

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

DESENVOLVIMENTO DE UM SOFTWARE DIDÁTICO EM PROJETOS FOTOVOLTAICOS RESIDENCIAIS

Bruno de Alencar Carneiro, brunoalnk@hotmail.com¹
Rubens Soeiro Gonçalves, soeiro@ifma.edu.br¹
Paulo Pacheco Pinto, paullo_grb@hotmail.com¹
Joaquim Teixeira Lopes, teixeira@ifma.edu.br¹
Jeovane Costa Batista, jeovane_cost@hotmail.com¹
Rômulo Diêgo Marinho Siqueira, romulodiegoms@hotmail.com¹
Ricardo Medeiros Rodrigues, ricardo.medeiros@engmecanico.com¹
Dalmir dos Santos Matos, dalmir.matos.s@gmail.com¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão, Av. Getúlio Vargas - 4, Monte Castelo, São Luís, MA, CEP 65030-005

Resumo: O software desenvolvido apresenta os requisitos necessários ao apoio das atividades didáticas para a disciplina de Fontes de Energia Alternativas, no ramo de energia solar fotovoltaica, podendo ser utilizado em outros cursos de graduação com conteúdo similar. Para que o mesmo atenda aos requisitos, deverá ter uma plataforma amigável com o usuário, com entradas e saídas de dados, gráficos e relatórios que atendam as demandas pedagógicas. Especificamente serão trabalhados os procedimentos de simulação das curvas corrente x tensão e potência x tensão a partir dos dados comerciais disponibilizados pelos fabricantes. O dimensionamento do projeto de geração de energia através de módulos fotovoltaicos voltado para residências será outro tópico a ser abordado, em que o mesmo deverá efetuar também uma análise econômica em comparação ao sistema elétrico convencional quanto ao tempo de recuperação do investimento. Em adição, o software apresentará procedimentos de análise da radiação extraterrestre, radiação na superfície horizontal e inclinada, ângulo de declinação solar, ângulo zenital, ângulo horário e ângulo de altura solar, por meio de cálculos e soluções das equações específicas a estes tópicos.

Palavras-chave: Educação, Fotovoltaico, Software, Projeto, Residencial.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de energia solar tem sido implementada globalmente como uma alternativa de geração de energia elétrica em áreas mais remotas desde que as células fotovoltaicas solares foram inventadas (Barlow et al, 1991). A tecnologia permite a conversão de radiação solar em eletricidade. Estes sistemas fotovoltaicos são baseados na tecnologia de semicondutores, principalmente através do silício segundo Ishaque (2011).

Dentre as vantagens da utilização da energia solar, está o fato de ser uma energia limpa, que não deixa resíduo de produção, possui uma fonte inesgotável e de fácil acessibilidade, podendo ser utilizada em qualquer lugar e indefinidamente por mais remota que seja a localização geográfica, levando, portanto, qualidade de vida. Porém, esta tecnologia possui o custo inicial relativamente alto comparado a outros métodos de geração de eletricidade, tais como plantas baseadas em carvão ou combustíveis fósseis. (Duffie et al, 1991).

Contudo, um projeto fotovoltaico residencial precisa atender aos requisitos de demanda do sistema: tensão, corrente e potência; necessitando conectar-se a vários módulos fotovoltaicos em série ou em paralelo para formar um painel solar. Em face à resolução de projetos, um apoio computacional é importante para a formação de engenheiros neste ramo tecnológico.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O trabalho proposto é iniciado com uma pesquisa bibliográfica acerca da energia solar e projetos fotovoltaicos no desenvolvimento experimental dos conteúdos assimilados dentro de um aplicativo criado em software MATLAB™. A

Apresentam-se nesta seção alguns trabalhos correlacionados com o tema central, destacamos alguns exemplos que contribuíram para a base deste trabalho.

Jäger et al. (2014), em seu trabalho, sistematiza todo o dimensionamento de um sistema fotovoltaico residencial, começando com a demanda de carga dos equipamentos eletrodomésticos, levantando as médias de consumo de energia ou o total de componentes existentes na residência do cliente.

A energia consumida por dia por cada eletrodoméstico é calculada através das Eq. 1 e 2:

$$E_{AC} = \sum n_{eqp} * P_{AC} * \Delta t \quad (1)$$

$$E_{DC} = \sum n_{eqp} * P_{DC} * \Delta t \quad (2)$$

No qual:

E_{AC} : Demanda de energia diária em Corrente Alternada (Wh/dia)

E_{DC} : Demanda de energia diária em Corrente Contínua (Wh/dia)

n_{eqp} : Quantidade do equipamento escolhido na residência

P_{AC} : Potência do equipamento em Corrente Alternada (W)

P_{DC} : Potência do equipamento em Corrente Contínua (W)

Δt : tempo de uso diário (Horas)

