



## **SIMULAÇÃO DE CELULAS SOLARES FOTOVOLTAICAS USANDO O SOFTWARE NI MULTISIM**

**João Luiz Cavalcanti de Farias** – jl.farias@hotmail.com

Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica de Pernambuco  
Rua Benfica 455 Madalena  
50720-001-Recife-PE

**Luis Arturo Gómez Malagón** – lagomezma@poli.br

Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica de Pernambuco  
Rua Benfica 455 Madalena  
50720001-Recife-PE

**Resumo:** Neste trabalho é apresentada uma ferramenta didática para o estudo das células solares fotovoltaicas usando o software NI MULTISIM 11.0 usado na análise de circuitos elétricos. Com este programa foi possível determinar de forma fácil e rápida o comportamento elétrico das células fotovoltaicas de silício e sensibilizada por corante usando os modelos analítico e comportamental, respectivamente. Os resultados das simulações mostraram que as curvas  $V-I$  (tensão – corrente) geradas estão em acordo com os resultados experimentais disponíveis na literatura, fazendo do programa uma ferramenta confiável que poderá ser empregada pelos alunos do curso de engenharia para melhorar o processo de aprendizado das tecnologias fotovoltaicas.

**Palavras-chave:** Células solares, MULTISIM, Silício, Células solares sensibilizadas por corante.

### **1. INTRODUÇÃO**

No estudo e descrição dos fenômenos físicos envolvidos no funcionamento de dispositivos fotovoltaicos se destacam os processos denominados modelagem por circuito equivalente, onde são empregadas equações matemáticas para descrever estes fenômenos do ponto de vista formal. Contudo os fenômenos físicos associados a dispositivos fotovoltaicos são descritos por equações com elevado número de variáveis e onde a relação entre as variáveis não é simples o que torna indispensável o uso de recursos computacionais para solucionar numericamente e representar graficamente os resultados.

Somado a isso, atualmente, tanto em centros técnicos quanto universitários, os alunos têm em seu cotidiano acadêmico um contato frequente com computadores e tecnologias similares e estão cada vez mais se familiarizando com a chamada

aprendizagem assistida por computador. Neste cenário a energia fotovoltaica, que por si só desperta o interesse de vários discentes, pode ter seu estudo impulsionado pela disponibilidade de uma ferramenta amigável que possa assimilar os parâmetros e resolver equações complexas e não lineares de forma rápida e fácil, e com isso o ensino pode então se concentrar em conceitos, critérios e resultados (CASTAÑER & SILVESTRE, 2002).

Sendo importante ressaltar, que o uso da simulação computacional tem destaque não só para no estudo do comportamento das células fotovoltaicas convencionais, como também para analisar alternativas para o desenvolvimento de células mais eficientes (KOID *et al.*, 2006) e avançar em setores ainda em franco desenvolvimento como é o caso das Células Solares Sensibilizadas por Corantes, *Dye Sensitized Solar Cells* (DSSC), (GAGLIARDI *et al.*, 2010) e das chamadas Células Multi-junção ou Tandem (SEGEV *et al.*, 2012).

Portanto, tendo em vista a presente necessidade de uma ferramenta de simulação computacional para o estudo de células solares fotovoltaicas, este artigo tem por objetivo apresentar o software NI MULTISIM 11.0 como uma ferramenta confiável e também amigável, logo de fácil aplicabilidade.

## 2. O SOFTWARE NI MULTISIM

O NI MULTISIM originalmente era chamado de Electronics Workbench (EWB) e foi criado pela empresa Interactive Image Technologies, em 1995, sendo usado principalmente no ensino de eletrônica em faculdades e centros técnicos.

Em 1999, a Interactive Image Technologies se fundiu com a Ultimate Technology, uma empresa de softwares para layout de placas de circuito impresso, dando origem a Electronics Workbench, sendo este um marco importante, pois o EWB, até então conhecido apenas como uma ferramenta de ensino, evoluiu para versões mais complexas e também profissionais dando origem as ferramentas MULTISIM, para projeto e simulação de circuitos, e UltiBOARD, para projeto e elaboração de placas de circuito impressos.

Já em 2005 a Electronics Workbench foi adquirida pela National Instruments, dando origem ao grupo National Instruments Electronics Workbench e desde então a ferramenta é conhecida como NI MULTISIM e conta com uma serie de novos recursos que lhe dão destaque em aplicações profissionais. Contudo a National Instruments tem mantido o legado educacional da versão original do NI MULTISIM em uma versão específica com características desenvolvidas para a eletrônica de ensino (National Instruments Brasil, 2013).

