



UFPA

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

**ESTUDO, LEVANTAMENTO E DIMENSIONAMENTO
DE UM SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO DE
GERAÇÃO DE ENERGIA UTILIZANDO OS
SOFTWARES HOMER E PVSIZENA NA ILHA NAZARÉ,
RIO MARACAPUCÚ, ABAETETUBA-PA.**

MARINALDO DE JESUS DOS SANTOS RODRIGUES

2º Semestre / 2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ABAETETUBA
ABAETETUBA-PA

Marinaldo de Jesus Dos Santos Rodrigues

ESTUDO, LEVANTAMENTO E DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO DE GERAÇÃO DE ENERGIA UTILIZANDO OS SOFTWARES HOMER E PVSIZO NA ILHA NAZARÉ, RIO MARACAPUCÚ, ABAETETUBA-PA.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Industrial da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Bispo do Vale

Abaetetuba - Pará

2014

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

R696e Rodrigues, Marinaldo de Jesus Santos.
ESTUDO, LEVANTAMENTO E DIMENSIONAMENTO DE
UM SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO DE GERAÇÃO DE
ENERGIA UTILIZANDO OS SOFTWARES HOMER E PVSIZE
NA ILHA NAZARÉ, RIO MARACAPUCÚ, ABAETETUBA-PA
/ Marinaldo de Jesus Santos Rodrigues. — 2014.
114 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Silvio Bispo do Vale
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
Federal do Pará, Campus Universitário de Abaetetuba, Curso de
Engenharia Industrial, Abaetetuba, 2014.

1. Energia solar. 2. Sistema fotovoltaico autônomo. 3.
Análise de custo. I. Título.

CDD 620.8

Marinaldo de Jesus dos Santos Rodrigues

ESTUDO, LEVANTAMENTO E DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO DE GERAÇÃO DE ENERGIA UTILIZANDO OS SOFTWARES HOMER E PVSIZENA NA ILHA NAZARÉ, RIO MARACAPUCÚ, ABAETETUBA-PA.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Industrial da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Industrial.



Prof. Dr. Silvio Bispo do Vale
ORIENTADOR



Prof.º Msc. Hallan Max Silva Souza

Prof. Msc. Hallan Max Silva Souza
MEMBRO DA BANCA EXAMINADORA



Prof.º Msc. Eliomar Azevedo do Carmo

Prof. Msc. Eliomar Azevedo do Carmo
MEMBRO DA BANCA EXAMINADORA

Abaetetuba, 13 de Junho 2014

Dedico este trabalho às pessoas mais importantes da minha vida: A meus pais, Manoel Rodrigues e Zuleide Rodrigues, a minha irmã Conceição Rodrigues, a minha sobrinha Rayane Ferreira, a minha namorada Tatiane Rodrigues, que confiaram na minha capacidade. Agradeço, por estarem sempre ao meu lado, me dando força, apoio, incentivo e principalmente pelo amor de vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar vida e tranquilidade nos momentos difíceis, sei que Ele sempre estará comigo indicando o caminho que devo seguir.

Agradeço a minha mãe por todo o sacrifício feito por ela, por ter suportado a minha ausência ao longo desses anos, pela ajuda incondicional e por me faz acreditar que sou capaz e por isso, exigir sempre o melhor de mim. Agradeço ao meu pai pela confiança, pelos incentivos e pela paciência comigo. Agradeço a meus avos por seu amor dedicado a mim, carinho e respeito e suas ajudas tão importantes. Agradeço a minha irmã pelo apoio, carinho amor e dedicação, a minha sobrinha pelo seu amor, a minha namorada que sempre esteve ao meu lado, agradeço pela sua paciência, compreensão e seu amor, obrigado.

Agradeço ao meu orientador, prof. Dr. Silvio Bispo do Vale, obrigado pelos ensinamentos, paciência e por acreditar no meu potencial e nunca me deixar desistir, ao Prof. Msc. Hallan Max, obrigado pelos ensinamentos e pelo exemplo como pessoa, por ceder ferramentas que foram fundamentais para o desenvolvimento desse trabalho. Ao Prof. Msc. Eliomar Azevedo do Carmo que sempre esteve disposto a me ajudar de alguma forma.

Aos professores: prof. Dr. Lamartine Vilar de Souza, Prof. Msc. Paulo Roberto Ribeiro Marques, obrigado pelos ensinamentos.

Agradeço aos meus amigos de classe que sempre estiveram nos momentos difíceis dessa caminhada, e a todas as pessoas que contribuíram de maneira direta ou indireta para a realização deste trabalho.

RESUMO

A utilização da energia solar fotovoltaica é uma alternativa em potencial para a geração de energia elétrica. Na zona rural pode-se utilizar essa tecnologia para reduzir o sofrimento dos moradores causados pela falta de eletricidade. Uma vez que as aplicações de energia solar fotovoltaica são bastante diversificadas, podendo ser utilizadas como fonte geradora em sistemas isolados ou conectados à rede. Neste trabalho realizou-se um levantamento em uma vila localizada na Ilha Nazaré, zona rural de Abaetetuba-PA, a fim de conhecer a carga instalada, perfil de carga e consumo de combustível do grupo gerador da vila e a partir desses dados dimensionar um sistema fotovoltaico autônomo.

Para obtenção dos dados da radiação utilizou-se o *software* Radiasol 2, tomando como base a cidade de Belém-PA.

Realizou-se os cálculos para o dimensionamento do sistema e após esta etapa foram realizadas duas simulações em dois *softwares* com o intuito de dar credibilidade ao estudo. Os programas utilizados foram o *Homer* e *PVSize*.

Comparou-se os dados obtidos pelos dois *softwares* com a intenção de verificar se os valores estavam correlacionados. Para concluir é apresentada uma análise de custo comparativa entre a geração de energia dos painéis fotovoltaicos e a geração do grupo gerador da vila.

Palavras-chave: Energia solar. Sistema fotovoltaico autônomo. Análise de custo.

ABSTRACT

The use of photovoltaic energy is a potential alternative for the generation of electricity. In rural areas can use this technology to reduce the suffering of residents caused by the lack of electricity. Since the applications of solar photovoltaic are quite diverse and can be used as a source in isolated or connected to the network systems. This paper conducted a survey of a village in Nazareth Island, rural Abaetetuba - PA in order to know the installed load, load and consumption of generator fuel profile of the village and from these data sizing a PV system autonomous. To obtain the data of radiation used the Radasol 2 software, based on the city of Belém - PA. We carried out the calculations for sizing the system and after this step two simulations were conducted in two software in order to lend credibility to the study. The program used were Homer and PVSize. We compared the data obtained by the two software's with the intention of checking whether values were correlated. To complete an analysis of comparative cost between the generation of energy from photovoltaic panels and the generation of the village generator is presented.

Keywords: Solar Energy. PV system no-grid. Cost analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1-Representação das camadas internas do Sol	2
Figura 1.2-Representação das componentes da radiação	5
Figura 1.3-Massa de ar para 0° e 60°	7
Figura 1.4-Representação da esfera celeste	8
Figura 1.5-Variação da declinação solar	8
Figura 1.6-Ângulo de altitude solar	9
Figura 1.7-Ângulo azimutal do Sol	9
Figura 1.8-Ângulo horário de Abaetetuba	10
Figura 1.9-Ângulo zenital.....	10
Figura 1.10-Ângulo de inclinação do coletor solar	10
Figura 1.11-Ângulo azimutal de superfície	11
Figura 1.12-Ângulo de incidência	11
Figura 1.13-Heliógrafo	12
Figura 1.14-Actonógrafo	12
Figura 1.15-Piranômetro do tipo preto e branco	13
Figura 1.16-Sensor	13
Figura 1.17-Pireliômetro	13
Figura 2.1-Fluxo de elétrons versus fluxo de lacunas	15
Figura 2.2-Material tipo N e material tipo P	15
Figura 2.3-Célula fotovoltaica de Silício cristalino.....	16
Figura 2.4-Fabricação de células fotovoltaicas	18
Figura 2.5-Célula de Silício policristalino.....	18
Figura 2.6-Célula de Arseneto de Gálio	19
Figura 2.7-Célula de Silício amorfo aplicado em vidro	19
Figura 2.8-Representação de associação em série.....	20
Figura 2.9-Curva de representação em série.....	20
Figura 2.10-Representação de associação em paralelo	21
Figura 2.11-Curva de representação em paralelo	21
Figura 2.12-Estrutura do módulo fotovoltaico	22
Figura 2.13-Composição do módulo fotovoltaico.....	22

Figura 2.14-Circuito elétrico equivalente de um módulo fotovoltaico	23
Figura 2.15-Curva obtida para o módulo submetido a vários valores de irradiação	26
Figura 2.16-Densidades de potência do módulo ensaiado, variação da irradiação	27
Figura 2.17-Curva obtida para o módulo submetido às várias temperaturas, irradiação constante (1000W/m ²)	27
Figura 2.18-Densidades de potência do módulo ensaiado, variação da temperatura	28
Figura 2.19-Ponto de operação do módulo simulado	28
Figura 2.20-Configurações dos controladores de carga	29
Figura 2.21-Diagrama básico do controlador tipo <i>shunt</i>	30
Figura 2.22-Princípio de um controlador de carga série	31
Figura 2.23-Controlador de carga	32
Figura 2.24-Formas de ondas típicas de um inversor monofásico	33
Figura 2.25-Ligações de baterias: (a) série, (b) paralelo e (c) mista	34
Figura 2.26-Curva de capacidade de uma bateria.....	35
Figura 2.27-Diodo de bloqueio em série com painel fotovoltaico	36
Figura 2.28-Diodo de bloqueio evitando o fluxo de corrente entre as fileiras do arranjo.....	36
Figura 2.29-Sistema conectado à rede elétrica	38
Figura 2.30-Configuração geral de um sistema autônomo de energia	39
Figura 2.31-Configuração geral de um sistema híbrido de energia.....	39
Figura 3.1-Localização da vila	40
Figura 3.2-Casa da vila (casa de referência).....	41
Figura 3.3-Estimativa do perfil de carga da vila	42
Figura 3.4-Grupo gerador da vila	43
Figura 3.5-Curva do consumo de combustível do grupo gerador da vila.....	44
Figura 3.6-Perfil de carga da casa de referência.....	46
Figura 3.7-Número de ciclos em função da profundidade de descarga.....	49
Figura 3.8-Diagrama das baterias Moura Clean 12MC150 para o sistema.....	49
Figura 3.9-Distância aproximada entre a vila e Belém-PA.....	50
Figura 3.10-Irradiação média de Belém-PA.....	51
Figura 3.11-Aparência do programa <i>Homer</i>	54
Figura 3.12-Aparência do programa <i>PVSize</i>	55
Figura 3.13-Perfil de carga gerado pelo <i>Homer</i>	56
Figura 3.14-Energia gerada pelos painéis fotovoltaicos, média mensais	57
Figura 3.15-Energia excedente gerada pelos painéis fotovoltaicos, média mensais.....	57

Figura 3.16-Estado de carga do banco de baterias	58
Figura 3.17-Produção total de energia gerada pelo sistema solar fotovoltaico	58
Figura 3.18-Condições de trabalho do inversor	59
Figura 3.19-Elementos modelados pelo sistema	60
Figura 3.20-Tela de identificação do projeto.....	60
Figura 3.21-Perfil de carga gerado pelo PVSize	61
Figura 3.22-Energia gerada pelos painéis fotovoltaicos.....	61
Figura 3.23-Excedente de energia gerado pelos PVSize.....	62
Figura 3.24-Estado de carga do banco de baterias	62
Figura 3.25-Energia total produzida pelo sistema	63
Figura 3.26-Resultado da simulação realizada pelo PVSize	64
Figura 3.27-Estado de carga do banco de baterias obtido com o PVSize e o <i>Homer</i>	65
Figura 3.28-Potência gerada pelo PVSize e o <i>Homer</i>	66
Figura 3.29-Variação da eficiência do inversor, PVSize e o <i>Homer</i>	67
Figura 3.30-Energia excedente gerada pelo PVSize e o <i>Homer</i>	67
Figura 3.31-Energia total gerada pelo sistema dos <i>softwares</i>	68
Figura 3.32-Simulação de instalação dos painéis fotovoltaicos e equipamentos do sistema solar	69
Figura 3.23-Distâncias e layout de instalação do sistema	69
Figura 4.1-Digrama do fluxo de caixa do gerador fotovoltaico	73
Figura 4.2-Digrama do fluxo de caixa do gerador diesel	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1- Albedo para diferentes superfícies	6
Tabela 2.1- Índices elétricos de uma célula fotovoltaica.....	24
Tabela 2.2- Ficha técnica do módulo M 140P-12V	26
Tabela 2.3- Características de inversores com diferentes formas de onda	33
Tabela 2.4- Parâmetros elétricos para o dimensionamento das cablagens	37
Tabela 3.1- Equipamentos utilizados e consumo estimado de carga.....	45
Tabela 3.2- Características do inversor Xantrex.....	47
Tabela 3.3- Irradiação média de Belém-PA	51
Tabela 3.4- Características do controlador de carga.....	52
Tabela 3.5- Custo estimado dos equipamentos.....	53
Tabela 3.6- Componentes sugeridos para o sistema solar fotovoltaico gerado pelo Homer....	59
Tabela 3.7- Dimensionamento das bitolas dos cabos	69
Tabela 4.1- Custos dos componentes fotovoltaicos.....	92

