



## Modelagem e avaliação do processo de degomagem no refino de óleo de soja

Sâmya Lorena Medeiros Confessor<sup>1</sup>

Dorgival Albertino da Silva Júnior<sup>2</sup>

---

**Resumo:** O presente artigo têm como objetivo apresentar a modelagem e simulação de um módulo fotovoltaico. Para isso, utilizou-se o modelo de um diodo, também conhecido como modelo ideal. A partir da modelagem, criou-se blocos através do MATLAB/Simulink® para implementação e simulação do módulo em estudo, o KC85T do fabricante Kyocera. Os resultados obtidos comprovaram e validaram o modelo desenvolvido, uma vez que as curvas características V-I e V-P obtidas coincidem com as fornecidas pelo fabricante do módulo PV. A partir do modelo, pode-se utilizá-lo em um sistema de geração fotovoltaica conectado a um conversor em que será realizado o controle do MPPT (Maximum Power Point Tracking) do módulo PV.

**Palavras-chave:** MATLAB/Simulink. MPPT. Painel fotovoltaico.

---

---

<sup>1</sup> UFERSA – Universidade Federal Rural do Semi-Árido

<sup>2</sup> UFERSA – Universidade Federal Rural do Semi-Árido

**Abstract:** This paper aims to present the modeling and simulation of a PV module. For this, we used a diode model, also known as the ideal model. From the modeling, it was created through blocks in MATLAB/Simulink to simulation and implementation in the module under study, from the Kyocera KC85T manufacturer. The results confirmed and validated the model developed, since the characteristic curves V-I and V-P obtained coincide with those supplied by the PV module manufacturer. From the model, we can use it in a photovoltaic generation system connected to a converter that will be held MPPT control (Maximum Power Point Tracking) of the PV module.

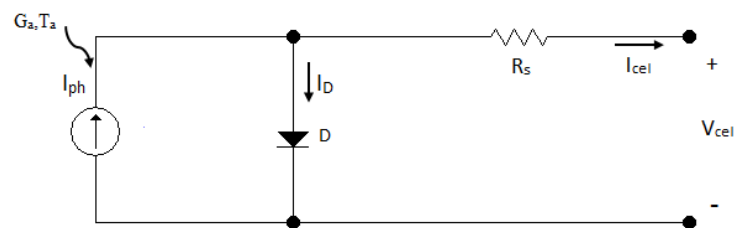
**Keywords:** MATLAB/Simulink. MPPT. Photovoltaic Panel.

---

## 1. Introdução

A curva de tensão-corrente (V-I) é uma das principais características do painel fotovoltaico. A modelagem do painel consiste em obter a curva V-I a partir do circuito elétrico equivalente da célula fotovoltaica. Existem três abordagens principais a respeito dos circuitos elétricos que representam as células solares: o modelo ideal, o modelo de um diodo, e o modelo de dois diodos (FREIRE, CARVALHO, 2000).

Muitos trabalhos são feitos a partir do modelo ideal. Alguns trabalhos utilizam um modelo com um diodo, considerando a resistência shunt ( $R_{sh}$ ) desprezível. A inserção de alguns parâmetros como, por exemplo, a temperatura ambiente torna o projeto mais complexo. Em relação a essa complexidade, o modelo mais aceito é o de um diodo (modelo real), pois quando comparada a análise com o modelo ideal e com os outros, apresenta complexidade moderada. A equação característica do modelo das células fotovoltaicas é obtida a partir da aplicação das Leis de Kirchhoff para o circuito equivalente ao qual se deseja determinar as grandezas de saída. No presente trabalho, será abordado o modelo de um diodo, desprezando-se a resistência shunt. A modelagem da célula fotovoltaica será obtida para o circuito equivalente ilustrado na Figura 1.



**Figura 1.** Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica (modelo com um diodo)

Pode-se observar que a fonte de corrente produz uma fotocorrente que é diretamente proporcional à radiação solar e inversamente proporcional à temperatura de operação da célula (REKIOUA, 2012). Aplicando a Lei de Kirchhoff para corrente, tem-se que:

$$I_{cel} = I_{ph} - I_D \quad (1)$$

Em que

$$I_D = I_0 \left[ \exp\left(q \frac{V_{pv}}{AkT_a}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

Logo,

$$I_{cel} = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(q \frac{V_{cel} + I_{cel}R_s}{AkT_a}\right) - 1 \right] \quad (3)$$

Onde:

$I_{ph}$  é a fotocorrente (Ampères);

$I_0$  é a corrente de saturação do diodo (Ampères);

$q$  é a carga do elétron (Coulombs);  
 $k$  é a constante de Boltzman (J/K);  
 $A$  é o fator de idealidade do diodo;  
 $Ta$  é a temperatura de junção da célula fotovoltaica (Kelvin);  
 $I_D$  é a corrente que atravessa o diodo (Ampères);  
 $R_s$  é a resistência em série (Ohms);  
 $V_{cel}$  é a tensão de saída da célula fotovoltaica (Volts).

