

08 a 11 de Outubro de 2018  
Instituto Federal Fluminense  
Búzios - RJ

## MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO COM MODELICA

**Yann Carlos de Ávila Ferreira**<sup>1</sup> – yanncarlos\_avila@hotmail.com

**Max Tatsuhiko Mitsuya**<sup>1,2</sup> – maxmitsuya@yahoo.com.br

**Anderson Alvarenga de Moura Meneses**<sup>1,2</sup> – anderson.meneses@pq.cnpq.br

<sup>1</sup> Universidade Federal do Oeste do Pará, Instituto de Engenharia e Geociências, Laboratório de Inteligência Computacional – Santarém, PA, Brasil.

<sup>2</sup> Universidade Federal do Oeste do Pará - Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais da Amazônia - Santarém, PA, Brasil.

**Resumo.** Simular um sistema torna-se significativamente importante a partir do momento que a implementação de um sistema físico real pode ser caro e/ou perigoso. Além disto, é possível testar facilmente os parâmetros dos modelos. O presente trabalho aborda a modelagem bloco a bloco de um módulo fotovoltaico, de acordo com seu modelo matemático. Para a construção do modelo foi utilizado o ambiente OpenModelica v1.12.0 que baseia-se na linguagem Modelica. Para a validação do modelo, foram comparados os valores obtidos na simulação com os fornecidos pelo datasheet do módulo KC200GT da fabricante KYOCERA. Em comparação com software MATLAB®/Simulink, o modelo simulado com OpenModelica apresentou tempo computacional menor, cerca de 0,267 s mais rápido, e com valores médio de erro inferiores a 0,045 em todos os testes realizados.

**Palavras-chaves:** Modelagem, Simulação, Módulo fotovoltaico, Modelica e OpenModelica.

### 1. INTRODUÇÃO

Uma das formas de aproveitar a energia proveniente do sol, se dá através da energia fotovoltaica, que consiste na obtenção de eletricidade convertida da radiação solar por intermédio das células fotovoltaicas.

O rendimento de aplicar recursos como a energia fotovoltaica depende de condições meteorológicas, tais como a variação de temperatura e irradiância ao longo do dia. Tendo isso em vista, é de suma importância desenvolver modelos matemáticos que possam prever de forma confiável a potência do sistema antes de qualquer investimento (Altshuller *et al.*, 2017).

Aliado a isso, existem no mercado diversos *softwares* desenvolvidos para auxiliarem no desenvolvimento da modelagem e simulação destes sistemas para uma melhor análise de

desempenho do mesmo. No presente trabalho apresentamos a modelagem e simulação de um módulo fotovoltaico utilizando a linguagem Modelica através do *software OpenModelica*, cujos resultados foram comparados com os obtidos com *software MATLAB®/Simulink*.

## 2. MODELO MATEMÁTICO

Um módulo fotovoltaico é formado por uma associação de células fotovoltaicas conectadas em série ou em paralelo entre si (Li *et al.*, 2017). São normalmente identificado pela sua potência elétrica de pico calculada de acordo com as condições-padrão de ensaio, ou seja, quando a irradiância solar assumida é igual a 1000 W/m<sup>2</sup> e temperatura 25°C, (Pinho & Galdino, 2014). Com o objetivo de definir as características elétricas de um módulo fotovoltaico pode ser feito um ensaio para estabelecer a curva I-V do painel. Para tanto pode-se utilizar o modelo de diodo único (Fig. 1), o qual é regido pela equação (Villalva *et al.*, 2009).

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V+R_s I)}{N_s k T a}\right) - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_p} \quad (1)$$

onde  $I_{ph}$  é o valor da corrente que é provocado pela incidência da luz solar no painel;  $I_0$  é a corrente de saturação do diodo,  $q$  é a carga do elétron ( $1,602 \times 10^{-19}$  C);  $a$  é a constante de idealidade do diodo podendo assumir para fins de modelagem um valor entre 1 e 1,5;  $k$  equivale a constante de Boltzmann igual a  $1,380 \times 10^{-23}$  J/C;  $T$  é o valor da temperatura ambiente em Kelvin;  $N_s$  refere-se ao número de células em série;  $R_s$  e  $R_p$  são as resistências em série e em paralelo, respectivamente.

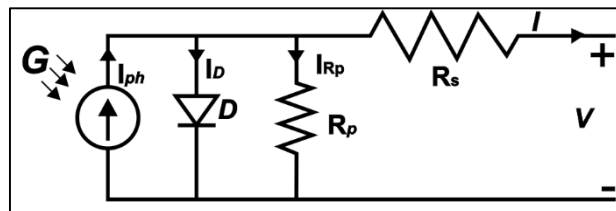


Figura 1. Representação do circuito de um diodo único em um módulo fotovoltaico.

