



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**DESENVOLVIMENTO DE PROJETOS DE SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS COM AUXILIO DO SOFTWARE
MATLAB™**

VILLIAN LAFAYETTE OLIVEIRA SILVA

MOSSORÓ - RN

2019

VILLIAN LAFAYETTE OLIVEIRA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE PROJETOS DE SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS COM AUXÍLIO DO SOFTWARE
MATLAB™**

Monografia apresentada à
Universidade Federal Rural do Semi -
Árido - UFERSA, Departamento de
Engenharias e Tecnologia para
obtenção do título de Engenheiro
Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Idalmir de Souza
Queiroz Júnior - UFERSA

MOSSORÓ - RN

2019

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

048d OLIVEIRA SILVA, VILLIAN LAFAYETTE.
DESENVOLVIMENTO DE PROJETOS DE SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS COM AUXÍLIO DO SOFTWARE MATLABM
/ VILLIAN LAFAYETTE OLIVEIRA SILVA. - 2019.
64 f. : il.

Orientador: Idalmir de Souza Queiroz.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Elétrica, 2019.

1. Dimensionamento. 2. Software. 3.
Fotovoltaico. 4. Solar. 5. MATLAB. I. de Souza
Queiroz, Idalmir, orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.



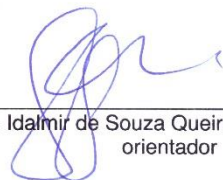
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA
Centro de Engenharias – CE
Engenharia Elétrica

ATA DE DEFESA DE PROJETO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

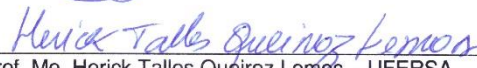
Às 08:00 horas do dia vinte e dois de março de dois mil e dezenove, no auditório do CITEd, UFERSA – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, reuniu-se a Banca Examinadora de defesa de Projeto de Engenharia Elétrica de autoria do aluno **VILLIAN LAFAYETTE OLIVEIRA SILVA**, aluno do curso de Engenharia Elétrica desta universidade, N° de matrícula **2015001189**, com o título **“DESENVOLVIMENTO DE PROJETOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS COM AUXÍLIO DO SOFTWARE MATLAB™”**. A Banca Examinadora ficou assim constituída por três membros: Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior, presidente da banca e orientador; Prof. Me. Herick Talles Queiroz Lemos; Prof. Me. Thomas Tadeu de Oliveira Pereira, como membros. Concluída a defesa, procedeu-se o julgamento pelos membros da banca examinadora, tendo o aluno obtido as seguintes notas: 7,0; 7,0; 7,0. Apuradas as notas verificou-se que o aluno foi aprovado com média geral 7,0. E para constar, eu, Idalmir de Souza Queiroz Júnior, lavrei a presente ata que, após lida e aprovada pelos membros da banca examinadora, será assinada por todos.

Mossoró, 22 de março de 2019.

Assinatura dos membros da Banca Examinadora.



Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior – UFERSA
orientador



Prof. Me. Herick Talles Queiroz Lemos – UFERSA
Primeiro Membro



Prof. Me. Thomas Tadeu de Oliveira Pereira – UFERSA
Segundo Membro

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradecer a Deus por me permitir avançar em mais uma etapa da minha vida e que me dê sabedoria e força para os próximos que virão.

A Idalmir Queiroz, meu orientador e que com muita paciência tomou seu tempo para me ajudar.

A Kátia Cilene, minha amiga e professora, o qual meu deu força e ajuda pra avançar neste projeto.

Ao meu pai Manoel Lafayette e minha mãe Maria Orineth, que me ensinaram a viver e com força e dedicação me proporcionaram a realização de mais um sonho.

A Makézia Mayara, minha namorada, amiga, que me incentiva a seguir em frente na realização dos meus objetivos e que sempre me perguntou preocupada: “E o TCC? Tá dando certo?”.

Aos meus familiares que mesmo distante me deram força indiretamente nesta etapa tão importante da minha jornada.

“Veni Vidi Vici”

Julio César

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo desenvolver o dimensionamento de sistemas solares fotovoltaicos nas configurações de rede autônomo ou ligado a rede elétrica através da plataforma do MATLABTM, permitindo que o usuário possa realizar um levantamento de demanda para dimensionar os equipamentos necessários de um sistema fotovoltaico como os dimensionamentos de banco de baterias, inversores, cabos e painéis solares. Com base na metodologia de dimensionamento fotovoltaico e seguindo os métodos de acordo com a NBR 5410:2004, desenvolveu-se um algoritmo que abrangesse todos os parâmetros utilizados para dimensionar um sistema solar na sua complexidade, dividindo o tipo de sistema adotado pelo usuário e o tipo de tensão da rede escolhida (110V ou 220V).

Palavras-chave: Matlab. Algoritmo. Sistemas fotovoltaicos.

ABSTRACT

The objective of this job was to develop a design of solar photovoltaic systems in the configurations of autonomous network or connected to the electric grid through the platform of MATLABTM. Allowing the user to perform a demand survey to size the necessary equipment of a photovoltaic system such as battery bank, inverter, cable and solar panel design. Based on the methodology identified and following the methods according to NBR 5410: 2004, an algorithm was developed that covers all the parameters used to size a solar system in its complexity, dividing the type of system adopted by the user and the type of selected (110V or 220V).

Keywords: Sizing. Algorithm. Solar systems.

Lista de Figuras

Figura 1: Esquema básico e foto de uma célula comercial.....	17
Figura 2: Princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica	17
Figura 3: Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica alimentam por uma carga Z	18
Figura 4: Curva I-V de uma célula solar fotovoltaica	21
Figura 5: Efeito causado pela variação de intensidade da luz	23
Figura 6: Variação da curva I-V com a temperatura	24
Figura 7: Piranômetro - modelo SP-214	25
Figura 8: Acnógrafo.....	25
Figura 9: Heliógrafo.....	25
Figura 10: Pireliômetros de Incidência Normal.....	25
Figura 11: Pireliômetros de Cavidade Absoluta.....	25
Figura 12: Diagrama de blocos de um sistema fotovoltaico isolado em série	27
Figura 13: Diagrama esquemático de sistema fotovoltaico autônomo.....	28
Figura 14: Diagrama esquemático de um SFV conectado à rede	30
Figura 15: Associação em paralelo das células solares.....	31
Figura 16: Associação em série das células solares	31
Figura 17: Consumo anual de demanda de cliente	43
Figura 18: Demanda da Geração de Energia.....	44
Figura 19: Organograma do algoritmo para sistema autônomo	49
Figura 20: Organograma de um sistema ligado à rede	51

Lista de Tabelas

Tabela 1: Condições experimentais	20
Tabela 2: Eficiência das células fotovoltaicas nos distintos materiais de fabricação	25
Tabela 3: Histórico de consumo	36
Tabela 4: Irradiação inclinada diária média local	37
Tabela 5: Características do Painei Fotovoltaico	37
Tabela 6: Energia Gerada no Mês.....	38
Tabela 7: Especificações Técnicas do Inversor	41
Tabela 8: Geração instalada	42
Tabela 9: Energia Gerada no Mês.....	43
Tabela 10: Especificação do Disjuntor AC de 200A	45
Tabela 11: Especificação do Disjuntor AC de 30A	46
Tabela 12: Especificação do DPS	46
Tabela 13: Especificação da Stringbox.....	47
Tabela 14: Dados para o sistema autônomo.....	50
Tabela 15: Dados para o sistema ligado à rede.....	52

Sumário

1. INTRODUÇÃO	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1. A ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	15
2.1.1. Células Fotovoltaicas	16
2.1.2. Modelo Matemático da Célula Fotovoltaico	17
2.1.3. Corrente de Curto-Circuito e Tensão em Circuito Aberto	19
2.1.4. Fator de Forma e Rendimento	21
2.1.5. Potência Elétrica	22
2.1.6. Efeito da Radiação	22
2.1.7. Efeito de Temperatura	23
2.2. PROJETO DE SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS	24
2.2.1. Tipos de Sistemas Fotovoltaicos	26
2.2.1.1. Sistema Fotovoltaico Autônomo (OFF- GRID)	27
2.2.1.2. Sistema Solar Fotovoltaico Conectado à Rede (ON-GRID)	27
2.2.1.3. Sistema híbrido	29
2.3. EQUIPAMENTOS USADOS EM PROJETOS DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	29
2.3.1. Painel Fotovoltaico	30
2.3.2. Inversores	32
2.3.3. Baterias	32
2.3.4. Controladores de carga	33
2.4. MATLAB TM	33
3. DIMENSIONAMENTO DO SFV	35
3.1. ESTUDO DE CASO	35
3.2. NÍVEIS DE RADIAÇÃO SOLAR DA LOCALIDADE	36
3.3. ESPECIFICAÇÕES DOS PAINÉIS	37
3.4. QUADRO DE GERAÇÃO INSTALADA	39
3.5. DIMENSIONAMENTO DE BATERIAS	40
3.6. DIMENSIONAMENTO DO INVERSOR	40
3.7. DEMONSTRAÇÃO DO CONSUMO X GERAÇÃO	42
3.8. PROTEÇÃO	44
3.8.1. Controlador de carga	44
3.8.2. Dimensionamento da proteção AC (Disjuntores)	45
3.8.3. Dispositivo de Proteção contra Surtos (DPS)	46

3.9.	DIMENSIONAMENTO DE PROTEÇÃO CC (STRINGBOX)	47
3.10.	CABEAMENTO	47
3.10.1.	Cabeamento CC	47
3.10.2.	Cabeamento CA	48
4.	METODOLOGIA PARA O DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS FOTVOLTAICOS	49
4.1.	ALGORITMO PARA O DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS AUTÓNOMOS	49
4.1.1.	Apresentação da configuração do sistema autônomo	50
4.2.	ALGORITMO PARA SISTEMA INTERLIGADO A REDE	51
4.2.1.	Apresentação da configuração do sistema ligado a rede	51
5.	DIMENSIONAMENTO FOLTOVOLTAICO NA PLATAFORMA DO MATLAB™	53
6.	RESULDOS E DISCUSSÕES	54
7.	CONCLUSÃO	56
	REFERENCIAS	57
	ANEXO A – PROGRAMAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO FOTVOLTAICO	60

1. INTRODUÇÃO

A utilização de energia elétrica já faz parte da vida do ser humano há muitas décadas, e o crescimento populacional associado ao desenvolvimento tecnológico provoca aumento da demanda energética em todo o mundo. As três fontes de energia elétrica mais utilizadas atualmente são de origem fóssil, petróleo, carvão mineral e gás natural, sendo os maiores responsáveis pela emissão de poluentes na atmosfera (ALBUQUERQUE et al., 2017; SILVA, 2013).

Além das questões ambientais, o grande problema da utilização de recursos energéticos de origem fóssil e carvão mineral é que são fontes não renováveis, fato que vem incentivando investimentos no desenvolvimento de técnicas de exploração de energia renováveis, como a geração de energia eólica e solar.

No Brasil as fontes de geração de energia predominantes são hidrelétrica e térmica, no entanto, a energia eólica e solar vem crescendo bastante. Segundo dados publicados pela Superintendência de Comunicação e Relações Institucionais da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) a Central geradora de Energia Solar Fotovoltaica apresentou no segundo semestre de 2018 um crescimento de 700% em relação ao mesmo período de 2017 (ANEEL, 2018).

A geração de energia solar fotovoltaica consiste na utilização dos fótons da luz solar para colidirem com os átomos dos semicondutores das placas fotovoltaicas, provocando deslocamento dos elétrons, gerando assim corrente elétrica. Este tipo de energia é totalmente limpa, existe em abundância no Brasil, requer pouca manutenção e devido à grande procura vem tendo seus custos reduzidos. Uma das grandes vantagens desta tecnologia é a facilidade de instalação e uma modularidade que permite ser utilizada em aplicações de alta potência e baixa potência (Cintra et. al, 2018).

Buscando incentivar a utilização de energia solar para geração de eletricidade, o Laboratório Nacional de Energias Renováveis dos Estados Unidos da América (NREL) em parceria com Universidades desenvolveu o software SAM (*System Advisor Model*) para auxiliar na instalação de projetos de energia renováveis (SILVA & SOUZA, 2017). Com a repercussão deste

tema, diversos outros softwares foram desenvolvidos, mas muitas vezes se detendo ao dimensionamento do módulo fotovoltaico, e seu melhor posicionamento, limitando sua utilização (FERREIRA, 2014).

Tendo em vista a importância da implantação da energia fotovoltaica e de técnicas que auxiliem nos projetos de instalação de painéis fotovoltaicos, este trabalho propõe desenvolver um algoritmo utilizando o *software* MATLABTM que possa dimensionar o sistema e fornecer diretrizes para aquisição de equipamentos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O uso de recursos fósseis para geração de energia é prejudicial ao meio ambiente. Com a elevada emissão de gases para a atmosfera tem como consequência o aquecimento global. Caso a energia solar seja utilizada em substituição aos combustíveis fósseis, obtendo-se uma preservação e sustentabilidade visto que minimize a degradação ambiental.

