

**A FÍSICA DAS CÉLULAS  
SOLARES: UMA  
RECONCILIAÇÃO  
INTEGRADORA ENTRE A  
ELETRODINÂMICA  
CLÁSSICA E OS EFEITOS  
FOTOELÉTRICO E  
FOTOVOLTAICO**

**THE PHYSICS OF SOLAR CELLS: AN INTEGRATIVE RECONCILIATION  
BETWEEN CLASSICAL ELECTRODYNAMICS AND THE PHOTOELECTRIC  
AND PHOTOVOLTAIC EFFECTS**

Ciências Exatas e da Terra, Ciências Sociais Aplicadas • 18/05/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/778985274](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/778985274)

---

Paulo Henrique Lopes Pessoa<sup>1</sup>

Mário de Jesus Ferreira<sup>2</sup>

José Roberto de Araújo Fontoura<sup>3</sup>

---

## RESUMO

Este artigo constitui um ensaio teórico e propositivo, vinculado a uma pesquisa em desenvolvimento no âmbito do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), Polo 60 da Universidade Estadual da Bahia (UNEB). O trabalho discute o ensino de Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio a partir da Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel. Diante da crise climática e das demandas da Agenda 2030 (ODS 7), problematiza-se a fragmentação curricular que tradicionalmente separa a Eletrodinâmica Clássica dos fenômenos quânticos. Como estratégia didático-pedagógica, propõe-se uma sequência didática que conta com a realização de atividades experimentais com células fotovoltaicas. Defende-se que a manipulação deste dispositivo tecnológico atua como instrumento de Reconciliação Integradora, permitindo que os conhecimentos prévios dos estudantes sirvam de ancoragem para a compreensão dos fenômenos físicos envolvidos nos efeitos fotoelétrico e fotovoltaico. A argumentação demonstra que o experimento não é meramente ilustrativo, mas o meio pelo qual o significado lógico da física do estado sólido se transforma em significado psicológico. Conclui-se que essa abordagem possui potencial para promover o letramento científico e a formação de cidadãos críticos diante dos desafios contemporâneos associados à geração de energia de modo sustentável.

**Palavras-chave:** Ensino de Física; Aprendizagem Significativa; Reconciliação Integradora; Efeito Fotovoltaico; Células Solares.

## ABSTRACT

This article constitutes a theoretical and propositive essay, linked to ongoing research within the scope of the National Professional Master's Degree in Physics Teaching (MNPEF), Polo 60 of the State University of Bahia (UNEB). The work discusses the teaching of

Modern and Contemporary Physics in secondary education in light of David Ausubel's Meaningful Learning Theory. In the face of the climate crisis and the demands of the 2030 Agenda (SDG 7), it problematizes the curricular fragmentation that traditionally separates Classical Electrodynamics from quantum phenomena. As a didactic-pedagogical strategy, a didactic sequence structured around experimental activities with photovoltaic cells is proposed. It is argued that manipulating this technological device acts as an instrument of Integrative Reconciliation, allowing students' prior knowledge to serve as an anchor for understanding the physical phenomena involved in the photoelectric and photovoltaic effects. The argumentation demonstrates that the experiment is not merely illustrative, but the means by which the logical meaning of solid-state physics transforms into psychological meaning. It is concluded that this approach has the potential to promote scientific literacy and the formation of critical citizens regarding contemporary challenges associated with sustainable energy generation.

**Keywords:** Physics Teaching; Meaningful Learning; Integrative Reconciliation; Photovoltaic Effect; Solar Cells.

## 1. INTRODUÇÃO

A dependência da sociedade contemporânea em relação à eletricidade impõe, diante da crise climática e ambiental, uma urgência de transição para modelos sustentáveis de geração de energia, configurando-se hoje como um imperativo civilizatório e um grande desafio para lideranças governamentais.

Essa preocupação é evidenciada na Agenda 2030. Por meio do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 7, o documento estabelece a meta de “Assegurar o acesso universal, confiável,

moderno a preços acessíveis a serviços de energia.” (ONU, 2015, p. 26). Além disso, o documento indica ser necessário, “Até 2030, aumentar substancialmente a participação de energias renováveis na matriz energética global” (ONU, 2015, p. 26).

Considerando esse debate essencial para a formação de sujeitos ativos e críticos, a Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (LDB), determina que a educação escolar deve “vincular-se ao mundo do trabalho e à prática social” (Brasil, 1996, art. 1). Na mesma diretriz, a Base Nacional Comum Curricular (BNCC) define que é fundamental o estudante seja capaz de “[...] fazer escolhas alinhadas ao exercício da cidadania e ao seu projeto de vida, com liberdade, autonomia, consciência crítica e responsabilidade” (Brasil, 2018, p. 9).

Para serem alcançadas essas diretrizes legais se faz necessária uma alteração na prática docente, considerando o rompimento com o modelo de ensino tradicional. Libâneo (2013) discute essa transição, defendendo que a formação crítica depende da superação do currículo conteudista. Para o autor, a relação entre o conhecimento escolar abstrato e a vivência social do aluno está na contextualização do que é aprendido. Essa relação pode conferir significado real à aprendizagem, conectando a sala de aula ao mundo concreto.

A abordagem de Libâneo (2013) converge com a BNCC, que orienta a contextualização como estratégia para conectar os saberes ao tempo e espaço do estudante (Brasil, 2018). No recorte específico das Ciências da Natureza, o documento é direto sobre a necessidade de habilitar o aluno a “Analisar fenômenos naturais e processos tecnológicos [...] para propor ações individuais e coletivas que aperfeiçoem processos produtivos, minimizem impactos

socioambientais e melhorem as condições de vida [...]” (Brasil, 2018, p. 553).

Existe um consenso na literatura especializada sobre a urgência de atualizar o currículo escolar com temas de Física Moderna e Contemporânea (FMC) (Pereira; Ostermann, 2009). Tal inserção é apontada como um catalisador para fomentar um entusiasmo duradouro dos alunos pelo fazer científico (Shabajee; Postlethwaite, 2000 *apud* Monteiro; Nardi; Bastos Filho, 2009). Num espectro mais amplo, esse ensino integrado favorece a construção de uma educação '[...] problematizadora, crítica, ativa, engajada na luta pela transformação social' (Zanetic, 2005, p. 21).