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
1 ENERGIA SOLAR	2
1.1 Sol	2
1.2 Radiação Solar	3
1.3 Aproveitamento da Energia Solar	5
1.4 Principais Ângulos	7
1.5 Equipamentos de Medição	11
1.5.1 Heliógrafo	11
1.5.2 Actonógrafo (Actinômetro ou Piranógrafo).....	12
1.5.3 Piranômetro Termoelétrico	12
1.5.4 Sensores Fotovoltaicos.....	13
1.5.5 Pireliômetro.....	13
2 EQUIPAMENTOS E ACESSÓRIOS.....	14
2.1 Efeito Fotovoltaico.....	14
2.2 Tecnologia Fotovoltaica.....	16
2.2.1 Célula de Silício Cristalino	17
2.2.1.1 Célula de Silício Monocristalino (mc-Si)	17
2.2.1.2 Célula de Silício Policristalino (pc-Si).....	18
2.2.2 Célula de Película Fina.....	18
2.2.2.1 Célula de Arseneto de Gálio (GaAs).....	18
2.2.2.2 Célula de Silício Amorfo (a-Si)	19
2.3 Módulos Fotovoltaicos.....	19
2.3.1 Modelo dos Painéis Fotovoltaicos	22
2.3.2 Curva Características do Módulo Fotovoltaico.....	25
2.4 Controlador de Carga	29
2.4.1 Controladores do tipo <i>Shunt</i>	29
2.4.1.1 Controlador <i>Shunt</i> (“ON/OFF”).....	30
2.4.1.2 Controlador Baseado em Tensão Constante	30
2.4.2 Controlador Tipo Série.....	30
2.4.2.1 Controlador Tipo Série (“ON/OFF”)	31
2.4.2.2 Controlador Tipo Série-Tensão Constante (Interrupção por Modulação de Pulso PWM) 31	
2.5 Inversores	32

2.5.1	Inversores Autônomos	32
2.6	Baterias.....	33
2.6.1	Não Recarregáveis (Célula Primária).....	33
2.6.2	Recarregáveis (Célula Secundária)	34
2.7	Diodos de Bloqueio.....	36
2.8	Cabos Elétricos.....	37
2.9	Tipos de Sistemas fotovoltaicos.....	37
2.9.1	Sistemas Conectados à Rede	38
2.9.2	Sistemas Isoaldos	38
2.9.1	Sistemas Híbridos	39
3	A ILHA NAZARÉ – CARACTERÍSTICAS DA VILA	40
3.1	Levantamento de Carga da Vila.....	41
3.2	Grupo Gerador	42
3.3	Dimensionamento	44
3.3.1	Dimensionamento do Inversor	46
3.3.2	Dimensionamento do Banco de Baterias	48
3.3.3	Estimativa de Potencial Solar.....	50
3.3.4	Dimensionamento do Painéis	52
3.3.5	Dimensionamento do Controlador de Carga.....	52
3.3.6	Custo Estimado para os Componentes do Sistema Fotovoltaico Autônomo.....	53
3.3.7	Softwares de Simulação do Sistema Solar Fotovoltaico.....	53
3.3.7.1	Softwares Homer.....	54
3.3.7.2	Softwares PVSize.....	54
3.3.8	Procedimento de Simulação	55
3.3.8.1	Homer.....	55
3.3.8.1.1	Conclusão da Simulação realizada pelo Homer.....	59
3.3.8.2	PVSize.....	60
3.3.8.1.2	Conclusão da Simulação realizada pelo PVSize.....	63
3.3.9	Análise de Simulação.....	65
3.3.9.1	Estado de Carga.....	65
3.3.9.2	Energia Gerada pelo Gerador Fotovoltaico.....	65
3.3.9.3	Eficiência do Inversor	66
3.3.9.4	Energia Excedente.....	67
3.3.9.5	Energia Total Gerada pelo Sistema.....	68

3.3.10	Dimensionamento das Bitolas dos Cabos	68
4	ANÁLISE DE CUSTO	70
4.1	Valor Presente Líquido (VPL)	70
4.2	Análise de Custo do Gerador Fotovoltaico	71
4.3	Análise de Custo do Gerador Diesel	73
4.4	Conclusão.....	75
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77
	APÊNDICE A.....	80
	APÊNDICE B	83
	APÊNDICE C	84

INTRODUÇÃO

Atualmente vivenciam-se crises energéticas constantes, tanto nas áreas do petróleo como das hidroelétricas. No que tange a geração de energia através das usinas, degrada-se o meio ambiente com objetivo de levar luz a todas as comunidades rurais. Entretanto, verifica-se que as pessoas mais afetadas por essa degradação são aquelas que não usufruem do conforto básico que a energia elétrica proporciona.

Nas zonas rurais não é difícil encontrar a população com seus candeeiros, sofrendo, sendo deixada para trás por conta dos avanços tecnológicos que necessariamente depende da energia elétrica. No caso de algumas localidades que já existe a geração de energia através do programa do governo federal, ocorre um fornecimento de péssima qualidade oferecido pelas concessionárias, com interrupções constantes causando prejuízos aos moradores. Outra parcela da população rural utiliza os geradores a diesel para o fornecimento de energia elétrica, mais essa produção é limitada por diversos fatores, pois requer manutenção constante, preço do combustível que é elevado e barulho proveniente do motor.

Com as crises energéticas cada vez mais evidentes muitos estudiosos afirmam que o Sol será a principal fonte de energia do futuro. Por conta disso, o homem vem aprimorando cada vez mais as formas de obtenção desta fonte. Um exemplo é a energia solar fotovoltaica que converte a energia contida na radiação luminosa em energia elétrica. Uma grande vantagem desse tipo de geração é ela ser totalmente renovável e versátil, que se encontra como auxiliar no caso de sistemas fotovoltaicos conectados a rede ou autônoma em sistemas isolados.

Este trabalho terá como foco mostrar a viabilidade da implantação de um sistema solar fotovoltaico autônomo (SFVA) para residências localizadas na Ilha Nazaré, zona rural do município de Abaetetuba no estado do Pará. Para tanto, pretende-se analisar na vila onde estão inseridas as residências, avaliando a carga instalada e o consumo de combustível do grupo gerador que atende a mesma. O sistema será dimensionado apenas para uma casa a fim de mostrar a possibilidade, mas como a vila apresenta-se homogênea, quanto à carga instalada, poderá replicar o sistema para as demais.

Espera-se, do estudo e levantamento, parâmetros para comparar o custo de energia de cada sistema e se é viável ou não implantar um SFVA nas zonas rurais no município de Abaetetuba.

1 ENERGIA SOLAR

1.1 Sol

A fonte de praticamente toda energia existente na superfície da Terra provem do Sol que encontra-se a uma distância média de $1,5 \times 10^{11}$ metros. A vida das diversas formas que se conhece no planeta é possível graças à energia solar, da qual as pessoas utilizam de diferentes maneiras. Dentre as diversas aplicações, a geração direta de eletricidade através do efeito fotovoltaico é uma das mais elegantes formas de gerar energia elétrica.

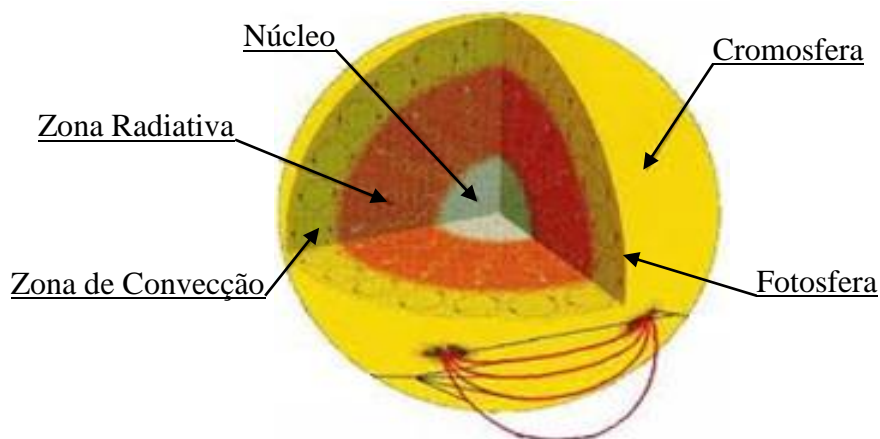
O Sol apresenta em sua estrutura interna um núcleo onde se originam as reações nucleares. Ele é capaz de emitir uma potência de $3,9 \times 10^{26}$ Watt. Existe uma zona que envolve o núcleo, denominada de zona radiativa, nela a energia é transportada pelos íons do plasma. Envolvendo esta zona encontra-se um envoltório convectivo (ou células de convecção).

Toda essa energia produzida pela fusão dos elementos, sendo que uma parte é usada para manter as condições de temperatura e pressão no núcleo e a outra é emitida sob a forma de luz, calor, radiação e etc. Além do núcleo, existe também a fotosfera, uma região que apresenta uma camada bastante estreita, com aproximadamente 500 km de espessura [1].

A cromosfera é outra região interna que apresenta uma espessura de aproximadamente de 2.500 km [2].

Pode-se observar na Figura 1.1 as principais camadas do Sol comentadas anteriormente.

Figura 1.1 - Representação das camadas internas do Sol.



Fonte: [3]

1.2 Radiação Solar

Todos os dias o Sol emite uma grande quantidade de energia através de ondas eletromagnéticas. Essas ondas são basicamente cargas elétricas oscilando no espaço criando em torno de si campo elétrico (\vec{E}) e campo magnético (\vec{B}) variando com a mesma frequência da carga oscilante. A propagação de uma onda eletromagnética é simultaneamente perpendicular às direções de oscilações de \vec{E} e \vec{B} . Maxwell mostrou que, no vácuo, todas as ondas eletromagnéticas se propagam com a mesma velocidade c . Quando ela incide em meio material, poderá ou não propagar-se, dependendo da frequência e da estrutura desse meio. Desde que ela consiga, sua velocidade será menor do que c .

De acordo com a mecânica quântica, essas ondas eletromagnéticas são emitidas na forma de “pacotes” de energia chamados de fótons.

Uma onda eletromagnética é definida como energia radiante. Pode-se observar essa característica através da Equação 1.1 que fornece a energia de um fóton [4].

$$E_F = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (1.1)$$

Onde:

h = Constante de Planck ($h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s);

c = Velocidade da luz ($c = 2,998 \cdot 10^8$ m/s);

λ = Comprimento da onda do fóton em metros.

Expressando-se o produto $h \cdot c$ em unidades apropriadas tal que λ é expresso em μm , então E_F será expresso em elétron-Volt (eV).

A intensidade é outra grandeza importante para energia radiante, definida como a potência por unidade de área [5], dada por:

$$I = \frac{P}{A} \quad (1.2)$$

Onde:

I = Intensidade;

P = Potência;

A = Área;

A potência é definida por [6].

$$P = \frac{E}{t} \quad (1.3)$$

Onde:

E = Energia;

t = Tempo;

Da definição de intensidade pode-se definir a irradiância (G) como a taxa de energia radiante que incide sobre a área de uma superfície. A constante solar (G_{SC}) é definida como quantidade (ou intensidade) de energia radiante que incide em uma superfície unitária, normal aos raios solares por unidade de tempo, em uma região situada no topo da atmosfera. Pode-se ajustar a Equação 1.2 para:

$$I = \frac{\frac{E}{t}}{A} \quad (1.4)$$

Da equação 1.4 define-se a constante solar de acordo com equação 1.5 [5].

$$G_{SC} = \frac{E}{A \cdot t} \quad (1.5)$$

Seu valor é de aproximadamente: $G_{SC} = 1.367(\pm 3,33\%) \frac{W}{m^2}$

Essa constante corresponde a um valor máximo da irradiância solar que é medida antes que ocorra qualquer tipo de atenuação por nuvens, poluição ou absorção pelos próprios elementos constituintes da atmosfera terrestre. Da constante solar pode-se definir a irradiância solar extraterrestre (G_0), que varia ao longo do ano. O valor G_0 irá aumentar se a Terra estiver a uma distância do Sol menor que a distância média, caso contrário irá diminuir. Seu valor é dado por [6]:

$$G_0 = G_{SC} \cdot \left(1 + 0,0333 \cdot \cos \frac{360 \cdot N}{365,25} \right) \quad (1.6)$$

Onde o fator $\left(1 + 0,0333 \cdot \cos \frac{360 \cdot N}{365,25} \right)$ é a correção por excentricidade da órbita da Terra e N é o dia do ano, contado a partir de primeiro de janeiro, variando de $1 \leq N \leq 365$.

1.3 Aproveitamento da Energia Solar

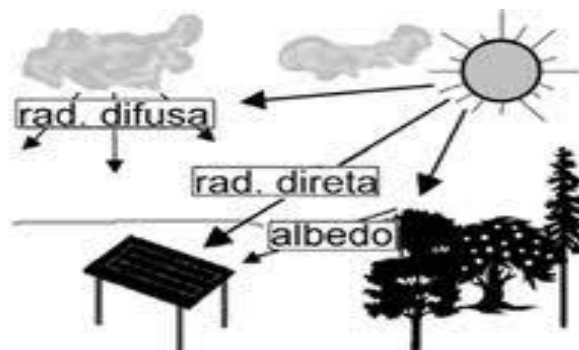
A irradiância solar que chega a superfície terrestre atinge um valor de aproximadamente, em boas condições climáticas, de $1000 \frac{W}{m^2}$, independentemente da localização. Considerando-se a quantidade total de radiação solar que incide na superfície terrestre durante um ano, obtém-se a radiação global anual com um valor médio dado em $\frac{k.W.h}{m^2}$. Essa radiação sofre modificações na sua intensidade e direção quando atravessa um determinado tipo de atmosfera. Essas modificações são de natureza aleatória devido às flutuações climáticas.

Realizam-se estimativas e previsões do recurso solar levantado durante prolongados períodos de tempo. Desses levantamentos têm-se informações de que a radiação solar é composta de duas componentes principais, uma chamada de direta e a outra de difusa. Em caso de realização de projetos de sistema solares, deve-se levar em consideração uma terceira componente, chamada de albedo.

A radiação direta é definida como a fração da irradiação que atravessa a atmosfera terrestre sem sofrer qualquer alteração em sua direção original. Ela é a parte utilizada para a conversão de energia solar em energia elétrica.

A radiação difusa não apresenta direção específica, pois ao atravessar a atmosfera é espalhada pelos elementos constituintes da massa atmosférica. Já o albedo é a parte da radiação que atinge o coletor solar proveniente da emissão e reflexão de sua vizinhança, caracterizada pela vegetação, construções civis, etc. [7]. Na Figura 1.2 são mostradas as três componentes da radiação global.

Figura 1.2 - Representação das componentes da radiação.



O albedo varia de acordo com a composição da superfície terrestre. Quanto maior seu valor, maior é a reflexão da luz solar. Pode-se observar seus valores para diferentes superfícies através da Tabela 1.1.

Tabela 1.1 - Albedo para diferentes superfícies.

