

# EFEITO FOTOELÉTRICO NO ENSINO MÉDIO: UMA SIMULAÇÃO EM REALIDADE VIRTUAL

João Lucas Aguiar Chaves<sup>1</sup>

Hualan Patrício Pacheco<sup>2</sup>

## Resumo

Este trabalho apresenta uma simulação em realidade virtual do experimento criado e utilizado por Phillip Lenard na condução dos seus estudos acerca do efeito fotoelétrico. Para criar a simulação, foram utilizados os *softwares Blender 3D*, uma ferramenta de modelagem, e *Unity*, uma ferramenta de construção de jogos e simulações. Inicialmente, buscamos apresentar o porquê e a relevância da inserção da Física Moderna no contexto do Ensino Médio. Em segundo momento, os aspectos físicos inclusos no algoritmo da simulação são apresentados, assim como o cenário e suas funcionalidades. Nos resultados é apresentado um vídeo demonstrativo da simulação, onde é possível observar o seu comportamento e suas características.

**Palavras-chave:** Efeito Fotoelétrico. Simulação em Realidade Virtual. Ensino de Física Moderna. Experimento de Phillip Lenard.

## Abstract

This work presents a virtual reality simulation of the experiment created and used by Phillip Lenard in conducting his studies on the photoelectric effect. To create the simulation, Blender 3D software, a modeling tool, and Unity, a tool for building games and simulations, were used. Initially, we seek to present the reason and the relevance of the insertion of Modern Physics in the context of High School. Secondly, the physical aspects included in the simulation algorithm are presented, as well as the scenario and its functionalities. The results show a demonstration video of the simulation, where it is possible to observe its behavior and characteristics.

**Keywords:** Photoelectric Effect. Virtual Reality Simulation. Modern Physics Teaching. Phillip Lenard Experiment.

<sup>1</sup> Discente do curso de Licenciatura em Física do Instituto Federal de Rondônia (IFRO) - Campus Porto Calama, chaveslukasefatima@hotmail.com.

<sup>2</sup> Mestre em Ensino de Física e docente do curso de Licenciatura em Física do Instituto Federal de Rondônia (IFRO) – Campus Porto Velho Calama, Hualan.Pacheco@ifro.edu.br.

## 1. INTRODUÇÃO

Algumas pesquisas em Instrumentação para o Ensino de Física apontam à experimentação de baixo custo como uma forma de transpor as barreiras impostas pela escassez de recursos voltados aos laboratórios didáticos, que em muitos locais de nosso contexto nacional se fazem presentes apenas em grandes universidades (AXT; MOREIRA, 1991, p. 99). Esta proposta ainda vem acompanhada em muitos casos da motivação dos alunos através de abordagens emocionais causadas pela descoberta do novo conceito que está sendo adquirido. (SILVA; ASSIS; 2012, p. 321)

No entanto, pode-se dizer que as práticas de laboratório, ou ainda simulações computacionais, vão além destes propósitos específicos. Podemos relacionar estas práticas de atividades docentes à saída que deve ser tomada para escapar dos Laboratórios Tradicionais, com seus roteiros rígidos que funcionam como guias para um aluno que possivelmente não compreende o que está fazendo e nem mesmo a razão de seguir os procedimentos experimentais que tem em mãos.

Sobre os Laboratórios Tradicionais pode-se verificar uma série de contrapontos que colaboram expressivamente para aquilo que chamamos de Aprendizagem Mecânica, ou ainda, para o desinteresse pelo Laboratório em Física:

Mesmo tendo uma participação ativa, a liberdade de ação do aluno é bastante limitada, assim como seu poder de decisão. Isto porque ele fica tolhido, seja pelo tempo de permanência no laboratório, seja pelas restrições estabelecidas no roteiro, seja pela impossibilidade de modificar a montagem experimental. (ALVES FILHO, 2000, p.175).

Assim, a execução de tarefas, ou ainda a relação das novas informações de cunho prático, experimental e teórico com a estrutura cognitiva do aluno se dará de maneira arbitrária e literal, contribuindo assim para que a Aprendizagem Significativa não seja obtida. (MOREIRA, 2011, p. 26), (SILVA; SCHIRLO, 2014, p.38).

Ainda que seja bem claro o contentamento de muitos alunos que participam de práticas de laboratório, sejam elas de baixo custo ou não, verificamos uma pequena parcela de alunos que se mostram descontentes com estas aulas voltadas para o conteúdo experimental (HODSON, 1994, p. 300). No entanto as atividades diferenciadas neste sentido trazem frutos não só a grande parte dos discentes, mas também dá fluidez a prática docente que em muitos casos é acometida pela rotina escolar.

Devemos fazer com que o discente desperte o anseio em verificar as teorias que levam às aplicações cotidianas e que podem ser esclarecidas quando falamos de Física Moderna. Por exemplo, ao observarmos uma maçaneta em uma porta sabemos que esta deve ficar mais distante da dobradiça devido ao fato de produzirmos um maior torque sobre esta, contudo usamos poucas manipulações matemáticas (HALLIDAY et al., 2008, p. 297) e também a experiência cotidiana para obter esta constatação e compreender este resultado.

Quando falamos de Física Moderna, ou ainda de Física Quântica, não podemos recorrer às experiências práticas como a que citamos no parágrafo anterior, já que o mundo quântico não se enquadra nas experiências de seres clássicos e macroscópicos, ou seja, Física Quântica não se parece com os conceitos presentes na Física Clássica (NUSSENZVEIG, 2014, p. 246).