Diante desse desafio, o estudo da tecnologia fotovoltaica no contexto do ensino de física no ensino médio parece promissor: Essa tecnologia possui "vários benefícios e relevância no cenário atual de visão sustentável" (Ribeiro; Braga; Rezende, 2022, p. 30), além de materializar, no mundo macroscópico, os efeitos fotoelétrico e fotovoltaico. Sob a ótica da Teoria da Aprendizagem Significativa, este trabalho propõe a Reconciliação Integradora como mecanismo cognitivo para superar a fragmentação entre os conceitos clássicos e quânticos para estudantes de ensino médio.

O presente artigo recorta parte dos resultados teóricos de uma pesquisa em andamento no âmbito do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), Polo 60 (UNEB), buscando articular essas demandas globais com aspectos da realidade escolar, especialmente no contexto da aprendizagem significativa da componente curricular Física.

## **2. A INSUFICIÊNCIA DA ABORDAGEM CLÁSSICA**

O início do século XX foi marcado por uma falsa sensação de plenitude para os avanços na física. A visão predominante entre os físicos era que os fundamentos dessa ciência já estavam plenamente mapeados, restando somente o aperfeiçoamento de dados coletados em atividades experimentais. Nesse contexto, Maxwell chegou a afirmar que, para as constantes físicas, "[...] a única ocupação que será deixada para os homens de ciência será aprimorar esses experimentos e aumentar a precisão em mais uma casa decimal [...]" (Maxwell, 1871 *apud* Badash, 1972 *apud* Schulz, 2007, p. 511).

A aparente estabilidade da física, no entanto, foi abalada quando Lord Kelvin expôs a fragilidade desse cenário ao identificar falhas explicativas fundamentais, afirmando que "A beleza e clareza da teoria dinâmica, que coloca calor e luz como modos de movimento, está presentemente obscurecida por duas nuvens" (Lord Kelvin, 1901 *apud* Schulz, 2007, p. 510).

Entre as inconsistências apontadas nas "nuvens" de Kelvin, destacaremos o teorema da equipartição de energia aplicada à radiação térmica. Inicialmente, a abordagem clássica obteve êxito empírico com a Lei de Stefan-Boltzmann, que descrevia corretamente a potência total irradiada  $R$  como proporcional à quarta potência da temperatura absoluta  $T$ , como indica a equação 1:

$$R = \sigma T^4$$

Tipler e Llewellyn (2014), ao comentarem a lei física em questão elucidam que:

*[...] a potência por unidade de área irradiada por um corpo negro é função apenas da temperatura e, portanto, não depende de outras características do corpo, como a cor ou o material de que é feito. Observe, também, que  $R$  representa a rapidez com a qual o corpo emite energia (Tipler; Llewellyn, 2014, p. 139).*

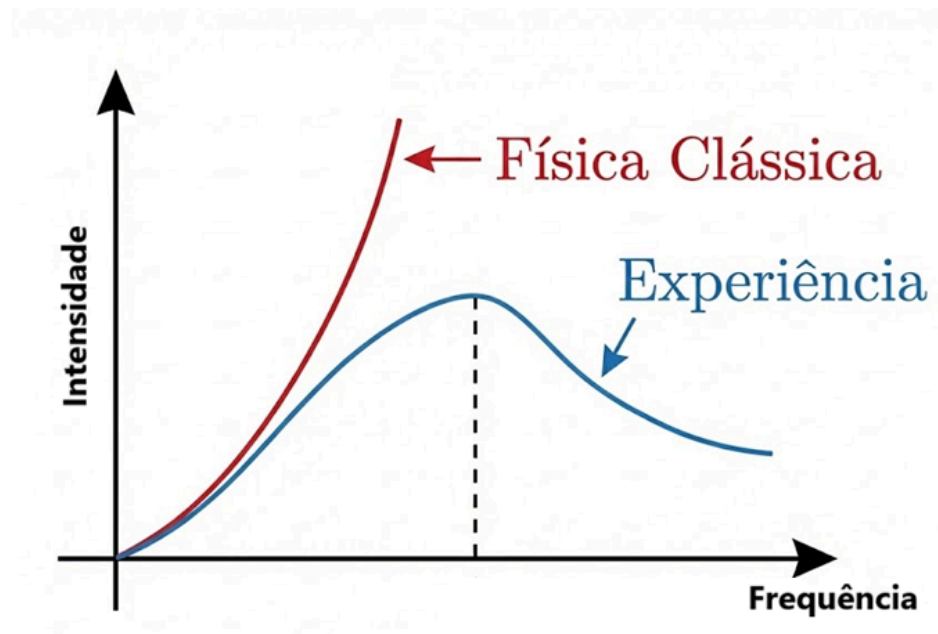
Apesar do sucesso inicial da Lei de Stefan-Boltzmann, a tentativa de descrever a distribuição espectral dessa energia utilizando os princípios da termodinâmica clássica e do eletromagnetismo resultou em um impasse. Lord Rayleigh e James Jeans, aplicando o teorema da equipartição de energia, deduziram uma expressão para a densidade de energia espectral que assumia a forma indicada na equação 2:

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3}kT$$

A equação 2 é conhecida como Lei de Rayleigh-Jeans. Essa lei demonstra que a irradiação do corpo negro não depende somente da temperatura absoluta, como afirma a Lei de Stefan-Boltzmann, mas, também, da frequência emitida. A dependência da densidade de energia com o quadrado da frequência implicava em uma divergência entre o resultado teórico esperado e os dados coletados experimentalmente. Por essa razão a grande diferença entre os resultados da teoria clássica e as observações experimentais para pequenos comprimentos de onda foi denominada "catástrofe do ultravioleta" (Stuart, 2000, p. 530).

