

# Tendências e Progressos da Eletroquímica e Eletroanalítica no Brasil

**CARMEN LÚCIA VOIGT**  
(Organizadora)

 **Atena**  
Editora

Ano 2018



Carmen Lúcia Voigt  
(Organizadora)

# **Tendências e Progressos da Eletroquímica e Eletroanalítica no Brasil**

Atena Editora  
2018

2018 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

**Editora Chefe:** Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Diagramação e Edição de Arte:** Geraldo Alves e Natália Sandrini

**Revisão:** Os autores

#### **Conselho Editorial**

- Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília  
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

#### **Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)**

T291 Tendências e progressos da eletroquímica e eletroanalítica no Brasil [recurso eletrônico] / Organizadora Carmen Lúcia Voigt. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2018.

Formato: PDF  
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader  
Modo de acesso: World Wide Web  
Inclui bibliografia  
ISBN 978-85-85107-36-9  
DOI 10.22533/at.ed.369181909

1. Eletroquímica. I. Voigt, Carmen Lúcia.

CDD 541.37

**Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422**

O conteúdo do livro e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2018

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br) E-mail: [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)

## APRESENTAÇÃO

Nos dias atuais estamos diretamente ligados às tecnologias em desenvolvimento. Muitas vezes não nos damos conta de conhecer todos os processos em evolução e nem mesmo todos os produtos desenvolvidos usados em nosso cotidiano. O conhecimento dos métodos e técnicas utilizados auxilia na compreensão dos sistemas modernos que envolvem a ciência, tecnologia, sociedade e meio ambiente.

Relacionando o desenvolvimento à ciência, está a Química, presente em tudo, por isso chamada de ciência central, sendo uma ponte entre outras ciências. Diversos processos tecnológicos usam diretamente relação com a química para avaliação e avanço em suas pesquisas. Dentre suas diversas áreas, encontra-se a Eletroquímica, que estuda o fenômeno da transferência de elétrons para a transformação de energia química em energia elétrica e vice-versa.

A eletroquímica se faz presente em nossa rotina diária incluindo aparelhos tão utilizados como celulares, relógios e computadores, ou seja, quando falamos nestes dispositivos que possuem uma bateria, desconectados de uma fonte de energia elétrica, que seja oriunda de uma fonte geradora, estamos falando em processos relacionados a essa área da química.

Para desenvolvimento tecnológico, a eletroquímica se divide em eletroanalítica que compreende um grupo de métodos analíticos baseado nas propriedades elétricas de um analito em solução. As técnicas eletroanalíticas podem ser utilizadas em caracterizações entre compostos e validação de novos métodos.

Neste volume, organizado para você, apresentamos estudos eletroquímicos de interação entre nanocarreadores e compostos bioativos, estes apresentam elevado potencial terapêutico, mas dificuldade na obtenção de uma forma farmacêutica estável. Neste contexto estudos bioanalíticos empregam a eletroquímica, surgindo uma nova área que está sendo conhecida como Bioeletroquímica.

Além desta nova área de pesquisa, trazemos técnicas de caracterização usadas no estudo do comportamento de células solares fotovoltaicas. O aumento do interesse por aplicações fotovoltaicas tem estimulado intensivas pesquisas em materiais semicondutores que oferecem maior eficiência de conversão para as células solares. Com isso ocorre avanço tecnológico pensando no meio ambiente.

O meio ambiente também se torna foco quando existe a busca de fontes de energias renováveis, sustentáveis e menos agressivas à natureza. Ainda neste volume apresentamos outro ramo muito interessante da eletroquímica: o uso de eletrodos modificados para processos ambientais, a exemplo da reação de eletro-oxidação de glicerol, um subproduto de biocombustível. A redução eletroquímica do  $\text{CO}_2$  utilizando novos eletrodos também se trata de estudo ambiental que mostramos neste volume.

Além disso, trazemos neste volume estudos com eletrodo de disco rotatório, um dos dispositivos experimentais mais utilizados no estudo de sistemas eletroquímicos, quando a influência do transporte de massa está presente, sendo trabalhos realizados

com cálculos e esquema numérico. Também são apresentadas tendências de validação de métodos eletroquímicos que visam validar metodologias eletroanalíticas, visando atestar a confiabilidade dos resultados gerados por estas técnicas.