Superfície	Albedo
Pastos (Julho a Agosto)	0,25
Relva	0,18.....0,23
Pastos secos	0,28.....0,32
Pedregulhos	0,18
Cimento liso	0,55
Asfalto	0,15
Florestas	0,05.....0,18
Terra estéril	0,17
Campos lavrados	0,26
Areal	0,10.....0,25
Superfície da água (ângulo de incidência>45°)	0,05
Superfície da água (ângulo de incidência>30°)	0,08
Superfície da água (ângulo de incidência>20°)	0,12
Superfície da água (ângulo de incidência>10°)	0,22

Fonte: [9]

Pode-se calcular a radiação total no plano horizontal através da seguinte Equação [10]:

$$I_H = I_B \cdot \cos \theta_z + I_D \quad (1.7)$$

Onde:

I_H = Radiação total no plano horizontal;

I_B = Radiação direta;

θ_z =Ângulo que os raios solares formam com a vertical;

I_D = Radiação difusa;

Como dito anteriormente, as modificações sofridas na radiação solar dependem da espessura da camada atmosférica. Essa espessura é caracterizada por um coeficiente denominado de massa de ar (AM), definido como o comprimento relativo do raio direto que atravessa a atmosfera. A Equação aproximada para o cálculo de AM é dado por [6]:

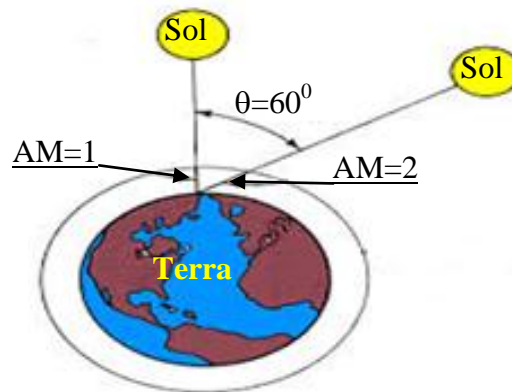
$$AM = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (1.8)$$

Essa equação é válida para ângulos zenitais de $\theta_z=0^\circ$ a $\theta_z=60^\circ$. Para ângulos maiores o efeito da curvatura da Terra torna-se significativo e deve ser considerado. A Equação mais precisa é dado por [11]:

$$AM = \frac{1}{[\cos\theta_z + 0,15 \cdot (93,885 - \theta_z)^{-1,253}]} \quad (1.9)$$

No espaço a radiação solar não sofre nem um efeito, como consequência $AM=0$. Utiliza-se $AM=1,5$ como padrão para a calibração de módulos fotovoltaicos. Na Figura 1.3 verifica-se a variação de AM para ângulos de 0° a 60° .

Figura 1.3 - AM para 0° e 60° .



Fonte: [12]

1.4 Principais Ângulos

Para a definição dos principais ângulos solares é conveniente retornar à teoria geocêntrica. Considera-se a Terra estacionária, fixa no espaço e todos os outros astros dotados de movimento aparente indo do Leste para Oeste, como pode-se observar na Figura 1.4. As distâncias da Terra aos corpos celestes são tão grandes que podemos supô-los projetados na superfície interna de uma esfera oca, de raio infinito, concêntrica com a Terra, denominada de esfera celeste. Essa esfera possui um círculo máximo descrito pelo Sol em seu movimento aparente em torno da Terra denominado eclíptica. Ela é inclinada em relação ao equador celeste cerca de $23,45^\circ$ possuindo quatro pontos importantes, a saber:

O ponto vernal (ou equinócio de março) é o ponto do equador celeste ocupado pelo Sol quando passa do hemisfério Sul para o hemisfério Norte celeste, ocorre a 20 de março,

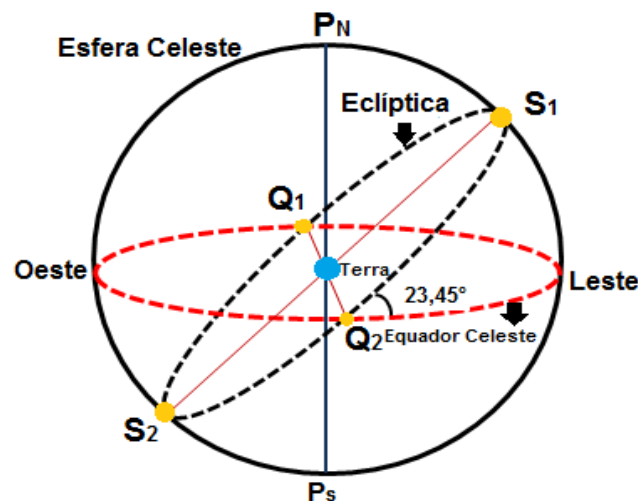
aproximadamente. Esse ponto é representado por Q_2 . Primeiro ponto da libra (equinócio de setembro) é o ponto do equador celeste ocupado pelo Sol quando passa do hemisfério Norte para o hemisfério Sul celeste, isto ocorre seis meses após a passagem do Sol pelo ponto vernal, aproximadamente a 23 de setembro representado pelo ponto Q_1 .

Solstício de inverno (para o hemisfério Sul) é o ponto da eclíptica ocupado pelo Sol quando está mais ao Norte do equador celeste, ocorre aproximadamente, a 21/22 de junho, quando o Sol alcança uma declinação de cerca de $23,45^\circ$ ao Norte do equador representado pelo ponto S_1 .

Solstício de verão (para o hemisfério Sul) é o ponto da eclíptica ocupado pelo Sol quando está mais ao Sul do equador celeste, ocorre a 21/22 de dezembro, aproximadamente, quando o Sol alcança uma declinação de cerca de $23,45^\circ$ ao Sul do equador, representado pelo ponto S_2 .

Como o eixo polar possui uma inclinação de $23,45^\circ$, Figura 1.5, em relação a normal do plano da orbita terrestre, à medida que a Terra orbita em torno do Sol, os raios solares incidem mais diretamente em um hemisfério do que no outro. Por isso, há verão com dias mais longos e inverno com dias de menor duração.

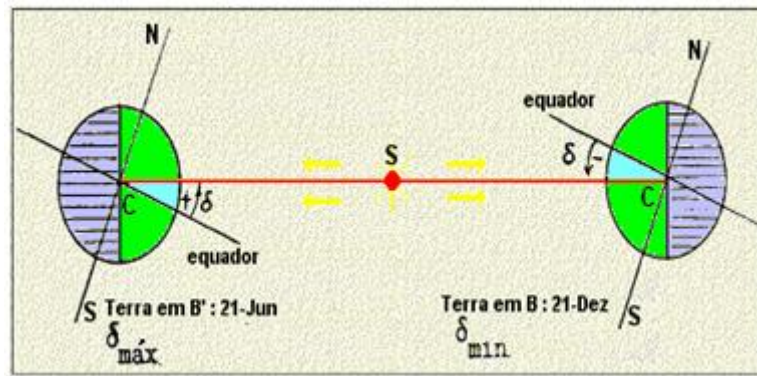
Figura 1.4 - Representação da esfera celeste.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O ângulo formado entre o plano do equador terrestre e o plano da eclíptica, mostrado na Figura 1.5 é denominado de declinação solar (δ) e sua variação ao longo do ano compreende o intervalo de $-23,45^\circ \leq \delta \leq +23,45^\circ$ [11].

Figura 1.5 - Variação da declinação solar.



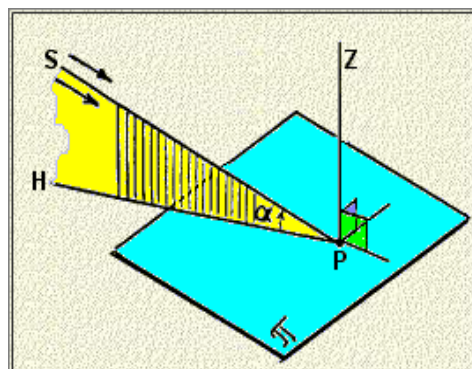
Fonte: [13]

A declinação solar (δ) pode ser calculada em graus aproximadamente pela Equação 1.10 [6].

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \text{Sen} \left[\frac{360}{365} (284 + N) \right] \quad (1.10)$$

Ângulo de altitude solar ou altura solar (α) é o ângulo formado entre o raio solar e a sua projeção sobre o plano horizontal. Pode-se observar esse ângulo através da Figura 1.6.

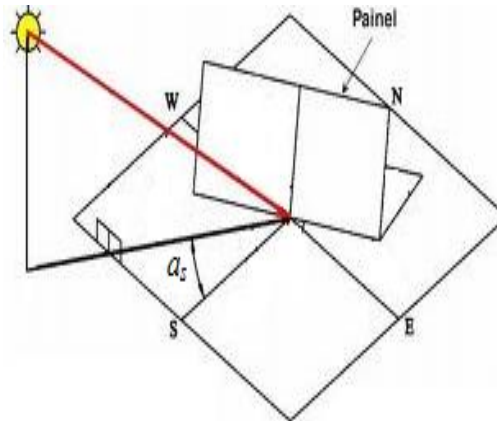
Figura 1.6 - Ângulo de altitude solar.



Fonte: [13]

Ângulo azimutal do sol (a_s) é o ângulo formado entre a projeção dos raios solares no plano horizontal e a direção Norte-Sul. Varia entre $-180^\circ \leq a_s \leq +180^\circ$, sendo considerado positivo quando sua projeção se encontra à esquerda do Norte e negativo quando se encontra à sua direita. O ângulo azimutal do sol pode ser visualizado através da Figura 1.7.

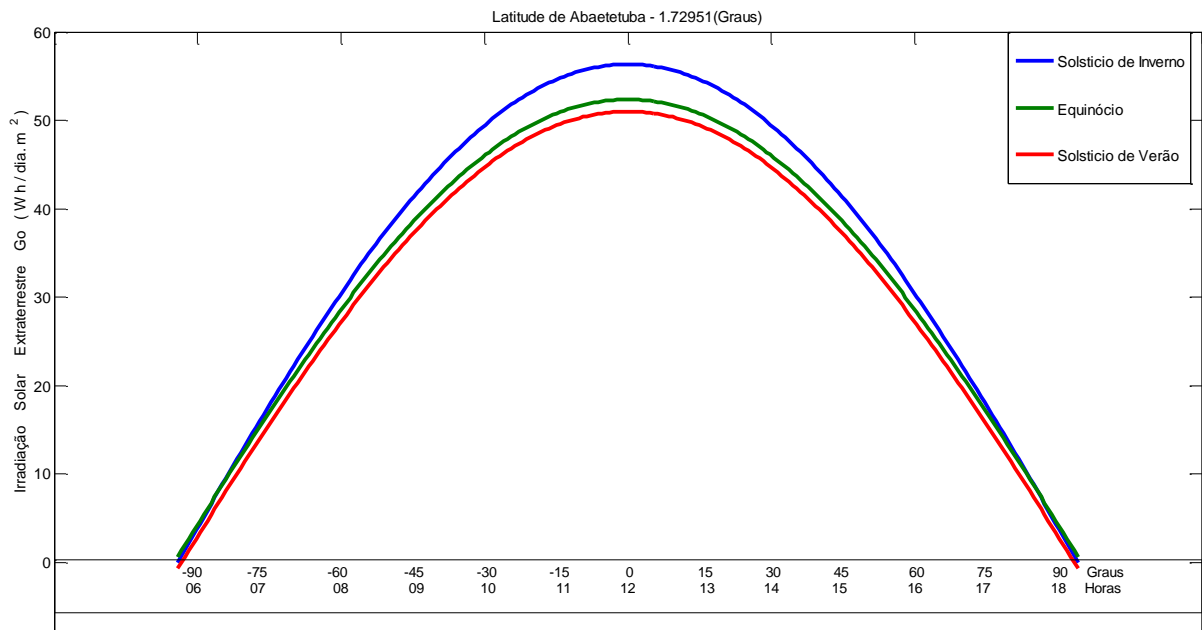
Figura 1.7 - Ângulo azimutal do Sol.



Fonte: Adaptado de [14].

Ângulo horário (ω) corresponde ao deslocamento angular do Sol em relação ao meridiano local devido o movimento de rotação da Terra. A Figura 1.8 ilustra o exposto. Ele é negativo pela manhã e positivo à tarde, com um deslocamento de 15° por hora [15].

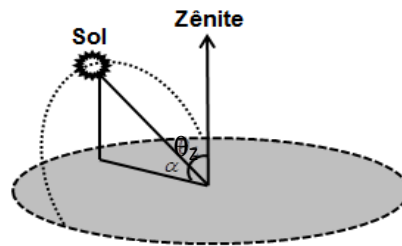
Figura 1.8 - Ângulo horário da cidade de Abaetetuba-PA.



Fonte: [15].

Ângulo zenital (θ_z) é o ângulo formado entre o vertical zênite em relação ao observador e a direção do Sol, variando de 0° a 90° como pode-se observar na Figura 1.9.

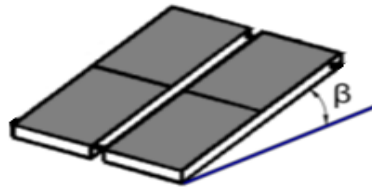
Figura 1.9 - Ângulo zenital.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Ângulo de inclinação do coletor solar (β) é o ângulo formado pelo plano inclinado do coletor solar e plano horizontal. Observa-se esse ângulo através da Figura 1.10.

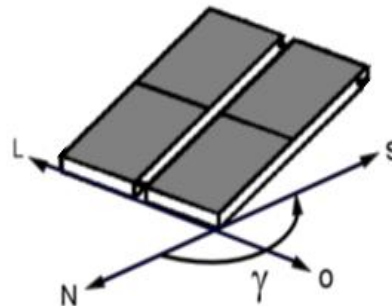
Figura 1.10 - Ângulo de inclinação do coletor solar.



Fonte: [16].

Ângulo azimutal de superfície (γ) é o ângulo formado entre a direção Norte-Sul e a projeção da reta normal à superfície do coletor solar (ver Figura 1.11). O deslocamento angular é tomado a partir do Norte e o valor de γ varia na faixa de $-180^\circ \leq \gamma \leq +180^\circ$, considerado positivo quando sua projeção se encontra à esquerda do Norte e negativo quando se encontra à sua direita.

