

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE MODELOS COMPUTACIONAIS REPRESENTATIVOS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

PERFORMANCE EVALUATION OF REPRESENTATIVE COMPUTATIONAL MODELS OF PHOTOVOLTAIC MODULES

Arthur Costa de Souza¹, Laura Elisa Issa², Fernando Cardoso Melo³, Luiz Carlos Gomes de Freitas⁴,
Ivan Nunes Santos⁵

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia, MG, Brasil.

¹Mestre em Engenharia Elétrica, E-mail: arthur_costasouza@hotmail.com

²Engenheira Elétrica, E-mail: lauraeissa@gmail.com

³Mestre em Engenharia Elétrica, E-mail: fernandocardoso101@gmail.com

⁴Doutor em Engenharia Elétrica, E-mail: lcgfreitas@yahoo.com.br

⁵Doutor em Engenharia Elétrica; E-mail: ivan@ufu.br.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar estudos investigativos correlatos à modelagem do principal elemento da geração distribuída por fonte solar, o módulo fotovoltaico, por meio da utilização de programas computacionais no domínio do tempo. Serão avaliados dois modelos matemáticos que representam o comportamento do módulo fotovoltaico na plataforma Matlab/Simulink, dos quais um deles é disponibilizado pela biblioteca deste *software*, fundamentado na modelagem tradicional, e o seguinte implementado de forma simplificada. Complementarmente ao estudo e análise computacional das distintas técnicas de modelagens, tem-se a avaliação de desempenho dos modelos por meio de ensaios reais em campo.

Palavras-chave: Geração Distribuída, Modelagem, Módulo Fotovoltaico, Redes Inteligentes.

ABSTRACT

This paper aims to present investigative studies related to modeling of the main component of solar distributed generation, the PV modules, by means of simulation software in the time domain. Two mathematical models will be evaluated that represent the behavior of the photovoltaic module in the Matlab/Simulink platform, one of them being available from the software library, based on traditional modeling, and the other one implemented by a simplified way. In addition to this study and computational analysis of different modeling techniques, the paper presents a real performance evaluation through practical results.

Keywords: Distributed Generation, Modeling, Photovoltaic Module, Smart Grid.

1 – INTRODUÇÃO

No final da década de 1970, a emergência do movimento ambientalista e a crise do petróleo fizeram dos recursos naturais, da energia e do meio ambiente em geral um tema de grande importância econômica, social e política, o qual pode ser chamado de “questão ambiental”. Esta trouxe a crítica ao modelo de desenvolvimento econômico vigente, mostrando um conflito, senão uma possível incompatibilidade, entre o crescimento econômico e a preservação dos recursos ambientais, e que tal conflito, em última instância, imporia limites à continuidade do próprio crescimento econômico. Desde então, muito se tem discutido sobre a otimização do uso dos recursos naturais e a utilização de fontes de energias sustentáveis, com baixos impactos ambientais.

Nesse contexto, vale destacar que o setor elétrico brasileiro já é caracterizado, há algumas décadas, pela grande participação de fontes renováveis. De acordo com o Balanço Energético Nacional (ANEEL, 2016) estima-se que 76% da oferta de energia elétrica no Brasil é proveniente de fontes renováveis, 61% de origem hídrica.

Como pode ser verificado, na última versão do Estudo de Demanda de Energia (ECOECO, 2015), há uma projeção

de aumento de 3,2% a.a. (ao ano) do consumo de energia elétrica total no Brasil, entre 2013 e 2050. Nesse contexto, faz-se necessário, além do aumento da geração, uma diversificação da matriz energética brasileira com outras fontes renováveis, de forma que o Brasil aumente sua confiabilidade no fornecimento, e ao mesmo tempo mantenha uma matriz energética sustentável e diversificada.

Nesse cenário é previsto um crescimento expressivo da geração distribuída de energia elétrica. Espera-se, em breve, que 10% do consumo total de energia elétrica seja proveniente de autoprodução (ECOECO, 2015), e uma grande parcela desta energia de característica solar.

Assim, sistemas solares fotovoltaicos integrados ao comércio, residências e indústrias, com conexão direta à rede, são soluções viáveis que resultariam, por meio da geração distribuída (via micro e mini geração elétrica), em reduções em investimentos na distribuição e transmissão de energia por parte do governo e de concessionárias, gerando economia e rentabilidade à sociedade como um todo.

De forma a viabilizar a expansão da geração distribuída e antever seu impacto nas redes elétricas de distribuição, sistemas fotovoltaicos são estudados por meio modelos digitais. Tais modelos são, via de regra, implementados em *softwares* capazes de efetuar simulações de circuitos

elétricos no domínio do tempo de modo a considerar a forte dinâmica da rede interligada de energia (DUGAN *et al.*, 2003).

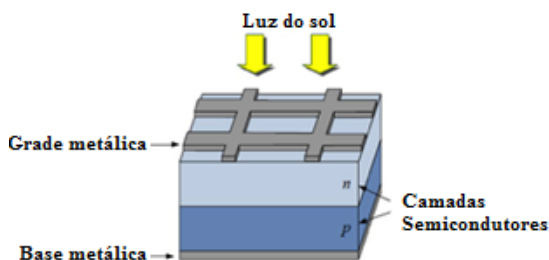
Modelos matemáticos precisos de painéis solares fotovoltaicos (FV) e de outras partes do sistema de geração permitem, entre outras possibilidades, investigar o desempenho dinâmico dos algoritmos rastreadores do ponto de máxima potência (do inglês, *Maximum Power Point Tracking* – MPPT) e facilitam a tarefa de projeto dos controladores e conversores eletrônicos usados no processo de conversão. Além disso, modelos precisos podem ser usados para avaliar a operação desses sistemas de geração quando conectados a uma rede elétrica de distribuição.