### 2.1. O diferencial do software

O grande diferencial do software NI MULTISIM encontra-se no fato de ele ser um dos poucos softwares de designs de circuitos que emprega a simulação com ênfase em circuito integrado (SPICE) (TECH SPICE, 2013). Esta característica coloca o NI MULTISIM na frente de diversos outros softwares que usam de linguagens e algoritmos ditos complexos. Pois, por exemplo, na “Figura 1” estão representados o mesmo modelo para geração do espectro de irradiância ilustrado na “Figura 2”, sendo a direita a interface do software NI MULTISIM e a esquerda a interface do software PSpice.

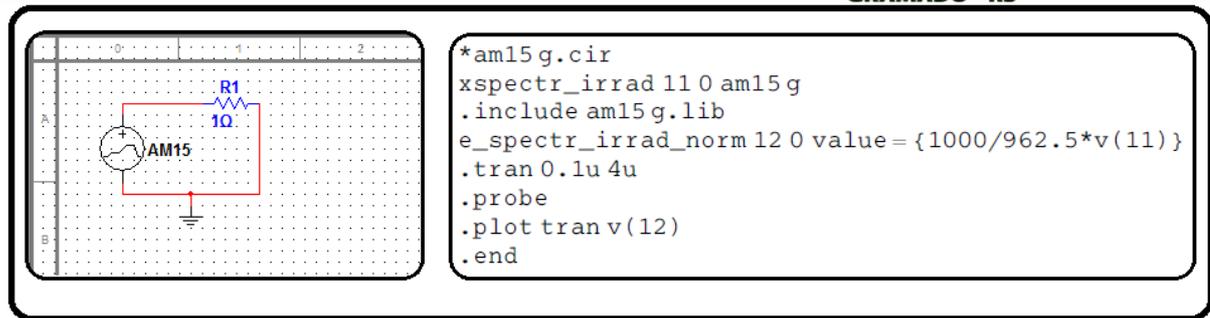


Figura 1 - Interface dos softwares NI MULTISIM e PSpice.

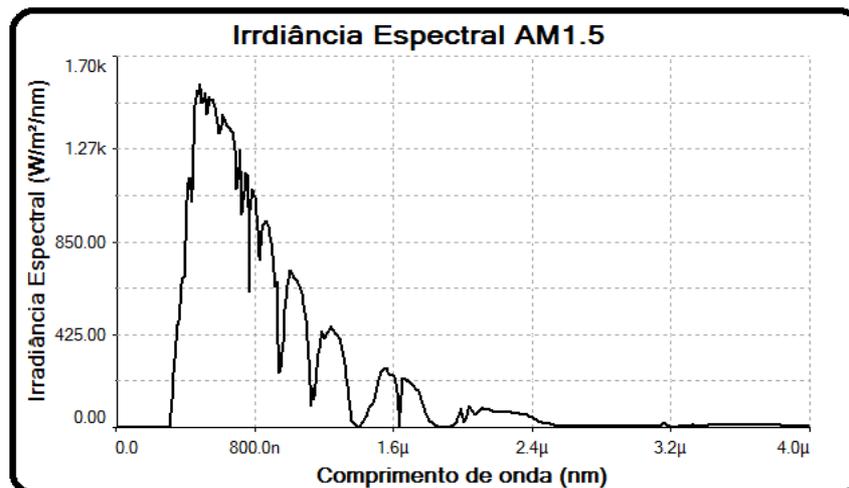


Figura 2 - Irradiância espectral AM1.5.

Conforme ilustrado na “Figura 2” o resultado da simulação é o mesmo, contudo ao observando-se a “Figura 1” percebe-se uma diferença marcante entre as interfaces dos softwares, sendo para a maioria dos estudantes de engenharia a interface do NI MULTISIM mais agradável e familiar. Este apresenta um circuito onde os componentes, uma fonte de tensão e uma resistência, são facilmente identificados pelos estudantes, já na interface do PSpice está presente um algoritmo, onde, por exemplo, a sintaxe “e\_spectr\_irrad\_norm 12 0” representa uma fonte de tensão, contudo tal sintaxe não faz sentido algum para alguém que não conheça o software.

