

A PRODUÇÃO DE UM MATERIAL UTILIZANDO O SOFTWARE TRACKER PARA ABORDAGEM DO EXPERIMENTO DA DIFRAÇÃO DE ELÉTRONS

THE PRODUCTION OF A MATERIAL USING THE SOFTWARE TRACKER TO APPROACH THE EXPERIMENT OF ELECTRON DIFFRACTION

LA PRODUCCIÓN DE UN MATERIAL UTILIZANDO EL SOFTWARE TRACKER PARA APROXIMAR EL EXPERIMENTO DE DIFRACCIÓN DE ELECTRONES

MARCUS VINICIUS PERES¹

JORGE ALBERTO LENZ¹

ARANDI GINANE BEZERRA JR¹

GIULIO DOMENICO BORDIN¹

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR),
Curitiba/PR - Brasil

RESUMO A experimentação é parte fundamental nos processos de ensino-aprendizagem relacionados ao ensino de Física e representa um grande desafio, particularmente, para o ensino de Física Moderna e Contemporânea. Neste trabalho, apresentamos um produto educacional baseado na tecnologia da videoanálise enquanto estratégia para levar à sala de aula o experimento de difração de elétrons. Trata-se de iniciativa concreta de utilizar o programa *Tracker* para permitir a estudantes e professores a visualização de um fenômeno fundamental da Física, concebido teoricamente pelo físico francês de Broglie e reportado experimentalmente no começo do século XX por Davisson, nos Estados Unidos, e Thomson, no Reino Unido, os três agraciados com o prêmio Nobel. O material didático é associado à comprovação do comportamento ondulatório dos elétrons, com implicações para explorar o conceito de dualidade onda-partícula, fundamental para a Mecânica Quântica. Ocorre que os custos para realização desse experimento são muito elevados, de modo que a videoanálise foi utilizada para produzir um material acessível, versátil e com o condão de dar a professores e estudantes a possibilidade de realizarem a atividade em diversos contextos, configurando um exemplo objetivo de utilização de uma Tecnologia de Informação

e Comunicação, no caso, a videoanálise com o *Tracker*, no Ensino de Física Moderna e Contemporânea fomentar atividades investigativas e de experimentação.

PALAVRAS-CHAVE: VIDEOANÁLISE, TRACKER, DIFRAÇÃO DE ELÉTRONS, FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA.

ABSTRACT Experimentation is a fundamental part of modern processes related to the teaching of Physics and represents a great challenge, particularly for the teaching of Modern and Contemporary Physics. In this work, we present an educational product based on video analysis technology as a strategy to bring the electron diffraction experiment to the classroom. This represents a concrete initiative to use the software Tracker allowing for students and teachers to visualize a fundamental phenomenon in physics. Particle diffraction was theoretically conceived by de Broglie, a French physicist, and reported experimentally in the early 20th century by Davisson, in the United States, and Thomson, in the United Kingdom, the three were awarded the Nobel Prize. Our educational resource consists in a teaching material for demonstrating the wave behavior of electrons, with implications for exploring the concept of wave-particle duality, of utmost importance in Quantum Mechanics. It turns out that the costs for carrying out this experiment are usually very high, so that video analysis was used to produce an accessible, versatile material with the ability to give teachers and students the possibility to carry out the experimental activity in different contexts, setting a concrete example of using an Information and Communication Technology, in this case, video analysis with Tracker, in the Teaching of Modern and Contemporary Physics and with the ability to foster investigative and experimental activities.

KEYWORDS: VIDEOANALYSIS, TRACKER, ELECTRON DIFFRACTION, MODERN AND CONTEMPORARY PHYSICS.

RESUMEN La experimentación es una parte fundamental de los procesos de aprendizaje relacionados con la enseñanza de la Física y representa un gran desafío, en especial, a la enseñanza de la Física Moderna y Contemporánea. En este trabajo, presentamos un producto educativo basado en tecnología de videoanálisis como estrategia para llevar el experimento de difracción de electrones al aula. Se trata de una iniciativa concreta para utilizar el programa Tracker para permitir que estudiantes y profesores visualicen un fenómeno esencial de la física, teóricamente concebido por el físico francés de Broglie e informado experimentalmente a principios del siglo XX por Davisson, en Estados Unidos, y Thomson, en el Reino Unido, los tres galardonados con el Premio Nobel. Es un material didáctico asociado a la prueba del comportamiento ondulatorio de los electrones, permitiendo explorar el concepto de dualidad onda-partícula, también fundamental para la Mecánica Cuántica. Resulta que los costos para llevar a cabo este experimento son muy altos, por lo que se utilizó la viodeanálisis para producir un material accesible, versátil y con la capacidad de brindar a docentes y estudiantes la posibilidad de realizar esta actividad en diferentes contextos, estableciendo un ejemplo concreto del uso de una Tecnología de la Información y la Comunicación, en este caso, la viodeanálisis con el Tracker, en la Enseñanza de la Física Moderna y Contemporánea fomentando actividades investigativas y experimentales.

PALABRAS CLAVES: VIDEOANALISIS, TRACKER, DIFRACCIÓN DE ELECTRONES, FÍSICA MODERNA E CONTEMPORANEA.

INTRODUÇÃO

Difração de elétrons, física moderna e ensino

No início do século XX a Física se encontrava em crise. A interação da luz com a matéria não era satisfatoriamente explicada pelos conhecimentos e teorias vigentes (mecânica, termodinâmica e eletromagnetismo). O efeito fotoelétrico, por exemplo, foi inicialmente observado fenomenologicamente por Hertz, em 1887, ao perceber a facilidade com que um arco voltaico surgia quando iluminava com luz ultravioleta as extremidades das antenas do experimento que hoje leva o seu nome; à fenomenologia observada não correspondia uma explicação razoável, muito pelo contrário, dado que a aplicação dos conceitos associados às ondas eletromagnéticas não era suficiente para a compreensão da ejeção de elétrons pela luz (MANGILI, 2012, p. 34; KUEHN, 2015; EBERHARDT *et al.*, 2017). De fato, a explicação concreta para esse fenômeno foi apresentada por Einstein em 1905 e corresponde a uma ruptura na Física, uma vez que estabelece o caráter corpuscular da luz, um dos aspectos da dualidade onda-partícula (THORNTON; REX, 2012; KUEHN, 2015).

Então, por a radiação se propagar como onda eletromagnética, mas exibir propriedades corpusculares quando interage com a matéria, estabeleceu-se o comportamento dual da luz. Este fato passou a ser um dos pilares na construção da Mecânica Quântica. Na efervescência daquele contexto, Louis de Broglie, em 1924, formula a seguinte questão: se ondas apresentam propriedades de partículas, poderia o contrário ser verdadeiro? Este foi o tema de sua tese de doutoramento, na Universidade de Paris, culminando no prêmio Nobel, que lhe foi concedido em 1929, justamente porque introduziu a ideia de que partículas, tais como os elétrons, poderiam ser também descritas enquanto ondas (THE NOBEL PRIZE, 1929). Trata-se de um caso interessante em que o prêmio foi concedido àquele que teve a ideia fundamental, mas cuja comprovação demandou a realização de experimentos elaborados, no contexto da ciência daquela época.

