

Uma abordagem didática do experimento de Millikan utilizando videoanálise

Arandi Ginane Bezerra Jr.

Jorge Alberto Lenz

Nestor Cortez Saavedra Filho

Marcus Vinícius Peres

Odair Cossi Jr.

Ana Caroline Mello

Sam Adam Hoffmann Conceição

RESUMO

Um aspecto importante no ensino de Física é a inserção, em sala de aula, de experimentos relevantes referentes à Física Moderna e Contemporânea. Neste contexto, merece destaque o desenvolvimento de atividades investigativas que sejam acessíveis a públicos amplos. O objetivo do presente trabalho é propor uma abordagem didática baseada em videoanálise para a experiência da gota de óleo de Millikan. Trata-se de material de apoio destinado ao ensino médio e superior, tendo em vista superar dificuldades relacionadas à aquisição e manutenção de laboratórios didáticos de Física Moderna e Contemporânea, bem como propor encaminhamentos para a realização de atividade interativa baseada em experimentação. Este experimento, datado de 1913, que possibilitou a determinação da carga elementar (e) e a quantização da carga elétrica, encerra diversos aspectos relacionados à história da Física e ao fazer científico. Dada sua complexidade, trata-se de uma atividade experimental que não é de fácil acesso a estudantes e professores do ensino médio, e mesmo de universidades que dispõe de menos recursos. A tecnologia empregada para a videoanálise foi o software livre *Tracker*, com o qual analisamos quadro a quadro o movimento das gotas em um experimento de Millikan didático. Após a realização de centenas de experimentos sob condições

Arandi Ginane Bezerra Jr. é Doutor em Física pela UFPE. Atualmente é professor do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências (PPGFCET) e do curso de Licenciatura em Física da UTFPR. Endereço para correspondência: UTFPR – Avenida Sete de Setembro, 3165, Centro, 80230-901, Curitiba, PR.

E-mail: arandi@utfpr.edu.br

Jorge Alberto Lenz é Doutor em Física pela UFRGS. Atualmente é professor do curso de Licenciatura em Física da UTFPR. Endereço para correspondência: UTFPR – Avenida Sete de Setembro, 3165, Centro, 80230-901, Curitiba, PR. E-mail: lenz@utfpr.edu.br

Nestor Cortez Saavedra Filho é Doutor em Física pela USP. Atualmente é coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências (PPGFCET) e do professor do curso de Licenciatura em Física da UTFPR. Endereço para correspondência: UTFPR – Avenida Sete de Setembro, 3165, Centro, 80230-901, Curitiba, PR. E-mail: nestorsf@utfpr.edu.br

Marcus Vinícius Peres é Licenciado em Física (UTFPR). Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Formação Científica, Educacional e Tecnológica (PPGFCET – UTFPR) e professor do Colégio Marista Santa Maria. Endereço para correspondência: UTFPR – Avenida Sete de Setembro, 3165, Centro, 80230-901, Curitiba, PR. E-mail: markinhusperes@gmail.com

Odair Cossi Jr. é Licenciado em Física pela UTFPR. Atualmente é professor do Colégio Bom Jesus. E-mail: odair-fisica@utfpr.com

Ana Caroline Mello é Licenciada em Física pela UTFPR. Endereço para correspondência: UTFPR – Avenida Sete de Setembro, 3165, Centro, 80230-901, Curitiba, PR. E-mail: ana.caroline91@hotmail.com

Sam Adam Hoffmann Conceição é Mestre em Ensino de Ciências pelo PPGFCET – UTFPR. Atualmente, é professor da rede estadual do Paraná. E-mail: peixeboipianista@hotmail.com
Recebido para publicação em 8/7/2015. Aceito, após revisão, em 29/10/2015.

experimentais diversas, foram selecionados vídeos específicos com informação que permite induzir a quantização da carga e a determinação do valor de e . Estes vídeos foram disponibilizados para acesso livre, juntamente com material de apoio, de modo a servir de suporte para atividades demonstrativas e investigativas compatíveis com aulas de Física, tanto em nível médio quanto superior. Este trabalho faz parte de uma iniciativa voltada à produção e disseminação de objetos educacionais para o ensino de Física Moderna e Contemporânea.

Palavras-chave: Experimento de Millikan. Videoanálise. *Tracker*. Tecnologias de Informação e Comunicação. Ensino de Física Moderna e Contemporânea.

A Didactic Approach to the Millikan Experiment Using Video Analysis

ABSTRACT

An important aspect in physics education is the classroom inclusion of relevant experiments regarding Modern and Contemporary Physics. In this context, emphasis should be given to the development of investigative activities that are accessible to large audiences. In this paper, we propose a didactic approach to Millikan's oil drop experiment that is based on video analysis. Our approach relates to both secondary and graduate levels. The oil drop experiment, originally from 1913, which allowed the determination of the elementary charge (e) and the quantization of electric charge, comprises several aspects regarding the history of physics and the making of science. Due to its complexity, this experimental activity is not easily accessible to students and high school teachers, and not even to less resourceful universities. The free software *Tracker* was the technology of choice for video analysis, allowing single droplets frame by frame movement analysis in a didactic Millikan experiment. Hundreds of experiments were performed under different experimental conditions and, thereafter, we selected a group of videos from which one can determine both charge quantization and the value of e . These videos are now freely available along with supporting material for teachers and students, with focus on classroom demonstrations and investigative activities for both secondary and higher education. This work is part of a broader initiative aiming at the production and dissemination of educational materials for the teaching of Modern and Contemporary Physics.

Keywords: Millikan Experiment. Video analysis. *Tracker*. Information and Communication Technologies. Modern and Contemporary Physics Teaching.

INTRODUÇÃO

Em 1962, a Associação Americana de Professores de Física (*American Association of Physics Teachers*, AAPT) estabeleceu a Medalha Robert A. Millikan. Trata-se de um prêmio anual, concedido em reconhecimento “àqueles que realizaram contribuições notáveis e intelectualmente criativas ao ensino de física” (AAPT, 2014), que, atualmente, continua sendo distinção importante daquela associação. Logo na primeira versão do prêmio, dá-se ênfase especial às contribuições de Millikan ao ensino de Física, tanto em nível médio quanto superior (NEHER, 1964). De fato, o ganhador do prêmio Nobel de 1923 considerava igualmente importantes as habilidades de pesquisar e de ensinar, tanto que, em sua biografia disponível no site oficial do prêmio, em conjunto com sua formação e contribuições científicas, é dado destaque à sua dedicação ao ensino e à escrita de livros referentes ao ensino de Física (NOBELPRIZE.ORG, 1923).