Este trabalho de pesquisa está focado na avaliação de desempenho da modelagem dos painéis solares desenvolvida por duas frentes distintas de pesquisa: modelo existente no simulador Matlab®, *PV Array*, e o arranjo evidenciado nas referências Rauschenbach (1980) e Souza *et al.* (2016), que será chamada neste trabalho como Modelo Simplificado. Tal avaliação de desempenho será realizada via estudo de caso computacional e também medições em campo em sistema real.

2 – MODELAGEM COMPUTACIONAL DO PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO

A célula solar fotovoltaica é um dispositivo que transforma a energia emitida pela luz do sol, diretamente, em energia elétrica. A célula é formada por um diodo semiconductor de junção p-n exposta à luz (SEDRA; SMITH, 1998). Os filmes de silício (Si) destas células são dopados com fósforo, para ter carga negativa (tipo *n*), e boro, para permanecer com característica inversa, portador de carga positiva (tipo *p*). Estes são montados sobre uma superfície metálica, conforme mostrado na Figura 1. A parte superior da junção semicondutora *p-n* é conectada a uma fina grade de metal, na qual incide a luz do sol.

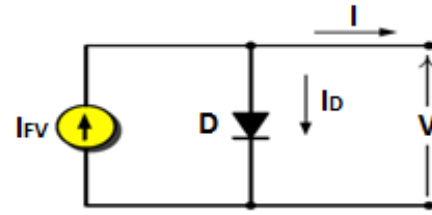
Figura 1 – Estrutura física simplificada de uma célula solar fotovoltaica



2.1 Célula fotovoltaica

Na Figura 2 é apresentado um circuito equivalente da célula fotovoltaica ideal, a mesma representada por uma fonte de corrente, cujo valor da corrente é proporcional à radiação solar incidente. Paralelo à esta fonte tem-se a presença de um diodo diretamente polarizado. Este diodo é representativo da característica não linear da junção *p-n* da célula fotovoltaica ora apresentada.

Figura 2 – Circuito equivalente ideal da célula fotovoltaica



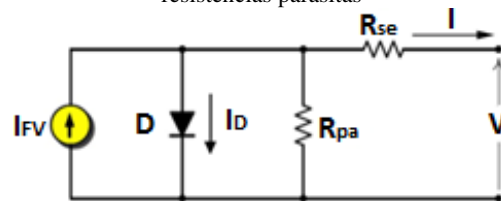
A relação matemática que descreve a característica *I-V* dessa célula ideal está evidenciada na Equação 1.

$$I = I_{FV} - I_D = I_{FV} - I_o \left[e^{\left(\frac{qV}{kT}\right)} - 1 \right] \quad (1)$$

Em que: I_{FV} é a corrente em Ampères gerada pela incidência de luz sobre a célula solar fotovoltaica; I_D é a corrente que flui pelo diodo; I_o é a corrente de saturação que flui pela junção semicondutora da célula FV, q é a carga elementar do elétron ($1,60217646 \cdot 10^{-19}$ Coulomb); k é a constante de Boltzmann ($1,3806503 \cdot 10^{-23}$ J/K); T é a temperatura da junção p-n em Kelvin; e V e I são, respectivamente, tensão e corrente nos terminais da célula (RAUSCHENBACH, 1980).

A partir desse modelo básico de célula fotovoltaica, até então ideal, pode-se representar a célula de uma maneira mais aprimorada, incluindo as resistências em série e em paralelo, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Circuito equivalente da célula fotovoltaica com resistências parasitas



A resistência série (R_{se}), neste arranjo, representa todas as resistências: da base metálica, de contato da base metálica com a camada semicondutora *p*, das camadas semicondutoras *p* e *n*, de contato da camada *n* com a grade metálica e da grade metálica (LASNIER, ANG, 1990). Já a resistência em paralelo (R_{pa}) existe basicamente devido à corrente de fuga da junção semicondutora *p-n* e depende diretamente do método de fabricação da célula fotovoltaica. Este modelo aproxima-se um pouco mais do sistema real de geração de energia.

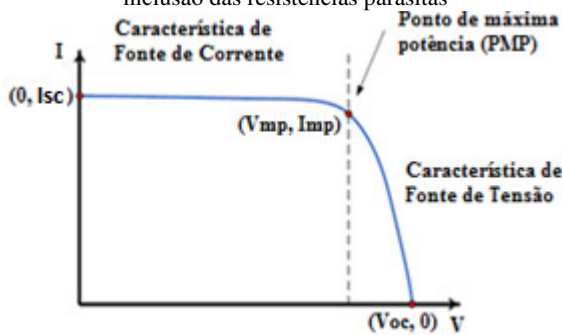
Baseado na Figura 3 pode-se reescrever a Equação 1, conforme a Equação 2:

$$I = I_{FV} - \underbrace{I_o \left[e^{\left(\frac{qV}{nKT}\right)} - 1 \right]}_{I_D} - \frac{V + R_{se}I}{R_{pa}} \quad (2)$$

Na Figura 4 é ilustrada a curva característica aproximada da célula fotovoltaica obtida com a inclusão das resistências parasitas. As resistências R_{se} e R_{pa} interferem nas inclinações da curva *I-V* nas regiões anterior e posterior ao ponto de máxima potência (PMP). Vale ressaltar que n , nesta última equação, é uma constante que expressa o grau

de idealidade da junção semicondutora, cujo valor empírico varia de 1 a 5 (RAUSCHENBACH, 1980), conhecido também como fator de idealização.