Esta característica sempre foi um entrave no ensino desta área da Física que tem sido incorporada aos currículos de cursos de ensino médio de forma geral, tal como é destacado nas Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino de Física em que verificamos a necessidade de conhecimentos sobre as formas de produção moderna e também com relação aos conceitos da Ciência praticada atualmente:

Alguns aspectos da chamada Física Moderna serão indispensáveis para permitir aos jovens adquirir uma compreensão mais abrangente sobre como se constitui a matéria, de forma a que tenham contato com diferentes e novos materiais, cristais líquidos e lasers presentes nos utensílios tecnológicos, ou com o desenvolvimento da eletrônica, dos circuitos integrados e dos microprocessadores. A compreensão dos modelos para a constituição da matéria deve, ainda, incluir as interações no núcleo dos átomos e os modelos que a ciência hoje propõe para um mundo povoado de partículas. Mas será também indispensável ir mais além, aprendendo a identificar, lidar e reconhecer as radiações e seus diferentes usos. Ou seja, o estudo da matéria e radiação indica um tema capaz de organizar as competências relacionadas à compreensão do mundo material microscópico. (BRASIL, 2004, p.70)

Essa relação intrínseca entre a tecnologia e a Física já é bem conhecida e aceita historicamente. Sobre isso, Nussenzveig (2013, p.15) afirma que:

A ciência desempenha um papel muito importante no mundo contemporâneo. Não era assim há poucas gerações: o desenvolvimento científico tem-se acelerado enormemente. Tornou-se um lugar comum dizer que vivemos numa sociedade tecnológica e medir o progresso pelo grau de desenvolvimento tecnológico. A tecnologia depende crucialmente da ciência para renovar-se, e também contribui para ela, mas não devem ser confundidas.

A partir disto, é possível compreender o porquê da inserção de tópicos de Física Moderna no ensino médio ter, nos últimos anos, se tornado cada vez maior, pois, à medida em que as tecnologias avançam, mais complexa a interpretação delas se torna. Assim, os recursos intelectuais para compreender de forma efetiva essas tecnologias cresce na mesma medida. Podemos citar os computadores quânticos e o *Global Positioning System* (GPS), que são desenvolvidos, respectivamente, a partir do entendimento dos aspectos quânticos da natureza e da Relatividade Geral de Einstein.

Os conhecimentos necessários para se entender estas tecnologias não são abordados no ensino médio com recorrência. Podemos citar Martini *et al* (2016) e Toscano (2016) como exemplos de livros que não tem os conteúdos relacionados aqui como parte do conteúdo programático. Vale ressaltar que essa não abordagem do conteúdo, se deve, não somente ao livro didático, e sim a vários fatores, por exemplo, o tempo de aula disponível.

Muitos docentes de Física ressaltam a dificuldade em abordar conteúdos educacionais relacionados ao Contexto da Física Moderna presente no currículo da Educação Básica, bem como a competição travada com os conteúdos que são cobrados em vestibulares. Porém estes mesmos docentes que destacam a dificuldade na abordagem desta parte da Física também ressaltam a importância na sua aplicação no cotidiano dos alunos (OLIVEIRA, 2007, p. 45).

Fica clara a necessidade de despender esforços para o desenvolvimento de metodologias de ensino e práticas que favoreçam a atuação docente em Física Moderna por meio de experimentos que busquem mostrar os resultados deste campo de conhecimento. Sabemos que a Física, necessita da observação de fenômenos concretos para as suas construções conceituais (SÁ, 1998, p. 72), e a experimentação em realidade virtual deve fornecer este aporte aos alunos, quebrando a notória rigidez dos roteiros experimentais e da aprendizagem experimental mecânica que se observa em muitas práticas.

Assim sendo, faz-se necessária a divulgação de diversas estratégias de ensino de física moderna. Por isso, a problemática estabelecida neste trabalho foi “qual estratégia pode ser eficiente para introduzir conceitos de física moderna no ensino médio?”, o que nos levou ao desenvolvimento de um simulador em realidade virtual do experimento desenvolvido por Phillip Lenard.

Utilizamos para a construção do simulador os *softwares Blender 3D e Unity*, por serem completos em recursos e serem de fácil acesso, além de possibilitar que a simulação seja reproduzida em diversos dispositivos de realidade virtual.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

De forma geral, no Ensino Médio, os alunos se deparam com a chamada Física Clássica, que envolve áreas de estudo como a Mecânica, Termodinâmica e Eletromagnetismo. Áreas que podem ser facilmente associadas ao cotidiano dos alunos, Kessler (2008) destaca que:

Os currículos de Física do Ensino Médio contemplam, destacadamente, a Física Clássica, que é, de um modo geral, o estudo das leis que se aplicam à matéria que conseguimos ver e podemos mexer. A Física Moderna é restritamente abordada, pois lida com coisas inacessíveis para os nossos sentidos, como partículas atômicas e buracos negros.

Podemos encontrar defesas da inserção da Física Moderna e Contemporânea (FMC) no ensino médio, em Ostermann (2001, p.145):

É viável ensinar Física Contemporânea no Ensino Médio, tanto do ponto de vista do ensino de atitudes quanto de conceitos. É um engano dizer que os alunos não têm capacidade para aprender tópicos atuais. A questão é como abordar tais tópicos. [...] Analogias são importantes, vínculos com conteúdos já existentes no currículo são convenientes e avanços em pontos mais modernos são possíveis se a ênfase dada for no aspecto mais conceitual da Física.

Essa inserção é compreendida como essencial, já que trata de tópicos que podem instigar o aluno na busca pelo conhecimento, no interesse pela ciência em si e na compreensão efetiva do mundo, além disso, é possível desenvolver no aluno uma visão mais racional sobre o universo e as tecnologias existentes. Sobre isso, Alvarenga (2000, p.191), argumenta que:

Os conhecimentos desta área, possibilitam aos estudantes um certo aprofundamento dos estudos de Cosmologia, levando-o a uma visão mais racional do mundo em que vivemos, a discussões mais equilibradas sobre a origem e o fim do Universo, colaborando para o afastamento de crenças e superstições, muito comuns entre os jovens. O assunto pode ser tratado historicamente, com apresentação de diversas teorias que se sucederam, levando os alunos a perceberem que os conhecimentos científicos não são verdades absolutas. O sucesso das pesquisas nesta área, altamente dependentes das tecnologias avançadas, que possibilitaram várias descobertas, evidenciaram a interdependência entre o desenvolvimento dos conhecimentos científicos e tecnológicos, sem priorização de um deles. São tópicos fundamentais e sua aprendizagem facilita a compreensão, com maior

profundidade, de muitos outros assuntos, tanto no campo da Física, quanto no campo de outras ciências (química, biologia, geologia, etc).

