual de Mach-Zehnder (OSTERMANN et al., 2009), mostrando como, para observar a trajetória de uma partícula é necessário adicionar um detector em seu caminho, já pode evitar interpretações místicas de mentes modificando a realidade.

Ambos os documentários trazem algumas analogias para discutir conceitos como dualidade, emaranhamento, efeito fotoelétrico e a própria ideia de quantização. Algumas analogias são bastante diretas, como a do jogo de bolas nas latas para representar o efeito fotoelétrico, no documentário de Al-Khalili. Essa analogia está bem explorada pelo apresentador, que deixa bem clara a relação entre o lançamento das bolas e a energia dos fótons¹¹ (ou quanta de ação, no contexto de Einstein).

Perguntamos então aos estudantes como eles avaliam essas analogias e se teriam alguma sugestão a respeito do uso dessas nas aulas de física. Por exemplo, o documentário de Greene usa uma analogia de roletas em anticorrelação para falar sobre emaranhamento, ilustrando como, usando as cores azul e vermelho para representar dois estados de uma partícula (seus spins, por exemplo), quando uma parar no azul, a outra parará no vermelho¹². Claro, isso deve ser usado com cautela. A1 comenta como:

A analogia da roleta para problematizar o emaranhamento pode provocar um certo desconforto, pois temos uma ideia formada com base na física clássica e temos que "fingir" que quando uma roleta mostra o vermelho, a outra irá parar no azul sem nenhuma influência externa. Sabemos que na prática isto dificilmente irá acontecer, então é necessário deixar claro ao estudante [o que] as roletas representam (A1).

Semelhantemente, A2 menciona que "as analogias podem ao mesmo tempo ajudar na compreensão daquele conceito/fenômeno como também contribuir para a construção de um conhecimento equivocado" (A2). Os estudantes A3 e A4 enfatizam que gostaram das

possíveis links, preferimos fazer alusão apenas às referências originais de cada documentário.

¹¹As latas só são demovidas de suas posições com bolas de certa energia, e o apresentador Al-Khalili mostra como existe uma relação (no caso específico do efeito fotoelétrico) entre a frequência de um fóton e sua energia. O apresentador, na analogia empregada, mostra como, ao se arremessar bolinhas vermelhas leves (pouca energia), as latas não são deslocadas e, ao se arremessar bolinhas azuis mais pesadas (maior energia), as latas são demovidas.

¹²O apresentador Brian Greene mostra duas roletas do tipo usado em gincanas e programas de TV, com cada uma tendo duas possibilidades de cores, vermelho e azul. Cada roleta, uma vez colocada em movimento, irá parar em uma ou outra cor. Estas roletas estão separadas por certa distância, e o apresentador mostra como, ao girar ambas, cada uma irá parar em uma cor oposta à outra (se uma parou no vermelho, a outra parará no azul, por exemplo). Isso ilustraria o emaranhamento entre os spins de dois elétrons, por exemplo.

analogias, mas também alertam para os cuidados do professor com o uso dessas, com A3 chamando a atenção para o que as roletas representam: "não tenho certeza que não haveria confusões na interpretação da questão do spin" (A3).

Ainda sobre o emaranhamento, o documentário de Al-Khalili traz uma analogia de cartas de baralho, onde um "demônio da natureza" garantiria que, sempre que o jogador tirasse uma carta determinada, uma outra carta com características anticorrelacionadas apareceria. A analogia sugere que, não importa a regra colocada pelo jogador, a natureza atua de modo a haver uma relação entre as cartas (as medidas realizadas pelo cientista) ao mesmo tempo em que não permite sua determinação antes do "lance" (antes da medida). Consideramos uma analogia bastante abstrata, ainda que possa ser relevante diante de uma boa compreensão do que ela trata (e pensamos que esse é o problema). A1 diz: "Penso que utilizar a analogia da carta em sala de aula pode acabar provocando muito mais questionamentos do que esclarecimentos, complicando ainda mais a interpretação dos fenômenos quânticos" (A1). A2 coloca:

Quando assisti pela primeira vez, não consegui entender, foi necessário assistir de novo pra conseguir relacionar o jogo de cartas ao emaranhamento. Então na sala de aula é necessário que o professor após exibir esse trecho do documentário explicar novamente buscando deixar claro as regras e como aquilo está relacionado ao emaranhamento (A2).

