

**ELABORAÇÃO DE UM MÉTODO LÚDICO PARA O ENSINO DE QUÍMICA: UM JOGO BASEADO EM CÉLULAS SOLARES SENSIBILIZADAS POR CORANTE**Letícia F. Magalhães<sup>a</sup>, Rafael B. Alves<sup>b</sup>, Letícia R. C. Cunha<sup>a</sup>, Leonardo A. Rocha<sup>b</sup> e Marco A. Schiavon<sup>a,\*</sup><sup>a</sup>Departamento de Ciências Naturais, Universidade Federal de São João del-Rei, 36301-160 São João del-Rei – MG, Brasil<sup>b</sup>Departamento de Ciências Naturais, Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG), 35501-170 Divinópolis – MG, Brasil

Recebido em 06/02/2023; aceito em 16/05/2023; publicado na web 07/07/2023

ELABORATION OF A PLAYFUL METHOD FOR CHEMISTRY TEACHING: A GAME BASED ON DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS. Considering the current environmental problems associated with the growing world demand for energy arising from development and population growth, the need to diversify energy matrices, such as the implementation of solar energy, is highlighted. Thus, it is important to discuss this topic in the school environment, because when they are introduced from childhood to high school, the probability of this orientation being effective is much greater. In this context, educational games have attracted attention as a teaching tool, combining a fun atmosphere with the improvement of learning. This work aimed the production and application of a game in board format representing a dye-sensitized solar cell (CSSC) as a didactic resource in approaching the content of energy conversion. The game allowed an easy visualization of how the energy conversion process is performed by a CSSC. It was presented during the scientific dissemination event “Café com Ciência”, promoted by the Federal University of São João del-Rei, with good results both in gameplay aspects and in helping to understand the theme. The feedback obtained indicates that the game can be a useful tool for students and educators, reaching all its didactic potential and facilitating learning in the face of complex concepts.

Keywords: solar cells; chemistry education; chemistry learning; interdisciplinarity; pedagogical game.

**INTRODUÇÃO**

O desenvolvimento da humanidade, assim como o crescimento populacional, sempre esteve associado à necessidade de diversificação nas matrizes energéticas, para atender as demandas mundiais.<sup>1</sup> Contudo, como indicado pelo IEA (*International Energy Agency*), em 2019, 86% dessa matriz energética ainda era proveniente de fontes não renováveis, como o petróleo, gás natural e carvão. Essa realidade associa-se a uma série de problemáticas ambientais, como o aquecimento global, alterações climáticas e a chuva ácida.<sup>2</sup> No Brasil, a maior fonte de abastecimento de energia elétrica são as hidrelétricas, responsáveis por cerca de 57% da energia na matriz energética brasileira em 2021.<sup>3</sup> Apesar de esta ser considerada renovável, ela apresenta muitos impasses em relação ao desflorestamento e a morte de espécies aquáticas, além do fato de possuir uma natureza de estocagem afetada por períodos de estiagem e seca.<sup>4</sup>

Em decorrência destes fatores, busca-se desenvolver tecnologias alternativas que envolvam diferentes formas de energia. Dentre estas, a energia solar tem atraído bastante atenção, visto que o sol fornece ao planeta Terra uma quantidade que é de aproximadamente 10<sup>4</sup> vezes o atual consumo diário de energia.<sup>5,6</sup> A ideia de utilizar desta fonte natural na transformação de energia elétrica não é recente, sendo um projeto que vêm se desenvolvendo desde 1839, quando Edmond Becquerel descobriu o efeito fotovoltaico.<sup>7</sup> A energia solar fotovoltaica representa somente 0,7% do mercado mundial de energia renovável, sendo 90% desses módulos solares baseados em silício mono e policristalino de alto custo, dificultando sua disseminação.<sup>8</sup> Além disso, a produção desses módulos tem sido restrita a alguns países, como a China, criando-se uma nova dependência energética.<sup>9-11</sup>

Esta divergência entre a dificuldade de disseminação e a necessidade de avanços na implementação e desenvolvimento energético requer maiores discussões a respeito desta matriz tanto em um contexto científico quanto social. Além disso, uma vez

que dispositivos conversores de energia se encontram difundidos no cotidiano da população, torna-se fundamental a incorporação de conceitos relacionados a estes dispositivos durante a formação acadêmica de estudantes em todos os níveis, podendo impulsionar estes alunos a se interessar por fontes energéticas renováveis, favorecendo o desenvolvimento de cidadãos mais conscientes e críticos da realidade.<sup>12</sup>

Nesse sentido, levando-se em conta a influência da educação, torna-se importante compreendermos o contexto educacional relacionado ao ensino de química.<sup>13</sup> Este, quase sempre, é visto pelos alunos como um conhecimento abstrato e de difícil compreensão. Associando este fato a falta de conexão com as questões cotidianas da sociedade,<sup>14,15</sup> têm-se como resultado a indiferença dos educandos frente ao conteúdo. Como abordado por Oliveira *et al.*, esta indiferença se intensifica ainda mais diante de um ensino tradicional, marcado por aulas monótonas e desestimulantes.<sup>16,17</sup> Assim, para reaver o interesse dos alunos pelas aulas de química é importante que o professor recorra a diversas metodologias que o auxiliem no processo de ensino. Dentre estas, a prática de atividades lúdicas tem ganhado espaço como um modelo de ensino mais dinâmico.<sup>18,19</sup>

Em vista disso, a aplicação de jogos educacionais torna-se relevante como um recurso didático, permitindo um ensino que agregue diversão e ao mesmo tempo motive e desafie os alunos na construção de seu próprio conhecimento, por meio da observação, criatividade e articulação com diferentes conhecimentos.<sup>20,21</sup> Como resultado, a prática com jogos acaba por desenvolver um senso de autonomia nos educandos, proporcionando por meio da análise de erros e acertos, uma maior fluidez na reflexão dos conceitos discutidos.<sup>21</sup> De acordo com Soares *et al.*, os professores têm demonstrado êxito na aplicação de jogos, não só no que diz respeito à aspectos conceituais, mas também no desenvolvimento da capacidade de raciocínio, tomada de decisões e pensamento crítico dos alunos.<sup>22</sup>

Considerando as discussões acima, o presente trabalho visou a produção e aplicação de um jogo em formato de tabuleiro fechado, inspirado no *Pinball*, estilo Arcade ou Fliperama, como recurso

\*e-mail: schiavon@ufsj.edu.br

didático na abordagem do conteúdo de células solares sensibilizadas por corante (CSSC), dentro da temática de conversão de energia e dispositivos fotovoltaicos, visando a construção de conhecimentos químicos no contexto interdisciplinar envolvendo um tema de interesse tecnológico atual.