A demanda total é calculada com o somatório das demandas em corrente contínua (CC) e corrente alternada (CA). Para a obtenção da demanda real, no qual será a base de dimensionamento dos módulos, nos quais são as perdas de energia relacionadas às eficiências do cabo, controlador de carga, bateria e inversor (conforme especificação do fabricante), representado nas Eq. 3 e 4, de modo a obter a demanda real de energia elétrica que o sistema deve trabalhar.

$$E_{Placa (Autônomo)} = \frac{E_{DC} + \left(\frac{E_{AC}}{\eta_{Inversor}}\right)}{\eta_{Cabos+CC+Bateria}} \quad (3)$$

$$E_{Placa (Conectado)} = \frac{E_{AC}}{\eta_{Inversor} * \eta_{Cabos}} \quad (4)$$

Onde:

E_{placa} : Demanda de energia que a placa deve produzir (Wh)

$\eta_{cabos+CC+bateria}$: Eficiência dos cabos, controladores de carga e bateria (%)

$\eta_{inversor}$: Eficiência do inversor (%)

η_{cabos} : Eficiência dos cabos (%)

Duffie, Beckman (1991), em seu livro *Solar Engineering of Thermal Processes*, faz um estudo sobre a radiação solar incidente na superfície terrestre, definindo todos os parâmetros necessários de localidade, desde sua latitude para obtenção dos ângulos compreendendo as relações trigonométricas esféricas da Terra com a fonte incidente de radiação solar, até os coeficientes empíricos de clima e vegetação da localidade para a estimativa de perda de radiação devido a albedo.

Ishaque et al, 2011, priorizou modelos matemáticos ideais referentes à performance elétrica de painéis fotovoltaicos, entre este o modelo de um diodo (Fig. 1) e de dois diodos. O primeiro consiste numa fonte de corrente, I_{pv} , dependente da radiação incidente, em paralelo com um diodo que representa o comportamento da corrente na junção P-N do semicondutor. Este modelo necessita de três parâmetros, sendo eles a corrente de curto-circuito I_{sc} , quando a tensão é nula, a tensão de circuito aberto V_{oc} , quando a corrente é nula, e o fator de idealidade do diodo, n .

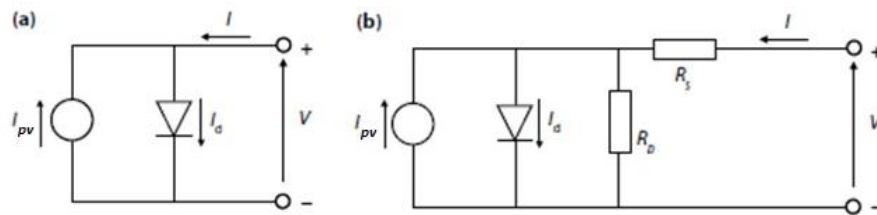


Figura 1. (a) Modelo matemático ideal de um diodo e (b) modelo otimizado com resistência em série R_s e uma resistência em paralelo R_p . (Solar Energy: Fundamentals, Technology and Systems - 2014)

Este modelo pode ser melhorado através da inclusão de uma resistência em série, R_s , exibindo, no entanto, falhas para variações de temperatura, necessitando estudos mais aprofundados de perdas de potência devido ao aumento de temperatura. A inclusão de uma resistência em paralelo R_p melhora significativamente os resultados obtidos com o modelo. A corrente de saída da Fig. 1 é $I = I_{pv} - I_d$. Ela pode ser escrita como Ishaque (2011) define nas Eq. 5 e 6:

$$I = I_{pv} - I_o * \left[\exp \left(\frac{V + I * R_s}{n * V_t} \right) - 1 \right] \quad (5)$$

Onde:

$$V_t = \frac{N_s * k * T}{q} \quad (6)$$

Nos quais, temos:

- I_{pv} : Corrente gerada pela incidência de luz;
- I_o : Corrente de saturação reversa;
- V_t : Tensão térmica do módulo;
- q : Carga do elétron ($1.60217646 \times 10^{-19}$ C);
- k : É a constante de Boltzmann ($1.3806503 \times 10^{-23}$ J / K);
- N_s : Numero de células em série;
- T : Temperatura (Kelvin) da célula;
- n : Fator de idealidade do diodo;

O modelo de dois diodos está representado na Fig. 2, cuja corrente de saída está definida pela Eq. 7 (Ishaque, 2011):

$$I = I_{pv} - I_{o1} * \left[\exp \left(\frac{V + I * R_s}{n_1 * V_t} \right) - 1 \right] - I_{o2} * \left[\exp \left(\frac{V + I * R_s}{n_2 * V_t} \right) - 1 \right] - \left(\frac{V + I * R_s}{V_p} \right) \quad (7)$$

Onde:

- I_{o1} : Corrente de saturação reversa do diodo 1;
- I_{o2} : Corrente de saturação reversa do diodo 2;
- V_{t1} : Tensões térmicas do diodo 1;
- V_{t2} : Tensões térmicas do diodo 2;
- n_1 : Constante de idealidade do diodo 1;
- n_2 : Constante de idealidade do diodo 2;

