

# MODELAGEM MATEMÁTICA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EMPREGADOS EM AMBIENTES DE SIMULAÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Luís F. Sauthier, Andressa T. Diefenthaler, Paulo S. Sausen, Airam T. Z. R. Sausen,  
Maurício de Campos e Giordano Walker  
Departamento de Ciências Exatas e Engenharias  
Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul  
Ijuí, Rio Grande do Sul  
Email: luisfernandosauthier@gmail.com

**Resumo**—A geração distribuída de energia em conjunto com o uso de fontes de energia renováveis vem evoluindo nos últimos anos. Acredita-se, atualmente, que as tecnologias de energia renováveis, com destaque para a energia solar fotovoltaica, podem atender em grande parte a demanda crescente a preços iguais, ou até inferiores aos normalmente praticados para a energia convencional. Dentro deste contexto, neste artigo é apresentada a primeira etapa do desenvolvimento de um ambiente de simulação para geração distribuída a partir da energia solar fotovoltaica. É apresentada uma análise comparativa entre três modelos matemáticos de células solares: Ideal, Real e de Dois Diodos. A partir dos resultados das simulações que considera a influência da irradiância e da temperatura é realizada uma análise comparativa entre os modelos. Para os cenários apresentados neste trabalho, o modelo real é o mais acurado quando comparado aos demais modelos simulados.

**Palavras-chave** – Sistema On Grid, célula solar, modelos matemáticos, geração distribuída.

## I. INTRODUÇÃO

A energia é considerada um importante agente na geração de riqueza e um fator significativo no desenvolvimento econômico. Somente nas últimas duas décadas do século passado o risco e a realidade da degradação ambiental tornaram-se mais evidentes. O aumento de problemas ambientais tem ocorrido pela combinação de vários fatores, dentre eles, os principais são o aumento da população mundial, o aumento do consumo de energia, e à crescente atividade industrial [1].

Obter soluções para os problemas ambientais que a humanidade enfrenta atualmente requer ações de longo prazo vinculadas ao desenvolvimento sustentável. Destaca-se como uma alternativa eficiente e eficaz a utilização de recursos energéticos renováveis. No entanto, para o uso desses recursos existe a necessidade de ocorrer o equilíbrio entre a produção e consumo de energia uma vez que realizar o armazenamento da mesma para posterior utilização, requer técnicas complexas acarretando em muitos casos, a inviabilidade do processo como um todo.

Neste cenário, a segurança e a confiabilidade do sistema de fornecimento de energia elétrica também ganham cada vez mais atenção devido aos requisitos críticos e rigorosos, tanto dos órgãos reguladores, como dos consumidores. As tecnologias de energia renovável distribuída estão se tornando cada vez mais importantes e presentes nos sistemas de fornecimento de energia em muitos países. Observa-se que a energia renovável distribuída incorpora várias tecnologias, tais como, energia solar, turbinas eólicas, células de combustível, pequenas centrais hidrelétricas, biomassa, geotérmica e sistemas de energia oceânica (ondas e marés).

A energia solar em módulos fotovoltaicos, em oposição à sistemas de concentração solar, é a tecnologia solar que gradativamente tem ocupado um lugar de destaque na geração distribuída, especialmente no Brasil. Esta tecnologia tem ganhado um impulso significativo nas duas últimas décadas como uma das opções de geração de energia renovável mais viável, contribuindo para atingir metas de energia sustentável em muitas redes de energia em todo o mundo. Paralelamente, as operadoras de redes de distribuição estão sendo obrigadas a resolver vários problemas de planejamento, operação e controle vinculados ao crescente uso da geração solar fotovoltaica distribuída [2].

Por outro lado, o investimento financeiro necessário na implementação de uma microgeração solar ainda é elevado. Desta forma, estratégias e metodologias que permitem quantificar e prever o tempo de retorno desse investimento, assim como de simular de forma eficiente a quantidade de energia gerada pelo sistema passa a ter uma significativa importância, tornando-se um campo de interesse na pesquisa. Uma das estratégias que pode ser utilizada é a utilização da modelagem matemática. Assim, é possível produzir modelos completos que são capazes de simular o tempo de retorno do investimento para o consumidor, além de analisar os impactos que este tipo de geração pode ocasionar na rede de distribuição, por parte da concessionária.