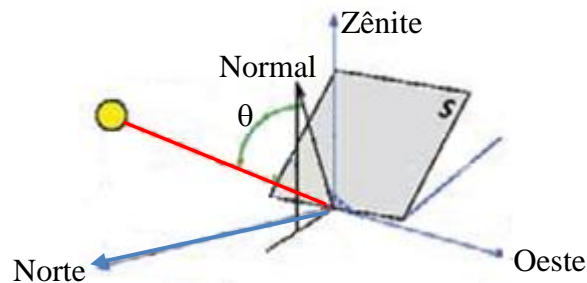
Figura 1.11 - Ângulo azimutal de superfície.



Fonte: [16].

Ângulo de incidência (θ) é o ângulo formado entre a normal à superfície do coletor e os raios solares. Pode-se observar o ângulo de incidência através da Figura 1.12.

Figura 1.12 - Ângulo de incidência.



Fonte: Adaptado de [6].

1.5 Equipamentos de Medição

As medições da radiação solar na superfície terrestre são muito importante para o conhecimento e influência das condições atmosféricas. Essas medições serve para a avaliação de um sistema solar de geração de energia, o que é um fator determinante para os cálculos de custos do retorno do dispositivo a ser investido ou não.

1.5.1 Heliógrafo

É utilizado para observar o número de horas de brilho solar em determinada localidade, constituído por uma esfera sólida de vidro polido, que se comporta como uma lente convergente capaz de concentrar numa região toda a luz que incide sobre ela. Esse instrumento pode ser visualizado na Figura 1.13.

Figura 1.13 - Heliógrafo.



Fonte: [17].

1.5.2 Actonógrafo (Actinômetro ou Piranógrafos)

É utilizado para medição da radiação solar global. É constituído por um sistema receptor bimetálico ao qual apenas um fica preso e a outra extremidade do componente bimetálico fica livre. A ação da radiação solar incidente sobre o bimetálico agindo de forma a curvá-lo devido à diferença dos coeficientes de dilatação dos metais componentes. A intensidade da radiação incidente é registrada por meio de uma agulha fixada na extremidade livre do bimetálico que marca uma carta de papel (ver Figura 1.14).

Figura 1.14 - Actonógrafo.



Fonte: [18].

1.5.3 Piranômetro Termoelétrico

São instrumentos que utilizam como componentes principais duas semi-esferas de vidro, um prato de metal de cor preta que serve como superfície absorvente da radiação, termoelementos e uma concha de metal da cor branca. A radiação solar atravessa as duas semi-esferas incidindo perpendicularmente sobre a superfície do metal de cor preta, isso faz com que ela aqueça. Como o aquecimento depende diretamente da irradiação, esta pode ser calculada recorrendo a diferença de temperatura do metal de cor branca e do prato de metal preto. O piranômetro pode ser visualizado através da Figura 1.15

Figura 1.15 - Piranômetro do tipo preto e branco.

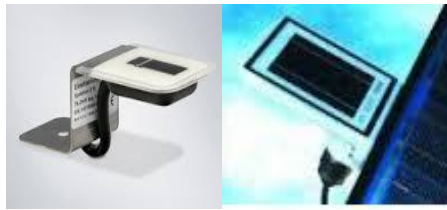


Fonte: [19].

1.5.4 Sensores Fotovoltaicos

São instrumentos que constituem uma célula fotovoltaica, fornecendo uma corrente elétrica proporcional a Irradiância Solar. Suas principais vantagens é o custo e a sua utilização como instrumento operacional de controle nos sistemas fotovoltaicos de maior dimensão (ver Figura 1.16).

Figura 1.16 - Sensores.



Fonte: [20].

1.5.5 Pireliômetro

Esse equipamento utiliza os piranômetros acoplados a um sistema específico que permite apenas a incidência da fração da radiação direta no elemento sensor. O ângulo de aceitação é da ordem de 6° e o instrumento segue o movimento do Sol, que é permanentemente focalizado na região do sensor. Na Figura 1.17 observa-se o pireliômetro.

Figura 1.17- Pireliômetro.



Fonte: [21].

2 EQUIPAMENTOS E ACESSÓRIOS

2.1 Efeito Fotovoltaico

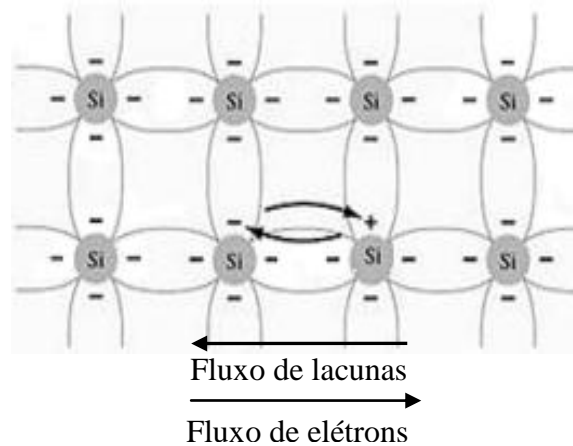
A conversão da energia contida na radiação luminosa em energia elétrica só é possível graças ao fenômeno físico conhecido como efeito fotovoltaico. Esse fenômeno ocorre em alguns materiais semicondutores que possui a capacidade de absorver a energia existente nos fótons da radiação solar transformando em eletricidade.

Os semicondutores possuem propriedades elétricas que são intermediárias entre aquelas apresentadas pelos condutores elétricos e pelos isolantes. Além disso, as características elétricas destes materiais são extremamente sensíveis à presença de minúsculas concentrações de átomos de impurezas, concentrações que podem ser controladas ao longo de regiões espaciais muito pequenas.

O silício é o semicondutor mais utilizado nas indústrias de dispositivos de conversão fotovoltaica. Esse elemento possui quatro elétrons de valência e quando seus átomos unem-se para formar um cristal esses elétrons distribuem-se de modo que cada átomo fique com oito elétrons de valência. A baixa temperatura, próxima do zero absoluto, as ligações covalentes do semicondutor mantem-se inalteradas comportando-se como um isolante. Entretanto, quando aumenta-se a temperatura algumas ligações são rompidas devido à agitação térmica. Os átomos da rede começam a vibrar fazendo variar as distâncias entre eles e os ângulos entre as ligações covalentes. Com a elevação da temperatura aumenta a amplitude de oscilação e parte dessa energia oscilante é transferida para os elétrons de valência dos átomos da rede cristalina. Se essa energia for suficiente, alguns elétrons abandonam a ligação da qual participam, como consequência elétrons ficam livres para vagar, deixando em seu lugar um vazio denominado de lacuna [22].

O elétron do átomo vizinho pode deixar sua ligação e vir a preencher uma lacuna deixando também outra lacuna em sua posição original que pode ser preenchida por outro elétron. Dessa forma, uma lacuna caminha em sentido contrário a de um elétron como pode ser visto na Figura 2.1. Vale ressaltar que uma lacuna comporta-se como uma carga positiva com o mesmo valor absoluto do elétron.

Figura 2.1 - Fluxo de elétrons versus fluxo de lacunas.



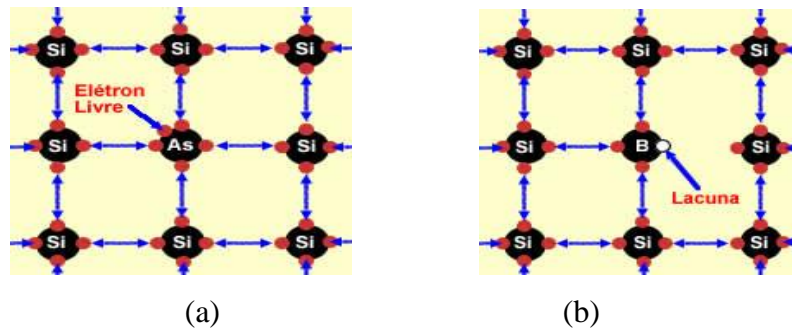
Fonte: [22].

O processo descrito anteriormente não pode ser usado para gerar energia elétrica, para isso o cristal é propositalmente contaminado com outras substâncias chamadas de impurezas substitucionais. As mais utilizadas são alguns elementos pentavalentes (Arsênio, Fósforo e Antimônio) e trivalentes (Boro, Alumínio e Índio).

Se o semiconductor for contaminado com um elemento pentavalente alguns átomos ocupam o lugar do átomo do semiconductor no cristal, nesse caso existem quatro átomos vizinhos para estabelecer a ligação covalente, o elétron que sobra fica livre para vagar no cristal indo fazer companhia aos elétrons livres já existentes, como pode ser observado na Figura 2.2 (a). Assim, o átomo de impureza cede elétrons ao cristal e esse material recém-formado denomina-se material tipo N (N referindo-se a carga negativa do elétron).

Se por outro lado acrescenta-se impureza trivalente existirão três elétrons de valência para estabelecer ligação com quatro átomos vizinhos do semiconductor, nessas condições uma ligação covalente ficará incompleta, faltando um elétron, então se caracteriza o surgimento de uma lacuna, (ver Figura 2.2 - b). Como os átomos de impureza trivalente cedem lacunas ao cristal, esse novo material é dito material tipo P (referindo-se a carga positiva da lacuna).

Figura 2.2 - Material tipo N (a) e material tipo P (b).



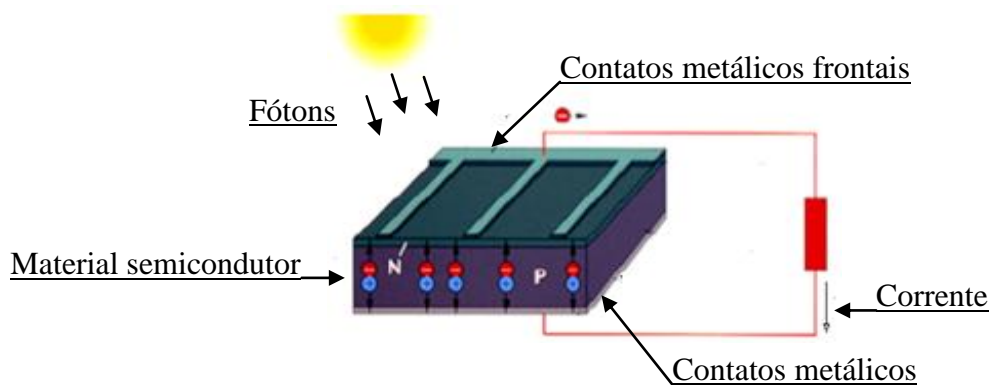
Fonte: [23].

Cada célula solar compõe-se de uma fina camada de material tipo N e outra com maior espessura de tipo P, unidas forma-se a junção P-N. Os elétrons do lado N passam para o lado P e as lacunas do lado P passam para o lado N, e este vai tornando-se mais positivo e o lado P vai tornando-se mais negativo. Cria-se um campo elétrico nas proximidades da junção P-N que com o decorrer do tempo opõe-se a passagem das cargas. A corrente associada ao fluxo de elétrons e lacunas tem sentido contrário a corrente originada pelo campo elétrico, isso faz com que o semiconductor alcance um estado de equilíbrio.

Se a junção P-N for submetida a iluminação o estado de equilíbrio é rompido ocorrendo a absorção de fótons pelos elétrons da banda de valência. Adquirindo energia suficiente para liberta-lo de sua ligação química este passa para a banda de condução criando um par elétron-lacuna. A carga negativa é atraída para o lado N e a carga positiva para o lado P devido a presença do campo elétrico, incidindo-se mais fótons surgirá mais pares de elétrons-lacunas e um desequilíbrio acentuado nas correntes, além de uma diferença de potencial estabelecido pelo acúmulo de elétrons na região N e lacunas na região P.

Conectando-se terminais metálicos e a estes fios elétricos em cada lado da junção, estabelece uma corrente elétrica chamada de fotocorrente, presente enquanto houver energia solar incidindo no semiconductor [4]. Como mostrado na Figura 2.3.

Figura 2.3 - Célula fotovoltaica de Silício cristalino.



Fonte: [24].

2.2 Tecnologia Fotovoltaica

No que tange a tecnologia e materiais tem-se feito inúmeras pesquisas a fim de desenvolver condições mais eficazes para a manufatura de células fotovoltaicas que possam proporcionar um custo menor e uma eficiência maior na conversão energética para que favoreça a relação custo-benefício.

A confecção de células fotovoltaicas utiliza diversos tipos de materiais, os mais utilizados são:

Células convencionais, são dispositivos fotovoltaicos manufaturados com base no material Silício monocristalino (mc-Si) ou no Silício policristalino (pc-Si);

Filmes finos são células e dispositivos fotovoltaicos manufaturados com base no Silício amorfo (a-Si) ou denominados também de Silício amorfo Hidrogenado (a-Si: H), Compostos policristalino, tais como o Arseneto de Gálio (GaAs), Telureto de Cádmi (CdTe) e o dissulfeto de Cobre e Índio (CuInSe₂ ou CIS).

Grupo das outras tecnologias, são células e dispositivos fotovoltaicos manufaturados a base da tecnologia Ribbon, que se compõem de longas e finas fitas com base no Silício cristalino. Também a *Artificial Leaf*, que são dispositivos manufaturados com base no dióxido de Titânio (TiO₂) e corantes fotoexcitáveis, a tecnologia *Spherical*, que tem como fundamento a utilização de pequenas esferas de Silício (Si) com camadas dopadas convenientemente e estas dispostas sobre finas folhas de alumínio.

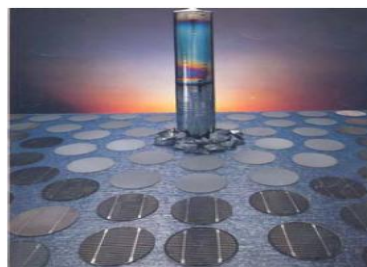
2.2.1 Célula de Silício Cristalino

A fabricação da célula de silício cristalino (mono ou policristalino) começa com a extração do cristal de dióxido de silício e este é desoxidado em grandes fornos, purificado e solidificado. O processo alcança um grau de pureza entre 98 e 99% (Silício metalúrgico), sendo consideravelmente eficiente, visto que se encontra em uma área de bom aproveitamento energético e de custo. Porém, 2% de impurezas no silício ainda é muito para a fabricação de células fotovoltaicas, (é apenas admissível um bilionésimo por cento para funcionar) este silício necessita de um grau de pureza mais elevado, alcançando a marca de 99,9999%. Este material de elevada qualidade pode agora ser processado de diferentes modos para produzir células monocristalinas ou policristalinas [6].