Com base nestes experimentos, convidamos você a aperfeiçoar seus conhecimentos no que se refere à eletroquímica e seus diversos ramos. Os experimentos oportunizam uma nova visão de materiais, processos e técnicas na área, como desenvolvimento de novos sensores e eletrodos modificados, interações eletroquímicas, estudos de caracterizações eletroquímicas, cálculos numéricos e validação de metodologias. Enfim, deduz-se que a eletroquímica tem relação direta com a ciência, tecnologia, sociedade e meio ambiente, uma vez que pode ser utilizada em todas as áreas, tendo diferentes funções, mas com um bem em comum, desenvolver novos materiais, processos, métodos e técnicas para uso do homem em auxílio no seu cotidiano, influenciando direta e indiretamente toda a sociedade.

Boa leitura.

**Carmen Lúcia Voigt**

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
CARACTERIZAÇÃO ELETROQUÍMICA DA INTERAÇÃO ENTRE COMPOSTOS BIOATIVOS E DENDRÍMERO PAMAM IMOBILIZADO NA SUPERFÍCIE DO ELETRODO DE OURO	
Anna Caroline Lima Candido Marílya Palmeira Galdino da Silva Emanuela Gomes da Silva Fabiane Caxico de Abreu Galdino Thiago Mendonça de Aquino	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>18</b>
CARACTERIZAÇÃO MOTT-SCHOTTKY EM CÉLULA FOTOVOLTAICA DE SILÍCIO	
Francisco Marcone Lima Vanja Fontenele Nunes Antonio Paulo Santos Souza Ana Fabíola Leite Almeida Francisco Nivaldo Aguiar Freire	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>26</b>
ELECTRODEPOSITION OF CADMIUM TELLURIDE ON CONDUCTIVE GLASS FOR PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS	
Raquele Lima Moreira Francisco Nivaldo Aguiar Freire Ana Fabiola Leita Almeida Francisco Marcone Lima Paulo Herbert França Maia Júnior Manuel Pedro Fernandes Graça	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>36</b>
NANOPARTÍCULAS DE HEXACIANO FERRATO DE RUTÊNIO PARA REAÇÃO DE ELETRO-OXIDAÇÃO DE GLICEROL	
Deracilde Santana da Silva Viégas Deranilde Santana da Silva Ismael Carlos Braga Alves Isaíde de Araújo Rodrigues Aldalea Lopes Brandes Marques	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>53</b>
UTILIZAÇÃO DE POLIACRILAMIDA-CO-DIALILDIMETILAMÔNIO COMO IMOBILIZADOR DE CUO NA REDUÇÃO ELETROQUÍMICA DE CO <sub>2</sub>	
Ruan Roberto Henriques Jorge Amim Júnior Ana Lucia Shiguihara Robson Valentim Pereira Kênia Silva Freitas	
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>66</b>
CARACTERIZAÇÃO ELETROCATALÍTICA DO CuO/Cu NA REAÇÃO DE REDUÇÃO DE CO <sub>2</sub> UTILIZANDO ELETRODO DE DISCO ROTATÓRIO	
Ruan Roberto Henriques	

Robson Valentim Pereira  
Kênia da Silva Freitas

**CAPÍTULO 7 ..... 79**

ANÁLISE NUMÉRICA DO EFEITO DE REAÇÕES HOMOGÊNEAS NA CORRENTE LIMITE DO ELETRODO DE DISCO ROTATÓRIO

Pedro Henrique Moura Leal  
Oswaldo Esteves Barcia  
Oscar Rosa Mattos

**CAPÍTULO 8 ..... 91**

CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA ELETRO-HIDRODINÂMICA ATRAVÉS DE SÉRIES NUMÉRICAS

Oswaldo Esteves Barcia  
Nathália de Almeida Leite da Silva  
Flávio Vieira Vasques de Sousa  
Pedro Rupf Pereira Viana  
Oscar Rosa Mattos