Millikan recebeu o prêmio Nobel por conta de seus trabalhos sobre “a carga elementar da eletricidade e o efeito fotoelétrico” (NOBELPRIZE.ORG, 1923). Em seu discurso, proferido por ocasião do prêmio, logo no primeiro parágrafo, Millikan se vale de uma metáfora interessante: a ciência caminha com dois pés, teoria e experimento. Na sequência, assume-se enquanto “mero experimentalista” e fornece detalhes a respeito de como concebeu e realizou alguns dos experimentos. Este destaque também permeava seus livros dedicados ao ensino, tendo em vista o grande valor por ele atribuído a “aprender física por meio do manuseio de equipamentos” (NEHER, 1964). Destacamos, assim, múltiplos sentidos que podem ser explorados, tendo em vista o ensino de Física Moderna e Contemporânea (FMC), a partir do experimento da gota de óleo de Millikan. Trata-se de experimento portador de inegável valor científico, realizado por um cientista que inspira valorizar os aspectos experimentais da ciência e do ensino. Desta forma, o presente trabalho busca criar meios inovadores de tornar acessível a estudantes e professores o experimento da gota de óleo.

Existe, atualmente, um notável interesse pelo ensino de FMC, representado pela crescente produção acadêmica na área (PEREIRA; OSTERMANN, 2009). Este assunto apresenta vários desafios, tendo em vista as particularidades necessárias para sua contextualização e Transposição Didática (BROCKINGTON; PIETROCOLA, 2005). Outro aspecto importante está relacionado ao desenvolvimento de atividades de laboratório e ao uso consequente de tecnologias educacionais inovadoras, que possam efetivamente causar impacto em sala de aula (MACÊDO et al., 2014). Além disso, há que se atentar para a formação docente num contexto em que a maioria das publicações consiste em bibliografia de consulta para professores, mas no qual é pequena a quantidade de trabalhos publicados envolvendo professores em serviço ou em formação inicial (PEREIRA; OSTERMANN, 2009). Embora o despertar da curiosidade dos estudantes pelo tema seja motivador para discussões na escola, entretanto, dada a realidade educacional brasileira, surgem dificuldades tais como deficiências na formação de professores com respeito a conteúdos de Relatividade e Física Quântica, por exemplo, já que as licenciaturas em Física, notadamente antes dos PCN+ (BRASIL, 2002) não contemplavam o tema enquanto componente da formação do professor de Física. Desta forma, há várias gerações de professores de Física e Ciências em nosso país que nunca travaram contato com discussões acerca da transposição didática da Física Moderna para a sala de aula. Isto explica, em parte, o desamparo sentido por estes professores, pelo fato já citado, de tais discussões permearem sua prática docente atual.

Diante deste quadro, o desenvolvimento de atividades experimentais pode ocupar um papel central no ensino de Física (ALVES FILHO, 2004), no entanto, é notória a ausência de laboratórios, especialmente aqueles voltados ao ensino de FMC. Estes laboratórios tendem a ser muito caros e, muitas vezes, os experimentos didáticos demandam um tempo não compatível com a reduzida quantidade de aulas de Física no ensino médio. Isto reflete na formação docente, inclusive, no potencial de desenvolvimento, por parte dos professores, de atividades que incluem o laboratório, ou na utilização de alternativas, tais como as Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC). De fato, há algumas propostas envolvendo equipamentos de baixo custo como, por exemplo, para a determinação da

constante de Planck (CAVALCANTE; HAAG, 2005), ou a combinação de um enfoque histórico com atividades experimentais (DA SILVA et al., 2011). O uso de simulações também é uma opção (OSTERMANN et al., 2009), mas, mesmo este campo das TIC ainda tem sido pouco explorado no ensino de FMC (MACÊDO et al., 2014).

Uma categoria importante das TIC são os vídeos didáticos. Existem diversas iniciativas de utilização de vídeos enquanto recursos didáticos voltados, por exemplo, para o ensino de mecânica clássica (SÁNCHEZ, 2007). Os vídeos podem servir de recurso para engajar estudantes e produzir materiais de apoio a serem utilizados em sala de aula, tendo em vista uma abordagem cultural mais ampla dos processos de ensino (PEREIRA et al., 2012). Destaque-se que este tipo de iniciativa do uso de vídeos também encontra ressonância na literatura internacional (LAWS et al., 2015). Neste contexto, é significativa a falta de materiais educacionais disponíveis na língua portuguesa; a propósito, no cenário brasileiro, a ausência de políticas públicas de incentivo e financiamento também constitui problema a ser superado (ARIMOTO et al., 2014).

O presente trabalho busca apresentar uma alternativa que emprega o uso das TIC, em especial, a produção de vídeos didáticos, com foco no ensino de FMC, tendo como tema o experimento da gota de óleo de Millikan. Os vídeos podem ser analisados por meio de videoanálise, mediada pelo *software* livre *Tracker* (TRACKER, 2014). O uso do *Tracker* possibilita a análise do movimento das gotas de óleo de um experimento didático de Millikan e, assim, a determinação das cargas elétricas dessas gotas. O projeto foi desenvolvido por estudantes de um curso de licenciatura em Física, em parceria com integrantes de um mestrado profissional em ensino de ciências, voltado à formação continuada de professores. Trata-se de uma articulação entre graduação e pós-graduação que visa à produção de vídeos didáticos voltados ao ensino de FMC.

O EXPERIMENTO DA GOTA DE ÓLEO DE MILLIKAN

O experimento de Millikan, ou experimento da gota de óleo, como ficou mais conhecido, sintetiza, de fato, uma série de experiências, realizadas na primeira década do século XX, visando à determinação da carga do elétron. O experimento de J. J. Thomson, de 1897, demonstrara que os raios catódicos consistiam em partículas – os elétrons – “portadoras” de eletricidade, que são constituintes do átomo (NOBELPRIZE.ORG, 1906). Thomson mediou o valor da relação carga-massa (e/m) do elétron. Anteriormente, Faraday havia realizado experimentos de eletrólise, os quais culminaram em uma lei empírica, expressa na equação 1 (TIPLER, 1981):

$$F = N_A \cdot e$$

Na equação 1, F é a constante de Faraday (determinada experimentalmente), N_A é o número de Avogadro, enquanto que e é a carga elementar. Portanto, a lei de Faraday e o experimento de Thomson apontavam para o entendimento de que a estrutura atômica era de natureza elétrica e esta seria quantizada. De fato, naquela época, havia “eminentes

cientistas que não acreditavam em átomos” (QUIGG, 2006). É interessante observar que, em seu discurso por ocasião do recebimento do prêmio Nobel, Millikan faça menção aos que, mesmo tendo “credenciais científicas”, não acreditavam na existência do “caráter unitário da eletricidade” (MILLIKAN, 1924). Neste mesmo discurso, argumenta que:

[...] o elétron mesmo, que o homem mediu, como no caso mostrado na tabela, não é nem uma incerteza, nem uma hipótese. É um novo fato experimental que esta geração, na qual vivemos, viu pela primeira vez, mas que qualquer um que tenha condições poderá, daqui por diante, ver. (MILLIKAN, 1924, p.59, tradução dos autores)

Em que pese a importância dos trabalhos de Perrin e de Einstein, referentes ao movimento Browniano, em favor da validade da teoria atômica (THORNTON; REX, 2013), deve-se reconhecer, no trabalho de Millikan, uma contribuição fundamental. Além disso, cabe notar que Millikan deu evidência conclusiva de que as cargas sempre ocorrem em múltiplos de uma unidade fundamental e (TIPLER, 1981, p.83). Outro aspecto importante está associado à sofisticação dos experimentos por ele elaborados. A leitura do discurso citado e do artigo de 1913 permite notar o cuidado dispensado por Millikan na tarefa de medir a carga elementar com “a maior acurácia”. Inclusive, Millikan conclui seu artigo com uma tabela na qual apresenta os valores, determinados experimentalmente, da carga elementar e do número de Avogadro (MILLIKAN, 1913).