As pesquisas e o desenvolvimentos científico, devem trilhar em busca do desenvolvimento sustentável. A utilização de recursos fósseis poluentes, em ambiente renováveis, explicados por uma possível maior eficiência energética ou redução de custos, deve ser julgada com uma abordagem que tende a direcionar os esforços para a solução que melhor atenda às privações da humanidade e da natureza (SHAYANI, 2006).

Em meados de 1960 por conta da corrida espacial deu-se início o uso de energia solar, considerada desde então o sistema mais barato e adequado para os longos períodos de permanência no espaço. Já o segundo incentivo foi dado por empresas da área de telecomunicações, onde buscavam fontes de energia para sistemas isolados em localidades longínquas (OSIS, 2007).

2.1. A ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

O Sol detém uma das maiores fontes de energia limpa e inesgotável existente. Sendo esta energia indispensável para a existência de vida na Terra, estando responsável pela realização de processos químicos e biológicos. A energia proveniente do Sol também é essencial para o meio ambiente, podendo esta ser utilizada de diversas formas.

No cerne do Sol sucede um processo de fusão nuclear, onde dois núcleos de hidrogênio se fundem com um núcleo de hélio, radiando para o espaço uma enorme quantidade de energia. A energia derivada desta fusão é lançada para o espaço em forma de ondas eletromagnéticas. Sabendo-se que o Sol se encontra a aproximadamente 143 milhões de quilômetros da Terra, apenas uma pequena fração da energia irradiada estará disponível. Porém, a energia fornecida pelo Sol durante um quarto de hora é superior à energia utilizada, a nível mundial, por cerca de um ano (GREENPRO, 2004).

Segundo Zilles (2012) uma das vantagens da tecnologia fotovoltaicas são seus módulos e facilidade de instalação. A modularidade desta tecnologia torna-a ideal para a produção doméstica e permite que seja usada para aplicações de alta potência como também para aplicações de baixa potência.

2.1.1. Células Fotovoltaicas

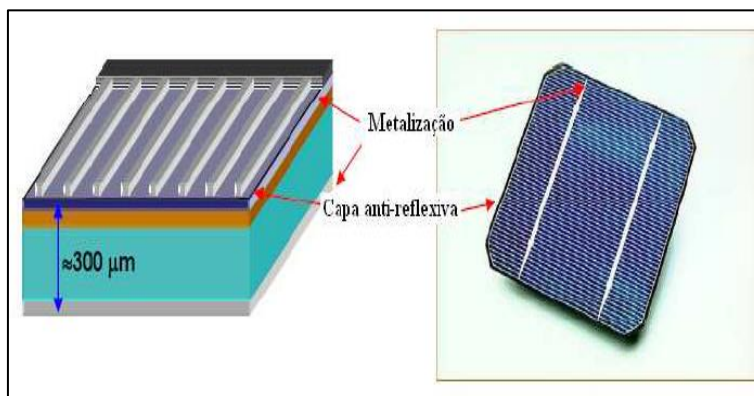
A transformação da energia solar em energia elétrica é realizada através do efeito fotovoltaico analisado por Edmond Becquerel em 1839. Observou - se uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura semicondutora, quando incidia uma luz sobre ela. Com as novas descobertas sobre as tecnologias da micro - eletrônica em 1956, deu-se o início a construção das primeiras células fotovoltaicas industriais.

Segundo Do Nascimento (2004) e uma célula fotovoltaica ocorre apenas um fluxo de elétrons em um circuito elétrico enquanto ocorrer incidência de raio solar sobre ele. Este fenômeno é chamado de “Efeito Fotovoltaico”.

Segundo Castro (2008), o Silício (Si) apresenta elétrons fracamente ligados a seus átomos, ocupando um estado energético chamado banda de valência, ao qual são adicionadas substâncias, ditas dopantes, de modo a criar um meio adequado ao estabelecimento do efeito fotovoltaico, isto é, à conversão direta da radiação solar em potência elétrica produzida em corrente contínua (C.C.). Para HEGEDUS (2003), quando uma fração de energia maior ou igual ao início, cujo valor é característico de cada semicondutor, é fornecido aos elétrons da banda de valência, estes se soltam dos átomos aos quais estavam ligados, passando para o estado de banda de condução. Nesta geração, os elétrons encontram-se livres para se deslocar pelo material e transportar energia elétrica para fora da célula por meio de coletores apropriados.

A técnica utilizada para criar o campo elétrico na junção é a fabricação de célula por meio da junção p-n, onde pode-se observar na Figura 1 duas placas de Si, ambas dopadas adequadamente. Geralmente usa-se o Fósforo e o Boro como dopantes.

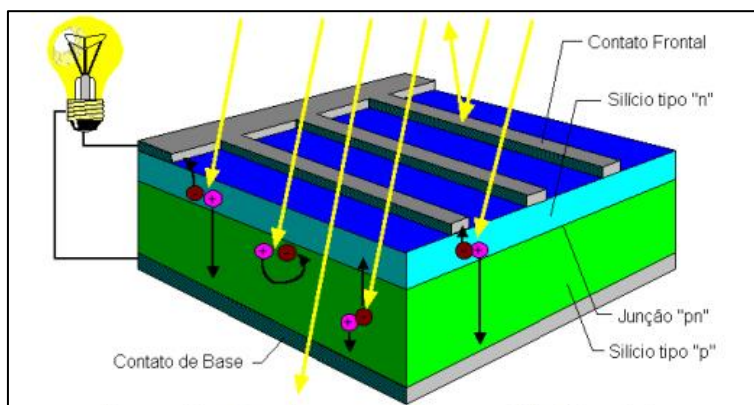
Figura 1: Esquema básico e foto de uma célula comercial



Fonte: Martín; Aguilera, 2005.

Sendo assim, quando o fóton contém energia suficiente, a ligação entre os elétrons é quebrada e estes movem-se para a banda de condução e são encaminhadas através do campo elétrico para a camada N e as lacunas criadas seguem para a camada P. Ao ligar os terminais da célula a um circuito exterior que se fecha através de uma carga, irá circular corrente elétrica. Se a célula não estiver ligada a nenhuma carga, é obtida a tensão em circuito aberto da célula solar conforme demonstrado na Figura 2 (CASTRO, 2008).

Figura 2: Princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica



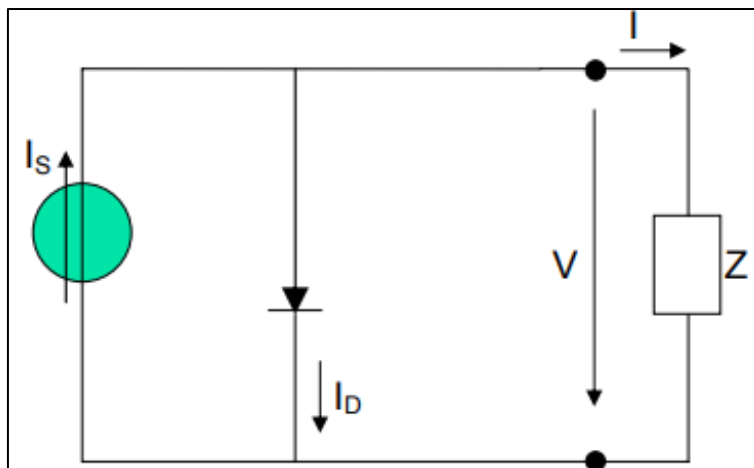
Fonte: CRESESB, 2003.

2.1.2. Modelo Matemático da Célula Fotovoltaico

Analisando detalhadamente o comportamento de um sistema de energia elétrica são necessários que sejam desenvolvidos modelos matemáticos para os componentes que fazem parte do sistema. Uma célula fotovoltaica pode ser

descrita através do circuito elétrico equivalente simplificado que representado pela Figura 3.

Figura 3: Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica alimentam por uma carga Z



Fonte: CASTRO, 2007.

A fonte de corrente (I_S) do inglês “*current source*” identificado no circuito acima, representa a corrente elétrica gerada pelo feixe de luz, constituídos por fótons, quando este atinge a superfície ativa da célula, gerando o efeito fotovoltaico (CASTRO, 2008).

A corrente I_D que bloqueia através do diodo está presente no modelo de cálculo da Equação 1:

$$I_D = I_o x \left(e^{\frac{V}{m \cdot V_t}} - 1 \right) \quad \text{Eq.(1)}$$

Onde:

I_o é a corrente inversa máxima de saturação do díodo;

V é a tensão dos terminais na célula;

m é o fator de idealidade do díodo (díodo ideal: $m = 1$; díodo real: $m > 1$);

V_T é designado por potencial térmico $V_T = \frac{kT}{q}$;

T é a temperatura absoluta da célula em K ($0^\circ\text{C} = 273,16^\circ\text{K}$);

q é a carga elétrica do elétron ($q = 1,6 \times 10^{-19}\text{C}$).

A corrente (I) que é reduzida pela carga está presente na Equação 2.

$$I = I_s - I_D = I_s - I_o x \left(e^{\frac{V}{m \cdot V_t}} - 1 \right) \quad \text{Eq.(2)}$$

2.1.3. Corrente de Curto-Circuito e Tensão em Circuito Aberto

Dois pontos de operação da célula merecem atenção particular:

No caso de curto-circuito, temos,

$$\begin{aligned} V &= 0 \\ I_D &= 0 \\ I &= I_s = I_{cc} \end{aligned} \quad \text{Eq.(3)}$$

A corrente de curto-circuito I_{cc} é o valor máximo da corrente gerada por efeito fotovoltaico. O seu valor é uma característica da célula, geralmente esse dado é fornecido pelo fabricante para determinadas condições de radiação incidente e temperatura.

No caso de circuito aberto, temos,

$$\begin{aligned} I &= 0 \\ V_{oc} &= m \times V_t \times \ln \left(\frac{I_s}{I_o} + 1 \right) \end{aligned} \quad \text{Eq.(4)}$$

A tensão em vazio é o valor máximo da tensão aos terminais da célula.

As condições nominais do teste *Standard Test Conditional* (STC), normalizadas para a realização das medidas dos parâmetros característicos da célula, designadas condições de referência são:

Radiação Incidente: $H_r = 1000 \text{ W/m}^2$

Temperatura: $25^\circ (298.16^\circ \text{ K})$

Para explicar as grandezas descritas anteriormente, é exemplificado a seguir a característica de corrente (I) e tensão (V) para uma célula fotovoltaica de silício cristalino de $10 \times 10 \text{ cm}^2$, com as seguintes condições experimentais na Tabela 1 (CASTRO, 2008):

Tabela 1: Condições experimentais

	H (W / m²)	A (m²)	Θ (°C)	I _{cc} (A)	V _{ca} (V)
Teste	430	0.01	25	1.28	0.56

Fonte: CASTRO, 2008).

A corrente inversa máxima de saturação do diodo foi calculada em condições de curto-circuito e de circuito aberto. Partindo da equação 5 e tendo em conta a Equação 6, encontra-se:

$$V_{ca} = m \times V_t \times \ln\left(\frac{I_s}{I_o} + 1\right) \quad \text{Eq.(5)}$$

$$I = I_s = I_{cc} \quad \text{Eq.(6)}$$

Onde,

$$I_o = 4.4 \times 10^{-10} \text{ A}$$

$m = 1$ (levando em consideração diodo ideal);

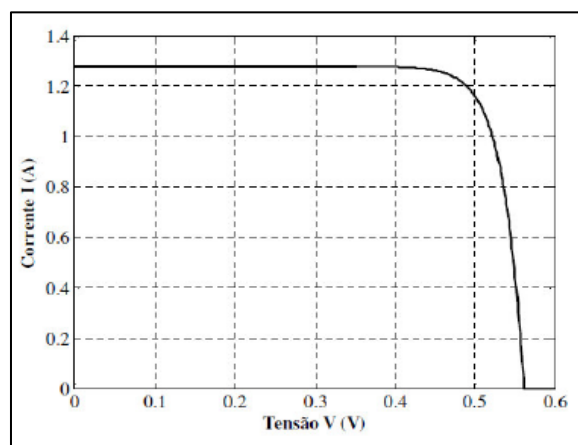
Analisando a Equação 7 a corrente que é bloqueada pela carga é dada a equação 8 por:

$$I = I_s - I_D = I_s - I_o \times \left(e^{\frac{V}{m \times V_t}} - 1 \right) \quad \text{Eq.(7)}$$

$$I = 1,28 - 4.4 \times 10^{-10} \times \left(e^{\frac{V}{m \times V_t}} - 1 \right) \text{ A} \quad \text{Eq.(8)}$$

A Figura 4, represente graficamente as características das correntes e tensões de uma célula fotovoltaica para as condições de referência.

Figura 4: Curva I-V de uma célula solar fotovoltaica



Fonte: E-LEE, 2003.

Pode-se analisar a representação gráfica da curva I-V como característica fundamental de um módulo fotovoltaico, pois é a partir desta que será possível obter os principais parâmetros que determinam sua qualidade e desempenho

2.1.4. Fator de Forma e Rendimento

O Fator de Forma (FF) demonstra a aproximação da representação da curva I-V a um retângulo. Quanto maior for a qualidade da célula, mais próxima da forma retangular será a curva I-V, qualificando as células. O FF é calculado pela Equação 9.

$$FF = \frac{I_{PPM} \times V_{PPM}}{I_{CC} \times V_{OC}} \quad \text{Eq.(9)}$$

O FF tem um valor menor que uma unidade, sendo comum para a célula de Silício entre 0,7 e 0,8.