Fonte: Adaptado de Muhsen *et al.* (2016).

Algumas informações relevantes para o ajuste mais adequado do módulo não são informadas pelo *datasheet* do fabricante, tais como a corrente gerada pela luz solar no módulo ( $I_{pv,n}$ ), a constante de idealidade do diodo ( $a$ ), as resistências ( $R_s$  e  $R_p$ ) e a corrente de saturação do diodo ( $I_0$ ). Os *datasheets* somente informam a corrente de curto circuito nominal ( $I_{sc,ref}$ ), sendo assim, assume-se que  $I_{sc,ref} \approx I_{pv,n}$  uma vez que em dispositivos práticos a resistência em série é baixa e a em paralelo é alta (Villalva *et al.*, 2009).

Para definir a corrente gerada pelos fótons presentes na luz solar, aplica-se

$$I_{ph} = (I_{pv,n} + K_i \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad (2)$$

onde  $K_i$  é o coeficiente de temperatura de curto circuito;  $\Delta T$  é a taxa de variação entre a temperatura ambiente e a temperatura de referência, ambas em Kelvin;  $G$  é a irradiância na superfície da placa e  $G_n$  é irradiância de referência, medidos em W/m<sup>2</sup>.

É possível calcular a corrente no diodo seguindo a equação,

$$I_0 = \frac{I_{sc,ref} - K_t \Delta T}{\exp((V_{oc,n} + K_V \Delta T)/aV_t) - 1} \quad (3)$$

em que  $V_t$  é igual a  $N_s kT/q$  e  $K_V$  refere-se ao coeficiente de temperatura de circuito aberto.

### 3. MODELICA

Modelica é uma linguagem de modelagem que possibilita especificar modelos matemáticos de sistemas naturais ou artificiais, além de ser uma linguagem de programação baseada em equações orientadas a objetos para aplicações computacionais (Fritzon, 2011).

O Modelica tem a intenção de se adequar a um formato padrão para que as bibliotecas e modelos criados em domínios diferentes possam ser trocados entre *softwares* e usuários (Pearson, 2017). Além de ser a linguagem de diferentes ambientes que permitem a construção dos componentes e conectá-los, elaborando sistemas físicos complexos para a simulação.

Dentre estes ambientes, destaca-se o *software OpenModelica*, desenvolvido pela *Open Source Modelica Consortium* (OSMC). Baseado na linguagem Modelica com código aberto, este *software* tem por objetivo criar um ambiente que abrange tanto a modelagem, como a compilação e a simulação de modelos, com base em *software* livre compartilhado em código-fonte para uso na pesquisa, ensino e indústria (Vasaiely, 2009).

De acordo com a OSMC (2018), o *OpenModelica* converte o modelo desenvolvido em representações de equações diferenciais ordinárias ou algébricas para a aplicação da simulação. Para isto, dispõe de diversos *solvers* baseados em métodos de integrações numéricas caracterizados por ser métodos implícitos ou explícitos, pela ordem de integração, ou pelo controle do tamanho do passo. A Tabela 1 demonstra os *solvers* encontrados no *OpenModelica* bem como suas características.

Tabela 1- *Solvers* presentes no *OpenModelica*.

Solucionador	Natureza	Ordem	Passo
DASSL	Implícito	Alta	Variável
Euler	Explícito	1 <sup>a</sup>	Fixo
Heun	Explícito	2 <sup>a</sup>	Fixo
Rungekutta	Explícito	4 <sup>a</sup>	Fixo
Impeuler	Implícito	1 <sup>a</sup>	Fixo
Imprungekutta	Implícito	Ajustável	Fixo
Trapezoid	Implícito	2 <sup>a</sup>	Fixo
RungekuttaSsc	Explícito	4 <sup>a</sup> – 5 <sup>a</sup>	Variável
Irksco	Implícito	1 <sup>a</sup> – 2 <sup>a</sup>	Variável
SymSolverSsc	Implícito	1 <sup>a</sup> – 2 <sup>a</sup>	Variável
SymSolver	Implícito	1 <sup>a</sup>	Fixo

Em que, para os *Solvers* de passo fixo, o tamanho do passo pode ser calculado por:

$$\text{Tamanho do passo} \approx \frac{\text{Tempo de parada} - \text{Tempo inicial}}{\text{Numero de intervalos}} \quad (4)$$

#### 4. MODELAGEM DO MÓDULO FOTOVOLTAICO

A modelagem foi realizada com o *software OpenModelica v1.12.0*. A Fig. 2 representa o nível mais externo do modelo onde é possível inserir os valores de entrada tanto de temperatura quanto de irradiância que incide no módulo.

