

Artigo

Célula Solar de Grätzel: Uma Proposta de Experimentação Interdisciplinar

Mayrinck, C.; Rocha, L. A.; Vitoreti, A. B. F.; Vaz, R.; Tartuci, L. G.; Ferrari, J. L.; Schiavon, M. A.*

Rev. Virtual Quim., 2017, 9 (2), 717-728. Data de publicação na Web: 13 de março de 2017

<http://rvq.sbq.org.br>

The Grätzel Solar Cell: A Proposal for Interdisciplinary Experimentation

Abstract: In this article an experimental work was evaluated to explore and disseminate solar energy thematic in an interdisciplinary way to different undergraduate courses. Initially the work was proposed as an activity of a post-graduation discipline for master and doctorate students. From this activity, it was applied an experiment on dye-sensitized solar cells, evaluated in different undergraduate courses in the form of short courses. Dye-sensitized solar cells were mounted by students, to better understand the construction and operation of these cells. Some adaptations were developed in the experiment for the classroom environment, for easier execution of the experiment. The knowledge obtained by students was evaluated from a questionnaire and the results are discussed. The adaptation of an experimental route involving solar cells in the undergraduate environment positively influenced the education of students.

Keywords: Solar cell; chemistry education; interdisciplinarity.

Resumo

Nesse artigo um experimento foi avaliado para explorar e difundir a temática de energia solar em um contexto interdisciplinar para diferentes cursos de graduação. Inicialmente o trabalho foi proposto como uma atividade de uma disciplina de pós-graduação para alunos de mestrado e doutorado. A partir dessa atividade, foi aplicado um experimento envolvendo células solares sensibilizadas por corante, avaliada em diferentes cursos de graduação na forma de minicursos. Células solares sensibilizadas por corante foram montadas pelos estudantes, para melhor compreensão sobre a construção e operação dessas células. Foram desenvolvidas algumas adaptações no experimento para o ambiente de sala de aula, facilitando sua execução, fora de um laboratório de pesquisa. Os conhecimentos obtidos pelos estudantes foram avaliados a partir de um questionário e seus resultados são discutidos. A adaptação de um roteiro experimental envolvendo células solares no ambiente de graduação influenciou positivamente na formação dos alunos.

Palavras-chave: Célula solar; educação química; interdisciplinaridade.

* Universidade Federal de São João del-Rei, Departamento de Ciências Naturais, Campus Dom Bosco, CEP 36301-160, São João del-Rei-MG, Brasil.

✉ schiavon@ufsj.edu.br

DOI: [10.21577/1984-6835.20170043](https://doi.org/10.21577/1984-6835.20170043)

Célula Solar de Grätzel: Uma Proposta de Experimentação Interdisciplinar

Caroline de Mayrinck, Leonardo A. Rocha, Ana Beatriz F. Vitoreti,
Roberto Vaz, Letícia G. Tartuci, Jefferson Luis Ferrari, Marco Antônio
Schiavon*

Universidade Federal de São João del-Rei, Departamento de Ciências Naturais, Campus Dom Bosco, CEP 36301-160, São João del-Rei-MG, Brasil.

* schiavon@ufsj.edu.br

Recebido em 27 de julho de 2016. Aceito para publicação em 13 de março de 2017

1. Introdução

- 1.1. Dispositivos conversores de energia
- 1.2. Células solares sensibilizadas por corantes

2. Objetivos

3. Parte experimental

- 3.1. Adaptação do roteiro experimental a diferentes ambientes
- 3.2. Avaliação qualitativa do experimento

4. Resultados e Discussão

5. Conclusão

1. Introdução

De acordo com Thomas Malthus¹ “A população cresce em progressão geométrica enquanto a produção de alimentos cresce em progressão aritmética”, vertente a qual pode ser estendida aos recursos energéticos. Este descompasso solicita avanços acerca do desenvolvimento energético, o que pode ser alavancado com uma maior discussão sobre a matriz energética dentro do contexto científico do país.

Contudo, dispositivos conversores de energia encontram-se difundidos no

cotidiano de todos, sejam membros da comunidade científica ou não. Como transmissores ou perpetuadores do conhecimento científico, torna-se de grande necessidade a incorporação destes conceitos durante a formação de cientistas e engenheiros, promovendo curiosidade epistemológica, indispensável para a aprendizagem crítica.²

Diversas críticas ao ensino tradicional são atribuídas ao papel passivo dos estudantes, frequentemente considerados apenas ouvintes,³ e uma forma de inclusão dessa importante temática do atual contexto tecnológico trata-se da experimentação.⁴

Por abranger conceitos multidisciplinares de química, tais como química de materiais, inorgânica, ambiental e eletroquímica, além de conceitos acerca de semicondutores, interfaces e circuitos relacionados às engenharias, a experimentação envolvendo células solares sensibilizadas por corantes pode atuar como um interessante meio de contextualização de aprendizado.