Em 1927, G. P. Thomson, em Cambridge, mostrou que os elétrons sofriam difração quando colidiam com cristais. De forma independente, Davisson, em Nova Iorque, realizou pesquisas semelhantes e, no mesmo 1927, encontrou mais evidências para corroborar a teoria de de Broglie (KUEHN, 2015). Há aqui um aspecto curioso da história da Física: o prêmio Nobel concedido ao físico teórico Louis de Broglie, em 1929, está intimamente relacionado aos experimentos de difração de elétrons realizados em 1927. Thomson e Davisson, os físicos experimentais, por sua vez, receberam o Nobel um pouco mais tarde, em 1937. Do ponto de vista científico, é fundamental a compreensão de que, ao movimento das partículas (com momento p), no caso os elétrons, corresponde um comprimento de onda (λ) dado por:

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (1)$$

onde h é a constante de Planck. É notável que uma equação aparentemente simples encerre um dos aspectos mais fundamentais da Mecânica Quântica, qual seja: a dualidade onda-partícula associada ao movimento de elétrons. De fato, a expressão de Einstein-Planck, associada à luz e ao efeito fotoelétrico:

$$E = hf \quad (2)$$

Também envolve a constante de Planck e relaciona a energia do fóton (E) à sua frequência (f). As equações (1) e (2) são complementares e formam a base da teoria quântica, por exemplo, na formulação de Schroedinger (THORNTON; REX, 2012; KUEHN, 2015). Além deste aspecto conceitual fundamental, cabe ainda chamar a atenção para que o comportamento ondulatório dos elétrons também implique em desdobramentos tecnológicos, tais como o desenvolvimento do microscópio eletrônico; a propósito, Ernst Ruska recebeu o prêmio Nobel de 1986, exatamente por sua colaboração para o desenvolvimento do microscópio eletrônico e, não por acaso, a página do prêmio destaca a seguinte informação “a descoberta de que feixes de elétrons se comportam como ondas com comprimentos de onda mais curtos que a luz visível abriu novas oportunidades” (THE NOBEL PRIZE, 1986). Escreve-se, portanto, uma parte da história da Física que perpassa a física teórica, incluindo aspectos da imaginação e da especulação científica (vide o trabalho desenvolvido por de Broglie), aspectos determinantes que envolvem física experimental (vide os trabalhos de Thomson e de Davison) e os fundamentos da ciência contemporânea, até a realização de um artefato tecnológico – vide o trabalho de Ruska (THE NOBEL PRIZE, 1986) –, no caso, o microscópio eletrônico. A existência de tal microscópio, por sua vez, alavancou uma série de avanços científico-tecnológicos; por exemplo, a ciência de materiais e a nanotecnologia têm nos microscópios eletrônicos uma ferramenta no mais das vezes indispensável. Há aqui vários aspectos que interligam a história da ciência, o desenvolvimento das (novas) teorias físicas, seus desdobramentos em tecnologias e suas implicações para a cultura e a sociedade, constituindo temática de valor para o ensino. De fato, a relevância da Física Moderna e Contemporânea (FMC) para o ensino é tema há muito debatido entre pesquisadores, estando presente nos documentos legais e representando um desafio particular: como pensar sua inserção nas aulas de Física? (ROCHA; RICARDO, 2016; PERES *et al.*, 2020).

DESENVOLVIMENTO DE MATERIAIS EDUCACIONAIS RELACIONADOS À FMC E EXPERIMENTAÇÃO

Pretende-se, com esta parte inicial, justificar a importância do desenvolvimento de materiais de ensino que viabilizem trazer para a sala de aula o fenômeno da difração de elétrons, no contexto do ensino de FMC. Então, parte-se do pressuposto de que, quando se trata de ensinar Física, é de suma importância a compreensão dos conteúdos. Contudo, caberia também afirmar que o Ensino de Física é mais do que a simples produção de materiais didáticos, elaborados com a intenção de realizar experimentos e de reproduzir dados experimentais. De fato, é preciso ter em mente que, no ensino, os “problemas complexos” não encontram respostas prontas e que na formação dos estudantes – devido às suas particularidades e complexidades intrínsecas – “o pensar, descrever, modelar e experimentar são partes indelévels entre as habilidades e competências a serem desenvolvidas” (SAAVEDRA *et al.*, 2017).

É importante salientar também que, apesar de um experimento tal como o da difração de elétrons ser fundamental para a Mecânica Quântica, nem todos os professores e estudantes têm acesso ao experimento didático, em geral, devido ao seu alto custo, impossibilitando muitas instituições de possuir os aparatos de laboratório necessários. Este aspecto financeiro sempre está presente, tanto no custeio do ensino quanto no da própria ciência, particularmente, nas pesquisas em Física. A propósito, em Davisson (1937, p. 387), no início do texto, destaca-se que o local de confirmação da difração de elétrons era um “grande laboratório industrial”. De fato, a comprovação do caráter ondulatório de feixes de elétrons se deu, por um lado, nos laboratórios da IBM e, por outro, na Universidade de Cambridge, ambas instituições reconhecidas e que, historicamente, recebem grandes aportes de financiamento.

Algumas décadas depois, foram desenvolvidos experimentos didáticos da difração de elétrons. Por exemplo, encontramos uma referência de como produzir, de modo artesanal, um equipamento didático, no contexto do desenvolvimento de materiais de interesse para professores de Física (CHRISTENSEN, 1963), no que deve ser um dos primeiros registros de empenho para levar o tema à sala de aula. Neste caso particular, uma maneira simplificada de apresentar um dos principais pilares da Mecânica Quântica. Modernamente, diversas empresas comercializam kits didáticos, contudo, os preços podem ser impeditivos para a compra por parte de escolas e mesmo universidades. Sendo assim, esse tipo de equipamento não é acessível para muitos professores e estudantes, particularmente no nível médio, daí também a importância do desenvolvimento de alternativas para possibilitar o acesso a experimentos como o aqui mencionado.

No ensino, existe vivo debate com relação à realização de experimentos nos processos de ensino-aprendizagem. Neste contexto, destaca-se o conceito de experimentação (ALVES FILHO, 2004, GONÇALVES; GOI, 2020). A experimentação compreende “experimentos realizados mediante a utilização de aparatos físicos, mas também, os experimentos de pensamento e as simulações computacionais” (WESENDONK; TERRAZZAN, 2020). Por meio da experimentação, é possível auxiliar os alunos a aprender conceitos de ciências, incluindo uma dimensão epistemológica (como a ciência é construída e como se desenvolve) e aspectos metodológicos (como se faz ciência). Assim, torna-se fundamental que as atividades de laboratório, demonstrações e outros recursos sejam inseridas no ambiente escolar dialogando com as diferentes ferramentas das tecnologias existentes. Um exemplo prático do uso da experimentação no ensino de FMC, a partir de um experimento avançado, foi desenvolvido por Eberhardt e colaboradores (2017). Inclusive, a partir de uma atividade didática baseada em experimento e que seja bem elaborada, é possível ensinar as diferentes dimensões das ciências, contudo, “para atingir tal objetivo, o docente precisa selecionar um experimento que seja relevante e que tenha papel de excelência para o contexto em que ele será inserido” (WESENDONK; TERRAZZAN, 2020).

Destarte, nossa proposta faz uso do programa *Tracker* como chave para produzir um material relacionado ao experimento de difração de elétrons, de modo que este seja acessível a professores e alunos e possibilite a realização de atividades de experimentação compatíveis com o tempo didático das aulas de Física, particularmente, no ensino de Física Moderna e Contemporânea. Um exemplo pioneiro de uso do *Tracker* para a realização de

atividades baseadas em experimentação e relacionadas a conceitos de Física Moderna e Contemporânea foi desenvolvido por Bezerra e colaboradores (BEZERRA *et al.*, 2015).

Esta iniciativa de integrar o *Tracker* com o experimento de difração de elétrons permite aproximar todos os interessados – professores e estudantes – e possibilita que os atores trabalhem variando parâmetros, extraindo os próprios dados e chegando a conclusões personalizadas, alicerçando as práticas experimentais em softwares de modelagem. No caso da formação de professores, o material pode ser utilizado tanto na formação inicial quanto na continuada, até porque uma questão central no ensino de FMC está associada à demanda dos professores por metodologias de ensino práticas e objetivas, com ênfase em conceitos fundamentais e aplicações (POSPIECH; SCHÖNE, 2014).

Para a produção dos vídeos a serem analisados com o *Tracker*, utilizamos uma câmera convencional para filmar o experimento de difração de elétrons, seguindo uma ordem de construção (PEREIRA; BARROS, 2010) que envolve: montagem dos equipamentos, confecção dos tutoriais, filmagem e seleção dos melhores vídeos. O material final está disponibilizado sob licença livre, para apropriação pela comunidade.

TECNOLOGIAS DE INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO E O VIÉS CONSTRUTIVISTA

Nos últimos 30 anos, a computação evoluiu de maneira exponencial. Sendo a escola um reflexo da sociedade, é natural que as tecnologias em sala de aula também avancem, como os computadores, auxiliando e ampliando o quadro negro e giz (MACÊDO *et al.*, 2014). Essa utilização aparece em artigos de ensino de ciências com um termo próprio: Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC), que permitem o uso e a construção de materiais utilizando diversos recursos modernos. Sobre isso, (MARTINHO; POMBO, 2009) destacam que as TIC contribuem para a potencializar a compreensão, visto que utilizam, por exemplo, vários recursos de vídeo e áudio para auxiliar o processo de ensino-aprendizagem, oferecendo mais oportunidades de visualização e interação. Atualmente, a UNESCO reconhece a importância do uso das TIC para apoiar o ensino em áreas afastadas ou de conflitos (UNESCO, 2018, p. 10) e, no contexto da pandemia associada à COVID-19, dado o imperativo do isolamento social e suas consequências para a educação, as TIC fazem parte das soluções a dar suporte a professores e estudantes (BORDIN *et al.*, 2020).