Considerando-se o valor da fotocorrente igual ao valor da corrente de curto circuito, a corrente de saída da célula fotovoltaica será dada pela Equação 4.

$$I_{cel} = I_{sc} - I_0 \left[ \exp \left( q \frac{V_{cel} + I_{cel} R_s}{AkTa} \right) - 1 \right] \quad (4)$$

Em que  $I_{sc}$  é a corrente de curto circuito da célula fotovoltaica (dada em ampères). Para determinar o valor da corrente de saturação reversa, considera-se a corrente na saída da célula como nula. Assim, tem-se que:

$$I_{cel} = 0 \quad (5)$$

$$V_{cel} = V_{oc} \quad (6)$$

$$I_{sc} - I_0 \left[ \exp \left( q \frac{V_{cel}}{AkTa} \right) - 1 \right] = 0 \quad (7)$$

Em que  $V_{oc}$  é a tensão do circuito aberto da célula fotovoltaica (dada em volts). Fazendo as devidas manipulações matemáticas na Equação 7, pode-se obter a expressão para a corrente de saturação do diodo como sendo:

$$I_0 = \frac{I_{sc}}{\left[ \exp \left( q \frac{V_{cel} + I_{cel} R_s}{AkTa} \right) - 1 \right]} \quad (8)$$

## 2. Curva característica de um módulo fotovoltaico

Em virtude da variação das condições operacionais no mundo real, os fabricantes de painéis PV precisam propor algumas condições de teste padrão (*Standart Test Conditions – STC*) a fim de realizar a classificação de um painel. Dessa forma, qualquer módulo PV deve ser submetido às mesmas condições para se formar uma base de comparação entre os fabricantes. Esta avaliação é realizada em 1000W/m<sup>2</sup> de luminosidade incidente, temperatura da célula (não é temperatura ambiente) de 25°C e massa do ar de 1,5 (AM1.5G, onde G significa "global" e inclui a irradiação direta e irradiação difusa) (TAVARES,2009). Deve-se ressaltar ainda que estas condições de operação são raramente encontradas simultaneamente no mundo real. Para o trabalho em estudo, escolheu-se o modelo KC85T multicristalino de alta eficiência de 87W, do fabricante KYOCERA, cujas características elétricas estão apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1.** Características elétricas do módulo KC85T

<b>Características elétricas do módulo KC85T (*STC)</b>	
Potência máxima (Pmax)	87W
Tensão na Pmax (Vpmax)	17,4V
Corrente na Pmax (Ipmax)	5,02A
Corrente de curto circuito (Isc)	5,34A
Tensão de circuito aberto (Voc)	21,7V
Coefficiente de temperatura de Isc	0,00212A/°C
Coefficiente de temperatura de Voc	-0,0821V/°C
Número de células em série (Ns)	36

### 2.1. Fatores que influenciam as características elétricas dos módulos

Assim como ocorre com as células fotovoltaicas, o desempenho dos módulos PV é influenciado pela irradiação solar e pela temperatura das células (CRESESB, 2014).

As células fotovoltaicas, bem como grande parte dos materiais semicondutores, operam com maior eficiência a temperaturas mais baixas. O aumento da temperatura, em geral, é o fator mais importante para a perda de desempenho de uma célula fotovoltaica. No inverno, os módulos PV geram menos energia do que no verão, em virtude de fatores como por exemplo, a existência de dias mais curtos em determinadas localidades, ao baixo ângulo de incidência de irradiação solar ou a grande cobertura de nuvens, causando o efeito de sombreamento nos painéis.

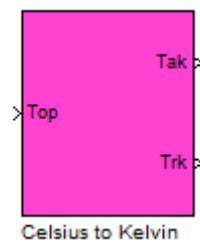
A potência de saída dos módulos PV é proporcional à intensidade da luz solar, portanto, além da passagem das nuvens, existe ainda, o movimento aparente do sol de acordo com a hora do dia que irá reduzir a potência produzida pelo sistema. Atualmente existem técnicas que determinam a melhor posição de inclinação para operação do painel fotovoltaico de acordo com o ângulo de incidência da irradiação solar (ARMSTRONG, HURLEY, 2005), mas a grande maioria das aplicações atuais ainda considera que os painéis PV são fixos em uma determinada estrutura.

### 3. Modelagem do painel fotovoltaico

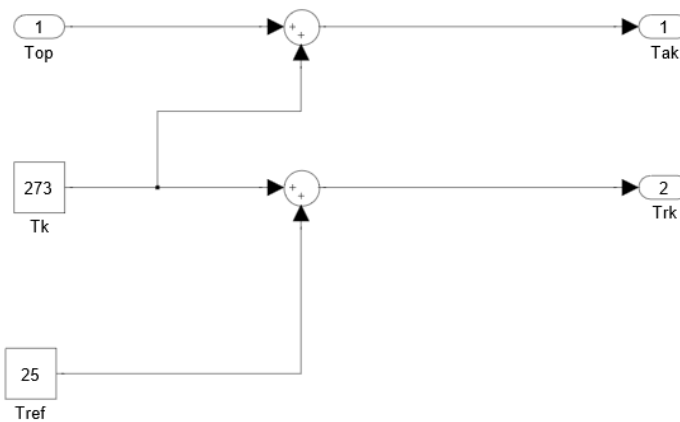
No presente trabalho, foi desenvolvido o modelo matemático de um diodo, também conhecido como modelo real. Para isso, utilizou-se o software MATLAB/Simulink® onde foram realizadas todas as implementações e simulações necessárias para validação do modelo em estudo. Desprezou-se a resistência shunt, visto que ela possui um valor muito elevado, quando comparada ao valor da resistência em série. Considerou-se o valor da resistência série ( $R_s$ ) como sendo 0,1  $\Omega$ , segundo Pandiarajan (2011).

O módulo utilizado para realizar as modelagens foi o KC85T do fabricante Kyocera, cuja as especificações foram apresentadas na Tabela 1. Ainda de acordo com Pandiarajan (2011), para realizar a modelagem de um módulo fotovoltaico são necessários blocos que abordem as seguintes variáveis: fotocorrente ( $I_{ph}$ ), corrente de saturação reversa ( $I_{rs}$ ), corrente de saturação ( $I_o$ ) e corrente de saída do painel fotovoltaico ( $I_{pv}$ ). Partindo dessa ideia, foram desenvolvidos sete blocos ao total para realizar a modelagem de um módulo fotovoltaico.

