

Modelagem e Simulação de um gerador fotovoltaico em MATLAB™ para estudo do uso de Cargas intermitentes

Leonardo de Carvalho Vidal
leonardo.carvalho.vidal@hotmail.com
AEDB, UBM , UNIFEI

Eduardo Barra
eduardo@logicwaysolutions.com
UBM , UFF

Jefferson Carlos Miranda da Silva Pinhão
miranda.jefferson@gmail.com
UBM

Resumo: A energia é a base do desenvolvimento das civilizações. A energia solar fotovoltaica é a conversão direta da radiação solar em energia elétrica. A sua vantagem é o fato de que é renovável, não tem a necessidade de entrada ou controle humano e tem uma elevada durabilidade com sistema de baixa manutenção. Hoje em dia, pode-se dizer que não há razões técnicas que impedem o uso de sistemas fotovoltaicos não importa a carga, qualquer que seja o tipo de corrente que ele precisa. Este trabalho apresenta uma simulação dos valores de corrente e tensão gerados pelos painéis, visando a utilização em cargas intermitentes, como é o caso de refrigeradores residenciais.

Palavras Chave: Fotovoltaico - Simulação - Modelagem - -

1. INTRODUÇÃO

Uma crise energética mundial ocorreu na década de 70, a qual demonstrou que havia uma dependência muito grande em relação aos combustíveis fósseis. Com isso, tornou-se necessária a busca por fontes alternativas para a geração de energia, como por exemplo, o aproveitamento da radiação solar. Nessa época deu-se início ao desenvolvimento dessa tecnologia cuja utilização buscava atender às instalações residenciais e comerciais, podendo ser aplicada em sistemas isolados ou conectados à rede elétrica. Assim sendo, houve melhorias na fabricação, desenvolvimento e qualidade dos módulos fotovoltaicos, contribuindo para a redução dos seus custos. Consequentemente tornou-se viável a instalação de sistemas fotovoltaicos isolados para o atendimento a regiões localizadas em áreas distantes das redes elétricas, como a zona rural.

Já na década de 90, o destaque associado ao crescimento da utilização de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, tanto no âmbito residencial quanto no comercial, foi conquistado pelos países desenvolvidos. A motivação principal de tais países era justamente a diminuição da dependência dos combustíveis fósseis, que levam à acumulação, na atmosfera, de gases propícios ao efeito estufa, acarretando constantes mudanças climáticas.

Todavia, as despesas geradas pelo uso de sistemas fotovoltaicos ainda são grandes se comparadas àquelas associadas a outras tecnologias. Portanto, faz-se necessário o apoio governamental para estimular o seu uso. Tal incentivo pode ser conseguido através de programas governamentais peculiares elaborados por cada país interessado em desenvolver esse tipo de tecnologia. Geralmente, esses programas são constituídos por incentivos fiscais e/ou financeiros para a população e auxílio às indústrias locais de Equipamentos e serviços, de modo a ocasionarem um desenvolvimento mais rápido.

O efeito fotovoltaico é um recurso de alta tecnologia na conversão de luz solar diretamente em energia elétrica, visando alimentares os diversos tipos de carga, sejam elas acionadas por corrente contínua (cc) ou corrente alternada (ca). A tecnologia fotovoltaica vem sendo usada, em muitas aplicações seja em sistemas híbridos, conectados à rede elétrica ou isolados. Os sistemas isolados são predominantes principalmente quando se trata de locais remotos, ou até mesmo para consumidores que residem em áreas urbanas, mas possuem recurso financeiro para “escolher” o tipo de sistema que deseja utilizar. É importante ressaltar que a adoção da tecnologia fotovoltaica como alternativa, para gerar energia elétrica, requer um estudo da energia solar disponível na região (o nível de insolação da região) e de um estudo sobre a possibilidade de extensão da rede elétrica convencional até o local onde se deseja utilizar a eletricidade.

A energia solar fotovoltaica também se destaca por ser uma fonte silenciosa, modular, necessitar de pouca manutenção, possuir prazos de instalação e operação pequenos, provocar impacto ambiental quase nulo e poder ser facilmente integrada às construções, gerando eletricidade localmente, sem a necessidade de linhas de transmissão.

Um problema significativo é criado quando os custos de um sistema conectado à rede são erroneamente aplicados aos sistemas isolados ou híbridos. Os sistemas isolados ou híbridos necessitam de outros componentes tais como baterias, geradores de apoio, assim como sistemas de controle. Os custos destes componentes aumentam o custo global do sistema fotovoltaico, por exemplo, em residências onde a energia elétrica é exclusivamente fornecida através de sistema fotovoltaico, a bateria e outros componentes de controle são indispensáveis.

No final da década 70 e início da década de 80, um estudo feito nos Estados Unidos, paralelo ao programa de incentivo ao uso de sistemas fotovoltaicos em diversas regiões do país, constatou que o custo com estes equipamentos (incluindo preparação do local, fundações, estrutura, instalação elétrica e preparação do sistema) representam dois terços do custo total de aquisição de equipamentos de um sistema fotovoltaico, ou seja, cerca de 70% do valor total, para sistemas que utilizavam coletores do tipo placa plana. Atualmente, estes dados não apresentam valores muito diferentes. Ou seja, em alguns casos,

pode tornar-se possível a minimização de alguns custos que não estão ligados diretamente aos equipamentos fotovoltaicos como, por exemplo, o tipo de fundação, a escolha do material, mão-de-obra de instalação, etc.