Além de poder dar aos alunos uma visão mais racional sobre o universo, há ainda um fator cultural que pode ser explorado e desenvolvido. Martins (2007, *apud* LOZADA, 2007, p. 76) dá destaque a FMC (mais especificamente a física de partículas) no ensino médio de forma mais conectada a questão cultural:

Há várias justificativas possíveis. Por um lado, é um tema relativo à chamada 'Física Moderna', cuja presença no Ensino Médio vem sendo defendida há muito tempo por pesquisadores a área de Ensino de Ciências. Por outro lado, já faz parte de uma certa 'cultura científica' que, vez por outra, surge em jornais, revistas de divulgação, etc. É importante que os alunos do Ensino Médio tenham elementos para dialogar com esses veículos, compreendam os conceitos que lá aparecem e possam discuti-los.

Essa questão da importância da FMC para uma certa compreensão cultural vem se mostrando importante, dado a grande quantidade de obras cinematográficas que vem sendo produzidas abordando temas ligados aos conceitos da FMC, por vezes, até mesmo de forma errônea e/ou ilusória. Portanto, pode-se até mesmo criar um senso crítico acerca das mesmas. Gaspar (2013, p. 212) aborda a importância da FMC no Ensino Médio devido às tecnologias:

É fundamental que nosso aluno do Ensino Médio saiba que toda essa revolução tecnológica que ele vive, em todos os campos da atividade humana, se origina da compreensão da estrutura íntima da matéria proporcionada pela Física Moderna, sobretudo a Mecânica Quântica.

Também é possível compreender a importância da física moderna no ensino médio ao analisar os Parâmetros Curriculares Nacionais da Física, pois é colocado que uma das competências é “reconhecer e avaliar o desenvolvimento tecnológico contemporâneo, suas relações com as ciências, seu papel na vida humana, sua presença no mundo cotidiano e seus impactos na vida social”. Sabendo disso, o docente do ensino médio precisa recorrer a uma abordagem que possa o auxiliar nesta tarefa de ajudar seus alunos na compreensão efetiva das tecnologias atuais, portanto, simulações computacionais que permitam ao docente abordar os tópicos de física moderna de forma razoável podem vir a ser necessárias.

Com o avançar da tecnologia dos hardwares, dos softwares dos computadores e com o surgimento de HMD's, (Head-mounted displays) as realidades aumentada e virtual vem ganhando grande espaço, tendo aceitação de um público cada vez maior, então pode-se questionar qual a diferença entre ambas. Para Kirner e Tori (2006, p.20) “a realidade aumentada mantém o usuário no seu ambiente físico e transporta o ambiente virtual para

o espaço do usuário, permitindo a interação com o mundo virtual”, esta visão dos autores traduz bem a ideia da realidade aumentada, a título de exemplificação, o leitor pode pensar no jogo eletrônico *Pokémon Go*, que introduz elementos virtuais no ambiente real do usuário.

A realidade virtual difere da realidade aumentada por levar o usuário para o ambiente virtual, novamente recorremos a Kirner (2011, *apud KIRNER; KIRNER, 2011, p.14*) que declara que a “realidade virtual é uma interface computacional que permite ao usuário interagir em tempo real, em um espaço tridimensional gerado por computador, usando seus sentidos, através de dispositivos especiais”.

### **3. MÉTODO**

#### **3.1 A CONCEPÇÃO DA SIMULAÇÃO EM REALIDADE VIRTUAL**

Alinhado à ideia de desenvolver um material didático que auxiliasse os alunos na compreensão do efeito fotoelétrico, surgiu a ideia de construir um simulador do experimento de Phillip Lenard, com o diferencial de ser executado em realidade virtual, diferente de outros simuladores como o do *PhET Interactive Simulations*. Alguns motivos levaram à escolha da realidade virtual em detrimento de uma plataforma de duas dimensões como o caso do *PhET Interactive Simulations*, sendo eles: (a) Imersão, pois os jogos em realidade virtual no geral trazem uma imersão maior que jogos em 2 e 3 dimensões; (b) Interação, já que apresenta uma interface mais intuitiva que simuladores comuns para que o usuário interaja com elementos do cenário; (c) Realismo, tendo em vista que a simulação permite ao usuário interagir com objetos realistas, que poderiam ser utilizados no mundo real.

É importante destacar que além dos pontos supracitados, experimentos de física quântica, como de Phillip-Lenard, costumam ter preços elevados. Portanto, com a criação de várias aplicações de realidade virtual, há a vantagem de que um HMD possa executar experimentos um número indefinido de vezes.

Para colocar em prática a ideia da criação da simulação foram utilizados dois softwares: *Blender 3D* e *Unity*, sendo que ambos foram usados em conjunto para a obtenção do resultado final. O *Blender 3D* foi escolhido para a criação de *assets 3D* (corpos) para o cenário por ser; uma alternativa completa em recursos de modelagem; *open-souce*; 100% gratuito.

O *Unity* foi escolhido para o desenvolvimento da aplicação por conta da sua abordagem simplificada para a criação de aplicações em realidade virtual. Utilizando um código único para reproduzir a mesma aplicação nos mais comuns HMD's presentes no mercado. Outro ponto que foi crucial para a escolha do *Unity* foi a Física de Corpos Rígidos implementada por padrão da *Unity 3D*, o que facilita a simulação de fenômenos físicos.

Na próxima seção falaremos sobre a forma como introduzimos a física dentro do algoritmo, teceremos comentários específicos sobre as constantes físicas, campo elétrico, aceleração dos elétrons, energia cinética máxima, etc.