O primeiro bloco desenvolvido converte a temperatura de operação do módulo fotovoltaico de graus Celsius para Kelvin. Este bloco encontra-se ilustrado na Figura 2 e na Figura 10 é mostrado as ligações entre entrada e saída desse bloco, obtidas a partir das Equações 9 e 10.



**Figura 2.** Bloco referente à conversão da temperatura de operação da célula fotovoltaica



**Figura 3.** Subsistema referente ao bloco "Celsius to Kelvin"

$$T_{rk} = 273 + 25 \tag{9}$$

$$T_{ak} = 273 + T_{op} \tag{10}$$

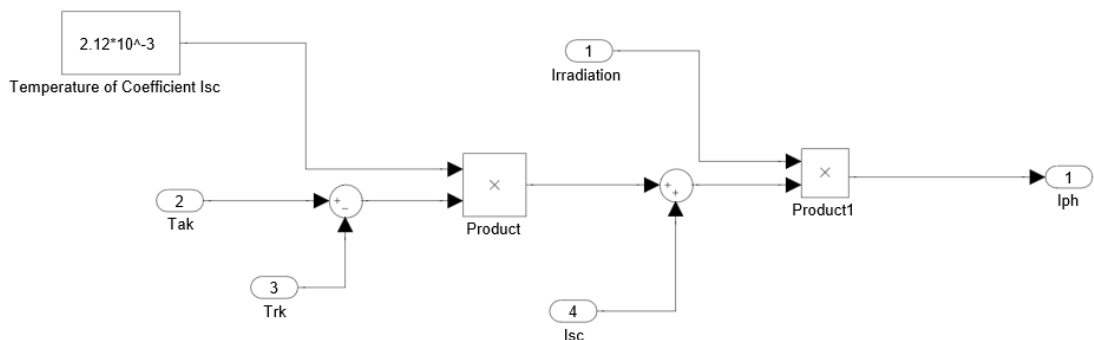
Os valores de  $T_{rk}$  e  $T_{ak}$  representam, respectivamente, a temperatura de referência adotada (298 K) e a temperatura de operação do módulo fotovoltaico em Kelvin. Já a variável  $T_{op}$  é a temperatura de operação do módulo em graus Celsius.

O segundo bloco refere-se à foto corrente, que de acordo com a Equação 11 é função da temperatura de operação do módulo fotovoltaico ( $T_{ak}$ ), da temperatura de referência ( $T_{rk}$ ), da

corrente de curto circuito do módulo fotovoltaico( $I_{sc}$ ) e da irradiação. Na Figura 4 é ilustrado esse bloco e na Figura 5, as ligações desenvolvidas nele.



**Figura 4.** Bloco referente à foto corrente

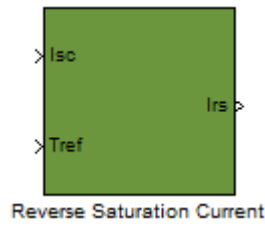


**Figura 5.** Subsistema referente ao bloco “Photo current”

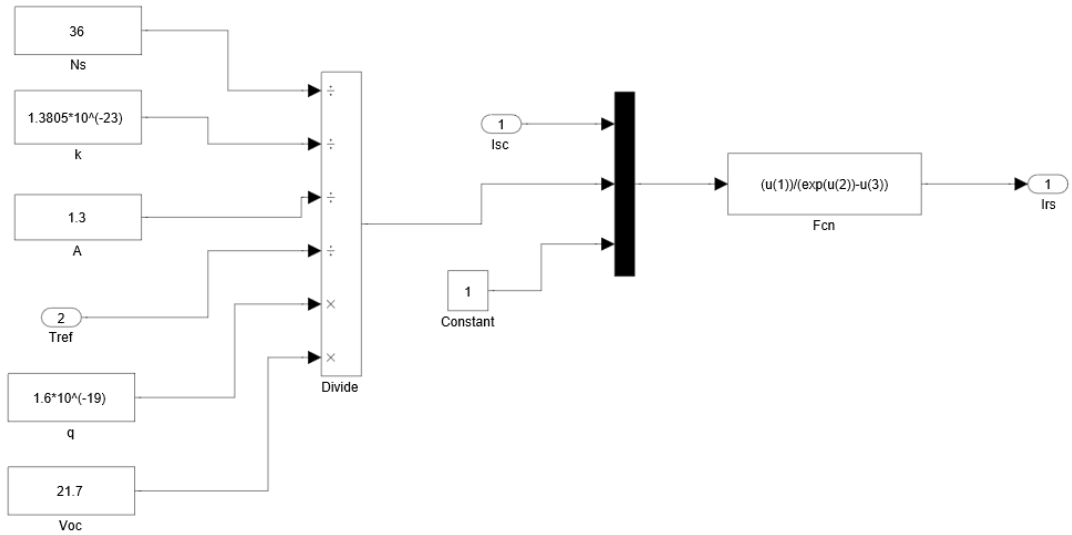
$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i \times (T_{ak} - T_{rk})] \times G \quad (11)$$

A variável “Temperature of Coefficient  $I_{sc}$ ” (designada na Equação 11 por  $K_i$ ) é uma constante que representa o coeficiente de temperatura da corrente de curto-circuito e pode ser encontrada no datasheet do fabricante do módulo fotovoltaico. Para o módulo utilizado nesse trabalho, tem-se que esse valor é dado por  $2,12 \times 10^{-3} A/^{\circ}C$  (conforme Tabela XX). A variável  $G$  representa a irradiação ( $KW/m^2$ ) e a variável  $I_{sc}$  significa o valor da corrente de curto-circuito para o módulo utilizado nas condições de teste padrão (STC).