### Dispositivos conversores de energia

Apesar de uma ascensão recente, a ideia de transformar energia solar em energia elétrica vem sendo desenvolvida há muitos anos, tendo início em 1839, quando Edmond Becquerel descobriu o efeito fotovoltaico.<sup>7</sup> Na literatura é possível encontrar registros da elaboração de uma célula solar a partir do efeito fotoelétrico, por Charles Fritts, em 1883, que atingiu uma eficiência de 1%.<sup>23</sup> Somente após quase um século de estudos, em 1954, foi demonstrado, por pesquisadores da *Bell Telephone Laboratories*, o processo prático de conversão de radiação solar em energia elétrica por meio da junção *p-n*, o que possibilitou um aumento da eficiência do processo para 6%.<sup>12,24</sup>

Desde então, estudos na área foram sendo desenvolvidos, aprimorando cada vez mais os dispositivos fotovoltaicos, os quais, atualmente, podem ser classificados em 3 tipos de células solares, a saber: primeira, segunda e terceira geração.<sup>25</sup> As chamadas “células solares de primeira geração” ainda representam a tecnologia dominante no mercado, e são baseadas na junção *p-n* e constituídas, principalmente, por silício cristalino dopado com boro e fósforo, cuja eficiência máxima em laboratório foi de 26,1%.<sup>5</sup> Já as células solares de segunda geração, consistindo de filmes finos, são comumente produzidas à base de silício amorfo, CIGS (seleneto de cobre, índio, gálio), CdTe (telureto de cádmio) ou CZTS (sulfeto de cobre, zinco, estanho), possuindo custo e rendimentos de conversão de energia inferiores às células solares de primeira geração.<sup>7</sup> Entretanto, essa menor eficiência, em torno de 11%, aliada ao uso de alguns materiais raros ou tóxicos, ainda não representa resultados satisfatórios para sua substituição das células de primeira geração.<sup>5</sup> Em vista de superar estas limitações, surgiram as células solares de terceira geração.<sup>26</sup>

A terceira geração de células solares compreendem aquelas potencialmente capazes de superar o limite termodinâmico de Shockley e Queisser, o qual corresponde, de acordo com cálculos teóricos, a uma eficiência máxima de 32,9% para uma célula *p-n* de junção única de silício.<sup>27</sup> Dentre essa geração, as células solares sensibilizadas por corante (CSSC), cujos princípios de funcionamento são baseados em processos eletroquímicos como a oxirredução, foram as primeiras a serem desenvolvidas e ganharam uma considerável atenção na literatura por ter dado origem a todas as células solares desta classe, também conhecida como células solares alternativas.<sup>8</sup>

### Células solares sensibilizada por corante (CSSC)

A primeira célula solar sensibilizada por corante, à base de TiO<sub>2</sub> nanocristalino, foi relatada em 1991, por Michel Grätzel, com eficiência máxima de 7,9%.<sup>28</sup> Desde então, os pesquisadores da EPFL vêm tentando torná-la comercialmente viável, por meio de tentativas de elevar a eficiência (atualmente em 13,09%),<sup>29</sup> bem como o tempo de vida destes dispositivos.<sup>5,12</sup> Um fato que viabiliza este tipo de célula frente as limitações apresentadas pelas outras gerações, é que neste caso, o emprego do corante como absorvedor de luz, bem como materiais mais acessíveis os quais reduzem o custo de produção, e por consistir de um sistema baseado em reações fotoeletroquímicas.

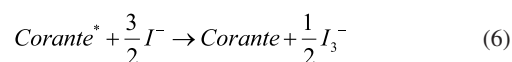
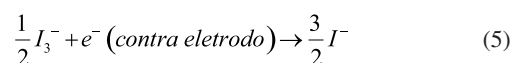
A CSSC é um dispositivo engenhoso e projetado minuciosamente, em que cada componente é parte essencial para o funcionamento harmonioso das reações envolvidas. Sua estrutura é composta, basicamente, por um fotoanodo, eletrólito líquido e contraeletrodo.

O fotoanodo funciona como o polo negativo no processo de geração da corrente elétrica, sendo constituído por um vidro recoberto por um óxido condutor transparente (TCO), (do inglês, *Transparent Conductive Oxide*) usualmente SnO<sub>2</sub> dopado com flúor ou índio (FTO ou ITO, respectivamente). Este é recoberto com uma camada do semiconductor nanoporoso, frequentemente TiO<sub>2</sub>, dopado com um corante sensibilizador. A utilização de semicondutores nanoporosos é importante para favorecer a adsorção do corante.<sup>30</sup>

O TiO<sub>2</sub> é uma substância não tóxica, transparente a luz visível e com energia de banda proibida de ~ 3,2 eV, necessitando de luz ultravioleta para gerar pares elétron-buraco. É justamente nessa etapa em que o corante atua simplificando o processo, uma vez que este absorve a radiação visível e possibilita a injeção de elétrons na banda de condução do semiconductor, resultando um aumento na fotocorrente gerada. Os buracos gerados no corante, rapidamente são preenchidos por elétrons do par redox do eletrólito.<sup>27,30</sup> Neste caso, o eletrólito age como um mediador de elétrons, servindo como um elo entre os eletrodos. Usualmente composto por um par redox, na maioria dos casos iodeto/triiodeto (I<sup>-</sup>/I<sub>3</sub><sup>-</sup>) em acetronitrila, o eletrólito regenera o corante oxidado quase instantaneamente por meio de uma reação de oxidação e, posteriormente, é reduzido ao receber o elétron do contraeletrodo.<sup>12,27</sup> Um eletrólito ideal deve apresentar reversibilidade, boa interação com as superfícies do óxido e do contraeletrodo, ser quimicamente estável e não ocasionar dissolução significativa dos demais componentes, principalmente do corante.<sup>31</sup>

O contraeletrodo das CSSC possui um eletrodo positivo constituído por uma camada de TCO sobre um vidro, acrescido de uma camada de um catalisador, geralmente platina ou grafite. A função desse catalisador é favorecer a reação de oxirredução, diminuindo a resistência no transporte de elétrons do TCO para o eletrólito. Ou seja, para as CSSC, o catalisador adequado deve favorecer a dissociação do iodo metálico (I<sub>2</sub>) em átomos de iodo e iodeto durante a adsorção.<sup>5</sup>

O funcionamento destas células, esquematizado pela Figura 1, inicia-se com a incidência de radiação, proveniente do sol. Assim, os elétrons do corante sensibilizador absorvem fótons de energia provenientes desta radiação (1), levando-os ao estado excitado (2), sendo promovidos para a banda de condução (BC) do semiconductor (3). Como resultado dessa injeção direta de elétrons na BC do semiconductor, ocorre a formação de buracos no corante. Em sequência, transferem-se os elétrons para o TCO, gerando corrente elétrica ao transpassar os elétrons para o contraeletrodo, por meio de um circuito externo (4). Imediatamente os elétrons são direcionados do contraeletrodo para o eletrólito (5) provocando uma reação de oxirredução, regenerando o corante (6), fechando o ciclo da célula.<sup>5,12</sup> As reações que se sucedem em cada etapa estão descritas abaixo:<sup>32</sup>