Destaca-se, portanto, que a abordagem do experimento da gota de óleo apresenta múltiplas possibilidades, dentre as quais ainda citamos: as controvérsias com respeito à participação de colaboradores na realização do experimento e em sua autoria (SANTOS, 1995); a discussão da importância da análise estatística dos dados (VEISSID et al., 2014); e o fato relevante, mas pouco divulgado em materiais didáticos, de que os resultados de Millikan não foram aceitos de imediato pela comunidade científica (HEERING; KLASSEN, 2010). Estas múltiplas possibilidades são uma das inspirações do presente trabalho.

O EXPERIMENTO DA GOTAS DE ÓLEO DE MILLIKAN E SEU CORRESPONENTE EXPERIMENTO DIDÁTICO

No experimento de Millikan, pequenas gotas de óleo eram borrifadas entre as placas de um capacitor, este concebido de maneira a que o campo elétrico fosse uniforme. No processo de produção, devido à fricção, estas gotas eram carregadas eletricamente e podiam ser observadas por meio de um sistema óptico. O movimento das gotas depende da resultante das seguintes forças: elétrica, gravitacional, empuxo e resistência do ar. Millikan podia variar o campo elétrico e também podia modificar a carga das gotas, por exemplo, irradiando com radiação ultravioleta ou raios x. Desta forma, era possível fazê-las subir ou descer com velocidade constante. Medidas dessas velocidades ou,

analogamente, dos tempos de subida e de descida, forneciam os dados experimentais necessários para a realização dos cálculos matemáticos. Estes, por sua vez, implicavam nas cargas elétricas das gotas. O conjunto de dados, ao ser analisado, permitiu a Millikan determinar a quantização da carga e o valor da carga elementar (MILLIKAN, 1913; TIPLER, 1981; THORNTON; REX, 2013).

Sugerimos que seja examinado o artigo original de Millikan (1913). Logo na primeira figura, o leitor se depara com um aparato experimental bastante complexo. De fato, o experimento original ocupava uma sala inteira (HEERING; KLASSEN, 2010). Fazemos esta ressalva porque é importante ter em mente que os aparelhos didáticos disponíveis devem ser encarados como uma simplificação do experimento de Millikan. Ainda em referência ao artigo de 1913, gostaríamos de destacar a passagem em que é apresentada a “equação fundamental do método” (MILLIKAN, 1913, p.119):

$$q = \frac{mg}{Ev_g} (v_g + v_E) \quad (2)$$

Na equação (2), q representa a carga e m a massa da gota; g é a aceleração da gravidade; E é o campo elétrico aplicado; v_g é a velocidade da gota ao cair, devido à força da gravidade, quando o campo elétrico é nulo; v_E representa a velocidade da gota ao subir, por conta da força elétrica associada ao campo produzido pelo capacitor. Considera-se também, neste problema, a resistência do ar, portanto, as velocidades v_g e v_E são velocidades terminais, ou seja, constantes. Millikan concebeu o experimento de modo a que estas velocidades pudessem ser atingidas quase que instantaneamente. Desta maneira, fixando a distância percorrida pela gota (na subida, com o campo ligado, e na descida, com o campo desligado), a equação (2) pode ser expressa em termos dos tempos de subida (T_E) e de descida (T_g):

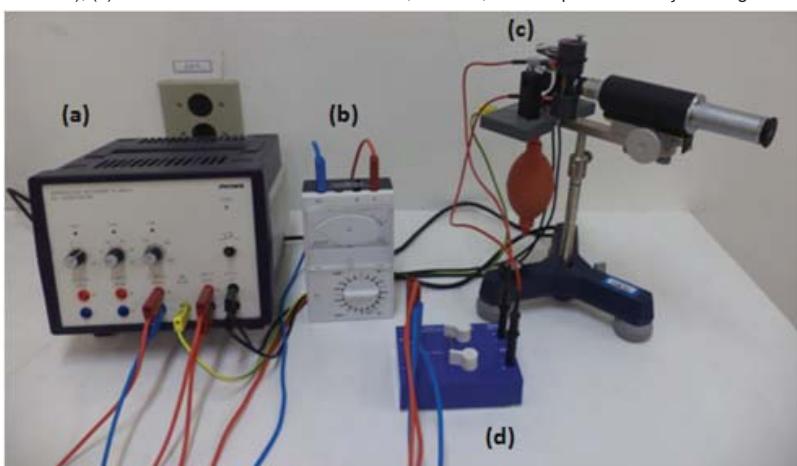
$$q = \frac{mgT_g}{E} \left(\frac{1}{T_g} + \frac{1}{T_E} \right) \quad (3)$$

O valor da massa da gota, na equação (3), pode ser obtido por meio da lei de Stokes da mecânica dos fluidos, sendo também necessário conhecer o valor do coeficiente de viscosidade do ar. Sendo assim, Millikan podia medir as cargas das gotas a partir da determinação dos seus tempos de subida e descida. Neste processo, ele modificava o valor da carga (irradiando a gota com raios X, por exemplo) e observava mudanças naqueles tempos. Foi desta maneira que a carga elementar foi determinada e a quantização da carga foi demonstrada.

Tendo esta discussão em mente, apresentaremos o experimento didático utilizado neste trabalho, a respeito do qual é representativa a foto da Figura 1.

Na Figura 2, apresentamos uma imagem típica, na qual podem ser observadas diversas gotas (o material das gotas é o silicone). A propósito, para que seja possível escrever as equações de movimento, é conveniente também apresentar os diagramas de força para uma gota. Estes diagramas encontram-se na Figura 3.

FIGURA 1 – Foto do aparato utilizado para o experimento de Millikan: (a) fonte de tensão; (b) voltímetro; (c) capacitor e câmara onde são borrifadas as gotas (o borrifador, de borracha alaranjada, está localizado na parte de baixo); (d) chave inversora de tensão. Note-se, à direita, a luneta para observação das gotas.



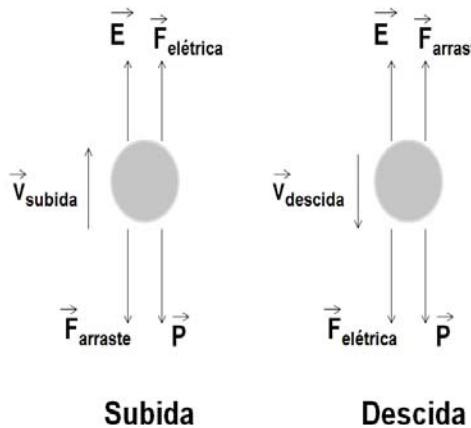
Fonte: autores, 2015.