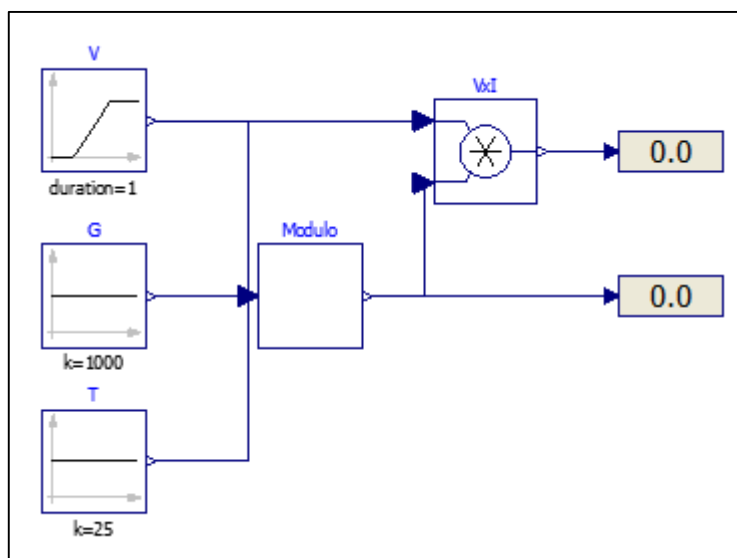


Figura 2. Módulo fotovoltaico no *software OpenModelica*.

Para a simulação e validação do modelo, o módulo selecionado foi o KC200GT da fabricante KYOCERA. Os parâmetros utilizados no modelo encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2- Dados de entrada para o modelo do módulo fotovoltaico.

Potência máxima ( $P_{max}$ )	200 [W] (+10% / -5%)
Corrente de curto circuito ( $I_{sc}$ )	8,21 [A]
Tensão em circuito aberto ( $V_{oc}$ )	32,9 [V]
Corrente máxima ( $I_{max}$ )	7,61 [A]
Tensão máxima ( $V_{max}$ )	26,3 [V]
Coefficiente de temperatura de curto circuito ( $K_i$ )	0,0032 [A/K]
Coefficiente de temperatura de circuito aberto ( $K_V$ )	-0,1230 [V/K]
Número de células em série ( $N_s$ )	54
Resistência em série ( $R_s$ )	0,221 [ $\Omega$ ]
Resistência em paralelo ( $R_p$ )	415,405 [ $\Omega$ ]
Constante de idealidade do diodo ( $a$ )	1,3

Os valores de  $a$ ,  $R_s$  e  $R_p$  estão de acordo com Villalva *et al.* (2009), representando o melhor valor de resistência para que o módulo possa expressar com maior fidelidade os valores reais do mesmo.

Para a construção dos subsistemas do modelo apresentado na Fig. 2 foram consideradas as Eq. (1) a (3).

A Figura 3 mostra a modelagem baseada na Eq. (2), que representa a corrente gerada pelos fótons que incidem no módulo.

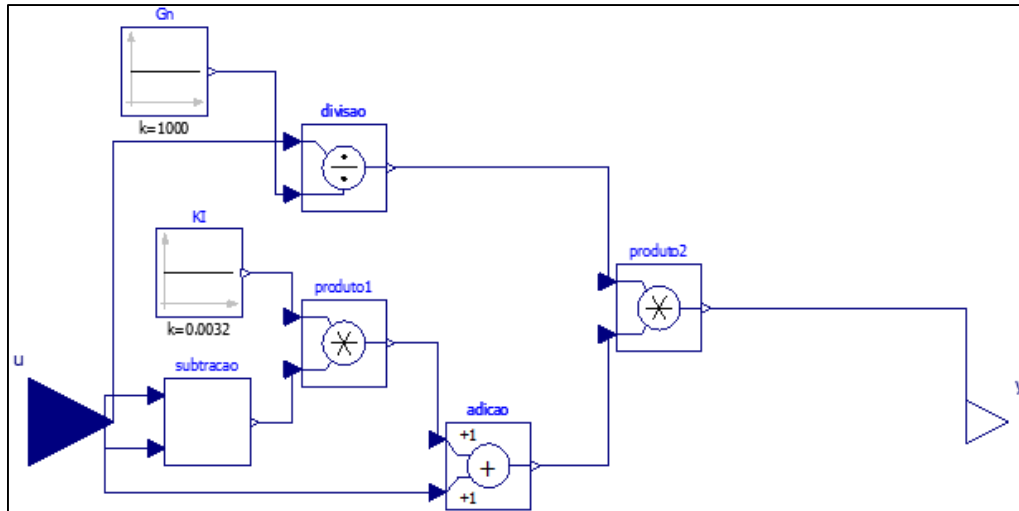


Figura 3. Bloco da Corrente Fotogerada.

