



ISSN: 1984-3151

## OTIMIZAÇÃO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS ORGÂNICAS

### OPTIMIZATION OF ORGANIC PHOTOVOLTAIC CELLS

**Allan Douglas Martins<sup>1</sup>; Ana Carolina Silva<sup>1</sup>; Camila C. S. Braga<sup>1</sup>; Carolina Cardoso Franco<sup>1</sup>; Dyeice Amélia Sales<sup>1</sup>; Guilherme Cunha Rezende<sup>1</sup>; Pollyanna Rodrigues Duarte<sup>1</sup>; Otávio Gomes<sup>2</sup>; Sinthya Gonçalves Tavares<sup>3</sup>**

- 1 Graduandos em Engenharia Química. Centro Universitário de Belo Horizonte - UniBH. Belo Horizonte MG. [allan\\_douglasmm@hotmail.com](mailto:allan_douglasmm@hotmail.com); [aninhacarolina91@hotmail.com](mailto:aninhacarolina91@hotmail.com); [camila.chiari@hotmail.com](mailto:camila.chiari@hotmail.com); [carolbh\\_s2@hotmail.com](mailto:carolbh_s2@hotmail.com); [dyeicesales@gmail.com](mailto:dyeicesales@gmail.com); [guilhermecunharezende@gmail.com](mailto:guilhermecunharezende@gmail.com); [polly\\_rodrigues@hotmail.com](mailto:polly_rodrigues@hotmail.com).
- 2 Doutor em Engenharia Elétrica, UFMG, Belo Horizonte, Brasil, 2012. Professor do Centro Universitário de Belo Horizonte – UniBH. Belo Horizonte, MG. [otavio@otaviogomes.com](mailto:otavio@otaviogomes.com).
- 3 Doutora em Engenharia Mecânica. UFMG, Belo Horizonte, Brasil - Università Politecnica delle Marche – Ancona – IT. 2006. Grupo de Pesquisa em Desenvolvimento de Novos Materiais Estruturados e Professora do Centro Universitário de Belo Horizonte - UniBH. Belo Horizonte, MG. [gtavar@terra.com.br](mailto:gtavar@terra.com.br).

Recebido em: 28/02/2013 - Aprovado em: 20/22/2011 - Disponibilizado em: 30/11/2013

*RESUMO: Com a previsível escassez dos recursos energéticos, as preocupações com as questões ambientais se tornam cada vez mais evidentes. Com isso, houve um incremento na busca de recursos alternativos para a produção de energia elétrica, principalmente aqueles baseados em fontes limpas e renováveis, como a energia solar. Para a conversão de energia solar em energia elétrica são utilizadas, na maioria das vezes, células solares fotovoltaicas, que se baseiam na propriedade semicondutora de silício. Como o custo dessa tecnologia ainda é muito alto, são propostos novos materiais para a substituição desse cristal, com destaque para a célula solar nanocristalina de dióxido de titânio (TiO<sub>2</sub>), acrescida de moléculas orgânicas de corantes. Essa célula apresenta vantagens em relação às células convencionais de silício, pois, na sua fabricação, são utilizados materiais disponíveis no mercado e corantes extraídos de plantas, modelo proposto por Grätzel, além de ser preparada através de processos simples e não poluentes. O objetivo deste trabalho é recriar as células solares nanocristalinas de dióxido de titânio, otimizando-a para a utilização de materiais com baixo custo, de modo que se obtenha a maior eficiência energética possível.*

*PALAVRAS-CHAVE: Energia Solar. Fotovoltaica. Nanocristalina.*

*ABSTRACT: With the expected shortage of energy resources, the concerns about environmental issues are becoming increasingly evident. Thus, there was an increase in search for alternative resources for energy production power, especially those based on clean sources and renewable energies such as solar energy. Converting solar energy into electrical energy, in most cases, solar cells photovoltaics, which based on property semiconductor silicon are used. As the cost of this technology is still very high, new materials are proposed for substitution this crystal, with emphasis on the cell nanocrystalline titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) solar plus molecules organic dyes. This cell has advantages compared to conventional silicon cells, because in his manufacturing, available materials are used in the market and extracted dyes from plants, the model proposed its by Grätzel, besides being prepared through Simple and clean process. The goal of this essay is to recreate the nanocrystalline solar cells titanium dioxide, optimizing it to the use of materials with low cost, so as to obtain the energy efficient as possible.*

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento exponencial do consumo energético implicou a necessidade de manutenção das reservas esgotáveis de energia, além do desenvolvimento tecnológico no setor de aproveitamento de fontes de energias alternativas (AZEVEDO; CUNHA, 2002). Segundo Ghensev (2006), a conversão de energia solar em energia elétrica é um campo da engenharia muito promissor, uma vez que o sol é capaz de lançar sobre a Terra  $1.367 \text{ W/m}^2$ , valor equivalente a 4000 vezes mais energia do que se consome. Frente a essa realidade, é extremamente viável a exploração de novas tecnologias para desenvolver a conversão de energia solar em energia elétrica, principalmente em países próximos à Linha do Equador e em locais como o Estado de Minas Gerais, que estão localizados sobre a AMAS – Anomalia Magnética do Atlântico Sul. Segundo Sobral e Paskocimas (2007), essa é a região onde os raios solares têm um menor desvio, sendo mais aproveitáveis para a geração de energia elétrica. Atualmente, para essa transformação utilizam-se células fotovoltaicas feitas, principalmente, de silício com um alto grau de pureza. Todavia, a purificação da matéria-prima para a fabricação de tais células requer uma sofisticada tecnologia, além de grande quantidade de energia. Esses são fatores que contribuem para o aumento do valor agregado ao produto final, o que influencia o seu alto valor no mercado. Ao realizar uma rápida análise sobre o processo de fabricação dessa célula, torna-se evidente a necessidade da redução do custo de produção (FREITAS, 2006).