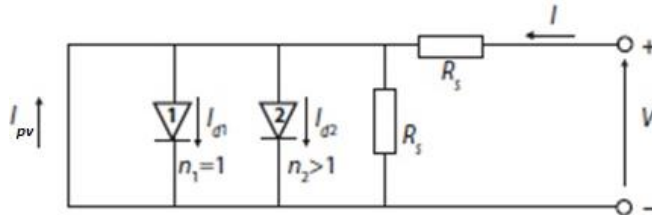


Figura 2. Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica segundo o modelo matemático de dois diodos (Solar Energy: Fundamentals, Technology and Systems; Universidade de Delft, Holanda - 2014)

Na aplicação específica para softwares computacionais, Machado, D.M.C. (2014) aproveitou métodos iterativos de *Newton-Raphson* para resolver equações não lineares da corrente em função da tensão, encontrando a resistência em série e em paralelo que satisfaça o critério “erro” para simulação de curvas corrente x tensão e potência x tensão de módulos comerciais com dados fornecidos pelo fabricante. Com isso, o software pôde aperfeiçoar o dimensionamento de módulos através dos parâmetros de performance, segundo Jäger (2014), nas Eq. 8, 9, 10 e 11:

$$P_{Min. Saída} = \frac{E_{Placas}}{H_{Eq. Sol}} \quad (8)$$

$$N_{Painéis} = \frac{P_{Min. Saída}}{P_{MPP}} \quad (9)$$

$$I_{m\acute{a}x} (Paralelo) = I_{CC} * N_{Pain\acute{e}is} \quad (10)$$

$$V_{m\acute{a}x} (S\acute{e}rie) = V_{OC} * N_{Pain\acute{e}is} \quad (11)$$

No qual:

$P_{Min. Sa\acute{d}a}$: Pot\^encia M\^inima de Sa\^ıda dos Pain\^eis (W)

$H_{Eq. Sol}$: Horas Equivalentes de Sol (Horas)

$N_{Pain\acute{e}is}$: Quantidade de Pain\^eis

P_{MPP} : Pot\^encia de Ponto de Pot\^encia M\^axima (Watts-pico)

I_{CC} : Corrente de Curto Circuito (A)

V_{OC} : Tens\~ao de Circuito Aberto (V)

A seguir, J\^ager (2014) sintetiza o dimensionamento da bateria, feito com base na rela\~ao entre a tens\~ao operacional do sistema e a pr\^opria tens\~ao do equipamento, na capacidade de armazenamento e a profundidade de descarga, definindo a quantidade de baterias necess\^arias ao projeto aut\^onomo al\^em de seu arranjo em s\^erie e/ou em paralelo conforme os dias de autonomia projetados pelo cliente, detalhadamente nas Eq. 12, 13, 14 e 15:

$$C_{Min. Bat.} = \frac{E_{Placas}}{D_{oD} * V_{Operacional}} * \Delta t_{autonomia} \quad (12)$$

$$N_{Bat. (S\acute{e}rie)} = \frac{V_{Operacional}}{V_{Bateria}} \quad (13)$$

$$N_{Bat. (Paralelo)} = \frac{C_{Min. Bat.}}{C_{Bateria}} \quad (14)$$

$$N_{Baterias} = N_{Bat. (S\acute{e}rie)} * N_{Bat. (Paralelo)} \quad (15)$$

Onde:

$C_{Min. Bat.}$: Capacidade m\^inima da bateria (Ah)

D_{oD} : Profundidade de Descarga da Bateria (%)

$\Delta t_{autonomia}$: Dias projetados para a autonomia do sistema (Dias)

Tamb\^em de modo simplificado na Eq. 16 para sistemas aut\^onomos e Eq. 17 para sistemas conectado \^a rede, o detalhamento do inversor \acute{e} feito da maneira fornecida por J\^ager (2014):

$$P_{Nom. Inv.} = \frac{P_{total}}{\eta_{Inversor}} \quad (16)$$

$$P_{Nom. Inv.} = N_{Pain\acute{e}is} * P_{MPP} \quad (17)$$

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivos Gerais

Desenvolver uma ferramenta educacional para apoio das atividades did\^aticas para a disciplina de Fontes de Energia Alternativas, especificamente em energia solar fotovoltaica.

3.2. Objetivos Espec\^ificos

- Relacionar as equa\~oes de corrente x tens\~ao e pot\^encia x tens\~ao em modelos de pain\^eis fotovoltaicos;
- Disponibilizar as rela\~oes existentes entre corrente x tens\~ao e pot\^encia x tens\~ao;
- Elaborar o dimensionamento de projeto solar residencial efetuando an\^alise de custo e retorno do projeto;
- Apresentar procedimentos de an\^alise da radia\~ao extraterrestre, radia\~ao na superf\^icie horizontal e inclinada, \^angulo de inclina\~ao solar \^angulo zenital, \^angulo hor\^ario e \^angulo de altura solar;
- Elaborar elementos gr\^aficos de f\^acil leitura e clareza de comando, com diagrama\~ao das telas do programa;
- Criar acesso a guias de ajuda e *troubleshootings*;

- Gerar relatórios com os dados de corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto, ponto de potência máxima, fator de forma e eficiência do painel fotovoltaico;
- Elaborar manual de instrução do programa;
- Validar o cálculo.