Figura 4 – Curva característica de uma célula fotovoltaica com a inclusão das resistências parasitas

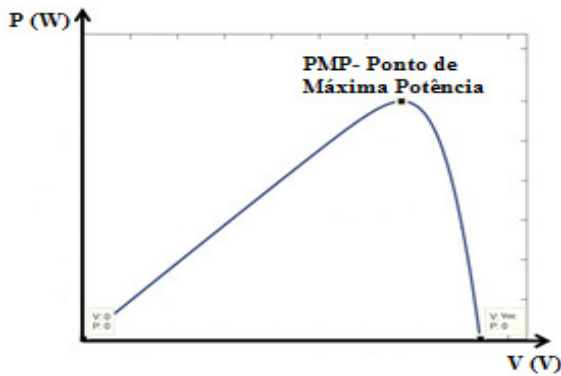


Nota-se que há duas regiões distintas de funcionamento, nas quais a célula apresenta características de fonte de corrente ou fonte de tensão. Podem ser destacados, também, três importantes pontos de funcionamento do sistema, a saber:

- i. Ponto de curto-circuito $(0, I_{sc})$;
- ii. Ponto de máxima potência (V_{mp}, I_{mp}) ;
- iii. Ponto de circuito aberto $(V_{oc}, 0)$.

Complementarmente, na Figura 5 é mostrado um gráfico genérico ilustrativo da potência em termos da tensão gerada por esta célula FV.

Figura 2 – Curva ilustrativa de um típico comportamento de potência gerada por uma célula fotovoltaica em função da tensão



2.2 Modelagem PV Array

A modelagem da célula solar descrito na Equação 2 é genérica para todos os modelos abordados em (RAUSCHENBACH, 1980). Para a modelagem disponibilizado pelo Matlab® (PV Array) tem-se que a corrente gerada pela incidência de luz na célula solar (I_{FV}) depende linearmente da irradiância solar incidente sobre ela e a variação da temperatura, conforme a Equação 3:

$$I_{FV} = (I_{FV,n} + K_I \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad (3)$$

Em que: G e G_n são, respectivamente, irradiações solares em W/m^2 na superfície da célula FV e o valor nominal da mesma; $\Delta T = (T - T_n)$ é a variação de temperatura em Kelvin, em que: T e T_n as temperaturas atual e nominal, respectivamente; K_I é o coeficiente de temperatura em Ampères/Kelvin da corrente de curto circuito e $I_{FV,n}$ é a corrente gerada pela incidência de luz sobre a célula FV nas condições nominais, ou STC ($T_n = 25^\circ C$ e $G_n = 1000 W/m^2$).

Já a corrente de saturação do diodo da célula FV, em função da temperatura de operação, pode ser aproximada pela relação apresentada na Equação 4.

$$I_o = I_{o,n} \left(\frac{T}{T_n}\right)^3 e^{\left(\frac{qE_g}{nk} \left[\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T}\right]\right)} \quad (4)$$

Em que: E_g é a energia de “bandgap” do semicondutor ($E_g = 1,12eV$ para o Si Poli-cristalino a $25^\circ C$); $I_{o,n}$ é a corrente de saturação do diodo cuja relação pode ser escrita como estabelecida na Equação 5.

$$I_{o,n} = \frac{I_{sc,n}}{e^{(V_{oc,n}/nV_{T,n})} - 1} \quad (5)$$

Em que: $I_{sc,n}$ é a corrente nominal de curto circuito da célula FV; $V_{oc,n}$ é a tensão nominal de circuito aberto da célula FV; $V_{T,n}$ é a tensão na temperatura nominal. O modelo da célula fotovoltaica pode ser aprimorado se a relação da Equação 5 for substituída por:

$$I_{o,n} = \frac{I_{sc,n} + K_I \Delta T}{e^{\left(\frac{V_{oc,n} + K_V \Delta T}{nV_{T,n}}\right)} - 1} \quad (6)$$

Em que: K_V é o coeficiente de temperatura em V/K da tensão de circuito aberto.

Essa nova equação simplifica o modelo matemático apresentado nesta seção e cancela o erro do mesmo nas vizinhanças da tensão de circuito aberto e nas demais regiões da curva $I \times V$ (VILLALVA; GAZOLI; FILHO, 2009).

Associando em série e/ou paralelo várias células PV forma-se os chamados painéis fotovoltaicos. Estas disposições têm-se como objetivo a obtenção de sistemas com correntes e tensões mais elevadas. Para um arranjo formado por N_s células em série e N_p células em paralelo, pode-se reescrever a relação dada na Equação 2, conforme Equação 7.

$$I = I_{FV,a} - I_{o,a} \left[e^{\left(\frac{V + IR_{se,a}}{nV_{T,a}}\right)} - 1 \right] - \frac{V + R_{se,a}I}{R_{pa,a}} \quad (7)$$

Em que: $V_{T,a} = N_s KT/q$ é a tensão térmica do arranjo devido a conexão de N_s células em série; $I_{FV,a} = N_p I_{FV}$ e $I_{R,a} = N_p I_R$ são, respectivamente, as correntes das N_p células em paralelo e reversa do arranjo fotovoltaico; $R_{se,a}$ e $R_{pa,a}$ são as resistências equivalentes série e paralelo do arranjo, respectivamente. O subíndice (a) é usado na

Equação 7 para diferenciá-la da Equação 2, por se referir ao arranjo fotovoltaico.

2.3 Modelagem Simplificada

Os estudos atualmente feitos em âmbito computacional têm apresentado o modelo explorado pelo Matlab (*PV Array*) que se encontra em (RAUSCHENBACH, 1980), como um dos mais completos e representativos da atualidade. Contudo, este modelo exige um grande volume de informações, geralmente não disponibilizadas pelos fabricantes, tornando sua aplicação bastante restrita. Não obstante, existe um modelo computacional simplificado de fácil aplicação, mas pouco explorado na literatura.