Estudos como o de Gratzel, em Sobral e Paskocimas (2007), indicam como uma possibilidade viável para a resolução desse impasse a criação de uma célula solar nanocrystalina de dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ),

sensibilizada por moléculas orgânicas de corantes (FIGURA 1). Com esta nova tecnologia espera-se superar os problemas experimentais, além de se reduzir custos da tecnologia de células solares convencionais.

Segundo Carvalho as células solares sensibilizadas por corantes (CSSC) apresentam o mesmo papel das funções fornecidas pelo silício numa célula tradicional. Assim como o silício, As CSSCs funcionam tanto como fonte de fotoelétrons bem como fornecedor do campo elétrico para separar as cargas e criar uma corrente. Entretanto nas CSSCs, o semiconductor é apenas um transportador de cargas e os fotoelétrons fornecidos pelo corante fotossensível. A separação de carga ocorre então na superfície entre o corante, o semiconductor e o eletrólito. Atualmente as mais bem sucedidas CSSCs são as conhecidas células de Graetzel, que utilizam corantes baseados em polipiridil-rutenatos, adsorvidos em filmes nanocrystalinos de dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ).

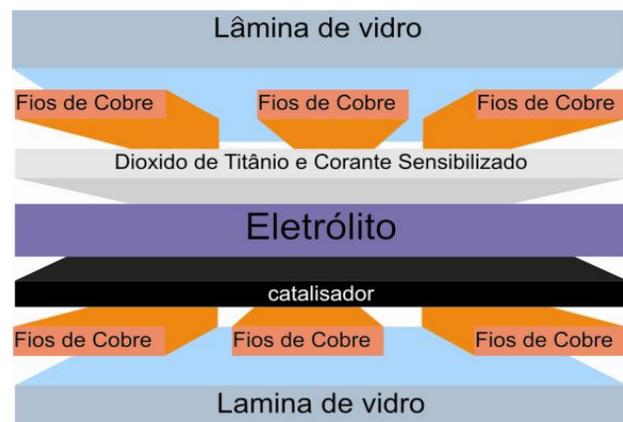


Figura 1 - Esquema de uma célula solar nanocrystalina de dióxido de titânio.

O objetivo deste trabalho é recriar as células solares nanocrystalinas de dióxido de titânio, propostas por Gratzel, otimizando-a para a utilização de materiais

com baixo custo, de modo que se obtenha a maior eficiência energética possível.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 HISTÓRICO

O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez em 1839, pelo físico francês Edmond Becquerel, ao descobrir que certos materiais geram corrente elétrica ao serem expostos à luz (BECQUEREL, 1839).

Em 1877, Adams e Day construíram a primeira célula solar baseada em dois eletrodos de selênio que produziam uma corrente elétrica quando expostos à radiação. Porém, os resultados indicavam que a eficiência destes sistemas criados era tão reduzida que o desenvolvimento de células solares teve que esperar por uma compreensão mais completa dos semicondutores (FREITAS, 2006). Já no ano de 1947 os físicos Shockley, Bardeen e Brattain descobriram os transistores, substituindo assim os semicondutores (SHOCKLEY, 1949).

Em 1954 Chapin, Fuller e Pearson desenvolveram, com eficiência de 6%, o dispositivo que permite a transformação da luz solar em eletricidade em um sistema fotovoltaico que tem como unidade básica a célula solar feita de silício (FREITAS, 2006).

Outro agente impulsionador das pesquisas dessa tecnologia para aplicações diversas, inclusive para complementação do sistema elétrico existente, foi a crise do petróleo em 1973. Nesse ano, a energia solar atraiu a atenção de governos internacionais, com a possibilidade real do esgotamento das reservas petrolíferas, como esclarece Nascimento (2004).

Todavia, o custo de produção das células era um fator preocupante em relação à quantidade de energia produzida por ela. Era preciso reduzir o custo significativamente para tornar viável sua utilização.

Com o passar dos anos, novos reservatórios de petróleo foram revelados por todo o mundo, dilatando assim o período de abundância até muitas dezenas de anos. Por outro lado, o mesmo autor ainda afirma que, a tecnologia solar não apresentava custos e eficiência comparáveis com as energias fósseis. Como alternativa, os governos internacionais começaram a financiar a construção de centrais nucleares, o que tornou o assunto sobre energia solar mais discreto durante a década 80.

Na última década, conforme conta em (BRITO; SERRA, 2004), a necessidade de utilização da energia solar para a obtenção de eletricidade se intensificou devido ao impacto ambiental causado pela utilização desenfreada do petróleo e, também, pelas mudanças climáticas associadas à emissão de gases inerentes à sua queima.

Uma das alternativas para a conversão da energia solar em energia elétrica foi desenvolvida pelo grupo de pesquisa do Prof. Michael Gratzel, em 1991, da Escola Politécnica Federal em Lauzane (Suíça), que deu início ao desenvolvimento de células fotovoltaicas sensibilizadas a corantes (CFSC) (SANTOS, 2005).

## 2.2 COMPONENTES DA CÉLULA SOLAR DE GRATZEL

### 2.2.1 DIÓXIDO DE TITÂNIO

O processo pelo qual uma impureza é introduzida em uma rede cristalina com a finalidade de melhorar as propriedades fotovoltaicas de semicondutor é chamado de sensibilização. Muitos semicondutores, como dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ), sulfeto de cádmio (CdS), óxido de zinco (ZnO), trióxido de tungstênio ( $\text{WO}_3$ ), sulfeto de zinco (ZnS), óxido de ferro (III) ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), podem agir como sensibilizadores em processos de oxidação e redução mediados pela luz (devido à sua estrutura eletrônica). Entre os semicondutores, o  $\text{TiO}_2$ , face às suas propriedades de

tenacidade, leveza, resistência à corrosão, opacidade, inércia química, toxicidade nula, elevado ponto de fusão, brancura, alto índice de refração, alta capacidade de dispersão, fotoestabilidade e estabilidade química em uma ampla faixa de pH, se tornou o mais amplamente estudado para os processos de sensibilização (FIGURA 2) (NOGUEIRA; JARDIM, 1998).