4. METODOLOGIA

4.1. Materiais

A metodologia adotada no desenvolvimento do software consistirá no planejamento, análise de requisitos, projeto, codificação, revisão, compilação e teste.

A análise de requisitos e o projeto são efetuados durante a pesquisa bibliográfica. Para as etapas de codificação, revisão e compilação do programa, a plataforma utilizada é o *MATLAB™*, mais precisamente a interface gráfica de usuário *GUIDE*. Para a obtenção das curvas corrente x tensão e potência x tensão em painéis fotovoltaicos serão considerados os modelos clássicos de um e dois diodos. Segundo Ishaque (2011), nestes modelos serão consideradas resistência em série (R_s) e a resistência em paralelo (R_p). As curvas corrente x tensão e potência x tensão serão obtidas a partir de um algoritmo de busca pelo método padrão de *Newton-Raphson* (Machado, 2014), utilizado para resolver a equação não linear da corrente em função da tensão, encontrando a resistência em série e em paralelo que satisfaça o critério “erro” menor que o dado erro admitido, sendo este a diferença entre o valor de potência encontrado através das simulações e a potência fornecida pelo fabricante.

Para o dimensionamento de projeto solar residencial será adotada a metodologia clássica: levantamento da demanda, dimensionamento do número de painéis fotovoltaicos, dimensionamento das baterias e controladores de carga e inversor e acessórios necessários para a instalação. O custo do sistema e a recuperação do capital a ser investido comparado ao custo da energia elétrica convencional serão inseridos como um procedimento deste tópico. Para o estudo da radiação, serão trabalhadas as equações clássicas específicas a este tema, as suas soluções e simulações visando facilitar o processo ensino-aprendizagem.

4.2. Modelagem do Software

Após a reunião da literatura necessária, foram definidos os algoritmos através do *software MATLAB™* tanto para a obtenção das análises de radiação solar e ângulo zenital quanto para o dimensionamento do projeto de painéis solares residenciais. O modelo de projeto destes sistemas é baseado na definição fundamental do sistema, que significa a forma como o ciclo de geração de energia se completará. Como a energia solar somente é obtida durante dias de céu claro, cabe ao cliente definir como este pretende obter a energia em baixas de produção. Portanto, os sistemas fotovoltaicos são divididos em sistemas autônomos e conectados à rede concessionária de energia elétrica. Após este requisito, as etapas de dimensionamento atendem às demandas de carga da residência, o modelo e parâmetro dos componentes geradores (módulos fotovoltaicos e baterias) e retificadores (controladores de carga e inversores) conforme as condições de ambiente e de instalação, para enfim poder traçar o custo da implantação e da manutenção durante o tempo de vida útil do projeto e estimar a produção em termos econômicos, conforme mostra a Fig. 3.

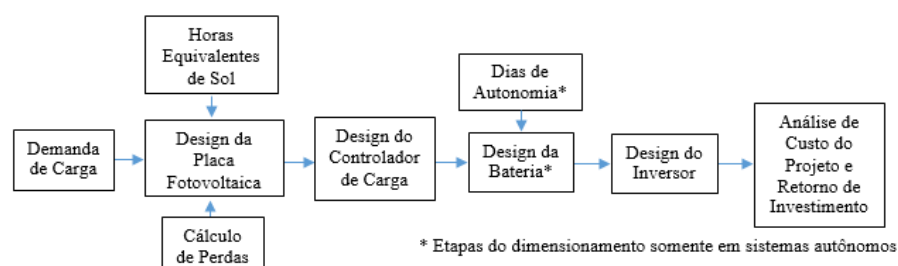


Figura 3. Fluxograma geral do dimensionamento do sistema de placas fotovoltaicas para obtenção de energia elétrica

O sistema autônomo é baseado no dimensionamento de módulos fotovoltaicos onde somente é utilizado como fonte a energia solar - sem conexão com a rede de distribuição, nos quais podem consistir de módulos fotovoltaicos, um inversor de carga e uma carga única ou podem incluir baterias para armazenamento de energia. É necessária a inclusão de controladores de carga para que desativem os módulos fotovoltaicos quando as baterias estão totalmente carregadas, por outro lado, estes também devem desligar a carga para evitar que as baterias estejam descarregadas. Para cumprir os requerimentos de projeto, as baterias têm de ter capacidade suficiente para armazenar a energia produzida durante o dia para ser usado à noite e durante os períodos de mau tempo.