A3 lembra que a própria quântica é intrinsecamente complexa e que não podemos esperar muito de analogias para compreender seus conceitos. "Eu gostei da analogia, porém achei ela um tanto quanto complexa, como a teoria quântica também é" (A3). Já A4 foi mais categórico: "Achei meio confusa. Entendo que achar analogias para esse fenômeno seja difícil, mas no caso das cartas, o jogo todo foi obviamente "fraudado" para que os resultados fossem aqueles, de forma a poder comparar com a teoria" (A4).

O documentário de Greene traz o conceito de teleporte quântico, extrapolando para situações que flertam com filmes de ficção científica. Achamos curioso o documentário investir um tempo considerável no tema, e por isso perguntamos aos estudantes como eles avaliavam o possível trabalho desse trecho junto aos alunos do ensino médio. A1 comentou sobre aspectos de motivação ao estudante e como o assunto poderia aparecer cientificamente ao aluno. "Particularmente, eu achei a parte do teletransporte muito curiosa e interessante e exibiria para os estudantes, pois somos bombardeados diariamente com estas ideias, mas ninguém as discute cientificamente com os alunos" (A1). E complementa:

Apesar de ser um assunto polêmico, que poderia gerar muitas discussões em sala de aula e até mesmo tirar o foco das problemáticas principais, é a partir de situações como esta que conseguimos manter o estudante interessado em algo que, por ser muito difícil, ele acaba perdendo o interesse (A1).

Os demais estudantes são mais reticentes ao uso desse trecho.

Esse é o trecho que o professor deve tomar cuidado redobrado quando for exibir para os estudantes, pois pode contribuir para a propagação de um conhecimento equivocado sobre o teleporte quântico, visto que apresenta várias questões que ainda não conseguimos responder (A2).

A3 comenta "que é um tema delicado, [que pode levar o aluno a] acreditar que estamos à beira de descobrir um jeito de viajar de forma rápida e prática" (A3). A4 vê razões para trabalhar esse trecho, mas também alerta para seu uso:

Um ponto positivo é mostrar as possibilidades da quântica e a importância de estudá-la para o seu desenvolvimento. Porém, acho que a ideia acaba indo um pouco longe e pode causar conclusões precipitadas por parte dos alunos. Deve-se ter cuidado ao exibir o trecho (A4).

Naturalmente cabe ao professor aproveitar adequadamente o tema, de modo a não levar o aluno a acreditar em tecnologias inexistentes. Porém, conforme apontado por A1, além do caráter motivador esse tema pode ser uma boa oportunidade para se discutir ideias que frequentemente se fazem presente na cultura, mas raramente são discutidos na escola. Reiteramos que é mais uma oportunidade para não permitir que narrativas pseudocientíficas e/ou fantasiosas fiquem sem uma contrapartida por parte do professor de física, e atividades problematizadoras a esse respeito junto aos alunos podem propiciar uma educação científica mais responsável.

Sobre como utilizariam os documentários em relação à sua exibição em sala, A2 e A4 disseram que usariam trechos previamente escolhidos, A1 disse que preferiria usar alguns recortes em uma exposição própria sobre o tema, e A3 exibiria todo o documentário, ainda que fazendo as ressalvas nos pontos que achasse necessário. Foi perguntado também se exibiriam integralmente os documentários, sem complementos. Todos os quatro alunos foram reticentes, demonstrando (acertadamente, pensamos) a percepção de que as referidas obras se constituem como material para o trabalho do professor, não o substituindo propriamente. Concordamos que

[...] apenas a exibição do vídeo, sem a mediação do professor, não traz o caráter didático que atividades como exercícios, debates e discussões podem promover. [...] Sem a condução do professor, muitos conteúdos podem ser ignorados por meio do olhar do aluno, que pode encarar o momento de exibição do vídeo como entretenimento, sem aproveitar o potencial didático que o mesmo oferece. Cabe ao professor, portanto, orientar e direcionar a forma com a qual o aluno irá perceber esses fatores (BERK e ROCHA, 2019, p. 84).