O diagrama correspondente ao modelo matemático expresso pela Eq. (3) está denotado pela Fig. 4.

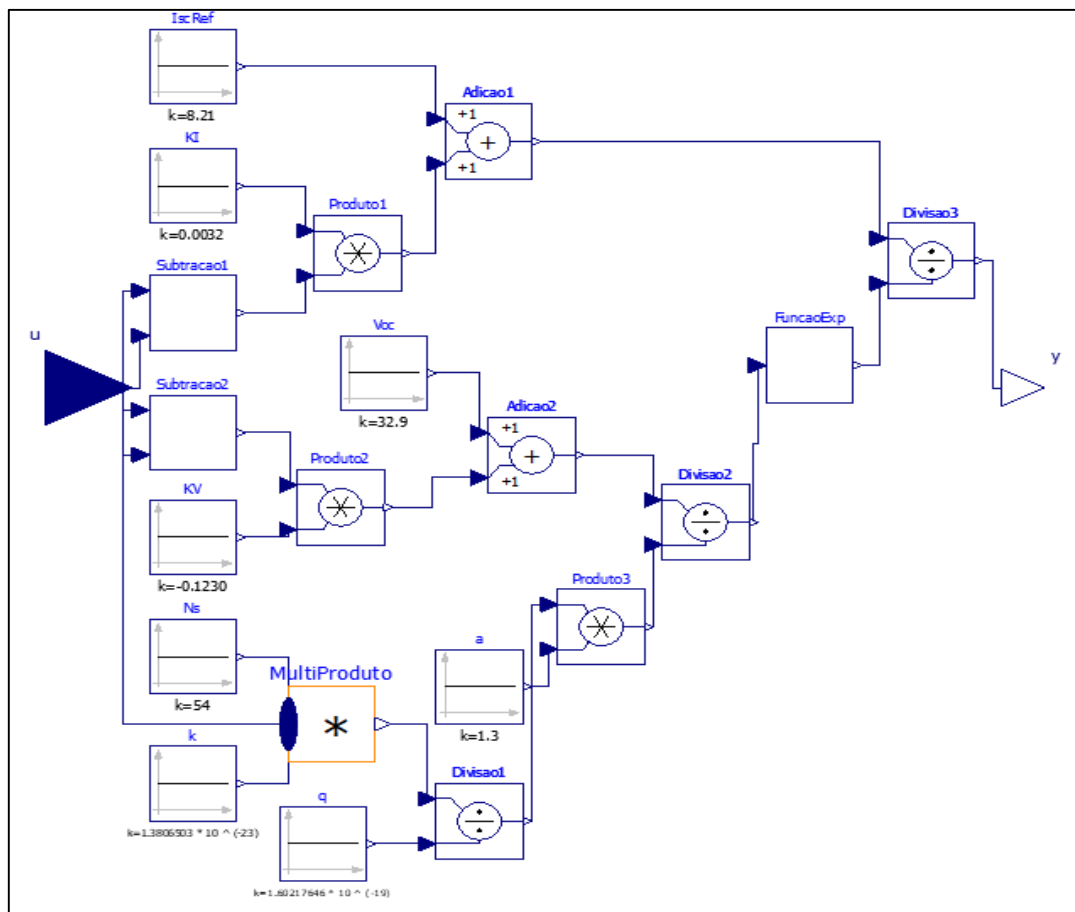


Figura 4. Bloco da corrente no diodo.

O esquema mostrado na Fig. 5 representa a Eq. (1) que resulta na corrente de saída do módulo, podendo assim simular as curvas I-V.

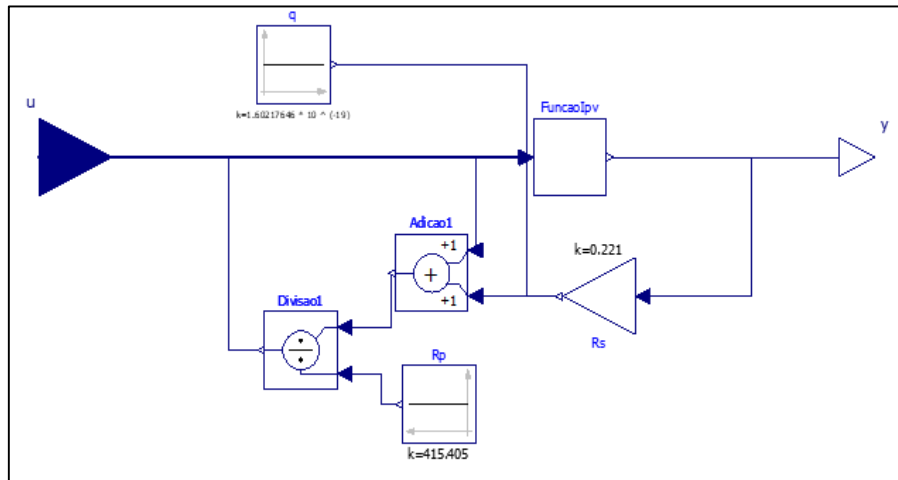


Figura 5. Bloco da corrente de saída do módulo.