Neste contexto, esta seção faz uma abordagem do modelo simplificado proposto em (RAUSCHENBACH, 1980). Sua representação matemática é indicada pela Equação 8, lembrando que tal expressão é baseada na Equação 2.

$$I = I_{sc} \left[1 - C_1 \left[e^{\left(\frac{V}{C_2 V_{oc}} \right)} - 1 \right] \right] \quad (8)$$

Em que:

$$C_1 = \left[1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}} \left[e^{\left(\frac{-V_{mp}}{C_2 V_{oc}} \right)} \right] \right] \quad (9)$$

e

$$C_2 = \left[\frac{V_{mp}}{V_{oc}} - 1 \right] \left[\ln \left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}} \right) \right]^{-1} \quad (10)$$

A utilização da Equação 8 resulta em um erro considerável. Para contornar esta questão, uma investigação empírica revelou que um melhor entendimento entre as características calculadas e reais pode ser obtido em intensidades luminosas mais altas, conforme Equação 11.

$$I = K_6 - [e^{(K_4 V^m - K_5)}] \quad (11)$$

Expressando as constantes K_4 , K_5 e K_6 em termos dos três pontos característicos das células I , I_{sc} e V resulta na Equação 12.

$$I = I_{sc} \left[1 - C_3 \left[e^{(C_4 V^m)} - 1 \right] \right] \quad (12)$$

As constantes m , C_4 , C_5 e C_6 são definidas nas Equações 13 a 16, respectivamente.

$$m = \frac{\ln \left(\frac{C_5}{C_6} \right)}{\ln \left(\frac{V_{mp}}{V_{oc}} \right)} \quad (13)$$

$$C_4 = \frac{C_6}{(V_{oc})^m} \quad (14)$$

$$C_5 = \ln \left[\frac{I_{sc}(1 + C_3) - I_{mp}}{(C_3 \cdot I_{sc})} \right] \quad (15)$$

$$C_6 = \ln \left[\frac{(1 + C_3)}{C_3} \right] \quad (16)$$

A constante C_3 não pode ser expressa em termos dos três pontos característicos, porém por meios empírico, verificou-se que um valor de 0,01175 para C_3 produz o mínimo de erros na gama de irradiância e temperatura considerada. Com este valor substituído por C_3 , as expressões referentes às outras constantes são simplificadas, como mostrado nas Equações 17 a 20.

$$C_6 = 4,46 \quad (17)$$

$$m = \frac{\ln \left(\frac{C_5}{4,46} \right)}{\ln \left(\frac{V_{mp}}{V_{oc}} \right)} \quad (18)$$

$$C_4 = \frac{4,46}{(V_{oc})^m} \quad (19)$$

$$C_5 = \ln \left[\frac{0,01175 \cdot I_{sc} - I_{mp}}{0,01175 \cdot I_{sc}} \right] \quad (20)$$

A curva ou o modelo celular, dado pela Equação 12, corresponde a uma curva I-V de referência arbitrária. Ela é válida somente em um nível de irradiância e temperatura. Para torná-la, aplicável a outros níveis de irradiância e temperatura são utilizadas as Equações 21 a 26.

$$\Delta T = T - T_{ref} \quad (21)$$

$$\Delta I_{sc} = I_{sc} \cdot \left(\frac{S}{S_{ref}} - 1 \right) + \alpha \cdot \Delta T \quad (22)$$

$$\Delta I_{mp} = I_{mp} \cdot \left(\frac{S}{S_{ref}} - 1 \right) + \alpha \cdot \Delta T \quad (23)$$

$$\Delta V = \beta \cdot \Delta T - \Delta I_{sc} \cdot R_s \quad (24)$$

$$V_{new} = V_{ref} + \Delta V \quad (25)$$

$$I_{new} = I_{ref} + \Delta I \quad (26)$$

Em que: V é a tensão nos terminais da célula; V_{oc} refere-se a tensão de circuito aberto; V_{mp} trata-se da tensão de máxima potência; V_{ref} é a tensão nas condições de referência; I consiste na corrente de saída da célula; I_{sc} refere-se a corrente de curto-circuito; I_{mp} trata-se na corrente de máxima potência; I_{ref} é a corrente nas condições de referência; α refere-se ao coeficiente de temperatura para a corrente de curto-circuito na irradiância solar de referência ($A/^\circ C$); β trata-se do coeficiente de temperatura para a tensão de circuito aberto na irradiância solar de referência ($V/^\circ C$); R_s consiste na resistência série da célula; S é a irradiância solar total no plano do gerador fotovoltaico (W/m^2); S_{ref} , trata-se da irradiância solar de referência ($1000 W/m^2$); T refere-se a temperatura da célula solar ($^\circ C$); T_{ref} é a temperatura de referência da célula solar ($25^\circ C$).

Esse equacionamento representa uma síntese do chamado Modelo Simplificado, que será tratado neste trabalho.

3 – ESTUDOS DE CASOS REALIZADOS

Uma vez apresentadas as duas modelagens de painéis fotovoltaicos, os trabalhos investigativos avançam com a realização de uma avaliação de desempenho das distintas estratégias de representação computacional em termo de incidência de irradiação solar e temperatura local. Tal avaliação de desempenho é realizada via estudo de caso, no qual há a confrontação das modelagens computacionais com medições reais. Neste sentido, é realizado estudo de caso em dois painéis: um da marca Kyocera e outro da marca BYD. Os modelos avaliados são os dois apresentados, ou seja, um disponibilizado pelo Matlab® em seus exemplos de aplicação (*PV Array*) e o outro explorado por pesquisadores da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) embasado nos princípios da Modelagem Simplificada.

3.1 Painéis fotovoltaicos avaliados

Conforme afirmado, são dois os painéis fotovoltaicos avaliados, os quais se encontram descritos a seguir. Todavia, é importante ressaltar que alguns parâmetros relacionados aos painéis nem sempre se encontram disponíveis ou não são de fácil obtenção, a exemplo da resistência série (R_s), a qual neste estudo será determinada por meio de um *software* livre chamado *PV-Analyzer*.