Assim, esperamos que as considerações que trouxemos possam estimular o uso dessas obras pelo professor de física, que pode aventar práticas diversas para seu trabalho em sala

de aula. Importante mencionar que os estudantes participantes da pesquisa demonstraram bastante interesse pelas discussões realizadas a respeito dos documentários, que podem muito bem representar a partícula de poeira ao redor da qual se cristalizam ideias e discussões em uma turma de ensino médio, o que é fundamental para se criar um contexto propício à aprendizagem.

IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A quântica, ao mesmo tempo em que é uma das teorias de maior sucesso da história da ciência, tem sido usada por círculos sociais totalmente às margens do que se produz seriamente nesse campo. Esse fenômeno do misticismo quântico só tem a ganhar caso o professor de física continue a se recusar a trabalhar o tema em sala de aula. Ocupar um espaço que é facilmente preenchido por engodo pode ser uma maneira de diminuir entendimentos inadequados e frear charlatanismos. Por outro lado, os conceitos da quântica são intrinsecamente desafiadores de serem trabalhados em sala de aula na educação básica.

Dentre diversas possibilidades já apontadas anteriormente, utilizar-se de documentários pode ser uma maneira de otimizar a visualização de alguns conceitos. Contudo, como evidenciou-se nas respostas dos estudantes participantes da pesquisa, essa utilização não prescinde da importante atuação do professor, que deve estar atento às narrativas e analogias empregadas. Há ainda que se relevar a diferença cultural entre o contexto de produção das referidas obras e o contexto do aluno (ROSA, 2000), o que pode exigir esclarecimentos adicionais por parte do professor, embora não tenhamos percebido nenhuma situação mais sensível a esse respeito.

De modo geral, o documentário Salto Quântico é claramente produzido para explorar graficamente os principais conceitos da quântica. Seu apresentador, Brian Greene, explora seus conceitos de modo direto, com pouca contextualização. Além da boa qualidade das animações, um aspecto diferencial interessante desse documentário é também a participação de outros cientistas, que aparecem tecendo comentários sucintos ao longo de toda a narrativa.

Já o documentário O Pesadelo de Einstein é bem mais cuidadoso em relação à apresentação dos conceitos trabalhados. Diferentemente do primeiro, que é mais direto e graficamente trabalhado de modo a ilustrar os conceitos por meio de animações, este segundo documentário sempre começa cada tema com uma contextualização histórica, primando pela apresentação dos cientistas envolvidos em cada situação. O apresentador Jim Al-Khalili faz uma narrativa mais cronológica e também é mais preocupado em relação às analogias empregadas.

Naturalmente cabe ao professor escolher como trabalhar essas obras e esperamos que os relatos e considerações trazidas possam auxiliar em suas escolhas didáticas. Atentando-se aos cuidados apontados em relação às analogias empregadas e às próprias características de cada documentário, recomendamos o seu uso junto a turmas do ensino médio, preferencialmente acompanhado de estratégias diversas por parte do professor. Apenas como sugestão, ainda que aportada nas considerações dos estudantes de física, indicamos a utilização das animações gráficas do documentário de Brian Greene, Salto Quântico, nas exposições do professor e discussões com a turma. Recortes desse documentário podem formar, em organização própria do professor, um material de apresentação bastante chamativo para se

trabalhar os principais tópicos da quântica.

Se preferir exibir trechos mais longos, recomendamos ao professor atentar às visões dos alunos em relação aos trechos. Além da simples exposição dialógica desses trechos, sugerimos que os alunos possam também participar ativamente da elaboração de explicações e interpretações para o que foi visto, de modo a se produzir uma discussão em sala. O professor pode colocar pequenos grupos para produzir uma explicação e/ou uma apresentação para o grande grupo, por exemplo, com o professor atuando para se chegar na melhor síntese a respeito. É claro que o professor pode decidir por exibir todo o documentário, e neste caso enfatizamos a importância de atividades complementares para que se evite compreensões inadequadas, principalmente em relação às analogias empregadas.