O rendimento (η) é a relação entre o ponto de potência máxima de uma célula e a potência da radiação solar incidente sobre a célula, demonstrado na Equação 10.

$$\eta = \frac{P_{max}}{A \times G} \quad \text{Eq.(10)}$$

Sendo:

A é a área da célula;

G é a radiação solar que incide na unidade de superfície.

2.1.5. Potência Elétrica

Em um módulo fotovoltaico a potência eléctrica de saída (P) é o produto entre a tensão e a corrente de saída dado pela Equação 11.

$$P = VI = V \left[I_{CC} - \left(I_0 \times \left(e^{\frac{V}{m \cdot V_t}} - 1 \right) \right) \right] \quad \text{Eq.(11)}$$

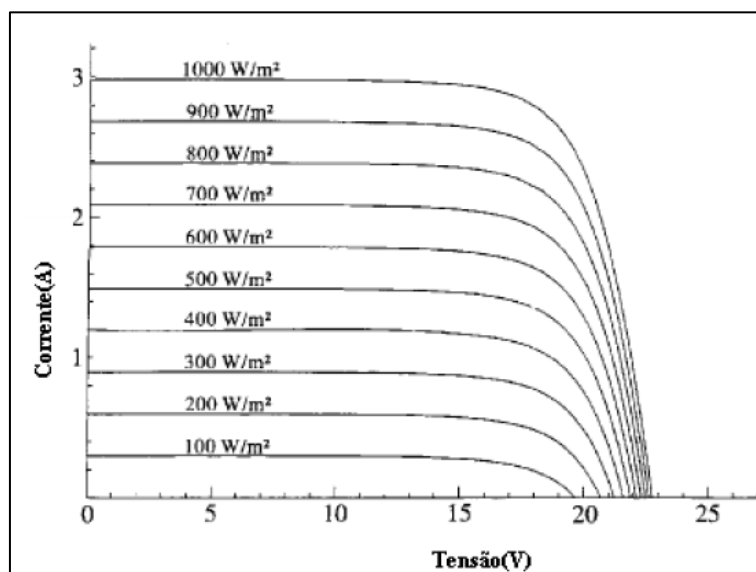
O ponto de potência máxima é calculado através da Equação 12.

$$P_{max} = V_{max} \times I_{max} \quad \text{Eq.(12)}$$

2.1.6. Efeito da Radiação

Pode-se observar na Figura 5, que a potência de saída aumenta com a intensidade da radiação incidente. A corrente de curto-circuito aumenta de forma aproximadamente linear com o aumento da radiação que incide, no mesmo instante que o valor de tensão do circuito aberto irá sofrer pouca alteração com a variação da radiação.

Figura 5: Efeito causado pela variação de intensidade da luz



Fonte: E-LEE, 2003.

2.1.7. Efeito de Temperatura

A temperatura é um parâmetro importante uma vez que exposto as células aos raios solares, ocorrerá certo grau de aquecimento a ser levado em consideração. Também há uma parte da incidência solar absorvida que não é convertida em energia elétrica, porém dissipada sob a forma de calor. Razão esta do por que a temperatura de uma célula é sempre superior à temperatura do meio ambiente (E-LEE, 2003).

Para encontrar a temperatura da célula, a partir da temperatura ambiente, pode utilizar-se a Equação 13:

$$T_c = T_a + \frac{NOCT - 20}{80} \times (219 + 823 \times Kt) \quad [^{\circ}C] \quad \text{Eq.(13)}$$

Cujo,

T_c é a temperatura da célula medido em $^{\circ}C$;

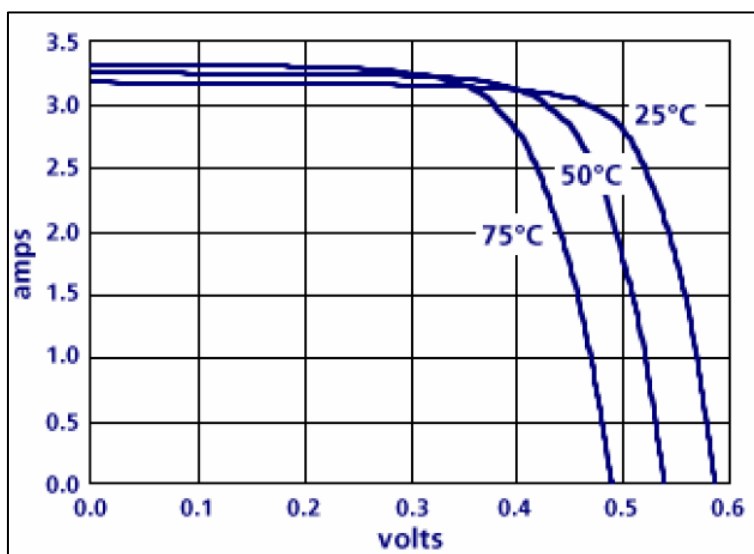
T_a é a temperatura do ambiente medido em $^{\circ}C$;

Kt é o índice de claridade;

$NOCT$ é a temperatura nominal de funcionamento da célula.

Pode-se observar que a potência de saída decresce com o aumento de temperatura, assim como a tensão do circuito aberto decresce com a temperatura. Verifica-se que há uma variação mínima na corrente de curto circuito com a temperatura.

Figura 6: Variação da curva I-V com a temperatura



Fonte: CREST.

2.2. PROJETO DE SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS

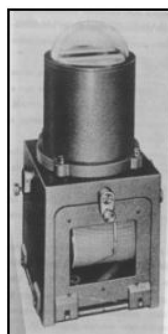
Para sistemas que utilizam painéis fotovoltaicos é essencial saber a quantidade de luz solar que incide numa determinada localização e durante quanto tempo. Logo existe a necessidade de medi-la através de aparelhos apropriados como Piranómetro visto na Figura 7, equipamento para medir a radiação global. O Actanógrafo que mede e registra a radiação global vista na Figura 8, o Heliógrafo que mede e regista o número de horas de insolação vista na Figura 9 e o Piroheliómetro visto na Figura 10 e Figura 11, onde se mede a radiação direta normal.

Figura 7: Piranômetro - modelo SP-214



Fonte: Apogee Instruments.

Figura 8: Acnógrafo



Fonte: CRESESB, 2003

Figura 9: Heliógrafo



Fonte: CRESESB, 2003

Figura 10: Pireliômetros de Incidência Normal



Fonte: CRESESB, 2003.

Figura 11: Pireliômetros de Cavidade Absoluta



Fonte: CRESESB, 2003.

Também há a necessidade em acoplar as células fotovoltaicas nos painéis, o qual são elaboradas à base de silício (material semicondutor) monocristalino, policristalino e amorfo. Há também células de disseleneto de cobre-índio (CuInSe_2) e telureto de cádmio (CdTe). A eficiência do sistema fotovoltaico irá depender da fração de energia solar que atingirá a célula, como também do material do qual é feita (CRESESB, 2003).

A Tabela 2 mostra a eficiência das células fotovoltaicas nos distintos materiais de fabricação.

Tabela 2: Eficiência das células fotovoltaicas nos distintos materiais de fabricação

Material	Eficiência de Módulos
----------	-----------------------

	Laboratório	Comercial
Silício Monocristalino	24%	15%
Silício policristalino	18%	14%
Silício amorfo	10%	7%
Telureto de cádmio (CdTe)	16%	7%
Disseleneto de cobre-índio (CuInSe2)	18%	11%

Fonte: Aldabó, 2002.

2.2.1. Tipos de Sistemas Fotovoltaicos

Existem diversos componentes que constituem o sistema solar fotovoltaico. Esses são escolhidos de acordo com a categoria de sistema fotovoltaico o qual se destaca em média potência (SolarBuzz, 2018).

Pode-se analisar a eletrificação no meio rural, onde os sistemas fotovoltaicos são utilizados para o abastecimento de cargas domésticas em locais sem rede, bombeamento de água para irrigação, abastecimento de energia em locais de difícil acesso ou sem rede.

A produção descentralizada também se encaixa para na categoria, onde o sistema fotovoltaico é utilizado como fonte de produção, entregando à rede totalmente ou parte desta energia produzida.

Segundo Reis et al. (2005) os sistemas fotovoltaicos, isolados ou também conhecido como sistema autônomos (OFF-GRID) e ou em associação com outras fontes de energia renováveis são competitivas para a alimentação de locais remotos, onde as soluções alternativas convencionais (gerador a diesel ou rede elétrica) apresentam inconvenientes ambientais consideráveis e são inferiores do ponto de vista econômico. Para Iqbal (1983) o caso do sistema fotovoltaico ligado à rede elétrica (ON-GRID) convencional, a perspectiva muda completamente em relação à economia. Neste caso o SV está distante de ser competitivo, mesmo quando comparados a outras fontes de energia renováveis.

Os sistemas fotovoltaicos podem ser explorados de três formas distintas:

- Sistemas ligados à rede (ON-GRID);
- Sistemas Fotovoltaicos isolados ou autônomos (OFF-GRID);

- Sistemas híbridos.

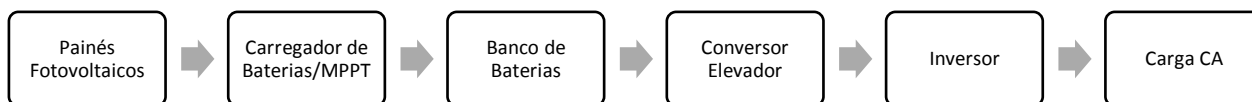
Os modos de operação dos sistemas fotovoltaicos são apresentados nas subseções a seguir.

2.2.1.1. Sistema Fotovoltaico Autônomo (OFF- GRID)

Segundo WU et al. (1999) os sistemas fotovoltaicos autônomos ou isolados podem ser classificados de duas formas: Sistema em Série ou sistema em Paralelo, os quais diferenciam pela forma com que o sistema de armazenamento é empregado.

Para um sistema em série conforme a demonstrado na Figura 12, o banco de baterias é colocado em série com o fluxo de energia. O carregador de bateria tem a função de ajustar a tensão para carga das baterias, além disso, procura o ponto de máxima potência dos módulos fotovoltaicos. O conversor elevador aumenta a tensão do banco de baterias para o nível necessário para a entrada do inversor, de acordo com a tensão de corrente alternada (C.A.) desejada na saída do sistema.

Figura 12: Diagrama de blocos de um sistema fotovoltaico isolado em série



Fonte: Autoria Própria, 2019.

2.2.1.2. Sistema Solar Fotovoltaico Conectado à Rede (ON-GRID)

Os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica (SFVCR) aplica-se em ambientes urbanos como geradores de energia elétrica para consumo. São de fácil integração à prédios e edifícios, não necessitando de área adicional, visto que são normalmente instalados sobre a cobertura da edificação. Tendo alta confiabilidade, operam de forma limpa e silenciosa (URBANETZ JUNIOR e CASAGRANDE JUNIOR, 2012).

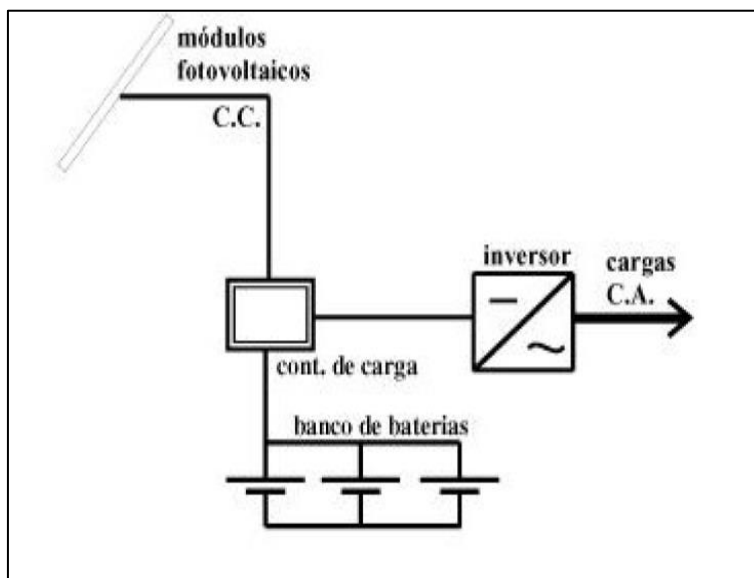
Para este sistema alimenta-se um conjunto de cargas sem a presença da rede elétrica. Sendo assim, dimensionando o painel com base na radiação

disponível no mês com menor radiação solar. Em conjunto com o painel solar o sistema inclui também:

- Controlador de carga;
- Inversor.
- Stringbox

Existem sistemas autônomos que não necessitam de armazenamento. Exemplo disso pode ser a irrigação onde toda a água bombeada é diretamente consumida ou colocada em reservatórios. Quando as bombas são alimentadas em CA torna-se necessário um inversor. Dependendo do tipo de carga à alimentar os sistemas fotovoltaicos autônomos podem assumir uma ou mais configurações possíveis. De modo geral, observando a Figura 13, os elementos básicos deste tipo de sistema são os módulos fotovoltaicos, bateria, controlador de carga e inversor de corrente elétrica, onde a energia elétrica gerada pelos módulos fotovoltaicos fica armazenada em baterias. Sendo que para os módulos fotovoltaicos e a bateria, é inserido um controlador de carga e há também o inversor CC-CA que converte a energia gerada pelo módulo, no caso uma CA para CC, por exemplo 12 V para 110/220V.