3.1.1 Painel Kyocera KD 135SX – UPU

O Kyocera é um dos maiores fabricantes e provedores de sistemas solares fotovoltaicos, verticalmente integrados, do mundo. É, portanto, uma empresa bem-conceituada no mercado, com mais de 35 anos de experiência em pesquisa e engenharia. O painel analisado trata-se do Kyocera KD 135SX–UPU, pertencente ao laboratório de Eletrônica de Potência da UFU. Seus parâmetros encontram-se disponíveis na Tabela 1.

Tabela 1 – Especificações técnicas nominais do módulo Kyocera

Kyocera KD 135SX-UPU	
Potência Máxima ($P_{m\acute{a}x}$)	135 W (+5%/-5%)
Tensão Máxima (V_{mpp})	17,7 V
Corrente Máxima (I_{mpp})	7,63 A
Tensão em Circuito Aberto (V_{oc})	22,1 V
Corrente de Curto-Circuito (I_{sc})	8,37 A
Tensão Máxima do Sistema	600 V
Coefficiente de Temperatura de V_{oc}	-0,362%/°C
Coefficiente de Temperatura de I_{sc}	0,060%/°C
Número de Células por Módulo	36

É importante salientar que o arranjo existente se trata de 15 unidades (módulos) em série. Neste sentido, na Figura 6 é mostrado tal arranjo fotovoltaico.

Figura 6 – Painel fotovoltaico Kyocera (15 módulos) empregado no estudo de caso



3.1.2 Painel BYD-240 P6-30

O BYD é também um fabricante de sistemas solares fotovoltaicos muito bem-conceituado, destacando-se pela alta eficiência de seus painéis que chegam à elevados 17,8%.

O Painel analisado, neste estudo de caso, é o BYD–240 P6–30, pertencente ao laboratório de Qualidade da Energia Elétrica da UFU. A Tabela 2 mostra seus principais parâmetros elétricos e físicos.

Tabela 2 – Especificações técnicas nominais do módulo BYD

BYD-240-P6-30	
Potência Máxima ($P_{m\acute{a}x}$)	240W
Tensão Máxima (V_{mpp})	30V
Corrente Máxima (I_{mpp})	8A
Tensão em Circuito Aberto (V_{oc})	36V
Corrente de Curto-Circuito (I_{sc})	8,96A
Tensão Máxima do Sistema	-0,34 %/C
Coefficiente de Temperatura de V_{oc}	0,045 %/°C
Coefficiente de Temperatura de I_{sc}	-0,47 %/°C
Número de Células por Módulo	60

Vale ressaltar que o arranjo a ser trabalhado possui 4 unidades (módulos) em conexão série. Assim sendo, na Figura 7 é mostrado tal arranjo fotovoltaico.

Figura 7 – Painel fotovoltaico BYD (04 módulos) empregado no estudo de caso



3.2 Modelos computacionais avaliados

Os modelos computacionais avaliados são os dois mencionados, ou seja, modelo disponibilizado nos exemplos do *software* Matlab® 2016 e o Modelo Simplificado implementado por pesquisadores da UFU (SOUZA *et al.*, 2016).

O Modelo *PV Array* encontra-se disponível no Simulink do Matlab®, nas versões superiores à 2014. O Matlab/Simulink®, como bem sabido, é uma ferramenta amplamente utilizada no ramo da engenharia elétrica, muito difundida no mundo, confiável e muito didática. Esta modelagem é constituída por um arranjo série/paralelo que permite implementar módulos fotovoltaicos predefinidos pelo *National Renewable Energy Laboratory (NREL) – System Advisor Model*, bem como inserir alguns módulos fotovoltaicos por meio de seus parâmetros elétricos. Este modelo está embasado em cinco parâmetros: utilização de fonte de corrente I_{PV} , um diodo de corrente I_D , uma resistência série R_s e uma resistência paralelo R_p , para representação das características *I-V* dos módulos.

O segundo modelo avaliado consiste em um modelo simplificado também estudado na referência (RAUSCHENBACH, 1980). Para implementação foi empregado, mais uma vez, a ferramenta Simulink da plataforma Matlab®, contudo, neste caso, tão somente para implementação do modelo. Vale ressaltar que para este estudo a estratégia de modelagem será tratada tão somente por Modelo Simplificado.

3.3 Descrição do equipamento empregado nas medições

O equipamento utilizado nas medições em campo foi o Solar I-V 400, cujo fabricante é a *HT Instruments*. Tal equipamento possibilita o teste do painel fotovoltaico, medindo sua eficiência e sua característica *I-V*. Podendo ser empregado tanto para um único módulo quanto em arranjos fotovoltaicos. A curva *I-V* é fornecida por meio de uma unidade remota de medição de irradiância e temperatura. A sincronização entre a unidade principal e a unidade remota, é feita por conexão sem fio via radiofrequência, o que garante a simultaneidade necessária de medições.

Ressalta-se, ainda, que a característica da curva *I-V* não é afetada pela resistência dos cabos de medição, uma vez que esta grandeza também é considerada com a aplicação do método de medição de 4 terminais, método de Kelvin

(MEDEIROS FILHO, 1981). Tem-se, na Figura 8, o equipamento ora descrito e utilizado nos estudos em campo.

Figura 8 – Equipamento Solar IV 400 da *HT Instruments* empregados nos estudos em campo



Na Tabela 3 é apresentado o erro intrínseco do equipamento utilizado, Solar I-V, para a caracterização das curvas *I-V* e *P-V* dos módulos fotovoltaicos.