A outra escolha que o *software* permite é de um sistema conectado à rede, no qual o projeto é ligado à rede de distribuição energética através de inversores que convertem a eletricidade em corrente contínua para corrente alternada, não necessitando de baterias. Como aqui o estudo de caso é voltado para o uso residencial, é projetado o inversor para

conexão com o quadro de distribuição, de onde a energia gerada é transferida para a rede elétrica ou aparelhos de corrente alternada na casa. O sistema conta com a vantagem de, além de ser amparado pela rede em baixas de produção, poder ceder à concessionária de energia a diferença de produção e consumo e consequentemente receber o retorno financeiro de tarifa elétrica.

Primeiramente o projeto é alavancado com a definições das condições de contorno nos quais estão submetidas a localidade. Sob definição da demanda de carga através do levantamento de consumo dos componentes elétricos residenciais ou do histórico estatístico de energia consumida – apresentadas nas Eq. 1 e 2, fornecidas pela rede concessionária de energia da residência (em casos de localidades integradas), a demanda real é conhecida após a definição das perdas de eficiência dos componentes do sistema fotovoltaico, na Eq. 3 e 4.

No decorrer do dimensionamento, é requisitada a entrada no software dos dados geográficos do local, os quais obtemos os gráficos de inclinação solar e altura solar, importantes também para análise do tempo de exposição diária da região ao Sol ao longo do ano no dimensionamento da bateria, conforme feito estudo bibliográfico solarimétrico conforme Duffie (1991). Após levantarmos e definirmos todos os fatores externos no projeto, parte-se para a entrada das configurações internas do sistema de placas fotovoltaicas. Aprofundando o conhecimento dos parâmetros de performance elétrica de painéis fotovoltaicos, são interpretados os gráficos de corrente x tensão e potência x tensão, sob os quais são estudados em modelos ideais de um e dois diodos – Eq. 5, 6 e 7. Segundo Ishaque, a partir dos padrões e normas reguladoras definidas pela Comissão Internacional de Eletrotécnica (IEC 61215/61646) os fabricantes devem fornecer dados do painel fotovoltaico, entre os quais são os valores de corrente de curto circuito, tensão de circuito aberto, potência, entre outros, para duas condições meteorológicas diferentes – a STC e a NOCT.

A STC (*Standard Test Condition*) é a condição de teste de painéis para obtenção dos parâmetros de especificação de fabricante. A saber, nesta norma os painéis devem calculados sob a temperatura ambiente de 25°C, em uma irradiação total de 1000 W/m² e espectro solar de massa de ar AM 1.5. A NOCT é outra norma de condição de teste, no qual é procedida sob uma irradiação de 800 W/m² com uma velocidade nominal do vento de 1m/s² e uma temperatura ambiente padrão de 20°C.

Uma das principais características de um painel fotovoltaico, que é obtida a partir modelo elétrico equivalente de uma célula, é a sua curva tensão x corrente (Curva I-V e P-V) na Fig. 4, características não lineares. Essas curvas (I-V e P-V) são necessárias para o estudo do ambiente de simulação, a partir dos dados obtidos na tabela de especificações do painel fotovoltaico comercial.

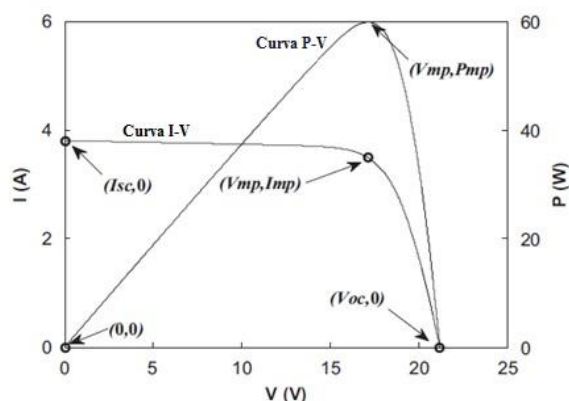


Figura 4. Curvas características de Corrente x Tensão (I-V) e Potência x Tensão (P-V) (Ishaque et al, 2011.a)

O modelo de simulação de curvas IxV e PxV de painéis no dimensionamento enfatiza a obtenção de parâmetros de performance de células fotovoltaicas, sendo estes o ponto de potência máxima, o fator de forma e a eficiência da célula. A célula solar terá o seu melhor desempenho em seu ponto de potência máxima, com a respectiva tensão no ponto de potência máxima é chamado V_{mpp} e a corrente no ponto de potência máxima é chamado I_{mpp} . O fator de forma (FF) representa a razão entre a potência máxima e o produto da corrente de curto-circuito e a tensão de circuito aberto. Vale ressaltar que é impossível para uma célula solar para ter um FF igual a 1, em que caso a curva I x V deve ter a forma de um retângulo. Por fim, tem-se a eficiência de conversão η de uma célula solar, que significa a razão entre a potência de saída máxima de uma célula solar P_{max} e a radiação solar incidente sobre a célula fotovoltaica. Por consequência, a eficiência de conversão pode ser expressa através dos parâmetros externos de uma célula solar: tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito e fator de forma. Com isso, o número de painéis fotovoltaicos é conhecido pelas Eq. 8, 9, 10 e 11.