Atualmente existem diversos trabalhos que realizam a mo-

delagem matemática de diversas partes de um sistema de geração distribuída usando módulos fotovoltaicos [3], [4]. No entanto, a maioria destes trabalhos realizam a modelagem matemática de um segmento específico da planta. Existe uma carência de modelos que descrevem, de forma completa e integrada, as questões anteriormente levantadas. Neste contexto, o presente trabalho objetiva apresentar a primeira etapa da modelagem de um sistema completo de geração distribuída a partir da geração fotovoltaica, que é constituída pela implementação, simulação e análise de três diferentes modelos matemáticos atualmente empregados na descrição de módulos fotovoltaicos, que são: Ideal, Real e modelo de Dois Diodos. A análise abrange questões de aplicabilidade e correspondência dos modelos existentes com o comportamento real da geração distribuída, sob inúmeras adversidades, tais como o nível de irradiação solar e temperatura.

O trabalho está organizado da seguinte forma. Na Seção II são apresentados uma revisão sobre a geração distribuída, com ênfase em sistemas fotovoltaicos conectados à rede (*On Grid*). Na Seção III são apresentados os modelos matemáticos utilizados nesse trabalho. Na Seção IV são apresentados os resultados das simulações destes modelos, assim como uma análise comparativa entre os mesmos. E finalmente, na Seção VI são apresentadas as considerações finais e as propostas para trabalhos futuros.

## II. GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA

Nesta seção, inicialmente, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre como ocorre a geração distribuída de energia. Em seguida são apresentadas as principais características dos módulos fotovoltaicos.

O sistema de energia é constituído por três subsistemas principais que são: os sistemas de geração, transmissão e distribuição [5]. Como as usinas de geração de energia estão normalmente localizadas longe dos centros de carga, todo o sistema de energia está geograficamente distribuído por uma vasta área. Neste contexto, a diversificação do uso da energia e a redução dessas distâncias passam pelo uso da Geração Distribuída. Campo de imenso potencial de investimento pois trata da produção de energia de forma descentralizada, no próprio local ou próximo ao consumidor independentemente da potência, tecnologia e fonte.

A geração de energia de forma distribuída, vem ganhando destaque nos últimos anos principalmente pela premissa de venda de excedentes à concessionária através de sistemas *On Grid*, ou no caso do Brasil, por compensação de energia. Os sistemas *On Grids* diferentemente dos sistemas isolados que atendem a um propósito específico e local, não utilizam sistemas de armazenamento de energia, em virtude, principalmente do alto custo de investimento e pelo alto nível de manutenção. Nos sistemas geração fotovoltaicos, o rendimento energético varia devido às alterações diárias e sazonais da energia solar. Na Europa Central por exemplo, a irradiância média recebida durante o verão é cerca de cinco a seis vezes maior do que no inverno [6]. Portanto, esses sistemas fotovoltaicos têm de estar equipados com dispositivos de armazenamento de

energia suficientes para fornecer cargas durante períodos de pouca ou nenhuma irradiação [7]. O armazenamento torna o sistema mais caro (especialmente o armazenamento sazonal) e aumenta os custos da energia gerada. Portanto, a rede pública é usada como “armazenamento” na qual a energia é alimentada durante os períodos em que a geração é maior do que o consumo e, da mesma forma, consumida durante os períodos sem geração de energia fotovoltaica [8].

O Brasil possui grande potencial de investimento desta fonte de energia. E com a evolução do mercado, o país já ocupa a quinta posição na capacidade de aquecimento solar. Todavia, carece de indústrias nacionais focadas na geração fotovoltaica para fabricação de módulos e de um marco regulatório bem definido, além do alto custo tecnológico que torna esta fonte menos competitiva. No Rio Grande do Sul, o potencial de geração de energia solar fotovoltaica é comparável a regiões do globo com intensa pesquisa e desenvolvimento aplicados a este segmento.

As variações de temperatura, umidade e Irradiação solar no Rio Grande do Sul são o grande empecilho na geração fotovoltaica. O fato de os extremos serem demasiadamente afastados dificulta a captação da energia solar pelos módulos fotovoltaicos. Dados da rede SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais) demonstram que os níveis médios de Radiação Global Horizontal (RGH) nos meses de inverno (Junho a Setembro) atingem cerca de 30% das médias de RGH nos meses do verão, como ilustrado pela Fig. (1). Uma relação direta é, uma restrita contribuição energética a níveis tão baixos de irradiação. Portanto, os modelos que descrevem os níveis de potência e eficiência dos módulos solares devem considerar essas variações de modo a intensificar a produção no ano todo. As intensas pesquisas e a adoção de novas tecnologias favorecem a fabricação de módulos fotovoltaicos mais eficientes.