Uma aplicação desse material é como foto anodo em células solares nanocristalinas sensibilizadas por corante. As partículas de dióxido de titânio desempenham um papel crucial nas células solares desse tipo, garantindo o uso efetivo do fluxo de elétrons resultante da absorção da luz do Sol pelo corante (RUSSEL, 1994).



Figura 2: Colocação da pasta de  $\text{TiO}_2$  na lamela de vidro da célula de Gratzel.

Fonte - AZEVEDO; CUNHA, 2002, p.2.

O semicondutor  $\text{TiO}_2$  também apresenta vantagens em relação ao transporte de carga, em virtude da sua alta constante dielétrica ( $\epsilon = 80$  para anatase). Ele fornece uma boa proteção eletrostática ao elétron injetado em relação ao corante adsorvido na superfície do óxido, impedindo sua recombinação antes da sua redução pelo mediador e, assim, o elétron injetado se difunde rapidamente através do filme. Em síntese, a função do  $\text{TiO}_2$ , além de fornecer suporte para o corante, permitindo um maior aproveitamento da luz incidente, é de coletor e condutor de carga (NOGUEIRA, 2011).

## 2.2.2 CORANTE

A característica que define uma molécula corante é a sua solubilidade no meio em que é exposta. Um corante verdadeiro é solúvel no meio, sendo mantido disperso em uma solução homogênea com pouca tendência de aglomeração. As partículas de corantes podem ser menores que 50 nm. Dentro dessa categoria tem-se uma grande variedade de moléculas corantes para as diversas aplicações (FREITAS, 2006).

Uma dessas aplicações é em dispositivos optoeletrônica de baixo custo. Dentre esses dispositivos destacam-se as células solares orgânicas (FIGURA 3). A eficiência desses dispositivos ainda é limitada, principalmente devido à baixa absorção de luz pela camada ativa e à baixa mobilidade dos portadores de cargas. Parte desse problema pode ser reduzida através da inserção de um terceiro componente na célula, como corantes orgânicos que apresentem elevada absorção de luz na faixa espectral acima de 400 nm. (FREITAS, 2006)



Figura 3: Colocação do corante na célula de Gratzel.

Fonte - AZEVEDO; CUNHA, 2002, p.2.

O princípio de operação se baseia na excitação do corante pela incidência de fótons de luz. Uma vez excitado, fica energeticamente apto a transferir elétrons para a superfície condutora formada pelo  $\text{TiO}_2$  e, em seguida, para a parte superior da célula, onde será coletado o fluxo de elétrons na forma de corrente elétrica. Os corantes foto-excitáveis são os

componentes essenciais das CFSC, através dos quais se baseiam os princípios destas células fotovoltaicas, determinam a sua absorção característica e a resposta espectral (NOGUEIRA, 1998).

O corante representa o elemento chave da célula e deve ser capaz de: absorver luz numa ampla faixa espectral; injetar elétrons na banda de condução do semicondutor a partir do seu estado excitado; mostrar excelente estabilidade que permita a realização de vários ciclos de oxi-redução, gerando o maior tempo de vida operacional possível.

No corante da amora, nota-se a existência de antocianinas, um pigmento natural encontrado na fruta. As antocianinas apresentam faixas intensas de absorção na região visível do espectro, atribuídas aos grupos hidroxila, capazes de se adsorverem quimicamente à superfície do filme semicondutor (PATROCÍNIO; MURAKAMI, 2010).

### 2.2.3 ELETRÓLITO

Segundo Lobo (1996) eletrólito é uma substância que, quando dissolvida em um dado solvente, produz uma solução com uma condutividade elétrica maior que a condutividade do solvente.

O eletrólito tem ampla aplicação nos processos de eletrodo e, a princípio, deve apresentar como propriedades alta solubilidade, alto grau de ionização, estabilidade química e eletroquímica. Com relação às suas aplicações, verifica-se que são bastante amplas: mantém os coeficientes de atividade praticamente constantes, e o número de transporte da espécie eletroativa praticamente igual a zero; diminui a espessura da dupla camada elétrica; mantém a viscosidade, o coeficiente de difusão e o número médio de ligantes constantes, além de incrementar a condutividade em meios de solventes polares, tanto orgânicos quanto inorgânicos (FREITAS, 2006).

O eletrólito escolhido para a execução da célula solar é composto por um par de redox iodo/iodeto ( $I_2/I^-$ ) (FIGURA 4), dissolvido em água destilada.

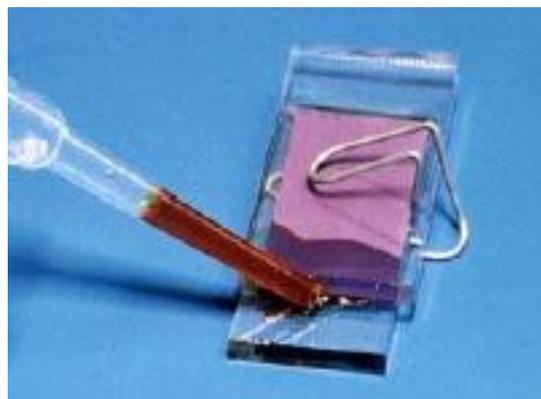


Figura 4: Colocação do eletrólito na célula de Gratzël.

Fonte - AZEVEDO; CUNHA, 2002, p.2.

Neste solvente o iodo prefere existir como íon tri-iodeto, formando uma solução de tri-iodeto/iodeto ( $I_3^-/I^-$ ). Os íons de iodeto reagem com o corante oxidado no filme de  $TiO_2$ , sendo oxidados a tri-iodeto, que por sua vez é reduzido ao estado original no contra-eletrodo (FREITAS, 2006).