2. COMPONENTES BÁSICOS DE UM SISTEMA DE POTÊNCIA SOLAR

Uma planta básica demonstrada na Fig. 1 para conversão de energia solar em energia elétrica é composta dos seguintes elementos físicos e construtivos:

Radiação Solar - a radiação solar é uma forma energia emitida pelo sol devido a sua temperatura. Portanto, a radiação é o "combustível" de um sistema de potência solar;

Módulo Fotovoltaico - o módulo é composto de várias células fotovoltaicas individuais interligadas em série, de modo a obter uma tensão que é a soma das tensões de cada célula;

Regulador de Carga - é elo entre o módulo, bateria e equipamentos. Ele protege a bateria de sobrecargas ou de descarga excessiva;

Inversor ou Conversor - esse elemento é responsável pela conversão de corrente contínua (CC) gerada pelo módulo fotovoltaico em corrente alternada (AC);

Bateria - É o elemento responsável pela estocagem da energia gerada pelo módulo solar;

Estrutura de Montagem - é o suporte de fixação do módulo em seu local de funcionamento.

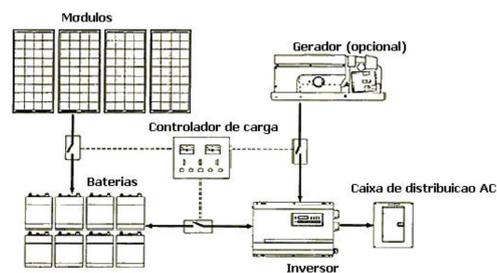


Figura 1 – Elementos físicos de uma planta de conversão de energia solar em elétrica.
 Fonte: Análise do Custo de Instalação de Sistemas Fotovoltaicos Isolados, 2002,p.2.

3. DESCRIÇÃO DO SISTEMA ESTUDADO

A planta de conversão fotovoltaica é prevista para atender as necessidades energéticas de uma geladeira para classe média alta. Além disso, considera-se que pelo menos um adulto e as duas crianças se ausentam da residência por no mínimo um expediente durante o dia, o que racionaliza o uso do eletrodoméstico. A corrente que deverá ser produzida pelo sistema fotovoltaico deve ser suficiente para alimentar estas geladeiras.

O conjunto de painéis deve ser montado numa fundação de blocos de concreto à distância de 100 m da casa. Esta configuração permite que os módulos sejam orientados na direção adequada, evitando danos devido a ventos fortes indesejáveis associados à montagem no telhado. Devido à distância que a fiação vai percorrer, condutores de alumínio minimizariam os custos. Os condutores podem ser instalados por baixo da terra através de condutos metálicos, e conectados usando-se plugs apropriados para fiação de alumínio. O quadro de distribuição elétrica central, que distribui a energia para o circuito residencial, deve permitir um pronto acesso. Todo o equipamento deve ser aterrado de acordo com as normas de instalação elétrica. O circuito deve ser protegido por chaves de segurança, podendo ser então facilmente isolado para manutenção.

4. CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Existem basicamente três tipos de células, conforme o método de fabricação:

- Silício monocristalino: Estas células obtêm-se a partir de barras cilíndricas de silício monocristalino produzidas em fornos especiais. As células são obtidas por corte das barras em forma de pastilhas finas (0,4 a 0,5mm de espessura). A eficiência na conversão de luz solar em eletricidade é superior a 12%.

- Silício policristalino: estas células são produzidas a partir de blocos de silício obtidos por fusão de silício puro em moldes especiais. Uma vez nos moldes, o silício arrefece lentamente e solidifica-se. Neste processo, os átomos não se organizam num único cristal. Forma-se uma estrutura policristalina com superfícies de separação entre os cristais. Sua eficiência na conversão de luz solar em eletricidade é ligeiramente menor do que nas de silício monocristalino.

- Filme fino ou silício amorfo: Estas células são obtidas por meio da deposição de camadas muito finas de silício ou outros materiais semicondutores sobre superfícies de vidro ou metal. Sua eficiência na conversão de luz solar em eletricidade varia entre 5% e 7%.

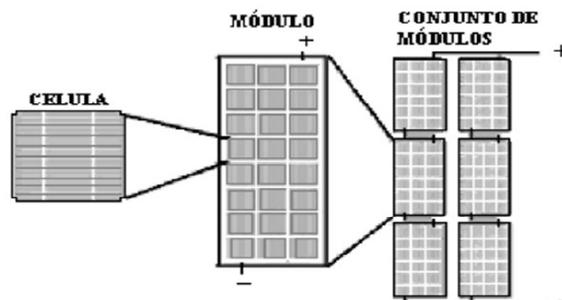


Figura 2 – Célula e módulo fotovoltaico.

Adaptado de: Análise do Custo de Instalação de Sistemas Fotovoltaicos Isolados, 2002,p.2.