Figura 13: Diagrama esquemático de sistema fotovoltaico autônomo



Fonte: Varella et al, 2009.

2.2.1.3. Sistema híbrido

Para Barbosa et al. (2004) a geração de energia fotovoltaica dos sistemas híbridos é utilizada para alimentar cargas em conjunto com outras fontes de energias renováveis, como por exemplo energia eólica ou sistemas convencionais como o gerador a diesel. Este modo de operação se configura como autônomo.

Dentre as fontes energéticas utilizadas pelos sistemas híbridos, as que mais se sobressaem são a solar e a eólica, ambas de caráter renovável.

Segundo Rosas et al (2003), os sistemas de geração eólica quando trabalham em conjunto com o sistema fotovoltaico, diesel ou hídricos, podem ou não ser usados como armazenamento de energia. Normalmente estes sistemas são utilizados em pequenas redes isoladas. É dimensionada entre 10 kW a 200kW de acordo com a especificidade do sistema utilizado, tendo em vista que para esse sistema há um elevado custo.

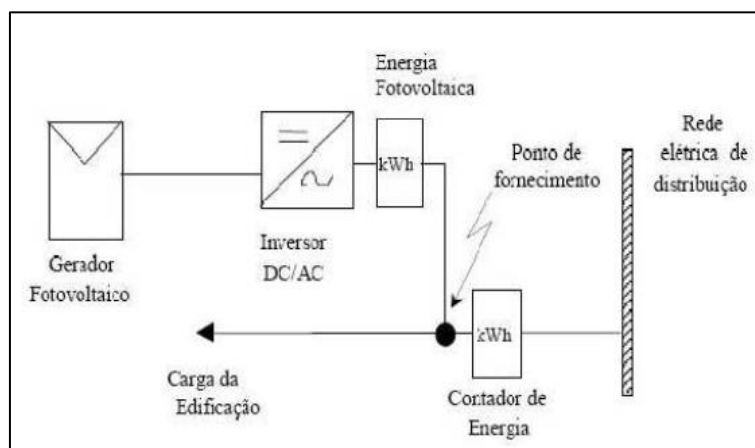
2.3. EQUIPAMENTOS USADOS EM PROJETOS DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

O sistema fotovoltaico (SFV) é a denominação utilizada para um conjunto de elementos necessários para a conversão direta da energia solar em energia elétrica. Tomando como características para alimentação adequada de aparelhos eletrônicos.

Para um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica pública são utilizados basicamente um painel fotovoltaico, inversor e componentes de proteção (chaves, fusíveis, disjuntores e etc.).

Este sistema onde o inversor detecta a presença da rede elétrica, irá converter a tensão continua vinda do painel solar em tensão alternada, com o mesmo padrão de frequência e fase da rede elétrica conectada, conforme demonstrado na Figura 14 (LAMBERTS et al. 2010).

Figura 14: Diagrama esquemático de um SFV conectado à rede



Fonte: LAMBERTS, 2010.

Em sistemas fotovoltaicos autônomos, podem haver situações cujo a geração de energia produzida não coincidam com a consumida ao longo do dia. Tal qual para esta situação o uso das baterias são de fundamental importância, onde possuam tempo de vida útil para longas condições de carga e descarga diária, baterias estas conhecidas como de alta capacidade de carga. Outras características importantes são uma elevada eficiência de carga, mesmo com baixas correntes de cargas e baixa razão de auto - descarga.

Essas baterias armazenam energia, por tanto são capazes de transformar a energia elétrica em energia potencial química, tão logo, converter diretamente a energia potencial em energia elétrica. Para cada bateria existe uma composição, onde o conjunto de células eletroquímicas são ligadas em série de modo a obter uma tensão elétrica desejada (ROSEMBACK, 2004).

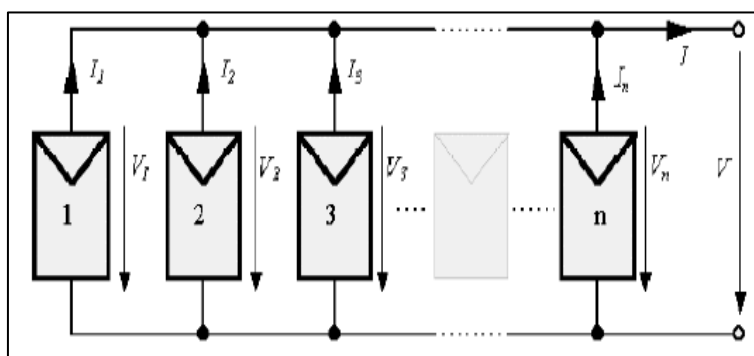
2.3.1. Painel Fotovoltaico

Os módulos fotovoltaicos são agrupados em paralelo ou série. Essa unidade de geração de energia proveniente da incidência do sol nos painéis, geram corrente elétrica ao deslocar os elétrons (GREENPRO, 2004).

Ao conectar as células em paralelo, soma-se as correntes de cada módulo e a tensão do módulo é exatamente a tensão da célula. A corrente produzida pelo efeito fotovoltaico é contínua. Pelas características típicas das células, este arranjo não é utilizado salvo em condições muito especiais.

Conforme a Figura 15, a ligação em paralelo é feita unindo o polo positivo de uma célula como polo positivo de outra, igualmente com o polo negativo de ambas. Essa associação não é comum para produção de energia elétrica devido a baixa tensão gerada. (CRESESB, 2003).

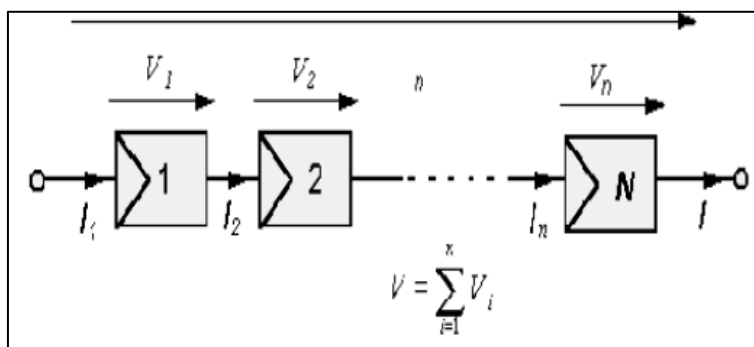
Figura 15: Associação em paralelo das células solares



Fonte: CRESESB, 2003.

Segundo CARNEIRO (2010) os módulos fotovoltaicos ligados em série constituem aquilo que normalmente se designa por fileiras, este tipo de associação tem como característica a soma das tensões de cada célula e sua corrente elétrica permanece inalterado. Sua interligação permite obter a tensão de 12 V ou mais dependendo do número de células, permitindo o armazenamento de baterias. É importante realçar que na associação de módulos fotovoltaicos devem ser utilizados módulos do mesmo tipo, de forma a minimizar as perdas de potência no sistema. A Figura 16 representa o esquema de associação em série de n módulos fotovoltaicos.

Figura 16: Associação em série das células solares



Fonte: CRESESB, 2003.

2.3.2. Inversores

Inversores de frequência são utilizados para produzir tensões alternadas em diversas aplicações, tais como fontes ininterruptas de energia (UPS's), acionamento de motores e filtros ativos. Assim, várias topologias de inversores têm sido desenvolvidas tanto para aplicações monofásicas quanto trifásicas. Diversas estratégias de modulação, diferentes em conceito e desempenho, têm sido desenvolvidas nas últimas décadas para a modulação destes inversores de tensão, conforme Holtz (1992).

2.3.3. Baterias

As baterias são uma forma de armazenamento de energia, logo são capazes de transformar energia elétrica em energia potencial química e posteriormente converter, diretamente, a energia potencial química em elétrica. A composição de cada bateria detém um conjunto de células eletroquímicas ligadas em série de modo a alcançar a tensão elétrica desejada (ROSEMBACK, 2004).

Para uma configuração de baterias em um sistema fotovoltaico, sua principal característica é o armazenamento de energia, o qual deve-se funcionar continuamente em ciclos de carga e descarga, de intensidade e duração que varia em função da descontínua geração de energia e das várias formas de consumo (COPETTI, 2007)

Em um estudo realizado por Trigos (2004) sobre a demanda de sistemas domiciliares de instalações nacionais verificou-se que o consumo médio mensal pode variar desde 0,24 kWh/mês até 4,8kWh/mês, dependendo do tipo de família, das cargas e do uso das mesmas. O consumo diário se concentrava mais no período da noite. Este estudo registrou um consumo não é linear, nem constante ao longo do tempo, sendo de relevância as diferentes características de cada família e região.

2.3.4. Controladores de carga

Segundo Guimarães (2004) os controladores de carga são dispositivos eletrônicos que controlam o fluxo de potência entre os painéis fotovoltaicos, baterias e a carga.

Os controladores devem desconectar o arranjo de painéis fotovoltaicos quando a bateria atinge carga máxima, interrompendo o fornecimento de energia para a carga da bateria não atingir um limite crítico, determinado pelo fabricante.

Existem basicamente dois tipos de controladores de carga: série e paralelo (shunt) (OLIVEIRA, 2005).

As duas configurações shunt ou série tem suas peculiaridades o qual controlam a forma de desconectar os painéis fotovoltaicos da bateria (GUIMARÃES, 2004).

2.4. MATLAB™

Segundo Chapra (2013) o MATLAB™ vem de *Matrix Laboratory* é um software que fornece ao usuário um ambiente com diversos modelos de cálculo, além de conter ferramentas para implementação de métodos numéricos, provendo de acesso amigável ao tratamento de vetores e matrizes.

O software MATLAB™ combina um ambiente de *desktop* para análise iterativa e processos além de um design com uma linguagem de programação que expressa matemática e matriz diretamente.

As Toolboxes são desenvolvidos por profissionais, onde são rigorosamente testados e totalmente documentados.

Seus aplicativos permitem ser vistos diferentes algoritmos que funcionem com seus dados.

Tendo a capacidade de obter os resultados desejados o MATLAB™ irá gerar automaticamente uma rotina para reproduzir ou automatizar o seu projeto.

O dimensionamento de suas análises em termos de capacidade de escala são executadas em *clusters*, unidade de processamento gráfico (GPUs) e nuvens através de pequenas alterações no código, seu dinamismo de

aprendizado em relação a programação faz com que não seja necessário reescrever uma gama grande de código e técnicas fora da memória (Palm III, et. Al. , 2013).

3. DIMENSIONAMENTO DO SFV

Segundo Venable (1983) o projeto de um sistema fotovoltaico necessita de informações das características meteorológicas no local onde o sistema será instalado e também o consumo das cargas a alimentar, sendo esses fatores primordiais para um dimensionamento do sistema adequado e eficiente. Assim como dos demais componentes do sistema, é importante conhecer, além das condições de radiação do local onde o sistema será implantado e das características da carga, outros parâmetros importantes. Faz-se necessário saber quais serão os níveis de tensão em que o sistema operará e além disso, quais serão as perdas estimadas dos componentes do sistema fotovoltaico.

Às informações meteorológicas, podem ser obtidas por meio de um banco de dados de potencial solar através do centro de referência para energia solar e eólica. São utilizadas as taxas médias de insolação da cidade de Natal no Rio Grande do Norte, pois é a localidade com registro solarimétrico (CRESESB,2003).

Pode ser utilizar também para fins de análise de irradiação o *Software* Radiasol, o qual foi utilizado no projeto de dimensionamento de uma loja na cidade de Natal, conforme informado no tópicos a seguir.

O consumo de energia diária esperada será definida considerando um sistema fotovoltaico autônomo de média potência elétrica, destinada a um loja de alimentos de uma renda mediana. De acordo com o caso de estudo definido serão dimensionados todos os componentes do sistema, visando obter um bom casamento entre a energia fornecida pelo sol e a demanda esperada de energia, requerimento necessário de qualquer projeto fotovoltaico (IMHOFF, 2007).

3.1. ESTUDO DE CASO

A Tabela 3 apresenta o histórico de consumo mensal durante o período de um ano em uma loja na cidade de Natal – RN.

Tabela 3: Histórico de consumo

Mês/ano	Consumo (kwh/mês)
Jan/17	6902
Fev/17	6086
Mar/17	6057
Abr/17	6590
Mai/16	7614
Jun/16	7539
Jul/16	7124
Ago/16	6848
Set/16	6598
Out/16	6659
Nov/16	6582
Dez/16	7420

Fonte: Autoria Própria, 2019.

3.2. NÍVEIS DE RADIAÇÃO SOLAR DA LOCALIDADE

Conforme foi analisado anteriormente, sobre o consumo mensal da loja de alimentos e da potência gerada, outro dado indispensável para um projeto eficaz de um sistema fotovoltaico são os índices de incidência de radiação solar na localidade onde o sistema será implantado.

Utilizando-se o *Software* Radiasol, atribuindo-se 22° ao ângulo azimutal, e 10° como inclinação dos módulos e valores de longitude e latitude do local de instalação do sistema, foi determinado a irradiação média diária por m² conforme a Tabela 4 a seguir.