## 3.2 PROGRAMAÇÃO FÍSICA

### 3.2.1 As Constantes Físicas

O primeiro passo para a criação do simulador foi atribuir valor às variáveis que seriam utilizadas posteriormente no desenvolvimento das equações dentro do algoritmo da simulação. Primeiramente tabelamos os valores da frequência de corte dos materiais. Estes dados podem ser conferidos na figura 1.

```
[System.Serializable]
public struct CutoffFrequencyMaterial
{
    public const double ALUMINIUM = 9.8654e14;
    public const double BERYLLIUM = 1.20899e15;
    public const double CADMIUM = 9.84122e14;
    public const double CALCIUM = 7.01217e14;
    public const double CARBONUM = 1.16305e15;
    public const double CESIUM = 5.07778e14;
    public const double COBALT = 1.20899e15;
    public const double COPPER = 1.13645e15;
    public const double GOLD = 1.23317e15;
    public const double IRON = 1.0881e15;
    public const double LEAD = 1.00105e15;
    public const double MAGNESIUM = 8.8982e14;
    public const double MERCURY = 1.0881e15;
    public const double NICKEL = 1.21141e15;
    public const double POTASSIUM = 5.56138e14;
    public const double PLATINUM = 1.53542e15;
    public const double SELENIUM = 1.23559e15;
    public const double SILVER = 1.14371e15;
    public const double SODIUM = 5.5108e14;
    public const double URANIUM = 8.70476e14;
    public const double ZINC = 1.03974e15;
}
```

Figura 1- Tabela com os valores da frequência de corte de cada material.

Logo em seguida foram estabelecidas as constantes “*lightSpeedMetersPerSecond*” (Velocidade da Luz), “*plankConstant*” (Constante de Planck), “*elementaryCharge*” (Carga Elementar), “*electricConst*” (Constante Elétrica), “*electronMass*” (Massa do elétron) e o “*timeStamp*”, que é introduzido nas equações visando possibilitar que o usuário possa visualizar o movimento dos elétrons, por eles

serem rápidos demais para serem vistos a olho nu. O *timeStamp* divide a velocidade inicial do elétron e o seu quadrado divide a aceleração, tal como é descrito na equação (I)  $a\left(\frac{x}{timeStamp}\right)^2 + b\left(\frac{x}{timeStamp}\right) + c$ , sendo que a velocidade inicial, representada pelo “b”, é multiplicada por  $x^1$ , enquanto que a aceleração, representada pela letra “a”, é multiplicada por  $x^2$ , com o x ditando o tempo em que o fenômeno ocorrerá. Com isso, foi possível desacelerar o movimento de todos os elétrons por igual através da adequação da velocidade e aceleração, visando o melhor entendimento do usuário.

A forma como estas constantes foram introduzidas no algoritmo pode ser vista na figura 2.

```
public class Constants
{
    public const double lightSpeedMetersPerSecond = 299792458;
    public const double planckConstant = 6.62607004e-34;
    public const double elementaryCharge = 1.60217662e-19;
    public const double electricConst = 8.85e-12;
    public const double electronMass = 9.10938356e-31;

    public const double timeStamp = 3e6;
}
```

Figura 2 - Valores das constantes físicas utilizadas no algoritmo da simulação.

### 3.2.2 Aceleração

Como no experimento original de Phillip Lenard era possível modificar a voltagem aplicada nas placas, e por consequência, o campo elétrico que atua nos elétrons, em nossa simulação não seria diferente, assim buscou-se introduzir as equações que definiram o campo elétrico do aparato.

Para isso, levamos em consideração que as duas placas utilizadas eram paralelas, ou seja, que o campo elétrico era constante no interior das placas, sendo definido por  $E = -\frac{V}{d}$ , onde V é a voltagem, que foi representada pela variável “*voltage*”, que pode ser definida pelo próprio usuário, d a distância representada por “*distance*”, obtida através da distância das duas placas na cena 3D e E o campo elétrico representado por “*electricField*”. Com isso, pudemos calcular a força elétrica atuante no elétron através da equação  $F = qE$  onde q é a carga elementar da partícula, sendo que a força é representada no algoritmo como “*electricForce*”.

De posse da força elétrica, precisamos apenas aplicar a Segunda Lei de Newton, de forma que obtivéssemos a aceleração. Como trabalhamos com unidades que são muito pequenas/grandes, utilizamos variáveis de ponto flutuante de precisão dupla para fazer os cálculos. Ademais, como a unidade de medida padrão da Unity é o ponto flutuante de precisão única, após todas as contas realizadas, os resultados dos cálculos são convertidos para variáveis de precisão única, no caso da aceleração, a variável “*accelerationSingle*”, que nada mais é que a aceleração com precisão dupla convertida em ponto flutuante de precisão única. O que foi descrito pode ser visto na figura 3.

```
float CalculateAcceleration()
{
    if (!Application.isPlaying) return 0;

    double voltage = GetVoltage();

    double electricField = - voltage / distance;

    double electricForce = electricField * (-Constants.elementaryCharge);

    double acceleration = (electricForce / Constants.electronMass);

    float accelerationSingle = Convert.ToSingle(acceleration * Math.Pow((1 / Constants.timeStamp), 2));

    return accelerationSingle;
}
```

Figura 3- Fórmulas que levaram ao encontro da aceleração dos elétrons.