Além disso, a incorporação de experimentos envolvendo a compreensão dos fenômenos de conversão de energia e dispositivos fotovoltaicos podem impulsionar o aluno a buscar por fontes de energias renováveis. A introdução desses conceitos durante a formação de cientistas e engenheiros pode resultar em maior disseminação de energia renováveis, e esses futuros profissionais podem alavancar de forma significativa a sua presença na matriz energética do país.

1.1. Dispositivos conversores de energia

Dados do Balanço Energético Nacional revelam que o setor elétrico brasileiro se destaca por gerar um alto potencial de energia elétrica a partir de fontes renováveis, sendo 84% a partir de fontes hidrelétricas, favorecendo o crescimento sustentável do país.⁵ No entanto, apesar da principal matriz energética do país ser considerada sustentável, a energia solar ainda é considerada promissora, uma vez que o sol fornece ao planeta cerca de 10.000 vezes mais energia do que o consumo diário global.⁶

Os dispositivos conversores de energia solar em energia elétrica têm experimentado um forte progresso tecnológico nos últimos anos,⁶ porém não são dispositivos relativamente novos. Em 1883, Charles Fritts criou a primeira célula solar, atingindo 1% de eficiência, um dispositivo que converte luz solar em corrente elétrica a partir do efeito fotoelétrico.⁷

Somente em 1954 pesquisadores da *Bell Telephone Laboratories* demonstraram o

primeiro processo prático de conversão de radiação solar em energia elétrica através de uma junção p-n, resultando em uma eficiência de conversão de 6%.⁸ Junções p-n são basicamente compostas por semicondutores obtidos a partir da dopagem de um cristal puro, como por exemplo silício, por uma impureza (elemento) que possua mais (tipo n) ou menos (tipo p) elétrons em sua camada de valência do que o próprio metal puro. A junção desses semicondutores p e n, devido ao excesso de lacunas e elétrons, respectivamente, altera significativamente as propriedades elétricas do material, o que faz com que estes dispositivos apresentem bons resultados em conversão de energia. O uso de múltiplos semicondutores permite a absorção de uma ampla faixa de comprimento de ondas, aumentando a eficiência de conversão da radiação solar em energia elétrica.⁹

A partir de então até os dias atuais, o desenvolvimento de novos materiais e tecnologias permitiu o surgimento de dispositivos fotovoltaicos que estão divididos em 3 categorias, sendo chamadas de primeira, segunda e terceira geração.⁹

As células solares de primeira geração, constituídas principalmente por silício cristalino e baseadas na junção p-n, atingiram eficiência máxima até o presente momento de 25,3%.¹⁰ Na necessidade de redução de custo dos dispositivos surgiram as células solares de segunda geração, consistindo em filmes finos inorgânicos depositados em substratos e com eficiência relatada de até 23,3%.¹⁰

Esses dispositivos até então esbarravam em desvantagens como custo relativamente elevado de fabricação, uso de produtos químicos tóxicos em sua produção, além de estabilidade limitada devido a processos degradativos. Buscando aprimorar essas limitações tornou-se crucial o desenvolvimento de uma nova classe de dispositivos fotovoltaicos,¹¹ surgindo então as células solares de terceira geração. Essa geração representa as tecnologias atuais, envolvendo a absorção de multifótons, e oferecem a possibilidade de associar

eficiência e baixo custo. Dentre essa geração pode ser destacada células solares sensibilizadas por corantes (CSCCs), cujo princípio baseia-se em uma reação química de oxirredução.¹² Michel Grätzel, em 1991 relatou células solares de TiO₂ nanocristalino sensibilizadas por corantes, o que faz com que estas também sejam denominadas como Células de Grätzel.¹³

Um diferencial entre esse tipo de célula solar e as convencionais é que, na CSCC, o elemento responsável pela absorção de luz, o corante, não necessita ser um material com pureza tão elevada, podendo ser extraído de produtos naturais reduzindo assim o custo de sua produção. Estudos são concentrados em superar sua baixa eficiência e o reduzido tempo de vida útil, cujo índice de eficiência máximo, porém não certificado, já se encontra em 12,6%.¹⁰

1.2 Células solares sensibilizadas por corantes

A estrutura básica de uma célula solar sensibilizada por corante é constituída por: fotoanodo (semicondutor e corante), contraeletrodo e eletrólito. Na Figura 1 é apresentada a estrutura básica de uma CSCC e seu funcionamento básico. Com a incidência de radiação, elétrons do corante são excitados (1) e injetados na banda de condução do semicondutor (2), deixando buracos no corante (3), que rapidamente são regenerados pelos elétrons provenientes da oxidação do eletrólito (4). Após percorrerem um circuito externo, e gerarem corrente, os elétrons são direcionados ao contraeletrodo, provocando a redução do eletrólito (5), e completando o ciclo da célula. Os processos são descritos nas reações abaixo:

- (1) $\text{Corante} + h\nu \rightarrow \text{Corante}^*$
- (2) e (3) $\text{Corante}^* + \text{TiO}_2 \rightarrow \text{Corante}^+ + \text{TiO}_2^*$
- (4) $\text{Corante}^+ + 3/2 \text{I}^- \rightarrow \text{Corante} + 1/2 \text{I}_3^-$
- (5) $1/2 \text{I}_3^- + e^- (\text{contraeletrodo}) \rightarrow 3/2 \text{I}^-$

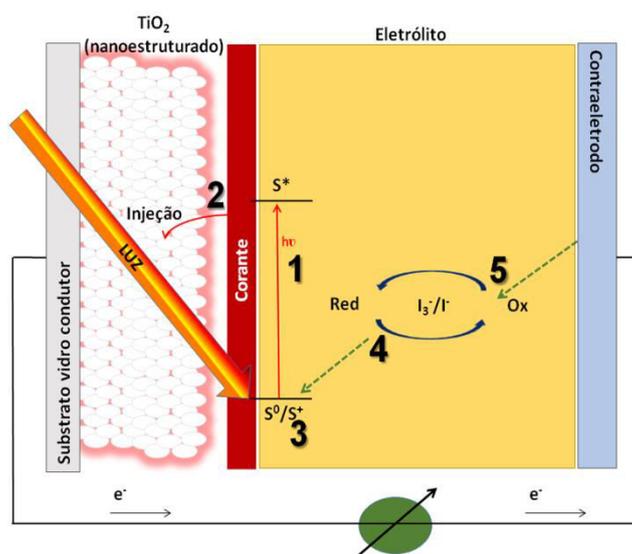


Figura 1. Estrutura básica de uma célula solar sensibilizada por corante. Os principais processos envolvidos no funcionamento básico de uma célula solar são apresentados: (1) excitação eletrônica pela radiação, (2) excitação do corante, (3) formação de buracos, (4) regeneração pelo eletrólito, (5) redução do eletrólito

As células solares sensibilizadas por corantes se baseiam na utilização de um corante absorvedor de fótons capaz de transferir um elétron no estado excitado para um semicondutor, iniciando o processo que leva à geração de corrente. O mais utilizado é o dióxido de titânio (TiO_2).¹³ Tais partículas do semicondutor executam a importante ação de assegurar o bom seguimento do fluxo de elétrons gerados pela absorção de fótons pelo corante.¹³ O processo de formação do par elétron-buraco é simplificado pelo uso da engenharia de superfície do semicondutor e do corante. É necessário que o semicondutor seja sensibilizado por outros materiais a fim de melhorar sua faixa de absorção de radiação solar. No entanto, os corantes devem apresentar grupos ligantes em sua superfície, capazes de fazer com que o sensibilizador se ligue à superfície do semicondutor de larga banda de energia proibida utilizado na célula.¹³ A transferência de energia entre o sensibilizador e o semicondutor ocorre desde que o LUMO (do inglês, *Lowest Unoccupied Molecular Orbital*) do sensibilizador seja maior que o limite da banda de condução dos semicondutores. É necessário também que o potencial de oxirredução do corante seja superior ao do eletrólito.¹⁴ A eficiência de células solares é dependente dos corantes empregados.

Já o contraeletrodo, geralmente é composto por outra camada de TCO (do inglês, *Transparent Conductive Oxide*) sobre substrato, e, sobre ela é depositada uma camada de um catalisador, como a platina ou o grafite. O catalisador adequado deve promover a dissociação do iodo metálico (I_2) em átomos de iodo e iodeto na adsorção, permitindo uma redução rápida dos elétrons.¹⁵ Para que a reação seja favorável é necessário que sobre a superfície do vidro condutor (FTO, do inglês, *Fluorine Doped Tin Oxide* ou ITO, do inglês, *Indium Doped Tin Oxide*) seja depositado um material que diminua a resistência ao transporte de elétrons. Um bom material para as células solares deve apresentar boa mobilidade ao transporte de cargas e boa estabilidade química na presença do eletrólito.^{16,17} Uma fina camada de platina é depositada sobre

óxidos condutores transparentes, sendo adotada como contraeletrodo nas CSSCs devido à sua elevada condutividade, atividade eletrocatalítica e estabilidade química.