A divergência entre o que a teoria prevê e os resultados experimentais é representada na figura 1. Sua análise possibilita perceber que, enquanto a curva experimental decai para zero em altas frequências, a previsão clássica de Rayleigh-Jeans diverge abruptamente para o infinito.

**Figura 1:** catástrofe do ultravioleta



Fonte: elaborado pelo autor (2026)

É atribuído a Max Planck a resolução do paradoxo discutido. Em dezembro de 1900 ele apresentou "[...] o trabalho intitulado Sobre a Teoria da Lei de Distribuição de Energia no Espectro Normal [...] em que introduziu o conceito de quantização da energia" (Studart, 2000, p. 523).

A equação postulada por Planck é mais do que uma simples fórmula matemática que se ajusta aos dados experimentais e, juntamente com a explicação do efeito fotoelétrico dada por Einstein, indica que as trocas energéticas mediadas por ondas eletromagnéticas ocorrem em pacotes discretos, estabelecendo a relação indicada na equação 3:

$$E = h\nu$$

Nessa conhecida equação, a energia pode ser compreendida como "[...] uma grandeza discreta, composta de um número inteiro de partes finitas iguais" (Studart, 2000, p. 531) e não como uma grandeza contínua, como era compreendida até então.

Mesmo após a teoria do efeito fotoelétrico, Planck permaneceu não acreditando em uma teoria consistente dos "quanta" de energia. Bernstein (1973), no livro *As ideias de Einstein* cita que Planck, ao defender a admissão de Einstein na Real Academia Prussiana de Ciências, disse "(O fato de) haver, por vezes, errado o alvo em suas especulações, tal como ocorreu, por exemplo, em sua teoria dos quanta de luz, não pode na verdade, ser levantado contra ele" (Bernstein, 1973, p. 157).

A ruptura com a física clássica, no entanto, não foi intencionalmente planejada. Planck descreveu sua postulação como um "ato de desespero" onde ele "[...] teve que introduzir a hipótese da descontinuidade da energia dos osciladores." (Studart, 2000, p. 530), o que se mostrou uma boa alternativa para adequar a teoria à curva experimental.

O caráter corpuscular da luz, que só ficou bem caracterizado nos trabalhos posteriores ao efeito fotoelétrico e ao efeito Compton, já havia se mostrado experimentalmente nos trabalhos de Heinrich Hertz. O físico alemão, que tinha como objetivo "comprovar experimentalmente as equações de Maxwell" (Barros; Soares, 2016, p. 225), notou o Efeito Fotoelétrico como uma perturbação em suas medidas de ondas eletromagnéticas. O relato de Hertz descreve o fenômeno como algo inesperado:

*Logo que comecei os experimentos, eu fui afetado por uma notável e recíproca ação entre duas sparks [faíscas] simultâneas. Eu não tive a intenção de permitir que esse fenômeno distraísse minha atenção do objetivo principal que eu tinha em mente; mas isso ocorreu de um modo tão definido e perplexo que eu não poderia completamente negligenciá-lo (Hertz, 1893, p. 4 apud Barros; Soares, 2016, p. 224).*

Quando confirmou que a anomalia se tratava de um efeito da luz ultravioleta, Hertz afirmou: "[...] coloquei de lado essa investigação, para dirigir minha atenção para a questão principal mais uma vez [a teoria eletromagnética]" (Hertz, 1886 apud Mangili, 2012, p. 46).

### **3. FUNDAMENTOS DA CONVERSÃO FOTOVOLTAICA**

O aspecto observado por Hertz, mas posto de lado, levou Philipp Lenard, seu assistente, a sistematizar o fenômeno, demonstrando que a incidência de radiação ultravioleta sobre placas metálicas provocava a ejeção de partículas carregadas, posteriormente identificadas como elétrons, fornecendo "importantes contribuições para a elucidação do efeito fotoelétrico" (Barros; Soares, 2016, p. 225).

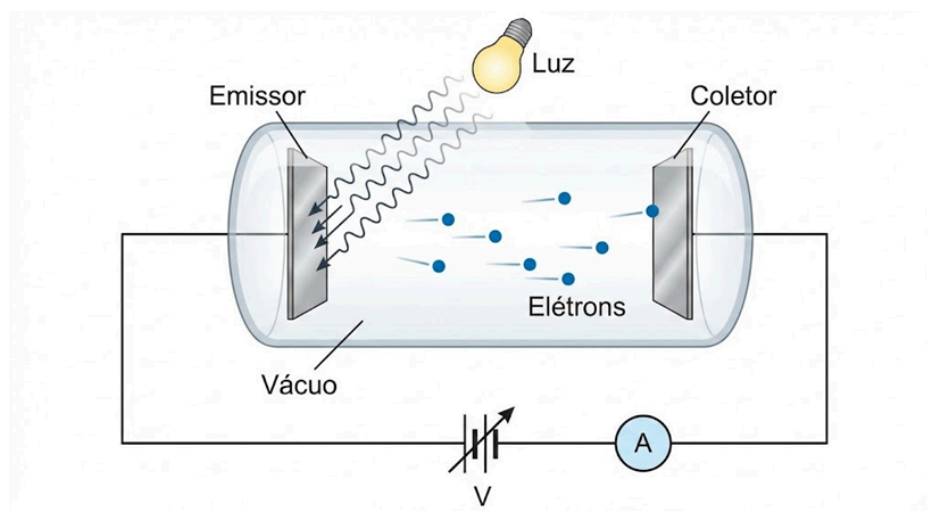
Os resultados de Lenard trouxeram um novo conflito com a física clássica: ele observou que "a velocidade de escape dos raios catódicos era independente da intensidade da radiação ultravioleta incidente" (Suttini; Caluzi; Errobidart, 2024, p. 3). Essa constatação era "[...] inconsistente e contraditória em relação ao que seria esperado

pela teoria ondulatória-eletromagnética clássica" (Suttini; Caluzi; Errobidart, 2024, p. 3).