Portanto o software NI MULTISIM ao utilizar uma interface com designs de circuitos se destaca didaticamente dentre outras plataformas SPICE, pois acaba por facilitar a compreensão do modelo de simulação empregado e de certa forma acelerar o aprendizado e a fixação dos conceitos e critérios, neste caso associados à simulação de dispositivos fotovoltaicos. Além disso a interpretação dos resultados será mais satisfatória, pois os discentes terão mais facilidade em se familiarizar com ferramenta e, por conseguinte, com os modelos utilizados na simulação.

## 2.2. Blocos hierárquicos

Outro ponto que merece destaque no software NI MULTISIM é o seu design hierárquico que permite ao usuário a construção de uma hierarquia de circuitos interligados, que, por meio dos chamados blocos hierárquicos, aumenta a reutilização de seus projetos e também melhora a interação entre os discentes durante projetos em grupo.

Por exemplo, na “Figura 3” está ilustrado um projeto onde foi gerada a hierarquia por meio de blocos hierárquicos, onde se tem indicado em vermelho o chamado arquivo principal, SIMULACAO DSSC, e indicado em verde os blocos hierárquicos, PARAMETROS(HB1) e MODELO COMPORTAMENTAL. Neste tipo de modelo hierárquico são armazenados arquivos independentes para cada um dos blocos hierárquicos, ou seja, este projeto apresenta 3 arquivos armazenados sendo um o arquivo principal e os demais arquivos contendo os blocos hierárquicos.

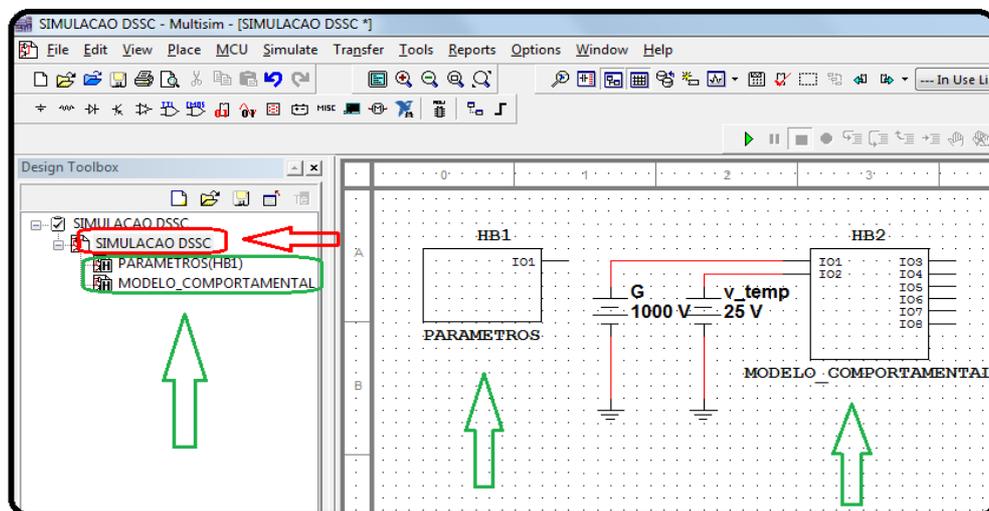


Figura 3 - Design hierárquico NI MULTISIM.

Com este tipo de estrutura hierárquica, por exemplo, é possível a construção de uma biblioteca de circuitos usados e o seu armazenamento em um local específico, caso haja utilização de um destes circuitos da biblioteca em mais de um projeto, um posterior refinamento do circuito original, existente na biblioteca, acarretará em uma atualização de suas cópias presentes nos diversos projetos, claro desde que as cópias estejam referenciadas ao circuito original.

É possível também, por exemplo, durante uma aula serem realizadas simulações de células fotovoltaicas de diferentes matérias alternando apenas o arquivo ao qual o bloco hierárquico PARAMETROS faz referência, conseguindo assim uma fluência durante a aula e possibilitando ao docente focar no ensino dos conceitos e na análise dos diferentes resultados obtidos para cada simulação.

### 3. MODELO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA

#### 3.1. Modelo Analítico

No estudo de células fotovoltaicas é comum a utilização de modelos de circuito equivalente para simulação e análise de alguns parâmetros físicos inerentes ao funcionamento destes dispositivos.