Os dois eletrodos são colocados em contato por meio de um eletrólito líquido ou polimérico, normalmente se utiliza um par redox, como iodeto/triiodeto (I^-/I_3^-) em acetonitrila, que é responsável pela regeneração do sensibilizador ao seu estado fundamental. Responsável pela regeneração do corante, o eletrólito age como transportador do mediador redox entre os eletrodos e é impulsionado por difusão. Os eletrólitos devem apresentar boa relação entre os potenciais redox do corante e do mediador, a reversibilidade das espécies, a difusão aparente permitida no meio, além da formação de um bom contato interfacial com os poros do filme de óxido e o contraeletrodo.¹⁸ Os eletrólitos que usualmente apresentam tais características são baseados em solventes orgânicos e denominados eletrólitos líquidos. O eletrólito líquido redox deve ser quimicamente estável, ter baixa viscosidade, a fim de minimizar os problemas de transporte, e ser um bom solvente para os componentes do par redox. O eletrólito não deve provocar uma dissolução significativa do corante adsorvido ou até mesmo do material semicondutor dos eletrodos. Por fim, a célula é fechada para completar o circuito elétrico.

2. Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo a avaliação de um roteiro experimental adaptado ao ambiente externo ao laboratório de pesquisa envolvendo a preparação de células solares sensibilizadas por corante (CSSC) e também avaliar o efeito da experimentação na construção do conhecimento a respeito do tema em um contexto interdisciplinar para diferentes cursos de graduação. Os conhecimentos prévios e posteriores a respeito da temática

serão confrontados a partir da aplicação de questionário aos alunos.

3. Parte experimental

3.1. Adaptação do roteiro experimental a diferentes ambientes

O roteiro experimental foi adaptado a partir de uma prática envolvendo a montagem de uma CSSC.¹⁹ Devido à estrutura física disponível para a realização do experimento, algumas adaptações foram necessárias. As soluções precursoras precisaram ser preparadas previamente, possibilitando sua execução fora do laboratório de química. No preparo do eletrodo de TiO₂, o forno foi substituído por uma chapa aquecedora, possibilitando o tratamento térmico do material devido a facilidade de transporte e operação da chapa, em relação ao forno.

Em relação ao contraeletrodo foi utilizado o grafite ao invés do contraeletrodo de platina, uma vez que o grafite tem menor custo, é mais acessível ao ensino e de mais fácil preparo, em relação aos contraeletrodos de platina. O grafite pode ser depositado a partir da fricção de um lápis preto macio sobre a superfície condutora de FTO.

Em virtude da dificuldade de se disponibilizar o aparato experimental necessário para efetuar a medida da corrente e do potencial das células solares preparadas com iluminação de 1 sol (100 mW cm⁻²), foi utilizado um multímetro comercial para realização das medidas elétricas na célula solar. Devido à baixa sensibilidade do equipamento, foi observada a voltagem nas medidas em claro e escuro, ilustrando assim a diferença de potencial elétrico gerada na célula solar. A variação de corrente no multímetro, quando o dispositivo estava sob radiação solar, foi de cerca de 400 mV sendo, portanto, valores de fácil visualização do efeito fotovoltaico nas células preparadas.

3.2 Avaliação qualitativa do experimento

Foi desenvolvido um questionário no intuito de verificar o impacto do experimento no ensino. O questionário elaborado foi aplicado no minicurso com questões envolvendo conhecimentos prévios e/ou adquiridos pelos alunos durante o minicurso sobre o tema de energia solar, assim como questões discursivas sobre a relevância do experimento e a contextualização do assunto. O questionário foi constituído de seis questões objetivas (1-6) e quatro questões discursivas (7-10), abordando tais questões:

1. Qual era seu nível de conhecimento sobre células solares antes do minicurso?
 2. Como você considera seu nível de conhecimento sobre células solares após o minicurso?
 3. Qual era seu nível de conhecimento sobre células solares sensibilizadas por corante antes?
 4. Como você considera seu nível de conhecimento sobre células solares sensibilizadas por corante após o minicurso?
 5. O minicurso atendeu suas expectativas?
 6. Qual conteúdo de Química você considera que mais se enquadra a essa experimentação?
 7. Qual seu interesse ao escolher esse minicurso?
 8. Qual a relevância da experimentação sobre células solares sensibilizadas por corante para seu curso?
 9. Quais os conceitos básicos e/ou conteúdos você conseguiu associar à experimentação?
- O que você mudaria e/ou complementaria nesse experimento?

4. Resultados e Discussão

Durante o minicurso foram montadas células solares sensibilizadas por corante, conforme apresentada na Figura 2. Foram utilizados como fotoanodo substrato de vidro

com camada condutora de FTO, recoberto com um substrato nanoestruturado de TiO_2 sensibilizado com corante eosina Y. O fotoanodo foi disposto em contato com um eletrólito iodo/triiodeto e fechado com um contraeletrodo de grafite.