Para a escolha do corante sensibilizador é importante levar em conta alguns fatores, como: a presença de grupos de ancoragem (-COOH, -H<sub>2</sub>PO<sub>3</sub>, -SO<sub>3</sub>H, etc.) que os permitam se ligar na superfície das nanopartículas do semiconductor; orbital LUMO (*lowest unoccupied molecular orbital*) maior que o limite da banda de condução dos semicondutores, para que ocorra transferência

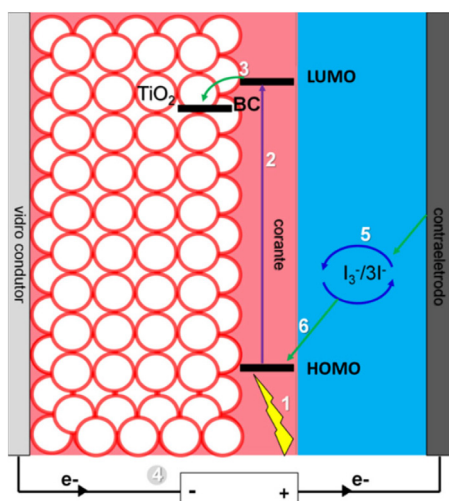


Figura 1. Representação esquemática da estrutura e funcionamento da CSSC

de energia e potencial de oxirredução do corante maior que o do eletrólito.<sup>12,27</sup> Além disso, os corantes ideais devem ser fotoestáveis, apresentarem estabilidade térmica e possuir um espectro de absorção que cubra uma parte significativa da região visível do espectro eletromagnético, para melhor aproveitamento da energia solar.<sup>27,32</sup>

### Trabalhos desenvolvidos na área

A criação de programas educativos acerca das energias renováveis tem sido difundida desde a crise do petróleo em 1970, objetivando conscientizar os estudantes em relação as questões ambientais e econômicas, além de incentivar o desenvolvimento de fontes renováveis.<sup>33</sup> Vários autores da área da educação destacam a importância da inserção dos estudantes no cenário da problemática energética. Quando as temáticas ambientais são introduzidas desde a infância à educação média, a probabilidade dessa orientação ser efetiva é muito maior, pois tais conceitos são internalizados como um estilo de vida.<sup>34</sup>

Aginaldo *et al.* experimentaram uma proposta para o ensino de física baseada na produção e caracterização de uma célula solar de Grätzel. O corante natural e o material utilizado foram de baixo custo, uma vez que o intuito da prática foi didático. Foi possível introduzir os mecanismos físicos envolvidos, como o ciclo do elétron, processos regenerativos, injeção de elétrons, geração de fotocorrente, entre outros. Os autores consideram essa experimentação como motivadora.<sup>30</sup>

Segundo Sonai *et al.*,<sup>8</sup> a temática das energias renováveis, com foco na energia solar, é importante principalmente levando-se em conta a crise energética nacional e mundial. Abordar as CSSC com os estudantes possibilita a eles reconectarem-se ao conteúdo e materiais já estudados, explorando diversos conceitos como ligações químicas, reações de oxirredução, processos de absorção de luz e transferência de elétrons, propriedades dos semicondutores, entre outros. Pensando nisso, Nogueira *et al.* também executaram uma aula prática, com duração de 8 h, realizando a montagem de células solares sensibilizadas por vários tipos corantes naturais extraídos durante a aula. Os estudantes analisaram todo o funcionamento e montagem, calcularam as eficiências e traçaram as curvas de corrente vs. potencial. Para os autores, esse experimento se sobressai devido seu caráter interdisciplinar, abordando, especialmente, os conteúdos de química inorgânica e físico-química.<sup>8</sup>

Mayrinck *et al.*<sup>12</sup> relataram uma experimentação didática envolvendo o estudo e preparação das CSSC, atingindo bons resultados na aprendizagem com estudantes de diversos cursos de graduação. O objetivo do trabalho foi avaliar o potencial didático

da proposta, por meio da aplicação de questionários anteriores e posteriores a minicurso de preparação de CSSC. Foram utilizados materiais alternativos adaptados, considerando o baixo custo e a disponibilidade. Os autores ressaltam o caráter interdisciplinar do tema e a viabilidade da sua execução fora do laboratório. Inicialmente, a maioria dos estudantes declarava ter conhecimento ruim ou regular relacionado à energia solar. Ao final do minicurso, esse resultado passou para bom e muito bom. Os autores consideram a prática como ideal para aplicação em cursos de graduação.<sup>12</sup>

Já Chien<sup>35</sup> e Csernovszky<sup>36</sup> trouxeram propostas didáticas experimentais para o ensino de química e física a partir da construção de CSSC funcionais utilizando métodos e materiais alternativos. Chien *et al.* trabalhou com o desenvolvimento de CSSC com estudantes do Ensino Médio, em que um dos principais destaques dessa produção foi a selagem alternativa com ferro elétrico de passar roupas, que ao final se mostraram operantes ao acionar pequenos ventiladores de plástico em mais de 80% das reproduções executadas pelos estudantes.<sup>35</sup> A proposta de Csernovszky *et al.* focou-se, principalmente, em explorar o conteúdo de física acerca das CSSC, argumentando que o mecanismo relativamente simples destas células pode facilitar a compreensão de reações mais complexas, como a fotossíntese, ao utilizar de um efeito comparativo. Csernovszky *et al.* ainda abordaram diversos outros conteúdos físicos disponíveis nessa prática como estudos do fenômeno de absorção e avaliação da potência máxima dos dispositivos.<sup>31</sup>

Christ *et al.*<sup>37</sup> desenvolveram uma metodologia simples para a montagem de células solares sensibilizadas por corantes naturais extraídos da beterraba, repolho roxo e urucum. Para isso, propuseram a utilização de materiais de baixo custo na fabricação dos dispositivos, como o eletrodo, retirado de uma calculadora, e a fonte de  $\text{TiO}_2$  sendo um corretivo líquido à base de água. Os autores aplicaram o experimento com alunos do primeiro semestre do curso Técnico em Química do Instituto Federal do Rio Grande do Sul. A célula solar montada conseguiu converter luz solar em corrente elétrica, demonstrando a capacidade do experimento para introduzir o conceito de CSSC utilizando materiais do cotidiano.<sup>37</sup>

A área da química, assim como a ciência da natureza no geral, ainda carece de disseminação de métodos de ensino que estimulem a participação e o aprendizado dos alunos em temas interdisciplinares de contexto tecnológico. O uso de estratégias alternativas, como os jogos didáticos, pode contribuir positivamente para alcançar objetivos relacionados ao desenvolvimento de habilidades cognitivas e sociais, afinidade com a ciência e representa principalmente um fator motivador.<sup>38</sup>

## PARTE EXPERIMENTAL

Baseando-se nos fundamentos teóricos sobre células solares sensibilizadas por corantes discutidos anteriormente, elaborou-se um jogo pedagógico, que considera o nível de interação 3 entre jogo e jogador,<sup>19</sup> na forma de um tabuleiro fechado e inclinado, inspirado no modelo de jogo Arcade *Pinball*.