Nesse contexto, cabe uma referência a Seymour Papert, que se destacou por associar computadores à educação, mas de forma construtiva. Pela concepção de Papert, os computadores deveriam ser utilizados como instrumentos para trabalhar e pensar, como meios de realizar projetos, como fontes para pensar novas ideias. (PAPERT, 1994). A partir desse momento, dois conceitos passaram a coexistir no cenário educacional, o instrucionismo e o construtivismo. Estes conceitos, na realidade, remetem inicialmente à concepção construtivista de Piaget, segundo a qual o conhecimento simplesmente não pode ser “transmitido” ou “transferido pronto” para outra pessoa:

Mesmo quando parece estarmos transmitindo com sucesso informações dizendo-as, se pudéssemos ver os processos cerebrais em funcionamento, observaríamos que nosso interlocutor está “reconstruindo” uma versão pessoal das informações que pensamos estar “transferindo”. (PAPERT, 1986, p. 137).

Segundo Papert, o instrucionismo estaria mais associado à ideia reducionista de que o caminho para uma melhor aprendizagem deve ser o aperfeiçoamento da instrução. Neste contexto, o uso do computador consistiria na informatização dos métodos de ensino tradicionais. De acordo com Valente (1997):

Do ponto de vista pedagógico esse é o paradigma instrucionista. Alguém implementa no computador uma série de informações e essas informações são passadas ao aluno na forma de um tutorial, exercício-e-prática ou jogo. Além disso, esses sistemas podem fazer perguntas e receber respostas no sentido de verificar se a informação foi retida. (VALENTE, 1997, p. 15)

Neste sentido, a visão instrutivista apresentaria limitações a serem superadas e Papert denominou de construcionista a abordagem pela qual o aprendiz constrói, por intermédio do computador, o seu próprio conhecimento (VALENTE, 1997).

Conforme Valente (1997), Papert:

usou esse termo para mostrar um outro nível de construção do conhecimento: a construção do conhecimento que acontece quando o aluno constrói um objeto de seu interesse... Na noção de construcionismo de Papert existem duas ideias que contribuem para que esse tipo de construção do conhecimento seja diferente do construtivismo de Piaget. Primeiro, o aprendiz constrói alguma coisa, ou seja, é o aprendizado por meio do fazer, do “colocar a mão na massa”. Segundo, o fato de o aprendiz estar construindo algo do seu interesse e para o qual ele está bastante motivado. O envolvimento afetivo torna a aprendizagem mais significativa. (VALENTE, 1997, p. 2)

Nas palavras de Papert, a mudança principal e necessária

assemelha-se a um provérbio africano: se um homem tem fome, você pode dar-lhe um peixe, mas é melhor dar-lhe uma vara e ensiná-lo a pescar. A educação tradicional codifica o que pensa que os cidadãos precisam saber e parte para alimentar as crianças com esse “peixe”. O construcionismo é construído sobre a suposição de que as crianças farão melhor descobrindo (“pescando”) por si mesmas o conhecimento específico de que precisam: a educação organizada ou informal poderá ajudar mais se certificar-se de que elas estarão sendo apoiadas moral, psicológica, material e intelectualmente em seus esforços. O tipo de conhecimento que as crianças mais precisam é o que as ajudará a obter mais conhecimento. ... Evidentemente, além de conhecimento sobre pescar, é também fundamental possuir bons instrumentos de pesca - por isso precisamos de computadores - e saber onde existem águas férteis - motivo pelo qual precisamos desenvolver uma ampla gama de atividades matematicamente ricas, ou “micromundos”. (PAPERT, 1986, p. 134)

Ainda que a citação acima faça menção explícita às crianças, acreditamos na generalidade da ideia. Assim, esta reflexão tem por objetivo explicitar que o presente projeto parte do entendimento de que as tecnologias, particularmente a videoanálise com o *Tracker*, podem servir de base para o desenvolvimento de atividades concretas (atividades experimentais relacionadas ao ensino de Física), por parte de professores e alunos, que remetem

à compreensão de como se dá o processo científico (modelagem científica). Portanto, o computador e o programa (*Tracker*) são instrumentos para um processo de ensino e aprendizagem que “atribui especial importância ao papel das construções no mundo como um apoio para o que ocorre na cabeça” (PAPERT, 1994). A tecnologia na escola, assim, não deve ser um fim em si mesma. Inclusive, aqui se estabelece uma possibilidade qualificada de utilização da tecnologia no Ensino de Física, tendo em vista o conceito de experimentação discutido anteriormente.

Com o aumento na produção de aplicativos na última década é natural que, cada vez mais, essas ferramentas sejam aplicadas ao ensino, em particular as atividades de laboratório – e de experimentação – visto que os dispositivos em questão (computadores, smartphones, câmeras etc.) permitem uma prática mais direta e eficaz do que algumas maneiras tradicionais de coleta de dados em laboratório (BONVENTI; ARANHA, 2015). Esta profusão de ferramentas remete a questões associadas à formação de professores (para o uso das tecnologias), à estrutura das escolas (que precisam estar materialmente preparadas para tal uso) e ao currículo (que precisa ser pensado de maneira a que as inovações possam ser incorporadas). Aqui cabe destacar que a dificuldade na abstração dos fenômenos físicos pode ser contornada com o uso das TIC e, como os materiais presentes na internet, em geral, são acompanhados de imagens e simulações, essa adversidade é amenizada (MACÊDO *et al.*, 2014). Neste contexto, a internet e as ferramentas online permitem que instituições com poucos recursos para comprar equipamentos e manter laboratórios superem algumas de suas dificuldades por meio da utilização de softwares livres. Para encontrar esses programas existem diversas iniciativas, por exemplo, o Open Source Physics que se trata de projeto comprometido com o ensino de Física por meio de programas com código aberto, dentre os quais destaca-se o *Tracker*.

O SOFTWARE TRACKER E A VIDEOANÁLISE

O software *Tracker* (BROWN, 2009) é um recurso que permite a análise quadro a quadro de um vídeo do experimento executado e a ser estudado. Assim, podem ser realizados experimentos das diversas áreas da Física e, com o *Tracker*, é feita a coleta e análise de dados, incluindo gráficos, modelagem matemática, análise em câmara lenta etc. Os vídeos podem ser produzidos de forma ágil, tendo em vista o tempo didático das aulas, compartilhados entre estudantes e analisados repetidas vezes, de modo que um experimento pode servir de base para múltiplas abordagens. Com isso, diversos obstáculos associados à realização de atividades experimentais em sala de aula são contornados (BEZERRA *et al.*, 2012). Basicamente, o vídeo fornece elementos que podem ser explorados graficamente, aferidos e manejados de acordo com o interesse dos professores e estudantes. Inclusive, experimentos podem ser realizados em sala de aula ou mesmo em casa e as filmagens podem ser analisadas em qualquer computador que tenha instalado o programa. No caso de aparatos experimentais que apresentem custos proibitivos, abre-se a possibilidade de que sejam realizadas algumas filmagens com variados parâmetros experimentais e, por meio do *Tracker*, os vídeos produzidos podem ser reproduzidos e analisados de maneira independente, segundo interesse e planejamento dos professores – e com independência da parte dos estudantes, conforme será abordado na sequência.