### A. Características dos módulos Fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos são dispositivos de estado sólido que convertem a luz do sol, a fonte de energia mais abundante

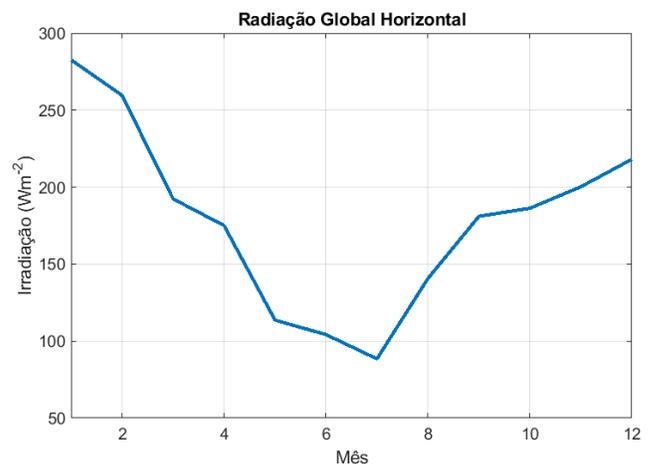


Fig. 1: Níveis médios de RGH.

do planeta, diretamente em eletricidade sem um mecanismo intermediário de aquecimento ou equipamento rotativo [7]. Os módulos fotovoltaicos não possuem partes móveis e como resultado, requerem manutenção mínima e tem uma vida útil longa. Geram eletricidade sem produzir emissões de gases de efeito estufa ou quaisquer outros gases e sua operação é completamente silenciosa. Sistemas fotovoltaicos podem ser construídos em praticamente qualquer tamanho variando de mW a MW e os sistemas são modulares, ou seja, mais módulos podem ser facilmente adicionados para aumentar a produção.

Uma célula fotovoltaica consiste em duas ou mais camadas finas de material semicondutor, geralmente o silício, que quando exposto à luz geram cargas elétricas. A corrente elétrica de uma única célula é pequena, de modo que várias células são conectadas e encapsuladas (geralmente cobertas por vidro) para formar um módulo (também chamado de painel). O painel fotovoltaico é o principal bloco de construção de um sistema fotovoltaico, e qualquer número de módulos pode ser conectado em conjunto para fornecer a saída elétrica desejada. Esta estrutura modular é uma vantagem considerável do sistema fotovoltaico, onde outros módulos de características similares podem ser adicionados a um sistema existente, conforme necessário.

Um módulo solar é geralmente identificado pela sua potência elétrica de pico ( $W_P$ ). As condições de potência de pico são realizadas através de ensaios sob condições específicas. A STC (do inglês, *Standard Test Conditions*) considera uma irradiância solar de  $1000W/m^2$ , e temperatura de célula de  $25^\circ C$ . A tensão observada em um módulo desconectado exposto às características de irradiação e temperatura do STC, é a tensão de circuito aberto ( $V_{OC}$ ). Ao curto-circuitar os terminais do painel, tem-se a corrente de curto-circuito ( $I_{SC}$ ).

A principal característica de um gerador fotovoltaico na concepção do projeto elétrico, é a sua curva Corrente-Tensão (I-V). A modelagem do gerador, consiste basicamente, na obtenção da curva I-V a partir do circuito elétrico equivalente. Ao conectar uma carga ôhmica variável aos terminais do módulo fotovoltaico irradiado, combinações de corrente e tensão podem ser registradas, o que resulta na curva potência-tensão (P-V) quando a carga é variada.

A potência atingível  $P_{Max}$  é definida por:

$$P_{Max} = P_{mp} = I_{mp} V_{mp} \quad (1)$$

onde:  $I_{mp} V_{mp}$  é o maior produto possível da tensão  $V$  e da corrente  $I$  em um ponto de operação. A Fig. (2) ilustra a Potência em função da Tensão e sua correspondente curva I-V.