5. DETERMINAÇÃO DA CORRENTE E DO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO DO ARRANJO

A determinação da corrente de projeto é o segundo item para a seleção do equipamento. Aqui se apresenta uma variável chamada Sol Pleno, dada em horas por dia (h/dia) e significa a quantidade de horas por dia em que se tem grande incidência de irradiação solar. Os dados do exemplo mostrados na tabela 5 foram simulados em Volta Redonda-RJ, e correspondem a um período de 1 ano. A partir daí, calcula-se a corrente de projeto, que corresponde àquela fornecida pelo módulo no mês de menor quantidade de horas de Sol Pleno, como também a corrente máxima de projeto, correspondente àquela fornecida no mês de maior quantidade de Sol Pleno. As tabelas referentes ao dimensionamento foram consultadas no *Stand-Alone Photovoltaics Systems-a handbook of recommended design practices*, Sandia National Laboratories (1991).

Tabela 5 – Dados para correção da corrente de projeto

Localização do Sistema		Volta Redonda		
Latitude 22° 31' 30.545" S		Longitude 44° 6' 13.606" W		
M	Carga (Ah/dia)	Sol Pleno (h/dia)	=	Corrente de Projeto (A)
Ê				
S				
J	17,6	÷ 6,54	=	2,69
F	17,6	÷ 6,22	=	2,83
M	17,6	÷ 5,6	=	3,14
A	17,6	÷ 5,4	=	3,26
M	17,6	÷ 4,89	=	3,60
J	17,6	÷ 4,56	=	3,86
J	17,6	÷ 4,52	=	3,89
A	17,6	÷ 5,25	=	3,35
S	17,6	÷ 6,1	=	2,89
O	17,6	÷ 6,7	=	2,63
N	17,6	÷ 6,6	=	2,67
D	17,6	÷ 6,43	=	2,74

6. GERADOR PV

Um gerador fotovoltaico é o conjunto de células solares, conexões, partes de proteção, suportes, etc. Neste trabalho focou-se na modelagem apenas do módulo/arranjo (array). As células solares consistem em uma junção p-n em uma fina camada de semicondutor (geralmente silício, devido à sua abundância na crosta terrestre). Quando a energia solar (fótons) excita a célula com uma energia maior do que a *band gap* do semicondutor, os elétrons são deslocados para fora dos átomos, criando lacunas (*electron-hole*). Se os fótons tiverem energia suficiente, os elétrons são capazes de superar o campo elétrico existente entre o material tipo p e o tipo n, surgindo, então, uma corrente proporcional à irradiação solar. Começaremos da modelagem de uma célula solar, e, a partir desse modelo, pretendem-se modelar painéis PV, uma vez que esses nada mais são que o conjunto dessas células conectados em série e/ou paralelo a fim de obter tensão e/ou corrente desejáveis.

A. MODELAGEM DE UMA CÉLULA SOLAR

Existem pelo menos três abordagens quanto aos circuitos elétricos que representam as células solares: o modelo empírico (ideal), o modelo de um diodo, e o de dois diodos, eles são apresentados na Figura 3:

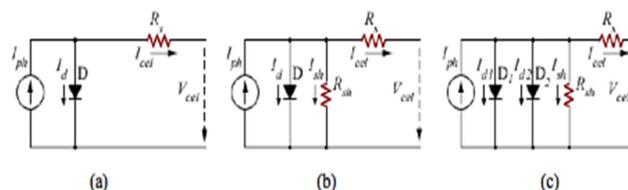


Fig. 3. Circuitos equivalentes de uma célula fotovoltaica: (a) Modelo ideal, (b) Modelo de um diodo, (c) Modelo de 2 diodos
 Fonte: (Tavares, 2009).

Entre os circuitos elétricos equivalentes da célula solar, o mais aceito, que será utilizado neste artigo, é o de um diodo, também conhecido como modelo real. Temos então o seguinte circuito equivalente na Fig.4:

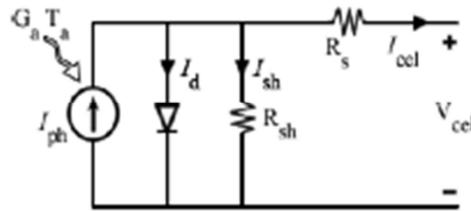


Fig. 4. Circuitos equivalentes de uma célula fotovoltaica: (a) Modelo ideal, (b) Modelo de um diodo, (c) Modelo de 2 diodos
 Fonte: (Tavares, 2009).

Sendo assim, aplicando a lei dos nós de Kirchhoff no circuito acima temos que:

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

A fotocorrente I_{ph} é diretamente dependente da irradiação solar G (W/m^2) e da temperatura ambiente, e pode ser expressa por (2). A equação (3) mostra a proporcionalidade de I_{ph} com G .

$$I_{ph} = I_0 + K_0(T_c - T_{ref}) \quad (2)$$

$$I_0 = \frac{G_a I_{sc}}{G_{ref}} \quad (3)$$

onde, $G_{ref} = 1000(W/m^2)$, T_{ref} é a referência de temperatura ambiente e K_0 corresponde ao coeficiente de temperatura da corrente de curto-circuito, obtido através do datasheet. A curva característica de uma célula também é influenciada pela temperatura da célula. O programa de simulação a ser desenvolvido permite ao usuário entrar com a temperatura da célula. Porém podemos estabelecer também uma relação da temperatura da célula para diferentes valores de irradiação G_a . Sendo assim, pode ser obtida por:

$$T_c = T_a + \frac{G_a(NOTC - 20)}{800(W/m^2)} \quad (4)$$

NOTC é um parâmetro chamado "Normal Operating Cell Temperature" geralmente fornecido pelo fabricante. NOTC é definido como temperatura da célula quando a temperatura ambiente for $20^\circ C$, irradiação solar $800 (W/m^2)$ e velocidade do vento de $1 (m/s^2)$.