FIGURA 2 – Foto das gotas tal como observadas durante o experimento didático de Millikan.



Fonte: autores, 2015.

FIGURA 3 – Diagrama das forças que atuam sobre uma gota no experimento didático de Millikan.



Fonte: autores, 2015.

Na Figura 3, listamos as seguintes forças:

- Força Peso: $P = m \cdot g = \rho_{sil} \cdot g \cdot V_{gota}$
- Força elétrica: $F_{elétrica} = q \cdot E_c$
- Força de Empuxo, devida ao ar: $E = \rho_{ar} \cdot g \cdot V_{gota}$,
- Força de Arraste devida à viscosidade do ar: $F_{arraste} = 6\pi \cdot R \cdot \eta \cdot v$

onde:

- m é a massa da gota;
- g é a aceleração da gravidade na superfície terrestre;
- q é a carga elétrica da gota;
- $E_c = \frac{U}{d}$ é o campo elétrico, U a tensão e d a distância entre as placas do capacitor;
- ρ_{ar} é a densidade do ar ($\rho_{ar} = 1,293 \text{ kg/m}^3$);
- ρ_{sil} é a densidade do silicone ($\rho_{sil} = 1,03 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$);
- V_{gota} é o volume da gota;
- R é o raio da gota;
- v é a velocidade da gota;
- η é o coeficiente de viscosidade do ar ($\eta_{ar} = 1,82 \times 10^{-5} \text{ kg.(m.s)}^{-1}$).

Assim, ao acompanhar o movimento de uma gota escolhida, pode-se modificar o sentido da sua velocidade, dado que o aparato permite variar a tensão, o que implica mudar o valor da força elétrica sobre a gota. Portanto, o que se faz é determinar as velocidades de subida (v_{sub}) e de descida (v_{desc}) em regime de equilíbrio, ou seja, quando é nula a resultante das forças que atuam sobre a gota. Utilizando a segunda lei de Newton, pode-se demonstrar que essas velocidades são dadas por:

$$v_{sub} = \frac{I}{6 \pi r \eta} [qE + \frac{4}{3} \pi r^3 g (\rho_{sil} - \rho_{ar})] \quad (4)$$

$$v_{desc} = \frac{I}{6 \pi r \eta} [qE - \frac{4}{3} \pi r^3 g (\rho_{sil} - \rho_{ar})] \quad (5)$$

Subtraindo-se as equações (4) e (5), obtém-se uma expressão para o valor da carga elétrica da gota:

$$q = C \cdot \frac{v_{sub} + v_{desc}}{U} \sqrt{v_{sub} - v_{desc}} \quad (6)$$

Sendo:

$$C = \frac{9}{2} \pi d \sqrt{\frac{\eta^3}{g(\rho_{sil} - \rho_{ar})}} = 2,73 \times 10^{-11} \text{ kg.m.(m.s)}^{-1/2} \quad (7)$$

Percebe-se, pela equação (6), que, no experimento didático, os valores das cargas das gotas são determinados a partir das medidas das velocidades de subida e de descida, que dependem do campo elétrico aplicado. Este resultado é semelhante àquele expresso pela equação (2), referente ao experimento original de Millikan.

O EXPERIMENTO DIDÁTICO DE MILLIKAN UTILIZANDO VIDEOANÁLISE

O experimento de Millikan é exposto de forma superficial no Ensino Médio, quando se cita apenas algo como: ao equilibrar as gotas de óleo com a força peso e a força elétrica sobre as mesmas, Millikan encontrou o valor da carga elétrica fundamental. Este tipo de descrição, simplificada ao extremo, tende a desprezar toda a discussão teórica exposta na seção anterior deste artigo, porém, dada a complexidade do experimento, é compreensível que exista tal limitação. Neste contexto, a presente proposta visa a criar alternativas para que o experimento em questão receba o tratamento adequado às componentes curriculares das aulas de Física do Ensino Médio e das disciplinas de Física Básica do Ensino Superior, abrindo possibilidades múltiplas para abordar conceitos fundamentais da Física, tais como: velocidade, aceleração, forças, viscosidade, eletrostática e a quantização da carga elétrica; além destes, também são criadas condições para discutir aspectos ligados à história da

ciência e ao papel da Física Experimental, a compreensão de suas sutilezas procedimentais e o seu importante papel na construção do conhecimento físico.

Uma primeira dificuldade é que, embora esta atividade experimental tenha sido repetida por várias gerações de estudantes, a mesma apresenta uma série de dificuldades em sua visualização e que geralmente implicam em erros na sua execução. Neste propósito, há na literatura alguns trabalhos que abordam alternativas didáticas para contornar dificuldades de execução, por exemplo, a iluminação das gotículas com luz de laser, e que propõem discussões e trabalhos colaborativos no sentido de aprimorar a atividade em si (CHENG, 2005; HEERING, 2010; COELHO, 1998; VEISSID et al., 2014). Contudo, mesmo com estes esforços, o equipamento que reproduz o experimento original de Millikan possui custo elevado, impossibilitando as escolas e algumas universidades de possuí-lo em seus laboratórios.

Outro aspecto é que, por sua montagem ser mais complexa que um experimento de Mecânica, por exemplo, torna-se difícil para o professor junto com seus alunos realizar toda a montagem, manipulação e obtenção dos dados no tempo didático das aulas do Ensino Médio, de cerca de 50 minutos. Acrescente-se a isto as dificuldades de transpor aos alunos os conceitos de análise estatística de dados experimentais, indispensável no experimento de Millikan.

Uma maneira de contornar estes problemas é a recorrência à chamada educação *on line*, que se utiliza de objetos educacionais, OE (IEEE, 2002; BRASIL, 2008), disponibilizados em ambientes virtuais de aprendizagem, em repositórios institucionais ou em sítios da web. A disponibilização *on-line* se tornou o meio preferível em relação às outras modalidades, para facilitar o acesso aos OE, permitindo ao professor inseri-los em diferentes contextos de aprendizagem e ampliando suas possibilidades de uso para suporte ao ensino e aprendizagem.

Neste aspecto, as Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) nas aulas de Ciências se fazem determinantes, não como panaceia, nem no sentido de substituir as aulas experimentais, mas pela mediação que proporciona aulas mais interativas e portadoras das múltiplas possibilidades pedagógicas já citadas. Porém, mesmo com todas estas aparentes vantagens, o uso do computador é ainda pouco explorado nas aulas de Física, seja por questões de infraestrutura das escolas, como também pela formação do professor (ALMEIDA, 2012), de modo que iniciativas que estimulem seu uso, articuladas com uma metodologia definida de ensino-aprendizagem, são mais que desejáveis no contexto da educação brasileira.