A multiplicação dos pares I-V leva à potência de saída que atinge o seu valor máximo no chamado "Maximum Power Point" ou Ponto de Máxima Potência (MPP ou  $P_{MP}$ ). A variação da irradiância  $E$  (ou  $G$ ) tem apenas uma pequena influência na tensão de circuito aberto de um módulo fotovoltaico em uma faixa de Irradiância de  $350 - 1.000 W/m^2$ . Abaixo disso, a tensão diminui de forma logarítmica [7].

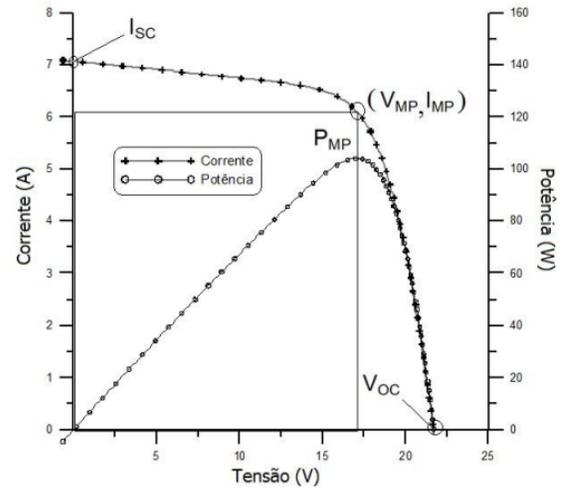


Fig. 2: Curva V-I e curva de potência P-V para um módulo com potência nominal de 100Wp.

A corrente de curto-circuito  $I_{SC}$  é diretamente proporcional à irradiância, em virtude da equivalência da corrente ao número de pares de elétrons e lacunas gerados pelos fótons absorvidos [9], como ilustrado por:

$$I_{SC}(G) = \frac{I_{SC}^*}{G^*} G_{eff} \quad (2)$$

onde:  $G_{eff}$  é a irradiação incidente sob a célula,  $I_{SC}^*$  e  $G^*$  são a corrente de curto-circuito no STC e a irradiância no STC, respectivamente.

Para níveis mais baixos de irradiância, a eficiência de conversão diminui devido a perdas de tensão, que dependem de imperfeições e falhas na célula, equivalentes a uma resistência paralela nos modelos elétricos denominada resistência *shunt*. A baixa resistência causa perdas de energia nas células solares ao fornecer um caminho alternativo para a corrente gerada. Desta forma, células solares com alta resistência *shunt* são mais adequadas para baixos níveis de irradiância [7].

A eficiência de conversão da maioria das células solares diminui à medida que a temperatura de operação aumenta devido a uma diminuição da tensão  $V_{OC}$ . A tensão decresce linearmente com o aumento da temperatura, conforme:

$$V_{OC}(T_C) = V_{OC}^* + (T_C - T_C^*) \frac{dV_{OC}}{dT_C} \quad (3)$$

onde:  $dV_{OC}/dT_C$  é o coeficiente de temperatura de tensão negativo,  $T_C$  é a temperatura da célula e  $T_C^*$  é a temperatura da célula no STC. A medição do coeficiente de temperatura de tensão costuma ser incluída nos padrões de caracterização dos módulos fotovoltaicos. Para células de silício cristalino, o coeficiente é tipicamente  $-2,3 mV$  por  $^\circ C$  e por célula [9].

Apesar disso, estudos recentes como em [10] demonstram que módulos constituídos por Silício Amorfo apresentam um desempenho superior a temperaturas elevadas em relação a outros tipos de módulos fotovoltaicos, devido a um pequeno acréscimo da corrente gerada.

O gerador fotovoltaico é uma fonte especial de energia finita com uma corrente elétrica característica. Na literatura, a modelagem do sistema fotovoltaico tem sido extensivamente tratada especialmente para identificação, dimensionamento ou objetivos de simulação. Os modelos utilizados são em grande parte estáticos e dificilmente adaptados a variações dinâmicas. Alguns trabalhos como em [11] propõem explorar modelos específicos para simular e estudar a estabilidade de um sistema fotovoltaico composto por um gerador fotovoltaico acoplado a uma bomba *CC* permanente através de um conversor *buck-boost* implementado com algoritmos MPPT (*Maximum Power Point Tracker*, Rastreamento do Ponto de Máxima Potência).