Tendo em vista que a célula solar é um semicondutor, esta pode ser representada, por exemplo, usando o modelo de Um Diodo como é mostrado na “Figura 4”, para representar células fotovoltaicas ideais. Neste modelo tem-se uma fonte de corrente que representa a corrente que circula através da célula fotovoltaica quando a radiação solar incide sobre a mesma, e um diodo que representa o material semicondutor do qual é feita a célula fotovoltaica (KALOGIROU, 2009).

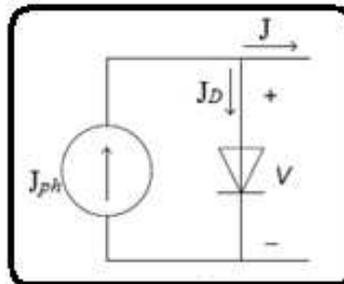


Figura 4 - Modelo de Um Diodo (KALOGIROU, 2009).

Este modelo possui algumas variantes, ilustradas na “Figura 5”, onde são adicionadas a resistência interna ( $R_S$ ), que é inerente a dispositivos reais, e a resistência shunt ( $R_{SH}$ ), que é uma representação para perdas por falhas na célula, devido a problemas de fabricação, por exemplo. Estas variantes tornam os resultados, obtidos em simulações utilizando o Modelo de Um Diodo, mais realísticos (KALOGIROU, 2009).

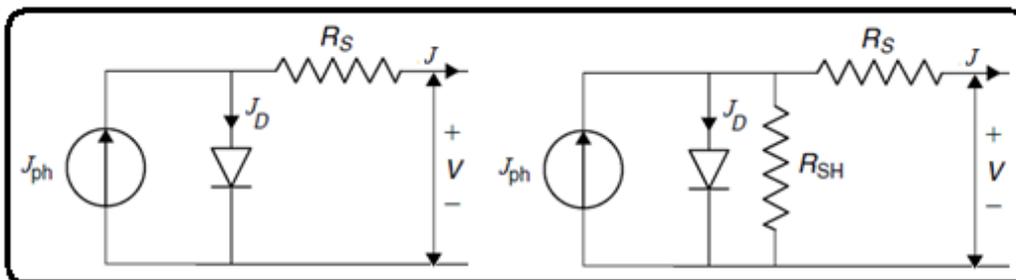


Figura 5 - Variantes do Modelo de Um Diodo (KALOGIROU, 2009).

Podendo a simulação de uma célula solar fotovoltaica de silício ser realizada com o modelo de Um Diodo usando suas constantes obtidas de dados experimentais. Usando este modelo é observado que este descreve a curva tensão – corrente com erro  $<2\%$  em acordo com as simulações reportadas na literatura (FERNANDEZ, *et al.* 2008).

Um modelo mais completo que o Modelo de Um Diodo seria o denominado Modelo de Dois Diodos, ilustrado na “Figura 6”. Este leva em conta, além da resistência

interna da célula ( $R_s$ ) e da resistência shunt ( $R_{sh}$ ), presentes nas variantes do Modelo de Um Diodo, o processo denominado recombinação, fenômeno este que acarreta em perdas de eficiência na célula e que é representado no circuito equivalente com a adição de um diodo, daí a denominação dada ao modelo (CASTAÑER & SILVESTRE, 2002).

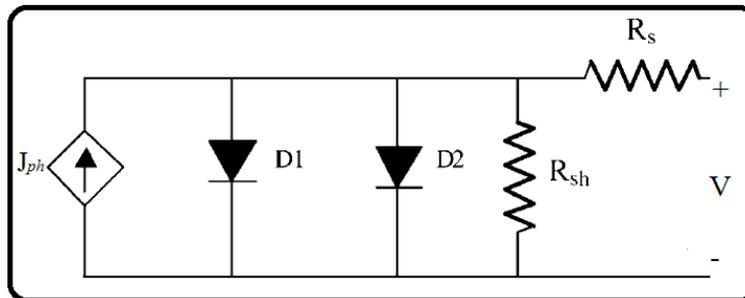


Figura 6 - Modelo de Dois Diodos(CASTAÑER & SILVESTRE, 2002).

Sendo estes modelos facilmente representados pelo software NI MULTISIM como é mostrado na “Figura 7”, por exemplo, para o modelo de Um Diodo.