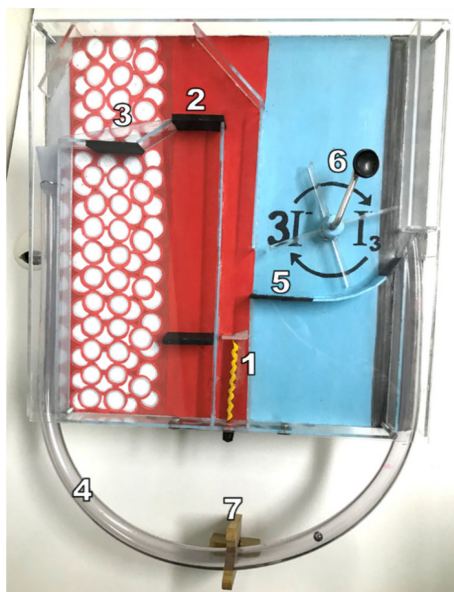
### Materiais utilizados

Madeira tipo MDF, placas de acrílico transparente, mangueira de borracha transparente, parafusos, esfera metálica de 1 cm diâmetro, tinta, elástico, imã de neodímio e manivela.

### Construção do tabuleiro

Para a montagem do tabuleiro utilizou-se de uma placa quadrada de madeira, a qual foi pintada de forma a representar as partes

constituintes de uma célula solar sensibilizada por corante, selada em todas as demais extremidades com pedaços de acrílico. Na Figura 2 é possível a visualização dos componentes desse jogo. Construiu-se um “gatilho” (1) por meio de um cilindro fino de madeira com uma plataforma de acrílico em seu topo, por onde a esfera metálica inicia sua trajetória. O impulso deste gatilho se deu por meio de um elástico externo. Para representação dos níveis de energia do corante e do semiconductor de  $\text{TiO}_2$ , foram utilizadas de barras de madeira preta (2), colando-se estas ao lado esquerdo do tabuleiro. A este lado também foi colado pedaços de acrílico (3) para contribuir/direcionar a trajetória que deve ser realizada pela esfera. Para ligar as duas extremidades do tabuleiro, por onde a esfera metálica foi mantida em ciclo, utilizou-se de uma mangueira de borracha transparente, para melhor visualização do movimento da esfera metálica, que representa o caminho percorrido pelo elétron (4). Ao lado direito do tabuleiro foi construído uma rampa de madeira (5) e inseriu-se uma manivela que rotaciona pás de acrílico (6), responsáveis por direcionar a esfera, a qual deve retornar ao ponto de partida, sendo esta etapa representada pelo papel do eletrólito na regeneração do corante. Para manter esse tabuleiro inclinado e a mangueira em uma altura adequada, para minimizar o atrito e a esfera conseguir fechar o caminho, foi construído um suporte de madeira (7). Como a força aplicada para impulsão da esfera depende do usuário, dispôs-se de um ímã de neodímio com movimento livre para auxiliar o percurso da esfera, quando necessário.



**Figura 2.** Imagem da vista superior do tabuleiro elaborado, indicando seus principais componentes de acordo com a descrição no texto

### Utilização do tabuleiro do jogo

Com o intuito de investigar qualitativamente o potencial do jogo desenvolvido, foi realizada uma demonstração informal para estudantes de graduação do curso de licenciatura em química da UEMG. Além disso, este foi apresentado na forma de uma oficina durante a segunda edição de um evento de divulgação científica, chamado “Café com Ciência”, promovido pela Universidade Federal de São João del-Rei, no dia 01 de outubro de 2022 na praça de um centro comercial da cidade. A montagem da oficina constituiu-se do jogo sobre uma mesa, bem como de um painel contendo informações e comparativo entre uma CSSC e uma célula comercial de silício (apresentado no Material Suplementar). Durante o evento, que teve duração de uma tarde, após a apresentação da dinâmica do jogo e dos

conceitos envolvendo CSSC e energias renováveis propostos, foram observadas as formas de interação das pessoas com o jogo, assim como o entendimento delas a respeito de células solares, após esta interação. Visando uma análise mensurável de alcance dos objetivos foi solicitado aos visitantes da oficina, o preenchimento de um questionário rápido contendo cinco questões fechadas, com respostas em escala de 0 a 10, e uma questão de resposta aberta, na qual era requerido comentários ou sugestões para o melhor funcionamento do jogo (apresentado no Material Suplementar).

### RESULTADOS

O protótipo desenvolvido pode ser classificado como um jogo pedagógico, o qual é criado exclusivamente para auxiliar na aprendizagem de alguma temática curricular. Conforme Cleophas, Cavalcanti e Soares,<sup>39</sup> o jogo pedagógico é um jogo inédito que objetiva desenvolver habilidades cognitivas sobre temas específicos, podendo ser explicado para ensinar o conceito sem a necessidade de o professor ter discutido a temática previamente.<sup>22,39</sup> Além disso, considera-se, para o protótipo desenvolvido, o nível de interação 3 entre jogo e jogador, uma vez que a construção do modelo é baseada em modelos teóricos vigentes, como forma de manipulação palpável do conhecimento teórico.<sup>19</sup>

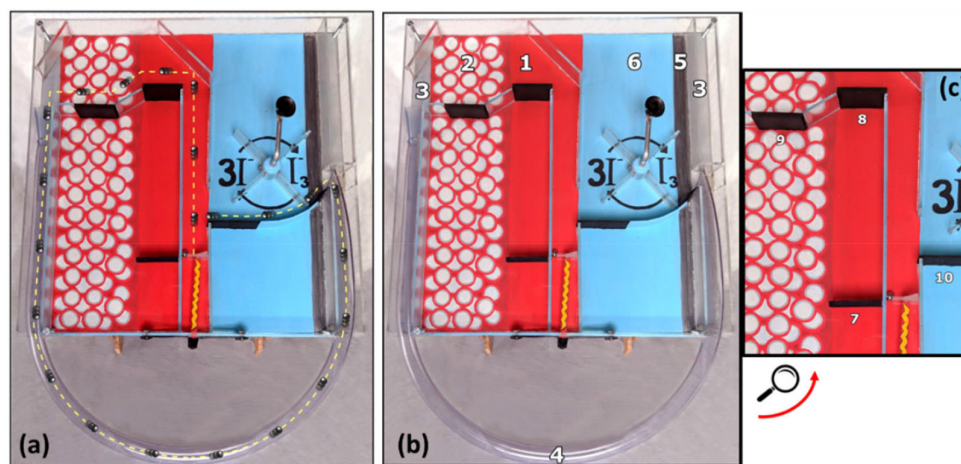
Considerando a elaboração do jogo na forma de um tabuleiro que implica em todas as etapas envolvidas no mecanismo de funcionamento de uma CSSC, a própria construção do jogo pode ser usada no processo de aprendizagem de um sistema de interesse tecnológico de importância na atualidade. A escolha dos materiais, esquemas envolvidos, dimensões do jogo, podem auxiliar o processo de entendimento da CSSC, e, portanto, ser uma contribuição ao ensino interdisciplinar, uma vez que envolve além dos conceitos das CSSCs também noções de dimensões, proporções, além do desenvolvimento de habilidades de trabalhos manuais.