Em um experimento típico de modelagem de vídeo usando o *Tracker*, uma vez realizado e filmado o experimento, os alunos capturam e abrem um arquivo de vídeo digital, calibram a escala e definem os eixos de coordenadas apropriados. No processo, é possível definir expressões teóricas de força, energia ou outras grandezas que sejam consideradas relevantes. As condições iniciais também podem ser escolhidas, para uma simulação dinâmica de modelo que sincroniza e se desenha no vídeo. O comportamento do modelo é, portanto, comparado diretamente com o movimento no mundo real (“capturado” pelo vídeo), portanto, a modelagem de vídeo via videoanálise oferece vantagens sobre a análise de vídeo tradicional (que comporta tão somente a filmagem) e a modelagem composta apenas de simulação. Este processo de modelagem por videoanálise é, deste modo, compatível com atividades investigativas e de experimentação, estimulando a independência e proporcionando a agência dos estudantes (SAAVEDRA *et al.*, 2017). Além disso, tem o condão de ser utilizado com sucesso mesmo em escolas com poucos recursos (OLIVEIRA *et al.*, 2019), sendo, portanto, ferramenta com grande potencial de uso no ensino em escolas públicas.

A tela inicial do *Tracker* permite que se estabeleça uma escala de comprimento, que deve ser medida antes da gravação (geralmente, pela inclusão de uma régua ou escala graduada no cenário do filme); ela servirá de referência para as demais medidas. Posteriormente, ao longo do vídeo, a posição dos corpos será marcada com um ponto e o programa fará associações entre pontos de posição e tempo, conforme o número de quadros por segundo disponíveis no vídeo, ou “fps” (frames per second, uma característica das câmeras). Atualmente, é muito comum que as câmeras tenham, pelo menos, 30 fps, ou seja, podem ser realizadas análises em intervalos de tempo de aproximadamente 0,033 segundos. Assim, ao final do processo, tem-se os valores de posição e tempo, com isso, o próprio software apresenta gráficos pertinentes a vários parâmetros físicos, tais como: velocidade, velocidade angular, aceleração, momento linear, força, energia cinética, dentre outras. Em alguns casos, é necessário conhecer parâmetros adicionais como, por exemplo, a massa dos objetos analisados.

Ressalta-se, no entanto, que o uso da videoanálise não substitui, necessariamente, a prática experimental tradicional no que diz respeito ao manuseio (“tocar” o objeto diretamente), mas as questões fundamentais de variar parâmetros, utilizar a teoria e observar um fenômeno (SERÉ, *et al.*, 2003, p. 32) são sempre garantidas e até potencializadas por essa prática. Em outras palavras: é possível conceber atividades em que os alunos manipulem diretamente os aparatos experimentais e realizem as filmagens para depois analisar com o *Tracker*, mas também é possível disponibilizar aos estudantes vídeos de experimentos já realizados e que poderão ser manipulados pelos alunos “como se” eles estivessem realizando aqueles experimentos. No caso de atividades envolvendo equipamentos de baixo custo, certamente que a primeira opção é, em geral, recomendada, porém, em situações tais como a aqui descrita do experimento de difração de elétrons, pode ser interessante que o experimento seja executado e filmado (uma vez) para depois ser analisado pelos alunos (diversas vezes). Neste segundo caso, os materiais devem ser produzidos a priori e daí utilizados em atividades mediadas pelo *Tracker*.

Dentre as desvantagens do programa destacam-se as limitações das câmeras (BEZERRA *et al.*, 2012) pois, quanto menor o poder de resolução, pior a qualidade da imagem e, com isso, a análise quadro a quadro pode ficar comprometida, impactando as visuali-

zações; inclusive, se algum dos parâmetros necessários para a realização do experimento ocorre com grande velocidade, a qualidade da câmera deverá ser maior (ter mais “fps”) acarretando mais uma desvantagem: o custo do equipamento. Porém, sempre é possível dimensionar os experimentos a serem realizados de modo que as câmeras e computadores disponíveis possibilitem a realização de atividades experimentais significativas. Inclusive, em muitas situações, os próprios erros e limitações experimentais podem servir de base para atividades visando à compreensão mesma dessas limitações, num contexto que favoreça a aprendizagem de conceitos, metodologias, atitudes e procedimentos relacionados ao fazer científico (SAAVEDRA *et al.*, 2017), ou seja, de maneira compatível com os conceitos anteriormente abordados de experimentação e a ideia de construcionismo.

Basicamente, necessita-se de uma câmera (sendo possível o uso de celulares) e um computador com o software instalado. Não existem grandes dificuldades em aprender a utilizar o *Tracker*, visto que a equipe que o traduziu para o português brasileiro também confeccionou um tutorial em língua portuguesa, que se encontra disponível no site TRACKERBRASIL e, além disso, há diversos relatos que apontam para a facilidade de uso (BEZERRA *et al.*, 2012; SAAVEDRA *et al.*, 2017; Oliveira *et al.*, 2019), inclusive, as potencialidades associadas ao uso da videoanálise em situações decorrentes do isolamento social devido à pandemia da COVID 19 (BORDIN *et al.*, 2020). Dada a ampla utilização do programa, há também diversos outros tutoriais elaborados por grupos no Brasil e no exterior e livremente disponíveis para consulta.

Cabe notar que os materiais desenvolvidos com o *Tracker* também estão em conformidade com os Recursos Educacionais Abertos (REA), definidos pela UNESCO como sendo mídias digitais que estejam disponíveis para o uso de qualquer pessoa, com potencial de impacto positivo na educação. Alguns exemplos de endereços onde se encontram estes recursos são a Rede Interativa de Educação, o Banco Internacional de Objetos Educacionais, dentre outros (ARIMOTO *et al.*, 2014).

A DIFRAÇÃO DE ELÉTRONS COM O TRACKER: O PROJETO E POSSIBILIDADES DE USO

Para a realização deste trabalho, optou-se por abordar o experimento da difração de elétrons com o auxílio do *Tracker*, visto que as grandezas variáveis são visíveis e, com a escala do próprio programa, a extração de dados é facilitada. Os vídeos, tanto o normal (a filmagem do experimento) quanto o “trackeado” (a filmagem processada e analisada com o *Tracker*), estão disponíveis na rede mundial de computadores (em repositório institucional) para que cada pessoa os utilize em conformidade com suas necessidades, sendo estes confeccionados de maneira que se adaptem às diferentes intenções de uso (nota: os autores também se comprometem a encaminhar, sob solicitação, a qualquer professor ou estudante interessado, por e-mail, todos os materiais produzidos).

A experimentação, no contexto do material desenvolvido, pode se dar a partir de três abordagens principais (COSTA, 2017): 1- laboratório de demonstração; 2- laboratório tradicional e 3- laboratório divergente. O primeiro contempla as apresentações experimentais, sendo os estudantes meros observadores (neste caso, o material poderia ser utilizado em

aula expositiva e manipulado pelo professor). O segundo é o tipo mais comum de experimentação, porque fornece um roteiro fechado, com todos os objetivos pré-determinados (neste caso, os estudantes podem realizar as medidas a partir dos vídeos disponíveis, seguindo orientações do professor). O terceiro (laboratório divergente) proporciona mais liberdade para que o estudante se familiarize com os equipamentos (ou com o tema) e propõe questões e temas mais abertos, incentivando à reflexão e à criação.

A utilização da videoanálise aplicada aos experimentos de Física pode ser utilizada da maneira conveniente ao professor, encaixando-se nas três definições destacadas no parágrafo anterior. Por isso a exploração e criação de materiais que utilizem esses recursos são de grande relevância dentro das práticas experimentais no ensino.

Com isso, o problema de investigação deste trabalho passa a ser obter resultados experimentais de qualidade, realizar as filmagens, fazer o tratamento de videoanálise com o software *Tracker*, analisar e interpretar resultados e disponibilizar o material de modo organizado, possibilitando a aplicação em sala de aula.

DETALHES DO EXPERIMENTO

O experimento foi realizado no laboratório didático de Física Moderna da universidade na qual atuam os autores do trabalho. Tal laboratório faz parte da infra-estrutura disponível para a formação de graduandos do curso de licenciatura em Física. Antes de realizar as filmagens, os autores realizaram o experimento de difração de elétrons (vide figura 1) segundo os manuais do fabricante, num processo que levou aproximadamente 12 horas, distribuídas em 4 dias de trabalho. Esta etapa prévia fez parte do planejamento da abordagem usando o *Tracker*.



Figura 1 – Detalhe do experimento didático de difração de elétrons: (a) fonte de tensão; (b) tubo de difração de elétrons com suporte; (c) alimentação regulável de energia para o feixe de elétrons.