### 3.2.3 Energia Cinética Máxima

Para determinação da energia cinética máxima, utilizamos a equação  $K = h * f - \phi$ , onde  $\phi$  é a função trabalho, definida como  $\phi = f_0 * h$ , sendo que  $h$  é a constante de Planck,  $f$  é a frequência da luz incidente nas placas, e  $\phi$  é uma propriedade do material das placas.  $K$  é representado por “*maxKineticEnergy*”,  $\phi$  como “work” e  $f_0$  por “*LightController.singleton.Getfrequency*” que pode ser determinado pelo próprio usuário. Na figura 4 é possível visualizar como as equações foram escritas no corpo do algoritmo.

```
public double GetMaxKineticEnergy()
{
    double work = plateMaterial.GetCutOffFrequency() * Constants.planckConstant;

    double maxKineticEnergy = (Constants.planckConstant * LightController.singleton.GetFrequency()) - work;

    return maxKineticEnergy;
}
```

Figura 4- Cálculo da energia cinética máxima

### 3.2.4 Velocidade

O cálculo da velocidade se deu através de uma manipulação da equação da energia cinética, de forma que a velocidade se tornou  $v = \sqrt{\frac{2K}{m}}$  de forma que foi representada por “velocity”. A velocidade que foi utilizada pela simulação efetivamente foi a “velocitySingle”, que já inclui o fator *timeStamp*. A forma como a velocidade foi introduzida no algoritmo pode ser vista na figura 5.

```
float CalculateMaxInitialVelocity()
{
    if (!Application.isPlaying || !LightController.singleton) return 0;

    double maxKineticEnergy = GetMaxKineticEnergy();

    if (maxKineticEnergy <= 0) return -1;

    double velocity = Math.Sqrt((2 * maxKineticEnergy) / Constants.electronMass);

    double finalVelocity = velocity * (1 / Constants.timeStamp);

    float velocitySingle = Convert.ToSingle(finalVelocity);

    return velocitySingle;
}
```

Figura 5- Equações utilizadas para se chegar à velocidade.

Desta forma, a velocidade se mostrou presente e funcional na simulação, porém, ainda não estava sendo levado em consideração a interpretação completa da função trabalho, pois dependendo da posição que o elétron ocupa na placa será necessário fornecer uma quantidade diferente de energia para que ocorra o efeito fotoelétrico. Então, para simular o fato de o elétron poder estar em diferentes pontos da placa, introduzimos um fator de aleatoriedade na velocidade do elétron, produzindo, por consequência, um fator de aleatoriedade na energia cinética do salto do elétron, de forma que sempre fosse apenas uma fração da energia cinética máxima K. Em seguida, criou-se a função final que regeu a aplicação da velocidade no Corpo Rígido que para nós, vem a ser o elétron, tal como pode ser vista na figura 6.

```

public void SpawnElectron()
{
    if (this.velocity <= 0) return;

    Rigidbody spawned = ElectronPoolingController.singleton.StartUsingElectron(
        RandomUtil.RandomCube(spawn.position, spawn.lossyScale),
        Quaternion.identity
    );

    if (spawned == null) return;

    Vector3 dir = (GetVoltage() != 0) ? direction : RandomUtil.GetRandomInDirection(direction);

    spawned.velocity = dir * UnityEngine.Random.Range(0, this.velocity);
}

```

Figura 6 - Inserção do aspecto aleatório da velocidade.

### 3.2.5 *AttractElectron*

A função “*AttractElectron*” tem o papel de aplicar a aceleração no elétron. A cada frame da aplicação ela percorre todos os elétrons em cena e aplica a aceleração em todos igualmente. Para fazer a simulação ser caótica no caso da voltagem igual a zero, foi feita uma condição que remove todas as limitações do elétron, permitindo que ele se mova de forma desordenada, colidindo tanto com as paredes do tubo, quanto com outros elétrons, fazendo com que não haja corrente elétrica, já que não há movimento ordenado e nem ao menos elétrons chegando de forma uniforme à placa de destino. Isso pode ser visto na figura 7.

```

public void AttractElectron()
{
    foreach (Electron electron in ElectronPoolingController.singleton.inUseElectrons)
    {
        electron.GetRigidbody().AddForce(-direction * this.acceleration, ForceMode.Acceleration);

        electron.GetRigidbody().constraints = (GetVoltage() != 0) ?
            RigidbodyConstraints.FreezePositionX | RigidbodyConstraints.FreezePositionY
            : RigidbodyConstraints.None;

        electron.GetCollider().isTrigger = (GetVoltage() != 0);
    }
}

```

Figura 7- Aplicação da aceleração e aspecto caótico no elétron.

### 3.2.6 *Cálculo da Corrente*

A corrente é calculada fazendo algumas suposições a respeito do comportamento dos fótons: 1º) consideramos que a intensidade da luz incidente, quando em 100% seria de  $1 \cdot 10^{-2} \text{ W/m}^2$  (TIPLER, 2017, p. 85); 2º) consideramos que o número de fótons incidentes por segundo e por metro quadrado seria uma razão entre a intensidade da luz e a energia por fóton; 3º) consideramos também que a quantidade de elétrons que saltariam seria igual a quantidade de fótons incidentes na placa. Desta forma, pudemos

estimar quantos elétrons chegariam ao anodo por segundo, podendo assim, calcular a corrente elétrica.

Aí então partimos para as considerações sobre a influência da voltagem sobre a corrente. Quando a voltagem é positiva, todos os elétrons passam a estar em movimento ordenado, fazendo com que haja uma corrente constante, independente do valor da voltagem positiva, já que todos os elétrons que poderiam chegar ao anodo, chegarão ao anodo.

Quando a voltagem está em 0, o simulador indica que não há corrente, pois sem voltagem, não há movimento ordenado dos elétrons, apenas movimento caótico, não podendo assim, existir corrente constante.

Para a voltagem negativa, ou seja, quando o campo elétrico age de tal forma a atrair o elétron de volta para o Cátodo, utilizamos uma função seno, pois ela se aproxima do comportamento real da corrente elétrica próxima da voltagem de corte. A voltagem de corte, quando atingida, não permite que haja corrente, pois, a força de atração elétrica do Cátodo é forte o suficiente para impedir que qualquer elétron chegue ao anodo (ver figura 8).