### 2.2.4 DIÓXIDO DE ESTANHO

Na célula solar de Gratzël (FIGURA 5), um dos eletrodos estudados para a condução da corrente elétrica e que tem demonstrado um bom potencial para esse tipo de anodo é o de dióxido de estanho (IV),  $SnO_2$ . Ele apresenta alta condutividade, é razoavelmente estável em meios de diferentes pHs, possui alta transparência na região do visível, alta estabilidade térmica, mecânica e química (PIMENTEL; ABRILLA, 1998).

Porém, por se tratar de um material caro e de difícil obtenção, pode-se substituí-lo por pequenas fileiras de fios de cobre, colados na placa solar. O cobre é um dos metais mais usados na fabricação dos fios condutores elétricos, devido, principalmente, às suas propriedades elétricas e mecânicas. Tal procedimento

foi utilizado neste estudo em alternativa para a nanopelícula condutora existente nos vidros especiais de células fotovoltaicas (FIGURA 6).

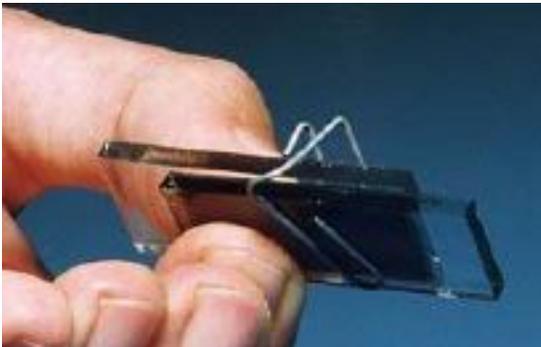


Figura 5: Montagem final da célula de Gratzel.

Fonte - AZEVEDO; CUNHA, 2002, p.2.

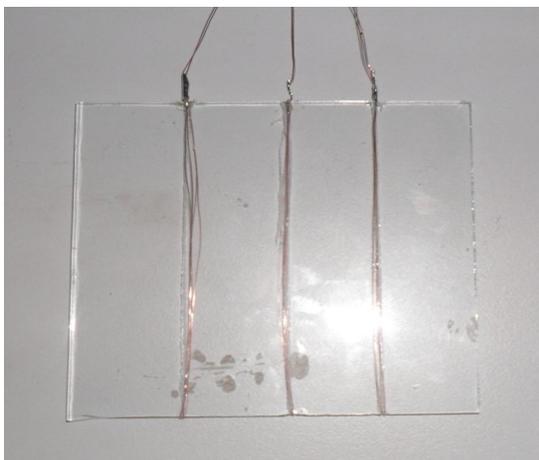


Figura 6: Placa de vidro com fios de cobre.

### 2.3 TRANSFORMAÇÃO DE ENERGIA SOLAR EM ENERGIA ELÉTRICA

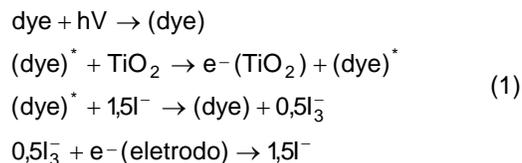
A célula fotovoltaica, proposta por Gratzel, é constituída principalmente por moléculas de um corante, um semiconductor nano cristalino ( $\text{TiO}_2$ ), um eletrólito (solução de Iodo), dois eletrodos de vidro com uma camada condutora e transparente ( $\text{SnO}_2$  -

dióxido de estanho) ou material similar, e um catalisador (grafite ou platina) (FREITAS, 2006).

O eletrodo negativo com  $\text{TiO}_2$  é sensibilizado com a molécula orgânica do corante ("organic dye"), que, ao receber a luz, excita seus elétrons e passa a injetá-los na banda de condução do  $\text{TiO}_2$ , deixando com isso, em suas moléculas, buracos oxidados. Os elétrons que vão para a banda de condução do  $\text{TiO}_2$  podem percorrer um caminho dentro desse semiconductor e chegar ao substrato, quando, então, saem da célula solar nanocristalina sensibilizada (FREITAS, 2006).

O mesmo autor ainda orienta que para facilitar a redução das moléculas na superfície do eletrodo, é depositada uma fina camada de grafite. Ao percorrer o circuito externo, os elétrons chegam ao eletrodo positivo com menor energia, onde completam o ciclo. Para que haja o fluxo da corrente elétrica é necessário ligar os dois eletrodos a uma resistência de carga.

Dentro do eletrólito, o processo de oxi-redução pode ser representado pelas reações entre o corante e as diversas partes da célula fotovoltaica, conforme Equação 1:



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a montagem da célula solar fotovoltaica, realizada no Laboratório de Química do Centro Universitário de Belo Horizonte, foi necessária a utilização de lâminas de vidro, fio de cobre, solda (estanho), dióxido de titânio, vinagre branco, detergente, vela, álcool 70%, água destilada,  $\text{I}_2$  (iodo), KI (iodeto de potássio), epóxi, ferro de solda, cortador de vidro e durex (FIGURA 7).



Figura 7: Materiais utilizados para a fabricação da célula fotovoltaica orgânica otimizada.

Para a preparação da solução de dióxido de titânio, pesou-se 15 g de  $\text{TiO}_2$ , mediu-se 10 mL de vinagre branco e, em um béquer, juntou-se o  $\text{TiO}_2$ , o vinagre branco e 3 (três) gotas de detergente para aumentar a viscosidade da mistura.

Para a solução do corante de amora, foram colocadas, em um béquer, cerca de 50g de amoras, as quais foram devidamente esmagadas.

Já na elaboração das lâminas (que foram lavadas com água destilada, álcool 70% e em seguida secas), foram realizadas linhas verticais, com o cortador de vidro e uma lixa, formando fissuras no vidro para que os fios de cobre fossem soldados nas extremidades de cada linha, substituindo assim o anodo de dióxido de estanho.