**CAPÍTULO 9 ..... 110**

TENDÊNCIAS E PERSPECTIVAS NA VALIDAÇÃO DE MÉTODOS ELETROANALÍTICOS

Sthéfane Valle de Almeida  
Andressa Galli  
Maria Lurdes Felsner

**SOBRE A ORGANIZADORA..... 122**

## CARACTERIZAÇÃO MOTT-SCHOTTKY EM CÉLULA FOTOVOLTAICA DE SILÍCIO

### Francisco Marcone Lima

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Mecânica, Fortaleza - Ceará

### Vanja Fontenele Nunes

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Mecânica, Fortaleza - Ceará

### Antonio Paulo Santos Souza

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Fortaleza - Ceará

### Ana Fabíola Leite Almeida

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Mecânica, Fortaleza - Ceará

### Francisco Nivaldo Aguiar Freire

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Mecânica, Fortaleza - Ceará

**RESUMO:** Técnicas de caracterização têm sido usadas no estudo do comportamento de células solares fotovoltaicas. Neste trabalho, a técnica eletroquímica Mott-Schottky foi usada na caracterização de células solares fotovoltaicas de silício. Diferente da abordagem tradicional, o chamado comportamento Mott-Schottky foi determinado para uma célula solar em função da densidade de potência luminosa. Além disso, a caracterização foi feita também para células de silício danificadas. As quantidades de densidade de luz usadas foram 0 mW/cm<sup>2</sup>, 20 mW/cm<sup>2</sup>, 40 mW/cm<sup>2</sup>, 60 mW/cm<sup>2</sup>, 80 mW/cm<sup>2</sup>

e 100 mW/cm<sup>2</sup> sob um intervalo de frequências de 0,1 MHz até 10 Hz para cada densidade. O comportamento Mott-Schottky foi identificado à alta frequência. Os gráficos de Mott-Schottky revelaram fotogeração de corrente similar a de um semiconductor do tipo n. Os resultados mostraram que a técnica tem potencial para aplicação na caracterização de dispositivos fotovoltaicos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Células Solares, Silício, Fotovoltaico, Mott-Schottky.

**ABSTRACT:** The several characterization techniques have been used to study the nonlinear electrical behavior in photovoltaic solar cells into generation region of energy. In this work, to explain that behavior was used an approach different than generally has been reported using the Mott-Schottky electrochemical technique. In this technique differently of traditional technique, the Mott-Schottky characterization was made in function of the light energy and frequency. Also, the characterization was made on a photovoltaic device. Silicon photovoltaic solar cells were characterized in the generation region using the photovoltaic Mott-Schottky technique. Furthermore, the characterization was made also in broken silicon cells. The conditions of light energy were 0 mW/cm<sup>2</sup>, 20 mW/cm<sup>2</sup>, 40 mW/cm<sup>2</sup>, 60 mW/cm<sup>2</sup>, 80 mW/cm<sup>2</sup> and 100 mW/cm<sup>2</sup> under scan in the frequency range about



0.1 MHz until 10 Hz per radiation. The Photovoltaic Mott-Schottky plots showed that cells can be described as have an n-type dominant photoconductivity. The flat-band potentials were estimated for the space charge capacitance at a high frequency to mimic cell behavior without the influence of frequency into of the capacitance. The results revealed that the technique has potential to photovoltaic applications.

**KEYWORDS:** Solar Cells, Silicon, Photovoltaic, Mott-Schottky.

## 1 | INTRODUÇÃO

O termo célula solar fotovoltaica é referente a qualquer dispositivo com a propriedade de conversão da energia solar em eletricidade usando uma junção p-n. Estes dispositivos são particularmente importantes na geração de eletricidade usando mecanismo de geração mais limpa. As células solares fotovoltaicas (CSFs) existem em diferentes tipos e cada um é composto por diferentes materiais. Células solares fotovoltaicas têm sido usadas em sistemas de potência como gerador de energia. Um dispositivo fotovoltaico muito importante comercialmente é a célula solar fotovoltaica de silício.

Sob uma fonte de radiação de energia adequada, sol ou fonte artificial, uma corrente elétrica irá fluir através da célula fotovoltaica e uma voltagem associada gera um produto de energia chamado potência elétrica. Para operar neste mecanismo a célula deve apresentar um alto comportamento não linear. As características de corrente e voltagem têm sido geralmente usada como base para estudar o comportamento elétrico de dispositivos fotovoltaicos (CASHMORE et al., 2016, GULI et al., 2013, GUOA et al., 2017, KHALIFA; KAOUACH; CHTOUROU, 2015, XIONG et al., 2014).