Figura 2. Imagem apresentando a célula solar sensibilizada por corante montada durante a realização dos minicursos

Na caracterização das células solares alguns parâmetros dos dispositivos a serem conhecidos são: o potencial de circuito aberto (V_{oc}) que representa a diferença de potencial entre os contatos do dispositivo fotovoltaico quando estes se encontram isolados; a densidade de corrente de curto circuito (J_{sc}) que é a densidade de corrente por unidade de área que passa pelo dispositivo quando os contatos estão em curto-circuito. A eficiência de conversão de energia (η) calculada pela razão entre a potência máxima ($P_{m\acute{a}x}$) e a potência de luz incidente (P_{inc}), normalizada a 100 mW cm^{-2} (AM 1,5) e o fator de preenchimento (FF), caracterizado pela razão entre a potência máxima e o produto entre o potencial de circuito aberto e a corrente de curto circuito. Estes dados podem ser obtidos a partir da curva de corrente (I) em função do potencial (V) e da curva de potência em função do potencial elétrico da célula solar fotovoltaica.

A forma de avaliação do experimento foi a aplicação de um questionário previamente elaborado. A aplicação de questionários é uma ferramenta de verificação a partir da indagação de um grupo amostral ou

totalidade com intuito de estimar o interesse, o conhecimento, a opinião e a construção da linha de pensamento dos participantes.²⁰ As questões abertas permitiram a liberdade dos participantes ao responderem o questionário, enquanto as questões fechadas direcionavam as respostas a fim de promover um estudo quantitativo a respeito dos levantamentos do assunto. Foram realizados cinco minicursos em eventos como jornadas e semanas de estudo nos cursos de química, engenharia química, física, engenharia mecânica e engenharia elétrica durante o ano de 2015. Cada minicurso foi ofertado com 20 vagas, uma vez que o minicurso envolve uma parte prática, em que os estudantes preparavam em dupla uma CSSC. Assim, foram totalizados cerca de 100 estudantes participantes nos minicursos.

A princípio, o interesse dos alunos em escolher o minicurso foi considerado por meio de questão qualitativa, de modo que eles poderiam responder abertamente sobre o porquê da escolha. Dentre todos os que responderam aos questionários, em torno de 90% dos discentes disseram ter escolhido o minicurso por algum tipo de interesse em

energias renováveis ou para agregar novos conhecimentos acerca de temas atuais. Já a menor parte, cerca de 10% dos discentes, escolheu por questões profissionais, pois disseram que já trabalham no ramo de energia. Entre várias respostas, essas três predominaram, mostrando que, apesar de turmas heterogêneas que realizarem o minicurso, ambas o buscavam com interesses muito próximos.

Logo após foram avaliados os conhecimentos prévios e posteriores dos discentes em relação às células solares perante o minicurso. A Figura 3 apresenta as

respostas dos discentes quanto ao seu nível de conhecimento sobre células solares, em que os alunos poderiam avaliá-lo como ruim, regular, bom ou muito bom. Os resultados evidenciam inicialmente o efeito positivo da experimentação sobre células solares na formação do aluno quanto à temática em que, apesar de possuírem conhecimento prévio ruim ou regular, a prática lhes proporcionou uma melhor inserção na temática, resultando em melhora de seu nível de conhecimento, que passou para bom ou muito bom, segundo os alunos.

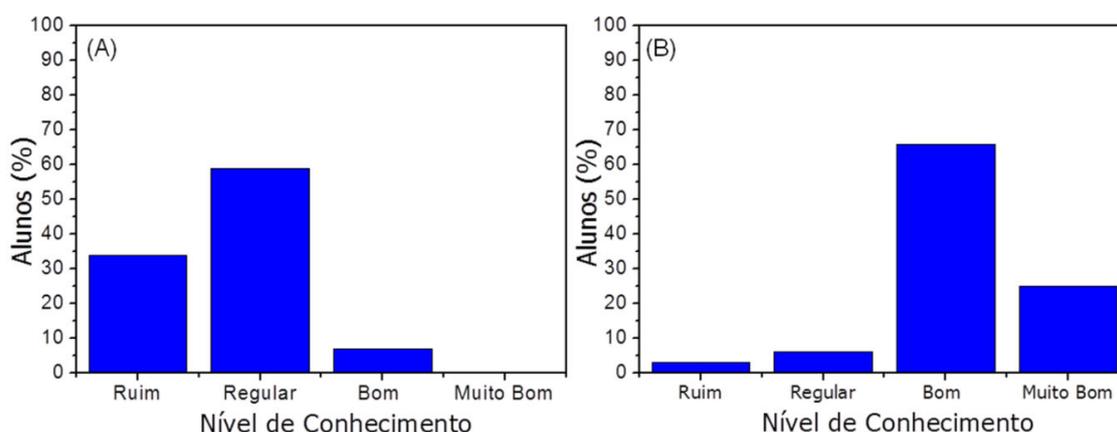


Figura 3. Nível de conhecimento relatado pelos alunos sobre células solares (A) antes e (B) após experimentação realizada no minicurso