Fonte – Peres (2016)

O experimento consiste em, utilizando a fonte (a), variar a tensão, entre 0 e 10 kV para aquecer o filamento e acelerar os elétrons no tubo de vidro (b). Com isso, os elétrons são emitidos, devido ao efeito termoiônico, e acelerados contra uma rede cristalina de grafite (não visível na fotografia). Observa-se, então, um padrão de difração na tela fluorescente (parte branca no tubo de vidro ao centro da figura). Um detalhe deste padrão de difração pode ser visto na figura 2. O equipamento de controle (c) regula as tensões entre as grades, permitindo o aumento (ou diminuição) da quantidade de elétrons que atingem o alvo, fazendo com que a intensidade dos anéis de difração também seja maior ou menor.

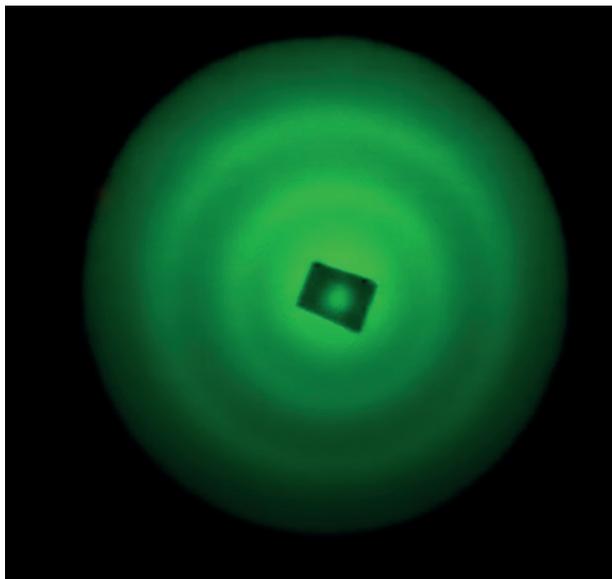


Figura 2 – Detalhe do padrão de difração obtido para um valor de tensão igual a 4 kV. (a região em destaque corresponde à área branca no centro do tubo de vidro da figura 1).

Fonte – Peres (2016)

Portanto, os fenômenos observados e mensuráveis diretamente são: a tensão e o raio dos anéis de difração. Para relacionar essas duas grandezas, necessitamos utilizar a seguinte equação (THORNTON; REX, 2012; KUEHN, 2015):

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2Uem}} \quad (3)$$

Assim, relacionamos o comprimento de onda (λ) com a tensão aplicada (U), a carga (e) e a massa (m) do elétron. É importante notar que a equação 3 nada mais é do que um desdobramento da equação 1, portanto, trata-se de uma aplicação direta da hipótese de de Broglie.

Para efeitos de medição, precisamos compreender como o raio do anel difratado no bulbo se relaciona com a equação (3). Nos experimentos originais já citados, cabe destacar que Thomson percebeu que os anéis observados corresponderiam a padrão análogo àquele que seria obtido caso um feixe de raios x incidisse na a mostra. Neste caso, valeria a condi-

ção de Bragg para a difração, $n\lambda=2d\text{sen}\theta$ (THORNTON; REX, 2012), sendo d a distância interplanar entre os planos atômicos do material (no caso o grafite) onde a radiação de comprimento de onda λ difrata (no caso da difração de elétrons, seria o comprimento de onda segundo de Broglie) e n é conhecido como a “ordem” da difração. A respeito do fenômeno observado em sua versão do experimento, Davisson percebeu que ocorria “interferência construtiva de ondas espalhadas pelo arranjo periódico dos átomos nos planos do cristal” (THORNTON; REX, 2012, p. 172). No experimento específico que realizamos, podemos encontrar o valor do raio dos anéis de difração, aplicando a relação de Bragg, que se traduz na seguinte equação:

$$R = \frac{2R_b n \lambda}{d} \quad (4)$$

Na equação (4), d é a distância entre os planos interatômicos do grafite, R é o raio do anel de difração (conforme visto na figura 2), R_b é o raio do bulbo de vidro (um número fixo que depende do bulbo específico utilizado), λ é o comprimento de onda e n é a ordem de difração (que vale 1 para este experimento).

Podemos associar as equações (3) e (4) para relacionar a tensão e o raio do anel difratado e perceber que são parâmetros inversamente proporcionais. Então, basta variar a tensão para observar a mudança no tamanho dos anéis e, com o auxílio de um paquímetro (ou por meio do *Tracker*), obter os dados necessários para trabalhar com o experimento. É importante destacar que os anéis de ordem maior ($n = 2, 3$ etc.) têm uma intensidade significativamente menor que o de primeira ordem, sendo mais difícil observá-los. A montagem do kit didático do experimento da difração de elétrons não é complexa, visto que conta com manual de instruções do fabricante e, além disso, houve o apoio dos professores responsáveis pelo laboratório onde o experimento foi realizado.

Para fazer as gravações de vídeo, foram utilizadas três câmeras habituais e uma webcam, o que forneceu uma gama maior de vídeos, com diferentes qualidades; obviamente, selecionamos os de melhor resolução, facilitando a visualização e as marcações com o programa *Tracker*.

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O experimento consiste em variar a tensão de 0 a 8 kV (é possível que se varie até 10 kV, mas, para preservar o equipamento, optamos por estabelecer 8 kV como limite para as medições) e pode-se medir diretamente com um paquímetro o raio dos anéis de difração que aparecem na tela fluorescente presente no bulbo. De acordo com as equações (3) e (4) o aumento da tensão provoca uma diminuição no raio do anel de difração (este efeito é facilmente observado e é visualmente impactante, bastando variar a tensão na primeira fonte).

No caso do uso do *Tracker*, foram marcados quatro pontos para cada anel (vide figura 3) e foi considerado, para medida de R , o valor da média dos quatro pontos marcados. Ao todo, determinamos 14 valores de R , cada um relacionado a um valor específico de tensão. Em resumo: foram produzidos vídeos em que pode ser visualizada a mudança de tamanho

dos raios para cada valor da tensão (que foi variada manualmente, lentamente); então, com o *Tracker*, pode-se ver “em tempo real” o valor da tensão e os anéis de difração correspondentes. Ao pausar o vídeo, tem-se ao fundo da imagem o valor de U e pode-se, com o *Tracker*, medir R . Note-se que qualquer usuário pode utilizar nossos vídeos e realizar, de forma independente, a análise com o *Tracker*.

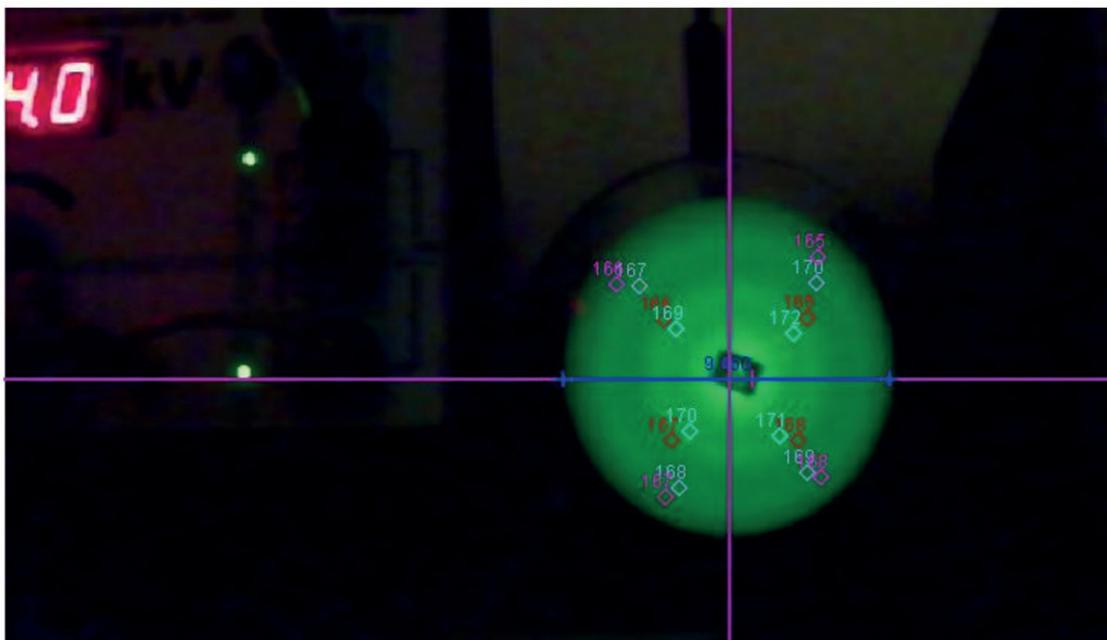


Figura 3 – Captura de tela do Tracker para o experimento de difração de elétrons. Nesta figura, observa-se, à esquerda, o valor da tensão (4.0 kV). Ao centro, a origem dos eixos coordenados (em rosa) e alguns dos pontos marcados com o Tracker, localizando as posições dos anéis (vide, por exemplo, os números 169, 170, 171 e 172), a fim de determinar R para a tensão aplicada.