Para contornar o já citado custo elevado bem como superar a dependência de tecnologias proprietárias, propõe-se a utilização de tecnologias livres: *hardwares* abertos e *softwares* livres. Estes favorecem a livre apropriação, a criatividade e a adequação às realidades locais e regionais. Contudo, é importante atentar para que tenham versatilidade e qualidade acadêmica (BEZERRA JR. et al., 2012). Atualmente, as TIC, onde incluímos a videoanálise, tornaram-se mais acessíveis aos professores e estudantes, permitindo-lhes, por exemplo, fazer medidas precisas de posição em função do tempo para objetos em movimento (BRYAN, 2010; CALLONI, 2010). Do mesmo modo, há vários programas

de computador que executam cálculos e produzem gráficos de grandezas relacionadas ao movimento com simplicidade, o que possibilita planejar e desenvolver atividades, incluindo a análise de dados experimentais, compatíveis com o tempo didático de aulas no Ensino Médio.

Como iniciativas significativas neste campo, pode-se citar uma comunidade de âmbito internacional que se destaca, a Open Source Physics (OSP). Um dos objetivos da OSP é, justamente, contribuir para a utilização de TIC, incluindo física computacional e simulação computacional, que, juntamente com a teoria e atividades experimentais, serve de auxílio aos usuários na superação de barreiras e dificuldades existentes no Ensino de Física. Esta comunidade disponibiliza um sitio com programas com códigos abertos, entre eles o *Tracker*, que é um aplicativo que possibilita análise de vídeos quadro a quadro, que constitui a videoanálise. Este *software* está em constante aprimoramento pela parceria entre a equipe comandada por Douglas Brown, do *Cabrillo College*, e o *OSP*, em projeto financiado pela *National Science Foundation* e pelo *Davidson College*.

Fica, portanto, estabelecido o cenário deste trabalho, que propõe uma abordagem didática para o experimento da gota de óleo de Millikan com a utilização de TIC, especificamente a videoanálise, por meio do *software Tracker*. A proposta sustenta que a videoanálise permite superar dificuldades de visualização e interpretação do experimento. Para contornar o problema do alto custo dos materiais e kits de experimentos didáticos, nosso grupo disponibiliza livremente os vídeos do experimento. Estes vídeos foram realizados em nosso Laboratório de Física Moderna e, ao serem baixados pelos professores e estudantes, possibilitam análises pormenorizadas via *Tracker*. Com a diversidade de programas de tratamento de dados acessíveis de forma livre, chega-se, assim, a uma proposta que articula todas estas iniciativas para tornar factível o ensino e a aprendizagem do experimento de Millikan, tanto no Ensino Médio quanto nas disciplinas de Física Básica do Ensino Superior.

A ATIVIDADE EXPERIMENTAL

Um borrifador é usado para pulverizar pequenas gotas de silicone entre as placas de um capacitor. Para visualizar essas gotículas, um sistema de iluminação e um jogo de lentes, tal como um microscópio, permitem ampliar e observar sua imagem. Uma fonte de alimentação produz uma tensão contínua (variável até 600 V), medida por um voltímetro, a qual é aplicada em um capacitor cujas placas distam 2,5 mm entre si (esta distância é fixa). Uma chave comutadora é usada para inverter a polaridade do capacitor, ou seja, o sentido do campo elétrico, e, portanto, o sentido da força elétrica sobre as gotículas. A Figura 2 mostra uma imagem típica das gotas observadas durante a realização do experimento. Note-se que a escala entre as placas contém divisões fixas, cada uma correspondendo a 0,029 mm, logo, esta escala permite mensurar o deslocamento de uma gotícula apenas contando o número de divisões percorridas. Portanto, ao se medir o tempo que uma gota leva para subir ou descer distâncias conhecidas, dependendo do campo aplicado, é possível determinar as respectivas velocidades de subida e descida.

O capacitor produz um campo elétrico intenso entre suas placas e que passa a atuar sobre as gotículas carregadas de eletricidade. Como foi dito antes, Millikan valeu-se de raios X para ionizar as gotas, mas o equipamento aqui utilizado não dispõe de uma fonte de raios X. No entanto, o próprio processo de pulverização das gotas, que implica em atrito, é a origem da ionização de muitas delas, de modo que estas passam a sofrer uma força elétrica associada ao campo elétrico do capacitor. O conjunto das forças atuantes está descrito na Figura 3. Ao selecionar uma gota e acompanhar seu movimento de subida e descida, para um dado potencial aplicado, utiliza-se a equação 6 na determinação da carga. Repetindo-se este processo para diversas gotas, incluindo variações de tensão, criam-se condições para a determinação de diferentes valores de q .

A seguir, explicamos como obter os valores das velocidades de subida e de descida usando videoanálise.

APLICAÇÃO DA VIDEOANÁLISE AO EXPERIMENTO DE MILLIKAN

Para utilizar os vídeos, sugerimos que o programa *Tracker* juntamente com a máquina virtual *Java* e o *Quicktime* sejam instalados, de acordo com instruções presentes no link: <https://www.cabrillo.edu/~dbrown/Tracker/>. Manuais em português de uso do programa estão disponíveis neste sítio ou no endereço <http://paginapessoal.utfpr.edu.br/lenz/Tracker>. Há na literatura descrições de sua utilização em experimentos de Física (BEZERRA JR. et al., 2012), com aplicações em Mecânica. Aqui surge mais uma articulação unificadora deste trabalho: o estudante percebe que as leis, procedimentos experimentais e utilização da videoanálise para a descrição de movimentos macroscópicos são equivalentes à descrição necessária a um fenômeno microscópio.

Em nosso grupo, foram filmados em torno de três centenas de vídeos e foram observadas de forma cuidadosa diversas gotas sujeitas a várias diferenças de potencial elétrico. A rigor, é necessário organizar estes valores por meio de análise estatística (VEISSID et al., 2014), mas, no processo desta pesquisa, optamos por selecionar alguns vídeos nos quais é possível observar gotas com valores de cargas elétricas bem determinadas e que correspondem de fato aos múltiplos inteiros (n) da carga elementar ($e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$).

Os vídeos selecionados foram disponibilizados em um portal de divulgação científica por meio de seis pares de arquivos (TRACKER-CIÊNCIA CURIOSA, 2015). Cada par é constituído pelo vídeo original (extensão “.mov”) e seu arquivo correspondente (extensão “.trk”) já tratado com o *Tracker*. A nomenclatura dos arquivos de vídeo leva em conta os seguintes elementos: a identificação da gota, a tensão utilizada e o múltiplo inteiro da carga elementar correspondente à gota. Por exemplo, na Figura 1, apresentamos o par de arquivos correspondente à gota de número 1. Neste caso, a tensão aplicada foi 450V e a análise do vídeo com o *Tracker* especifica uma gota para a qual a carga medida tem valor numérico $q = 1 \cdot e$.

FIGURA 4 – Exemplo de nomeação dos arquivos disponíveis para download. À esquerda, o vídeo bruto, sem tratamento de dados, à direita, o mesmo vídeo, já inserido no *Tracker*.



Fonte: autores, 2015.