### III. MODELAGEM MATEMÁTICA

Um problema recorrente em aplicações fotovoltaicas é a previsão do comportamento elétrico de um gerador fotovoltaico, dadas as informações construtivas, a localização geográfica e o clima local. Em particular, isso representa a base para prever a entrega de energia do gerador, que é uma etapa crítica de qualquer projeto do sistema fotovoltaico. Desta forma, a estruturação de novos modelos que representam as singularidades dos módulos fotovoltaicos na prática, onde o desempenho de energia e outras características são especificadas, partem fundamentalmente de 3 modelos básicos, que são: o modelo Empírico ou Ideal (ISDM – *Ideal Single Diode Model*) representado na Fig. (3a); o modelo Real ou de um Diodo (SDM – *Single Diode Model*) representado na Fig. (3b); e o modelo de dois Diodos (TDM – *Two Diode Model* ou DDM – *Double Diode Model*) representado na Fig. (3c) [12].

#### A. Modelo Ideal

Este modelo é fundamentado em uma equação não transcendente, que pode ser reduzida diretamente sem a necessidade de uma ferramenta numérica muito sofisticada. Contudo, apesar de sua simplicidade, ele não garante uma característica precisa no MPP [7]. O modelo matemático que representa o circuito da Fig. (3a) é representado por:

$$I = I_{ph} - I_0 \underbrace{\left[ e^{\left( \frac{qV}{akT} \right)} - 1 \right]}_{I_D} \quad (4)$$

onde:  $I_{ph}$  é a corrente gerada pela luz incidente, ou corrente fotovoltaica (é diretamente proporcional à irradiância),  $I_D$  é a equação de *Shockley*, que representa o modelo do diodo,  $I_0$  é a saturação reversa ou corrente de fuga do diodo,  $q$  é a carga do elétron ( $1,60217646 \cdot 10^{-19} C$ ),  $k$  é a constante de *Boltzmann* ( $1,3806503 \cdot 10^{-23} J/K$ ),  $T$  (em *Kelvin*) é a temperatura da junção P-N, e  $a$  é o constante de idealidade do diodo.

#### B. Modelo Real

A conectividade entre as células nos módulos fotovoltaicos na realidade apresenta naturalmente pequenas resistências que são representadas como fatores de perda de potência. O modelo representado na Fig. (3b) corresponde ao que é considerado por muitos autores como o modelo real de uma célula solar. A resistência *shunt*  $R_{sh}$  modela a corrente de

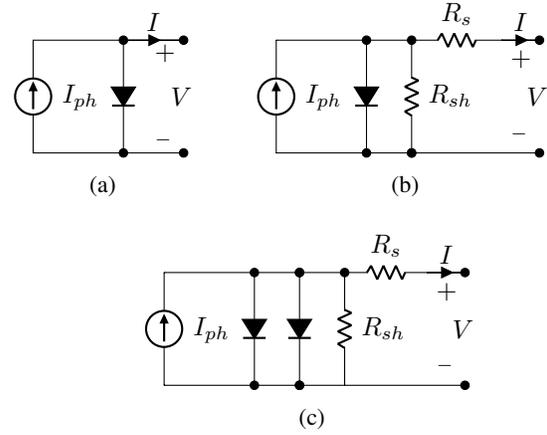


Fig. 3: Circuitos equivalentes de células solares: (a) ISDM; (b) SDM; (c) DDM.

fuga, enquanto a resistência em série  $R_s$  representa as perdas internas devido ao fluxo de corrente e às conexões elétricas, além de contribuir para a eficiência do modelo [13]. O modelo matemático que representa o modelo de dois diodos é dado por:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ e^{\left( \frac{V+R_s I}{V_t a} \right)} - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_P} \quad (5)$$

onde:  $I_{ph}$  e  $I_0$  são as correntes fotovoltaica e de saturação respectivamente do painel,  $R_s$  é a resistência em série equivalente do painel e  $R_P$  é a resistência paralela equivalente,  $V_t = N_s k T / q$  é a tensão térmica do painel com células  $N_s$  conectadas em série. As células conectadas em paralelo aumentam a corrente, e as células conectadas em série fornecem maiores tensões de saída. Se o painel é composto por conexões paralelas de  $N_p$  células, as correntes  $I_{ph}$  e  $I_0$  podem ser expressas como  $I_{pv} = I_{ph} N_p$ ,  $I_0 = I_0 N_p$ .