2.2.1.1 Célula de Silício Monocristalino (mc-Si)

O processo mais comum para chegar-se ao Silício monocristalino é conhecido como “processo de Czochralski” cujo produto final é o lingote de Silício monocristalino como se pode observar na Figura 2.4.

Figura 2.4 - Fabricação de células fotovoltaicas.



Fonte: [25].

Após o processo, a célula recebe uma película, uma grade metálica em um dos lados e uma camada de material antirreflexivo na superfície onde a luz incidirá. Essas células atingem uma eficiência entre 15 e 18% e são produzidas nos seguintes formatos: redondas, semi-quadradas e quadradas.

2.2.1.2 Células de Silício Policristalino (pc-Si)

O Silício policristalino (pc-Si) apresenta menor eficiência de conversão comparada com a célula de mc-Si, com a vantagem de um baixo custo de produção . O material é fundido e posteriormente solidificado direcionalmente, o que resulta em um bloco com grande quantidade de grãos ou cristais, no contorno dos quais concentram os defeitos. São realizados processamentos posteriores até obter-se uma célula fotovoltaica [26]. Pode-se observar na Figura 2.5 uma célula de Silício policristalino.

Figura 2.5 - Célula de Silício policristalino.



Fonte: [27].

2.2.2 Células de Película Fina

2.2.2.1 Células de Arseneto de Gálio (GaAs)

O Arseneto de Gálio é um material com várias propriedades desejáveis para a fabricação de células fotovoltaicas, tais como energia de banda proibida próxima ao valor ideal, alto coeficiente de absorção, além de poder formar ligas com vários materiais. Embora essas células apresentem elevada eficiência (aproximadamente 27,6% em laboratório), elas não são competitivas devido aos altos custos envolvidos em seu processo de fabricação [28]. Na Figura 2.6 pode-se observar uma célula de Arseneto de Gálio.

Figura 2.6 - Célula de Arseneto de Gálio.

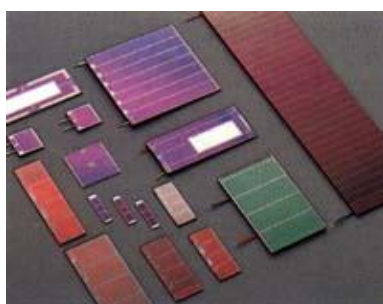


Fonte: [29]

2.2.2.2 Célula de Silício Amorfo (a-Si)

As células de Silício amorfo apresentam alto grau de desordem na estrutura dos átomos. Possui um processo de fabricação simples e barato sendo fabricado mediante deposição de diversos tipos de substratos. Isso possibilita a construção de células com grandes áreas e baixo consumo de energia na produção. Na Figura 2.7 pode-se verificar a aplicação das células de Silício amorfo.

Figura 2.7- Células de Silício amorfo aplicado em vidro.



Fonte: [9].

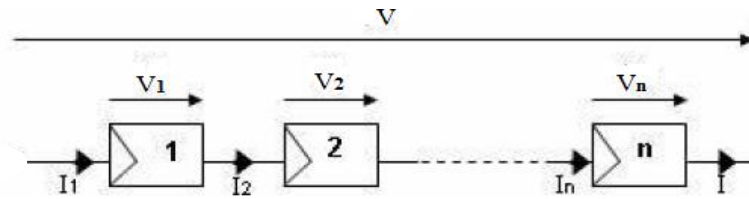
2.3 Módulos Fotovoltaicos

A célula solar é o elemento básico do módulo fotovoltaico. Geralmente elas possuem o formato de pequenos retângulos ou discos, suas características elétricas dependem do tipo do semicondutor utilizado na sua fabricação. Além disso, apresenta grande fragilidade e um baixo fornecimento de tensão quando isoladas, em torno de 0,5 V. Para atingir a corrente e tensão desejada em aplicações elétricas as células fotovoltaicas são agrupadas em série ou paralelo constituindo um módulo fotovoltaico.

De acordo com [9] os componentes da Figura 2.8 pode ser utilizados para representar uma célula fotovoltaica, um módulo fotovoltaico, um campo fotovoltaico ou um gerador fotovoltaico.

Representando células fotovoltaicas a Figura 2.8 mostra-nos a configuração em série, disposta da seguinte maneira:

Figura 2.8 - Representação de associação de células em série.



Fonte: Elaborada pelo autor.

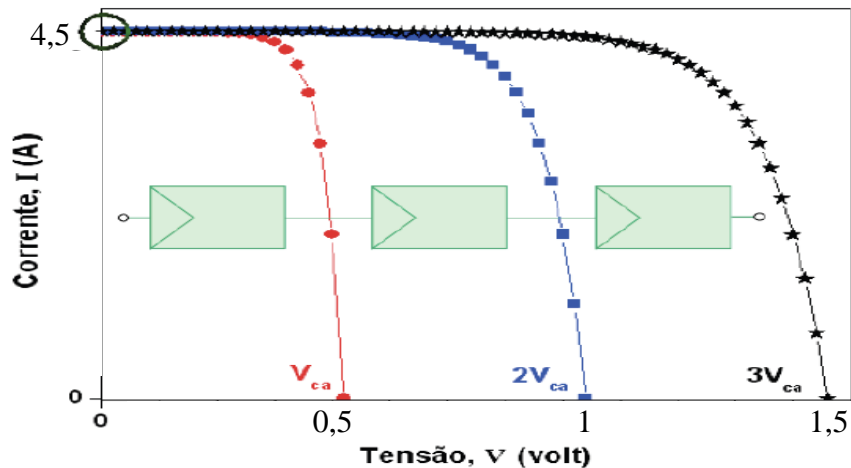
Quando a ligação é em série as tensões são adicionais e a corrente não é afetada. Pode-se verificar através das Equações 2.1 e 2.2 respectivamente.

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n \quad (2.1)$$

$$I = I_1 = I_2 = \dots I_n \quad (2.2)$$

A Figura 2.9 corresponde à representação gráfica da curva característica (de acordo com as Equações 2.1 e 2.2) referente à associação em série de três células fotovoltaicas.

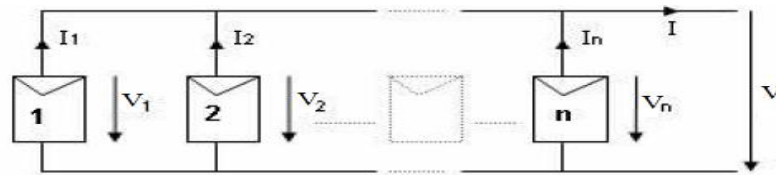
Figura 2.9 - Curva de representação em série.



Fonte: Adaptado de [9].

A conexão em paralelo resulta em uma adição das correntes enquanto a tensão mantém-se constante. Observando a Figura 2.10 tem-se uma representação da associação em paralelo de células fotovoltaicas. As Equações 2.3 e 2.4 mostra essas características.

Figura 2.10 - Representação de associação em paralelo.



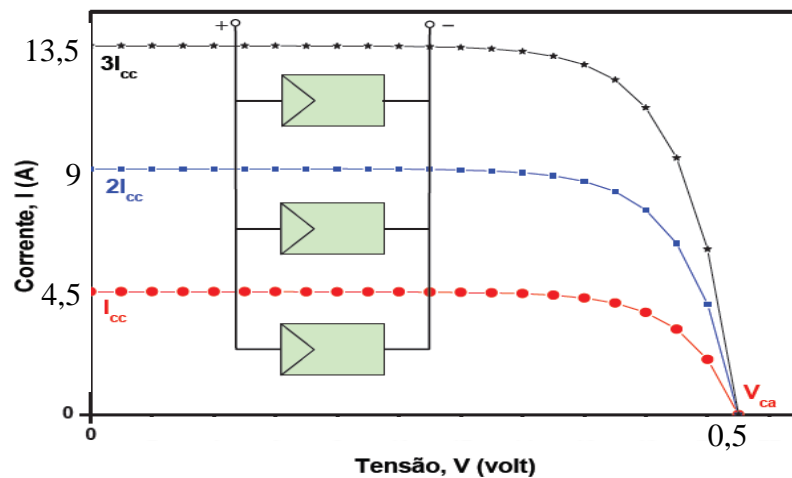
Fonte: Elaborada pelo autor.

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (2.3)$$

$$V = V_1 = V_2 = \dots = V_n \quad (2.4)$$

A Figura 2.11 corresponde à representação gráfica da curva característica da associação em paralelo (de acordo com as Equações 2.3 e 2.4) de três células fotovoltaicas.

Figura 2.11 - Curva de representação em paralelo, adaptado.



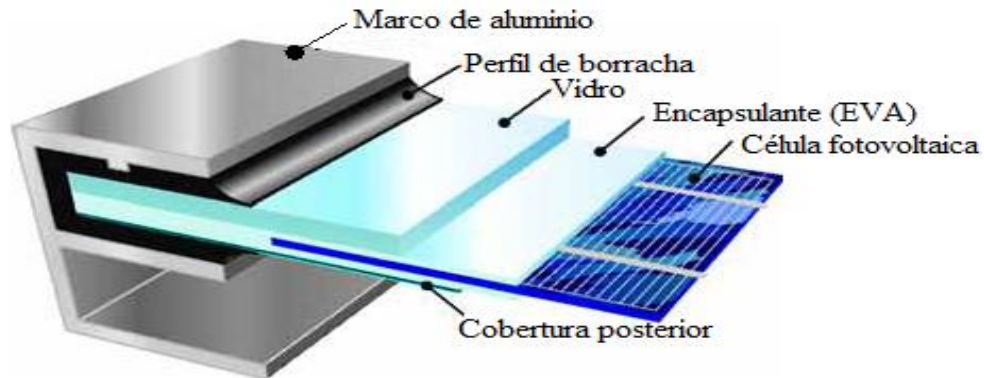
Fonte: Adaptado de [9].

Um módulo típico é formado por 30 a 36 células em série. Ele tem como função proteger as células de fatores atmosféricos e da umidade, dar rigidez mecânica ao sistema e isola-los eletricamente de contatos exteriores.

Internamente é composto de tiras metálicas que fazem as ligações entre as células e fornece contato com a caixa de conexões. Existe também um material encapsulante que reveste as células. Utiliza-se geralmente um polímero transparente e isolante (EVA- acetato de vinil-etila), Teflon e resina fundida. Na cobertura frontal, geralmente utiliza-se um vidro

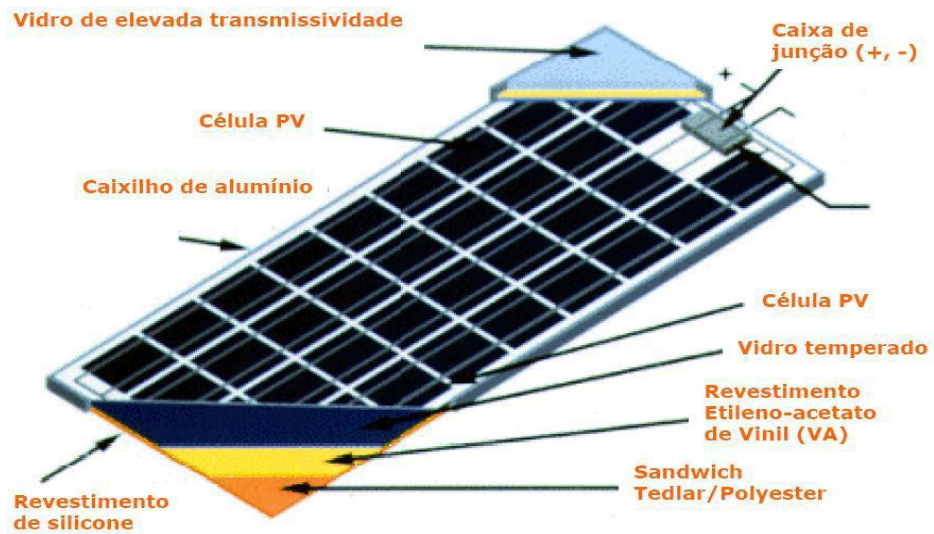
temperado e antirreflexivo e na posterior normalmente o polifluoreto de vinila, e por fim uma estrutura metálica que sustenta todo o módulo (ver Figuras 2.12 e 2.13) [4].

Figura 2.12 - Estrutura do módulo fotovoltaico.



Fonte: Adaptado de [9].

Figura 2.13 - Composição do módulo fotovoltaico.



Fonte: [6].

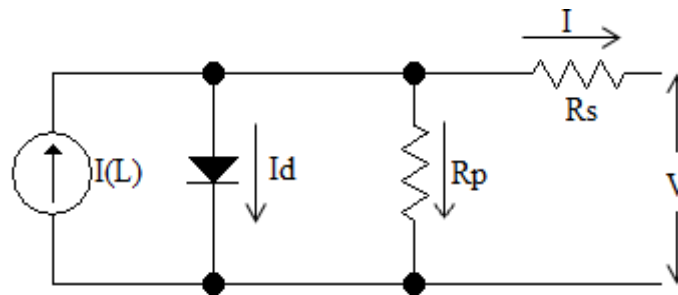
Todo esse revestimento, em conjunto com o suporte de alumínio, resulta em uma estrutura rígida e resistente ao manuseio e as intempéries. É importante que as células fiquem protegidas da umidade do ar para que possam manter suas características ao longo de sua vida útil que gira em torno de 20 anos.

2.3.1 Modelo dos Painéis Fotovoltaicos

Para compreender o comportamento eletrônico de uma célula fotovoltaica desenvolveu-se um modelo eletricamente equivalente, pois é possível representá-la a partir de seus parâmetros elétricos de saída (tensão e corrente) em função de fatores que influenciam na entrada como a temperatura da célula e a irradiância.

Nesse trabalho adota-se o modelo de um circuito equivalente real, possuindo uma fonte de corrente $I(L)$ que representa a fotocorrente a uma determinada irradiância, um diodo representando a junção P-N, I é a corrente fornecida pela célula solar a carga externa, V é a tensão nos terminais de saída, R_p e R_s resistências paralelo e série, intrínseca da célula. Pode-se observar na Figura 2.14 o circuito equivalente real de um módulo fotovoltaico.