Tabela 3 – Erro atrelado ao equipamento Solar I-V 400

Precisão do equipamento Solar I-V	
Parâmetro	Precisão
Vcc (OPC)	$\pm(1,0\%rdg+2dgt)$
Icc (OPC)	$\pm(1,0\%rdg+2dgt)$
Pmáx (OPC)	$\pm(1,0\%rdg+6dgt)$
Pmáx (STC)	$\pm(5,0\%rdg+1dgt)$
Irradiância	$\pm(1,0\%rdg+5dgt)$
Temperatura do módulo	$\pm(1,0\%rdg+1^\circ C)$

Em que: *rdg* são as leituras e *dgt* é o número de dígitos. Assim, a precisão é calculada como $\pm [\% rdg+(dgt). Resolu\c{c}\tilde{a}\tilde{o}]$ na temperatura de $23\pm 5^\circ C$, com a umidade relativa do ar menor que 80%.

3.4 Síntese dos estudos realizados

Com objetivo de uma melhor clareza dos estudos realizados foi desenvolvida a Tabela 4.

Tabela 4 – Quadro resumo dos estudos realizados

Painel	Resultados a Serem Comparados
Kyocera	Medição em Campo
	Modelo <i>PV Array</i>
	Modelo Simplificado
BYD	Medição em Campo
	Modelo <i>PV Array</i>
	Modelo Simplificado

4 – RESULTADOS DOS ESTUDOS DE CASOS

Nesta seção são apresentados os resultados advindos das medições em campo dos painéis e também provenientes das simulações computacionais.

4.1 Resultados das medições em campo

Nesta subseção são apresentados os resultados advindos de medições em campo feitas para cada um dos painéis selecionados. Vale destacar que as mesmas ocorreram em datas e horários distintos e ressalva-se que não foram realizados quaisquer tipos de tratamento estatístico.

4.1.1 Painel Kyocera

Na Tabela 5 consta um resumo dos principais dados obtidos durante tal processo de medição em campo para o painel Kyocera.

Tabela 5 – Dados obtidos por meio da medição em campo do painel Kyocera

Kyocera			
Parâmetros	Resultado 15 unidades	Equivalente unitário	Equivalente unitário estimado para 1.000 W/m ² e 25 °C
V_{oc} [V]	293,94	19,60	21,67
I_{sc} [A]	6,96	6,96	8,10
V_{mpp} [V]	229,84	15,32	17,53
I_{mpp} [A]	6,28	6,28	7,34
$P_{m\acute{a}x}$ [W]	1444,32	96,29	128,56
Irradiância [W/m ²]	843	843	1000
Temperatura Módulos [°C]	51,1	51,1	25
Alpha	0,0601	0,0601	0,0601
Beta	-0,362	-0,362	-0,362
Discrepância ^a %		-4,77%	

(a) discrepância percentual entre valores determinados via equipamento de medição e parâmetros nominais estabelecidos em *datasheet* para $P_{m\acute{a}x}$.

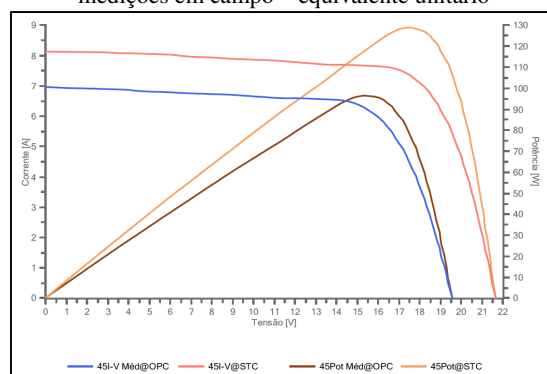
A última coluna da Tabela 5 trata de uma estimativa feita pelo equipamento de medição para uma condição de irradiância de 1000W/m² e temperatura de 25 °C. Esta estimativa é conhecida como STC (*Standard Test Conditions*). Tal estimativa foi realizada para possibilitar a avaliação de eventuais discrepâncias entre condições nominais dos painéis (*datasheet*) e aquelas encontradas via instrumento de medição. Vale, desde já, destacar que esta discrepância pode ser, entre outras razões, atribuída ao envelhecimento do painel e sujeiras no mesmo.

A potência equivalente unitária em OPC (96,29W) é convertida pelo próprio equipamento para o seu equivalente em STC (128,56W). Dessa forma, é possível obter a discrepância de -4,77%, por meio da divisão da potência equivalente em STC pela potência STC do *datasheet* (135W). Vale ressaltar que a discrepância de -4,77% obtido pela medição está dentro da tolerância estipulado pelo fabricante de ±5%.

Adicionalmente, na Figura 9 constam as curvas *P-V* e *I-V* encontradas em tal procedimento de medição. Vale

destacar que as curvas em legenda @OPC são aquelas relacionadas com a medição propriamente dita (obtida para o equivalente unitário de painel fotovoltaico).

Figura 9 – Curvas *P-V* e *I-V* do painel Kyocera a partir de medições em campo – equivalente unitário



4.1.2 Painel BYD

Na Tabela 6 tem-se um resumo dos principais dados de medição em campo para o painel BYD.

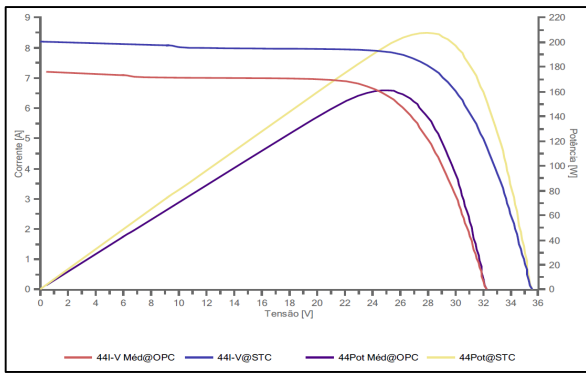
Tabela 6 – Dados obtidos por meio da medição em campo do painel BYD

BYD			
Parâmetros	Resultado 4 unidades	Equivalente unitário	Equivalente unitário estimado para 1.000 W/m ² e 25 °C
V_{oc} [V]	129,16	32,29	35,56
I_{sc} [A]	7,19	7,19	8,09
V_{mpp} [V]	98,88	24,72	27,98
I_{mpp} [A]	6,50	6,50	7,41
$P_{m\acute{a}x}$ [W]	643,04	160,76	207,29
Irradiância [W/m ²]	867	867	1000
Temperatura Módulos [°C]	52,2	52,2	25
Alpha	0,0451	0,0451	0,0451
Beta	-0,34	-0,34	-0,34
Discrepância ^a %		-13,63%	

(a) discrepância percentual entre valores determinados via equipamento de medição e parâmetros nominais estabelecidos em *datasheet* para $P_{m\acute{a}x}$.