Após o estudo da performance de células fotovoltaicas, é definida, para o sistema autônomo, a configuração do inversor, controlador de carga e da bateria, associada aos seus dias de autonomia. O controlador de carga, como o próprio nome diz, evitar danos de sobrecarga de energia da bateria através do controle da tensão aplicada no mesmo, impedindo a circulação de corrente vinda dos quando a bateria está com sua capacidade cheia. O seu dimensionamento também é importante para definir a configuração de painéis em paralelo ou em série, sob as condições a serem implementadas no programa de que o sistema será em paralelo se a tensão do controlador for maior do que a soma de

todas as tensões de circuito aberto dos módulos e a corrente for maior que a soma das correntes de curto circuito dos painéis, caso contrário o sistema será modelado em série. Por fim, é dimensionado o inversor do sistema autônomo, cuja sua função é transformar a energia em corrente contínua vinda dos módulos fotovoltaicos para corrente alternada, adaptando-se à especificação de parte dos equipamentos domésticos, sumarizados nas Eq. 12, 13, 14 e 15.

Tais etapas não são feitas no dimensionamento do sistema conectado à rede, no qual o seu design chega a seu final após a entrada de dados referentes ao inversor, levando ao cálculo de quantos painéis devem ser montados, de que maneira estes devem ser posicionados (em paralelo ou em série) e quais serão a voltagem e corrente operacional, além de definida a potência mínima nominal – Eq. 16 e 17.

A configuração de painéis é dada conforme especificação dos inversores, onde as condições de arranjo são análogas às dos controladores de carga em sistemas autônomos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a reunião da literatura necessária, foram definidos os algoritmos através do *software* MATLAB™ tanto para a obtenção das análises de radiação solar e ângulo zenital quanto para o dimensionamento do projeto de painéis solares residenciais. A plataforma de início do *software*, na Fig. 5, oferece opção de idioma e possui um botão de ajuda ao usuário em relação ao programa em geral e sua faixa de aplicação.

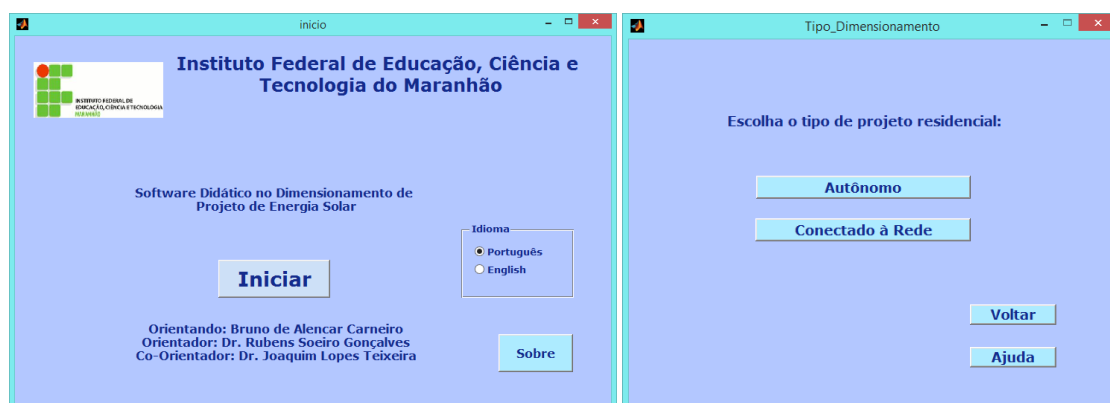


Figura 5. Interface inicial e de escolha de sistemas do Software Didático no Dimensionamento de Projetos Fotovoltaicos. Elaborada pelo Autor.

Dando a opção ao usuário de escolher o tipo de dimensionamento desejado, a interface foi montada da maneira mais didática para que o aluno sempre seja amparado diante das etapas de projeto de um sistema fotovoltaico, no caso a escolha de *design* entre um sistema autônomo e um sistema conectado à rede – Fig. 6.



Figura 6. Menu do dimensionamento do sistema de placas fotovoltaicas para obtenção de energia elétrica para os sistemas conectados à rede e autônomos. Elaborada pelo Autor.

Figura 7. Interface da etapa de tabelamento de dispositivos elétricos residenciais para obtenção da demanda total de carga elétrica no *Software* de Energia Solar. Elaborada pelo Autor.

O dimensionamento começa pelo tabelamento dos equipamentos elétricos usuais de uma casa, seu total de horas diárias de funcionamento, a energia gasta diariamente por cada um a fim de que obtenha a demanda de energia requerida na residência, ilustrado na Fig. 7.

Com opção de montar o projeto fotovoltaico conectado à rede de distribuição de energia ou de modo independente, possibilitamos o usuário de escolher um sistema de acordo com a sua necessidade ou o ambiente oferecido. A coleta de dados referentes à simulação de curvas corrente x tensão e potência x tensão disponibilizam ao usuário o poder de analisar e comparar as placas fotovoltaicas segundo os fornecedores e seus dados técnicos, já arquitetando que configurações (um diodo ou dois diodos) o mesmo pode definir no projeto.