#### C. Modelo de dois Diodos

O modelo real, acompanhado pelas respectivas resistências  $R_s$  e  $R_{sh}$  é o modelo mais usado para na literatura para descrever as características dos módulos solares, principalmente pelo seu baixo número de parâmetros [14], [15]. Contudo, este modelo só pode ser utilizado em regiões que detenham grande parcela de irradiância solar [16]. Alternativamente, o modelo composto por dois diodos pode representar com maior acurácia a célula solar, mas apresenta um número significativamente maior de parâmetros.

O circuito representado pela Fig. (3c) acrescenta um diodo ao modelo anterior. Como nos modelos anteriores, o diodo caracteriza o processo de difusão dos portadores minoritários para a camada de depleção. A adição do segundo diodo, corresponde à recombinação na região de carga espacial da junção. Desta forma, este modelo leva a uma função exponencial dupla expressa na Equação (6), que torna o modelo mais complexo. Contudo, esta característica é particularmente mais adequada a regiões em que a irradiância solar seja limitada [13].

$$I = I_{ph} - I_{o1} \left( e^{\frac{V+IR_S}{a_1 V_t}} - 1 \right) - I_{o2} \left( e^{\frac{V+IR_S}{a_2 V_t}} - 1 \right) - \frac{V + IR_S}{R_{sh}} \quad (6)$$

onde:  $I_{ph}$  é a corrente fotovoltaica do módulo,  $V_t = N_s k T / q$  é a tensão térmica do módulo com  $N_s$  células conectadas em série,  $I_{o1}$  e  $I_{o2}$  são a corrente de saturação do primeiro e do segundo diodo respectivamente,  $a_1$  e  $a_2$  representam o fator de idealidade do primeiro e segundo diodo respectivamente,  $k$  é a constante de Boltzmann ( $1,3806503 \cdot 10^{-23} J/K$ ),  $q$  é a carga elétrica ( $1,60217646 \cdot 10^{-19} C$ ),  $T$  é a temperatura em Kelvin ( $K$ ),  $R_S$  é a resistência em série equivalente do módulo, e  $R_{sh}$  é a resistência paralela equivalente, ou resistência *shunt*. No total, este modelo requer a determinação de 7 parâmetros que são:  $I_{ph}$ ,  $I_{o1}$ ,  $I_{o2}$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $R_S$  e  $R_{sh}$ .

Os valores de  $I_{o1}$  e  $I_{o2}$  são calculados usando iteração. Infelizmente, o método de iteração aumenta o tempo de cálculo, principalmente devido aos valores inadequados das condições iniciais. Em geral,  $I_{o2}$  tem de 3 a 7 ordens de magnitude maior que  $I_{o1}$  [12].

#### IV. RESULTADO DAS SIMULAÇÕES E ANÁLISE

Nessa seção são apresentados os resultados das simulações dos três modelos Ideal, Real, e de dois Diodos, assim como uma análise comparativa entre eles. Os modelos são submetidos a simulações de modo a verificar previamente o comportamento frente às restrições climáticas constantes. Para tal, como painel solar, optou-se na utilização do modelo MSX-60 de 60W do fabricante *Solarex*. Sendo assim, as características do painel fotovoltaico considerado são apresentadas na Tabela I.

Os modelos são implementados no software *Matlab*, onde considerou-se nesta primeira análise como a entrada do sistema  $G = 1000 W m^{-2}$  e  $T = 25^\circ C$ . Para a estimação dos parâmetros, em vista da sua convergência e precisão aprimorada, é utilizado o método de *Newton-Raphson* [17], [15]. Os fatores de idealidade do diodo  $a_1$  e  $a_2$  representam os componentes da corrente de difusão e recombinação, respectivamente. Assim, de acordo com [15] e [18]  $a_1 = 1$  e  $a_2 \geq 1,2$  em decorrência da teoria de difusão de *Shockley*. Desta forma, de modo a simplificar a análise neste primeiro momento, considerou-se  $I_{o1} = I_{o2} = I_{ph}$  para o modelo de dois Diodos.

O processo de iteração incrementa em 0,01 os valores de  $R_S$  de modo a obter o valor de  $R_{sh}$ . O critério de parada para o processo de iteração dado por:

$$Erro = |P_{max,E} - P_{max,C}| \quad (7)$$

Tab. I: Características do Módulo MSX60.