Tabela 4: Irradiação inclinada diária média local

Mês	Irradiação (kwh/m²/dia)
Janeiro	5,38
Fevereiro	5,43
Março	4,34
Abril	5,28
Maio	5,4
Junho	4,65
Julho	5
Agosto	5,83
Setembro	5,92
Outubro	6,19
Novembro	6,09
Dezembro	5,74

Fonte: Autoria Própria, 2019.

3.3. ESPECIFICAÇÕES DOS PAINÉIS

Através dos dados da irradiação média, foi encontrada a quantidade de energia que seja gerada pelos módulos na unidade. O módulo utilizado foi o painel fotovoltaico CANADIAN 270 – CS6K-270 P, informada na Tabela 5.

Tabela 5: Características do Painel Fotovoltaico

Máxima potência (Pm)	270 Watts
Voltagem de máxima potencia (Vm)	30,8 V
Corrente de máxima potência (Im)	8,75 A
Voltagem de circ. Aberto (VoC)	37,9 Volts
Corrente de Curto-Circuito (Isc)	9,32 A
Voltagem máxima do sistema	1000 V
Eficiência do módulo	16,6%
Área do módulo	1,63 m²
Número de células	60
Tipo	Silício Policristalino

Fonte: Autoria Própria, 2019.

Observa-se que a energia gerada durante o ano pelos módulos fotovoltaicos foi determinada pelo seguinte modelo de cálculo presente na Eq.14:

$$G = A \times \eta_{\text{painel}} \times H_{\text{plano_inclinado}} \times n \times \eta_{\text{sist}} \times Nm \quad \text{Eq.(14)}$$

Cujo,

Nm é o número de painéis

G é a geração mensal (kW/mês)

A é a área útil dos módulos fotovoltaicos (m^2)

η_{painel} é a eficiência dos painéis (%)

$H_{\text{plano_inclinado}}$ é a irradiação média no plano inclinado.

n é o número de dias no mês

η_{sist} é o rendimento do sistema (%)

Neste projeto, utilizou-se uma eficiência do sistema de 80 %. A fim de equilibrar consumo e geração, onde a rede local é de 220/110V. Serão utilizados no projeto 176 módulos fotovoltaicos, com isto, os painéis possuirão uma potência total de 47520Wp. A Tabela 6 ilustra a energia que será gerada mensalmente pelos 176 módulos a serem instalados.

Tabela 6: Energia Gerada no Mês

Mês	Irradiação (kwh/m ² /dia)	Área do módulo(m ²)	Quant. de Painéis	Número de dias	Eficiência do módulo	Eficiência do sistema	Energia gerada (kwh/mês)
Janeiro	5,38	1,6	176	31	16,47%	80%	35,97
Fevereiro	5,43	1,6	176	28	16,47%	80%	32,79
Março	4,34	1,6	176	31	16,47%	80%	29,02
Abril	5,28	1,6	176	30	16,47%	80%	34,16
Mai	5,4	1,6	176	31	16,47%	80%	36,10
Junho	4,65	1,6	176	30	16,47%	80%	30,09
Julho	5	1,6	176	31	16,47%	80%	33,43
Agosto	5,83	1,6	176	31	16,47%	80%	38,98
Setembro	5,92	1,6	176	30	16,47%	80%	38,30
Outubro	6,19	1,6	176	31	16,47%	80%	41,38
Novembro	6,09	1,6	176	30	16,47%	80%	39,40
Dezembro	5,74	1,6	176	31	16,47%	80%	38,38

Fonte: Autoria Própria, 2019.

3.4. QUADRO DE GERAÇÃO INSTALADA

Os módulos serão associados em 22 conjuntos em série visto na Equação 15 de tal forma que a tensão e corrente de saída estejam de acordo com a tensão e corrente de entrada dos inversores. A tensão e corrente de saída dos módulos em condições de operação 30,8 V e 8,75A respectivamente.

$$N^{\circ} \text{ total de módulos} = \frac{P_{pp}}{\text{Máxima potência do módulo}(P_m)} \quad \text{Eq.(15)}$$

Onde:

P_{pp} é a potência de pico do módulo tal que P_{pp} encontra-se na Equação 16 a seguir.

$$P_{pp} = \eta \times \frac{E}{G} \quad \text{Eq.(16)}$$

Em que:

P_{pp} é a potência de pico do painel em Wp;

E é a energia consumida diariamente em Wh;

G é o número de horas de sol verificadas no pior mês tendo em conta o ângulo de orientação e inclinação do painel;

η é o rendimento total do sistema expresso em valor percentual (0.6 para 60%) descrito na Equação 17.

$$\eta = \eta_{PV} - \eta_{PV-Bat} \times \eta_{cc} \times \eta_{dist} \times \eta_{inv} \quad \text{Eq.(17)}$$

Onde:

η é o rendimento total do sistema;

η_{PV} é o rendimento do painel tendo em conta que não está a funcionar no ponto de potência máxima (80% do valor típico);

η_{PV-Bat} representa as perdas devido à queda de tensão nos cabos que ligam o painel à bateria, tomando valores de 2%, logo o rendimento é de 98%;

η_{cc} é o rendimento do controlador de carga, na ordem dos 98%;

η_{dist} representa as perdas nos cabos de distribuição na ordem dos 2%, sendo o rendimento de 98%;

η_{inv} é o rendimento do inversor, na ordem de 90%.

3.5. DIMENSIONAMENTO DE BATERIAS

A bateria deve ser dimensionada para armazenar a energia consumida diariamente e mais alguns dias de reserva. Desta forma o sistema pode fornecer energia em dias em que a radiação solar é escassa, como por exemplo em dias nublados, compensar as perdas do sistema e assegurar que a carga da bateria não excede o nível de profundidade de descarga máximo permitido.

A capacidade da bateria pode ser calculada através da seguinte Equação 18 a seguir:

$$Q (Ah) = \frac{E \times A}{V \times T \times \eta_{inv} \times \eta_{cabo}} \quad \text{Eq.(18)}$$

Em que:

Q é a capacidade mínima da bateria em Ah;

E é a energia média diária consumida em Wh;

A é o número de dias de autonomia;

V é a tensão do sistema;

T é o limite máximo permitido da profundidade de carga da bateria (0.3);

η_{inv} é o rendimento do inversor ($\eta_{inv} = 0.70$);

η_{cabo} é o rendimento dos cabos de distribuição calculado com base nas perdas ($\eta_{cabo} = 0.97$).

Para Solenerg (2007) quanto maior a profundidade da descarga, menor a vida útil para a bateria. O valor normalmente adotado para baterias estacionárias apropriadas para sistemas fotovoltaicos é 0,6.

3.6. DIMENSIONAMENTO DO INVERSOR

A faixa de tensão de operação do MPPT do inversor é de 320Vcc a 800Vcc, e a corrente de curto circuito por arranjo é de 204,38 A. Serão

empregados quatro inversores do tipo MPPT da Fronius, modelo Symo 15.0-3-M, vista na Tabela 7, demonstrado seu modelo de cálculo na Equação 19, os quais terão duas strings cada. Em cada string será inserida uma string contendo 22 módulos em série. A tensão da string será então o produto da corrente máxima do painel com o número de painéis em série totalizando 677,6V e a corrente total 8,75A. Dessa forma, a tensão e corrente de entrada no inversor serão de 678V e 17,5A, respectivamente, sendo informado na Tabela 8.

Os módulos serão posicionados com um deslocamento de 10° que corresponde a inclinação do telhado, e azimute 22°.

$$N^{\circ} \text{ de inversores} = \frac{P_{(w)}}{P_{inv}} \quad \text{Eq.(19)}$$

Cujo:

N° de inversores é o número total de inversores necessários para a instalação;

$P_{(w)}$ é valor de potência consumida pelas cargas CA em W;

P_{inv} valor da potência do inversor escolhido.

O dimensionamento do sistema deve obedecer a corrente nominal de tal modo que o regulador de carga e bateria estejam dimensionados com mais de 30% da corrente máxima do painel fotovoltaico. A potência de saída do sistema deve ser dimensionada para a máxima carga CA.

Tabela 7: Especificações Técnicas do Inversor

Fabricante	Fronius
Modelo	Symo 15.0-3-M
PARAMETROS DE ENTRADA	
Tensão Máxima De Entrada	1000 Vcc
Faixa De Voltagem Do MPP	320 Vcc a 800 Vcc
Tensão Mínima De Entrada	200 Vcc
Corrente Máxima De Entrada	33A/27 ^a
PARAMETROS DE SAÍDA	
Potência Nominal De Saída	15000W
Tensão De Saída(Faixa)	154 Vca a 264 Vca
Frequência De Saída	60 Hz

Corrente Máxima De Saída	23,9 A
--------------------------	--------

Fonte: Autoria Própria, 2019.

Tabela 8: Geração instalada

	Inversor 1		Inversor 2		Inversor 3		Inversor 4	
	Stringb ox1	Stringb ox2	Stringb ox3	Stringb ox4	Stringb ox5	Stringb ox6	Stringb ox7	Stringb ox8
Painéis	22	22	22	22	22	22	22	22
Tensão do arranjo (V)	677,6	677,6	677,6	677,6	677,6	677,6	677,6	677,6
Correntedo arranjo (A)	8,75	8,75	8,75	8,75	8,75	8,75	8,75	8,75
Pot. Instal. (Kw)	5929	5929	5929	5929	5929	5929	5929	5929
Total	47520							

Fonte: Autoria própria, 2019.

3.7. DEMONSTRAÇÃO DO CONSUMO X GERAÇÃO

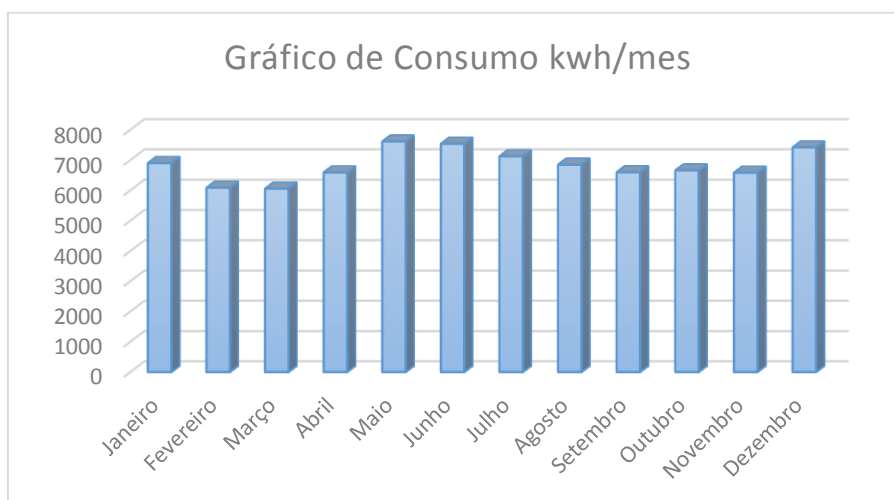
Para estimar a geração, foi utilizado o método da irradiação que foi calculado a partir dos dados de radiação obtidos no software Radasol 2, informando o local, a inclinação do telhado e o azimute. Como serão usados os dois lados do telhado, o indicado seria fazer o cálculo para a metade dos painéis com um azimute e para outra metade outro azimute, mas como a diferença de radiação é insignificante, foi utilizado apenas um para simplificação dos cálculos. Na Tabela 9 mostra as configurações de energia gerada em cada mês, na Figura 17 mostra os valores estimados em cada mês do demonstrativo do consumo de demanda do cliente e na Figura 18 informa a demanda da geração de energia, onde observa-se uma breve comparação de consumo e geração.

Tabela 9: Energia Gerada no Mês

Mês	Irradiação (kwh/m ² /dia)	Área do módulo (m ²)	Quant. de Painés	Número de dias	Eficiência do módulo	Eficiência do sistema	Energia gerada (kwh/mês)
Janeiro	5,38	1.6	176	31	16,47%	80%	35,97
Fevereiro	5,43	1.6	176	28	16,47%	80%	32,79
Março	4,34	1.6	176	31	16,47%	80%	29,02
Abril	5,28	1.6	176	30	16,47%	80%	34,16
Maio	5,4	1.6	176	31	16,47%	80%	36,10
Junho	4,65	1.6	176	30	16,47%	80%	30,09
Julho	5	1.6	176	31	16,47%	80%	33,43
Agosto	5,83	1.6	176	31	16,47%	80%	38,98
Setembro	5,92	1.6	176	30	16,47%	80%	38,30
Outubro	6,19	1.6	176	31	16,47%	80%	41,38
Novembro	6,09	1.6	176	30	16,47%	80%	39,40
Dezembro	5,74	1.6	176	31	16,47%	80%	38,38

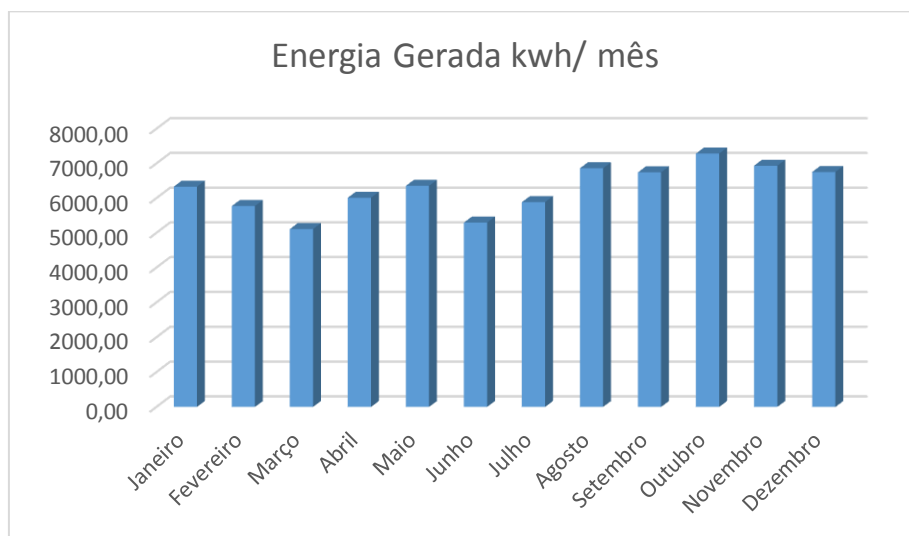
Fonte: Autoria própria, 2019

Figura 17: Consumo anual de demanda de cliente



Fonte: Autoria próprio, 2019.