Em uma dessas lâminas foi preparado o eletrodo negativo. Em três extremidades da superfície da lâmina foi colocado durex. Em seguida, colocada na superfície descoberta da lâmina a solução de  $\text{TiO}_2$ . Com um bastão de vidro, distribuiu-se a pasta na superfície de modo a se obter um fino filme homogêneo. Após completa evaporação da umidade, foi retirado o durex e colocado o filme formado para cozer. A temperatura utilizada foi de  $450^\circ\text{C}$  à  $550^\circ\text{C}$ , por 10 minutos.

Em outra lâmina, foi preparado o eletrodo positivo. Para isso, sua superfície foi queimada com vela, deixando o vidro escurecido. O eletrodo negativo já resfriado foi mergulhado no corante de amora, permanecendo por 5 minutos. Ao retirá-lo, com

cuidado, as bordas foram limpas e aguardou-se a secagem completa do eletrodo.

A montagem final da Célula pode ser visualizada a seguir nas figuras 8 e 9.



Figura 8: Célula fotovoltaica orgânica.



Figura 9: Célula fotovoltaica orgânica ligada em paralelo.

Para a montagem da Célula, os dois eletrodos foram colocados juntos, de forma que a camada de  $\text{TiO}_2$  ativada com o corante ficasse em contato com a superfície da outra lâmina queimada pela vela.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Partindo da célula montada, foram definidas as etapas de experimentação para a análise do rendimento da energia gerada por esta.

Essas etapas foram divididas em: análise de qual a fonte geradora de energia a ser utilizada; se as células seriam conectadas durante o experimento; se haveria o isolamento do sistema formado entre a fonte de energia e as células do meio externo; medição da tensão gerada por intervalo de tempo.

Para a fonte, optou-se pelo uso de uma lâmpada incandescente com uma potência de 60 W, devido ao fato de ser uma fonte de baixa energia e fácil aquisição. Com a utilização desta fonte de energia, é fornecida ao sistema uma potência de 60 Joules/segundo (célula + fonte), sendo determinada através da equação de potência.

O uso do circuito em paralelo foi determinado por questões de cálculo de diferença de potência, além de apresentar a melhor leitura no equipamento utilizado, o multímetro. O experimento proposto por Gratzël evidenciou que a tensão gerada pela célula padrão é baixa, portanto seria melhor a escolha de um sistema em paralelo, uma vez que, como dito anteriormente, apresenta melhor resolução no equipamento, facilitando a medição.

Na primeira etapa de testes, iniciaram-se as medições sem o isolamento do sistema, para verificar o funcionamento da célula. De início, não foi visualizada nenhuma anomalia na célula, indicando que esta obteve um resultado satisfatório. Entretanto, ao utilizar uma fonte luminosa acrescida à luminosidade ambiente, observou-se que a célula registrava uma diferença de potencial, demonstrando que iluminações locais eram capazes de influenciar a tensão gerada e registrada pelo multímetro. Com essa interferência, foi sugerido o isolamento do sistema (célula + fonte) para medição correta do experimento.

Realizada a medida de tensão das células em um ambiente isolado, verificou-se o comportamento até então não identificado em células propostas por Gratzël. A tensão gerada pelas células não caiu imediatamente após o desligamento da fonte de

energia luminosa. Durante um tempo determinado, as células em paralelo continuavam a gerar uma diferença de potencial pequena, que, no decorrer do experimento, diminuiu gradativamente até retornar ao valor medido no início do experimento. Essa característica evidenciou que a célula se comporta como um capacitor, ou seja, ela é capaz de acumular carga e também de emití-la tão logo a fonte luminosa interrompa a emissão de energia.

Como mencionado por Fragnito (2010), a relação entre tensão e corrente real, em um circuito de malha contendo resistores, capacitores e indutores, pode ser expressa por uma equação integral-diferencial de primeira ordem, conforme Equação 2:

$$\varepsilon = Ri + L \frac{\partial i}{\partial t} + \frac{q}{c} \quad (2)$$

onde:  $[\varepsilon]$  = Tensão [V],  $R$  = Resistência [ $\Omega$ ],  $i$  = Corrente [A],  $L$  = Indutância [Henri],  $\partial i$  = Derivada da corrente [A],  $\partial t$  = Variação do tempo [s],  $q$  = Carga elétrica [C],  $c$  = Capacitância [F]

Como a corrente ( $i$ ) pode ser mensurada através do tempo, é possível definir conforme Equação 3:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = R \frac{\partial i}{\partial t} + L \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} + \frac{\partial q}{\partial t c} \quad (3)$$

onde:  $\partial \varepsilon$  = Derivada da tensão [V],  $R$  = Resistência [ $\Omega$ ],  $L$  = Indutância [Henri],  $\partial i$  = Derivada da corrente [A],  $\partial t$  = Variação do tempo [s],  $\partial^2 i$  = derivada segunda da corrente [A],  $\partial t^2$  = Derivada ao tempo ao quadrado [s],  $\partial q$  = Derivada da Carga elétrica [C],  $c$  = Capacitância [F].

Ainda, considerando que a relação entre a variação de cargas em um intervalo de tempo pode determinar a relação destas com a corrente elétrica, na Equação 4:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = R \frac{\partial i}{\partial t} + L \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} + \frac{i}{c} \quad (4)$$

onde:  $\partial\varepsilon$  = Derivada da tensão [V], R = Resistência [ $\Omega$ ], L = Indutância [Henri],  $\partial i$  = Derivada da corrente [A],  $\partial t$  = Derivada do tempo [s],  $\partial^2 i$  = Derivada segunda da corrente [A],  $\partial t^2$  = Derivada ao tempo ao quadrado [s], i = Corrente elétrica [A], c = Capacitância [F].