Na representação lúdica da CSSC preparada neste trabalho e apresentada na Figura 3, foi elaborado um gatilho na cor amarela ao centro do tabuleiro responsável por simular a excitação do corante, situado como a faixa na cor vermelho (1), como apresenta a Figura 3b. Ou seja, ele representa o componente que irá fornecer energia ao corante, como, por exemplo, a radiação solar, para que o elétron seja promovido ao estado excitado. As nanopartículas do semiconductor,  $\text{TiO}_2$ , foram ilustradas como esferas brancas (2), as quais se encontram envoltas pelo corante, caracterizando o processo de sensibilização do  $\text{TiO}_2$ . As faixas cinzas (3) nas extremidades do tabuleiro equivalem aos óxidos condutores transparentes (TCO), interligados por uma mangueira (4) que configura o circuito externo. A fina camada de coloração preta metalizada (5) representa o catalisador do contraeletrodo, enquanto o fundo azul (6) caracteriza o eletrólito. Nesta faixa foi instalado roleta à manivela simbolizando a reação de oxirredução do iodo ( $3\text{I}^-/\text{I}_3^-$ ) para a regeneração do corante. O tabuleiro é selado por um acrílico que retrata o revestimento de vidro.

Os níveis de energia são retratados pelas barras de madeira preta, como indicadas pela ampliação na Figura 3c. Nela, os níveis 7 e 8 correspondem, respectivamente, aos orbitais HOMO (*highest occupied molecular orbital* – orbital molecular ocupado de maior energia) e LUMO (*lowest unoccupied molecular orbital* – orbital molecular não ocupado de menor energia) do corante, respectivamente, enquanto o 9 equivale a banda de condução (BC) do semiconductor ( $\text{TiO}_2$ ). Já o nível 10 simboliza o potencial de oxirredução do eletrólito. A diferença energética entre esses níveis de energia garante a espontaneidade na transferência de elétron, assim como o caráter cíclico de funcionamento de uma CSSC.

A trajetória do elétron (representado pela esfera metálica) ao longo do processo de conversão de energia em uma CSSC pode ser





**Figura 3.** Imagens do tabuleiro da CSSC: (a) projeção da trajetória cíclica do elétron; (b) representação dos componentes representativos conceituais e (c) ampliação destacando os níveis energéticos

visualizada pela linha pontilhada na Figura 3a. O circuito se inicia pela excitação eletrônica do corante, representada pela projeção do elétron por meio do gatilho. Devido à baixa diferença entre o estado excitado do corante e a BC do  $TiO_2$ , a esfera de metal é direcionada para o semiconductor e, subsequentemente, percorre o circuito externo até o contraeletrodo. Ao adentrar no eletrólito, o elétron integra-se ao íon  $I_3^-$  que reduz a  $3I^-$ , o qual se oxida novamente para regenerar o corante. Espera-se que esta trajetória ocorra de forma direta, para melhor representar uma célula real, no entanto, caso a execução seja falha, o que depende da força com a qual o usuário puxa e solta o gatilho, o ciclo pode ser completado manualmente, com um ímã de neodímio para guiar a esfera metálica pelo circuito externo até a entrada pelo lado oposto, para atingir a região azul. Apesar de parecer uma limitação do jogo, esta etapa está relacionada com a força inicial do usuário no momento do lance da esfera metálica.

O tabuleiro desenvolvido possibilita a visualização de como ocorre o processo de conversão de energia realizado por uma célula solar sensibilizada por corante, etapa por etapa. A dinamicidade física do jogo facilita o entendimento do funcionamento teórico desse tipo de célula solar, pois a observação do percurso do elétron torna claro esse fenômeno. Assim, nota-se a viabilidade da aplicação deste jogo como uma metodologia de ensino, sendo o maior diferencial didático deste, pautado na contextualização e ludicidade, aliadas a inclusão de tecnologias emergentes que permitem discussões interdisciplinares.

Trazendo para um contexto de Ensino Médio, a implementação desse jogo permite abordar variados tópicos da química, num contexto interdisciplinar, sobretudo envolvendo conceitos de eletroquímica, com ênfase em reações de oxirredução, fluxo de elétrons, propriedades dos materiais, conversão de energia, bem como questões ambientais relacionadas. O Quadro 1 apresenta um resumo com possibilidades dos contextos em que a aplicação do jogo, juntamente a temática, podem ser inseridos. A partir de uma análise da Base Nacional Curricular Comum (2017), encontra-se na área de “Ciências da Natureza e suas Tecnologias” alguns pontos que podem englobar o ensino acerca das CSSC, destacando-se as competências específicas 1 (habilidades EM13CNT101, EM13CNT102 e EM13CNT106) e 3 (habilidade EM13CNT309).<sup>40</sup> Já para discentes de nível superior, além da própria temática de conversão de energia, o jogo pode ser aproveitado para a abordagem das propriedades elétricas dos materiais, como características de semicondutores, processo de condução eletrônica em sólidos e medidas eletroquímicas, além de posicionamento de bandas de energia e orbitais moleculares, quando corantes são usados.

Para avaliar a potencialidade do jogo, foi realizado inicialmente uma demonstração informal para estudantes de graduação do curso de licenciatura em química da UEMG. Observou-se, num primeiro contato, um estranhamento por parte dos discentes devido à ausência de familiaridade com o tema, o qual foi facilmente sanada a partir de uma explicação simplificada ministrada durante a demonstração. Assim, após estabelecida a ambientação dos estudantes diante da temática da CSSC, a interação com o jogo passou a fluir com maior espontaneidade. Ao final, os graduandos se mostraram visivelmente interessados acerca do potencial didático oferecido pelo material.

Além desta exibição, o jogo também foi apresentado no evento de divulgação científica “Café com Ciência”, promovido, em sua segunda edição, pela Universidade Federal de São João del-Rei, o qual visa divulgar para a comunidade, com uma linguagem acessível de divulgação científica, os trabalhos de pesquisa que são realizados na universidade. Para isso, além do jogo, foi desenvolvido um painel, contendo um esquema de uma célula de silício, encontrada atualmente nos painéis fotovoltaicos comerciais, como forma de explicar comparativamente o processo de conversão e redistribuição de energia e um esquema do próprio jogo, indicando os processos presentes nas CSSC, Figura 1S. Inicialmente, nas visitas à oficina de modo contínuo, o público foi questionado a respeito de seus conhecimentos prévios sobre energia solar e placas fotovoltaicas, como forma de adentrá-los ao conteúdo, deixando-os livre para exporem seus entendimentos. Em seguida, foi explanado a eles sobre a temática, apontando a importância de difundir o conhecimento sobre células fotovoltaicas em função da necessidade de mudanças nas matrizes energéticas frente aos problemas ambientais enfrentados na atualidade. Como as células solares de silício de primeira geração são as mais difundidas atualmente, por serem comerciais, estas foram inicialmente apresentadas, pois a probabilidade de algum conhecimento sobre essas é maior. Após essa introdução ao tema, houve um direcionamento para as CSSC. Neste momento o jogo ganha destaque, auxiliando nas explicações de como ocorre o processo de conversão de energia dentro dessas células, ou seja, evidenciando que se trata de um dispositivo de conversão de energia e que envolvem diversos conhecimentos químicos, majoritariamente representado pela trajetória realizada pelo elétron (parte central de movimento do jogo).