Além da caracterização por corrente e voltagem, outras técnicas podem ser utilizadas, entre eles estão à espectroscopia de impedância eletroquímica (COTFAS; COTFAS; KAPLANIS, 2016), eficiência de conversão de fótons para corrente elétrica (TSAI; FEI; WU, 2015), responsividade espectral (BARDIZZA et al., 2016) e Mott-Schottky (JAROSZ, 2008, XIONG et al., 2014). A capacitância uma das propriedades elétricas dos materiais pode ser estudada usando a técnica Mott-Schottky (M-S). O estudo da capacitância pode ser favorável ao entendimento do desempenho de dispositivos fotovoltaico.

A técnica M-S é uma técnica de caracterização de materiais semicondutores. Em M-S, a caracterização dos materiais semicondutores sólidos explora o comportamento da junção sólido/líquido com o uso de célula eletroquímica com três eletrodos e um eletrólito (BONDARENKO; RAGOISHA, 2005, FABREGAT-SANTIAGO et al., 2003, FERNÁNDEZ-DOMENE et al., 2016, KARAZEHIR; ATES; SARAC, 2015, REN et al., 2015, XIONGA et al., 2016, ZHU et al., 2016). Nesta caracterização, a capacitância (C) da junção é determinada a partir da variação do potencial elétrico (E) e da frequência (f). Para a situação onde o quadrado do inverso da capacitância ( $1/C^2$ ) *versus* E gera uma linha reta há o chamado comportamento M-S. De outro modo, o comportamento

M-S é a condição onde a C varia somente em função de E.

Além da abordagem tradicional, a técnica M-S tem sido explorada em dispositivos fotovoltaicos usando a variação de potencial e frequência (JAROSZ, 2008, XIONG et al.,2014). Neste trabalho é reportado o uso da técnica M-S como ferramenta para estudar o comportamento da capacitância de uma junção p-n da célula fotovoltaica. A diferença entre este trabalho e outros citados na literatura é que na caracterização é estudo o comportamento da capacitância em função da radiação luminosa incidente sobre a célula e da variação da frequência para determinar o comportamento M-S de células fotovoltaicas de silício.

## 2 | EXPERIMENTAL

Os materiais usados foram à célula comercial de silício (área ativa de 332.558,92 cm<sup>2</sup>) e os sistemas sanduíches com vidros condutores de óxido de estanho dopado com flúor (A) e frações com e sem camada antirreflexo de célula de silício quebrada (B), isto é, geometria do tipo A/B/A. A camada antirreflexo foi removida usando lixa 1200 e água deionizada.

Para fração de célula de silício sem camada antirreflexo, a caracterização foi feita usando célula eletroquímica com três eletrodos e uma solução de 1 molar de cloreto de potássio (1M KCl) como eletrólito. A fração de silício foi usada como eletrodo de trabalho, placa de platina como contraeletrodo e eletrodo prata/cloreto de prata (Ag/AgCl) como eletrodo de referência. Variação de potencial aplicado foi +0,9 V até -0,9 V e intervalo de frequência de 0,1 MHz até 10 Hz.