Já em relação ao documentário de Jim Al-Khalili, *O Pesadelo de Einstein*, recomendamos sua exibição integral, ainda que com complementações do professor, durante ou após sua exibição. A narrativa de Al-Khalili é bastante didática, demonstrando situações historicamente acuradas, e também traz analogias bem trabalhadas, como o jogo de atirar bolas nas latas para discorrer sobre o feito fotoelétrico. É claro que, por se tratar de uma analogia, o professor pode também complementar como achar melhor a exposição de Al-Khalili, apesar de considerarmos essa exposição potencialmente significativa mesmo ao estudante de ensino médio. Mas também recomendamos que o professor possa revisitar os principais tópicos assistidos, sempre cuidando particularmente com os exemplos e analogias.

Uma estratégia para diminuir possíveis dispersões dos alunos em um contexto de exibição integral dos documentários é oferecer previamente a eles um roteiro ou conjunto de questões que apontem para o que o professor efetivamente queira trabalhar. Mas, neste caso, sugerimos que os alunos sejam orientados a tomar notas de, no máximo, algumas poucas palavras-chave para só depois da exibição proceder a alguma nota mais extensa. É importante lembrar aos alunos que, em caso de anotações extensas durante a exibição, pode-se facilmente perder outros trechos importantes da narrativa.

Esperamos que, cada vez mais, não seja por falta de opções audiovisuais diversas e acadêmicas que o professor deixará de trabalhar com elementos da quântica em suas aulas. Por mais que seus conceitos sejam desafiadores, os esforços de toda a noosfera podem fazer com que as mixórdias perniciosas presentes na cultura tenham um espaço, no mínimo, concorrido com propostas didáticas compromissadas com o que de fato estuda a física quântica.

REFERÊNCIAS

AL-KHALILI, J. *The Secrets of Quantum Physics: Einstein's Nightmare*. [Filme-vídeo]. BBC Four, Furnace Limited, 2014. Mais informações em < <https://www.bbc.co.uk/programmes/b04v5vjz> >.

ARNTZ, W. *What the Bleep do We Know!?* [Filme-vídeo]. Samuel Goldwyn Films, 2004.

BARBOSA, L. C. A.; BAZZO, W. A. O uso de documentários para o debate ciência-tecnologia-sociedade (cts) em sala de aula. *Revista Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências*, v. 15, n. 3, p. 149-161. 2013.

BERK, A.; ROCHA, M. O uso de recursos audiovisuais no ensino de ciências: uma análise em periódicos da área. *Revista Contexto e Educação*, v. 34, n. 107, p. 72-87, 2019.

CORRÊA, A. R.; ARTHURY, L. H. M. Afinal o que é física quântica? Uma história em quadrinhos para uso no ensino médio. *Revista do Professor de Física*, v. 5, n. 1, p. 70-96, 2021.

CRUZ, F. F. S.; CRUZ, S. M. S. Pode o ambiente cultural e social definir o conteúdo escolar de física: o caso da mecânica quântica. In: *Atas do VII ENPEC, Encontro Nacional em Pesquisa em Educação em Ciências*, 2009. Florianópolis, SC, Brasil, 2009.

DIONÍSIO, P. H. Física Quântica: da sua pré-história à discussão sobre o seu conteúdo essencial. *Cadernos IHU Ideias*, v. 2, n. 22, p. 1-28, 2004.

FERNANDES, R. F. A. M.; PIRES, F. F.; FORATO, T. C. M.; SILVA, J. A. Pinturas de Salvador Dalí para introduzir conceitos de Mecânica Quântica no Ensino Médio. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 34, n. 2, p. 509-529, 2017.

GOSWAMI, A. *A Física da Alma*. São Paulo: Aleph, 2015

GREENE, B. *The Fabric of the Cosmos: Quantum Leap*. [Filme-vídeo]. NOVA-PBS, 2011. Mais informações em <<https://www.pbs.org/wgbh/nova/series/the-fabric-of-the-cosmos/episodes/>>.

JESUS, R.M.V. Escola e documentário: uma relação antiga. *Revista HISTEDBR On-line*, v. 32, n. 1, p. 233-242, 2008.

LIMA, L. G.; RICARDO, E. C. O Ensino da Mecânica Quântica no nível médio por meio da abstração científica presente na interface Física-Literatura. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 36, n. 1, p. 8-54, 2019.