Fonte – Peres (2016)

Por meio da equação (3) e dos dados obtidos pela aplicação do *Tracker* no experimento, obtivemos, então, valores que correspondem ao comprimento de onda. Estes resultados se encontram na Tabela 1. Para auxiliar os cálculos, utilizamos uma planilha eletrônica. Note-se que é possível determinar, para cada valor de tensão, dois valores diferentes para o raio, R e RM (vide Tabela 1), sendo o primeiro associado ao valor $n=1$ e o segundo a $n=2$ (optaremos por utilizar somente o primeiro nos cálculos que seguem).

Tabela 1 – Valores obtidos da análise com o Tracker: tensão (U), raio do menor anel (R), raio do maior anel (RM) e comprimento de onda (λ).

U [kV]	R[mm]	RM [mm]	λ [m]
3,9	23,50	38,26	$6,21 \times 10^{-10}$
4,3	20,91	34,76	$5,91 \times 10^{-10}$
4,6	19,35	32,73	$5,72 \times 10^{-10}$
4,9	18,00	30,53	$5,54 \times 10^{-10}$
5,2	16,72	28,86	$5,38 \times 10^{-10}$
5,5	15,79	26,98	$5,23 \times 10^{-10}$
5,8	15,00	25,91	$5,09 \times 10^{-10}$
6,1	14,33	24,63	$4,97 \times 10^{-10}$
6,4	13,71	23,60	$4,85 \times 10^{-10}$
6,7	12,96	22,34	$4,74 \times 10^{-10}$
7,0	12,58	21,94	$4,64 \times 10^{-10}$
7,3	12,20	21,13	$4,54 \times 10^{-10}$
7,6	11,74	20,69	$4,45 \times 10^{-10}$
7,9	11,34	19,92	$4,36 \times 10^{-10}$

Fonte – Peres (2016)

Relacionando as equações (3) e (4), obtemos uma equação para o raio:

$$R = \frac{2L}{d} \cdot n \cdot \frac{h}{\sqrt{2me \cdot U}} \quad (5)$$

Como não podemos alterar o material (grafite) que difrata o feixe de elétrons e nem o bulbo que o engloba, unificamos os parâmetros que não variam (L, n, h, d, m, e) em uma constante, K (nota: em havendo interesse, é possível substituir os valores numéricos, a fim de determinar K). Desta maneira, a equação (5) torna-se,

$$R = \frac{K}{\sqrt{U}} \quad \text{ou} \quad K = \frac{2L}{d} \cdot n \cdot \frac{h}{\sqrt{2me}} \quad (6 \text{ e } 7)$$

Esta manipulação ocorre para aproximar os dados tratados no laboratório didático ao gráfico presente no artigo original de Davisson – aqui, nossa opção de apresentação dos dados, visando a traçar um possível caminho para explorar o experimento, com um viés didático. A propósito, na palestra proferida por ocasião do prêmio Nobel, este gráfico en-

contra posição de destaque, porque é apresentado como a uma comprovação da “fórmula de de Broglie” (DAVISSON, 1937), ou seja, a equação 1. O gráfico apresentado por Davisson é reproduzido na figura 4; esta figura inclui também os dados (Tabela 1) obtidos no experimento realizado utilizando o *Tracker*.

Após a montagem e realização dos experimentos, houve uma seleção dos melhores vídeos (PEREIRA; BARROS, 2010), baseada na qualidade apresentada e nos valores mais precisos apresentados no visor da fonte de energia. Na sequência, os dados foram tratados com o auxílio de um editor de planilhas, bem como um software de análise de gráficos. Conforme é possível observar na figura 4, os resultados obtidos com o *Tracker* guardam grande semelhança com aqueles apresentados por Davisson.

O PRODUTO EDUCACIONAL DESENVOLVIDO

Foi produzido um material que consiste em um vídeo do experimento de difração, um arquivo do *Tracker*, com marcações, em que tal experimento foi analisado, além de dois tutoriais (um escrito e outro em vídeo) contendo explicações e informações detalhadas dos processos referentes ao experimento e ao uso da videoanálise enquanto ferramenta de mediação. Portanto, este material é indicado para professores e estudantes, permitindo diversas maneiras de uso, dentre as quais: 1- assistir ao experimento, com ou sem a utilização do *Tracker*, constituindo um material simplesmente demonstrativo, para o caso de o professor buscar apenas, por exemplo, um recurso inicial para apresentar o experimento; 2- (re)fazer a prática com o *Tracker*, aproveitando as marcações de valores de tensão e raios (R) correspondentes, para o caso de professores e estudantes também se interessarem por manipular valores numéricos; 3- selecionar os vídeos disponibilizados e personalizar a prática, realizando o “trackeamento” dos vídeos de forma independente (variando parâmetros diferentes ou marcando outros pontos, que não os já marcados e disponibilizados por nosso grupo); 4- realizar um tratamento completo dos dados, buscando, por exemplo, compor uma tabela semelhante à Tabela 1 e utilizando os dados para realizar um ajuste (uma regressão pelo método de mínimos quadrados) e obter uma reta semelhante ao que se observa na figura 4. Neste último caso, ainda seria possível realizar as substituições de alguns dos valores numéricos presentes na equação 5, a fim de determinar, por exemplo, o valor de h (caso se opte por considerar d um parâmetro dado) ou, inversamente, determinar d (caso h seja considerado um valor dado).

Essas nuances foram pensadas de maneira a dar aos usuários a liberdade de utilizar o material segundo seus planejamentos didáticos, em conformidade com o tempo didático disponível, as determinações curriculares e os interesses específicos de professores e alunos em abordar ou explorar o tema “difração de elétrons”. Nossa opção por apresentar o gráfico de $R \times$ (figura 4) é uma maneira elegante de organizar os dados, porque coincide com a forma da apresentação feita na entrega do prêmio Nobel, contudo, trata-se tão somente de uma das possibilidades de abordagem didática.

Em verdade, o material produzido faz parte do produto do mestrado profissional de um dos autores deste trabalho e todos os arquivos estão disponíveis no repositório institucional da universidade na qual o projeto foi realizado. Tanto o produto educacional quanto a dissertação associada estão disponíveis no repositório institucional por meio do

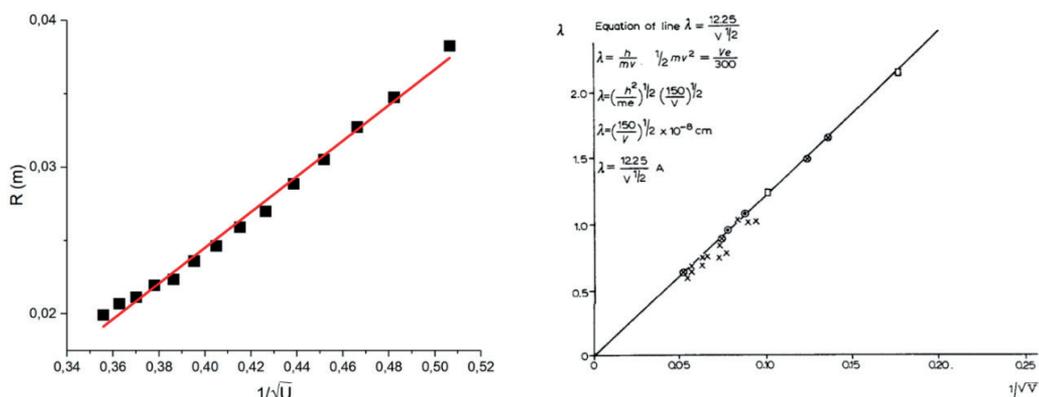


Figura 4 – Comparação entre o gráfico obtido no laboratório didático de Física Moderna (à esquerda), no experimento mediado pelo Tracker (vide dados da Tabela 1), e o gráfico publicado por Davisson (à direita), no documento do prêmio Nobel de 1937 (DAVISSON, 1937). Nota: a linha vermelha corresponde ao ajuste de uma reta aos pontos experimentais.