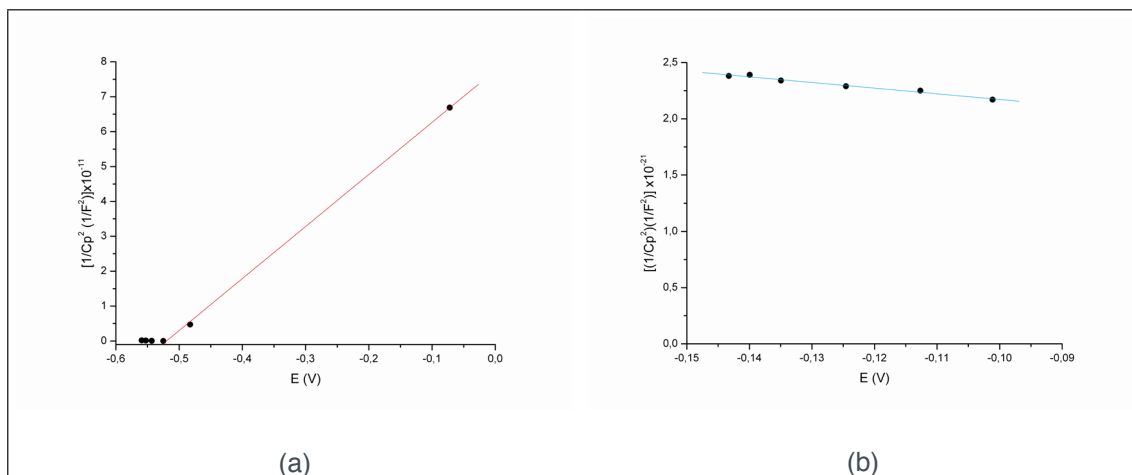
A célula comercial de silício e o sistema A/B/A foram submetidos a intensidades de radiação de 0 mW/cm<sup>2</sup>, 20 mW/cm<sup>2</sup>, 40 mW/cm<sup>2</sup>, 60 mW/cm<sup>2</sup>, 80 mW/cm<sup>2</sup> e 100 mW/cm<sup>2</sup> usando a radiação visível oriunda de fonte de LED e para cada intensidade foi aplicada a variação de frequência de 0,1 MHz até 10 Hz. Todas as medidas foram feitas com auxílio de equipamento para análise eletroquímica potenciostato/galvanostato AUTOLAB (Metrohm) controlado por programada de computador NOVA®.

## 3 | RESULTADO E DISCUSSÃO

A variação de potencial e frequência para determinar a região onde a capacitância é função apenas do potencial tem sido adotada na caracterização de dispositivos fotovoltaicos usando M-S (JAROSZ, 2008, XIONG et al.,2014). A caracterização M-S foi reportada para dispositivo fotovoltaico orgânico com geometria ITO/orgânico/Au (JAROSZ, 2008). Neste trabalho, a caracterização foi baseada na variação de radiação e frequência. O comportamento M-S da capacitância da camada do espaçamento de carga da junção p-n da célula de silício é ilustrado na Figura 1.

A técnica M-S pode ser interpretada como uma técnica eletroquímica que permite

identificar a região onde a capacitância do espaçamento de carga de uma junção (C) é função somente do potencial aplicado (E). Nesta situação, o gráfico  $(1/C^2)$  versus E gera uma reta. A partir de gráficos M-S, como reportado na literatura, a inclinação positiva da reta é atribuído a semicondutores do tipo n (excesso de elétrons na banda de condução), enquanto que a inclinação negativa é associado a semicondutores do tipo p (excesso de lacunas na banda de valência).



**Figura 1.** Caracterização por M-S: (a) Célula comercial de silício e (b) sistema A/B/A.

Na caracterização M-S com junção sólido/líquido, a influencia da frequência sobre a capacitância é considerada desprezível para valores igual ou maior que 1.000 Hz (FERNÁNDEZ-DOMENE et al., 2016, KARAZEHIR; ATES; SARAC, 2015, REN et al., 2015, XIONGA et al., 2016). Na Figura 1 os dados foram obtidos usando 81.113,00 Hz como frequência de referência e com E sendo o potencial gerado em função da quantidade de radiação incidente. A Figura 1a ilustra uma inclinação positiva da reta, enquanto inclinação negativa é visto na Figura 1b.

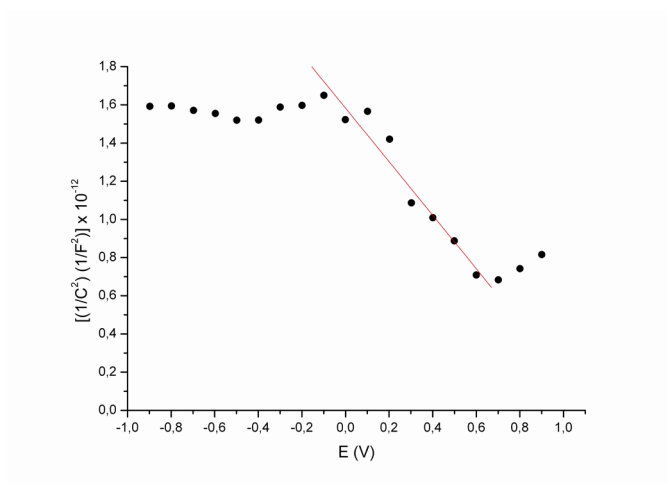
A inclinação positiva (Figura 1a) indica fotogeração de corrente é influenciada pelo tipo n da junção p-n da célula de silício, mas a situação parece ser inversa quando a célula é danificada (Figura 1b). A capacitância na célula danificada pode não ser determinada somente como uma função da quantidade de radiação no sistema A/B/A, onde os efeitos de interface A/B e presença de capturadores de elétrons podem ter contribuído para favorecer a dominância do tipo p na geração de corrente. A variação do comportamento M-S em função do tipo de dispositivo tem sido reportada (REN et al., 2015).