Figura 2.14 - Circuito elétrico equivalente de um módulo fotovoltaico.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Aplicando a lei de Kirchhoff, tem-se a Equação 2.5 [22]:

$$I(L) = I_d + I_p + I \quad (2.5)$$

Onde:

I_p = É a corrente que atravessa a resistência em paralelo;

I_d = Corrente que flui através do diodo. Pode-se calcular através da Equação 2.6 [4]:

$$I_d = I_0 \cdot \left[e^{\left(\frac{q \cdot V_d}{m \cdot k \cdot T_c} \right)} - 1 \right] \quad (2.6)$$

Onde:

V_d = Tensão aplicada aos terminais do diodo;

m = Fator de idealidade do diodo (entre 1 e 2 para o Silício monocristalino);

k = Constante de Boltzmann ($k = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$);

q =Carga do elétron ($q=1.602 \times 10^{-19} \text{C}$);

T_c =Temperatura equivalente de operação da célula fotovoltaica ($T_c=298.15 \text{K}$);

I_o =Corrente de saturação reversa do diodo. Pode-se calcular através da Equação 2.7 [30].

$$I_o = I_{rr} \left(\frac{T_c}{T_{ref.}} \right)^3 \cdot \left[e^{\frac{q \cdot E_G}{m \cdot k} \cdot \left(\frac{1}{T_{ref.}} - \frac{1}{T_c} \right)} \right] \quad (2.7)$$

Onde:

$T_{ref.}$ =É a temperatura de referência;

I_{rr} =É a corrente de saturação reversa na temperatura de referência;

E_G =É a energia do *band-gap* do material da célula;

A fotocorrente $I(L)$ pode ser calculada de acordo com a Equação 2.8 [30].

$$I(L) = [Y_o + \alpha \cdot (T_c - T_{ref.})] \quad (2.8)$$

Onde:

α =Coeficiente de temperatura da corrente de curto-circuito, fornecido pelo fabricante através do datasheet.

O parâmetro Y_o pode ser calculado através da Equação 2.9 [30].

$$Y_o = \frac{G_a \cdot I_{sc}}{G_o} \quad (2.9)$$

Onde:

G_a =É a irradiância experimentada pela célula em um determinado instante.

I_{sc} =Corrente de curto-circuito (*Isc-short circuit current*), fornecida pelo fabricante;

A parcela da corrente I_p representa as correntes de fuga. Estas perdas são representadas pela resistência em série R_s e em paralelo R_p . A resistência em série deve-se à resistividade do corpo do material, a resistência da lâmina da camada difundida e a resistência dos contatos metálicos. A resistência em paralelo deve-se aos defeitos da junção que ocasionam correntes de perdas [10].

Analisando o circuito da Figura 2.14, tem-se que a corrente de fuga é dada pela Equação 2.10.

$$I_p = \frac{I \cdot R_s + V}{R_p} \quad (2.10)$$

Os principais índices elétricos funcionais de cada célula fotovoltaica são fornecidos pelo seu fabricante. A Tabela 2.1 resume as principais características.

Tabela 2.1 - Índices elétricos de uma célula fotovoltaica.

Símbolo	Característica
Voc	Tensão de circuito aberto (V).
Pmax.	Potência máxima (W).
Impp	Corrente no ponto de máxima potência (A).
Vmpp	Tensão no ponto de máxima potência (V).

Fonte: [4].

A partir do exposto pode-se calcular a corrente fornecida por um módulo fotovoltaico, pela seguinte Equação 2.11 [30].

$$I = n_p \cdot \left\{ I(L) - I_o \cdot \left[e^{\frac{q \left(\frac{V}{n_s} + \frac{I R_s}{n_p} \right)}{m \cdot k \cdot T_c}} - 1 \right] - \frac{V}{n_s} + \frac{I R_s}{n_p} \right\} \quad (2.11)$$

Onde:

n_s =Número de células conectadas em série do painel fotovoltaico;

n_p =Número de células conectadas em paralelo do painel fotovoltaico;

2.3.2 Curva Característica do Módulo Fotovoltaico

O entendimento desta curva é básico para avaliar como o módulo fotovoltaico comporta-se em diferentes condições de irradiação e de temperatura, cada condição gera uma curva específica. O eixo das ordenadas corresponde à corrente elétrica que o módulo fornece em Ampère e o eixo das abscissas corresponde à tensão elétrica que desenvolve em seus terminais.

A curva característica, (I x V) é definida pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas - Norma NBR 10899/TB-328) como a representação dos valores da corrente de saída, de um módulo fotovoltaico, em função da tensão para condições preestabelecidas de irradiância e temperatura.

Para o desenvolvimento de tal curva utilizou-se os parâmetros descritos anteriormente implementando as equações demonstradas. A fim de se obter um módulo fotovoltaico que pudesse ser implementado na modelagem, escolheu-se painel do fabricante *MPrime* por apresentar as características que considerou-se necessárias para o desenvolvimento correto do sistema solar fotovoltaico autônomo. A Tabela 2.2 mostra os parâmetros fornecidos pelo fabricante.

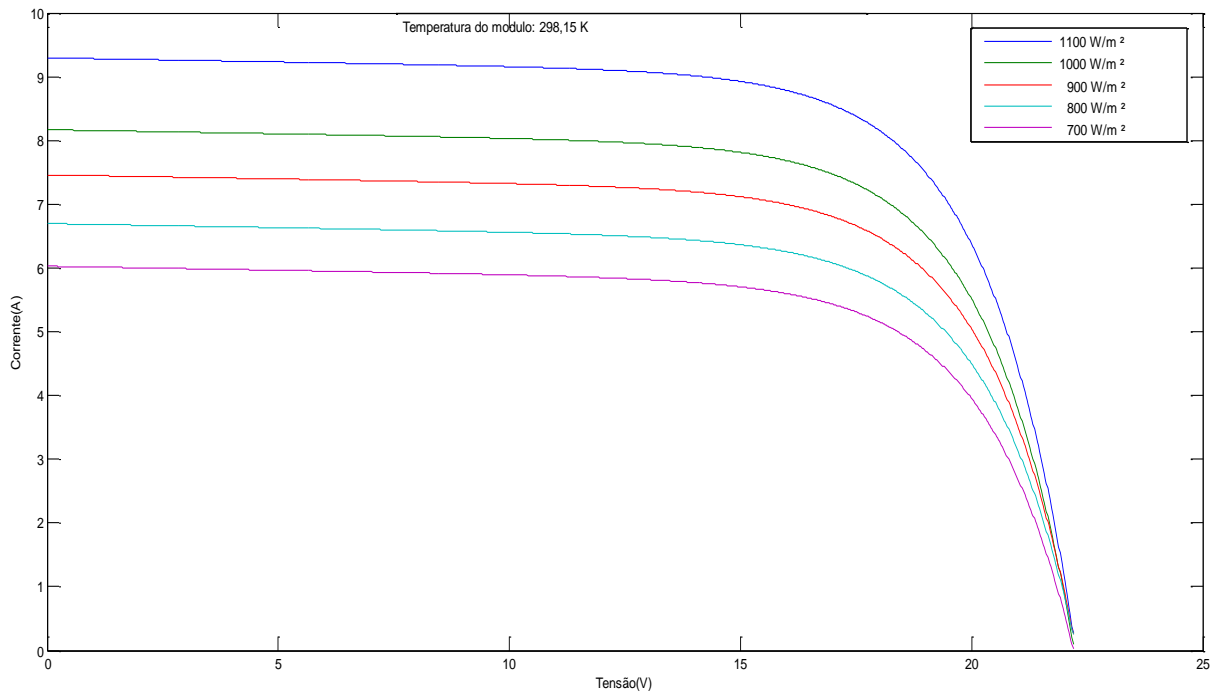
Tabela 2.2 - Ficha técnica do módulo M 140P-12V.

Parâmetros elétricos (1000 W/m^2 , 25°C temperatura da célula, $\text{AM}=1.5$).	
Pmax.	140 $\text{W}_p \pm 3\%$
Impp.	7.91 A
Vmpp.	17.7 V
Isc	8.17 A
Voc	22.2 V
$\alpha(\%)$	$0.034\%/^\circ \text{C}$
$\eta(\%)$	14.16

Fonte: [31].

Quando ocorre variação da intensidade da radiação solar sobre um módulo fotovoltaico ocorre também uma variação proporcional na corrente gerada por ele. A tensão de circuito aberto sofre poucas alterações, exceto para os casos quando a radiação é muito baixa, como pode-se observar na Figura 2.15, que manteve-se a temperatura padrão (25°C) constante.

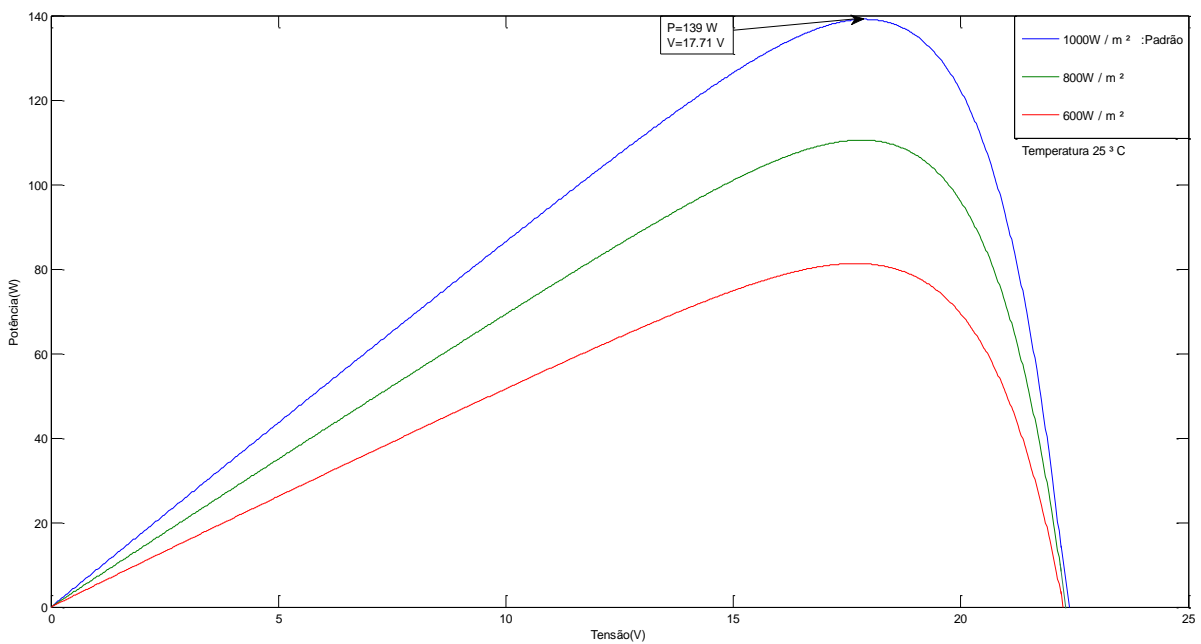
Figura 2.15 - Curva obtida para o módulo submetido a vários valores de irradiação.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com a variação da radiação ocorre um deslocamento para baixo do ponto de máxima potência, pode-se observar na Figura 2.16.

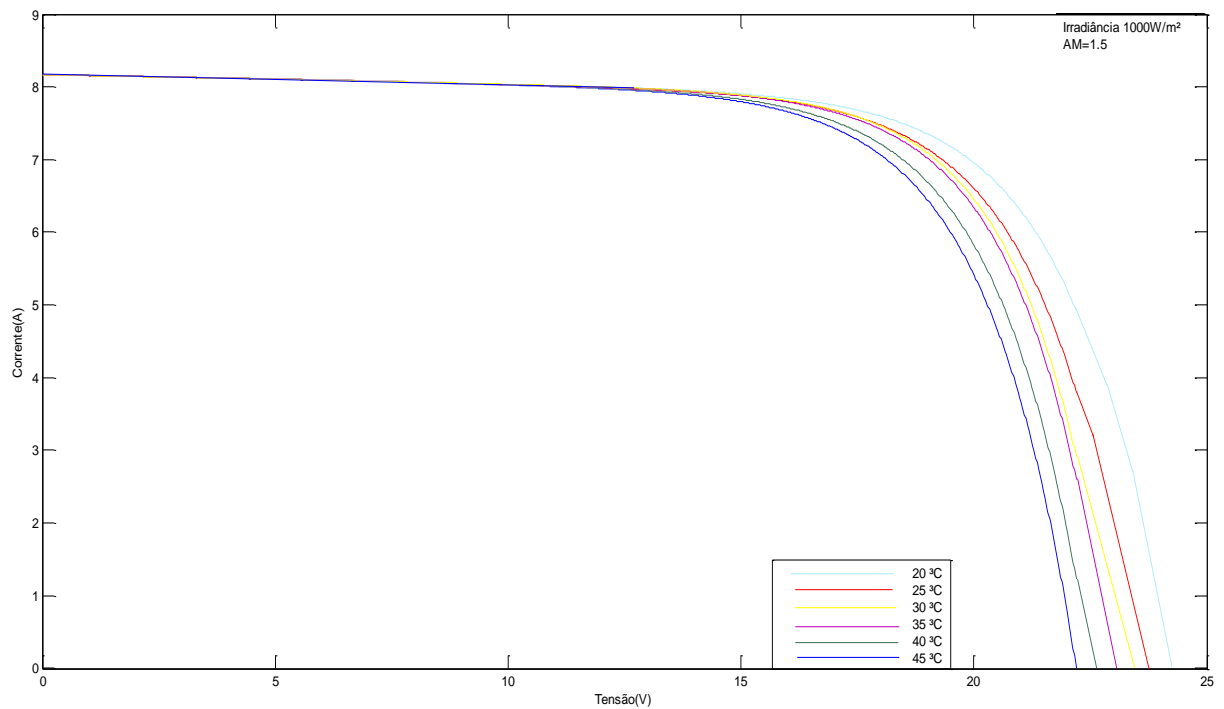
Figura 2.16 - Densidades de potência do módulo ensaiado, variação da irradiação.



Fonte: Elaborada pelo autor

A corrente gerada pelo módulo sofre poucas variações com o aumento da temperatura. Entretanto, a tensão de circuito aberto sofre uma diminuição significativa, (ver Figura 2.17).