A corrente no diodo I_d é expressa por:

$$I_d = I_{sat} \left[\exp \left(\frac{q}{nkT_c} (V_{cel} + R_s I_{cel}) \right) - 1 \right] \quad (5)$$

Sendo

$$I_{sat} = I_{or} \left(\frac{T_c}{T_{ref}} \right)^{\frac{3}{n}} \exp \left[-\frac{qE_g}{nk} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_c} \right) \right] \quad (6)$$

e

$$I_{or} = \frac{I_{sc}}{\left[\exp\left(\frac{qV_{oc}}{nkT_{ref}}\right) - 1 \right]} \quad (7)$$

onde T_{ref} é a média da temperatura de referencia; I_{sat} é a corrente de saturação do diodo; q é a carga de um elétron: $1,60 \times 10^{-19}$; n é o fator de idealização: 1,525; k é a constante de Boltzman: $1,38 \times 10^{-23}$ [J/K]; R_s é a resistência série. E_g Gap Energy: 1.11 [eV] e I_{or} é a corrente de saturação do diodo em T_{ref} [A].

A resistência série pode ser calculada por

$$R_s = -\frac{dV_{cel}}{dI_{voc}} - \frac{1}{X_{Vcel}} \quad (8)$$

Onde:

$$X_{Vcel} = \frac{I_0 q}{nkT_{ref}} \exp\left(\frac{qV_{oc}}{nkT_{ref}}\right) \quad (9)$$

As equações (8) e (9) são obtidas diferenciando-se a equação (1) quando $V_{cel} = V_{oc}$ e rearranjando-se os termos em função de R_s .

Por último, podemos calcular a corrente paralelo I_{sh} . Em outros modelos, as contribuições dessa corrente é comumente desprezada, mas neste trabalho adicionaremos essa variável.

$$I_{sh} = \frac{(V_{cel} + R_s I_{cel})}{R_{sh}} \quad (10)$$

onde a resistência paralelo R_{sh} pode ser calculada por:

$$R_{sh} = -\frac{dV_{cel}}{dI_{sc}} \quad (11)$$

Mais à frente, tratar-se-á com mais detalhes sobre a resistência série e a resistência paralelo (*shunt resistance*).

Com essas equações, podemos então simular a curva característica do módulo em posse dos dados fornecidos pelo fabricante.

B. MODELAGEM DE UM ARRANJO (ARRAY) FOTOVOLTAICO.

Como descrito anteriormente, várias células e módulos podem ser conectados para formar os chamados *arrays* fotovoltaicos. Eles podem ser conectados em série e/ou paralelo para produzirem qualquer combinação de tensão e corrente. As equações abaixo são usadas para expressar isso matematicamente e, a partir daí, podemos simular qualquer módulo (arranjo, painel) fotovoltaico a partir do modelo de uma única célula, dado que:

$$I_{array} = I_{cel} M_p N_p \quad (12)$$

$$V_{array} = V_{cel} M_p N_p \quad (13)$$

onde M_p é o número de módulos em paralelo; M_s é o número de módulos em série; N_p é o número de células em paralelo; N_s é o número de células em série.

C. ALGUNS PARÂMETROS DE UMA CÉLULA SOLAR.

Uma célula solar pode ser caracterizada por alguns parâmetros fundamentais, a seguir trataremos de cada um deles.

1) *Corrente de Curto-Circuito:* é o maior valor de corrente gerado pela célula. Ela corresponde à corrente nas condições de curto-circuito, quando a impedância é baixa, e é calculada quando $V = 0$.

2) *Voltagem de Circuito Aberto (V_{oc}):* esta voltagem(V_{oc}) ocorre quando não há corrente passando através da célula.

$$V(\text{quando } I = 0) = V_{oc}$$

3) *Ponto de Máxima Potência(P_{max}):* é o único ponto de operação, para valores instantâneos de irradiação e temperatura, em que os valores de corrente e tensão resultam em uma potência máxima. Assim, $P_{MAX} = I_{MP} \times V_{MP}$ onde I_{MP} e V_{MP} são as respectivas corrente e tensão no ponto de máxima potência. Para se rastrear esse ponto, deve ser utilizado algum tipo de controle que permita que um circuito conversor tire o máximo de energia disponível no painel solar. Graficamente, esse parâmetro pode ser visualizado na seguinte figura:

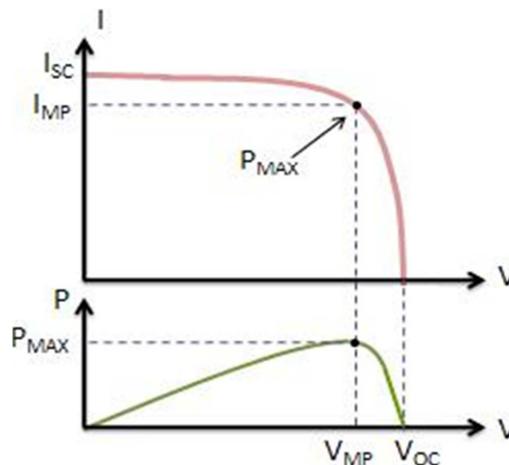


Fig. 5. Ponto de Máxima Potência para uma curva I-V.