Em um gráfico M-S, a extrapolação da reta em direção ao eixo E permite determinar o valor do potencial de banda plana ( $E_{bp}$ ).  $E_{bp}$  pode ser descrito como a energia necessária para remover a curvatura nas bandas de condução e valência gerada na interface de uma junção de dois materiais semicondutores. A ausência da curvatura induz um fluxo zero de elétrons através da junção.

A inclinação positiva (Figura 1a) pode ser atribuída à condutividade elétrica dominante por elétrons, o qual é similar ao que ocorrem em semicondutores do tipo

n. A partir do resultado é possível denominar a célula de silício como uma célula fotovoltaica do tipo n. Por outro lado, o sistema A/B/A é uma célula fotovoltaica do tipo p, cuja fotocondutividade é dominada por lacunas. A interseção da reta em direção ao eixo E permite estimar os potenciais de banda plana ( $E_{bp}$ ) como - 0,52 V e + 0,33 V para célula de silício e sistema A/B/A, respectivamente.

No caso do contato entre um semiconductor e outro material (condutor, metal, eletrólito ou isolante), uma região chamada de depleção ou camada de espaçamento de carga com cargas positivas e negativas é gerada. Isso ocorre devido à difusão e recombinação de cargas móveis próximas à junção dos materiais. Para semiconductor em contato com eletrólito uma camada de depleção é formada e a capacitância dela é dependente do potencial aplicado. A partir da conhecida dependência da capacitância da camada de depleção em relação ao potencial em uma junção líquida, então foi usada uma célula eletroquímica com configuração de três eletrodos. A Figura 2 ilustra os dados obtidos pela técnica M-S para a célula de silício danificada sem a camada antirreflexo.



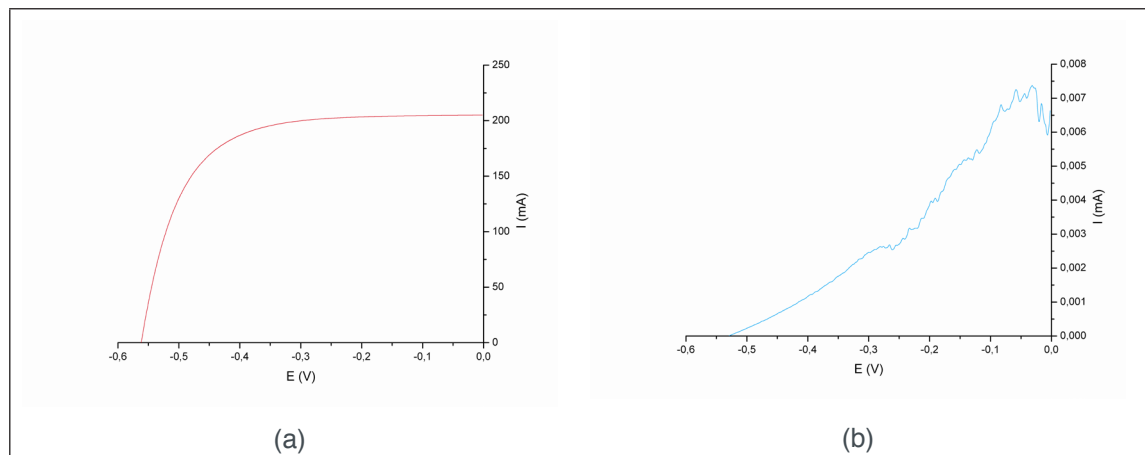
**Figura 2.** Caracterização M-S para célula de silício usando junção sólido/líquido.