Figura 18: Demanda da Geração de Energia



Fonte: Autoria próprio, 2019

3.8. PROTEÇÃO

3.8.1. Controlador de carga

Após a realização do dimensionamento do painel fotovoltaico e das baterias, será feito o dimensionamento do controlador de carga. Este controlador tem a função de proteger as baterias de sobrecargas e descargas acima do limite dela suportado.

Em situações que ocorra descargas excessivas provocado por um aumento de radiação, o controlador irá sobredimensionar na ordem de 25% em relação a corrente de curto-circuito do painel fotovoltaico, calcula-se a corrente de curto circuito visto na Equação 20 onde a equação baseia-se no módulo fotovoltaico, seguida da corrente mínima do controlador de carga, conforme a Equação 21 apresentada.

$$I_{\text{mín}} \text{ do controlador de carga} = 1.25 \times I_{\text{cc}} \text{ do painel fotovoltaico} \quad \text{Eq.(20)}$$

$$I_{\text{cc total}} = I_{\text{mín}} \text{ do cont. de carga} \times \text{Núm. de módulos} \quad \text{Eq.(21)}$$

Desta forma podemos encontrar o número de controladores de carga, configurado para o sistema adotado de acordo com a equação 22, onde a

razão da corrente de curto total do controlador de carga e a corrente nominal de entrada e saída do controlador seja no mínimo 20% superior à corrente de curto circuito (I_{sc}) produzida pelo painel.

$$\text{Número de controladores} = I_{cc_{total}} / I_{sc} \text{ do painel fotovoltaico} \quad \text{Eq.(22)}$$

3.8.2. Dimensionamento da proteção AC (Disjuntores)

A instalação do disjuntor será feita após o ponto de conexão e antes dos Inversores. Sendo 23,9 A a corrente de saída máxima dos inversores, o disjuntor escolhido foi de 200 A para suportar a soma das correntes de saída dos quatro inversores, somando 95,6 A e um disjuntor de 30 A depois de cada inversor presente na Equação 23, o qual a potência gerada total consumida no dia é dividida pelo sistema adotado na rede elétrica local. As Tabelas 10 e 11 mostram as especificações dos disjuntores utilizados.

$$I = \frac{P}{U} \quad \text{Eq.(23)}$$

Tabela 10: Especificação do Disjuntor AC de 200A

	AC
Fabricante	Schneider
Modelo	EZ9F33391
Tensão de Operação nominal	230-400V
Corrente nominal adotada	200A
Capacidade de interrupção	400Vca
Curva de disparo	C
Número de polos	Tripolar

Fonte: Autoria próprio, 2019

Tabela 11: Especificação do Disjuntor AC de 30A

	AC
Fabricante	Lorenzetti
Modelo	DLBE-3030
Tensão de operação nominal	220/380V
Corrente nominal adotada	5kA
Capacidade de interrupção	380Vca
Curva de disparo	C
Número de polos	Tripolar

Fonte: Autoria próprio, 2019

3.8.3. Dispositivo de Proteção contra Surtos (DPS)

O DPS é um dispositivo de proteção para evitar a queima de componentes elétricos por surtos de tensão provenientes da atmosfera. Ao presente projeto ir-se-á utilizar um Dispositivo de Proteção contra Surtos (DPS) nos condutores fase e neutro da rede AC ligadas aos inversores para a proteção dos componentes do sistema fotovoltaico. Será utilizada um DPS para cada fase do inversor, ou seja 12 DPS, sendo assim, o foi adotado o DPS classe II 250V $I_n = 20kA$, $I_{máx} = 100kA$. As especificações do DPS adotado está Tabela 12 e o diagrama com as devidas conexões do DPS ligadas a disjuntores específicos do sistema.

Tabela 12: Especificação do DPS

	AC
Fabricante	Finder
Modelo	7P.23.9.700.1020
Corrente de descarga máxima	100 kA
Tensão nominal	250 V
Tipo	II
Número de pólos	3

Fonte: Autoria próprio, 2019

3.9. DIMENSIONAMENTO DE PROTEÇÃO CC (STRINGBOX)

A stringbox escolhida foi uma do tipo ABB 1SL0605A00, que permite a conexão de 1 string na entrada e possui 1 saída para conexão ao inversor. Uma vez que cada stringbox será conectada a uma string de módulos, serão utilizadas 8 stringbox no total. Além disso, o modelo inclui um DPS, dois fusíveis CC para isolar e proteger o String, caixa com grau de proteção IP65 e chave seccionadora CC. Na Tabela 13 encontra-se as especificações da stringbox para compor o sistema.

Tabela 13: Especificação da Stringbox

	CC
Fabricante	PHB Eletrônica
Modelo	StringBox PHB
Tensão cc máxima dps	1000Vcc
Corrente máxima dps	40kA
Corrente nominal fusíveis	10 A
Tensão máxima fusíveis	1000Vcc
Corrente de op. chave seccionadora	15 A
Tensão máxima chave seccionadora	1000Vcc

Fonte: Autoria próprio, 2019

3.10. CABEAMENTO

3.10.1. Cabeamento CC

Para a estimativa da bitola do cabeamento foi utilizado a fórmula da Equação 24 a seguir:

$$S(mm^2) = \rho \times \frac{d(m) \times I(A)}{\Delta V(V)} \quad \text{Eq.(24)}$$

Onde:

ρ – Resistividade do material do condutor, ρ do cobre = 0,01724 $\Omega \cdot mm^2/m$;

d – Distância total do condutor, considerando o trecho de retorno (ida e volta);

I – Corrente que passa pelo condutor;

ΔV – Queda de tensão tolerada no cabeamento para o trecho analisado;

Através dos cálculos a seguir foram dimensionados o cabeamento, para cada arranjo: 2% a 4%

22 painéis x 0,992 m = 21,824m

Distância entre painéis: 21 x 0,03m = 0,63m

Distância entre arranjo e inversor, com folga: 8m x 2 cabos = 16m

Total = 21,824 + 0,63 + 16 = 38,454m $\approx$ 39m

Com isso, calculou-se a bitola do cabo

$$S(mm^2) = 0,01724 \times \frac{39 \times 8,75}{97} = 6,065$$

Como a estimativa de cabos entre os painéis e o inversor foi feita com bastante folga, a uma pequena diferença do valor e devido à disponibilidade do mercado, serão utilizados cabos de 6mm².

Ao todo serão utilizados 312m de cabos até os inversores, por serem 8 arranjos.

3.10.2. Cabeamento CA

Como são 4 inversores e cada um tem corrente máxima 23,9, o cabeamento deve suportar uma corrente de 95,6A. Segundo a Tabela 31 da NBR5410/1997, como o cabeamento é embutido na parede (B1), deverão ser utilizados cabos de 35mm². Para o aterramento, também segundo à NBR5410/1997, deverá ser utilizado um cabo de 16mm².

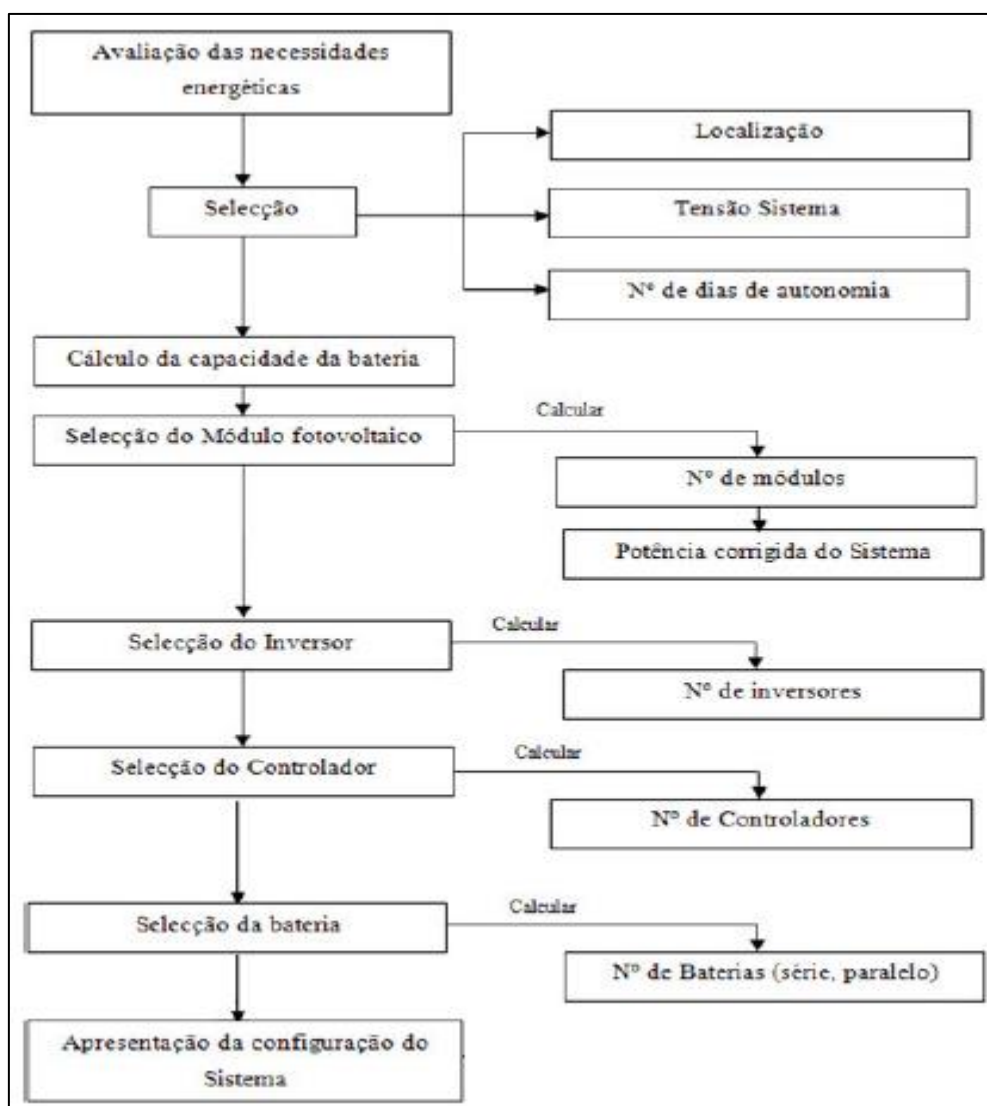
Contando com o terra, saem 4 cabos de cada inversor que percorrerão aproximadamente 20m cada totalizando 320m de cabo.

4. METODOLOGIA PARA O DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

4.1. ALGORITMO PARA O DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS AUTÓNOMOS

O algoritmo implementado para efetuar o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos autónomos presente no Anexo A segue a metodologia descrita no capítulo 3 e é esquematizado através do fluxograma apresentado na Figura 19.

Figura 19: Organograma do algoritmo para sistema autónomo



Fonte: Adaptado de Freitas, 2008.

4.1.1. Apresentação da configuração do sistema autônomo

A apresentação da configuração do sistema está representada tabela 14, onde é feita uma descrição das características do inversor e os módulos selecionados, baterias e dados iniciais durante o procedimento de dimensionamento, bem como das respectivas quantidades.