Na Figura 10 são apresentadas as curvas *P-V* e *I-V*, deste painel BYD, em que, mais uma vez, as curvas com complemento @OPC relacionadas com a medição propriamente dita (obtida para o equivalente unitário de painel fotovoltaico) e as curvas com extensão @STC tratam-se das curvas estimadas para as condições de 1.000 W/m² e 25 °C.

Figura 10 – Curvas *P-V* e *I-V* do painel BYD a partir de medições em campo – equivalente unitário



Vale ressaltar que, na Figura 10, a discrepância de 13,63% constata que alguns dos módulos do arranjo, possivelmente, apresenta redução na sua potência gerada, ou seja, está com algum tipo de falha porque a tolerância permitida pelo fabricante é de 0 até +3%.

4.2 Resultados das simulações na modelagem PV Array

As simulações foram realizadas adotando-se as condições de operação (OPC) encontradas durante as medições em campo. Somente assim, poder-se-á efetivamente realizar as comparações necessária ao trabalho ora descrito. Os resultados estão detalhados na sequência.

4.2.1 Painel Kyocera

Na Tabela 7 são apresentados os valores obtidos por meio da simulação do módulo Kyocera advindos da aplicação da modelagem PV Array do Matlab®. Ressalta-se, que tal módulo já se encontrava disponível nesta modelagem computacional. Fora utilizado, para tanto, os valores nominais, uma vez que estes estão muito próximos dos valores estimados via equipamento de medição, conforme pode ser observado pelas Tabelas 1 e 4.

Tabela 7 – Seleção de dados obtidos por meio da simulação do painel Kyocera na modelagem PV Array

Parâmetros	Valores advindos de simulação
V_{oc} [V]	19,40
I_{sc} [A]	7,17
V_{mpp} [V]	15,50
I_{mpp} [A]	6,20
$P_{máx}$ [W]	96,38

As condições ambientais de operação foram 843 W/m² de irradiância e 51,1 °C de temperatura.

4.2.2 Painel BYD

Verificou-se, neste momento, uma primeira limitação do modelo PV Array disponível no Matlab®, dado que não foi possível inserir todas as informações necessárias ao funcionamento o módulo BYD neste modelo existente no software. Tal procedimento é imprescindível pelo fato de que tal modelo de painel não se encontra cadastrado na modelagem existente.

Em outras palavras, pode-se afirmar que o módulo BYD-240 P6-30 não está pré-inserida na modelagem PV Array, sendo assim, por ser esta uma modelagem mais complexa, é necessário inserir valores que não são obtidos por meio de datasheet ou medição. A exemplo de I_{ph} e I_{sat} , necessários para que se possa plotar o gráfico e obter os valores a serem analisados nesse trabalho. Assim sendo, apenas o módulo Kyocera terá seu desempenho analisado nesta modelagem PV Array do Matlab®.

4.3 Resultados das simulações na modelagem simplificada

Dando continuidade à implementação computacional dos painéis selecionados, as condições ambientais de medição em campo foram inseridas na modelagem simplificada implementada no Simulink. Mais uma vez, foi empregado valores nominais de datasheet.

4.3.1 Painel Kyocera

Na Tabela 8 são mostrados os resultados da simulação do painel Kyocera via modelagem simplificada.

Tabela 8 – Seleção de dados obtidos por meio da simulação do painel Kyocera na modelagem simplificada

Parâmetros	Valores Advindos de Simulação
V_{oc} [V]	19,66
I_{sc} [A]	7,19
V_{mpp} [V]	16,00
I_{mpp} [A]	6,28
$P_{máx}$ [W]	100,40

As condições ambientais de operação foram, mais uma vez, 843W/m² de irradiância e 51,1 °C de temperatura.

4.3.2 Painel BYD

Os resultados da simulação do painel BYD advindos da aplicação da modelagem simplificada estão na Tabela 9.

Tabela 9 – Seleção de dados obtidos por meio da simulação do painel BYD na modelagem simplificada

Parâmetros	Valores advindos de simulação
V_{oc} [V]	33,64
I_{sc} [A]	7,83
V_{mpp} [V]	27,20
I_{mpp} [A]	6,78
$P_{máx}$ [W]	184,50

Para o painel BYD, as condições ambientais de operação foram 867 W/m² de irradiância e 52,2 °C de temperatura do painel. Desde já, pode-se constatar que na corrente modelagem foi possível a inserção do módulo BYD, a despeito das limitações da modelagem anterior elencadas para a inserção de tal módulo. Na sequência, tem-se a análise de desempenho e respectiva comparação dos resultados de simulação com as medições feitas em campo.

5 – ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS ESTUDOS DE CASOS

Uma vez realizadas as medições e efetuadas as simulações passa-se à fase de análise de desempenho. Neste sentido, para efeito de comparação, os valores de referência são

aqueles encontrados durante as medições no sistema real de campo. Os resultados relacionados aos painéis Kyocera e BYD estão nas Tabela 10 e 11, respectivamente.