O conhecimento prévio insuficiente sobre a temática pode ser atribuído inicialmente à falta de sua inserção em práticas durante a formação dos alunos bem como a ausência de discussões voltadas à conversão de energia. Apesar de um assunto bem difundido na sociedade, o meio acadêmico não aborda de forma aprofundada e não torna os alunos como o sujeito de transformação na área de energias renováveis. O objetivo da prática trata-se de, colocando o aluno como sujeito no tema, tornar mais rápida a sua inserção no conteúdo além de despertar seu interesse

para a temática. Essa avaliação pode ser utilizada como primeiro indicativo de sucesso da experimentação realizada no minicurso.

Por se tratar de um conteúdo mais específico e recente, a falta de conhecimento sobre CSSCs se mostra ainda mais evidente, conforme apresentado na Figura 4. Introduzidas na comunidade científica em 1991, as CSSCs ainda não se encontram difundidas em materiais didáticos de fácil acesso aos alunos, uma vez que a tecnologia ainda é considerada emergente.

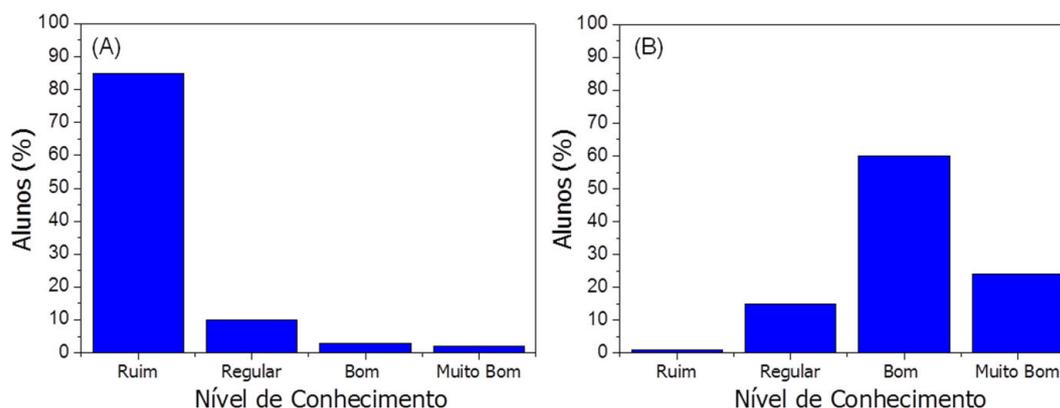


Figura 4. Nível de conhecimento relatado pelos alunos sobre células solares sensibilizadas por corantes (A) antes e (B) após experimentação realizada no minicurso

As CSSCs fazem parte de um novo grupo de conhecimentos científicos que devem ser incorporados nas grades curriculares visando sua rápida inserção tecnológica. Conforme observado nos resultados, a inserção do experimento ocasiona uma melhora no conhecimento dos alunos, que antes era considerado ruim em sua grande maioria, efeito positivo ocasionado pela contextualização.

A relevância da experimentação sobre CSSCs nos cursos foi questionada de maneira qualitativa, pois os discentes poderiam descrever da forma que achassem melhor. Em sua grande maioria os discentes consideraram alta a relevância, por diversos

motivos por eles relatados. Boa parte dos discentes comentou que existe em sua grade curricular a disciplina optativa de Energias Renováveis, porém não há experimentação sobre o tema.

A melhor maneira de avaliar a assimilação de conteúdos a partir da experimentação trata-se da indagação direta aos alunos sobre os conteúdos de química enquadrados na experimentação desenvolvida por eles. Na Figura 5 são revelados conhecimentos multidisciplinares. A maior percepção dos alunos foi a respeito do conteúdo de eletroquímica, uma vez que os processos que imperam a regeneração de uma CSSC ocorrem via processos eletroquímicos.

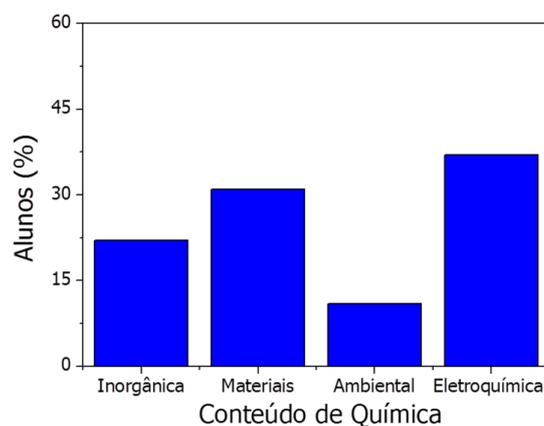


Figura 5. Respostas relatadas pelos alunos quanto ao conteúdo de química melhor assimilado durante o minicurso e a produção de uma CSSC

O conteúdo de materiais apresentou-se bem difundido entre os alunos, o que pode estar correlacionado principalmente ao próprio processo de preparação das células realizado. A química inorgânica também foi altamente mencionada pelos alunos, devido à familiaridade a conceitos adquiridos na disciplina como compostos de coordenação, teoria do orbital molecular, teoria do campo ligante, espectroscopia eletrônica de absorção, todos estes durante os primeiros anos dos cursos de graduação.