O terceiro bloco refere-se a corrente de saturação reversa que é obtida através da Equação 12. Como pode-se observar, ela depende das seguintes variáveis: corrente de curto-circuito( $I_{sc}$ ), da carga do elétron( $q$ ), da tensão de curto-circuito do módulo fotovoltaico( $V_{oc}$ ), do número de células em série( $N_s$ ), da constante de Boltzmann( $k$ ), do fator de idealidade( $A$ ) e da temperatura de operação( $T_{ak}$ ). A constante de idealização  $A$  é o fator que indica o quão perto as células se encontram uma da outra. Segundo (KOTTAS, BOUTALIS, KARLIS, 2006) para o módulo em estudo (silício multicristalino de alta eficiência), esse fator é 1,3. Na Figura 6 é ilustrado esse bloco e na Figura 7 é mostrado o seu esquema de montagem.



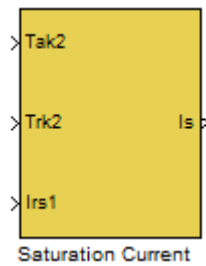
**Figura 6.** Bloco referente à corrente de saturação reversa



**Figura 7.** Subsistema referente ao bloco "Reversa saturation current"

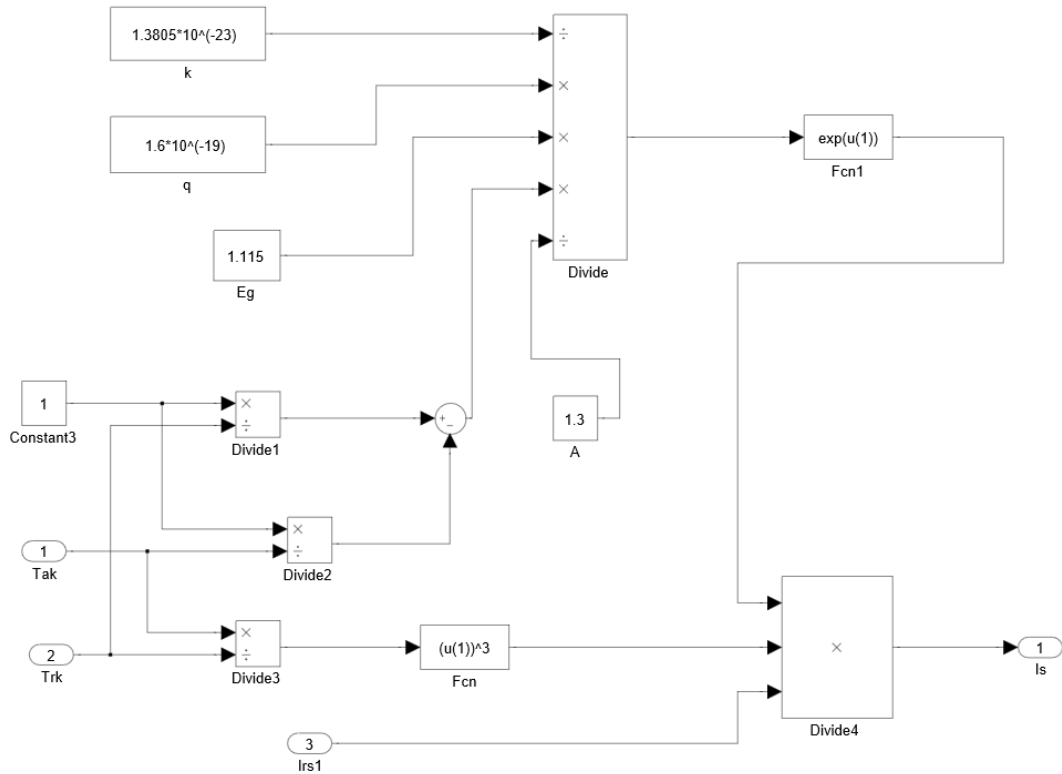
$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\exp\left(\frac{qV_{oc}}{N_s A k T_{ak}}\right)} \quad (12)$$

O quarto bloco representa a corrente de saturação que segundo a Equação 13 depende da corrente de saturação reversa ( $I_{rs}$ ), da carga do elétron ( $q$ ), da constante de Boltzman ( $k$ ), do gap de energia para o silício ( $E_g$ ), do fator de idealidade ( $A$ ), da temperatura de referência adotada ( $T_{rk}$ ) e da temperatura de operação do módulo fotovoltaico ( $T_{ak}$ ). De acordo com (KOTTAS, BOUTALIS, KARLIS, 2006) o gap de energia para materiais semicondutores utilizados na fabricação de células solares é 1,115 eV. Na Figura 8 é ilustrado esse bloco e na Figura 9, o seu esquema de ligação.



**Figura 8.** Bloco referente à corrente de saturação

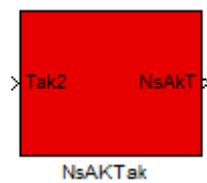




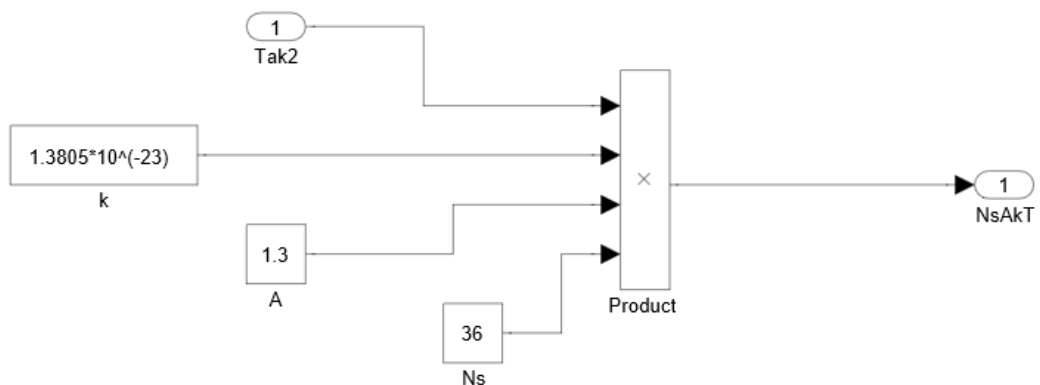
**Figura 9.** Subsistema referente ao bloco " Saturation current"