Segundo Santos (2005), a célula proposta por Gratzel possui internamente uma resistência que tende a um valor nulo, além de que, por se tratar de um processo de reação química, é possível que se obtenha uma impedância nula do sistema ideal, visto que não gerará uma corrente alternada, e sim corrente contínua. Como a quantidade de placas utilizada no experimento não seria suficiente para medir a corrente em um voltímetro e considerando as alterações propostas por Santos (2005), seria possível projetar uma equação diferencial para descrever os valores de tensão teóricos e obter a corrente teórica gerada pelas células fotovoltaicas. Para tanto, é necessário o cálculo da capacitância das células. Segundo Halliday, Resnick e Walker (2007), pode-se utilizar como base a equação de capacitores de placas, descrita na Equação 5:

$$c = \varepsilon_0 \frac{A}{d} \quad (5)$$

onde: c = Capacitância [F],  $\varepsilon$  = Permissividade elétrica do meio [ $\frac{F}{m}$ ], A = Área da placa [ $m^2$ ], d = Distância entre as placas [m].

Como o principal material nanocondutor na célula é composto de  $TiO_2$ , o fator na permissividade elétrica do meio [ $\varepsilon_0$ ] é 100 vezes o valor deste ( $8,85 \times 10^{-12}$  F/m), e a área de cada célula é de 0,06 m x 0,04 m, e a distância entre as placas é de 0,0004 m. Pode-se, assim, calcular a capacitância unitária, que é de C =  $5,31 \times 10^{-9}$  F por célula.

Como o sistema de células está em paralelo, pode-se calcular a capacitância equivalente diretamente, pela

quantidade de células utilizadas. O valor da Capacitância total é de  $1,062 \times 10^{-8}$  F.

Os valores de medição da tensão no sistema inicialmente encontram-se na tabela (Tabela 1), estes foram usados para definição de uma equação (Equações 6, 7 e 8) que demonstrasse a tensão gerada pelo sistema, com base nos dados fornecidos por Fragnito (2010) e Santos (2005).

Tabela 1

Tensão x tempo das células fotovoltaicas

Tempo (segundos)	Tensão (em mV)
0	-1,5
60	-0,3

Com esses dados, é possível descrever uma equação para o comportamento da tensão x tempo de uma célula fotovoltaica:

$$\frac{\partial\varepsilon}{\partial t} = R \frac{\partial i}{\partial t} + L \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} + \frac{i}{c} \quad (6)$$

Como R = L = 0 então:

$$\frac{\partial\varepsilon}{\partial t} = \frac{i}{c} \quad (7)$$

Deduzimos que:

$$\varepsilon = \frac{it}{c} + k \quad (8)$$

Substituindo os valores encontrados do sistema de células fotovoltaicas com tempo inicial igual a 0 e tempo após 60 segundos, ter-se-á uma corrente de  $2,124 \times 10^{-13}$  A. O valor de corrente é muito baixo, próximo a zero, considerando que o sistema não está ligado a um circuito elétrico. Ainda para que uma corrente elétrica considerável fosse obtida, seria necessária a ligação de várias células fotovoltaicas orgânicas em série, o que não foi testado no estudo supracitado.

Com os dados obtidos, a equação que descreveria a tensão, em função do tempo, gerada na célula proposta, seria conforme Equação 9:

$$\varepsilon = 2,0 \times 10^{-5} \cdot t - 1,5 \times 10^{-3} \quad (9)$$

Com esta equação, estimaram-se os valores de tensão que seriam medidos em uma célula fotovoltaica orgânica, onde é possível a comparação destes com os valores reais de medição. Na Tabela 2 pode-se realizar o comparativo destes valores. Entretanto, ao se realizar as medições no conjunto de células, notou-se valores de tensões diferentes dos esperados e determinados pela equação diferencial. Estas medições permitem o esboço de uma nova avaliação sobre a alteração realizada na célula fotovoltaica proposta por Gratzel, comparando-a com os dados obtidos pela Equação 9.

Tabela 2

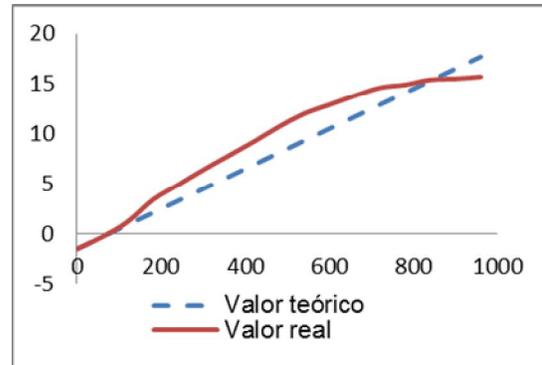
Tensão teórica em função do tempo em células fotovoltaicas

Tempo (segundos)	Tensão Teórica da Célula (mV)	Tensão Real da Célula (mV)
0	-1,5	-1,5
60	-0,3	-0,3
120	0,9	1,2
180	2,1	3,4
240	3,3	4,9
300	4,5	6,4
360	5,7	7,8
420	6,9	9,2
480	8,1	10,7
540	9,3	12,0
600	10,5	12,9
660	11,7	13,8
720	12,9	14,6
780	14,1	14,9
840	15,3	15,4
900	16,5	15,5
960	17,7	15,7

Com base na comparação dos valores, esboçou-se um gráfico das curvas do valor de tensão teórico e do real (GRÁFICO 1).

Gráfico 1

Curva da tensão contínua gerada pelas células fotovoltaicas em paralelo:



Baseando-se nessa análise, a alteração no modelo de Gratzel, com uso de micro terminais de fios de cobre para a condução das cargas geradas no circuito, demonstrou que há um possível fator de resistividade em cada célula. Essa resistividade, cuja característica varia em função da temperatura, ao receber a irradiação, tenderá a perder ainda mais desempenho na geração de uma tensão, com valor máximo previsto para células de Gratzel de 27% (SANTOS, 2005).