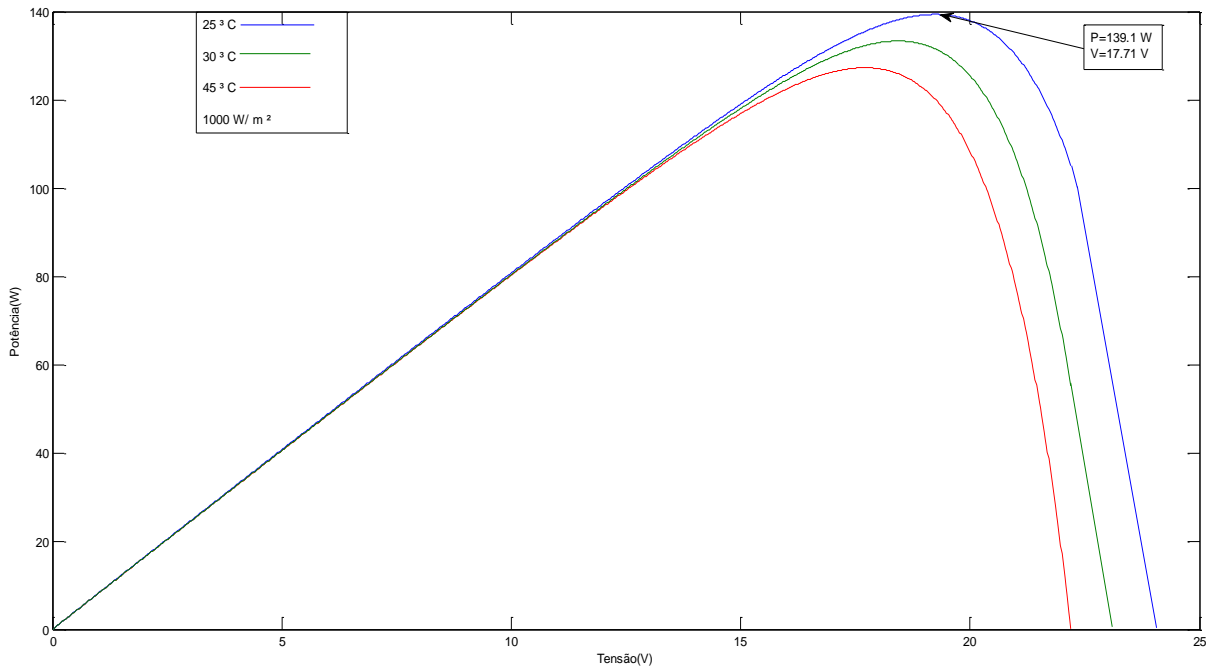
Figura 2.17- Curva obtida para o módulo submetido às várias temperaturas, a irradiação constante (1000 W/m^2).



Fonte: Elaborada pelo autor.

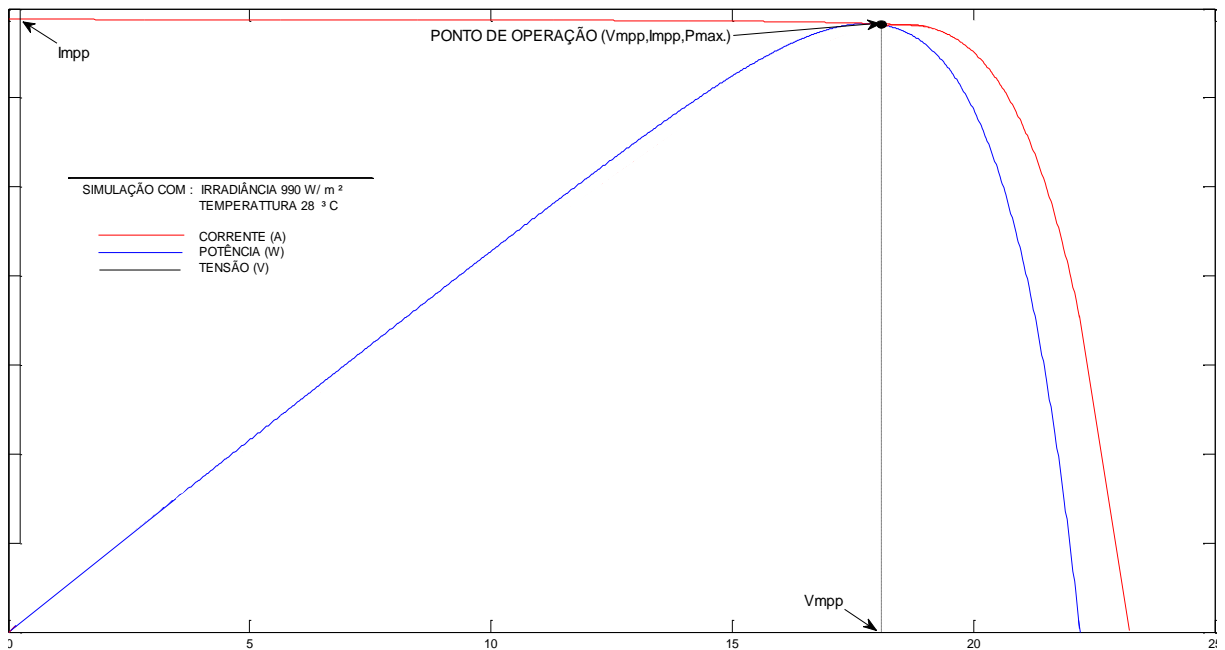
Com a variação da temperatura ocorre um deslocamento para baixo do ponto de máxima potência, como pode-se observar na Figura 2.18.

Figura 2.18 - Densidades de potência do módulo ensaiado.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 2.19 - Ponto de operação do módulo simulado.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir da análise da Figura 2.19, percebe-se que a máxima transferência de potência (Pmax.) ocorre em uma única combinação de valores de tensão e corrente, localizado no

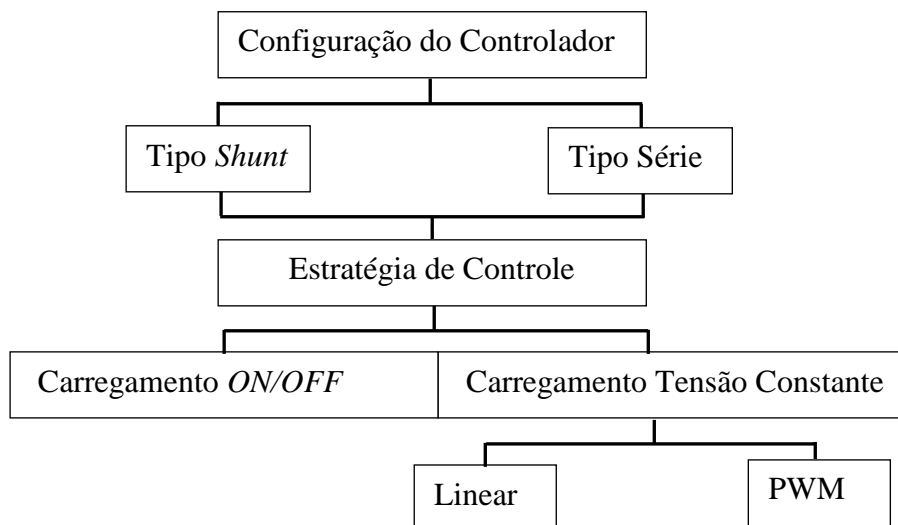
“joelho”(V_{mpp}, I_{mpp}). Ao dimensionar os painéis, será trabalhado nesse ponto de operação (seção 3.3.4).

2.4 Controladores de Carga

Este equipamento é o responsável por monitorar e controlar os processos de carga e descarga das baterias evitando sobrecargas ou descargas excessivas que possam danificá-las.

Existem basicamente dois mecanismos para controlar a carga fornecida a bateria a partir de módulos fotovoltaicos, chamados de regulagens paralelas (“*shunt*”) e série. Existem também dois métodos de controle de cargas, um denominado de “*ON/OFF*” e o outro de tensão constante, este podendo ser linear ou PWM. Esses métodos possuem a função de reduzir a corrente da carga entregue às baterias. A Figura 2.20 resume exposto.

Figura 2.20 - Configurações dos controladores de carga.



Fonte: Elaborada pelo autor.

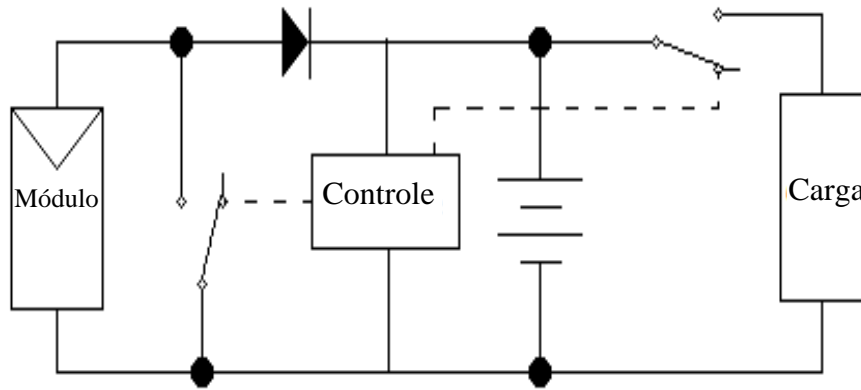
2.4.1 Controladores do Tipo *Shunt*

Os controladores de carga do tipo *shunt* evitam o excesso da corrente fornecida à bateria desviando a corrente dos módulos através de um “curto-circuito” que é proporcionado por um elemento de potência (Transistor ou MOSFET).

A fração de corrente a desviar depende do limite de tensão estabelecido para a bateria. O regulador *shunt* ótimo se comporta como uma carga variável de forma que a tensão na saída

do arranjo é mantida constante e igual ao valor limite [4]. A partir da Figura 2.21 pode-se observar o diagrama básico de um controlador do tipo *shunt*.

Figura 2.21 - Diagrama básico do controlador tipo *shunt*.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os controladores do tipo *shunt* podem ser:

2.4.1.1 Controlador *Shunt* (“ON/OFF”)

Neste tipo de controlador o painel fotovoltaico é desconectado da bateria quando a tensão sobre ela atinge a tensão de regulação. A partir deste ponto a bateria segue descarregando até atingir a tensão de reconexão, quando o elemento *shunt* religa o painel fotovoltaico a carga da bateria que ocorre de forma cíclica.

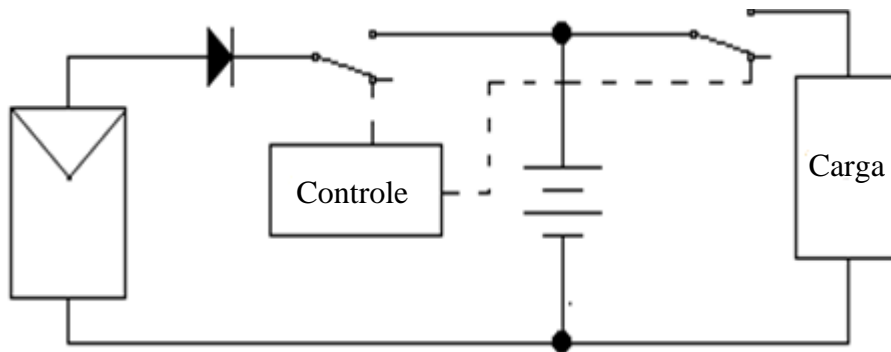
2.4.1.2 Controlador Baseado em Tensão Constante

Todas as decisões são tomadas com base no valor instantâneo da tensão nos terminais da bateria. Estes controladores possuem parâmetros idênticos, variando somente os valores aferidos em suas calibrações. Variam, fundamentalmente, quanto ao nível de sofisticação, qualidade e funções disponíveis [7].

2.4.2 Controlador Tipo Série

São controladores cuja regulagem é feita por um elemento série entre o módulo fotovoltaico e a bateria, como pode-se observar através da Figura 2.22, onde o elemento série opera de varias formas dependendo da complexidade e custo do controlador.

Figura 2.22 - Princípio de um controlador de carga série.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os controladores do tipo série podem ser:

2.4.2.1 Controlador Tipo Série ("ON/OFF")

Este tipo de controlador atua abrindo e fechando o circuito entre o módulo fotovoltaico e a bateria, à medida que, a tensão sobre ela atinge as tensões de regulação e de reconexão. O controlador do tipo série ("ON/OFF") opera de forma cíclica na medida em que a bateria vai se recarregando, o tempo de carga é mais rápido enquanto o ciclo diminui. Ele trabalha de forma idêntica ao *shunt*, diferindo apenas na forma de conectar e desconectar do módulo fotovoltaico da bateria.

2.4.2.2 Controlador do Tipo Série - Tensão Constante (Interrupção por Modulação de Pulso - PWM)

Este tipo de controlador trabalha interrompendo completamente a conexão entre o módulo fotovoltaico e a bateria, entretanto de forma pulsada relativamente rápida. Nesse sentido a dissipação é reduzida, visto que, o elemento série opera no corte ou saturação, mantendo uma tensão média constante em valores predeterminados em função da fase de carga da bateria. A Figura 2.23 apresenta um controlador com a tecnologia PWM.

Figura 2.23 - Controlador de carga.



Fonte: [31]

2.5 Inversores

Módulos solares fotovoltaicos geram energia em corrente contínua. Faz-se necessário o uso de um equipamento eletrônico conhecido como inversor CC-CA, para que se obtenha tensão em corrente alternada com características (frequência, conteúdo de harmônico, forma de ondas, etc.) específicas. Dependendo da aplicação existe uma distinção entre os inversores utilizados nos conectados à rede elétrica (inversores de rede), e nos sistemas autônomos (inversores isolados).

Como o presente trabalho visa o dimensionamento de um sistema solar fotovoltaico autônomo, descreve-se um inversor para essa finalidade.

2.5.1 Inversores Autônomos

Um inversor com aplicações em sistemas autônomos operam com tensões de entrada de 12, 24 e 48 (V) em corrente contínua que geralmente são convertidas em 120 ou 240 (V), em corrente alternada na frequência de 60 Hertz. Esse tipo de inversor deve satisfazer as necessidades de uma grande variedade de equipamentos elétricos.

No mercado existem basicamente três tipos comuns, de acordo com a forma de onda: quadrada, quadrada modificada ou retangular e senoidal pura. Em geral, todo inversor deve ser dimensionado com uma folga de potência (10 a 20%) para aumentar a confiabilidade e sua vida útil de 10 anos [7].