Os blocos apresentados são conectados entre eles, e a disposição destas conexões podem ser visualizadas na Fig. 6.

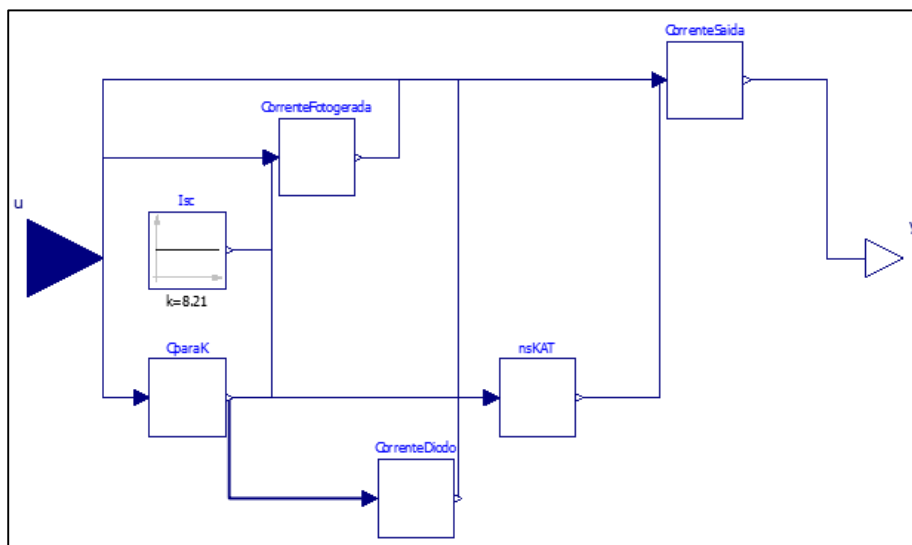


Figura 6. Diagrama dos blocos modelados.

Vale ressaltar que o bloco “CparaK” faz a conversão da temperatura de Celsius para Kelvin e o bloco “nsKAT” representa apenas um produto entre o número de células em série ( $N_s$ ), constante de Boltzmann ( $k$ ), a constante de idealidade do diodo ( $a$ ) e a temperatura ambiente no semicondutor ( $T$ ), afim de simplificar a construção do bloco representado pela Fig. 5.

## 5. SIMULAÇÃO DO MODELO

A configuração utilizada para a simulação do módulo está representada na Tabela 3. Como o *solver* usado foi do tipo de passo fixo, a Eq. (4) foi aplicada para o cálculo do tamanho deste passo.

Tabela 3- Configuração para a simulação do modelo.

Tempo inicial	0 [s]
Tempo de parada	1 [s]
Número de intervalos	500
Passo	0,002
<i>Solver</i>	Rungekutta
Tolerância	1e-6

A Tabela 4 apresenta os valores obtidos com a simulação do modelo, além da comparação com os dados fornecidos pelo fabricante e alcançados por Villalva *et al.* (2009). O modelo foi rodado 10 vezes para cada curva e, em média, obteve um tempo de simulação de 0,077s.

Tabela 4- Comparação entre parâmetros obtidos.

Parâmetro	<i>Datasheet</i>	Villalva <i>et al.</i> (2009)	Presente trabalho
$P_{max}$	200 [W] (+10% / -5%)	200,143 [W]	200,035 [W]
$I_{max}$	7,61 [A]	7,61 [A]	7,60 [A]
$V_{max}$	26,3 [V]	26,3 [V]	26,32 [V]

## 5.1 Análise de Desempenho Computacional

Para avaliarmos o desempenho computacional do modelo foram realizados testes com valor do passo variando entre  $2 \times 10^{-1}$ ,  $2 \times 10^{-2}$ ,  $2 \times 10^{-3}$ ,  $2 \times 10^{-4}$  e  $2 \times 10^{-5}$ , mantendo-se os demais valores dos parâmetros conforme Tabela 3. Cada configuração foi rodada 10 vezes e então calculada a média dos erros no ponto de máximo ( $P_{max}$ ,  $I_{max}$  e  $V_{max}$ ), juntamente com o tempo de simulação. O cálculo do erro é descrito por:

$$Erro_{m\u00e9dio} = \sum_{i=1}^N \frac{|Valor_{data} - Valor_{medido,i}|}{N} \quad (5)$$

onde,  $Valor_{data}$  representa o valor apresentado pelo fabricante no *datasheet*,  $Valor_{medido,i}$  valor medido pela simulação no  $i$ -ésimo teste e  $N$  é o número total de testes.