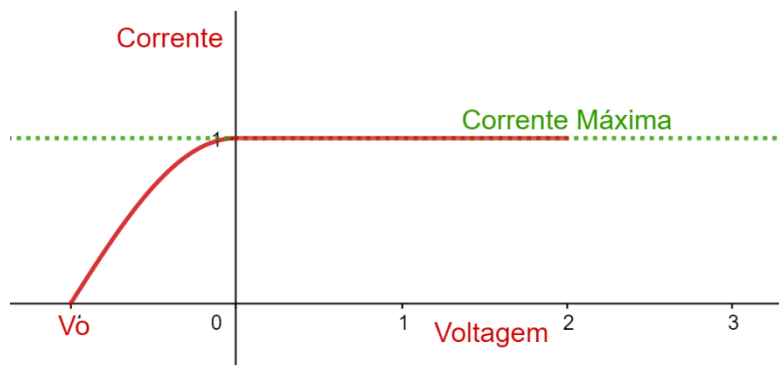


Figura 8 – Representação da função construída pelo autor

Outro fator que pode ser destacado e que influencia no cálculo da corrente é a frequência de corte, pois quando a frequência da luz incidente no cátodo é menor que a de corte, ou seja, menor que a frequência mínima para que aja efeito fotoelétrico, então não há salto de nenhum elétron e por consequência nenhuma corrente.

A descrição feita nos parágrafos anteriores, pode ser vista, em sua forma de algoritmo, na figura 9.

```

public double GetCurrent()
{
    double frequency = LightController.singleton.GetFrequency();
    double cutoffFrequency = Simulation.singleton.GetPlateMaterial().GetCutOffFrequency();
    double voltage = Simulation.singleton.GetVoltage();
    double cutoffPotential = Simulation.singleton.GetCutoffPotential();
    double electronsPerSecond = LightController.singleton.GetElectronsPerSecond();
    double maxCurrent = electronsPerSecond * Constants.elementaryCharge;
    return CurrentFunction(frequency, cutoffFrequency, voltage, cutoffPotential, maxCurrent);
}

private static double CurrentFunction(double frequency, double cutoffFrequency,
    double voltage, double cutoffPotential, double maxCurrent)
{
    double voltageCalc = -voltage;
    if (voltageCalc == 0) return 0;
    if (frequency <= cutoffFrequency) return 0;
    if (voltageCalc <= -cutoffPotential) return 0;
    if (voltageCalc >= 0) return maxCurrent;
    return Math.Sin((voltageCalc + cutoffPotential) * Mathf.PI/(2 * cutoffPotential)) * maxCurrent;
}

```

Figura 9 – Cálculo da corrente

### 3.3 O CENÁRIO

O cenário foi construído com armários ao redor, tendo o aparato que simula o experimento de Phillip Lenard sobre uma mesa, visando dar a ideia de presença em um laboratório real. É possível ter uma visão geral do cenário a partir da figura 10

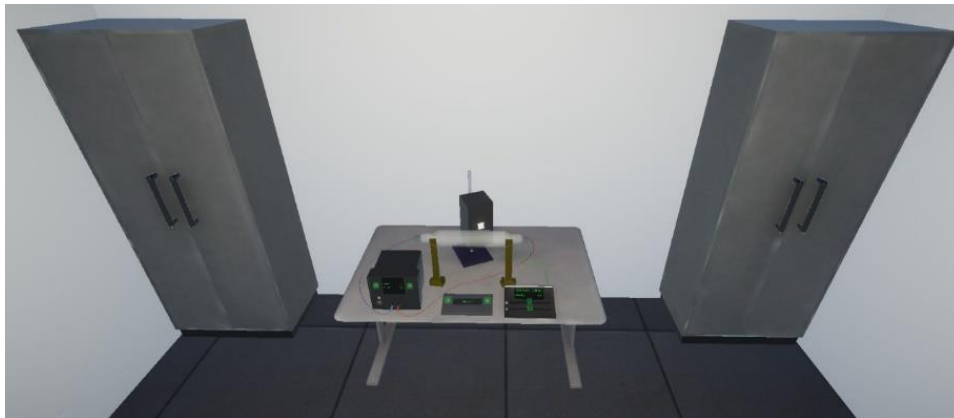


Figura 10 - Visão geral do Cenário

#### 3.3.1 O Suporte

O suporte utilizado na simulação está acoplado com um tubo de vácuo com placas paralelas no seu interior, possibilitando a existência do efeito fotoelétrico.

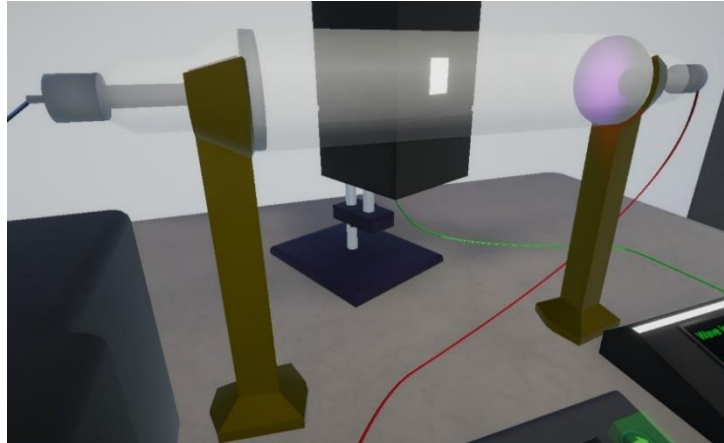


Figura 11- Suporte para o tubo de vácuo

### 3.3.2 Mesa de controle da Luz

Este é o objeto criado para controlar dois fatores do experimento: o comprimento de onda e a intensidade da luz. Os botões dispostos na mesa de controle são móveis e permitem o ajuste necessário nas condições do experimento.