Tabela 14: Dados para o sistema autônomo

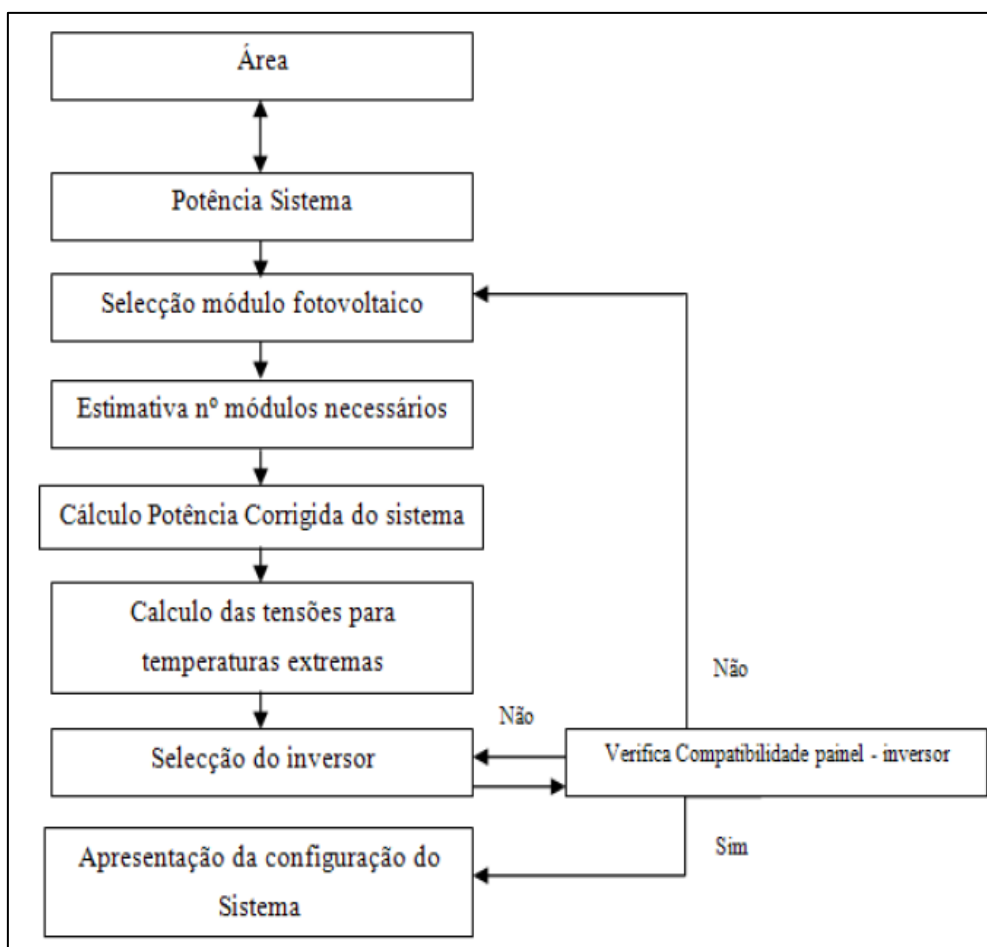
Consumo Total (dia): 9586 W	Consumo
Localização: Natal - RN	
inclinação: 22°	Dados iniciais
Nº de dias de autonomia: 5	
Tensão do sistema: 110 V / 220V	
Fabricante: Canadian	Módulo(s)
Modelo: CS6K-270 P	
Potência: 270 W	
Nº total de módulos necessários: 103	
Potência conjunto fotovoltaico: 27810 W	
	Inversores
Fabricante: Fronius	
Modelo: Symo 15.0-3-M	
Potência: 15000 W	
Nº de inversores: 1	
	Controlador(es) de carga
Fabricante: Sunenergy	
Modelo: Esmart 3	
Tensão nominal: 12 V	Baterias
Nº de controladores de carga: 8	
Fabricante: Freedom	
Modelo: DF4100	
Capacidade: 240Ah	
Nº de baterias: 54	Baterias
Capacidade total das baterias: 140 Ah	
Nível de Tensão: 12 Vcc	

Fonte: Autoria própria

4.2. ALGORITMO PARA SISTEMA INTERLIGADO A REDE

O algoritmo implementado para efetuar a metodologia do dimensionamento de sistemas fotovoltaicos do Anexo A ligado a rede está descrita no capítulo 3 e é esquematizado através do fluxograma apresentado na Figura 20.

Figura 20: Organograma de um sistema ligado à rede



Fonte: Adaptado de Freitas, 2008

4.2.1. Apresentação da configuração do sistema ligado a rede

A apresentação da configuração do sistema está representada tabela 15, onde é feita uma descrição das características do inversor e os módulos seleccionados durante o procedimento de dimensionamento, bem como das respectivas quantidades.

Tabela 15: Dados para o sistema ligado à rede

Potência: 3510W	Dados iniciais
Área: 30 m²	
Fabricante: Canadian	Módulo(s)
Modelo: CS6K-270 P	
Potência de pico do módulo: 270 wp	
Nº total de módulos necessários:103	
Potência conjunta fotovoltaica:	
Voc (a 10°C): 37,9 V	
Tensão de pico (Vmpp) : 30,8 V	
Corrente de pico(Impp): 8.75 A	
Voltagem máxima do sistema: 1000 V	Inversor
Fabricante: Fronius	
Modelo: Symo 15.0-3-M	
Potência: 15000 W	
Nº de inversores: 1	Stringbox
Strings: 4	

Fonte: Autoria própria

5. DIMENSIONAMENTO FOTOVOLTAICO NA PLATAFORMA DO MATLAB™

Para avaliar o desempenho de um sistema fotovoltaico por meio de simulações, primeiramente é necessário determinar o comportamento do painel fotovoltaico em termos de geração de energia elétrica para o sistema. Seguido da importância de escolher o modo de como o sistema irá operar, para que sejam colocados todos os componentes necessários para tal aplicação, como baterias, inversores, controladores de tensão, etc.

Os modos de operação do sistema fotovoltaico adotados para realização deste trabalho foram: sistemas isolados e interligados a rede de distribuição de energia elétrica presente no anexo A. Na configuração para sistemas isolados o qual é o mais comumente utilizado para o suprimento de energia elétrica em comunidades isoladas, onde localizam-se instalações de linha de distribuição é técnica e economicamente inviável. Logo após implementou-se o segundo modo de operação fotovoltaica para uma rede de distribuição de energia elétrica como forma de analisar os impactos do sistema fotovoltaico neste modo, onde observou-se um crescimento exponencial nas redes ao longo desses anos e principalmente no Brasil. (IEA, 2010).

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os objetivos específicos relacionados as funções do *software* foram atingidas. Analisou-se todos os parâmetros de um dimensionamento fotovoltaico voltados para redes autônomas ou ligadas a rede, seguida da implantação dos métodos de dimensionamento no MATLABTM para cada etapa utilizada, onde cálculos e análises de dados são regidos pela NBR 5410:2004.

O MATLABTM é um software interativo de alta performance voltado para o cálculo numérico. O MATLABTM integra análise numérica, cálculo com matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos em ambiente fácil de usar onde problemas e soluções são expressos somente como eles são escritos matematicamente com inúmeras aplicações em várias áreas da ciência. Também usufrui de ferramentas de suma importância para um estudo de dimensionamento fotovoltaico, voltado para engenharia elétrica e implementado neste projeto.

O projeto teve como início à análise local da região pré-disposta para estudo, averiguando índices de irradiação solar pelo Atlas Brasileiro de Energia Solar, seguido do sistema configurado para o cliente, se configurado para sistema autônomo ou ligado à rede. Foram definidos 5 dias de autonomia para bateria na etapa seguinte, devidamente dimensionado para o número de baterias presente no projeto. Para terceira etapa, são selecionados os módulos fotovoltaicos, onde o dimensionamento do número de módulos fotovoltaicos definiu 103 painéis para o projeto com potência de 270 W cada.

Em sua quarta etapa do projeto foi implantado o uso do inversor de 15Kw e uma potência consumida pelas cargas de 9586,11 W, definindo o uso de um inversor para o projeto.

Na quinta etapa do projeto o sistema de proteção é devidamente dimensionado para uso de controladores de carga, com uma corrente de curto-circuito (I_{sc}) total de 160 A, dimensionando para um total de 8 controladores.

Na sexta etapa do projeto dimensionou-se o número de baterias, utilizando uma bateria estacionária com a capacidade de 240 Ah e nível de tensão de 12 Vcc. Tal qual encontrou-se uma capacidade total para 5 dias de autonomia de 10240 KA, dando um total de 54 baterias para suprir o consumo gerada.

Em seguida dimensiona-se o disjuntor para proteção na rede de 43 A, porém no valor comercial, adotou-se um de 45 A para 220 V e 90 A para 110 V.

Para o DPS, utilizou-se para máxima tensão de operação contínua, um mesmo de 600 V, o qual se encaixa para os sistemas de 110 V e 220 V.

Em caso de um sistema ligado a rede entra no projeto a stringbox, o qual para o presente projeto foi configurado com 4 stringbox, com um total de 13 painéis por controlador de carga, é instalado um inversor. Em seguida é inserido os valores da tensão e corrente de arranjo, de 400.4 v 8.75 A para obter a potência de arranjo da string box de 3503 Kw.

E o dimensionamento dos cabos para finalizar o projeto de dimensionamento fotovoltaico. Adotou-se os critérios de queda de tensão e o método da ampacidade dos circuitos vistos, utilizando-se das tabelas que regem a NBR 5410:2004, para dois condutores, sendo pra o circuito ligado dos painéis para os controladores de carga é instalado condutores com bitola de 4 mm², já do controlador para o inversor, uma bitola de 10 mm² e do inversor para o sistema de proteção, uma bitola de 6 mm².

É importante observar também, que os dados apresentados no dimensionamento, não são refinados para o usuário. Informação importante para ser implementado, onde o usuário não tenha que trabalhar os valores exatos fornecidos pelo sistema. Mas que o sistema de os valores adequados para o usuário.

7. CONCLUSÃO

A aplicação do dimensionamento fotovoltaico, com a intenção de desenvolver nesse projeto foi, principalmente, facilitar e aplicar a teoria aprendida em sala de aula em relação a projetos de sistemas solares fotovoltaicos. Além de inserir exemplos de equações vistas em sala de aula, possibilitar a consulta de fornecedores de equipamentos para a instalação do sistema também, e a consulta dos dados técnicos.

O campo de pesquisa da Energia solar fotovoltaica tem a crescido exponencialmente e seu mercado está numa curva ascendente. O MATLABTM representa em um meio acadêmico, através de uma ferramenta poderosa para o setor onde foi desenvolvido um algoritmo para efetuar o dimensionamento de um sistema fotovoltaico autônomo e ligado a rede o qual o dimensionamento é relativamente complexo. Esse *software* pode ainda utilizar o GUIDE, ferramenta para implementação de uma interface gráfica do MATLABTM, tendo assim um ambiente mais interativo entre o usuário e o sistema. Assim como agregar um banco de dados para utilizar informações como irradiação solar em qualquer local do mundo, um banco de equipamentos, seja de painéis, baterias, inversores ou até mesmo tipos de conectores, interligados a sites de fabricantes ou vendedores. Esta pode ser uma forma mais próxima em um meio acadêmico de se aproximar das exigências do mercado de trabalho.

O programa desenvolvido é uma versão preliminar que deverá ser aperfeiçoada e complementada. Além de servir de apoio para futuras pesquisas e estudo.

REFERENCIAS

ALBUQUERQUE, T. C.; MALDONADO, M. U.; VAZ, C. R.. Um levantamento da produção intelectual sobre energia solar fotovoltaica. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 6, n. 5, p. 915-939, 2017.

ALDABÓ, Ricardo. **Energia Solar**. 1 ed. São Paulo: Artliber Editora, 2002. p. 25-108.

ANEEL, **Informações gerenciais, 2018**. Disponível em:

<<http://www.aneel.gov.br/informacoes-gerenciais>>. Acesso em: 28 out. 2018.

Apogee instruments. Disponível em: <<https://www.apogeeinstruments.com/sp-214-ss-amplified-4-20-milliamper-pyranometer/>>. Acessado em novembro 2018

BARBOSA, Claudomiro Fábio de Oliveira et al. **Situação da geração elétrica através de sistemas híbridos no estado do Pará e perspectivas frente à universalização da energia elétrica**. Proceedings of the 5th Encontro de Energia no Meio Rural, 2004.

CARNEIRO, Joaquim AO. **Módulos fotovoltaicos: Características e associações**. Monografia, 2010.

CASTRO, Rui MG. Introdução à Energia Eólica: Energias Renováveis e Produção Descentralizada. **Universidade Técnica De Lisboa**, 2008.

CINTRA, A. B. G.; CRISTIANO, C.; FERREIRA, L. C.; LOURENÇO, R. A.; AMARANTE, M. S.. Energia solar fotovoltaica. **Encontro Científico da Universidade Braz Cubas**, v, 4, n. 1. Mogi das Cruzes, SP. 2018, p. 153-161

COPETTI, Jacqueline Biancon; MACAGNAN, Mario Henrique. **Baterias em sistemas solares fotovoltaicos**. In: I CBENS-I Congresso Brasileiro de Energia Solar. sn, 2007. p. 29.

CRESESB. **Energia. Princípios e Aplicações**. CRESESB. 2003, Rio de Janeiro: CEPEL, 2003. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf> Acessado em novembro de 2018.

CREST - United States Department of Energy, **Center for Renewable Energy and Sustainable Technology**, Aurora educational. Disponível em: <http://thecrestproject.com/>. Acessado em novembro de 2018.

DO NASCIMENTO, Cássio Araújo. Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica. **Diss. Universidade Federal de Lavras**, 2004.

Estudos diversos da empresa SolarBuzz. Disponível em: www.solarbuzz.com. Acessado em novembro 2018.

FERREIRA, L. A. **Desenvolvimento de software orientado à objetos para dimensionamento de sistemas solares fotovoltaicos**. 2014, Monografia: Departamento de Ciências Ambientais e Tecnológicas, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró-RN

FREITAS, Susana Sofia Alves. **Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos**. 2008. Tese de Doutorado. Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior de Tecnologia e de Gestão.