4) *Fator de forma (Fill Factor):* é essencialmente uma medida de qualidade da célula solar. Ele é a relação entre a máxima potência que a mesma pode fornecer a uma carga e o produto de I_{sc} e V_{oc} , expressado por

$$FF = \frac{P_{MAX}}{V_{oc}I_{sc}} = \frac{I_{MAX}V_{MAX}}{V_{oc}I_{sc}} \quad (14)$$

Graficamente, ele pode ser interpretado pela razão das duas áreas retangulares mostradas na figura abaixo.

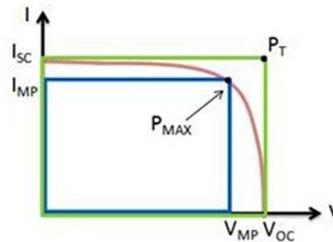


Fig. 6. Interpretacao grafica do fator de forma

onde P_T é o ponto de máxima potência teórica e P_{MAX} o ponto de máxima potência. Esse fator é diretamente influenciado pelos valores de R_s e R_{sh} .

5) Eficiência (η): é a relação entre a máxima potência e a potência da luz irradiada mostrada abaixo:

$$\eta = \frac{P_{MAX}}{P_{in}} = \frac{I_{MAX}V_{MAX}}{AG_a} \quad (15)$$

6) Resistência em paralelo (Shunt) (R_{sh}) e Resistência em série (R_s): A eficiência dos módulos solares é reduzida durante a operação pela dissipação de potência através das resistências internas. Essas resistências parasitas podem ser modeladas como resistência série e resistência paralelo. Em uma célula ideal, R_{sh} seria infinito e não proporcionaria um caminho alternativo para o fluxo de corrente, enquanto a R_s seria zero, assim, não existiria nenhuma queda de tensão antes da carga. Diminuído-se R_{sh} e aumentando-se R_s , o resultado será uma queda do (FF) e P_{MAX} , como mostrado na Fig. 5. Se R_{sh} é muito baixo, V_{oc} vai cair, assim como, aumentando-se R_s , haverá uma queda da I_{sc} .

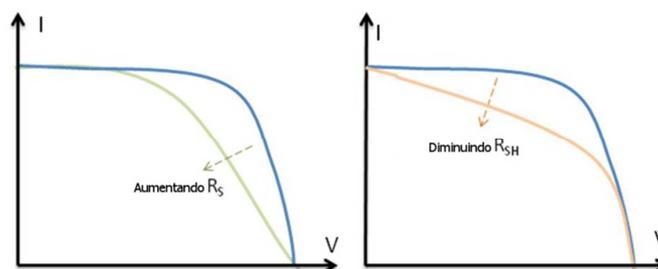


Fig. 7. Resultado na curva I-V da variação de R_s e R_{sh} .

Tanto a R_s quando a R_{sh} podem ser obtidas através das inclinações das curvas publicadas pelo fabricante, como é mostrado na Fig. 8.

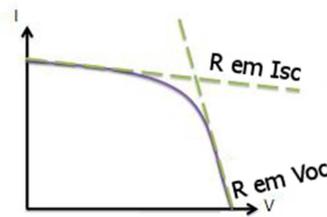


Fig. 8. Resultado na curva I-V da variaçao de R_s e R_{sh} .

D. EFEITO DA TEMPERATURA NA CURVA I-V

Os cristais usados na construção das células solares, como todo material semicondutor, são sensíveis à temperatura. A figura 9 mostra o efeito da temperatura na curva característica. Quando uma célula PV é exposta a altas temperaturas, a corrente de curto-circuito (I_{sc}) aumenta levemente enquanto V_{oc} diminui mais significativamente, o que pode ser observado na Figura 9.

Para condições ambientes, altas temperaturas resultam em uma queda da potência máxima de saída (P_{MAX}).

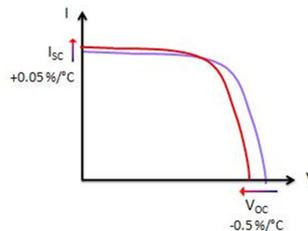


Fig. 9. Efeito da temperatura na curva característica I-V.

E. CONSIDERAÇÕES SOBRE AS VARIÁVEIS UTILIZADAS NO MODELO

O modelo do painel para MATLAB™ inclui alguns parâmetros fixos que são válidos para qualquer tipo de célula solar. No entanto, alguns parâmetros variam com as características construtivas da célula. Como não existe uma correlação direta entre os dados do fabricante com os necessários para a simulação, alguns parâmetros devem ser estimados, como o fator de idealização ou emissividade (n). Esse fator indica o quão perto as células se encontram uma da outra, e assume valores entre 1 a 2. Para o módulo utilizado neste trabalho (silício multicristalino), a literatura sugere o valor de 1,3, que será usado inicialmente e depois ajustado para corresponder à curva do fabricante. Também é necessário calcular R_s e R_{sh} . Os detalhes desses cálculos são mostrados na seção VIII-A.

7. SIMULAÇÃO DO MODELO NO MATLAB™

O módulo escolhido para modelagem foi um Sunpower (SPR-300-WHT-I) que é composto por 96 células de silício monocristalino (Sunpower A-300) conectadas em série. O módulo proporciona uma potência máxima nominal de 300 Watts. As especificações chave são dadas na Tabela 6. O modelo foi implementado no MATLAB™ usando as equações mostradas nas seções anteriores. O programa calcula a corrente I , usando as características do *datasheet* e as variáveis Voltagem, Irradiação e Temperatura.