$$I_0 = I_{rs} \times \left[ \frac{T_{ak}}{T_{rk}} \right]^3 \times \exp \left[ \frac{qE_g}{Ak} \left\{ \frac{1}{T_{rk}} - \frac{1}{T_{ak}} \right\} \right] \quad (13)$$

No quinto bloco é feita a multiplicação das seguintes variáveis: número de células em série ( $N_s$ ), constante de Boltzman ( $k$ ), fator de idealidade ( $A$ ) e temperatura de operação ( $T_{ak}$ ). Na Figura 10 é ilustrado esse bloco e na Figura 11, as ligações desenvolvidas nele.

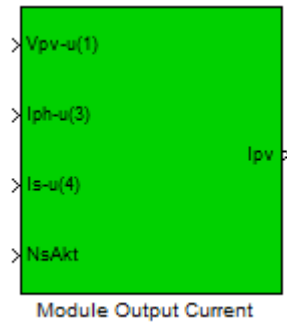


**Figura 10.** Bloco referente à multiplicação das variáveis  $N_s$ ,  $k$ ,  $A$  e  $T_{ak}$

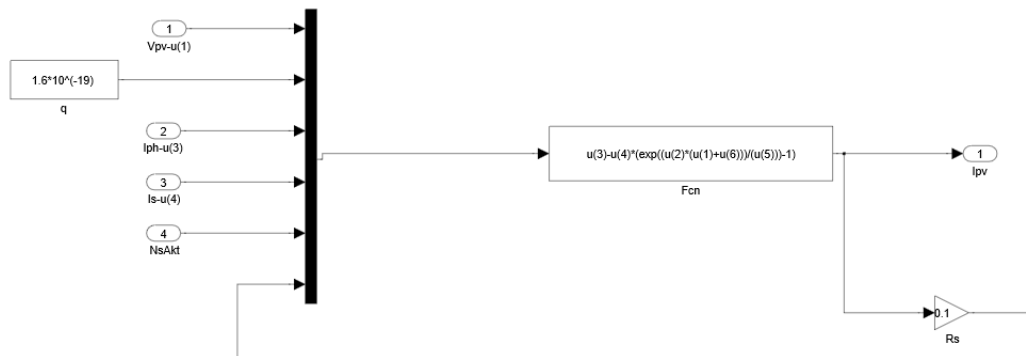


**Figura 11.** Subsistema referente ao bloco "NsAKTak"

O sexto bloco representa a corrente de saída do módulo PV ( $I_{pv}$ ), que é dada pela Equação 14. Ela é função das seguintes variáveis: número de células em série ( $N_s$ ), número de células em paralelo ( $N_p$ ), fotocorrente ( $I_{ph}$ ), carga do elétron ( $q$ ), resistência série ( $R_s$ ), constante de Boltzmann ( $k$ ), fator de idealidade ( $A$ ), temperatura de operação ( $T_{ak}$ ) e da tensão de saída do painel fotovoltaico ( $V_{pv}$ ). A Figura 12 ilustra esse bloco e a Figura 13, suas respectivas ligações.



**Figura 12.** Bloco referente à corrente de saída do módulo fotovoltaico



**Figura 13.** Subsistema referente ao bloco "Module Output Current"

$$I_{pv} = N_p \times I_{ph} - N_p \times I_0 \times \left[ \exp \left\{ \frac{q(V_{pv} + I_{pv}R_s)}{N_s k A T_{ak}} \right\} - 1 \right] \quad (14)$$

No sétimo bloco é feita a montagem final baseada nos blocos descritos anteriormente. Nele, as entradas são dadas pela tensão de entrada ( $V_{in}$ ), irradiação e temperatura de operação do módulo FV e as saídas são tensão ( $V_{pv}$ ) e corrente ( $I_{pv}$ ) de saída do módulo PV. Na Figura 14 é ilustrado o respectivo bloco e na Figura 15, seu esquema de ligação.