Fonte – Autores (2021)

link <<http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/>>, para que qualquer pessoa possa consultar o material e acessar os tutoriais que foram elaborados, com o intuito de facilitar e promover seu uso em sala de aula.

DISCUSSÃO

O ensino de FMC, particularmente a Física Quântica, consiste em, fundamentalmente, elaborar, articular representações e construir estratégias para modelar e representar o mundo microscópico e, dadas as complexidades (conceituais, matemáticas e mesmo epistemológicas) dos temas, seu desenvolvimento é, muitas vezes, contraintuitivo (KUEHN, 2015; PERES *et al.*, 2020). De fato, a transposição desses temas “está baseada em experimentos elaborados e intrincados que, do ponto de vista didático, apresentam dificuldades relacionadas ao custo dos equipamentos e à dinâmica mesma necessária para as aulas de laboratório” (PERES *et al.*, 2020). Além disso, a complexidade inerente aos experimentos tende a se traduzir em um tempo didático mais extenso para as aulas. Assim, a formação (inicial e continuada) de professores, tanto do ponto de vista do conhecimento dos conceitos fundamentais e dos conteúdos curriculares quanto do ponto de vista da elaboração de aulas (aí incluída a competência na utilização de TIC) representa outro importante desafio. A propósito, os aspectos referentes à formação de professores e ao uso das tecnologias constituem assunto atual e que mobiliza comunidades no Brasil (NOVAES; STUDART, 2016) e no exterior (POSPIECH; SCHÖNE, 2014; GUNSTONE, 2015).

No caso brasileiro, merecem destaque as iniciativas relacionadas ao Mestrado Profissional Nacional em Ensino de Física, MPNEF, (<http://www.www1.fisica.org.br/mnpef/>), voltado à formação de professores de ensino médio e fundamental, com ênfase principal

em aspectos de conteúdos na área de Física, tendo em vista o diagnóstico de que “o ensino de Física na Educação Básica precisa passar por mudanças significativas, pois está desatualizado em termos de conteúdos e metodologias” (NOVAES; STUDART, 2016). Este diagnóstico também aponta para o problema de que os conteúdos de FMC não são abordados nas aulas e que “as metodologias de ensino tendem a ser, predominantemente, aulas expositivas e resolução de exercícios, sem incorporar as tecnologias de informação e comunicação” (NOVAES; STUDART, 2016).

Neste trabalho, buscamos uma articulação “tripla”: 1- a seleção de um tópico fundamental – a difração de elétrons –, que representa um experimento relevante para o contexto em que será inserido (WESENDONK; TERRAZZAN, 2020), no caso, o ensino de FMC; 2- a utilização de uma TIC (a videoanálise) baseada em um Recurso Educacional Aberto (o *Tracker*); 3- tendo em vista a elaboração de um material didático (o produto de um mestrado profissional) inspirado por pesquisas referenciadas no construcionismo (PAPERT, 1986) e no conceito de experimentação (WESENDONK; TERRAZZAN, 2020) para ser usado por professores e estudantes nas aulas de Física. Esta articulação envolve a integração dos trabalhos de ensino e pesquisa norteados pelo compromisso de construir alternativas concretas para o Ensino de Física, e tem também como inspiração a consciência de que é preciso fomentar o impacto e relevância dos trabalhos da pós-graduação para a sociedade (PERES *et al.*, 2020).

Numa primeira etapa, foi realizado o experimento de difração de elétrons, incluindo a mediação por meio da videoanálise com o *Tracker* (vide figuras de 1 a 4). Com isso, o material produzido permite a visualização do experimento (figuras 1 e 2), a fim de propiciar que o professor incremente suas aulas de FMC. Ao mesmo tempo, foram obtidos os dados experimentais (vide Tabela 1) e procedeu-se uma análise quantitativa por meio da manipulação das equações fundamentais associadas ao fenômeno. Os resultados também foram organizados de modo a compor uma representação gráfica (figura 4), a qual incorpora informação contida em um trabalho original (DAVISSON, 1937), que ecoa a história da ciência, associado à descoberta e interpretação do fenômeno, o que resultou em um prêmio Nobel.

Note-se que, para o gráfico de $R = \dots$ (figura 4), o comportamento dos pontos experimentais segue uma reta, permitindo concluir de maneira relativamente simples que, neste experimento que envolve equipamento didático de alto custo, os vídeos produzidos e a mediação usando o software *Tracker* oferecem as condições de reprodutibilidade do experimento de difração de elétrons. Portanto, o experimento pode ser “levado” para a sala de aula. No contexto brasileiro, essa constatação é relevante, na medida em que grande parte das escolas estão inseridas em um contexto de falta de laboratórios de Física, bem como de desafios concernentes ao preparo de estudantes e professores para as atividades experimentais (OLIVEIRA *et al.*, 2019; PERES *et al.*, 2020).

O material produzido e aqui descrito é caracterizado por possibilitar a professores e estudantes assistirem ao vídeo da difração de elétrons e realizarem atividades experimentais mediadas pela videoanálise com o *Tracker*. De maneira complementar, foi elaborado um roteiro de uso, com o intuito de facilitar a apropriação do material por parte de professores e estudantes. Por outro lado, está mantido um convite à inovação, tendo em vista que o material didático é aberto à utilização em atividades que podem ser elaboradas pelos

usuários, o que está em conformidade com as múltiplas maneiras de se utilizar práticas experimentais, incluindo o conceito de experimentação no ensino de FMC (COSTA, 2017; EBERHARDT *et al.*, 2017; WESENDONK; TERRAZZAN, 2020).

Caberia ponderar que a condução de atividades mediadas por TIC demanda professores com formação para isso, incluindo o conhecimento das diversas ferramentas e as condições de apropriação e uso das mesmas em sala de aula. Esta formação deve ser continuada, dada a velocidade com que as novas tecnologias são atualizadas e modificadas. No caso do presente trabalho, isso aponta para o conhecimento do uso do *Tracker* aliado ao conhecimento do conteúdo específico de Física (a difração de elétrons) e a capacidade de levar o material para sala de aula de modo a que seja inserido no planejamento da disciplina. Portanto, há ainda o desafio de demonstrar como levar este material efetivamente para a sala de aula, para que os estudantes tenham acesso ao conteúdo, ao experimento e a seus possíveis desdobramentos. A propósito, o desenvolvimento dos estudantes, em relação às TIC, está diretamente associado à confiança e capacidade dos professores em lidar com situações ligadas a *hardware* e *software* (THOMSON, 2015). A investigação desses processos demandaria a realização de pesquisas complementares em que o uso do produto aqui desenvolvido seria avaliado – e validado – a partir de situações específicas. Reconhecemos este tipo de pesquisa como sendo fundamental, porém, estas análises estão fora do escopo do presente trabalho e constituem sugestão para trabalhos futuros.

O material didático produzido consiste nos vídeos, em textos orientativos com considerações concernentes aos conteúdos específicos da difração de elétrons e suas inter-relações com a FMC, incluindo alguns elementos da história da Física, e agrega um breve tutorial a respeito da videoanálise com o *Tracker*. Por este material estar disponível em ambientes virtuais de amplo acesso (particularmente, o repositório institucional da universidade: [link](#)), oportuniza incrementos na aprendizagem dos estudantes, ao mesmo tempo em que fornece apoio consistente para docentes que não têm possibilidades de trabalhar com equipamentos tão caros, mas que necessitam – ou almejam – lecionar tal conteúdo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, apresentamos um produto educacional baseado na tecnologia da videoanálise, para levar à sala de aula o experimento de difração de elétrons, um tema fundamental no contexto da Física Moderna e Contemporânea.

A videoanálise por meio do software livre *Tracker* é um exemplo concreto de TIC com potencial de ampliar as possibilidades de visualização e manipulação de dados experimentais associados a experimentos de Física. Sua aplicação em atividades de FMC é compatível com abordagens investigativas e em sintonia com o conceito de experimentação.

A integração do experimento de difração de elétrons por meio do *Tracker* no material didático desenvolvido configura um Recurso Educacional Aberto (REA) disponível à comunidade e que visa à formação inicial e continuada de professores e à promoção e fomento do ensino de FMC.