Analisando o andamento da dinâmica, foi perceptível que os participantes gostaram da atividade, sendo estimulados pelo jogo, pelo acompanhamento da esfera metálica que representa o elétron, e, assim, compreendendo um pouco mais a respeito do tema. Para realizar uma avaliação de forma mais concreta, após a aplicação do jogo, foi pedido a todos os visitantes um *feedback* e possíveis

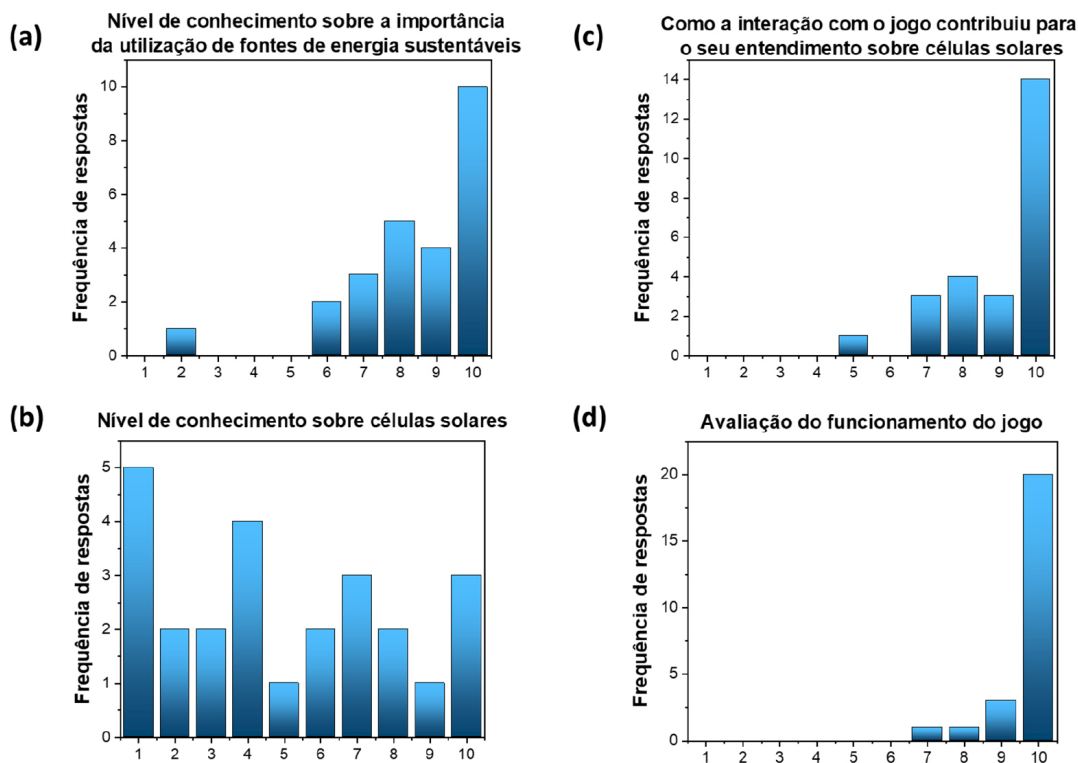
**Quadro 1.** Resumo dos contextos em que se pode explorar a temática de células solares sensibilizadas por corante, auxiliado pelo jogo pedagógico

| Nível           | Disciplina         | Componente curricular            | Tópicos  |
|-----------------|--------------------|----------------------------------|--|
| 1º EM*          | Física             | Conversão de energia             | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Identificar formas de energia</li> <li>- Transformação de energia solar em energia elétrica</li> <li>- Conversão térmica</li> <li>- Transformações de energia elétrica em energias aplicáveis no cotidiano</li> </ul>                           |
| 2º EM           | Química            | Oxirredução                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Identificar a variação de NOX em reações de oxirredução</li> <li>- Conceituar oxidante, redutor, agente oxidante e agente redutor</li> <li>- Relacionar o funcionamento do eletrólito de uma célula solar com reações de oxirredução</li> </ul> |
| 3º EM           | Química            | Química ambiental                | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Recursos energéticos</li> <li>- Impactos ambientais</li> <li>- Energia fotovoltaica</li> <li>- Busca pela solução de problemas ambientais</li> <li>- Recursos alternativos para hidroelétricas e termoeletricas</li> </ul>                      |
| 3º EM           | Física             | Propriedades elétricas           | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Corrente elétrica</li> <li>- Intensidade de corrente</li> <li>- Fluxo de elétrons</li> <li>- Circuito elétrico</li> <li>- Efeito fotovoltaico</li> </ul>  |
| Ensino Superior | Química Inorgânica | Estrutura eletrônica dos sólidos | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Semicondutor</li> <li>- <i>Bandgap</i></li> <li>- Bandas de energia</li> <li>- Orbitais moleculares</li> </ul>  |
|                 | Físico-Química     | Eletroquímica/Electroanalítica   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Potenciais redox</li> <li>- Eletrodos</li> <li>- Transferência de elétrons</li> <li>- Medidas eletroquímicas</li> </ul>   |

\*EM: Ensino Médio.

sugestões, para uma melhor potencialidade da atividade, por meio de um formulário rápido a ser respondido de forma espontânea e anônima. As respostas obtidas foram agrupadas e estão representadas pelos gráficos de barras apresentados na Figura 4.

O questionário foi composto por 5 questões objetivas, a serem respondidas por meio de uma escala gradativa de 0 a 10. As perguntas foram: 1- Qual era o seu nível de conhecimento sobre células solares?; 2- O quanto você considera que a interação com o jogo contribuiu



**Figura 4.** Gráficos de barras referente as respostas do questionário sobre o (a) nível de conhecimento sobre a importância da utilização de fontes de energia sustentáveis, (b) nível de conhecimento sobre células solares, (c) como a interação com o jogo contribuiu para o entendimento sobre células solares e (d) avaliação do funcionamento do jogo

para o seu entendimento sobre células solares?; 3- De modo geral, como você avalia a aplicação deste jogo em escolas para auxílio na compreensão sobre células solares?; 4- O quanto você sabia sobre a importância da utilização de fontes de energia sustentáveis?; 5- Avalie o funcionamento do jogo. Além destas, adicionou-se uma questão de resposta aberta ao final, na qual era solicitado ao público que registrasse comentários ou sugestões para o melhor funcionamento do jogo. Esta pergunta foi elaborada como: 6- Registre aqui comentários ou sugestões para o melhor funcionamento do jogo e da oficina. Em relação a esta última pergunta, não obtivemos respostas com textos, mas palavras isoladas ou respostas em branco, o que atribuímos à dinâmica da oficina que aconteceu numa praça.