Os resultados obtidos foram comparados com o *software* MATLAB®/Simulink, podendo ser observados na Tabela 5.

Tabela 5 - Comparação entre *OpenModelica* e Simulink em função do passo de simulação.

Passo	<i>OpenModelica</i>				Simulink			
	Erro $P_{max}$	Erro $I_{max}$	Erro $V_{max}$	Tempo (s)	Erro $P_{max}$	Erro $I_{max}$	Erro $V_{max}$	Tempo (s)
$2 \times 10^{-1}$	0,0350	0,0099	0,0200	0,0354	0,0352	0,0099	0,0200	0,3206
$2 \times 10^{-2}$	0,0350	0,0099	0,0200	0,0276	0,0352	0,0099	0,0200	0,4190
$2 \times 10^{-3}$	0,0350	0,0099	0,0200	0,0720	0,0352	0,0099	0,0200	0,4315
$2 \times 10^{-4}$	0,0370	0,0156	0,0397	0,3623	0,0369	0,0174	0,0463	0,5988
$2 \times 10^{-5}$	0,0370	0,0171	0,0450	2,2070	0,0369	0,0182	0,0490	2,2694
M\u00e9dia	0,0358	0,0124	0,0289	0,5409	0,0358	0,0130	0,0310	0,8078

A Tabela 5 apresenta as médias dos erros obtidos para cada parâmetro analisado, dado configuração (tamanho do passo) e *software* utilizado, bem como a média do tempo de simulação. Para as configurações com passos de  $2 \times 10^{-1}$ ,  $2 \times 10^{-2}$ ,  $2 \times 10^{-3}$  o erro para os parâmetros  $I_{max}$  e  $V_{max}$  se mantiveram constantes tanto para o *OpenModelica* quanto para o Simulink, no caso do erro na  $P_{max}$  ocorreram alterações apenas entre *softwares*. No entanto, o *OpenModelica* obteve custos computacionais consideravelmente menores para estes casos, em torno de 0,3454 s. Alterações nos valores de erro nos parâmetros desejados entre configurações, são percebidas a partir do passo  $2 \times 10^{-4}$ , em que foram obtidos erro maiores em função de passos menores em ambos os *softwares*. De modo geral, para este modelo, o *OpenModelica* leva vantagem sobre o Simulink, levando em consideração que atingiu erros menores em todos os parâmetros com um tempo computacional menor cerca de 0,267 s.

## 5.2 Análise de Comportamento

Para a análise de comportamento do modelo, considerando que um módulo fotovoltaico está sujeito a condições climáticas, verificou-se dois cenários:

**Cenário 1: Variação na irradiância.** Com a finalidade de variar a irradiância que age no módulo, foi determinado os valores de entrada iguais a 400, 600, 800 e 1000 W/m<sup>2</sup> para a mesma e manteve-se constante a temperatura à 25°C. A Figura 7 indica as curvas I-V obtidas através da modelagem com o Modelica, bem como as curvas P-V.

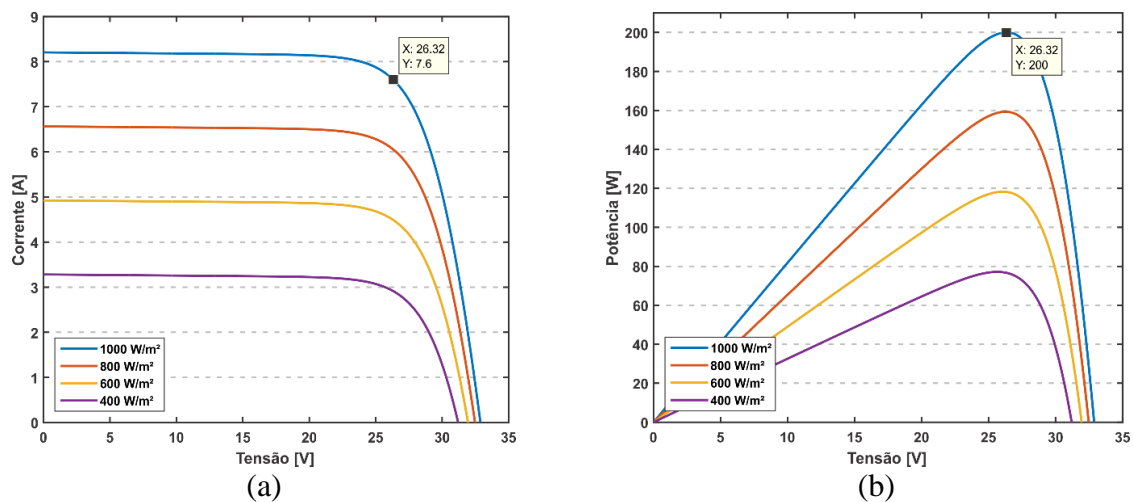


Figura 7. Curvas características (a) I-V e (b) P-V, com a variação na irradiância e temperatura constante.