TABELA 6 - CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS TÍPICAS DO MÓDULO

SPR-300-WHT-I

Parâmetro	Variável	Valor ²
Potência Máxima	P_{MAX}	300(W)
Tensão em Pm	V_{MAX}	54,7(V)
Corrente em Pm	I_{MAX}	5,49(A)
Corrente de curto-circuito	I_{sc}	5,87(A)
Tensão de circuito aberto	V_{oc}	64,0(V)
Coefficiente de temperatura de Isc	α	3,5(mA/K)

^a Dados do datasheet da célula.

F. OBTENÇÃO DE R_s e R_{sh}

Dois parâmetros essenciais para a modelagem proposta são a resistências série e paralelo. Infelizmente esses parâmetros não são fornecidos no *datasheet* da célula, tendo então que se lançar de recursos de forma a obtê-los. Algumas vezes os fabricantes fornecem a curva em formato *xls* ou similar com os dados da curva amostrado, desta forma fica pode-se calcular a inclinação da curva e retirar os parâmetros conforme visto nas equações (11) e (9). Para conseguirmos obter as inclinações das curvas usou-se técnicas de processamento de imagem e visão computacional para conseguir extrair esses dados de uma imagem digitalizada das curvas I-V do fabricante. Foi criado então uma função que recebe como parâmetro de entrada o valor máximo do eixo das abscissas, o valor máximo do eixo das ordenadas e partir daí cria uma relação dos pixels pertencentes a curva com esses valores, obtendo assim valores amostrados da mesma. A partir daí pode-se calcular as derivadas de (11) e (9) discretamente, trazendo assim, valores para as resistências. A figura 10 mostra a imagem digitalizada original do *datasheet*, a figura 11 mostra a imagem “binarizada” e a figura 12 mostra a curva amostrada pela função plotada pelo MATLAB™.

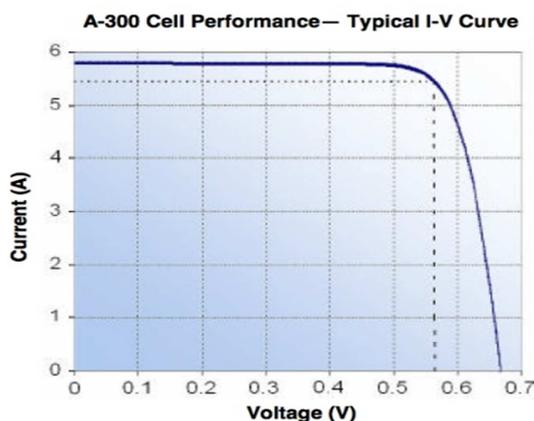


Fig. 10. Curva I-V extraída do datasheet.

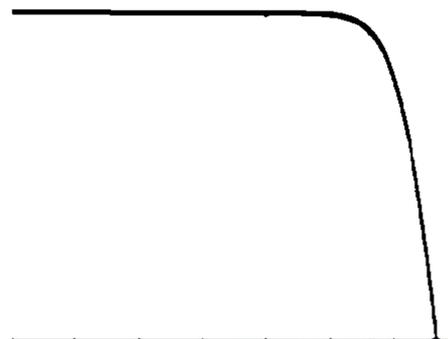


Fig 11. Curva da Fig 10 binarizada

A abordagem de “binarização” não será tratada com mais detalhes, pois não é o assunto principal do escopo deste artigo.

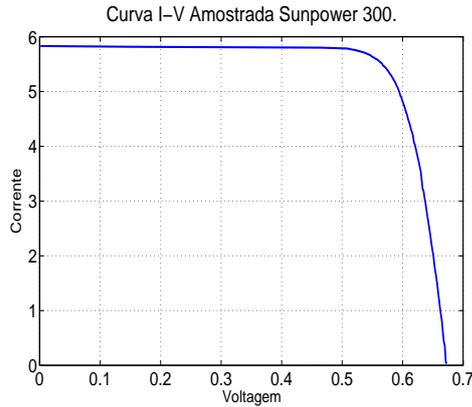


Fig. 12. Curva plotada pelo MATLAB com os dados amostrados.

8. RESULTADOS

Os resultados do MATLAB™ são mostrados primeiro para uma célula solar e comparado com a curva do fabricante na figura abaixo:

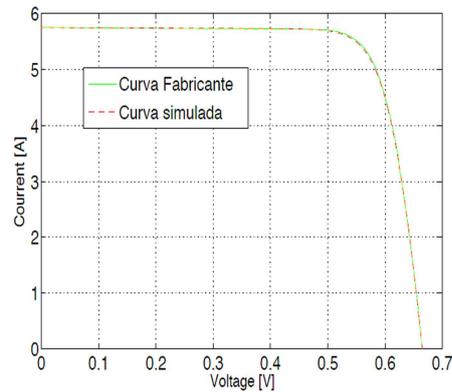


Fig. 13. Comparação entre a curva do fabricante e a simulada no MATLAB.

A saída do MATLAB™ para o módulo inteiro é mostrado na Fig. 14 em comparação com a Fig. 15: Na Fig. 14 observam-se as curvas do fabricante obtidas variando a irradiação e na Fig. 15 se tem as curvas simuladas obtidas para vários valores de irradiação.