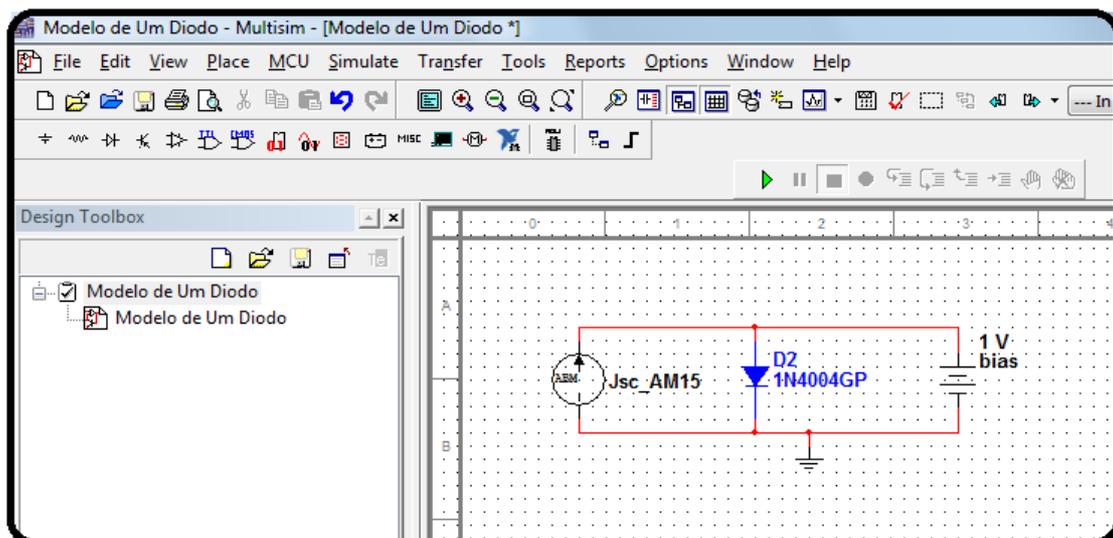


Figura 7 - Representação do modelo de Um Diodo usando NI MULTISIM

Além dos modelos baseados em diodos, um modelo que se destaca, por sua precisão nos resultados obtidos, é o Modelo Analítico. Este necessita de informações de entrada tais como o comprimento de onda da radiação solar ( $\lambda$ ), o espectro de absorção do material semiconductor ( $\alpha(\lambda)$ ), a irradiância espectral ( $I\lambda$ ) e a reflexão sofrida pela radiação solar em função do comprimento de onda ( $R(\lambda)$ ). Após o processamento usando o modelo analítico obtêm-se como saída a corrente de curto circuito espectral no emissor ( $J_{sce}(\lambda)$ ) e na base ( $J_{scb}(\lambda)$ ), a corrente de curto circuito total ( $J_{sc}$ ), a eficiência quântica em função do comprimento de onda ( $EQ(\lambda)$ ) e a resposta espectral apresentada pela célula fotovoltaica ( $SR(\lambda)$ ). A “Figura 8” mostra as entradas e saídas do modelo analítico (CASTAÑER & SILVESTRE, 2002).

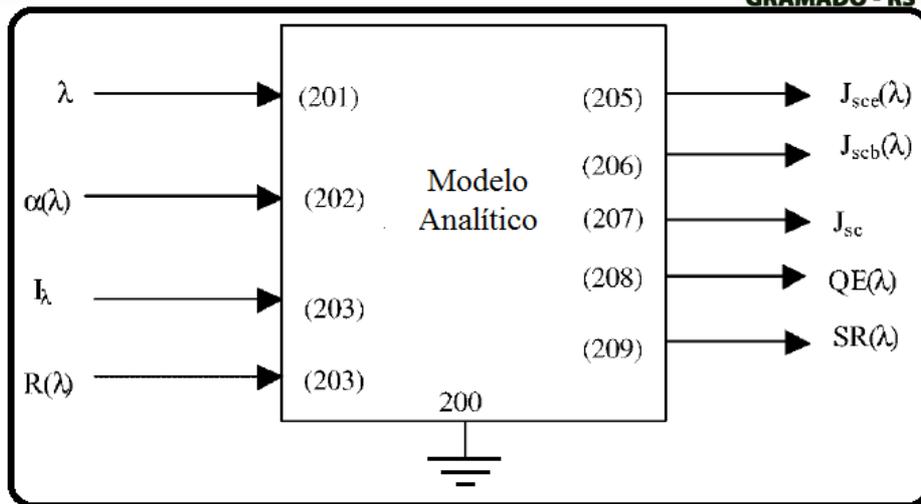


Figura 8 - Esquemático do Modelo Analítico (CASTAÑER & SILVESTRE, 2002).