Na Figura 7(a), observa-se o decaimento da corrente proporcionalmente ao decaimento da irradiância, ao mesmo tempo em que a tensão sofre uma leve perda, como é observado em (Pinho & Galdino, 2014). Enquanto que na Fig. 7(b), a potência máxima ocorre na mesma faixa de tensão máxima, além de ser minimizada devida a influência que a corrente sofre com a alteração de irradiância. A linha azul representa as curvas características de um módulo à condições padrões, em conjunto com os valores de máximos alcançados com a modelagem considerando as características do módulo.



**Cenário 2: Variação na temperatura.** Para o caso da variação da temperatura, os valores especificados variaram entre 25°C, 50°C e 75°C, à uma irradiância constante igual a 1000 W/m<sup>2</sup>. As curvas I-V características obtidas podem ser visualizadas na Fig. 8. Juntamente com as curvas P-V.

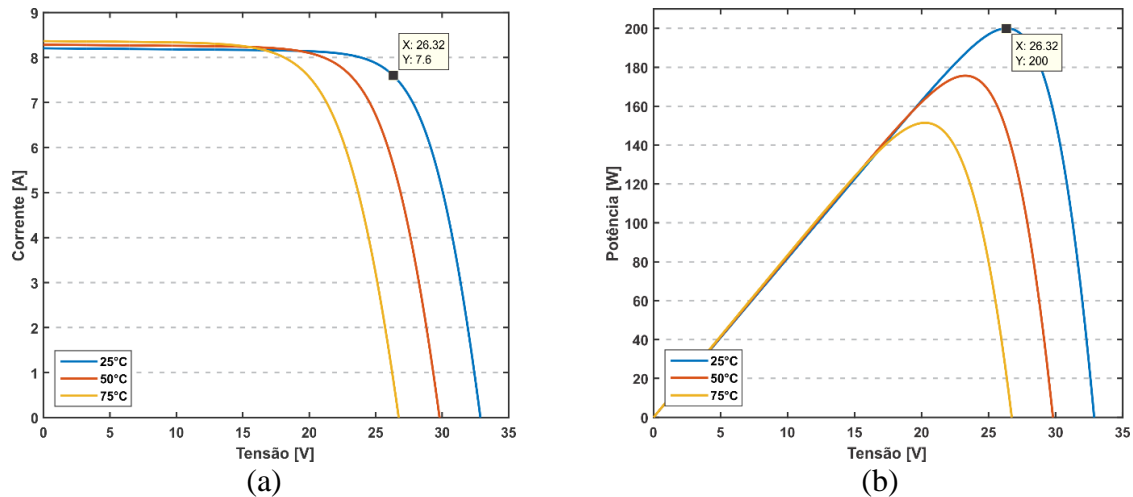


Figura 8. Curvas características (a) I-V e (b) P-V, com a variação na temperatura e irradiância constante.

Na Figura 8(a), a corrente sofre pequenas alterações com o aumento da temperatura, ao mesmo tempo que ocorre uma considerável queda na tensão de circuito aberto. Enquanto que na Fig. 8(b), a potência máxima ocorre em tensões máximas diferentes, quanto maior a temperatura, menor é sua tensão máxima consequentemente menor e a potência máxima do módulo.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos para a modelagem do módulo fotovoltaico se apresentaram em concordância com os dados fornecidos pelo *datasheet*, assim como com o modelo expresso em Villalva *et al.* (2009), em que foram traçadas curvas características I-V e P-V considerando mudanças na temperatura e na irradiância. Os valores de máximos para, corrente, tensão e potência, 7,60 A, 26,32 V e 200,035 W, respectivamente, tiveram pequenas variações quando comparadas ao trabalho de Villalva *et al.* (2009), que indicou valores iguais a 7,61 A, 26,3 V e 200,143 W, respectivamente, para o módulo em condições padrões. Isso pode ser explicado pela quantidade de passos escolhido para a simulação, uma vez que quanto maior é a quantidade de passos, mais refinado é o resultado da simulação, ou até mesmo pelo *solver* selecionado. O modelo obteve, em média, 0,077s para 1s de simulação. Por fim, o modelo construído no *OpenModelica* foi comparado com o modelo equivalente feito no Simulink, com variações nas configurações de passos de tempo, resultando em erros similares em ambos os *softwares*, entretanto, o *OpenModelica* foi mais rápido cerca de 0,267s levando vantagem sobre o Simulink para este modelo. A utilização do *OpenModelica* torna-se vantajosa em relação a outros *softwares* cuja licença é paga, por ser um *software* livre e não deixar a desejar com relação à qualidade de simulação, tendo em vista outros trabalhos desenvolvidos por Mitsuya & Meneses (2016), Oliveira *et al.* (2017), Ferreira *et al.* (2017) e Martins *et al.* (2018).