A inclinação negativa da reta (Figura 2) ilustra condutividade dominante por lacunas similar aos semicondutores do tipo p e  $E_{bp} = + 1.13$  V. O gráfico M-S mostra que a remoção da camada antirreflexo também induziu a perda da propriedade de conversão da luz em eletricidade, uma vez que o sistema A/B/A não gera eletricidade. Provavelmente, a remoção da camada antirreflexo também resultou na remoção da camada do tipo-n da célula.

Para uma célula solar, a voltagem de circuito aberto ( $E_{ca}$ ) é definida como a quantidade em que a corrente gerada na célula sob iluminação é zero. A partir da curva de corrente (I) *versus* voltagem (E) sob uma iluminação de 100 mW/cm², para célula de silício comercial é identificado  $E_{ca} = - 0,56$  V (Figura 3a) e  $E_{ca} = - 0,52$  V para o sistema A/B/A (Figura 3b). O desvio da curva I *versus* E característica de uma célula fotovoltaica é observado somente na Figura 3b. Este desvio estar relacionado a perdas de energia influenciada pelos defeitos das interfaces A/B.

Uma vez que o valor  $E_{bp} = - 0,52$  V para a célula comercial de silício funcional

é aproximadamente igual ao valor de  $E_{ca}$  da mesma, isto é,  $E_{ca} \sim E_{bp}$ . De forma que, então é possível inferir que  $E_{ca}$  é a energia que induz o desaparecimento da curvatura das bandas de energia na camada de espaçamento de carga da junção p-n da célula. Portanto, a técnica M-S quando é associada à curva *I versus E* identifica a relação entre dois parâmetros ( $E_{ca}$  e  $E_{bp}$ ) importantes na caracterização de materiais e dispositivos.



**Figura 3.** *I versus E* sob  $100 \text{ mW/cm}^2$ : (a) célula comercial de silício e (b) sistema A/B/A.

#### 4 | CONCLUSÃO

A aplicação da técnica M-S para a caracterização eletroquímica de células fotovoltaicas de silício, sobre o comportamento da junção p-n em função da radiação, enquadrou-se como uma ferramenta adequada para determinação de parâmetros de células fotovoltaicas. Quando comparada a técnica M-S com os dados da curva *I versus E*, observou-se que a mesma poderia substituir a curva *I versus E* na determinação de  $E_{ca}$ .

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) pelo auxílio econômico e financeiro para o desenvolvimento deste trabalho.

#### REFERÊNCIAS

BARDIZZA, G. et al. Spectral responsivity measurements of DSSC devices at low chopping frequency (1 Hz). **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, [S.l.], v.24, p.428-435, 2016. Disponível em < <https://doi.org/10.1002/pip.2558>>. Acesso em: 23 maio 2018.

BONDARENKO, A.S.; RAGOISHA, G.A. Variable Mott-Schottky plots acquisition by potentiodynamic electrochemical impedance spectroscopy. **Journal of Solid State Electrochemistry**, [S.l.], v.9, p. 845-849, 2005. Disponível em < <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs10008-005-0025-7.pdf>>. Acesso em: 23 maio 2018.

CASHMORE, J.S. et al. Improved conversion efficiencies of thin-film silicon tandem (MICROMORPH™) photovoltaic modules. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, [S.I.], v.144, p. 84-95, 2016. Disponível em < <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.08.022> >. Acesso em: 23 maio 2018.

COTFAS, D.T.; COTFAS, P.A.; KAPLANIS, S. Methods and techniques to determine the dynamic parameters of solar cells: Review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.I.], v. 61, p. 213-221, 2016. Disponível em < <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.051> >. Acesso em: 23 maio 2018.

FABREGAT-SANTIAGO F. et al. Mott-schottky analysis of nanoporous semiconductor electrodes in dielectric state deposited on SnO<sub>2</sub>(F) conducting substrates. **Journal of The Electrochemical Society**, [S.I.], v.150, p.E293-E298, 2003. Disponível em < <http://jes.ecsdl.org/content/150/6/E293> >. Acesso em: 23 maio 2018.

FERNÁNDEZ-DOMENE, R.M. et al. Photoelectrochemical characterization of anatase-rutile mixed TiO<sub>2</sub> nanosponges. **International Journal of Hydrogen Energy**, [S.I.], v.41, p.18380-18388, 2016. Disponível em < <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.08.012> >. Acesso em: 23 maio 2018.