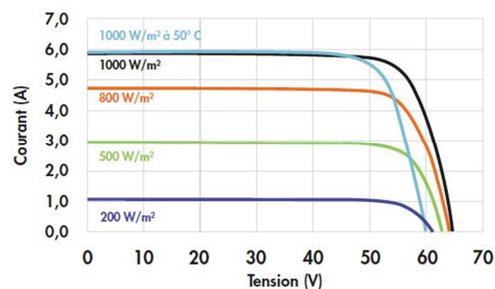


Fig. 14. Curva do painel Sunpower A300 (datasheet).

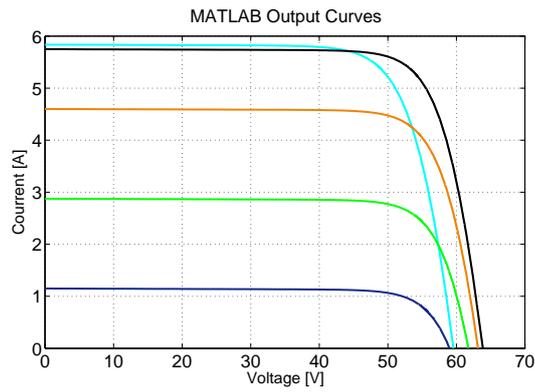


Fig. 15. Curvas obtidas no MATLAB™ para o painel.

A seguir pode-se ver as curvas obtidas variando a irradiação :

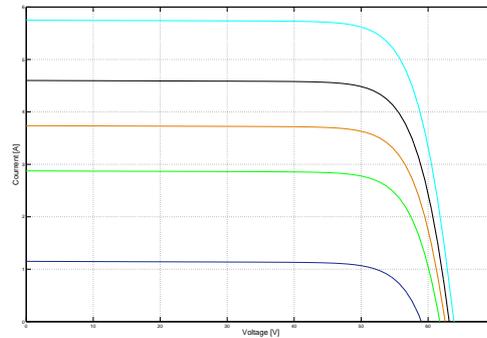


Fig. 16. Curvas obtidas no MATLAB™ para o painel quando submetido a vários valores de irradiação.

Da mesma forma podem ser variadas os valores de temperatura (Fig 17) e fator de idealização(Fig 18):

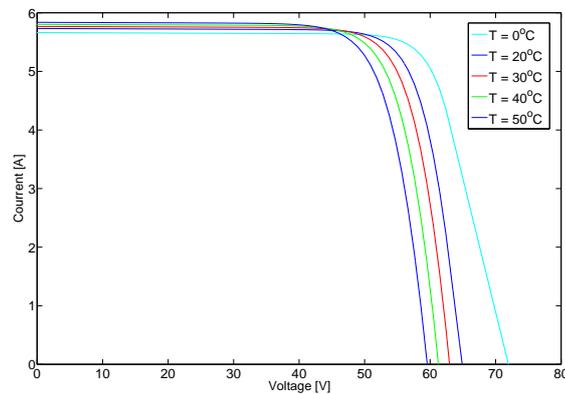


Fig. 17. Curvas obtidas no MATLAB para o painel quando submetido a variações de temperatura.

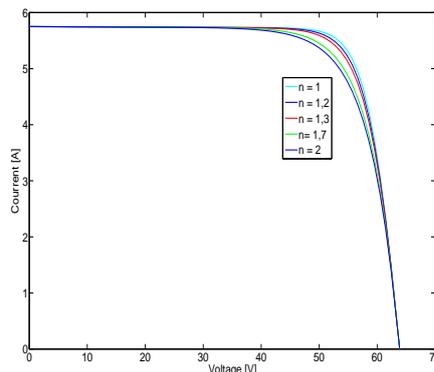


Fig. 18. Curvas obtidas no MATLAB para o painel variando-se o fator de idealizacao.

9. CONCLUSÃO

Apesar da importância no âmbito ambiental, os altos custos dos módulos fotovoltaicos sempre foram o principal problema desta tecnologia, porém a energia fotovoltaica começou a receber importantes investimentos, tanto do setor público, por meio de programas de incentivos governamentais, como de empresas privadas que vislumbram na energia solar fotovoltaica uma boa oportunidade para investimentos.

Como consequência das políticas de investimentos na pesquisa e no desenvolvimento dos painéis fotovoltaicos, a sua produção mundial e a demanda cresceram consideravelmente, desta forma os custos da geração fotovoltaica de energia elétrica diminuíram significativamente. Com esta redução dos custos, os sistemas fotovoltaicos se tornaram mais acessíveis e começaram a ser mais utilizados.

Nos últimos anos, o governo do Brasil desenvolveu importantes programas para a disseminação das energias renováveis, como o PRODEEM (Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios), o PROINFA (Programa de Incentivo as Fontes Alternativas) e o Programa Luz para Todos. Todos estes têm como objetivo final acabar com a exclusão elétrica no país.

Através dos cálculos verifica-se que para a implementação na alimentação de refrigeradores ainda há o obstáculo dos custos, principalmente para modelos de classe média alta (maiores capacidades), tendo ainda um retorno do investimento de longo prazo, mas que traz como efeito benéfico a disponibilização, considerando que a redução pode estar em quase todos os lares em pouco tempo, de quantidade considerável de energia para o sistema elétrico, deixando de consumir recursos da rede interligada.