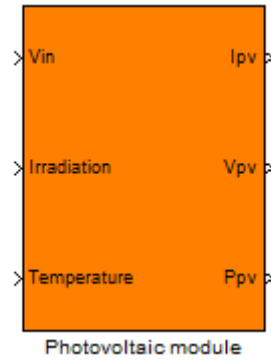


Figura 14. Bloco referente ao módulo fotovoltaico

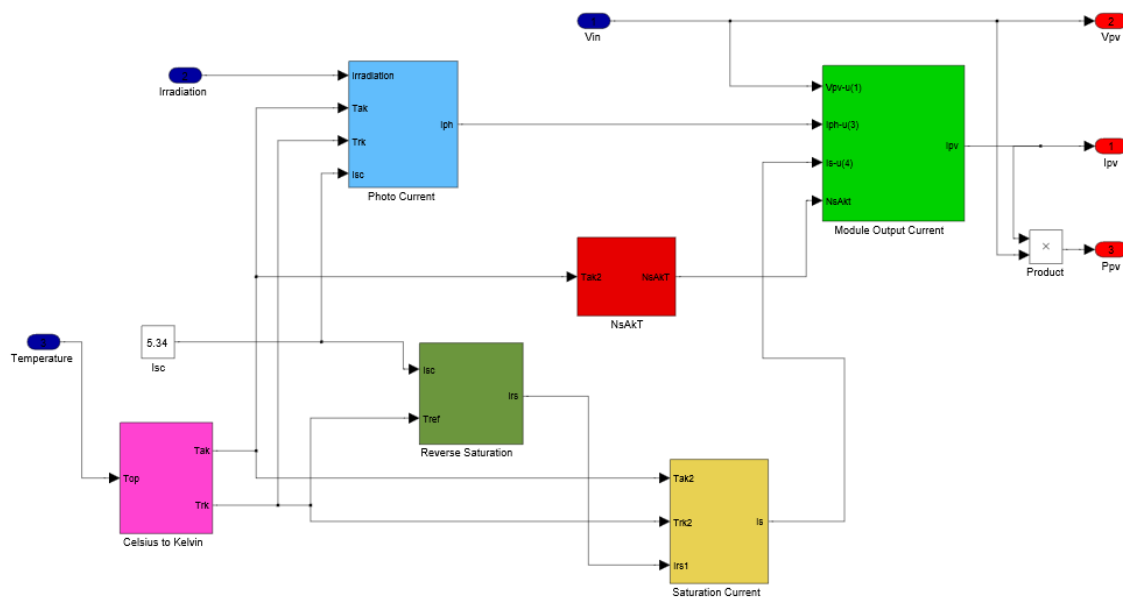
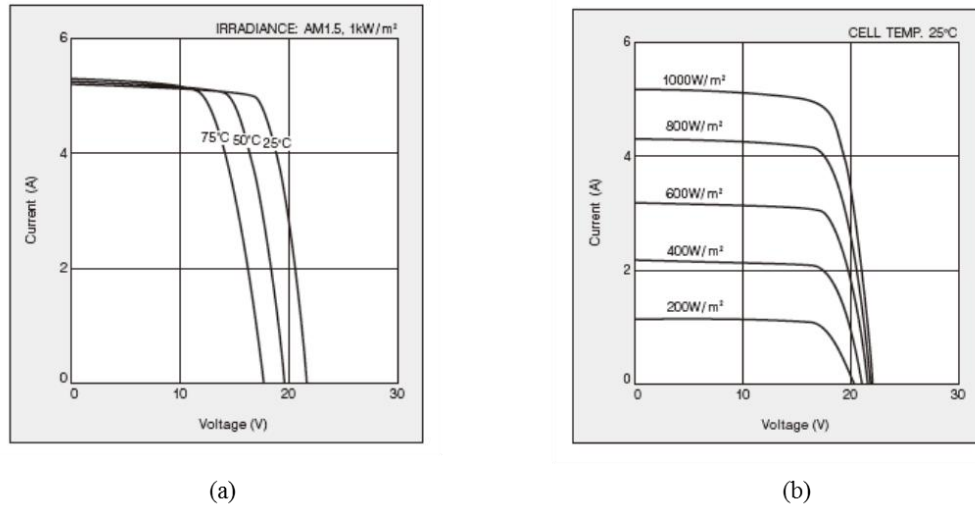


Figura 15. Subsistema referente ao bloco " Photovoltaic module"

#### 4. Resultados

O modelo fotovoltaico foi implementado e simulado no software *MATLAB/Simulink*® e deverá apresentar um comportamento próximo de um painel comercial, ou seja, deverá fornecer a mesma curva característica apresentada no catálogo do fabricante desejado. Para o módulo utilizado nesse trabalho, tem-se que as curvas V-I e V-P fornecidas pela Kyocera são mostradas na Figura 16.