Após isso, são calculadas quais as perdas de energia relacionadas às eficiências do cabo, controlador de carga, bateria e inversor de modo a obter a demanda real de energia elétrica que o sistema deve trabalhar, na Fig. 8.

Figura 8. Interface da etapa do cálculo de perdas de energia nos componentes do sistema fotovoltaico no *Software* de Energia Solar. Elaborada pelo Autor.

No decorrer do dimensionamento, é requisitada a entrada no *software* dos dados geográficos do local, na Fig. 9, os quais obtemos os gráficos de inclinação solar e altura solar, importantes também para análise do tempo de exposição diária da região ao Sol ao longo do ano no dimensionamento da bateria, conforme feito estudo bibliográfico. Após levantarmos e definirmos todos os fatores externos no projeto, parte-se para a entrada das configurações internas do sistema de placas fotovoltaicas na Fig. 10. A interface de especificação das configurações elétricas nas placas fotovoltaicas vem a seguir, com a simulação dos parâmetros de performance elétrica em condições personalizadas, ilustrado na Fig. 11.

Figura 9. Interface da etapa de coleta de dados geográficos para construção de curvas do ângulo de Altura Solar e Radiação Solar ao longo do ano (Esquerda); etapa do dimensionamento das configurações elétricas do módulo fotovoltaico no *Software* de Energia Solar (Direita). Elaborada pelo Autor.

The image shows two side-by-side software windows. The left window, titled 'Auto_CCBateria', is for configuring the battery and charge controller. It includes fields for 'Especificações de Controlador de Carga, Bateria e Inversor' with inputs for maximum voltage (0 V), maximum current (0 A), operational voltage (12 V selected), depth of discharge (0 %), battery voltage (0 V), battery capacity (0 Ah), minimum battery capacity (0 Ah), number of batteries in series (0), number of batteries in parallel (0), number of batteries (0), and minimum inverter power (0 W). The right window, titled 'Conec_Inversor', is for inverter configuration. It includes fields for 'Especificações do Inversor' with inputs for nominal power (0 W), maximum DC voltage (0 V), maximum DC current (0 A), minimum nominal power (0 W), and a checkbox for 'Seguimento de Ponto de Potência Máximo' (Sim selected). Both windows have 'Calcular', 'OK', and 'Cancelar' buttons.

Figura 11. Interface da etapa do cálculo de configurações elétricas da bateria, controlador de carga e inversor do sistema autônomo de placas fotovoltaicas no *Software* de Energia Solar. Elaborada pelo Autor.

Após todo o dimensionamento energético do sistema fotovoltaico residencial, é feita a análise de custo do projeto e a estimativa de retorno de investimento, como demonstrado na Fig. 12. Inicialmente faz-se todo o orçamento dos equipamentos necessários para a implantação do projeto, em especial o custo dos módulos e dos inversores em função da potência de pico. Com isso, encontra-se o custo total dos módulos, inversores e a soma de todo o projeto.

A estimativa de retorno de investimento é feita ao tomar como base a tarifa de consumo ativo mensal da localização que o usuário reside ou planeja projetar, além da taxa para se calcular a compensação de crédito de energia mensal e juntamente, o anual. Para estimar o período necessário para todo o projeto dar o retorno financeiro com base no custo total de projeto, é necessário levar em consideração o reajuste tarifário médio, após levantamento estatístico das concessionárias de energia locais.

The image shows a software window titled 'Auto_CustoRetorno' for 'Análise de Custos e Retorno de Investimento'. It contains input fields for: 'Custo do módulo fotovoltaico por unidade de potência de pico' (0 R\$/Wp), 'Potência de Pico do Módulo' (0 Wp), 'Custo total do módulo fotovoltaico' (0 R\$), 'Tarifa de consumo ativo mensal' (0 R\$/kWh), 'Custo do Inversor por unidade de potência de pico' (0 R\$/Wp), 'Potência de Pico do Inversor' (0 Wp), 'Custo total do Inversor' (0 R\$), 'Reajuste tarifário médio anual' (0 %), 'Custo total do projeto' (0 R\$), 'Compensação de crédito anual' (0 R\$), and 'Tempo de Retorno de Investimento' (0 Anos). There is a 'Calcular' button and a graph area on the right. The graph has a y-axis from 0 to 1 and an x-axis from 0 to 1. At the bottom are 'OK' and 'Cancelar' buttons.

Figura 12. Interface do cálculo final de composição de custo do projeto e estimativa de retorno de investimento de projeto no *Software* de Energia Solar. Elaborada pelo Autor.