A solução para a crise teórica da radiação de corpo negro veio em 1905 com Albert Einstein. Ele considerou que a energia luminosa não se distribuía continuamente no espaço, mas sim de forma discreta. Segundo sua hipótese, a energia de um feixe de luz consiste num número finito de quanta de energia que podem ser produzidos e absorvidos apenas como unidades completas, já que “[...]um quantum de luz transfere toda sua energia para um único elétron” (Barros; Soares, 2016, p. 228).

A investigação empírica do efeito fotoelétrico pode ocorrer por meio de um arranjo experimental típico, esquematizado na Figura 2. Nele, a radiação incide sobre uma placa metálica emissora (cátodo) dentro de um tubo de vácuo, permitindo que os elétrons ejetados sejam atraídos para o coletor (ânodo) e gerem uma corrente detectável por um amperímetro.

**Figura 2:** Efeito Fotoelétrico



**Fonte:** elaborado pelo autor (2026)

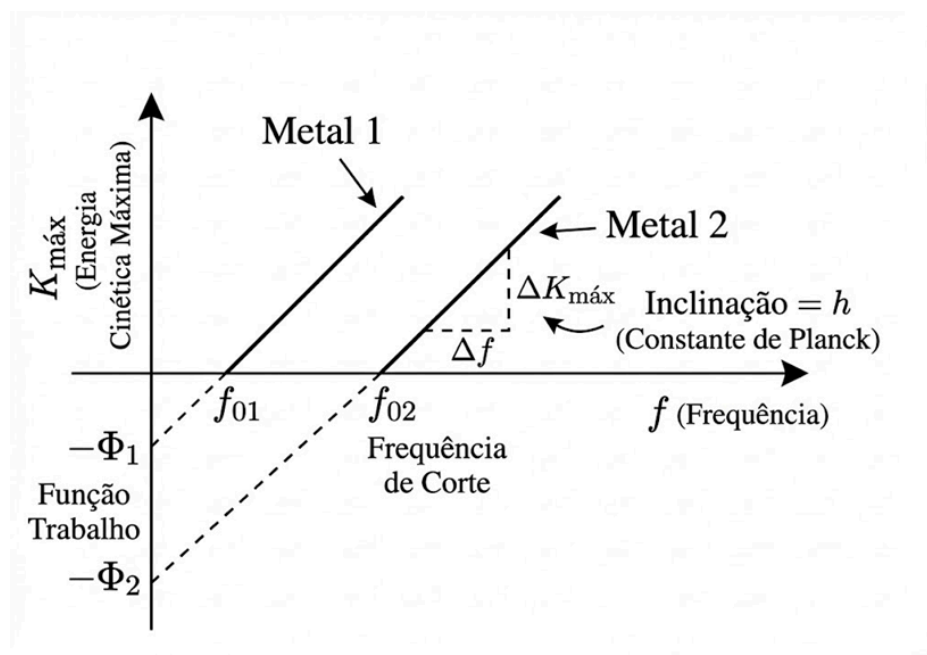
A equação 4 relaciona a energia cinética máxima ( $K_{\text{máx}}$ ) do elétron e a energia do pacote de luz incidente ( $h\nu$ ).

$$K_{\text{máx}} = h\nu - \phi$$

Nessa equação,  $\phi$  é conhecido como função trabalho do material, constituindo a energia mínima necessária para libertar o elétron da superfície.

A dependência na energia cinética máxima com a frequência pode ser observada na figura 3. Nela, percebe-se um padrão linear para diferentes metais. Embora cada material apresente sua própria frequência de corte, a taxa de crescimento da energia é a mesma, já que todas as retas são paralelas. A inclinação dessas retas corresponde numericamente à constante de Planck ( $h$ ).

**Figura 3:** Gráfico 1



**Fonte:** elaborado pelo autor (2026)

A aceitação dessa ideia, contudo, não foi imediata. Robert Millikan, cético em relação à natureza corpuscular da luz, realizou inúmeros estudos em que “[...] tinha o intuito de comprovar,

experimentalmente, que Einstein (1905) estava equivocado, no entanto, seu trabalho evidencia a validade geral da equação de Einstein, mesmo que continuasse discordando de sua teoria." (Einstein, 1905 *apud* Barros; Soares, 2016, p. 226).

A consolidação da teoria quântica abriu caminho para tecnologias que transformariam a matriz energética global, como os painéis solares. O princípio físico que rege o funcionamento desses dispositivos é o Efeito Fotovoltaico. Historicamente, o registro inaugural do fenômeno remonta a 1839, quando "Edmund Becquerel<sup>4</sup>, físico experimental, descobriu que duas placas de latão imersas em um líquido produzia uma corrente contínua quando expostas à luz" (Mendonça *et al.*, 2022, p. 4).

Do ponto de vista físico, o efeito fotovoltaico fundamenta-se na interação da radiação com a estrutura de materiais semicondutores. Nesse processo, a absorção de luz provoca a excitação de portadores de carga, resultando na formação de elétrons livres (cargas negativas) e lacunas (cargas positivas) (Mendonça *et al.*, 2022).

Os Efeitos Fotovoltaico e Fotoelétrico guardam distinções importantes. Enquanto o fotoelétrico ejeta elétrons para o meio externo, no caso de um painel solar, para que a conversão de energia ocorra, é necessário que "para cada fóton absorvido deve haver a criação de um par elétron-buraco" no interior do material (Lima *et al.*, 2020, p. 5). Apesar dessas diferenças, ambos os fenômenos compartilham a mesma natureza quântica fundamental: a interação discreta entre a luz e a matéria.

#### **4. A TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA E A INTEGRAÇÃO ELETRODINÂMICA**

A teoria física sobre o efeito fotoelétrico explica como luz interage com a matéria de forma quantizada. A incidência de luz sobre um metal pode fazer ejetar elétrons de sua superfície. Para converter essa energia em eletricidade utilizável, é necessário haver uma estrutura material específica, capaz de ordenar o movimento das cargas.

A célula solar funciona graças à estrutura de bandas de energia dos semicondutores, onde a condução elétrica depende da superação de uma barreira energética, o *gap*. A condição para que esse processo ocorra é descrita por Lima *et al.* (2020): [...] para cada fóton absorvido deve haver a criação de um par elétron-buraco (Lima *et al.*, 2020, p. 5).