Ainda sobre a Célula, constatou-se que houve uma queda de tensão gerada no instante do desligamento da fonte de energia, conforme Tabela 3 e Gráfico 2. Com este desligamento, houve o fluxo de cargas indicando propriedades de um capacitor, conforme proposto na elaboração da equação da célula. Entretanto, há interferências para determinação da equação que descreverá o comportamento dessa capacitância real.

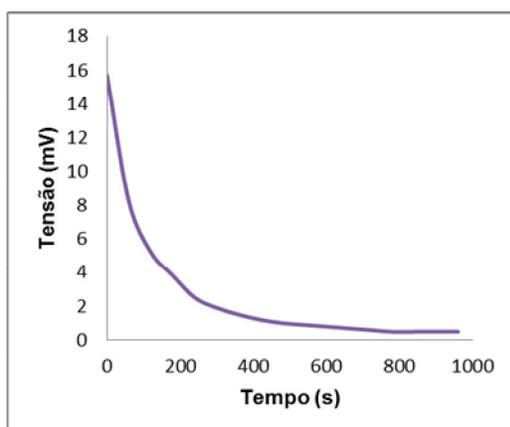
Tabela 3

Perda de tensão nas células x tempo

Tempo (segundos)	Tensão (mV)
0	15,7
60	8,2
120	5,2
180	3,8
240	2,5
300	1,9
360	1,5
420	1,2
480	1,0
540	0,9
600	0,8
660	0,7
720	0,6
780	0,5
840	0,5
900	0,5
960	0,5

Gráfico 2

Queda da tensão x tempo



Segundo Santos (2005), a eficiência de células fotovoltaicas obedece aos princípios da termodinâmica, principalmente pela transformação da energia de radiação por efeito fotovoltaico. Para qualquer reação, há a perda de energia livre na condição de desequilíbrio, que ocasiona uma limitada

potência na liberação de energia. Considerando que em uma célula fotovoltaica não há uma reação química, e sim uma excitação de reagentes pela radiação, tem-se o potencial  $\mu A + hv \leftrightarrow \text{potencial } \mu A^*$ .

Considerando a radiação monocromática com comprimento de onda  $\lambda$ , a energia recebida por mol  $Q_r$  é definida por número de avogadro  $\times hc / \lambda$ . A entropia é dada pela Equação 10:

$$Q_r = \frac{\text{Número de Avogadro} \times Hc}{\lambda} \quad (10)$$

No espectro do visível, uma lâmpada incandescente de 60 W tem uma intensidade (energia por unidade de área a tempo) definida pela constante de Stefan-Boltzmann  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$  dentro do espectro do visível para a célula orgânica entre  $850 \times 10^{-9} \text{ m}$ , onde, segundo Santos (2005) o comprimento de onda em que há a maior absorção de energia para plantas, é possível obter o valor de  $I = 60 \text{ W.m}^{-2}.\text{nm}^{-1}$  emitido pela lâmpada incandescente 60 W.

Ainda para esta lâmpada, tendo a resistência do filamento, é possível estimar a temperatura absoluta. A resistência do filamento informada pelo fabricante é de  $0,15 \Omega$ . Para o cálculo da temperatura gerada na célula tem-se então a Equação 11.

$$T_r = \frac{Hc}{Kb\lambda} \times \frac{1}{\ln\left(1 + \frac{2\Omega Hc^2}{\lambda^5 I}\right)} \quad (11)$$

onde  $T_r$  = Temperatura de qualquer comprimento de onda [K],  $H$  = Constante de Planck [J.s],  $K_b$  = Constante de Boltzmann [J/K],  $\lambda$  = Comprimento de onda,  $\Omega$  = Resistividade da fonte geradora de energia [ $\Omega\text{m}$ ],  $c$  = Velocidade da luz no vácuo [ $\text{m/s}^2$ ],  $I$  = Intensidade de luminosidade [cd].

Dessa forma é possível obter a temperatura  $T_r$  aproximada de 2599 K. Conforme a eficiência de Carnot, ter-se-á o potencial químico máximo gerado pela radiação, que é determinado pela Equação 12:

$$\mu R_m = Q_r \frac{(T_r - T_{\text{ambiente}})}{T_r} \quad (12)$$

onde:  $\mu R_m$  = Potencial químico máximo da radiação [J/mol]  $T_r$  = Temperatura em qualquer comprimento de onda no espectro do visível [k],  $T_{\text{ambiente}}$  = Temperatura ambiente [k].

Como  $Q_r = 140725,62$  J/mol, pode-se então deduzir que  $\mu R_m = 124.483,04$  J/mol, pelo qual é possível definir, através da Equação 13, o valor da entropia do sistema:

$$S = \frac{4(\sigma T^4)}{3T_r} \quad (13)$$

$S$  = Entropia do sistema [j],  $\sigma$  = Constante de Stefan-Boltzmann [ $W/m^2.K^4$ ],  $T_r$  = Temperatura de qualquer comprimento de onda [k].

Obteve-se a variação de entropia gerada em uma célula de 1327,51 j/s.k. Esta seria a entropia prevista para uma célula de Gratzel, caso esta fosse utilizada no experimento citado. Com as alterações na célula, é necessário o cálculo dos valores de temperatura. Para essa medida, será necessária a medição via termômetro digital do calor absorvido pela célula para, assim, mensurar o rendimento da célula.

Segundo Patrício (2006), é possível realizar um cálculo estimado de uma máquina térmica baseado no ciclo de Carnot, levando em conta a temperatura que a célula atingirá durante o experimento. Com base na temperatura calculada para o filamento da fonte e o valor de temperatura, após o tempo de 15 minutos na célula, foi possível obter o valor de 53°C. Usando a equação abaixo, considerando a emissão de energia advindo de uma fonte de 60W, e considerado que a fonte geradora emitiria todos os feixes úteis em direção ao conjunto de células, é possível estimar o cálculo global de rendimento da célula fotovoltaica conforme Equação 14:

$$\eta = 1 - \frac{4TC}{3TF} + \frac{1}{3} \left( \frac{T_c}{T_f} \right)^4 \quad (14)$$

onde:  $TC$  = Temperatura da célula [k],  $TF$  = Temperatura da fonte [k].