Parâmetro	Valor
$P_{mp}$ (W)	60
$I_{mp}$ (A)	3.5
$V_{mp}$ (V)	17.1
$I_{SC}$ (A)	3.8
$V_{OC}$ (V)	21.1
$N_{oct}$ ( $^\circ C$ )	49
$dV_{OC}/dT_C$	-80mV/ $^\circ C$
$N_S$	36

onde:  $P_{max,E}$  representa a Potência de pico do Painel ( $P_{mp}$ ) e  $P_{max,C}$  a potência de pico obtida através da iteração. As condições iniciais são dadas pela Equação (8).

$$R_{s0} = 0; \quad R_{p0} = \frac{V_{mp}}{I_{sc}^* - V_{mp}} - \frac{V_{OC}^* - V_{mp}}{I_{mp}} \quad (8)$$

onde:  $I_{sc}^*$  e  $V_{OC}^*$  representam as características de corrente de curto circuito e tensão de circuito aberto do painel no STC.

Na Fig. (4) são apresentadas as curvas características P-V e I-V para cada modelo implementado, Ideal, Real e dois Diodos, além da curva I-V disponibilizada pelo fabricante do módulo analisado. Os pontos em destaque na Fig. representam os respectivos MPP. Salienta-se que essa análise preliminar considerou apenas a modelagem sob condições constantes de temperatura e irradiância. Assim, é possível observar uma pequena redução da potência gerada pelo modelo de dois diodos. Isso é devido às perdas de recombinação das cargas espaciais. Os processos de recombinação reduzem o tempo de vida dos portadores minoritários diminuindo assim a tensão e corrente gerada numa célula. Portanto, observa-se que tanto a  $I_{SC}$  quanto a  $V_{OC}$  são afetadas sob condições operacionais específicas [19].

O modelo ideal, não caracteriza as perdas no módulo fotovoltaico pelas resistências série e paralela e, portanto, apresenta características de potência superiores aos demais modelos apresentados. Embora sua curva I-V esteja mais próxima do comportamento real apresentado na Fig. (4), quando comparado ao modelo de dois diodos, o modelo ideal não é considerado muito preciso no MPP, em virtude, de apresentar

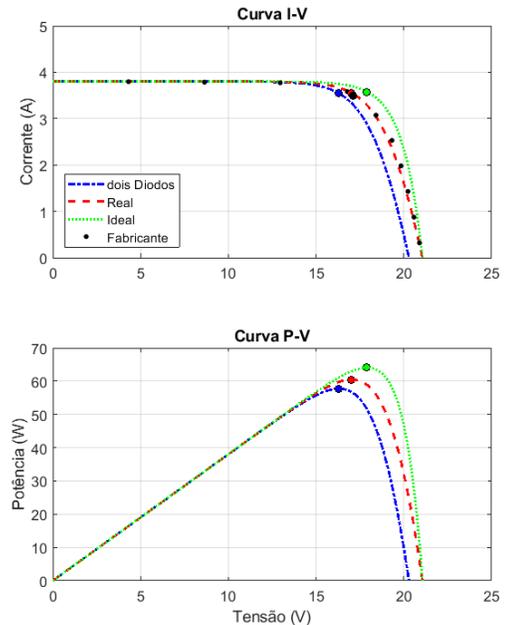


Fig. 4: Resultados obtidos a partir da simulação dos modelos Ideal, Real e dois Diodos.

potências excedentes ao que o módulo fotovoltaico fornece na realidade [7].

## V. CONCLUSÃO

Atualmente, a crescente demanda por energia e a significativa dependência de combustíveis fósseis são importantes estímulos no estudo de novas fontes alternativas de energia. Destaca-se que a energia solar fotovoltaica é a fonte de energia mais utilizada neste aspecto. A introdução dessas energias renováveis na planta energética mundial tem sido enfatizada, principalmente pelo conceito de geração distribuída, por suas características de baixos níveis de ruído, e também por baixo impacto ambiental. Na concepção de modelos matemáticos para predição do comportamento dos módulos fotovoltaicos e na implementação de algoritmos de MPPT e estratégias de controle, neste trabalho três modelos são implementados, o Ideal, o Real, e o de dois Diodos. O modelo Real (SDM) é o mais empregado e o modelo de dois Diodos apresenta maior esforço computacional devido principalmente ao seu alto número de parâmetros e, em decorrência disso, também possui o maior tempo de processamento.