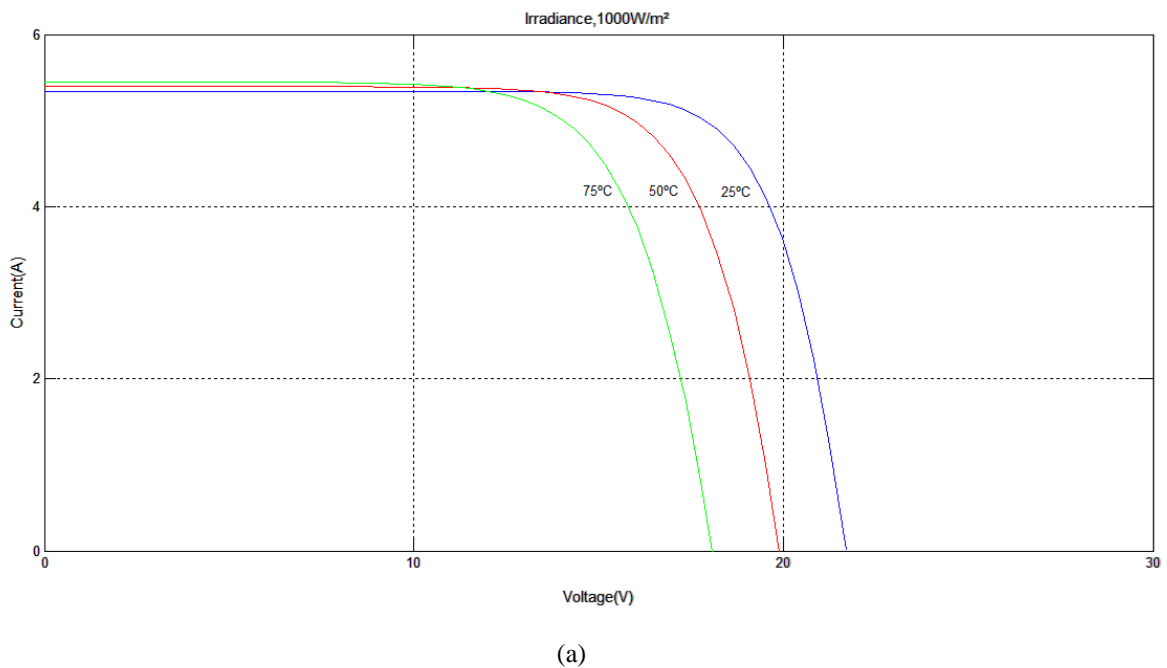


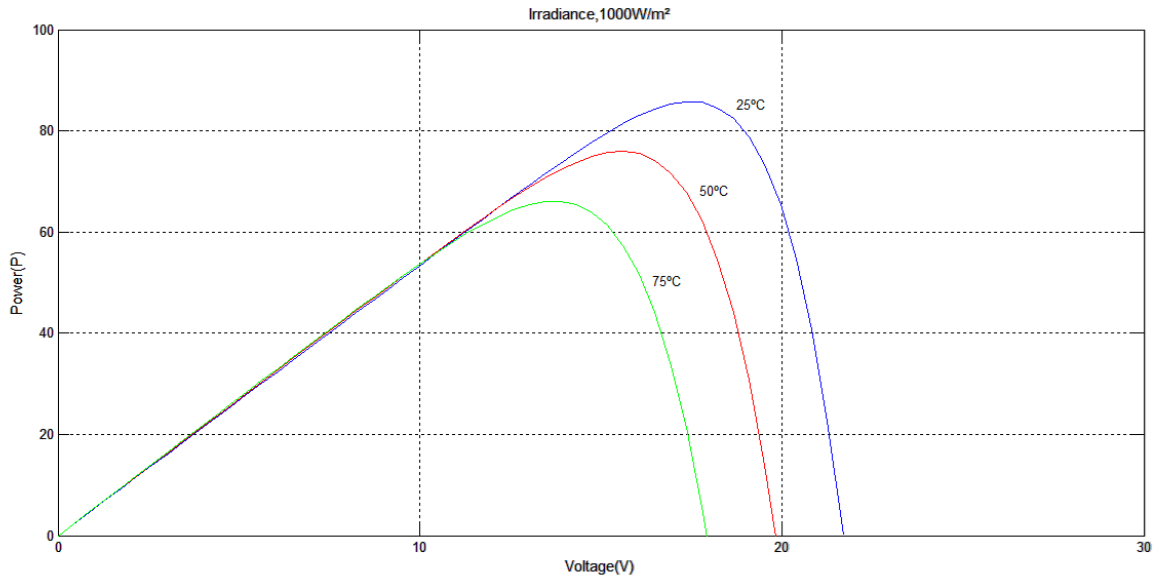
**Figura 16.** Curvas características V-I do módulo fotovoltaico KC85T (a) Irradiação constante (1 kW/m<sup>2</sup>) (b) Temperatura constante (25° C)

Para o modelo desenvolvido, as curvas características são obtidas para duas condições:

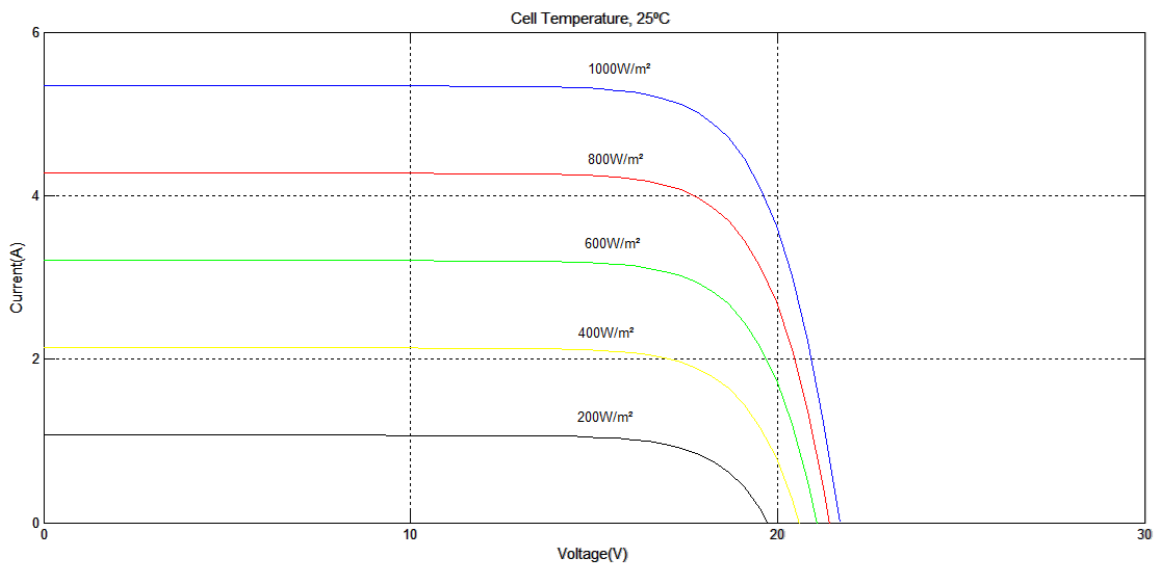
1. Irradiação constante (1000 W/m<sup>2</sup>) e variação da temperatura de operação (25°C, 50°C e 75°C);
2. Temperatura de operação constante (25°C) e variação da irradiação (1000W/m<sup>2</sup>, 800 W/m<sup>2</sup>, 600 W/m<sup>2</sup>, 400 W/m<sup>2</sup> e 200 W/m<sup>2</sup>).

Nas Figura 17 e 18 encontram-se ilustrados os resultados simulados para as curvas características, sob a influência da temperatura e da irradiação, do módulo comercial KC85T utilizado neste trabalho.