Fazendo as devidas substituições, é possível estimar um valor de um rendimento de aproximadamente 16%. Segundo Santos (2005), considerando que o rendimento proposto em uma célula tipo Gratzel para luz difusa é de aproximados 27%, nota-se que a alteração gerou um valor de 62% do valor de energia gerada pela Célula de Gratzel. Não é possível determinar com exatidão o rendimento devido a inúmeras transformações e ajustes em equações utilizadas para tais fins. Estes valores são apenas estimados para um comparativo em vista de resultados obtidos em outras metodologias de rendimento de células fotovoltaicas.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com os problemas que se enfrentam nos dias de hoje em relação ao gasto energético, muitas soluções são criadas e discutidas para combatê-los. A utilização de energias renováveis está sempre presente nas soluções encontradas. Dentre elas, a energia solar ganha grande destaque devido à localização privilegiada da maioria dos países do mundo, principalmente na região de Minas Gerais, no Brasil, que possui um excelente potencial para utilização dessa energia.

Com o objetivo de propor uma solução mais econômica para esse problema que é enfrentado em todo o mundo, no presente trabalho efetuou-se a otimização de uma célula fotovoltaica orgânica de Gratzel, visando reduzir os seus custos em relação aos atuais painéis solares já utilizados. O maior desafio encontrado no projeto foi a substituição do vidro de borossilicato com uma camada condutora de  $SnO_2$  por fios de cobre, formando uma rede condutora sobre a placa de vidro.

Após a conclusão do protótipo da célula em escala reduzida, pode se observar um comportamento caracterizado pela capacidade de produzir energia elétrica a partir do fornecimento de energia solar, além de armazenar essa energia produzida por um intervalo de tempo. Ainda é necessário notar que a célula terá um rendimento menor ao proposto por células tipo Gratzel (SANTOS, 2005), devido ao fator de resistividade interna do sistema, que impactou diretamente nos valores de rendimento dessa célula.

Entretanto, o fator de perda calculado no tempo mensurado no experimento apresentou uma variação pequena, considerando a modificação feita na célula e a energia provida de tal alteração.

Ao término deste projeto obteve-se resultados satisfatórios em relação à alteração no modelo proposto por Gratzel, mostrando a viabilidade em sua elaboração e um possível desenvolvimento de tecnologia para condução da energia produzida pela célula.

---

## REFERÊNCIAS

AZEVEDO, M.; CUNHA, A. **Fazer uma célula fotovoltaica tipo Gratzel**. Avedo – Portugal: Escola Cooperativa Vale São Cosme - Physics on Stage, 1998: 3 páginas.

BECQUEREL, E. Memories sur les effets electriques produits sous influence des rayons. **Paris: comptes rendues**, volume 9, 1839: 591 páginas.

BRITO, M. C.; SERRA, J. M. **Células solares para a produção de energia eléctrica**. 2004: 17 páginas.

CARVALHO, E. F. A.; CALVETE, M. J. F. Energia solar: um passado, um presente...um futuro auspicioso. Aveiro: **Revista Virtual de Química** n. 3, 2010: 192-203 páginas.

FRAGNITO, H. L. **Circuitos de Corrente Alternada**. Campinas: Unicamp - IFGW, 2010: 83 páginas.

FREITAS, F. E. **Célula solar de  $\text{SnO}_2$  /  $\text{TiO}_2$  preparada por spray - pirolise ativada com corante orgânico**. São Paulo: Departamento de engenharia da UNESP, 2006: 106 páginas.

GHENSEV, A. **Materiais e processos de fabricação de células fotovoltaicas**. Lavras: Departamento de pesquisa da Universidade Federal de Lavras, 2006: 154 páginas.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física 3**. São Paulo: LTC, volume 3, 2007: 369 páginas.

LOBO, V. M. M. **Portugaliaeae electrochimica acta**. Paris: volume 14, 1996: 27 páginas.

NASCIMENTO, C. A. do. **Princípio de Funcionamento da célula fotovoltaica**. 2004.

NOGUEIRA, A. F. **Células solares de Gratzel com eletrólito polimérico**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2001: 185 páginas.

NOGUEIRA, A. F. **Conversão de energia luminosa em eletricidade utilizando  $\text{TiO}_2$  / corante; eletrólito sólido polimérico**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 1998: 101 páginas.

NOGUEIRA, R. F. P.; JARDIM, W. F. **A fotocatalise heterogênea e sua aplicação ambiental**. São Paulo: Química Nova nº 21, 1998: 69-73 páginas.

PATROCÍNIO, A. O.; MUROKAMI, N. Y. **Em busca da sustentabilidade: células solares sensibilizadas por extratos naturais**. São Paulo, 2010: 18 páginas.

PIMENTEL, A. S.; ABRILLA, G. Kinetic analysis of gas-phase reactions of methyl vinyl ketone with the OH radical in the presence of NOx. São Paulo: **Journal of the Brazilian Chemical Society** n. 9, 1998: 551-562 páginas.

SANTOS, A. J. **Resistência interna de células fotovoltaicas de Si e  $\text{TiO}_2$** . Maceió: Universidade Federal de Alagoas, 2005: 107 páginas.

RUSSEL, J. B. **Química Geral**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, volume 1, 2ª Edição, 1994: 662 páginas.

SHOCKLEY, W. The theory of p-n junctions in semiconductors and p-n junction transistors. **Bell System Tech**, n. 28, 1949: 435 páginas.

SOBRAL, E. G.; PASKOCIMAS, C. A. **Construção de células solares de corantes fotoexcitáveis utilizando flavonóides da pimenta malagueta**. Rio Grande do Norte: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2007: 74 páginas.