Contudo o Modelo Analítico e os modelos de diodo, mesmo os mais sofisticados, apresentam aplicabilidade, em certas ocasiões, limitada. Para tanto foram desenvolvidos alguns modelos que são capazes de representar de forma mais realística e precisa o comportamento das células fotovoltaicas, como é o caso do denominado Modelo Comportamental.

### 3.2. Modelo Comportamental

O Modelo Comportamental, do inglês Behavioral Model, é um modelo baseado em fontes de tensão e de corrente, conforme ilustrado na "Figura 9", sendo capaz de modelar corretamente o comportamento de uma célula fotovoltaica em condições arbitrárias de irradiância e temperatura (CASTAÑER & SILVESTRE, 2002).

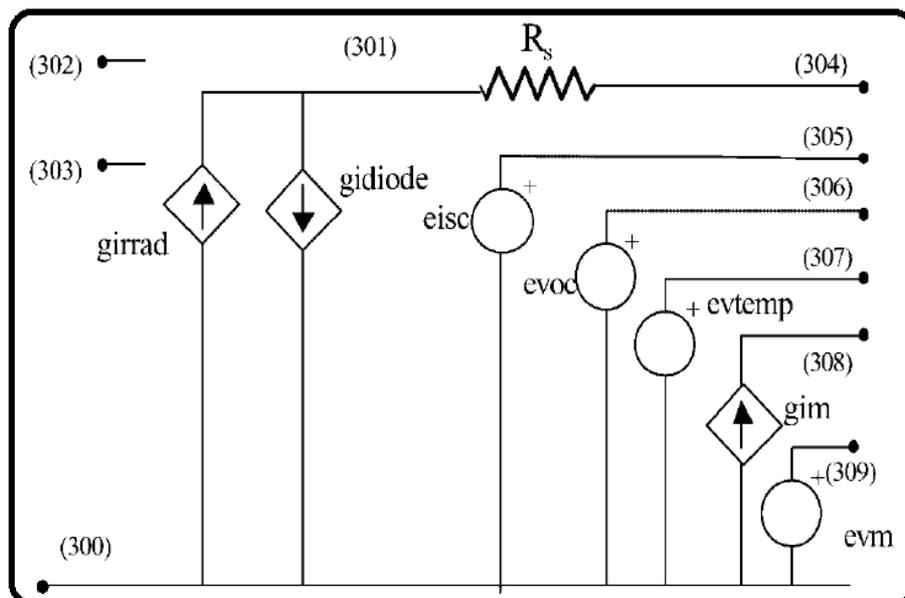


Figure 9 - Modelo Comportamental (CASTAÑER & SILVESTRE, 2002).

Este modelo assume que a célula fotovoltaica pode ser modelada a partir de duas fontes de corrente “girrad” e “gidiode” e uma resistência em série ( $R_s$ ), sendo as demais fontes de tensão e corrente, pontos de saída de dados relevantes no estudo de células fotovoltaicas, tais como corrente de curto circuito ( $i_{sc}$ ) e tensão de circuito aberto ( $v_{oc}$ ), entre outros.

As fontes de corrente “girrad” e “gidiode” têm suas saídas analiticamente controladas, o que se torna possível graças a funcionalidade do software que apresenta componentes empregados na Modelagem de Comportamento Análogo, *Analog Behavioral Model* (ABM), ou seja, componentes capazes de gerar sinais de corrente segundo equações matemáticas.

A representação do modelo comportamental usando o software NI MULTISIM é mostrada na “Figura 10”.