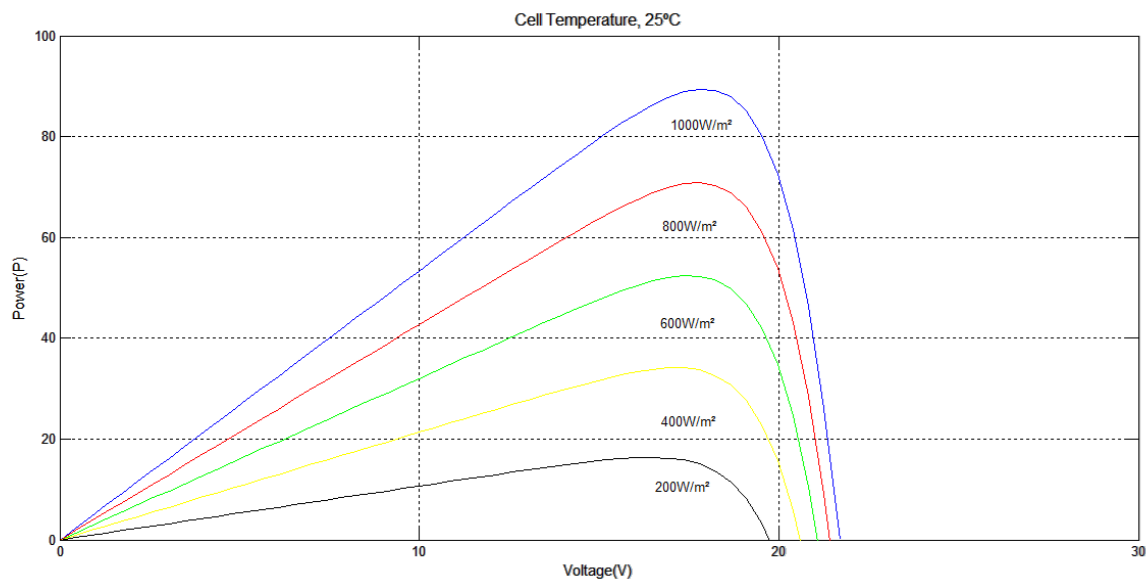




(b)  
**Figura 17.** Influência da temperatura ambiente nas curvas características do módulo KC85T (a) curva V-I, (b) curva V-P



(a)



(b)

**Figura 18.** Influência da irradiação nas curvas características do módulo KC85T (a) curva V- I, (b) curva V-P

Como pode-se observar, a temperatura exerce maior influência sobre a tensão, conforme indicam os deslocamentos na horizontal das curvas na Figura 17(a) e 17(b). Com o aumento da temperatura da célula, a tensão de circuito aberto do módulo PV apresenta uma diminuição em seus valores muito mais significativa do que a corrente gerada pelo módulo. Assim, com o aumento da temperatura, além de ocorrer um deslocamento para baixo do ponto de máxima potência (MPP), ele se desloca consideravelmente para a esquerda.

Com relação ao efeito produzido pela radiação solar, pode-se observar que a corrente do módulo PV é o parâmetro mais afetado por sua variação, conforme Figura 18(a). Isso ocorre pelo fato de serem os fótons que liberam os elétrons, que contribuem para o efeito fotovoltaico na estrutura semicondutora. A tensão do circuito aberto sofre poucas alterações com a variação da intensidade luminosa. Dessa forma, tem-se que com o aumento da radiação incidente ocorre um deslocamento para cima do ponto de máxima potência.

## 5. Conclusão

A modelagem do módulo PV é apresentada. O procedimento desenvolvido gera as curvas características V-I e P-V do módulo estudado nesse trabalho. A partir da validação do modelo estudado pode-se utilizá-lo na implementação de qualquer sistema fotovoltaico, variando apenas alguns parâmetros de projeto, particulares de cada módulo PV. Outros trabalhos podem ser desenvolvidos considerando-se a resistência shunt ( $R_{sh}$ ) que foi desconsiderada nesse trabalho a título de simplificação.

## 6. Referências

- ARMSTRONG, S.; HURLEY, W.G. Investigating the Effectiveness of Maximum Power Point Tracking for a Solar System. PESC '05. IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference, 2005, Recife, p. 204 – 209, 16-16 June 2005
- CRESESB. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: Cepel, 2014.
- FREIRE, Cristiano Augusto da Silva e CARVALHO, Paulo César Marques de. Comparação de dois modelos de células fotovoltaicas usando dados reais: modelo de dois diodos versus modelo de um diodo e quatro parâmetros. Encontro de Energia No Meio Rural, 3, 2000, Campinas.
- KYOCERA. KC85T HIGH EFFICIENCY MULTICRYSTAL PHOTOVOLTAIC MODULE. 2014. Disponível em: <<http://www.kyocerasolar.com/assets/001/5177.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2014.
- KOTTAS, T.L.; BOUTALIS, Y.S.; KARLIS, A.D. New maximum power point tracker for PV arrays using fuzzy controller in close cooperation with fuzzy cognitive network. IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 21, n. 5, p. 793 – 803, 3 Sept. 2006.
- PANDIARAJAN, N; MUTHU, Ranganath. Mathematical Modeling of Photovoltaic Module with Simulink. 1st International Conference on Electrical Energy Systems, India, 2011.
- REKIOUA, Djamila; MATAGNE, Ernest. Optimization of Photovoltaic Power Systems: Modelization, Simulaton and Control. 1.ed. Londres: Springer, 2012. p. 53-87.
- TAVARES, Carlos António Pereira. Estudo Comparativo de Controladores Fuzzy Aplicados a um Sistema Solar Fotovoltaico. 2009. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Eletrônica, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.