Todavia, o conteúdo menos citado foi o relacionado à área ambiental. Esse resultado não era esperado, uma vez que a temática de células solares encontra-se bastante difundidas em temáticas ambientais. Essa constatação evidencia que a experimentação sobre CSSCs permitiu aos alunos visualizarem melhor os diferentes conteúdos abordados nestes dispositivos, alcançando o objetivo interdisciplinar da prática, e mostrando o quão amplo é o conteúdo discutido.

Com o propósito de melhor elucidar os conceitos associados pelos discentes à experimentação, os mesmos foram questionados de forma dissertativa, em que poderiam se relacionar com conceitos abrangentes ou não à sua área mais específica de conhecimento. Muitos descreveram conteúdos mencionados em outra pergunta, tais como química inorgânica e eletroquímica. No entanto, outros associaram a conceitos mais específicos, tais como funcionamento da célula, envolvendo diferença de potencial, eficiência e circuitos da célula. Alguns dos discentes, por estarem em períodos iniciais dos cursos, não relacionaram a nenhum conteúdo específico, mesmo tendo relatado que foi de grande proveito.

Os resultados positivos observados nos primeiros questionamentos são confirmados pelos alunos quando indagados sobre se o minicurso atendeu suas expectativas. De forma unânime os alunos disseram que sim, que a experimentação utilizada no minicurso lhes proporcionou os conhecimentos almejados. Com o propósito de melhorar a

experimentação, eles ainda foram questionados se alterariam algo no experimento. Em sua maioria, eles não alterariam nada, porém alguns sugeriram a individualização da célula, que por questões de custo é feita uma célula por dupla de alunos, outros propuseram o aumento da escala e o uso de diferentes materiais para construção das células.

A experimentação em CSSCs se apresentou como forma eficiente de introduzir o aluno dentro do seu ambiente de formação às temáticas de energias renováveis e, especificamente, células solares. Com os resultados apresentados no presente trabalho se torna clara a necessidade de implementação de experimentação sobre a temática de energia solar na formação de cientistas e engenheiros.

A metodologia utilizada apresentou relativa simplicidade, e foi levantada a possibilidade de utilização de outros materiais alternativos, como corantes naturais, contraeletrodo a partir de materiais com menor custo, além de substituição dos equipamentos de laboratório por equipamentos convencionais. Outras modificações podem ser implementadas de acordo com o ambiente em que a prática for realizada, como por exemplo, laboratórios de ensino médio, o que pode ser estudado futuramente.

5. Conclusão

A realização do experimento foi importante na divulgação de tecnologias relacionadas à conversão de energia solar por meio de células solares. Possibilitou ainda a aprendizagem sobre a montagem e funcionamento de células solares sensibilizadas por corante de maneira interdisciplinar, envolvendo alunos de diferentes cursos de graduação. Foi também destacado no minicurso a importância da utilização de materiais de baixo custo e de

fácil preparo e manuseio na construção de células solares, como por exemplo, a utilização de contraeletrodo de grafite no lugar da platina e utilização de equipamentos mais acessíveis, além da possibilidade de realização do experimento fora de um laboratório de química. Os alunos relataram nos questionários que apresentam grande interesse na temática de energias renováveis. Quando avaliados quanto ao seu conhecimento prévio sobre as tecnologias relacionadas à energia solar, a maioria dos alunos afirmou ter conhecimento de ruim a regular. Após o minicurso os alunos asseguram que seus conhecimentos sobre células solares melhoraram, passando para bom a muito bom. Além disso, quando questionados sobre conhecimentos sobre CSSCs, a maioria dos alunos afirma possuir conhecimento ruim em relação ao tema, o que mudou bastante após o minicurso. Os alunos assimilaram preferencialmente conteúdos de eletroquímica, uma vez que os processos que dominam a regeneração de uma CSSC ocorrem via processos eletroquímicos. Algumas sugestões são inviáveis por questões financeiras, outras poderão ser atendidas nos próximos experimentos. O experimento proposto mostrou-se ideal para aplicação como prática de ensino na graduação, facilitado pelas adaptações propostas. O objetivo de demonstrar aos alunos como o conteúdo de célula solar se mostra interdisciplinar foi alcançado além da abordagem de um conteúdo atual e de importante inserção durante sua formação acadêmica.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES, CNPq, FAPEMIG e RQ-MG pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

¹ Malthus, T. R.; *An Essay on the Principle of Population*, Dover Publications: London, 2007.