## **Agradecimentos.**

Y.C.Á.F. agradece ao apoio da Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA) e do LABIC. M.T.M agradece ao apoio da CAPES e UFOPA. A.A.M.M. agradece a UFOPA.

## **REFERÊNCIAS**

- Altshuller, D., Hüsson, P., Jones, C.A., Janczyk, L. (2017) *Improved Model of Photovoltaic Systems. Proceedings of the 12<sup>a</sup> International Modelica Conference*, 477-482.
- Ferreira, Y.C.Á., Mitsuya, M.T., Meneses, A.A.M., (2017). Modelagem dos Componentes de um Sistema Fotovoltaico Isolado com *Matlab/Simulink*. XX Encontro Nacional de Modelagem Computacional. Anais do XX Encontro Nacional de Modelagem Computacional. Nova Friburgo.
- Fritzon, P. (2011), *Introduction to Modeling and Simulation of Technical and Physical Systems with Modelica. Institute of Electrical and Eletronics Engineers*. Publicado por John Wiley & Sons, Inc.
- Li, G., Jin, Y., Akram, M.W., Chen Xiao (2017), *Research and Current Status of the Solar Photovoltaic Water Pumping System – A Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 440–458.
- Martins, C.S., Ferreira, Y.C.Á., Mitsuya, M.T., Meneses, A.A.M., (2018). Modelagem de Componentes de Sistema Híbrido Fotovoltaico/Diesel com *Matlab/Simulink*. Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão, vol 3, 95-1 – 95-13.
- Mitsuya, M.T., Meneses, A.A.M., (2016). Utilização de Redes Neurais *Feedforward* e *Layer-Recurrent* na Busca de Máxima Potência de Sistemas Fotovoltaicos. XIX Encontro Nacional de Modelagem Computacional. Anais do XIX Encontro Nacional de Modelagem Computacional. João Pessoa.
- Muhsen, D.H., Khatib, T., Nagi, F., (2017), *A Rewiew of Photovoltaic Water Pumping System Designing Methods, Control, Strategies and Field Performance. Renewable and Sustainable Energy Rewiews*, 68, 70–87.
- Oliveira, G.S., Mitsuya, M.T., Meneses, A.A.M., (2017). Estudo Comparativo Entre os Algoritmos P&O e InC como Método MPPT em um Sistema Fotovoltaico. XX Encontro Nacional de Modelagem Computacional. Anais do XX Encontro Nacional de Modelagem Computacional. Nova Friburgo.
- Open Source Modelica Consortium (2018). *OpenModelica User's Guide, v1.13.0-dev-1153-g36f0540*.
- Pearson, R.R. (2017). *Photovoltaic Power Converter Modeling in Modelica*. Tese (Mestrado em Engenharia de Sistemas e Controle). *Universidad Complutense de Madrid & Universidad Nacional de Educación a Distancia*.
- Pinho, J.T., Galdino, M.A. (2014). Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. CEPEL – CRESESB. Rio de Janeiro.
- Vasaiely, P. (2009). *Interactive Simulation of SysML Models Using Modelica*. Tese de Bacharelado. Programa de Graduação em Ciência da Computação Aplicada. Departamento de Ciência em Computação. Faculdade de Engenharia e Ciência da Computação. Universidade de Ciências Aplicadas de Hamburg. Alemanha.
- Villalva, M.G., Gazoli, J.R., Filho, E.R. (2009). *Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays*.

## **MODELING AND SIMULATING A PHOTOVOLTAIC MODULE WITH MODELICA.**

**Abstract.** *Simulating a system becomes significant from the moment that the implementation of a real physical system can be expensive and dangerous, and it is possible to have an easy manipulation of the parameters of the models. The present work deals with the block-by-block modeling of a photovoltaic module, according to its mathematical model. For the construction of the model we used the OpenModelica v1.12.0 environment that is based on the Modelica language. For the validation of the model, the values obtained in the simulation were compared with those provided by the datasheet of the KC200GT module of the manufacturer KYOCERA. The results obtained with the modeling approximated the values presented by the manufacturer. Compared to MATLAB<sup>®</sup>/Simulink software, the model simulated with OpenModelica presented lower computational time, about 0.267 s faster, and with mean error values lower than 0.045 in all tests performed.*

**Keywords:** *Modeling, Simulation, Photovoltaic Module, Modelica e Open Modelica.*