Tabela 10 – Comparação dos valores obtidos nas simulações e medição do painel Kyocera – 843 W/m² e 51,1 °C

Parâmetros	Medição em campo	Painel Kyocera			
		Modelo PV Array		Modelo Simplificado	
		Valor	Discrepância	Valor	Discrepância
V_{oc} [V]	19,60	19,40	-1,02%	19,66	0,31%
I_{sc} [A]	6,96	7,17	3,02%	7,19	3,30%
V_{mpp} [V]	15,32	15,50	1,17%	16,00	4,44%
I_{mpp} [A]	6,28	6,20	-1,28%	6,275	-0,08%
$P_{máx}$ [W]	96,29	96,38	0,01%	100,40	4,27%

Tabela 11 – Comparação dos valores obtidos nas simulações e medição do painel BYD – 867 W/m² e 52,2 °C

Parâmetros	Medição em campo	Painel BYD			
		Modelo PV Array		Modelo Simplificado	
		Valor	Discrepância	Valor	Discrepância
V_{oc} [V]	32,29	-	-	33,64	4,18%
I_{sc} [A]	7,19	-	-	7,83	8,90%
V_{mpp} [V]	24,73	-	-	27,20	9,99%
I_{mpp} [A]	6,50	-	-	6,78	4,31%
$P_{máx}$ [W]	160,76	-	-	184,50	14,77%

Diante dos resultados advindos do estudo de caso realizado poder-se afirma que:

- Num primeiro momento, observou-se uma grande similaridade, no painel Kyocera, entre os valores nominais (Tabela 1) e os valores estimados (STC) via equipamento de medição (Tabela 5), apresentando uma pequena discrepância de -4,77%. Por outro lado, verifica-se uma maior discrepância quando se realiza a mesma comparação para o painel BYD, conforme Tabelas 2 e 5, da ordem de -13,63%. Isto significa que ambos painéis estão em condições de geração de potência abaixo da nominal de fábrica.
- No que diz respeito aos resultados da Tabela 10 (Kyocera) pode-se concluir que há uma boa correlação entre os resultados encontrados via medições e aqueles gerados pelas simulações em ambos modelos. A maior discrepância encontrada é de aproximadamente 4% e está relacionada com a potência máxima, o que é coerente com a discrepância percentual encontrada para o painel ora aferido, no tocante à $P_{máx}$.
- Quando da comparação dos resultados do painel BYD, Tabela 11, verifica-se que para os parâmetros V_{oc} , I_{sc} e I_{mpp} tiveram uma boa correlação entre os valores encontrados via modelagem simplificada e aqueles colhidos em campo, por outro lado, V_{mpp} e, consequentemente, $P_{máx}$ apresentaram grandes discrepância, em torno de 10% e 15%, respectivamente. Assim, é muito importante ressaltar que a discrepância encontrada entre os valores nominais do *datasheet* e aqueles estimados via equipamento de aferição são, praticamente, 14% para a potência gerada estando, assim, em consonância com as discrepâncias obtidas na simulação.

CONCLUSÕES

Este artigo apresentou, em um primeiro momento, uma visão geral da geração distribuída com uma ênfase para a geração solar fotovoltaica, mostrando o cenário atual em termos de Brasil e mundo, bem como, as perspectivas de ampliação desta tecnologia. Foram detalhadas as principais etapas do processo de geração fotovoltaica, focando, particularmente, na modelagem matemática do painel fotovoltaico.

Num segundo instante foram realizados diversos estudos levando-se em consideração dois modelos computacionais – modelo *PV Array*/Matlab® e o modelo Simplificado – e duas distintas marcas de módulos fotovoltaicos existentes nas edificações da UFU – Kyocera e BYD. O procedimento de análise de desempenho partiu de medições em campo e posterior comparação dos resultados, assim encontrados, com aqueles advindos das modelagens implementadas. O desempenho dos modelos computacionais foram em geral satisfatórios. As discrepâncias encontradas foram provocadas pelas variações dos parâmetros nominais de um dos painéis, as quais foram identificadas no processo de medição. Os resultados tiveram discrepâncias muito coerentes com estas variações previamente verificadas.

Por fim, ressalta-se a limitação encontrada para a modelagem *PV Array*, uma vez que não foi possível a inserção do painel BYD comprometendo-se, assim, parte da análise de desempenho e ao mesmo tempo evidenciando sua não flexibilidade quando da necessidade de inserção, alteração de painéis em sua plataforma de dados.

REFERÊNCIAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Banco de Informações de Geração – BIG. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/>>

capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso em: 25 out. 2016.

DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; SANTOSO, S.; BEATY, H. W. **Electrical power systems quality**. 2. ed., New York: McGraw-Hill, 2003.

ECOECO – **Sociedade Brasileira de Economia Ecológica**. Disponível em: <<http://www.ecoeco.org.br/>>. Acesso em: 29 mar. 2015.

LASNIER, F.; ANG, T. G. **Photovoltaic Engineering Handbook**. New York: Adam Hilger, 1990, 80 p.

MEDEIROS FILHO, S. **Fundamentos de Medidas Elétricas**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: Editora Guanabara Dois S.A., 1981, 307 p.

RAUSCHENBACH, H. S. **Solar Cell Array Design Handbook**. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1980. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-7915-7>.

SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. **Microelectronic Circuits**. 4. ed. Oxford: Oxford University Press, 1998.

SOUZA, A. C.; MELO F. C.; OLIVEIRA, T. L.; TAVARES, C. E. Performance Analysis of the Computational Implementation of a Simplified PV Model and MPPT Algorithm. **IEEE Latin America Transactions**, v. 24, n. 2, p. 792-798, 2016. <https://doi.org/10.1109/TLA.2016.7437224>.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R.; FILHO, E. R. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. **Transactions on Power Electronics**. v. 24, n. 5, p. 1198-1208, 2009. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2013862>.