Assim, qualquer pessoa que acessar o site <http://www.cienciacuriosa.com.br/tracker-millikan/> poderá usar o material de três maneiras:

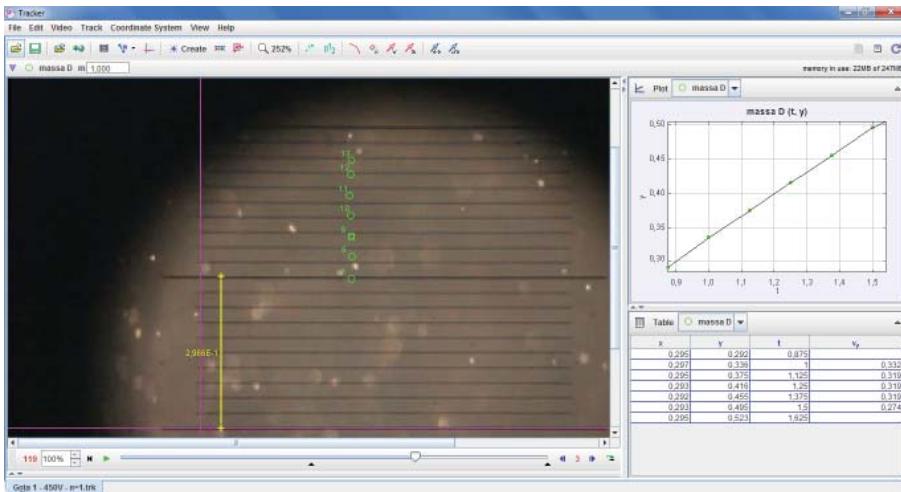
- 1) Assistir ao vídeo (formato “.mov”) para ver como ocorre o movimento das gotas no experimento.
- 2) Analisar cada vídeo “trackeado” por nosso grupo (formato “.trk”). Neles já está especificada uma gota com valor de carga definido. Então, basta abrir o arquivo usando o *Tracker* e visualizar o movimento da gota. Os valores das velocidades de subida e de descida estão determinados e podem ser utilizados para o cálculo da carga.
- 3) Analisar cada vídeo utilizando o *Tracker* desde o início. Assim, ao escolher gotas aleatoriamente, os cálculos resultarão em outros valores para as cargas, dado que gotas diferentes apresentam cargas diferentes.

Na Figura 5 mostramos um detalhe da tela do *Tracker* quando empregado para a análise do movimento de uma gota escolhida. Por meio desta figura, destacamos diversos elementos importantes:

- 1) a barra amarela corresponde ao “bastão de calibração” do *Tracker*. A barra está associada à escala do equipamento: dez divisões que aparecem ao fundo da tela correspondem a 0,2966mm;
- 2) os círculos verdes correspondem a quadros sucessivos do movimento da gota, que foram marcados com o *Tracker*. À direita, encontra-se um gráfico com a posição vertical em função do tempo. Logo abaixo deste gráfico, está uma tabela com os valores de posição, tempo e velocidade vertical da gota;

3) em nossos vídeos, utilizamos uma câmera com 24 quadros por segundo, portanto, o intervalo entre dois instantes de tempo é 0,0417s. Em nossos experimentos, optamos por marcar o movimento a cada 3 quadros (*frames*) do vídeo.

FIGURA 5 – Captura de tela do *Tracker* indicando o movimento quadro a quadro de uma gota específica (círculos verdes). Note-se, à direita, o gráfico do movimento na direção vertical e a tabela com os valores de posição, tempo e velocidade. Para alternar entre movimento de subida e descida, basta clicar no botão (acima, à direita) “massa D”.



Fonte: autores, 2015.

As velocidades de subida e de descida são praticamente constantes, conforme pode ser verificado ao examinar os vídeos. Assim, optamos por calcular uma velocidade média, a partir dos valores obtidos com o *Tracker*. Esta velocidade é usada para a determinação do valor da carga elétrica da gota, por meio da equação 6, juntamente com os valores da tensão (disponível nos títulos dos vídeos).

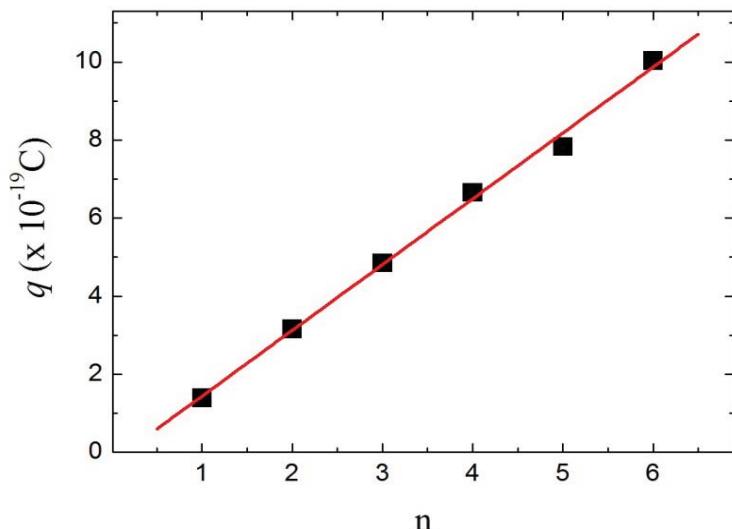
Em resumo, ao escolher um dos arquivos (com extensão “.trk”) e abri-lo com o *Tracker*, já estará marcada a gota correspondente àquela carga específica e seu movimento (de subida e descida) poderá ser acompanhado, tanto os gráficos quanto os valores numéricos (vide Figura 5, à direita). Bastará, então, substituir os valores (da tensão e das velocidades) na equação 6.

Um detalhe a ser observado pelo professor é que as velocidades de subida, na equação 6, são maiores que as de descida. Isto ocorre porque, como as gotas são observadas por meio de uma luneta, suas imagens são invertidas, ou seja, no vídeo, o movimento de subida corresponde à descida real das gotas (esta descida real é mais rápida porque a força elétrica se soma à gravitacional, daí a velocidade maior). Pela mesma razão, o

movimento de descida que se vê no vídeo corresponde à subida real da gota no aparato experimental.

Na Figura 6, é mostrado um gráfico que relaciona o valor obtido por intermédio da videoanálise para a carga elétrica de cada uma das gotas versus os números inteiros (de 1 a 6) – referentes aos vídeos disponíveis selecionados neste trabalho. A reta em vermelho corresponde a um ajuste utilizando o método dos mínimos quadrados e seu coeficiente angular resulta no próprio valor da carga elétrica fundamental ($e = 1,686 \times 10^{-19} C$). Note-se que este valor difere em apenas 5% daquele presente nas tabelas dos livros didáticos (THORNTON e REX, 2013), comumente expresso por $1,602 \times 10^{-19} C$. Assim, a análise dos seis vídeos selecionados conduz a resultados experimentais que estão em consonância com a quantização da carga elétrica e , ao mesmo tempo, permitem determinar um valor de e coerente com aquele medido de formas mais rigorosas. Esta validação também toma parte do processo de ensino-aprendizagem, ao articular a descrição teórica necessária para a dedução da equação 6, os procedimentos experimentais descritos acima, bem como o tratamento de dados necessários para a seleção dos vídeos utilizados até a obtenção da reta da Figura 6.