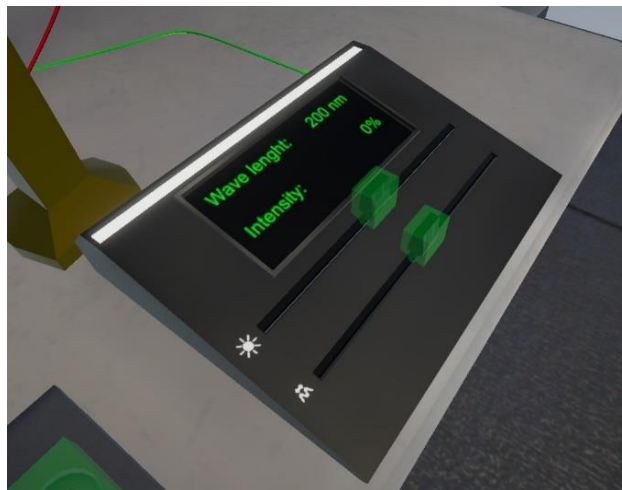


Figura 12 - Mesa de controle da luz

### 3.3.3 Fonte

A fonte controla a diferença de potencial entre as placas e também é responsável por medir a corrente que está percorrendo o circuito. O botão + é responsável por aumentar a voltagem enquanto que o botão – é responsável por diminuí-la, sendo que esse aumento e diminuição é feito através da amplitude de 0.1V.

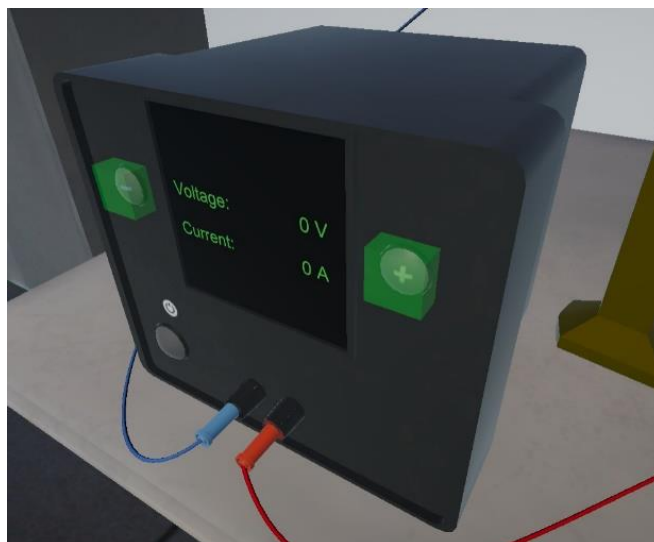


Figura 13- Fonte de tensão acoplada ao tubo de vácuo

### ***3.3.4 Luminária***

Trata-se de um adereço da cena que serve apenas para sinalizar ao usuário de forma visual o comprimento de onda escolhido incidente sobre a placa, não sendo possível observar a luz quando ela está no espectro do ultravioleta e do infravermelho. Ela é inteiramente controlada pela mesa de controle da luz, pois sua cor e intensidade são definidas pela mesma.



Figura 14 – Luminária (fonte de luz primária)

### ***3.5 Menu de escolha de materiais***

Este menu é visualizado em uma tela que possibilita ao usuário modificar o material que compõe as placas utilizadas na cena 3D. Sabemos que tal aparato não existe na vida real, mas por se tratar de uma simulação em realidade virtual, optamos, por motivos pedagógicos e didáticos, permitir a troca rápida e fácil do material das placas.



Figura 15- Menu de seleção de materiais que compõem a placa

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O usuário da simulação pode variar o comprimento de onda da luz incidente no cátodo, a diferença de potencial elétrico entre o cátodo e o ânodo, a intensidade da luz e o material das placas envolvidas. Podendo observar alguns fatores como a frequência de corte, a corrente elétrica gerada e o potencial de corte, além, é claro, de poder ver a relação de proporcionalidade entre a intensidade da luz e a corrente gerada. Em relação ao fenômeno, a simulação se mostrou eficiente, reproduzindo um resultado visual que se mostra condizente com a realidade, podendo apresentar ao aluno diversas possibilidades de exploração teórica e experimental.

O algoritmo, apesar de ainda estar em processo de finalização, se mostrou bastante sólido, conseguindo ser executado da forma prevista, se adequando às situações e testes aos quais a simulação foi submetida. O cenário se mostra: simples e intuitivo. Simples na medida que apresenta um lugar comum, sem muitas luzes ou objetos que possam tirar o foco do aluno, que possivelmente já vai estar animado com a provável novidade apresentada pela realidade virtual. Intuitivo, pois todos os equipamentos virtuais foram projetados com botões simples e de ação única que contemplassem as diversas variáveis existentes no fenômeno do efeito fotoelétrico.

Em anexo, é possível encontrar um *link* de um vídeo demonstrativo do simulador, onde o usuário faz vários testes mostrando as funcionalidades e a resposta do simulador às variáveis impostas a ele. Lembrando que este vídeo é uma gravação feita dentro da realidade virtual, onde o usuário utiliza o *Oculus Quest 2* para interagir com o experimento e o cenário.

Acreditamos que simulações em realidade virtual podem se comportar como excelentes aliadas ao processo de ensino e aprendizagem, pois trazem uma inovação apoiada em uma das tecnologias mais promissoras da atualidade, abrindo grandes possibilidades para o futuro, o que acaba por empolgar e estimular os alunos na busca por conhecimento, não só de física, como também de tecnologias e inovações.

No campo da Física Moderna, como exposto ao longo do artigo, é muito difícil ter experimentos reais que possam ser levados para os alunos do Ensino Médio, pois normalmente possuem preços elevados, o que torna quase proibitivo a aplicação de experimentos de Física Moderna, e mesmo os experimentos de baixo custo não permitem um grau de interação muito grande. Acreditamos que aqui reside o diferencial do simulador, pois com a redução regular do preço dos HMD's, estes têm se tornado cada vez mais acessíveis. Outro aspecto é o alto grau de interação com o experimento, o que dá ao aluno e ao professor uma gama de possibilidades de aplicação e discussão. Sendo possível até mesmo iniciar discussões a respeito da divergência entre a concepção da Física Clássica em relação ao efeito fotoelétrico e os resultados experimentais encontrados por Phillip Lenard.