² Francisco Jr, W. E.; Ferreira, L. H.; Hartwig, D. R. Experimentação Problematizadora: Fundamentos Teóricos e Práticos para a Aplicação em Salas de Aula de Ciências. *Química Nova na Escola* **2008**, *30*, 34. [Link]

³ Freire, P.; *Pedagogia da autonomia: saberes necessários à prática educativa*, 33a. ed., Paz e Terra: Rio de Janeiro, 2006.

⁴ Giordan, M. O papel da experimentação no ensino de ciências. *Química Nova Escola* **1999**, *10*, 43. [Link]

⁵ La Rovere, E. L.; Valle, C.; Pereira, A.; Poppe, M. K. Projeto “A Carta do Sol”; Relatório técnico “Subsídios para o planejamento da promoção da energia solar fotovoltaica no Brasil”; Disponível em: <<http://www.lima.coppe.ufrj.br/includes/pages/projetos/cartadosol/Relatorio%20Tecnico%20para%20a%20Carta%20do%20Sol.pdf>>.

Acesso em: 19 Julho 2016.

⁶ Nazeeruddin, K.; Baranoff, E.; Grätzel, M. Dye-sensitized solar cells: A brief overview. *Solar Energy* **2011**, *85*, 1172. [CrossRef]

⁷ Fritts, C. On the Fritts selenium cell and batteries. *Van Nostrands Engineering Magazine* **1888**, *32*, 388. [Link]

⁸ Chapin, D. M.; Fuller, C. S.; Pearson, G. L. A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power. *Journal of Applied Physics* **1954**, *25*, 676. [CrossRef]

⁹ Bagher, A. M.; Vahid, M. M. A., Mohsen, M. Types of Solar Cells and Application. *American Journal of Optics and Photonics* **2015**, *3*, 94. [CrossRef]

¹⁰ Sítio da National Renewable Energy Laboratory. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/>> Acesso em: 22 Fevereiro 2017.

¹¹ Polman, A.; Knight, M.; Garnett, E. C.; Ehrler, B.; Sinke, W. C. Photovoltaic materials: Present efficiencies and future challenges. *Science* **2016**, *352*, 307. [CrossRef]

¹² Sonai, G. G.; Melo Jr, M. A.; Nunes, J. H. B.; Megiatto Jr., J. D.; Nogueira, A. F. Células

solares sensibilizadas por corantes naturais: um experimento introdutório sobre energia renovável para alunos de graduação. *Química Nova* **2015**, *38*, 1357. [CrossRef]

¹³ O'regan, B.; Gratzel, M. A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films. *Nature* **1991**, *353*, 737. [CrossRef]

¹⁴ Hui, T.; Naoya E.; Inada, M.; Yumi, T.; Junichi, H. Synthesis of mesoporous TiO₂ spheres and aggregates by sol-gel method for dye-sensitized solar cells. *Materials Letters* **2015**, *141*, 259. [CrossRef]

¹⁵ Xiao, Y.; Lin, J. Y.; Wu, J.; Tai, S. Y.; Yue, G.; Lin, T. W. Dye-sensitized solar cells with high-performance polyaniline/multi-wall carbon nanotube counter electrodes electropolymerized by a pulse potentiostatic technique. *Journal of Power Sources* **2013**, *233*, 320. [CrossRef]

¹⁶ Xiao, Y.; Lin, J.Y.; Tai, S. Y.; Chou, S. W.; Yueab, G.; Wu, J. Pulse electropolymerization

of high performance PEDOT/MWCNT counter electrodes for Pt-free dye-sensitized solar cells *Journal of Materials Chemistry* **2012**, *22*, 19919. [CrossRef]

¹⁷ Grätzel, M. Recent advances in sensitized mesoscopic solar cells. *Accounts of Chemical Research* **2009**, *42*, 1788. [CrossRef] [PubMed]

¹⁸ Papageorgiou, N.; Athanassov, Y.; Armand, M.; Bonhote, P.; Pettersson, H.; Azam, A.; Grätzel, M. The Performance and Stability of Ambient Temperature Molten Salts for Solar Cell Applications. *Journal of The Electrochemical Society* **1996**, *143*, 3099. [CrossRef]

¹⁹ Takechi, K.; Muszynski, R.; Kamat, P. V. Fabrication procedure of dye-sensitized solar cells. Disponível em <<http://www3.nd.edu/~pkamat/pdf/solarcell.pdf>>. Acesso em: 19 julho 2016.

²⁰ Gil, A. C.; *Métodos e técnicas de pesquisa social*. 5^a ed., Atlas: São Paulo: 1999.