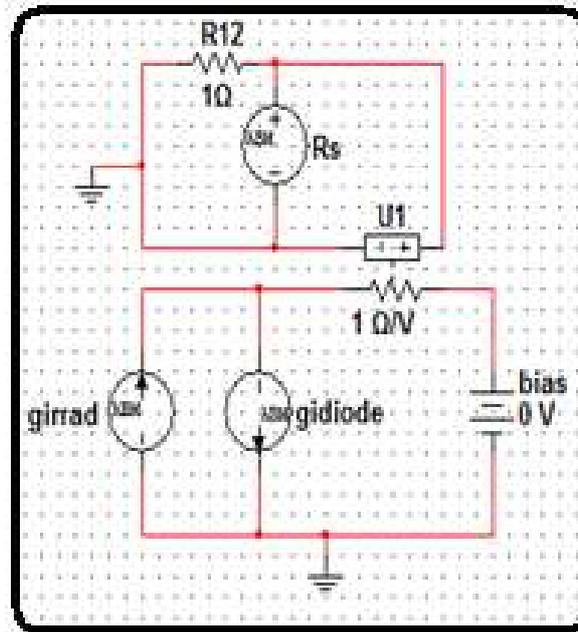


Figura 10 - Representação do modelo comportamental usando NI MULTISIM

Como o Modelo Comportamental pode ser alimentado com dados de valores elétricos, tais como corrente de curto circuito, tensão de circuito aberto e potência máxima, como única entrada, ele se apresenta extremamente aplicável, pois é comum a apresentação destes dados nas folhas de dados das células fotovoltaicas principalmente em casos onde a célula estudada ainda não possui parâmetros de funcionamento bem definidos como é o caso das células sensibilizadas por corante.

A simulação deste tipo de células foi realizada tendo como base os dados experimentais de uma célula sensibilizada por corante com máxima eficiência apresentada na Solar Cells Efficiency Tables (GREEN, M. 2012). Os dados da célula selecionada são mostrados na “Figura 11”.

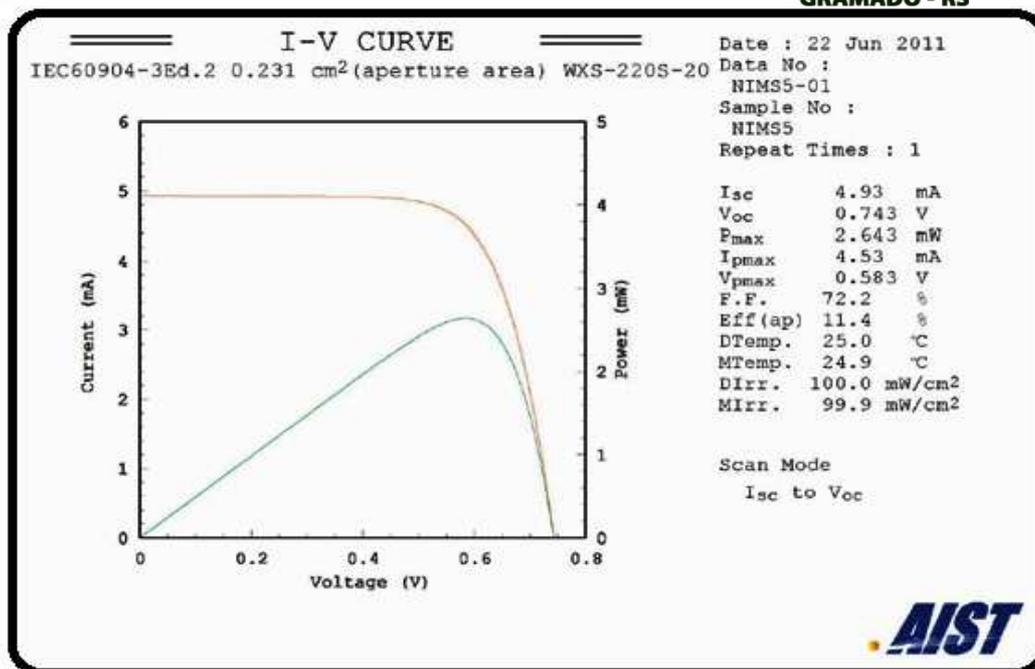


Figura 11 - Folha de dados da célula sensibilizada por corante (GREEN, M. 2012).

A partir da folha de dados da célula selecionada, as fontes ABM girrad, gidiode e Rs, foram moduladas segundo as equações do modelo comportamental.

Já para análise da simulação foi usado o processo denominado DC sweep, ou seja, a varredura de um dispositivo de corrente contínua (DC), sendo este dispositivo uma fonte denominada bias. Quando efetuada esta análise no NI MULTISIM, o ponto de operação do componente DC é identificado, o valor da fonte é incrementado e em seguida outro ponto de operação é calculado. De forma resumida, tem-se a leitura da corrente que flui através da fonte DC “bias” para cada incremento que é feito na tensão gerada por esta fonte, sendo tanto o valor do incremento quanto o range valores configuráveis pelo usuário.

Como resultado desta análise é gerada pelo software a curva característica da célula fotovoltaica, onde, a partir desta curva, é possível fazer a leitura dos principais parâmetros de funcionamento da célula e realizar a comparação entre os resultados obtidos pelo modelo comportamental e os dados experimentais. Sendo esta análise expressa na “Tabela 1”.