Esse processo é o chamado "efeito fotoelétrico interno". Ele se distingue daquele observado nos experimentos clássicos comentados na seção anterior. No contexto da célula solar, a carga permanece confinada no material. Nesse caso, “[...] o coração de uma célula solar é a junção p-n e quando o cristal absorve a luz (o efeito fotoelétrico interno), os pares elétron-buraco aparecem” (Richards; Etkina, 2013 *apud* Reis, 2019, p. 51).

A principal diferença aqui é que, embora a natureza quântica da interação seja idêntica, o resultado prático no caso das células fotovoltaicas é a disponibilização de portadores livres na banda de condução, e não sua expulsão do material.

Gerar portadores de carga, no entanto, não é suficiente: é preciso separá-los. Para isso, é utilizado o processo de dopagem para criar a junção P-N. A construção do lado positivo (Tipo P) ocorre pela introdução de impurezas na rede cristalina. De acordo com

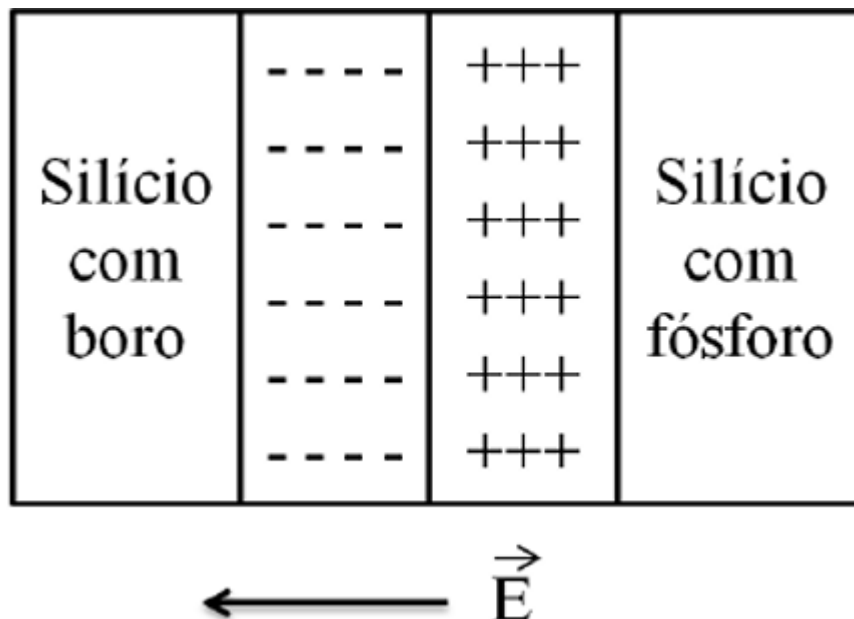
Machado e Miranda (2015), “A dopagem do silício com o boro gera a vacância de um elétron na rede cristalina, já que o boro tem três elétrons de valência. [...] o boro é um acceptor de elétrons, ou seja, um dopante do tipo p” (Machado; Miranda, 2015, p. 130-131).

Para o lado negativo (Tipo N), o processo é análogo, mas com efeito oposto. Ainda segundo esses autores:

*Ao fazer a dopagem com o fósforo, ao contrário do boro, haverá um elétron sobrando nas ligações, já que o fósforo tem cinco elétrons de valência. [...] o fósforo é um doador de elétrons ou um dopante do tipo n (Machado; Miranda, 2015, p. 131).*

A união desses materiais através da difusão de cargas estabelece um campo elétrico interno permanente, como indica a figura 4.

**Figura 4:** Acúmulo de cargas na junção p-n



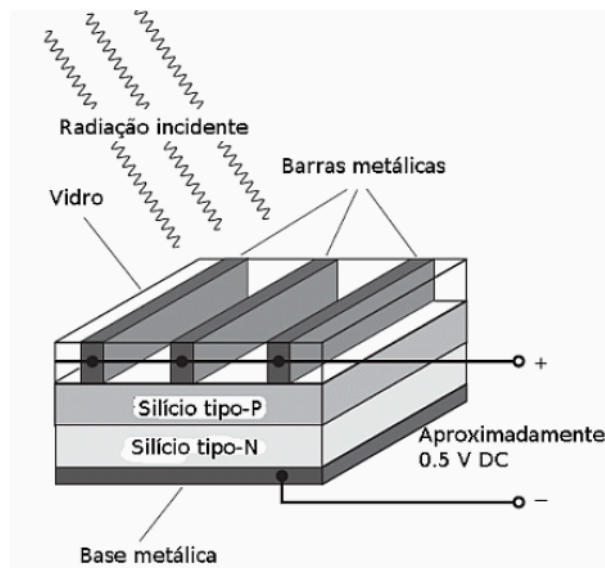
**Fonte:** Adaptado de Machado e Miranda (2015, p. 131)

É o campo elétrico representado na figura 4 que realiza trabalho sobre as cargas liberadas pela luz. Machado e Miranda (2015) descrevem que:

*Com essa energia extra, os elétrons são acelerados, gerando uma corrente através da junção. Esse fluxo de corrente dá origem à diferença de potencial entre as duas faces da junção p-n (Machado; Miranda, 2015, p. 131).*

A materialização dessa teoria é constituída em uma célula fotovoltaica. Na figura 6 podemos observar como as camadas são montadas: a grade metálica superior (que coleta os elétrons sem bloquear a luz), a camada antirreflexo (para maximizar a absorção), as camadas dopadas N e P onde ocorre a junção, e o contato traseiro. É essa arquitetura que permite coletar a corrente gerada no interior do cristal e levá-la ao circuito externo.