GULI, M. et al. Preparation and characterization of TiO<sub>2</sub> anode film with spinodal phase separation structure in dye-sensitized solar cells. **Optical Materials**, [S.I.], v. 35, p. 2175-2182, 2013. Disponível em < <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2013.05.041> >. Acesso em: 23 maio 2018.

GUOA, M. et al. An In<sub>2.77</sub>S<sub>4</sub>@conductive carbon composite with superior electrocatalytic activity for dye-sensitized solar cells. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, [S.I.], v.332, p. 87-91, 2017. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2016.07.029>>. Acesso em: 23 maio 2018.

JAROSZ, G. On doubts about mott-schottky plot of organic planar heterojunction in photovoltaic cell. **Journal of Non-Crystalline Solids**, [S.I.], v.354, p.4338-4340, 2008. Disponível em < <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2008.06.077> >. Acesso em: 23 maio 2018.

KARAZEHIR, T.; ATES, M.; SARAC, A.S. Mott-schottky and morphologic analysis of poly(pyrrole-N-propionic acid) in various electrolyte systems. **International Journal of Electrochemical Science**, [S.I.], v.10, p.6146 - 6163, 2015. Disponível em < <http://www.electrochemsci.org/papers/vol10/100806146.pdf> >. Acesso em: 23 maio 2018.

KHALIFA, N.; KAOUACH, H.; CHTOUROU, R. Improvement of a Si solar cell efficiency using pure and Fe<sup>3+</sup> doped PVA films. **Optical Materials**, [S.I.], v. 45, p. 9-12, 2015. Disponível em < <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2015.03.003> >. Acesso em: 23 maio 2018.

REN, C. et al. Physicochemical performance of FeCO<sub>3</sub> films influenced by anions. **RSC Advances**, [S.I.], v.5, p. 20302-20308, 2015. Disponível em < <http://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2015/ra/c4ra14313b> >. Acesso em: 23 maio 2018.

TSAI, C.H.; FEI, P.H.; WU, W.C. Enhancing the efficiency and charge transport characteristics of dye-sensitized solar cells by adding graphene nanosheets to TiO<sub>2</sub> working electrodes. **Electrochimica Acta**, [S.I.], v.165, p.356-364, 2015. Disponível em < <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.02.241> >. Acesso em: 23 maio 2018.

XIONG, D. et al. Crystal structural, optical properties and mott-schottky plots of p-type Ca doped CuFeO<sub>2</sub> nanoplates. **Materials Research Bulletin**, [S.I.], v.83, p.141-147, 2016. Disponível em < <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2016.05.031> >. Acesso em: 23 maio 2018.

XIONG, J. et al. Efficient and stable inverted polymer solar cells using TiO<sub>2</sub> nanoparticles and analyzed by mott-schottky capacitance. **Organic Electronics**, [S.I.], v.15, p.1745-1752, 2014. Disponível em < <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2014.04.041> >. Acesso em: 23 maio 2018.

ZHU, T. et al. High photovoltages of CuFeO<sub>2</sub> based p-type dye-sensitized solar cells. **Journal of**

**Alloys and Compounds**, [S.l.], v.685, p. 836-840, 2016. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.06.231>>. Acesso em: 23 maio 2018.

## **SOBRE A ORGANIZADORA**

**CARMEN LÚCIA VOIGT:** Doutora em Química na área de Química Analítica e Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Especialista em Química para a Educação Básica pela Universidade Estadual de Londrina. Graduada em Licenciatura em Química pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Experiência há mais de 10 anos na área de Educação com ênfase em avaliação de matérias-primas, técnicas analíticas, ensino de ciências e química e gestão ambiental. Das diferentes atividades desenvolvidas destaca-se uma atuação por resultado, como: supervisora de laboratórios na indústria de alimentos; professora de ensino médio; professora de ensino superior atuando em várias graduações; professora de pós-graduação lato sensu; palestrante; pesquisadora; avaliadora de artigos e projetos; revisora de revistas científicas; membro de bancas examinadoras de trabalhos de conclusão de cursos de graduação. Autora de artigos científicos. Atuou em laboratório multiusuário com utilização de técnicas avançadas de caracterização e identificação de amostras para pesquisa e pós-graduação em instituição estadual.



Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-85107-36-9



9 788585 107369