6. CONCLUSÃO

Através da pesquisa feita, foi possível desenvolver um *software* que será de grande importância para o estudo na disciplina de Fontes de Energia Alternativas, especificamente em energia solar. O aprendizado em linguagem MATLAB na criação de interfaces gráficas e aplicativos de dimensionamento fornece a construção de parâmetros de estudo e projeto. Em adição, o trabalho abre a possibilidade de desenvolvimento de extensões do *software* para que se busque dados experimentais em várias etapas do dimensionamento, sendo significativo nas demandas pedagógicas e acadêmicas área de Energia Solar e de Projetos Fotovoltaicos, e bastante válido para a formação de engenheiros e pesquisadores na Engenharia Mecânica, Elétrica, Física e outras áreas tecnológicas.

Quanto às oportunidades de aperfeiçoamento experimental, estudos experimentais poderão ser feitos através de piranômetros e pireliômetros na obtenção de níveis de radiação solar ou por auxílio de microcontroladores em projetos

de seguidores solares, onde serão calculados os ângulos zenitais e azimutais do Sol ao longo do ano. No levantamento do consumo mensal de um projeto elétrico experimental, um centro de dados pode ser desenvolvido para estimativas de demanda residenciais mais precisas.

7. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à FAPEMA, por ter dado a oportunidade de fomentar a pesquisa e dar espaço à divulgação para inspirar futuros trabalhos; e ao IFMA, pela instituição que busco a graduação e pela oportunidade de oferecer a bolsa de pesquisa com renomados orientadores de vasta experiência acadêmica.

8. REFERÊNCIAS

- Barlow R., McNelis B. and Derrick A., 1991, "Status and Experience of Solar PV Pumping In Developing Countries", In Proc. 10th European PV Solar Energy Conf., Lisbon, Portugal, pp. 1143-1146.
- Duffie, J.A. and Beckman, W.A., 1991, "Solar Engineering of Thermal Processes", 2nd Ed., John Wiley & Sons, New York, USA, pp. 3-141.
- Ishaque, K., Salam, Z., Taheri, H., 2011a, "Simple, Fast and Accurate Two-Diode Model for Photovoltaic Modules", Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 95, Issue 2, Skudai, Johor Bahru, Malaysia, pp 586-594.
- Jäger, K., Isabella, O., Smets, A.H.M., et al., 2014, "Solar Energy: Fundamentals, Technology and Systems", Uit Cambridge Ltd., Delft University of Technology, Delft, Netherlands, pp. 251-345.
- Lopes, J. T., 2013, "Thermal Analysis and Sizing of a Solar Desalination Unit Type Bowl with Assymetric", Doctoral Thesis, Federal University of Uberlandia, Minas Gerais, Brazil, pp. 99-101.
- Machado, D. M. C., 2014, "Current x Voltage and Power x Voltage Curve Simulation of Comercial Photovoltaic Modules Using One and Two-Diode Model", Monograph Thesis, Federal Institute of Technology of Maranhão, São Luís, Brazil, pp. 44-79.
- Quaschnig, V., Hanitsch, R., 1996, "Numerical simulation of current– voltage characteristics of photovoltaic systems with shaded solar cells", Solar Energy Vol. 56, No. 6, pp. 513–520.
- Pereira, E.B., Martins, F.R., Abreu, S.L., Ruther, R., 2006, "Atlas Brasileiro de Energia Solar", 1st Ed., INPE, São José dos Campos, Brazil, pp. 31-41.

9. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

DEVELOPMENT OF EDUCATIONAL SOFTWARE IN RESIDENTIAL PHOTOVOLTAIC PROJECTS

Bruno de Alencar Carneiro, brunoalnk@hotmail.com¹

Rubens Soeiro Gonçalves, soeiro@ifma.edu.br¹

Paulo Pacheco Pinto, paullo_grb@hotmail.com¹

Joaquim Teixeira Lopes, teixeira@ifma.edu.br¹

Jeovane Costa Batista, jeovane_cost@hotmail.com¹

Rômulo Diêgo Marinho Siqueira, romulodiegoms@hotmail.com¹

Ricardo Medeiros Rodrigues, ricardo.medeiros@engmecanico.com¹

Dalmir dos Santos Matos, dalmir.matos.s@gmail.com¹

¹Federal Institute of Education, Science and Technology of Maranhão, Getúlio Vargas Av., n. 4, Monte Castelo, São Luís, MA, ZIP Code: 65030-005

Abstract. The software on development provide the conditions required for the support of educational activities of Renewable Energy Sources Courses, specifically in Photovoltaic Solar Energy, which can be useful on other undergraduate courses with similar content. The program must present an user-friendly platform in order to meet the requirements, with input and output data, charts and reports attending the educational demand. Specifically, procedures are made on the simulation of Current x Voltage and Power x Voltage curves by commercial data available from manufacturers. The design of the Solar Energy project focused on households is another topic to be addressed, in which an economic analysis comparing the distributed generation with grid system is performed, with the respect to the payback of the investment. In addition, the software will present analysis procedures of extraterrestrial radiation, radiation in the horizontal and tilted surface, angle of solar incidence, zenith angle, hour and solar altitude angle, through calculations and equations solutions specific to these topics.

Keywords: Educational, Photovoltaics, Software, Project, Residential.