**Figura 5:** Estrutura das células fotovoltaicas



**Fonte:** Adaptado de Silva et al. (2014, p. 2).

Matematicamente o comportamento das células fotovoltaicas pode ser expresso na equação 5 (equação do diodo), que expressa o balanço entre a corrente gerada pela luz ( $J_L$ ) e as perdas termodinâmicas do diodo ( $J_S$ ):

$$J(V) = J_S (e^{V/V_T} - 1) - J_L$$

Nesta expressão, o termo  $J_L$  representa a densidade de corrente gerada pela incidência da luz. O termo exponencial (envolvendo a densidade de corrente de saturação  $J_S$  e o potencial térmico  $V_T$ ), representa as perdas internas do diodo. Essas perdas aumentam exponencialmente com o aumento de tensão. O saldo líquido entre esses termos constitui a corrente disponível por unidade de área que a placa entrega ao circuito.

É importante ressaltar que a eficiência dessa conversão tem limites físicos, embora apresente um notável e contínuo avanço tecnológico. Se no passado recente a literatura indicava que a eficiência da maior parte dos módulos comerciais orbitava a faixa dos 15% (Machado; Miranda, 2015), o cenário atual apresenta avanços. Módulos comerciais modernos já operam com eficiências em torno

de 21% a 22%, e relatórios recentes, como os de Green *et al.* (2025), atestam que células à base de silício cristalino já alcançam o recorde de 27,8% de eficiência em laboratório.

Para fins didáticos e práticos, é fundamental traduzir o significado físico dessa taxa de conversão. Segundo Pereira *et al.* (2017), a região Nordeste do Brasil apresenta uma irradiação solar média anual que pode variar entre 1.800 e 2.400 kWh/m<sup>2</sup>. Na prática, isso significa dizer que um painel com 22% de eficiência é capaz de entregar, anualmente, entre 396 kWh e 528 kWh de energia elétrica útil para cada metro quadrado de placa instalada.

Os números aqui citados nos lembram que, embora a física quântica tenha estabelecido os princípios teóricos fundamentais para aproveitarmos a luz solar, a engenharia de materiais se dedica continuamente à solução de desafios associados à otimização tecnológica na direção de um futuro energético sustentável.

## **5. A CÉLULA FOTOVOLTAICA COMO INSTRUMENTO DE RECONCILIAÇÃO INTEGRADORA**

A discussão apresentada até aqui é, como já descrito na introdução desse artigo, fruto de uma pesquisa desenvolvida no âmbito do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF). O objetivo geral desta investigação é oportunizar o ensino dos efeitos fotoelétrico e fotovoltaico no ensino médio, estruturando a abordagem a partir da perspectiva da Aprendizagem Significativa de Ausubel.

A escolha por essa abordagem pedagógica é decorrente do reconhecimento da necessidade de superar o ensino tradicional,

numerosas vezes marcado pela aprendizagem mecânica. Esse tipo de aprendizagem é aquela em que a:

*[...] aquisição de associações arbitrárias literais em situações de aprendizagem nas quais o próprio material de aprendizagem não pode ser relacionado não arbitrariamente ou substantivamente à estrutura cognitiva (isto é, não possui “significado lógico”) ou no qual o aprendiz apresenta uma disposição para uma aprendizagem não significativa (Ausubel; Novak; Hanesian, 1980, p. 521 apud Puhl; Müller; Lima, 2020, p. 68).*

Por sua vez, a aprendizagem é considerada significativa quando “[...] o processo através do qual uma nova informação (um novo conhecimento) se relaciona de maneira não arbitrária e substantiva (não-litera) à estrutura cognitiva do aprendiz (Moreira, 2011, p. 26).

Na teoria ausubeliana o conhecimento prévio do estudante tem um papel central no processo de aquisição de novos conhecimentos. O próprio Ausubel acentua que:

*Se tivesse que reduzir toda a psicologia educacional a um só princípio, diria o seguinte: o fator isolado mais importante influenciando a aprendizagem é aquilo que o aprendiz já sabe. Determine isso e ensine-o de acordo (Ausubel, 1978, p. iv apud Loreian; Darroz; Rosa, 2020, p. 212).*

Para que a aprendizagem significativa ocorra, o novo material ser aprendido precisa encontrar estabilidade em conceitos relevantes já existentes na mente do aprendiz, denominados subsunçores. Esse processo é denominado ancoragem. Moreira (2010), ao definir Aprendizagem Significativa Subordinada, explicita que “[...] o novo conhecimento interage com o conhecimento prévio e, de certa forma, ancora-se nele.” (Moreira, 2010, p. 15).

Diferentemente da Aprendizagem Significativa Subordinada, pode ocorrer a Aprendizagem Significativa Superordenada. Esse tipo de aprendizagem “É muito importante na formação de conceitos e na unificação e reconciliação integradora de proposições aparentemente não relacionadas ou conflitivas.” (Moreira, 2011, p. 25).

Quando os subsunçores relevantes são ausentes, instáveis ou inacessíveis na estrutura cognitiva dos estudantes, a teoria de Ausubel prevê o uso de organizadores prévios. A principal função do organizador prévio é a de servir de “ponte cognitiva” (Moreira, 2011 apud Puhl; Müller; Lima, 2020, p. 72) entre o que o aprendiz já sabe e o que ele precisa saber.

*[...] organizadores prévios são materiais introdutórios apresentados antes do material de aprendizagem em si mesmo, em um nível mais alto de abstração, generalidade e inclusividade, para servir de ponte entre o que o aprendiz já sabe e o que deveria saber para que esse material fosse potencialmente significativo ou, mais importante, para mostrar a relacionabilidade e a discriminabilidade entre o novo conhecimento e o conhecimento prévio. (Moreira, 2010, p. 6).*

A presente pesquisa propõe, como organizador prévio, uma fatura de energia elétrica. Ao analisar esse documento, o estudante pode mobilizar conhecimentos prévios sobre eletrodinâmica, tais como energia, potência e tensão elétricas. A discussão deve apontar, também, para a reflexão sobre o consumo de energia e as necessidades contemporâneas de geração de energia sustentável, assim como aponta o objetivo de desenvolvimento sustentável 7 da agenda 2030 da ONU, como já comentado na primeira seção desse artigo.