FIGURA 6 – Relação entre as cargas elétricas obtidas para cada gota e os números inteiros correspondentes de 1 a 6.



Fonte: autores, 2015.

DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Após a publicação dos PCN+, em 2002, o Ensino de Física Moderna deixa de ser um conteúdo opcional ao Ensino Médio. Por esta ser de natureza intrinsecamente microscópica – e por tratar da interação da radiação eletromagnética com a matéria – a visualização dos fenômenos a ela relacionados e sua consequente interpretação e transposição didática têm causado dificuldades tanto na formação de professores como na realidade da sala de aula. Embora seja consenso na literatura em Ensino de Física a necessidade desta inserção na formação dos professores, também as barreiras (da falta) do laboratório não têm contribuído para a reversão deste quadro.

As dificuldades supracitadas terminam por ecoar numa visão mistificadora da Física Moderna, cuja evolução, a ver nos livros didáticos, às vezes parece ter sido guiada por experimentos e deduções acessíveis somente a “gênios cientistas”, fora, portanto, do alcance de professores e alunos da Educação Básica, de acordo com esta visão distorcida da Ciência.

O trabalho aqui apresentado propõe contribuir para a solução desses problemas, ao ser baseado em um experimento comumente citado nos livros didáticos do Ensino Médio e por ser de fundamental importância epistemológica, dada a determinação experimental da carga elétrica elementar, cujo valor permeia toda a discussão da eletricidade vista também no Ensino Médio.

Deste modo, procurou-se articular uma série de elementos:

1) a utilização de resultados experimentais obtidos em laboratório como estratégia didática no processo de ensino e aprendizagem da Física Moderna para o Ensino Médio;

2) o emprego das Tecnologias de Informação e Comunicação, especificamente, a videoanálise mediada pelo software livre *Tracker*;

3) a adequação da iniciativa ao tempo didático disponível nas aulas de Física das escolas;

4) o desenvolvimento de uma alternativa para contornar a barreira do custo. Ao disponibilizar livremente os vídeos contendo resultados do experimento didático assemelhado ao desenvolvido por Millikan, é oferecida uma oportunidade aos estudantes de manipular dados experimentais reais e, assim, de se aproximar e melhor compreender aspectos importantes do trabalho de laboratório, em particular, e da ciência, em geral;

5) a estruturação de uma metodologia de trabalho norteadora das aulas, que inclui acesso aos vídeos previamente organizados, nos quais gotas selecionadas foram analisadas para determinação da quantização da carga e obtenção do valor de e . Contudo, está aberta a possibilidade para livre apropriação por parte dos usuários, dado que em cada um dos vídeos há diversas gotas cujo movimento poderia ser analisado na elaboração de roteiros abertos e no desenvolvimento de novas atividades.

A utilização das TIC por si só certamente não garante que todos os objetivos tidos em mente na concepção deste trabalho sejam atingidos. Por isso, sugere-se uma metodologia de aplicação que inclui um recorte histórico com a discussão do experimento original. Além disso, deve-se atentar para que o movimento das gotas possa ser descrito por equações que conduzem a expressões matemáticas relativamente simples para a carga (equações 2, 3 e 6). Defendemos, baseados na literatura e em nossa experiência em sala de aula, que a integração desses elementos seja efetiva no processo de ensino e aprendizagem. Em nosso caso, sua aplicação buscou os espaços da formação do professor, articulando um curso de Licenciatura em Física (formação inicial) e um Mestrado Profissional em Ensino de Ciências (formação continuada). Neste último entra uma componente desejada pela Capes quando da concepção dos Mestrados Profissionais em Ensino, que é fazer a recuperação de conteúdos nem sempre vistos com profundidade pelos professores em suas respectivas licenciaturas.

Salientamos ainda que a metodologia descrita neste trabalho permite uma visualização e análise qualitativa de um fenômeno microscópico, portanto, não sensorial aos estudantes, fomentando uma discussão também quantitativa em sala de aula. Deste modo, supera-se um discurso do senso comum de que “não é possível demonstrar aqui no Ensino Médio”. De fato, constrói-se mais uma possibilidade para aplicação do método científico (o “fazer ciência”) pelos alunos. Em outros momentos, os estudantes podem ter analisado o movimento de objetos macroscópicos (um trilho de ar ou sistema massa-mola, por exemplo) e, aqui, a mesma mecânica newtoniana é utilizada para descrever fenômenos microscópicos, os quais apontam histórica e conceitualmente para a Física Moderna.

Estas articulações também encontram ressonância em habilidades e competências expostas na Matriz Enem para a Física (BRASIL, 2009), que, no tocante a este experimento, seriam: a inserção da História da Ciéncia para contextualização de como é feito o progresso científico, a destreza em utilizar linguagens diversas, como textos (enfoque histórico), gráficos (análise de dados experimentais) e matemática (discussão quantitativa), que são inerentes à modelagem que resulta na concepção e realização do experimento. Com relação aos PCN+ (BRASIL, 2002), esta metodologia está inserida no tema estruturante “Matéria e Radiação”, sob o qual se articulam as conexões dos temas de Física Moderna e as visões de mundo dos nossos estudantes.

Nosso trabalho comprehende diversas etapas, incluindo desde a montagem de um Laboratório de Física Moderna para atender a um curso de Licenciatura em Física até as discussões sobre como conciliar aspectos de conteúdo específico da Física com elementos da Didática das Ciências. Trata-se de um processo desenvolvido ao longo de dois anos em que foram montados os experimentos e realizadas medidas envolvendo dezenas de estudantes de graduação. As observações em sala de aula, a percepção das dificuldades relacionadas ao experimento e as tentativas de torná-lo acessível a um público maior, a resposta à necessidade de aproximar a universidade da comunidade, o anseio de tornar o Ensino de Física vivo e presente na vida das escolas, a busca pela qualidade acadêmica, as reflexões ocorridas no âmbito da pós-graduação, todas essas componentes estiveram e estão presentes no trabalho. Abre-se, assim, espaço para que os efeitos do material

elaborado sejam testados em sala de aula. Neste sentido, estão em andamento em nosso grupo de pesquisa projetos que visam a avaliar o impacto em sala de aula do material produzido. Porém, isto não impede que outros grupos também realizem este tipo de pesquisa, afinal, as situações e vivências em sala de aula são sempre muito diversas – porque dependem dos próprios materiais didáticos, da formação dos professores, da maneira como se faz uso do material, da interação com os alunos, da motivação e dos conhecimentos prévios que estes trazem, de nuances regionais e locais associadas à organização do ambiente escolar, etc. A existência de uma metodologia que articula objetos educacionais com o embasamento aqui apresentado abre mais possibilidades – para teste, avaliação, divulgação e aperfeiçoamento – que, no contexto do Ensino de Ciências, devem sempre ser consideradas com atenção, porque são portadoras de múltiplas possibilidades de aplicação e discussões dentro do contexto escolar. No caso específico da inserção de tópicos de FMC, em especial no Ensino Médio, entendemos ser de fundamental importância estimular a produção de materiais de referência. Nossa experiência revela que os estudantes (professores em formação inicial ou continuada) envolvidos no processo tendem a se aprofundar no tema e, com isso, expandem seus horizontes de compreensão sobre o fenômeno e sobre como abordá-lo em sala de aula, conjugando erudição e saber fazer, multiplicando habilidades e recursos passíveis de serem empregados no desenvolvimento de mais e novos projetos. Ao mesmo tempo, os docentes da graduação e orientadores de pós-graduação (formadores de professores) têm a oportunidade de por em prática estratégias que são elas mesmas baseadas no ensino por investigação e, assim, as aulas na universidade – inclusive na pós-graduação – espelham aquilo que se deseja fazer na escola. Acreditamos que as universidades brasileiras, no âmbito de seus cursos de licenciatura e de pós-graduação – e aqui damos ênfase aos Mestrados Profissionais na área de Ensino – precisem dar ainda mais atenção ao tema e, neste sentido, nosso trabalho almeja apontar alguns caminhos ao buscar fortalecer uma iniciativa voltada à produção e disseminação de objetos educacionais para o ensino de FMC.