## **5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Diante do exposto podemos afirmar que a realidade virtual pode atuar positivamente na educação, de forma a permitir que alunos tenham contato com o laboratório de física, sem necessariamente estarem presos a equipamentos limitantes. É importante que fique esclarecido que o recurso educacional desenvolvido aqui não é somente algo visual e sim uma simulação completa, que permite a manipulação de diversas variáveis, possibilitando que um professor ministre diversos tipos de aula apoiadas no simulador, desde aulas puramente experimentais e exploratórias a aulas mistas.

## **AGRADECIMENTO**

Deixo aqui meus mais sinceros agradecimentos a Eperson Cardoso Mayrink Xavier Filho, que foi o principal responsável pela construção do algoritmo.

## **ANEXO**

Link do vídeo demonstrativo: <https://youtu.be/k6FKwRm9mww>

## REFERÊNCIAS

ALVARENGA, Beatriz in: CARUSO, Francisco; Santoro, Antonio. *Do átomo grego à Física das interações fundamentais*. Rio de Janeiro. AIAFEX, p. 179-196, 2 edição, 2000.

ALVES FILHO, Jose de Pinho. REGRAS DA TRANSPOSIÇÃO DIDÁTICA APLICADAS AO LABORATÓRIO DIDÁTICO. **Caderno Catarinense do Ensino de Física**, [S.I.], v. 17, n. 2, p. 174-182, ago. 2000.

AXT, Rolando; MOREIRA, Marco Antônio. O ENSINO EXPERIMENTAL E A QUESTÃO DO EQUIPAMENTO DE BAIXO CUSTO. **Revista de Ensino de Física**, Porto Alegre, v. 13, p. 97-103, dez. 1991.

GASPAR, A. Física: manual do professor. São Paulo: Ática, 2003.

HALLIDAY, D. RESNICK, R. WALKER, J. Fundamentos de Física. Volume 1. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

HODSON, D.. HACIA UN ENFOQUE MÁS CRÍTICO DEL TRABAJO DE LABORATORIO. **Enseñanza de Las Ciencias**, [S.I.], v. 12, n. 3, p. 299-313, 1994.

KESSLER, Sérgio Luís. **O ENSINO DA FÍSICA MODERNA NO ENSINO MÉDIO**: necessidades e dificuldades no oeste catarinense. 2008. 211 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Educação em Ciências e Matemática, Programa de Pós-Graduação em Educação em Ciências e Matemática, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

KIRNER, Claudio; TORI, Romero. Fundamentos da Realidade Aumentada. In: TORI, Romero; KIRNER, Claudio; SISCOOTTO, Robson. **Fundamentos e Tecnologia de Realidade Virtual e Aumentada**. Belém: Editora Sbc - Sociedade Brasileira de Computação, 2006. p. 20-34.

KIRNER, Claudio; KIRNER, Tereza Gonçalves. Evolução e Tendências da Realidade Virtual e da Realidade Aumentada. In: RIBEIRO, Marcos Wagner S.; ZORZAL, Ezequiel Roberto (org.). **Realidade Virtual e Aumentada: Aplicações e Tendências**. Uberlândia: Editora Sbc - Sociedade Brasileira de Computação, 2011. p. 10-24.

LOZADA, Cláudia de Oliveira. **O essencial invisível aos olhos: uma viagem divertida e colorida pela estrutura da matéria**. 2007. 424 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ensino de Ciências e Matemática, Universidade Cruzeiro do Sul, São Paulo, 2007.

MARTINI, Glorinha *et al.* **Conexões com a Física 3**: eletricidade e física no século xxi. 3. ed. São Paulo: Moderna, 2016.

MOREIRA, Marco Antonio. APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA: UM CONCEITO SUBJACENTE. **Aprendizagem Significativa em Revista**, [S.I.], v. 1, n. 3, p. 25-46, 2011.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de física básica, 1: mecânica**. 5. ed. São Paulo: Blucher, 2013.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de física básica, 4: ótica, relatividade, física quântica**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2014.

OLIVEIRA, Fabio Ferreira de; VIANNA, Deise Miranda; GERBASSI, Reuber Scofano. Física moderna no ensino médio: o que dizem os professores. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [S.I.], v. 29, n. 3, p. 447-454, 2007.

OSTERMANN, Fernanda; MOREIRA, Marco Antonio. ATUALIZAÇÃO DO CURRÍCULO DE FÍSICA NA ESCOLA DE NÍVEL MÉDIO: UM ESTUDO DESSA PROBLEMÁTICA NA PERSPECTIVA DE UMA EXPERIÊNCIA EM SALA DE AULA E DA FORMAÇÃO INICIAL DE PROFESSORES. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, [S.I.], v. 18, n. 2, p. 135-151, ago. 2001.

SÁ, Celso Pereira de. **Núcleo central das representações sociais** – Petrópolis, RJ : Vozes, 1996.

SILVA, Luciene Fernanda da; ASSIS, Alice. FÍSICA MODERNA NO ENSINO MÉDIO: UM EXPERIMENTO PARA ABORDAR O EFEITO FOTOELÉTRICO. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, [S.I.], v. 29, n. 2, p. 313-324, ago. 2012.

SILVA, Sani de Carvalho Rutz da; SCHIRLO, Ana Cristina. TEORIA E APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA DE AUSUBEL: REFLEXÕES PARA O ENSINO DE FÍSICA ANTE A NOVA REALIDADE SOCIAL. **Imagens da Educação**, [S.I.], v. 4, n. 1, p. 36-42, 2014.

TIPLER, Paul A.; LLEWELLYN, Ralph A.. **Física Moderna**. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2017. Tradução e revisão técnica: Ronaldo Sérgio de Biasi.

TOSCANO, Carlos. **Física: Interação e Tecnologia**: volume 3. 2. ed. São Paulo: Leya, 2016