Aqui se faz oportuno problematizar a substituição gradual da frota de veículos a combustão por carros elétricos. A sustentabilidade dessa mudança está associada à adoção de uma matriz elétrica limpa, visto que o abastecimento desses veículos com energia oriunda de usinas termelétricas prejudicaria os benefícios ambientais pretendidos.

Por essa razão, deve-se fomentar uma cultura de microgeração, estimulando a população a produzir sua própria energia de forma sustentável. Quando essa geração ocorre por meio de painéis fotovoltaicos, o impacto climático positivo é duplo. Considerando uma célula com eficiência energética de 22%, compreende-se que essa exata fração da radiação solar incidente é convertida em trabalho elétrico, deixando de ser dissipada como calor no ambiente. Dessa forma, a tecnologia atua simultaneamente na redução do aquecimento direto do microclima local e na mitigação do efeito estufa, graças à ausência de emissão de gases poluentes.

A partir dessa ponte, o processo pedagógico foi desenhado para seguir a dinâmica da diferenciação progressiva, que pode ser entendida como “o princípio programático segundo o qual as ideias mais gerais e inclusivas da matéria de ensino devem ser apresentadas desde o início da instrução e, progressivamente, diferenciadas em termos de detalhes e especificidade.” (Moreira, 2010, p. 5).

A sequência didática a ser proposta terá seu ápice no fenômeno da Reconciliação Integradora, materializada no experimento com o painel solar. Ao medir a geração de corrente elétrica a partir da luz, bem como fatores ambientais que podem interferir nesse processo, o estudante é levado a confrontar a física clássica com a quântica, pois consiste em “[...] explorar, explicitamente, relações entre conceitos e proposições, chamar a atenção para diferenças e semelhanças e reconciliar inconsistências reais e aparentes” (Moreira, 2010, p. 5).

A reconciliação integradora, descrita nesta seção, ocorre quando o estudante manipula o aparato experimental, confrontando o

comportamento da célula fotovoltaica com suas expectativas baseadas na Eletrodinâmica Clássica. Ao utilizar multímetros para aferir a tensão e a corrente elétrica sob diferentes condições de luminosidade, o aluno percebe que, embora o circuito externo obedeça à Lei de Ohm e às Leis de Kirchhoff (subsunçores existentes), a origem da corrente não pode ser explicada por indução eletromagnética ou processos químicos convencionais.

Ao observar a dependência direta entre a intensidade da luz e a corrente gerada, ou a existência de uma tensão de limiar, que os conceitos de fóton e *gap* de energia devem ganhar significado psicológico. O experimento, portanto, possibilita a reestruturação cognitiva, integrando a nova física (quântica) à estrutura já existente (física clássica) do estudante.

## **6. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A proposta pedagógica aqui apresentada visa oferecer um ensino de física que supere a simples exposição de conceitos e fórmulas. A idealização da sequência didática busca garantir o protagonismo do estudante no processo de construção de seu conhecimento, partindo do princípio de que "A essência do processo da aprendizagem significativa está, portanto, no relacionamento não-arbitrário e substantivo de idéias simbolicamente expressas a algum aspecto relevante da estrutura de conhecimento do sujeito [...]" (Moreira, 2011, p. 26).

A escolha dessa teoria de aprendizagem é fundamental para que o ensino cumpra seu papel transformador, uma vez que "O levantamento de subsunçores, seguido de sua organização avançada, são condições de possibilidade para que a aprendizagem

possa romper a barreira de uma ocorrência meramente mecânica" (Silva Filho; Ferreira, 2022, p. e20210339-1).

A escolha dos painéis solares como objeto de investigação é estratégica, pois "É no curso da aprendizagem significativa que o significado lógico do material de aprendizagem se transforma em significado psicológico para o aprendiz [...]" (Ausubel, 1963, p. 58 *apud* Moreira, 2011, p. 26). Ao ancorar os conceitos de Física Moderna em tecnologias sustentáveis, a sequência didática deixa de ser um fim em si mesma para se tornar um meio de compreensão da realidade, fomentando o "aprender a aprender que permitirá à pessoa lidar frutiferamente com a mudança, e sobreviver" (Moreira, 2010, p. 4).

O experimento com células fotovoltaicas atua como elemento de integração entre a física clássica e a física quântica. Nesse sentido, "A reconciliação integrativa é, então, o princípio programático segundo o qual a instrução deve também explorar relações entre ideias, apontar similaridades e diferenças importantes e reconciliar discrepâncias reais ou aparentes" (Moreira, 2011, p. 38). Dessa forma, o aluno foi incentivado a superar a fragmentação do conhecimento, unificando princípios que antes pareciam desconectados.

Embora o produto educacional aguarde sua aplicação plena, as expectativas de aprendizagem apontam para a aprendizagem dos tópicos envolvidos de forma crítica. É esperado que a sequência didática resulte em uma crescente capacidade de intervir na sociedade de maneira consciente, já que "A aprendizagem significativa subjaz à integração construtiva entre pensamento, sentimento e ação que conduz ao engrandecimento ("empowerment") humano" (Moreira, 2011, p. 32).

Diante dos desafios energéticos contemporâneos, este trabalho reafirma que, para formar cidadãos autônomos e críticos, é imprescindível contextualizar os objetos de conhecimento a serem ensinados com as demandas contemporâneas de nossa sociedade. Dessa forma, o trabalho em construção pretende unir a aprendizagem dos conceitos físicos presentes nos efeitos fotoelétrico e fotovoltaico à necessária postura reflexiva acerca dos processos de geração de energia renováveis.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

BARROS, José Acácio de; SOARES, Fabiana. O efeito fotoelétrico em livros didáticos de física do PNLD 2012. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 38, n. 2, p. 223-231, 2016.

BERNSTEIN, Jeremy. **As ideias de Einstein**. São Paulo: Cultrix, 1973.

BRASIL. Lei nº 9.394, de 20 de dezembro de 1996. Estabelece as diretrizes e bases da educação nacional. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 23 dez. 1996. Seção 1, p. 27833.

BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília, DF: MEC, 2018.

GREEN, M. A. et al. Solar cell efficiency tables (Version 66). **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 33, p. 795-810, 2025.

LIBÂNEO, José Carlos. **Didática**. 2. ed. São Paulo: Cortez, 2013.

LIMA, L. F. *et al.* Uma proposta de sequência didática para o ensino do efeito fotovoltaico. **Revista do Professor de Física**, v. 4, n. 1, p. 1-14, 2020.

LOREIAN, Ingridy; DARROZ, Luiz Marcelo; ROSA, Cleci Teresinha Werner da. Organizadores prévios no processo de ensino de Física: o que dizem os periódicos da área. **Amazônia: Revista de Educação em Ciências e Matemática**, v. 16, n. 37, p. 210-223, 2020.

MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. Energia solar fotovoltaica: uma breve revisão. **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 1, p. 126-143, 2015.

MANGILI, T. F. **A história do efeito fotoelétrico e suas implicações para o ensino de física**. 2012. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

MENDONÇA, A. F. *et al.* Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 11, n. 1, p. 1-12, 2022.

MONTEIRO, M. A. A.; NARDI, R.; BASTOS FILHO, J. B. A física moderna e contemporânea no ensino médio: o que dizem os professores. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 31, n. 3, p. 3402, 2009.

MOREIRA, Marco Antonio. **Aprendizagem significativa crítica**. Porto Alegre: Ed. do Autor, 2010.

MOREIRA, Marco Antonio. Aprendizagem significativa: um conceito subjacente. **Aprendizagem Significativa em Revista**, Porto Alegre, v. 1, n. 3, p. 25-46, 2011.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável**. [S. l.]: ONU, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-09/agenda2030-pt-br.pdf>. Acesso em: 29 set. 2025.

PEREIRA, A. P.; OSTERMANN, F. A física moderna e contemporânea no ensino médio: um estudo de caso. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 14, n. 3, p. 365-386, 2009.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017.

PUHL, Cassiano Scott; MÜLLER, Thaísa Jacintho; LIMA, Isolda Gianni de. As contribuições de David Ausubel para os processos de ensino e de aprendizagem. **Revista Dynamis**, Blumenau, v. 26, n. 1, p. 61-77, 2020.

REIS, A. S. **O ensino de física moderna e contemporânea no ensino médio: uma proposta baseada na aprendizagem significativa**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019.

RIBEIRO, A. C.; BRAGA, M. S.; REZENDE, D. T. O uso da energia solar fotovoltaica no ensino de física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 44, e20220030, 2022.

SCHULZ, P. A. A crise da física clássica e o advento da física quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 4, p. 509-519, 2007.

SILVA, Bruno Dal Pont; RUBBO, Patrick Nikson; RAMPINELLI, Giuliano Arns. Análise do desempenho de sistemas fotovoltaicos fixos e com rastreador solar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 5., 2014, Recife. **Anais** [...]. Recife: ABENS, 2014.

SILVA FILHO, Olavo Leopoldino da; FERREIRA, Marcello. Modelo teórico para levantamento e organização de subsunçores no âmbito

da Aprendizagem Significativa. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 44, e20210339, 2022.

STUDART, N. A radiação do corpo negro e a origem da teoria quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 22, n. 4, p. 523-537, 2000.

SUTTINI, L. C.; CALUZI, J. J.; ERROBIDART, N. C. A controvérsia sobre a natureza da luz e o efeito fotoelétrico. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 41, n. 1, p. 1-20, 2024.

TIPLER, Paul A.; LLEWELLYN, Ralph A. **Física moderna**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

ZANETIC, J. Física e cultura. **Ciência e Cultura**, v. 57, n. 3, p. 21-24, 2005.

---

<sup>1</sup> Licenciado em Física pela Universidade Federal da Bahia (UFBA) e Pedagogo pela Faculdade Unyleya, especialista em Ensino de Física, em Psicopedagogia e em Psicologia do Desenvolvimento. Mestrando em Ensino de Física pelo MNPEF/UNEB. Professor auxiliar da Universidade do Estado da Bahia (DCET II/UNEB), da Secretaria de Educação do Estado da Bahia (SEC/BA) e de instituições privadas. Membro do Grupo de Pesquisa em Ensino de Ciências da Natureza e Educação Matemática (GPECNEM). Desenvolve pesquisa em Ensino de Física com ênfase na Teoria da Aprendizagem Significativa. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6752-5661>. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

<sup>2</sup> Doutor e Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Ensino, Filosofia e História das Ciências (PPGEFHC/UFBA/UEFS), Licenciado

e Bacharel em Física pela Universidade Federal da Bahia (UFBA).

Professor de Física na Graduação e no Programa de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF/UNEB), Coordenador do NDE e Coordenador do Colegiado do Curso de Licenciatura em Matemática DCET II/UNEB. Líder do Grupo de Pesquisa em Ensino de Ciências da Natureza e Educação Matemática (GPECNEM/UNEB).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7465-2149>. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#).

<sup>3</sup> Doutor em Difusão do Conhecimento pela Universidade Federal da Bahia (UFBA), Mestre em Contabilidade pela Fundação Visconde de Cairu onde também se graduou em Ciências Contábeis. Professor titular da Universidade do Estado da Bahia (DCET II/UNEB), lecionando na graduação e pós-graduação. Professor e ex coordenador do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF/UNEB). Coordenador do Núcleo de Pesquisa e Extensão (NUPE/DCET II/UNEB). Professor e coordenador da linha 1 do mestrado em modelagem e simulação de biosistemas, ex coordenador da Agência de inovação da UNEB. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9703-835X>. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#).

<sup>4</sup> O sobrenome Becquerel está frequentemente presente na história da ciência. Alexandre Edmond Becquerel, citado neste texto não deve ser confundido com seu pai, Antoine César Becquerel, um dos fundadores da eletroquímica, tão pouco com seu filho, Antoine Henri Becquerel, ganhador do prêmio Nobel de Física em 1903, juntamente à Pierre Currie e Marie Curie.