No presente trabalho foi apresentado e demonstrado no MATLAB™ um modelo preciso de um painel solar típico de 300 Watts. Para uma determinada tensão e temperatura o modelo calculou a corrente em uma dada voltagem. Os resultados mostraram uma excelente correspondência com as curvas publicadas pelo fabricante do painel. Foi mostrado também como alguns parâmetros exercem influência nas curvas características da célula e como obter indiretamente os valores de R_s e R_{sh} que são essenciais para o estudo. Finalmente usamos o modelo para mostrar os efeitos da variação de irradiação, temperatura e fator de idealização.

Esse artigo é a base para o desenvolvimento de uma modelagem e simulação mais completa que envolva todos os circuitos, inclusive o controle, de um sistema fotovoltaico, norteando o estudo de PV em cargas intermitentes, em especial para refrigeradores domésticos.

Apêndice A
Código em Matlab™

```
function Ia = PV(V,Suns,Tcell)
% Ia,Va = current and voltage vectors [A] and [V]
% G = [Ga/Gref]
% T = temperature of cell [C]

k = 1.38e-23; % Boltzmann constant [J/K]
q = 1.60e-19; % Elementary charge [C]
n = 1.2; % Quality factor for the diode [].
% n=2 for crystalline, <2 for amorphous
Eg = 1.12; % Voltage of the Crystalline Silicon [eV],
% 1.75eV for Amorphous Silicon

Tref = 273 + 25; % Normalised temperature [K]

% Cell Values
Voc_Tref = 0.665; % Open-current voltage at T1 [V].
Isc_Tref = 5.75; % Short-circuit current at T1 [A].
K0 = 3.5/1000; % Current/Temperature coefficient [A/K].
dVdI_Voc = -0.0092361111; % dV/dI coefficient at Voc [A/V].

Tc = 273 + Tcell; % Convert cell's temperature from Celsius
% to Kelvin [K].
Iph_Tref = Isc_Tref * Suns; % Equation(3).
Iph = Iph_Tref + K0*(Tc - Tref); % Equation(2).

Id_Tref = Isc_Tref/(exp(q*Voc_Tref/(n*k*Tref))-1);%Equation(7)
%Equation(6)
Id = Id_Tref*(Tc/Tref).^(3/n).*exp(-q*Eg/(n*k).*(1./Tc)-(1/Tref));

Xv = Id_Tref*q / (n*k*Tref) * exp(q*Voc_Tref/(n*k*Tref));%Equation(9)
Rs = - dVdI_Voc - 1/Xv; %Compute the Rs Resistance.

Vt_Ta = n * k * Tc / q;
Rsh =24.6296296296; %Obtained by -dV/dIsc

Ia = zeros(size(V)); %Preallocating the Ia Vector to speed
In = zeros(size(V));

% Compute Ia with the Iterative Newton Method
maxit = 100;
eps = 1e-16;

for j=1:maxit;
Ia = Ia - (Iph - Ia - Id.*( exp((V+Ia.*Rs)./Vt_Ta) -1) - ...
((V+ Rs*Ia)/Rsh))./(-1 - ((Id.*( exp((V+Ia.*Rs)./Vt_Ta) -1))...
.*Rs./Vt_Ta)- (Rs./Rsh));
if(max(abs(In-Ia))<eps)
break;
end
In = Ia;
end
end
```

10. REFERÊNCIAS

Ministério de Minas e Energia do Brasil, "Balanço energético nacional", pp.21. 21 de Maio de 2007.Disponível em www.mme.gov.br.

Siemens, "Formas Não-convencionais de Geração e uso Racional de Energia".

Oliveira, K.J., "Análise do Custo de Instalação de Sistemas Fotovoltaicos Isolados". II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – João Pessoa – PB, 2012.

C. A. P. Tavares, "Estudo Comparativo de Controladores Fuzzy Aplicados a um Sistema Solar Fotovoltaico.", 2009.

F. M. González-Longatt, "Model of Photovoltaic Module in MATLAB", 2DO CONGRESO IBEROAMERICANO DE ESTUDIANTES DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y 1 COMPUTACIÓN (II CIBELEC 2005).

A. Luque, S Hegedus "Handbook of photovoltaic science and engineering.", 1. ed. Chichester – England. 2003. Ed. John Wiley and Sons, 2003. April 2003. 1168 p.

L.A.C Lopes and Lienhardt, A.-M. "A simplified nonlinear power source for simulating PV panels", Power Electronics Specialist, 2003. PESC'03. IEEE 34th Annual Conference on, Volume 4, pp. 1729- 1734.15-19 June 2003.

B. Kroposki, R. DeBlasio, "Technologies for the New Millennium: Photovoltaics as a Distributed Resource". Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE, Vol. 3, p.p. 1798 – 1801,16-20 July 2000.

G. Walker, "Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PVmodel," Journal of Electrical and Electronics Engineering, Australia, IEAust, vol.21, No. 1, 2001, pp.49-5.

Sandia National Laboratories, Photovoltaic Design Assistance Center, 1991, "Stand-Alone Photovoltaic Systems – A Handbook of Recommended Design Practices". Sandia National Laboratories, 1983.

Resolução Homologatória ANEEL nº 1440, de 24/01/2013.