Do público presente, constituído por pessoas de todas as faixas etárias, desde crianças em idade pré-escolar, adolescentes, jovens universitários e pessoas de mais idade, 25 responderam ao questionário. Pela análise das respostas, foi possível verificar que apesar de grande parte ter o entendimento a respeito da importância de se utilizar fontes renováveis de energia, poucos apresentavam o conhecimento sobre o meio de conversão destas, como as células solares. Estes dados, evidenciados na Figura 4a e b, demonstram a necessidade de se discutir mais o tema, de forma a torná-lo mais acessível e difundido na sociedade, possibilitando um crescimento da utilização e desenvolvimento destes dispositivos. Assim, torna-se interessante incluir esta temática na formação dos estudantes, sendo a aplicação do método lúdico proposto neste artigo, uma excelente forma de se abordar o conteúdo. A dispersão das respostas apresentadas no gráfico da Figura 4b pode ser atribuída à heterogeneidade de faixa etária e nível de escolaridade dos visitantes.

Por meio da interação do público com o jogo, foi possível validá-lo, como um instrumento lúdico de ensino de um tema atual e relevante, visto que por meio deste contato, como enfatiza os dados dispostos na Figura 4c, a dinâmica foi eficaz na contribuição do entendimento sobre as células solares e seu funcionamento, sendo perceptível ao final da apresentação uma maior discussão, questionamentos e domínio de termos relacionados ao tema, mesmo considerando as características de alta dispersão de faixa etária e nível de escolaridade dos visitantes.

Além de cumprir o objetivo, a funcionalidade do jogo foi muito bem avaliada, como pode ser observado no gráfico da Figura 4d, não apresentando problemas ao longo do evento, com a trajetória da esfera metálica ocorrendo de forma direta, sem que a execução fosse falha ou que fosse utilizado o ímã de neodímio para completar o percurso da esfera. Um dos comentários registrados no questionário que corroborou com o intuito proposto pelo trabalho, oferecendo um bom retorno quanto ao potencial didático da atividade lúdica, afirmou:

“O jogo representa com bastante precisão os processos que ocorrem em uma célula solar sensibilizada por corante, ajudando no entendimento de forma lúdica e clara.”

É importante destacar aqui que com a heterogeneidade do público visitante em relação à idade e a escolaridade, houve a necessidade de adaptação na forma de conduzir a apresentação, principalmente nos casos mais extremos das dispersões. Nestes casos, foi dado maior ênfase a questões ambientais que ao funcionamento do jogo, que passou a ter um papel secundário. Esse fato corrobora com a proposta da aplicação do jogo destinada a estudantes do Ensino Médio e ao Ensino Superior, em que os discentes apresentam um conhecimento prévio que permite um melhor desenvolvimento da temática, com o jogo cumprindo sua função de facilitar na aprendizagem por meio da ludicidade e como forma de facilitar o campo do conhecimento abstrato, tornando-o mais concreto.

Para aplicação do jogo durante uma dinâmica em sala de aula, torna-se importante que o professor saiba as vantagens e as desvantagens ao propor a utilização de um jogo no trabalho pedagógico. Kishimoto<sup>41,42</sup> aponta que se torna vantajoso a aplicação de jogos no ambiente escolar quando para facilitar a aprendizagem de conceitos previamente apreendidos; como meio de introduzir e desenvolver conceitos de difícil compreensão, principalmente para elucidar conceitos abstratos muito presentes nos conteúdos de química; possibilitar a correlação entre diferentes disciplinas; como meio de desenvolver estratégias de resolução de problemas, favorecer tomada de decisões e saber avaliá-las. Além disso, esta abordagem requer uma participação ativa do aluno, o que favorece a ele, a construção do seu próprio conhecimento, com desenvolvimento de senso crítico e da criatividade, como também favorece a socialização entre os alunos.

Contudo, deve-se ficar atento para que os jogos não sejam mal utilizados, adquirindo um caráter puramente recreativo, e, para evitar isso, este deve estar relacionado ao conteúdo que está sendo trabalhado, ou seja, deve ser aplicado como forma de complementar ou introduzir conteúdos trabalhados. Outra desvantagem relaciona-se com o tempo utilizado para a dinâmica, o qual pode prejudicar o planejamento dos planos de aula. Por fim, é imprescindível que o professor não se isole do processo durante a aplicação do jogo, sendo fundamental sua atuação como um integrante, atuando como mediador, observador ou organizador, mas de forma a estar presente para gerar e responder a questionamentos.

Portanto, com o entendimento de todos estes fatores, destaca-se a importância da atuação e preparo do docente para com a aplicação do jogo baseado na CSSC, estando atento aos objetivos da utilização deste em sala de aula, planejando como dar encaminhamento ao trabalho após o seu uso, para que o jogo não ganhe um caráter puramente dispersivo. É interessante que o educador atue como mediador durante a dinâmica, trazendo os principais conceitos por trás do lúdico, de forma a conduzir a turma e ambientá-la a temática. Por fim, ressalta-se que os jogos didáticos não são substitutos de outros métodos de ensino, mas atuam tanto como apoio para o educador, quanto como ferramenta no processo de aprendizagem dos alunos. Com isso, acredita-se que o jogo possa cumprir e atingir todo o seu potencial didático e facilitar o aprendizado dos alunos frente a conceitos complexos.

## CONCLUSÕES

Diante da problemática energética e ambiental documentada, é imprescindível a abordagem desse conteúdo para futuras gerações de estudantes. Mais que apenas constatar as adversidades, é importante proporcionar uma visão tecnológica futurista para instigar a participação ativa dos estudantes, sem desanexar-se do ensino da ciência básica.

Foi desenvolvido um jogo para o ensino de química, usando a temática de conversão de energia solar, por meio da preparação de um tabuleiro-jogo envolvendo uma célula solar sensibilizada por corante. Tanto a preparação do tabuleiro, quanto a sua utilização na forma de jogo pedagógico podem ser trabalhadas em escolas envolvendo professores de diferentes áreas.

A contextualização e problematização do ensino são amplamente difundidas nos currículos oficiais e recomendadas pelos estudiosos da educação. Essa metodologia aproxima os estudantes da ciência prática e dá sentido à disciplina, despertando maior interesse dos discentes. Nesse sentido, a introdução das CSSC no Ensino Médio qualifica-se como uma estratégia didática de grande potencial teórico e interdisciplinar, atendendo aos requisitos energéticos, ambientais, tecnológicos, contextualizadores do conhecimento básico.

De modo geral, esse trabalho atingiu os objetivos almejados satisfatoriamente, obtendo a aprovação pessoal de estudantes, professores de diferentes níveis acadêmicos e demais públicos apresentados ao jogo. A função educativa deste foi facilmente observada durante sua aplicação, sendo possível verificar um favorecimento na construção do conhecimento por meio de métodos mais descontraídos, tornando a aprendizagem mais leve.