Tabela 1 - Análise dos resultados de simulação da célula sensibilizada por corante.

Parâmetro	Experimental	Simulado	Erro(%)
Corrente de curto-circuito	4,93 mA	4,881 mA	0,99
Tensão de circuito aberto	743 mV	743,2 mV	0,02
Potência máxima	2,643 mW	2,549 mW	3,56
Corrente no ponto de máx.	4,53 mA	4,553 mA	0,51
Tensão no ponto de máx.	583 mV	560 mV	3,94
Fator de preenchimento	72,2%	70,28%	2,66
Eficiência	11,4%	11,04%	3,15

Conforme análise da “Tabela 1” percebe-se que os resultados obtidos a partir da simulação com auxílio do modelo comportamental e do software NI MULTISIM se aproximam de forma satisfatória dos dados levantados experimentalmente. Ainda na tabela tem-se na coluna “Erro(%)” o erro gerado durante a simulação para cada um dos parâmetros estudados, com erros não superiores a 4% o que destaca a confiabilidade do software e do modelo de simulação.

#### **4. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O uso do software NI MULTISIM por meio da implementação do modelo comportamental permitiu a simulação de células fotovoltaicas sensibilizadas por corante, onde foram obtidos resultados que estão de acordo com os valores experimentais reportados na literatura.

Estes resultados reforçam a aplicabilidade do software NI MULTISIM para simulações na área de estudos fotovoltaicos, já que o software além de se apresentar com uma didática certamente melhor que a maioria dos demais softwares presentes no mercado, o NI MULTISIM se destacou também pela confiabilidade de seus resultados.

Especificamente, o software poderá ser empregado na disciplina “Fontes Alternativas de Energia” do curso de graduação do curso de Engenharia Mecânica, e também na disciplina “Física das células solares” do programa de pós-graduação em Tecnologia da Energia da Universidade de Pernambuco.

#### *Agradecimentos*

Os autores agradecem ao CNPq pelo suporte financeiro.

#### **5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

CASTAÑER, Luis; SILVESTRE, Santiago. Modelling Photovoltaic systems using PSpice. 1. ed. Barcelona: John Wiley & Sons, 2002.

FERNANDEZ, Hernam. et al. Modelo Genérico de células fotovoltaicas. Universidad, Ciencia y Tecnología, v. 12, n. 48, p. 157 – 162, 2008

GAGLIARDI, Alessio. et al. Multiscale Modeling of Dye Solar Cells and Comparison With Experimental Data. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, v. 16, n. 6, p. 1611-1618, 2010

GREEN, Mastin A. et al. Solar cell efficiency tables (version 39). Progress in Photovoltaics: Research and Applications. v. 20, p. 12-20, 2012.

KALOGIROU, Soteris. Solar Energy Engineering. 1 ed. Burlington: Elsevier Inc., 2009.

KOIDE, Naoki. et al. Improvement of efficiency of dye-sensitized solar cells based on analysis of equivalent circuit. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, v. 182, p. 296-305, 2006



NATIONAL INSTRUMENTS BRASIL. National Instruments Electronics Workbench Group – EWB. Disponível em: < <http://brasil.ni.com/academia/multisim/ewb>> Acesso em: 13 jun. 2013.

SEGEV, Gideon. et al. Equivalent circuit models for triple-junction concentrator solar cells. Solar Energy Materials and Solar Cells, v. 98, p. 57-65, 2012.

TECH SPACE. Spice (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis). Disponível em: < <http://techspaceofatul.wordpress.com/2010/09/29/spice-simulation-program-with-integrated-circuit-emphasis/>> Acesso em: 13 jun. 2013.

## **SIMULATION OF PHOTOVOLTAIC SOLAR CELLS USING THE NI MULTISIM SOFTWARE**

**Abstract:** *In this work is shown a didactical tool to study photovoltaic solar cells using the NI MULTISIM 11.0 software used to analyze electric circuits. With this program was possible to determine in an easy and fast way the electrical behavior of photovoltaic solar cells of silicon and dye sensitized using the analytical and behavioral model respectively. The simulation results shown that the V-I (voltage-current) curves generated are in agreement with the experimental results available in the literature, making of the program a trustable tool that can be used by the students of the engineering courses to improve the learning process of photovoltaic technologies.*

**Key-words:** *solar cells, MULTISIM, silicon, Dye Sensitized Solar Cells*