Por fim, acreditamos que a iniciativa aqui exposta pode contribuir para tornar as aulas de Física mais interativas e interessantes aos estudantes. Em nossas observações, ficou patente a motivação dos estudantes, que moveram suas expectativas sobre o experimento, antes apenas uma breve nota ou uma simples demonstração, para a determinação quantitativa do valor da carga elétrica elementar, conjugando elementos que colaboraram para uma visão epistemológica unificadora, desmistificadora e estimulante no Ensino de Física.

REFERÊNCIAS

- AAPT, 2014. Robert A. Millikan Medal. Disponível em: <<http://www.aapt.org/Programs/awards/millikan.cfm>>. Acesso em: 14 nov. 2014.
- ALMEIDA, F. J. *Educação e Informática: os computadores na escola*. São Paulo: Cortez, 2012.
- ALVES FILHO, J. P. Regras da transposição didática aplicadas ao laboratório didático. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v.21, n. especial, p.44-58, 2004.

- ARIMOTO, M. M.; BARROCA, L.; BARBOSA, E. F. Recursos Educacionais Abertos: Aspectos de desenvolvimento no cenário brasileiro. *Novas Tecnologias na Educação*, v.12, n.1, 2014.
- BEZERRA JR., A. G.; LENZ, J. A; OLIVEIRA, L. P; SAAVEDRA FILHO, N. C. Videoanálise no ensino de física: experiências com o Software Tracker. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v.29, n. especial, p.469-490 2012.
- BRASIL. *Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais – PCN+*. Ministério da Educação: Brasília, 2002.
- BRASIL. *Matriz de Referência para o ENEM*. Ministério da Educação: Brasília, 2009.
- BRASIL. Banco Internacional de Objetos Educacionais. Ministério da Educação e Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação: 2008. Disponível em: <<http://objetoseducacionais2.mec.gov.br>>. Acesso em: 1 ago. 2014.
- BROCKINGTON, G.; PIETROCOLA, M. Serão as regras de transposição didática aplicáveis aos conceitos de Física Moderna? *Investigações em Ensino de Ciências*, v.10, n.3, p.387-404, 2005.
- CAVALCANTE, M. A.; HAAG, R. Corpo negro e determinação experimental da constante de Planck. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v.27, n.3, p.343-348, set. 2005.
- CHENG, D. L.; HSU, Y. A better illumination system for Millikan's oil-drop experiment. *Physics Education*, p.498-499. Nov. 2005.
- COELHO, J. V. Laboratório caseiro: experiência de Millikan. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v.5, n.3, p.190-197, 1988.
- HEERING, P.; KLASSEN, S. Doing it differently: attempts to improve Millikan's oil-drop experiment. *Physics Education*, v.45, n.4, p.382-393, 2010.
- IEEE, 2002. 1484.12.1-2002, 15 July 2002, *Draft Standard for Learning Object Metadata*, IEEE Learning Technology Standards Committee (LTSC). Disponível em: <http://ltsc.ieee.org/wg12/files/LOM_1484_12_1_v1_Final_Draft.pdf>. Acesso em: 07 ago. 2015.
- LAWS, P. W., WILLIS, M. C.; JACKSON, D. P.; KOENIG, K.; TEESE, R. Using Research-Based Interactive Video Vignettes to Enhance Out-of-Class Learning in Introductory Physics. *The Physics Teacher*, v.53, n.114, 2015.
- MILLIKAN, R. A. On the elementary electrical charge and the Avogadro constant, *Physical Review*, v.II, n.2, p.108-143, 1913. Disponível em <<http://www.aip.org/history/gap/PDF/millikan.pdf>>. Acesso em: 16 nov. 2014.
- MILLIKAN, R. A. *The electron and the light-quant from the experimental point of view*, Nobel Lecture, 1924. Disponível em <http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1923/millikan-lecture.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2014.
- NEHER, H. V. Millikan – Teacher and Friend. *American Journal of Physics*, v.32, p.868-877, 1964.
- NOBELPRIZE.ORG, 1923. Disponível em: <http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1923/>. Acesso em: 14 nov. 2014.
- NOBELPRIZE.ORG, 1906. Disponível em: <http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1906/thomson-facts.html>. Acesso em: 14 nov. 2014.
- OSTERMANN, F.; CAVALCANTI, C.; PRADO, S.; RICCI, T. 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.

- PEREIRA, A. P.; OSTERMANN, F. Sobre o ensino de Física Moderna e Contemporânea: uma revisão da produção acadêmica recente. *Investigações em Ensino de Ciências*, v.14, n.3, p.393-420, 2009.
- PEREIRA, M. V., BARROS, S. S. REZENDE FILHO, L. A. C; FAUTH, L. H. A. Audiovisual physics reports: students' video production as a strategy for the didactic laboratory. *Physics Education*, v.47, n.1, 44, 2012.
- QUIGG, C. *Particles and the Standard Model*, in The New Physics for the twenty-first century, Gordon Fraser, editor, Cambridge Press, New York, 2006.
- SÁNCHEZ, M. A. Animaciones Modellus y videos de experiencias de laboratorio para dar un nuevo impulso a la enseñanza de la mecánica newtoniana. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, v.6, n.3, 729, 2007.
- SANTOS, C. A. A participação de Fletcher no experimento da gota de óleo de Millikan, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v.17, n.1, 1995.
- SILVA, L. C. M.; SANTOS, W. M. S.; DIAS, P. M. C. A carga específica do elétron. Um enfoque histórico e experimental. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v.33, n.1, 1601, 2011.
- THORNTON, S.; REX, A.; *Modern Physics for Scientists and Engineers*, Fourth Edition, Cengage Learning: Boston, 2013.
- TRACKER-CIÊNCIA CURIOSA, 2015. Disponível em: <<http://www.cienciacuriosa.com.br/tracker-millikan/>>. Acesso em: 07 jul. 2015.
- VEISSID, N.; PEREIRA, L.; PEÑA, A. Uma abordagem diferente na estatística do experimento Millikan. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v.36, n.1, 1302, 2014.