Contudo, a partir das simulações realizadas, o modelo real apresentou em relação aos demais modelos simulados uma aproximação mais coerente com o comportamento real, aproximando-se da curva real disponibilizada pelo fabricante. Embora a análise seja preliminar e realizada sob condições de temperatura e irradiância constantes, este trabalho é a primeira etapa no desenvolvimento de um ambiente de simulação de geração distribuída utilizando a energia solar fotovoltaica. Desta forma, propõe-se como trabalhos futuros a consideração das variações de temperatura e irradiância além de verificar a real influência da umidade, considerando as variações climáticas do Rio Grande do Sul, onde pressupõe-se que o modelo de dois diodos apresente melhores resultados.

## VI. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, e com o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) a partir do Edital 02/2017 - PqG (17/2551-0001 204-6).

## REFERÊNCIAS

- [1] S. R. Milligan, W. V. Holt, and R. Lloyd. Impacts of climate change and environmental factors on reproduction and development in wildlife. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1534):3313–3319, 2009.
- [2] Math Bollen and Fainan Hassan. *Integration of Distributed Generation in the Power System*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, jul 2011.
- [3] Savitha Krishna. Real Time Monitoring of Solar Micro Grid Installations ; Discussion on Three Year Performance Analysis and System Black Out Modelling. *2017 International Conference on Technological Advancements in Power and Energy ( TAP Energy)*, pages 1–7, 2017.
- [4] Zia Ur Rahman, Lidian Zhou, Jie Wang, Gang Yao, and Dian Rui. Damped PR Controller Based Modeling and Simulation of Single Phase Grid Connected Photovoltaic System. *2017 2nd International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE)*, pages 869–874, 2017.

- [5] Ramesh Bansal. *Handbook of Distributed Generation*. Springer International Publishing, Cham, 2017.
- [6] Seyed Abbas Mousavi Maleki, H. Hizam, and Chandima Gomes. Estimation of hourly, daily and monthly global solar radiation on inclined surfaces: Models re-visited. *Energies*, 10(1), 2017.
- [7] S.C.W. Krauter. *Solar Electric Power Generation*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2006.
- [8] G. Stapleton and S. Neill. *Grid-connected Solar Electric Systems: The Earthscan Expert Handbook for Planning, Design and Installation*. Earthscan Expert. Taylor & Francis, 2012.
- [9] Antonio Luque and Steven Hegedus. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 2 edition, dec 2011.
- [10] D.E. Carlson, G Lin, and G Ganguly. Temperature dependence of amorphous silicon solar cell PV parameters. In *Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 2000 (Cat. No.00CH37036)*, pages 707–712. IEEE, 2000.
- [11] R. Andouisi, A. Mami, G. Dauphin-Tanguy, and M. Annabi. Bond graph modelling and dynamic study of a photovoltaic system using MPPT buck-boost converter. In *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, volume vol.3, page 6. IEEE, 2002.
- [12] Nahla M. Shannan, Nor Zaihar Yahaya, and Balbir Singh. Two diode model for parameters extraction of PV module. In *2014 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON)*, pages 260–264. IEEE, oct 2014.
- [13] Francesco Adamo, Filippo Attivissimo, Attilio Di Nisio, and Maurizio Spadavecchia. Characterization and testing of a tool for photovoltaic panel modeling. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 60(5):1613–1622, 2011.
- [14] Aurel Gontean, Septimiu Lica, Szilard Bularka, Roland Szabo, and Dan Lascu. A novel high accuracy PV cell model including self heating and parameter variation. *Energies*, 11(1), 2018.
- [15] Kashif Ishaque, Zainal Salam, and Hamed Taheri. Simple, fast and accurate two-diode model for photovoltaic modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(2):586–594, 2011.
- [16] Mohamed Azab. Identification of one-diode model parameters of PV devices from nameplate information using particle swarm and least square methods. *2015 1st Workshop on Smart Grid and Renewable Energy, SGRE 2015*, 2015.
- [17] Xuan Hieu Nguyen and Minh Phuong Nguyen. Mathematical modeling of photovoltaic cell/module/arrays with tags in Matlab/Simulink. *Environmental Systems Research*, 4(1):24, 2015.
- [18] C.T. Sah. *Fundamentals of Solid-state Electronics*. World Scientific, 1991.
- [19] Sangram Bana and R. P. Saini. A mathematical modeling framework to evaluate the performance of single diode and double diode based SPV systems. *Energy Reports*, 2:171–187, 2016.