REFERÊNCIAS

ALVES FILHO, J. P. . Regras da transposição didática aplicadas ao laboratório didático. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, 21, 2004. 44-58

ARIMOTO, M. M. *et al.* Recursos Educacionais Abertos: Aspectos de desenvolvimento no cenário brasileiro. **Novas Tecnologias na Educação**, 12(1), 2014. 1-10 p.

BEZERRA-JR, *et al.* . Uma abordagem didática do experimento de Millikan utilizando videoanálise. *Acta Scientiae - Revista de Ensino de Ciências e Matemática*, 17(3), 2015. 813-832 p.

BEZERRA JR, A. G. *et al.* Vídeoanálise com o software livre tracker no laboratório didático de Física: movimento parabólico e segunda lei de Newton. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, 29, 469-490, 2012.

BONVENTI JR, W.; ARANHA, N. Estudo das oscilações amortecidas de um pêndulo físico com o auxílio do “Tracker”. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, 37(2), p. 2504-1 - 2504-9, 2015.

BORDIN, G. D.; PERES, M.; LENZ, J. A.; BEZERRA JR, A. G. **Desafios dos professores durante o distanciamento social devido à pandemia da COVID-19: uma proposta para o Ensino de Física utilizando videoanálise.** R. Tecnol. Soc., Curitiba, v. 16, n. 43, p. 147-157, ed. esp. 2020. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/12186>. Acesso em: 20 out. 2020.

BROWN, D.; COX, A. J. Innovative Uses of Vídeo Analysis. **The Physics Teacher**, 47(3), 2009. 145-150 p.

CHRISTENSEN, F. E. Electron Diffraction Tube. **American Journal of Physics**, v. 31, n. 10, p. xiii-xiv, 1963.

COSTA, F. W. . **A Experimentação no ensino de Física: proposta de aplicação para temas do ensino médio.** 2017. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) – Programa Nacional Profissional em Ensino de Física, Universidade Federal de São Carlos, 2017.

DAVISSON, C. J. The discovery of electron waves. **Nobel Lecture**, p. 387-394. 1973. Disponível em: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1937/davison/lecture/>. Acesso em: 16 dez. 2020.

EBERHARDT, D., DA ROCHA FILHO, J. B., LAHM, R. A., & BAITELLI, P. B. v. 34, n. 3, p. 928-950. Experimentação no ensino de Física Moderna: efeito fotoelétrico com lâmpada néon e LEDs. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**. 2017.

EISTEIN, A. Fundamental ideas and problems of the theory of relativity. **Nobel Lecture**, 1923. 482-490 p.

GONÇALVES, Raquel Pereira Neves; GOI, Mara Elisângela Jappe. Metodologia de Experimentação como estratégia potencializadora para o Ensino de Química. **Comunicações**, v. 27, n. 1, 2020. 219-247 p.

GUNSTONE, Richard. **Encyclopedia of Science Education**; With 88 Figures and 32 Tables. Springer, 2015.

KUEHN, Kerry. **A Student's Guide Through the Great Physics Texts: Volume IV: Heat, Atoms and Quanta**. Springer, 2015.

MACÊDO *et al.* . Levantamento das abordagens e tendências dos trabalhos sobre as Tecnologias de Informação e Comunicação apresentados no XIX Simpósio Nacional de Ensino de Física. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, 31(1), 2014. 167-197 p.

MANGILI . A. I. Heinrich Rudolph Hertz e a “descoberta” do efeito fotoelétrico: Um exemplo dos cuidados que devemos ter ao utilizar a história da ciência na sala de aula. **História da Ciência e Ensino**, v. 6, 2012. 32-48 p.

MIRANDA, G. L. Limites e possibilidades das TIC na educação. **Sísifo**, n. 3, p. 41-50/EN 39-48, 2007

MARTINHO , T.; POMBO, L. . Potencialidades das TIC no ensino das ciências naturais – um estudo de caso. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, 8(2), 2009. 527-538 p.

NOVAES, Marcel; STUDART, Nelson. **Mecânica quântica básica**. Livraria da Física, 10 edição, v. 12, 2016.

OLIVEIRA, F. A. *et al.* . Videoanálise e Ensino de Física em Situação de Vulnerabilidade Social. **Abakós**, 7, 2019. 3-21 p.

PAPERT, S. **Constructionism: A new opportunity for elementary science education**. Massachusetts Institute of Technology, Media Laboratory, Epistemology and Learning Group, 1986.

PAPERT, S. **Máquina das Crianças**, tradução Sandra Costa. Artmed 1994.

PEREIRA, M. V., BARROS, S. S. Análise da produção de vídeos por estudantes como uma estratégia alternativa de laboratório de física no Ensino Médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, 32(4), 4401-1 – 4401-8. 2010.

PERES, M. V.; **Ensino de Física Moderna e Contemporânea baseado em atividades de laboratório mediadas pela utilização de um *software* de videoanálise e modelagem.** 2016. Dissertação (Mestrado Profissional em Formação Científica, Educacional e Tecnológica) – Programa de Pós-Graduação em Formação Científica, Educacional e Tecnológica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

PERES, M. V., CONCEIÇÃO, S. A. H., DOS SANTOS, T. V., LENZ, J. A., SAAVEDRA FILHO, N. C., BEZERRA JR, A. G. . Articulated Video Production Between Teachers and Training Teachers as a Proposal for the Teaching of Modern and Contemporary Physics. **Acta Scientiae**, 22(6), 2020. 159-184 p.

POSPIECH, Gesche; SCHÖNE, Matthias. Quantum physics in teacher education. *In: Frontiers of Fundamental Physics and Physics Education Research.* Springer, Cham, 2014. 407–416 p.

ROCHA, D. M., & RICARDO, E. C. . As crenças de autoeficácia e o ensino de Física Moderna e Contemporânea. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, 33(1), 2016. 223-252 p.

SAAVEDRA, N.; LENZ, J. A.; BEZERRA JR, A. G.; FLORCZAK, M. A.; GARCIA, V. G. A videoanálise como mediadora da modelagem científica no ensino de mecânica. **Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia**, v. 10, p. 231-246, 2017

SERÉ, M. G. *et al.* (2013). O papel da experimentação no ensino da física. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v.20(1), 2013. 30-42 p.

THE NOBEL PRIZE, **The Nobel Prize in Physics 1929.** Disponível em: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1929/summary/> . Acesso em: 17 dez. 2020. 17/12/2020

THE NOBEL PRIZE, **The Nobel Prize in Physics 1986.** Disponível em: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1986/ruska/facts/> . Acesso em: 17 dez. 2020.

THOMSON, S. Policy Insights: Australian Students in a digital world. **Australian Council for Educational Research.** v. 3, Camberwell, 2015.

THORNTON, Stephen T.; REX, Andrew. **Modern physics for scientists and engineers.** Cengage Learning, 2012.

UNESCO. **Padrões de Competência em TIC para professores**, n. 1, 2008. Disponível em https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000156209__por - Acesso em: 01 maio. 2020.

VALENTE, J. A. **Informática na Educação: instrucionismo x construcionismo.** EDUCAÇÃO PÚBLICA 1997. Disponível em: <http://www.educacaopublica.rj.gov.br/biblioteca/tecnologia/0003.html>. Acesso em: 25 fev. 2019.

WESENDONK, Fernanda Sauzem; TERRAZZAN, Eduardo Adolfo. Condicionantes para a utilização de experimentações por professores de física do ensino médio. **Revista de enseñanza de la física**, v. 32, n. 1, p. 123-136, 2020.

DADOS DOS AUTORES

MARCUS VINICIUS PERES

Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Formação Científica, Educacional e Tecnológica (PPGFCET) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). E-mail: markinhusperes@gmail.com

JORGE ALBERTO LENZ

Professor Titular do Ensino Básico Técnico e Tecnológico do Departamento Acadêmico de Física do Campus Curitiba da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

ARANDI GINANE BEZERRA JR

Professor Associado da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), atuando no Departamento Acadêmico de Física (DAFIS) e no programa de pós-graduação *stricto sensu* em Formação Científica, Educacional e Tecnológica (PPGFCET).

GIULIO DOMENICO BORDIN

Mestre em Ensino de Ciências e Matemática pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Submetido em: 04-02-2021

Aceito em: 20-01-2022