## MATERIAL SUPLEMENTAR

O questionário utilizado após a execução do experimento e o painel desenvolvidos para compor a oficina apresentada no evento “Café com Ciência”, promovido pela Universidade Federal de São João del-Rei, estão disponíveis em <http://quimicanova.sbq.org.br>, na forma de arquivo PDF, com acesso livre.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, ao CNPq, à FINEP e à FAPEMIG pelo apoio recebido.

## REFERÊNCIAS

- Lee, J.; Yang, J. S.; *Renewable Sustainable Energy Rev.* **2019**, *115*, 109370. [Crossref]
- International Energy Agency; *Key World Energy Statistics*, 2021. [Link] acessado em junho 2023
- <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>, acessada em junho 2023.
- Gioda, A.; *Quím. Nova* **2018**, *41*, 839. [Crossref]
- Machado, C. T.; Miranda, F. S.; *Rev. Virtual Quím.* **2015**, *7*, 126. [Crossref]
- Zerrahn, A.; Schill, W. P.; Kempfert, C.; *European Economic Review* **2018**, *108*, 259. [Crossref]
- Raphael, E.; Silva, M. N.; Szostak, R.; Schiavon, M. A.; Nogueira, A. F.; *Quím. Nova* **2018**, *41*, 61. [Crossref]
- Sonai, G. G.; Melo Júnior, M. A.; Nunes, J. H. B.; Megiatto Júnior, J. D.; Nogueira, A. F.; *Quím. Nova* **2015**, *38*, 1357. [Crossref]
- <https://www.portalsolar.com.br/energia-solar-fotovoltaica-na-china>, acessada em junho 2023.
- <https://www.portalsolar.com.br/os-10-maiores-fabricantes-de-celulas-fotovoltaicas-no-mundo-2018>, acessada em junho 2023.
- <https://diarionordeste.verdesmares.com.br/opiniao/colunistas/egidio-serpa/china-concentra-producao-de-painel-fotovoltaico-e-ruim-para-o-mundo-1.3253843>, acessada em junho 2023.
- de Mayrinck, C.; Rocha, L. A.; Vitoreti, A. B. F.; Vaz, R.; Tartuci, L. G.; Ferrari, J. L.; Schiavon, M. A.; *Rev. Virtual Quím.* **2017**, *9*, 717. [Crossref]
- Brydges, S.; Dembinski, H. E.; *J. Chem. Educ.* **2019**, *96*, 511. [Crossref]
- Easa, E.; Blonder, R.; *Chemistry Teacher International* **2022**, *4*, 71. [Crossref]
- Rezende, F. A. M.; Soares, M. H. F. B.; *Investigações em Ensino de Ciências* **2019**, *24*, 103. [Crossref]
- Oliveira, L. M. S.; Silva, O. G.; Ferreira, U. V. S.; *Holos* **2010**, *5*, 166. [Crossref]
- Lhardy, C.; García-Ortega, H.; Gracia-Mora, J.; Marín-Becerra, A.; Reina, A.; Reina, M.; *J. Chem. Educ.* **2022**, *9*, 3170. [Crossref]
- de Oliveira, F. C.; Milani Júnior, J.; Carvalho, J. W. P.; *Revista Educação e Cultura Contemporânea* **2020**, *17*, 86. [Crossref]
- Soares, M. H. F. B.; *Redequim* **2016**, *2*, 5. [Link] acessado em junho 2023
- Silva, I. K. O.; Moraes, M. J. O.; *Holos* **2011**, *5*, 153. [Crossref]
- da Apresentação, K. R. S.; Teixeira, R. R. P.; *Revista Linhas* **2015**, *15*, 302. [Crossref]
- da Silva, C. S.; Soares, M. H. F. B.; *Ciência & Educação (Bauru)* **2023**, *29*, 1. [Crossref]
- Fritts, C. E.; *J. Franklin Inst.* **1885**, *119*, 221. [Crossref]
- Chapin, D. M.; Fuller, C. S.; Pearson, G. L.; *J. Appl. Phys.* **1954**, *25*, 676. [Crossref]
- Bagher, A. M.; Vahid, M. M. A.; Mohsen, M.; *American Journal of Optics and Photonics* **2015**, *3*, 94. [Crossref]
- Polman, A.; Knight, M.; Garnett, E. C.; Ehrler, B.; Sinke, W. C.; *Science* **2016**, *352*, 1. [Crossref]
- Vitoreti, A. B. F.; Corrêa, L. B.; Raphael, E.; Patrocínio, A. O. T.; Nogueira, A. F.; Schiavon, M. A.; *Quím. Nova* **2017**, *40*, 436. [Crossref]
- O'Regan, B.; Grätzel, M.; *Nature* **1991**, *353*, 737. [Crossref]
- <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>, acessada em junho 2023.
- Agnaldo, J. S.; Bastos, J. B.; Cressoni, J. C.; Viswanathan, G. M.; *Rev. Bras. Ensino Fis.* **2006**, *28*, 77. [Crossref]
- Sharma, K.; Sharma, V.; Sharma, S. S.; *Nanoscale Res. Lett.* **2018**, *13*, 1. [Crossref]
- Araujo, V. O.; Scarpellini, M.; Amado, R. S.; *Energia do Sol - Células Solares Sensibilizadas por Corantes: uma Proposta de Metodologia Interdisciplinar*; UFRJ: Rio de Janeiro, Brasil, 2019. [Link] acessado em julho 2023
- Kandpal, T. C.; Broman, L.; *Renewable Sustainable Energy Rev.* **2014**, *34*, 300. [Crossref]
- Güller, E.; Tokuç, A.; Köktürk, G.; Savaşır, K. Em *Environmentally-Benign Energy Solutions*; Dincer, I.; Colpan, C. O.; Ezan, M. A., eds.; Springer: Cham, 2020, p. 3. [Crossref]
- Chien, S. I.; Su, C.; Chou, C. C.; Li, W. R.; *J. Chem. Educ.* **2018**, *95*, 1167. [Crossref]
- Csernovszky, Z.; Horváth, A.; *Eur. J. Phys.* **2018**, *39*, 1. [Link] acessado em junho 2023
- Christ, I. S.; Almeida, K. N.; Oliveira, V. G.; Oliveira, M. C.; Santos, M. J. L.; Atz, N. R.; *Quím. Nova Esc.* **2019**, *41*, 394. [Link] acessado em junho 2023
- Silva, A. C. R.; Lacerda, P. L.; Cleophas, M. G.; *Revista de Educação em Ciências e Matemáticas* **2017**, *13*, 28. [Crossref]
- Cleophas, M. G.; Soares, M. H. F. B.; *Didatização Lúdica no Ensino de Química/Ciências*, 1ª ed.; Livraria da Física: São Paulo, 2018.
- <http://basenacionalcomum.mec.gov.br/abase/>, acessada em junho 2023.
- Kishimoto, T. M.; *Jogo, Brinquedo, Brincadeira e a Educação*, 8ª ed.; Cortez: São Paulo, 2011.
- Kishimoto, T. M.; *O Brincar e suas Teorias*, 1ª ed.; Cengage Learning: São Paulo, 2011.