MOURA, M. D.; SANTOS, R. P. Detectando misticismo quântico em livros publicados no Brasil com Ciência de Dados. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 34, n. 3, p. 725-744, 2017.

NICHOLS, B. *Introdução ao documentário*. Campinas: Papyrus, 2005.

OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa Física moderna e contemporânea no ensino médio. *Investigações em Ensino de Ciências*, v. 5, n. 1, p. 23-48, 2000.

OSTERMANN, F.; CAVALCANTI, C. J. H.; PRADO, S. D.; RICCI, T. S. F. Fundamentos da física quântica à luz de um interferômetro virtual de Mach-Zehnder. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, v. 8, n. 3, p. 1094-1116, 2009.

PAGLIARINI, C. R.; ALMEIDA, M. J. P. M. Leituras por alunos do ensino médio de textos de cientistas sobre o início da física quântica. *Ciência e Educação, Bauru*, v. 22, n. 2, p. 299-317, 2016.

PENAFRIA, M. O filme documentário. Lisboa: Edições Cosmos, 1999.

PAULO, I. J. C.; MOREIRA, M. A. Abordando conceitos fundamentais da mecânica quântica no nível médio. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, v. 4, n. 2, p. 63-73, 2004.

PESSOA Jr., O. F. O fenômeno cultural do misticismo quântico. In: Freire Jr., O.; Pessoa Jr., O. F.; Bromberg, J. L. (Org.). (2010). *Teoria Quântica - Estudos históricos e implicações*. São Paulo: Livraria da Física, p. 281-302, 2010.

PESSOA Jr., O. F. Introdução histórica à teoria quântica, aos seus problemas de fundamento e às suas interpretações. *Caderno de Física da UEFS*, v. 4, n. 1, p. 89-114, 2006.

PESSOA Jr., O. F. Interferometria, Interpretação e Intuição: Uma Introdução Conceitual à Física Quântica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 19, n. 1, p. 27-48, 1997.

RICHARDSON, R. J. Pesquisa social: métodos e técnicas. São Paulo: Atlas, 1999.

ROSA, P. R. S. O uso dos recursos audiovisuais e o ensino de ciências. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 17, n. 1, p. 33-49, 2000.

SAGAN, C. *Cosmos*. [Filme-vídeo]. BBC-PBS, 1980.

SALES, G. L.; VASCONCELOS, F. H. L.; CASTRO FILHO, J. A.; PEQUENO, M. C. Atividades de modelagem exploratória aplicada ao ensino de física moderna com a utilização do objeto de aprendizagem pato quântico. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 30, n. 3, p. 3501-1 3501-13, 2008.

SCHAPPO, M. G. (org.). *Armadilhas Camufladas de Ciência: mitos e pseudociências em nossas vidas*. Rio de Janeiro: Autografia, 2021.

SILVA, A. C.; ALMEIDA, M. J. P. M. Física quântica no ensino médio: o que dizem as pesquisas. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 28, n. 3, p. 624-652, 2011.

STUDART, N. Inovando a Ensino de Física com Metodologias Ativas. *Revista do Professor de Física*, v. 3, p. 3, p. 1-24, 2019.

TYSON, N. G. *Cosmos: Possible Worlds*. [Filme-vídeo]. Fuzzy Door Productions, 2020.

VASCONCELOS, F. C. G. C.; LEÃO, M. B. C. Utilização de recursos audiovisuais em uma estratégia flexquest sobre radioatividade. *Investigações em Ensino de Ciências*, v. 17, n. 1, p. 37-58, 2012.

VIDAL, F. L. K.; REZENDE FILHO, L. A. C. Escolhendo gêneros audiovisuais para exibições em aulas de ciências e biologia: como os professores entendem a referencialidade da imagem. *Revista Alexandria*, v. 3, n. 3, p. 47-65, 2010.

VIEIRA, R. C.; MARTINS, M. R. O uso de vídeos do gênero documentário em aulas de ciências naturais: uma janela para o real? In: *Atas do XI Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências*, 2017. Florianópolis, SC, Brasil, 2017.