GREENPRO, **Altener Programa Comunitário. Energia Fotovoltaica-Manual sobre tecnologias, projecto e instalação**. Europa: Comissão Europeia, p. 43, 2004.

GREENPRO: **Manual sobre tecnologias, projeto e instalação**. Energia Solar Térmica e Energia Fotovoltaica. Disponível em: <http://www.greenpro>. Acessado em 04 novembro de 2017.

GUIMARÃES, A. P. C. et al. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Edouro Gráfica e Editora SA Edição Especial, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.

HEGEDUS, Steven S.; LUQUE, Antonio. Status, trends, challenges and the bright future of solar electricity from photovoltaics. **Handbook of photovoltaic science and engineering**, p. 1-43, 2003.

HOLTZ, J.; KRAH, J. O. **Adaptive optimal pulse-width modulation for the line-side converter of electric locomotives**. IEEE transactions on power electronics, v. 7, n. 1, p. 205-211, 1992.

IEA - International energy agency . **Solar photovoltaic energy**. Technology Roadmap. 2010. Disponível em: <<https://webstore.iea.org/world-energy-investment>> Acessado em fevereiro de 2019.

IMHOFF, Johninon et al. **Desenvolvimento de conversores estáticos para sistemas fotovoltaicos autónomos**. 2007.

IQBAL, M. **An Introducton to Solar Radiation**, Academic Press, 1983.

LAMBERTS, Roberto et al. **Casa eficiente: consumo e geração de energia**. Florianópolis: UFSC/LABEE, v. 2, 2010.

MARTIN, E. Caamaño; AGUILERA, M. Ángel Egido. **Edifícios fotovoltaicos conectados a la red eléctrica: características y posibilidades energéticas**. I Master em Domótica, 2005.

OLIVEIRA, LUÍS GUILHERME M. **Estrategia de Controle de Carga de Descarga em Sistemas Fotovoltaicos Domiciliares**. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, 2005.

OSIS, L. R. **Alimentação de motores para refrigeração doméstica utilizando energia solar fotovoltaica**. 2007. 81f. Monografia (Especialização em Fontes Alternativas de Energia) - Departamento de Engenharia, Universidade de Lavras-MG, 2007.

PALM III, William J. **Introdução ao MATLAB para Engenheiros-3**. AMGH Editora, 2013.

REIS, Lineu Belico dos; FADIGAS, Eliane Aparecida Faria Amaral; CARVALHO, Cláudio Elias. Energia, recursos naturais e a prática do desenvolvimento sustentável. In: **Energia, recursos naturais e a prática do desenvolvimento sustentável**. 2005.

ROSEMBACK, Ricardo Henrique. **Conversor CC-CC bidirecional buck-boost atuando como controlador de carga de baterias em um sistema fotovoltaico**. vol. Master. Juiz de Fora-MG: UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA, 2004.

SHAYANI, Rafael Amaral; OLIVEIRA, MAG de; CAMARGO, IM de T. **Comparação do custo entre energia solar fotovoltaica e fontes convencionais**. In: Congresso Brasileiro de Planejamento Energético (V CBPE). Brasília. 2006.

SILVA, G. D. P.; SOUZA, M. J. R. Estimativa de geração de energia através de um sistema fotovoltaico: implicações para um sistema flutuante no lago bolonha, Belém-Pará. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 6, n. 2, p. 149-164, 2017.

SILVA, J. V. C. **Pré-dimensionamento de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica para a Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia**, campus de Itapetinga. 2013. Especialização em Formas alternativas de energia Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG.
Tools for Electrical engineering, e-learning - 2003. Disponível em: <http://e-lee.ist.utl.pt>. Acessado em novembro de 2018.

TRIGOSO, Federico Bernardino Morante. **Demanda de energia elétrica e desenvolvimento socioeconômico: o caso das comunidades rurais eletrificadas com sistemas fotovoltaicos**. Programa Intercomunidades de Pós Graduação em Energia. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

URBANETZ JUNIOR, J.; CASAGRANDE JUNIOR, E. F. **Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica do Escritório Verde da Universidade Tecnológica Federal do Paraná**. VIII CBPE: Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, 12 a 15 janeiro 2012. Disponível em: <<http://www.utfpr.edu.br>>. Acesso em 01 janeiro. 2019

VENABLE, H. Dean. **The K factor: A new mathematical tool for stability analysis and synthesis**. In: Proc. Powercon. 1983. p. H1-1.

WU, Tsai-Fu; CHANG, Chien-Hsuan; WU, Yong-Jing. Single-stage converters for PV lighting systems with MPPT and energy backup. **IEEE transactions on aerospace and electronic systems**, v. 35, n. 4, p. 1306-1317, 1999.

ZILLES, Roberto. **Energia solar fotovoltaica**. USP, São Paulo, 2012.

ANEXO A – PROGRAMAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO FOTOVOLTAICO

```
% AVALIAÇÃO DAS NECESSIDADES ENERGETICAS
clc;

IRm = 0;
SF = 0;
Vs = 0 ;
N_aut = 0;

% Escolha do sistema a ser instalado

SF = input('Digite "1" para sistema on grid ou digite "2" para
sistema off grid: ');

    if(SF == 1)

        SF1 = input ('Configurado para Sistema ON-Grid. Tecle Enter
para continuar...');

        elseif(SF == 2);

            SF2 = input ('Configurado para Sistema OFF-Grid. Tecle Enter
para continuar...','s');
            end;

%Localização

LC = input('Sua localidade fica em Natal(RN). Tecle Enter para
continuar...');

IRm = input('A irradiação média no local definido é: ','s');

IRm = 5.43

Vs = input('Digite 110 ou 220 para indicar a tensão: ');

%-----
% Número de dias de autonomia

N_Aut = input('O número de dias de Autonomia da Bateria será: ');

    N_Aut = 5

%-----
%SELEÇÃO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

%Número de módulos
NT_modulos = 0;

NT_modulos = input ('O número de módulos a serem instalados é: ');
```

```

Ppp = 0;
rts = 0.6;

%Energia gerada
G = 0;
A = 1.63;
N_sist = 0.8;
H_plinc = 5.43;
n_painel = 0.166;
n = 30;

    G = (A * n_painel * H_plinc * n * N_sist);

%A é a Área do módulo estabelecida pelo fabricante;
%n_painel é a eficiência do painel estabelecida pelo fabricante;
%H_plinc é a irradiação média no plano inclinado no valor de 5.43;
%N_sist é o rendimento do sistema que por padrão é 80% .

%Potência de pico do módulo
rts= 0.6;
G = 4.34;
E=200000;
    Ppp = rts * (E/ G);

%G é o número de horas de sol, verificadas no pior mês tendo em conta
o ângulo de orientação e inclinação do painel;
%E é a energia consumida diariamente em Wh;
%rts é o rendimento total do sistema expresso em valor percentual (0.6
para 60%) .

MPM = 270;

    NT_modulos = ceil (Ppp)/(MPM)

%MPM é a máxima potência do módulo definida pelo fabricante.

%-----
%SELEÇÃO DO INVERSOR

Num_inv = 0;
P_inv = 15000;
Pw = 9585.11;
Num_inv = input ('Número de inversores no projeto é : ');

Num_inv = ceil((Pw)/(P_inv))

%Pw é o valor de potência consumida pelas cargas CA em W 230k/24h=
9586,11;
%P_inv valor da potência do inversor definido pelo fabricante.

%-----
%PROTEÇÃO

%Seleção do controlador

N_CC = 0;

```

```

    N_CC = input ('Número de de controladores de carga para o sistema
será: ');

%Corrente de curto circuito total do controlador de carga

Icc_tcc = 160;

Icc_PF = 9.32;

%Corrente de curto circuito do P.F.

    I_mc = 1.25 * Icc_PF;

%Icc total de tds paineis

    Icc_total = I_mc * NT_modulos;

%Número de controladores

    N_CC = ceil (Icc_total/Icc_tcc)

%Icc_total é a corrente de curto total do controlador de carga;
%Icc_tcc = 20A pois o controlador de carga cuja corrente nominal de
entrada e saída seja no mínimo 20% superior à corrente Isc, produzida
pelo painel;
%I_mc é a corrente mínima do controlador de carga;
%Icc_PF é a corrente de curto circuito do P.F. definido pelo
fabricante do painel;
%N_CC Numero do controlador de carga.

%-----
if SF == 2
%SELEÇÃO DE BATERIA

%Número de baterias (série, paralelo)

Num_bat = 0;

%Carga da bateria disponível em Ah
    C_bat = (240*0.8);

%Capacidade da bateria

Cs_bat = (Pw)/12;
N_aut = 5;
KD = 0.6;
Kbat = 0.65;

    CBAT = input('A capacidade (Ah) da bateria é: ');

    CBAT = (Cs_bat *N_aut)/(KD*Kbat)

Num_bat = input ('O número de baterias para o sistema é de: ');

    Num_bat = ceil(CBAT/C_bat)

%0.8 é a descarga máxima adotada;

```

```
%KD (DOD) é a profundidade de descarga máxima, adotou-se 60%;
%Kbat é a eficiência da bateria;
%C_bat carga da bateria disponível em Ah;
%CBAT é a capacidade da bateria;
%Cs_bat é o consumo da bateria;
%Num_bat=Q/capacidade de uma bateria(definida pelo fab, ex: 200Ah);
```

```
end
```

```
%-----
%PROTEÇÃO
```

```
%Disjuntor AC de 43,56 A
```

```
Dj1 = input('O disjuntor para o sistema em A, será de: ');
```

```
Dj1 = Pw/Vs
```

```
%-----
%DPS F+N
```

```
DPS = input('DPS para o sist. em máxima tensão (V) de operação  
cotínua é: ');
```

```
DPS = 600
```

```
%DPS de 175VCA - 127v;
```

```
%DPS de 275VCA - 220v;
```

```
%DPS classe II(caso 1)- 8-20kA;
```

```
%DPS classe II(caso 2)- 40kA ou superior (periferias, prédios mais  
baixos);
```

```
%DPS classe II(caso 3)- 65kA ou superior (Zonas rurais);
```

```
%-----
if SF == 1
```

```
%STRINGBOX
```

```
Stbox = input ('O número de stringbox será de: ');
```

```
stbox = 4
```

```
P_F = input ('O total de módulos por controlador de carga será de:  
');
```

```
P_F = 13
```

```
Con_Car = input ('O número de controladores será de: ');
```

```
Con_car = 8
```

```
Inv = input ('O número de inverso para o sistema na Stringbox é: ');
```

```
Inv = 1
```

```
V_arranjo = input ('A tensão (V) de arranjo será de: ');
```

```
V_arranjo = 400.4
```

```
I_arranjo = input ('A corrente (I) de arranjo será de: ');
```

```
I_arranjo = 8.75
```

```
Pot_inst = input ('A potencia (Kw) instalada será de: ');
```

```
Pot_inst = 3.503
```

```

end
%-----
%CABEAMENTO

%Cálculo da bitola de cabos Painei/Controlador de carga
S_pi = 0;
p = 0.01724;
L = 12;
I_pi = 9.32;
QV = (30.8 * 0.04);
    Spi = input('A estimativa da bitola de cabeamento
Painei/Controlador é de: ');
    Spi = (p * (2 * L) * I_pi)/QV

%p é a resistividade do material do condutor, do cobre = 0,01724 ;
%d é a distância total do condutor, considerando o trecho de retorno
(ida e volta);
%I_pi - Corrente que passa pelo condutor;
%QV é a Queda de tensão tolerada no cabeamento para o trecho
analisado.

%Cálculo da bitola de cabos Cont. Carga/Inversor
S_cci = 0;
p = 0.01724;
L = 3;

    I_cci = (13 * 9.32);

    QV = (30.8 * 0.04);

    S_cci = input('A estimativa da bitola de cabeamento Cont. Carga/
Inversor é de: ');
    S_cci = (p * (2 * L) * I_cci) / QV

%Cálculo da bitola de cabos Inversor/ Sistema de proteção
S_isp = 0;
p = 0.01724;
L = 2;

    QV = (220 * 0.03);

    PT = (MPM * NT_modulos);

    I_isp = PT / Vs;

    S_isp = input('A estimativa da bitola de cabeamento Inversores/
Sist. de Proteção é de: ');
    S_isp = (p * (2 * L) * I_isp) / QV

%PT é a potência total gerada pelos painéis;
%MPM é a máxima potência do módulo definida pelo fabricante;

%Capacidade de condução de corrente (AMPACIDADE)

S_pi = input ('Valor da ampacidade (A) no eletroduto é de: ');
S_pi = 32*0.8

```

```

S_isp = input('O Condutor em mm² pela tabela 5410 do
Painel/Controlador é de: ');
S_isp = 4

S_cci = input ('Valor da ampacidade (A) no eletroduto é de: ');
S_cci = 57*0.8

S_cci = input('O Condutor em mm² pela tabela 5410 do Cont. Carga/
Inversor é de: ');
S_cci = 10

S_isp = input ('Valor da ampacidade (A) no eletroduto é de: ');
S_isp = 36.48

S_cci = input('O Condutor em mm² pela tabela 5410 do Inversores/ Sist.
de Proteção é de: ');
S_cci = 6
%-----
Fim = input ('Fim do dimensionamento');

%-----
%APRESENTAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA

```