Na Tabela 2.3, resumem-se as principais características dos inversores.

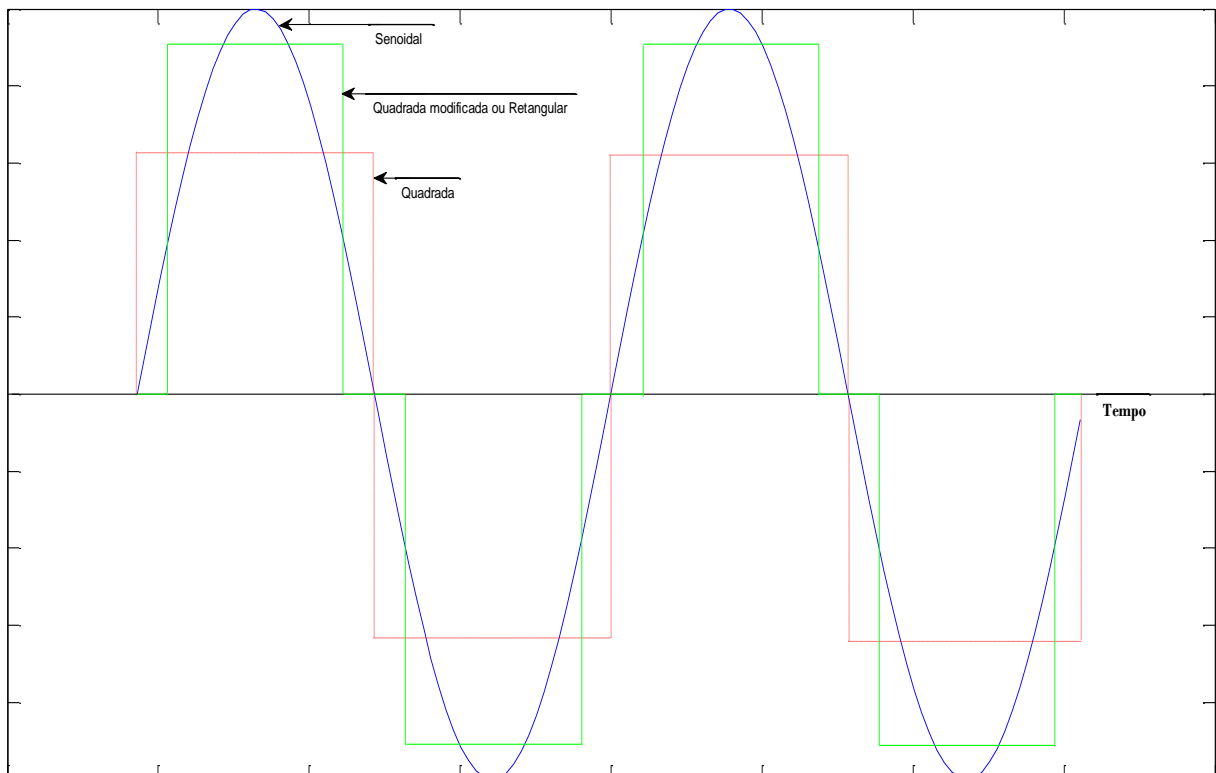
Tabela 2.3 - Características de inversores com diferentes formas de onda.

Inversor	Característica
Onda quadrada	Fornecem uma saída CA com harmônicos elevados e pequena regulação de tensão. São tipicamente mais baratos, porém, não devem ser usados para cargas indutivas, como motores elétricos.
Onda quadrada modificada	É um refinamento dos inversores de onda quadrada. São adequados para uma maior variedade de cargas, incluindo a maioria dos motores elétricos.
Onda senoidal	São geralmente mais caros; entretanto, se adequadamente projetados e dimensionados, são os que produzem uma tensão de saída e desempenho mais adequados.

Fonte: Adaptado de [7].

Na Figura 2.24 pode-se observar as formas de ondas dos inversores monofásicos.

Figura 2.24 - Formas de ondas típicas de um inversor monofásico



Fonte: Elaborada pelo autor.

2.6 Baterias

Em sistemas autônomos de geração de energia elétrica o banco de baterias é um item de grande importância no dimensionamento do sistema fotovoltaico. As baterias podem ser classificadas em:

2.6.1 Não Recarregáveis (Célula Primária)

São baterias que geralmente são utilizadas como fonte de energia de baixa potência, como por exemplo, baterias de relógios de pulso e calculadoras.

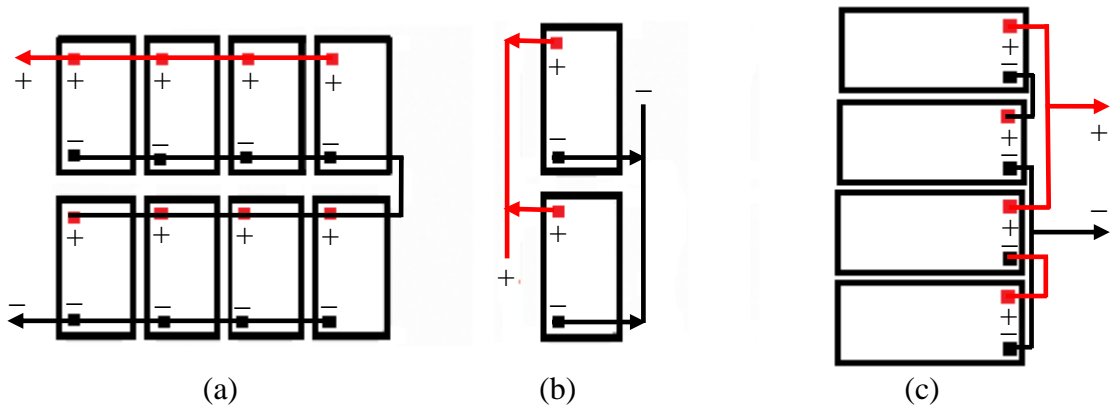
2.6.2 Recarregáveis (Célula Secundária)

São baterias que podem ser recarregadas várias vezes com auxílio de uma fonte de tensão ou corrente. As principais encontradas no mercado são as de chumbo-ácido e as de níquel-cádmio. Uma bateria de chumbo-ácido é constituída de células compostas de placas positivas com dióxido de chumbo (PbO_2) e uma placa negativa com chumbo (Pb) e de eletrólito de sulfúrico (H_2SO_4) dissolvido em água.

Para sistemas fotovoltaicos as baterias de chumbo-ácido respondem pela quase totalidade dos sistemas já instalados, as abertas para sistemas de grande porte e as seladas para pequeno porte. As baterias abertas são aquelas que necessitam de verificação periódica do nível de eletrólito, os eletrólitos são livres por isso as baterias devem trabalhar na vertical. Estes tipos de baterias têm descargas profundas, porém nunca deve ser descarregada na sua totalidade. Já as baterias fechadas, ou seladas possuem o eletrólito confinado no separador ou sob a forma de gel, também são conhecidas como sem manutenção porque não necessitam de adição de água. Elas resistem a uma completa descarga e são mais eficientes do que as de chumbo-ácido.

Para armazenar energia suficiente em um sistema fotovoltaico precisa-se agrupar várias baterias para que este conjunto atinja a voltagem nominal do sistema, como pode-se observar na Figura 2.25.

Figura 2.25 - Ligações de baterias: (a) série, (b) paralelo e (c) mista.



Fonte: Elaborada pelo autor.

As baterias recarregáveis podem ser divididas em:

Automotivas: são utilizadas em partidas de motores de automóveis, projetadas para descargas rápidas com elevadas taxas de corrente e com reduzidas profundidades de descargas.

Tração: são baterias que trabalham em regime de ciclos diários profundos com taxa de descargas moderadas.

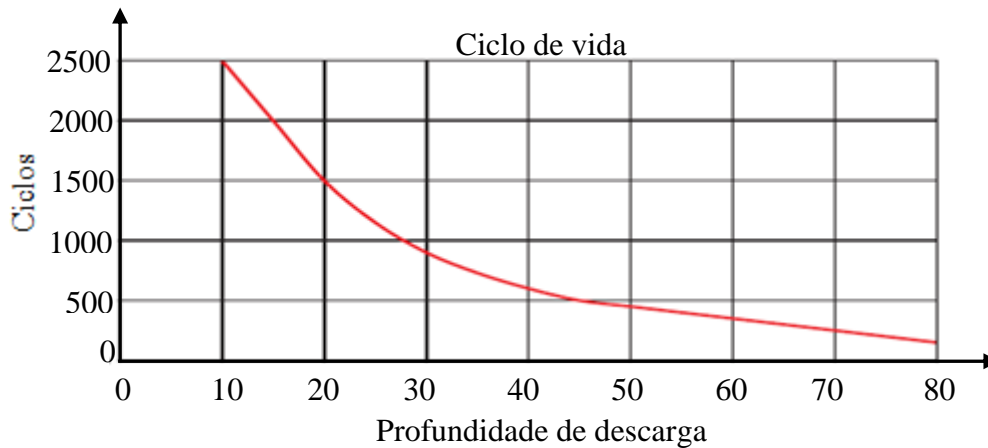
Estacionárias: nos sistemas fotovoltaicos utilizam-se as baterias estacionárias que são projetadas para alimentar equipamentos elétricos e eletrônicos, pois elas suportam muitos ciclos de descargas e recargas podendo ser descarregadas várias vezes.

A capacidade nominal (C) de uma bateria corresponde ao produto da intensidade de corrente de descarga constante (I) e do tempo de descarga (t). É quantificada de acordo com a corrente que ela consegue oferecer por hora, medida em Ampère-hora (Ah).

A capacidade de uma bateria depende fortemente do tempo de descarga. Com efeito, para pequenos tempos de descarga (ou seja, elevadas correntes de descarga), a capacidade da bateria diminui. Por outro lado, para elevados tempos de descarga, aumenta. Por este motivo, a capacidade nominal da bateria deve ser sempre especificada em função do tempo de descarga para o qual a capacidade nominal da bateria é expressa, conjuntamente com a respectiva corrente de descarga.

A Figura 2.26 apresenta o número de ciclos em função da profundidade de descarga, conforme o fabricante, esse tipo de bateria foram projetadas para uma vida útil superior a 4 anos a uma temperatura de 25°C e profundidade de descarga de 20 a 25%.

Figura 2.26 - Curva de capacidade de uma bateria.

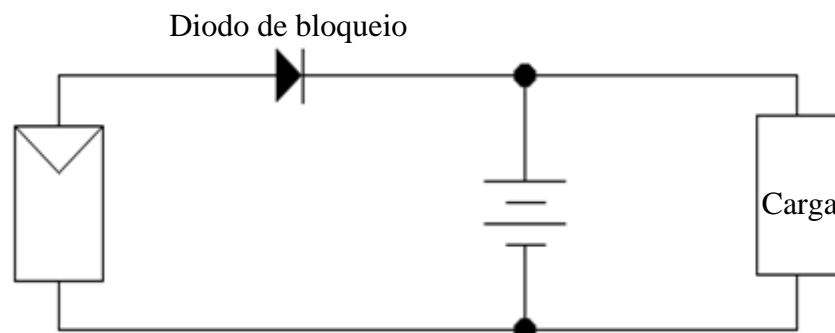


Fonte: [31].

2.7 Diodos de Bloqueio

Os diodos de bloqueio são um importante acessório para os sistemas fotovoltaicos. Eles são instalados em série com a saída do painel e o banco de baterias (ver Figura 2.27) com o intuito de impedir que os módulos fotovoltaicos atuem como carga para as baterias, exemplo, à noite ou quando o céu esta nublado em que ocorre indisponibilidade de geração de energia. Outra função é proteger o circuito contra uma possível inversão de polaridade durante a instalação.

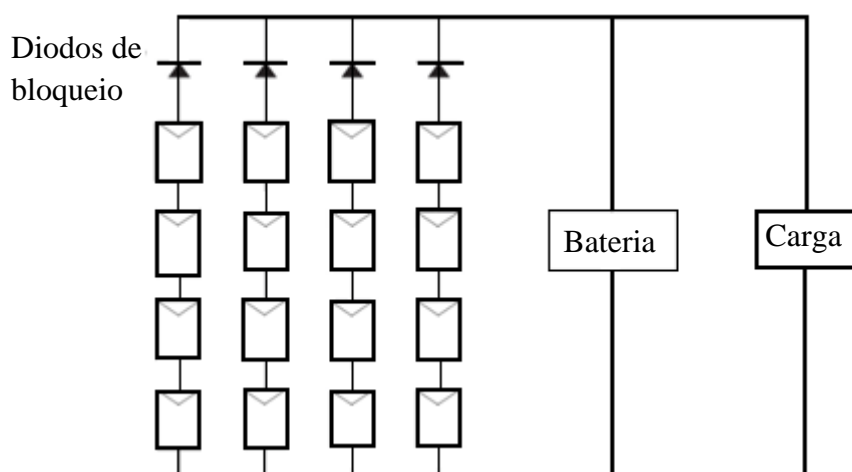
Figura 2.27 - Diodo de bloqueio em série com painel fotovoltaico.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se na Figura 2.28 que o diodo de bloqueio também são responsável por evitar que o sistema em que houver conexão em paralelo de módulos ou fileiras (conexão série de módulos), ocorra fluxo de corrente de uma fileira com maior tensão para uma de menor tensão.

Figura 2.28 - Diodos de bloqueio evitando o fluxo de corrente entre as fileiras do arranjo.



Fonte: [7].

2.8 Cabos Elétricos

Para atingir bons níveis de qualidade dos geradores fotovoltaicos deve-se dimensionar o cabeamento elétrico de forma correta com um mínimo de perdas aceitáveis. O dimensionamento do lado CC é mais crítico por apresentar possibilidades de diferentes configurações e variações de corrente em seus circuitos alterando os cabos elétricos de uma situação para outra. As aplicações tem mostrado que limites de perda de tensão razoáveis são: 1% entre controlador e baterias; 3% para qualquer outro trecho individual; e 5% de perda total (desde o módulo até o usuário final) [7].

Na instalação elétrica de um sistema fotovoltaico deve-se apenas usar cabos que cumpram os requisitos para este tipo de aplicação, uma vez que em corrente contínua, os cabos elétricos estão sujeitas à ação de forças de natureza eletromagnética e também ao aquecimento por efeito Joule. Na Tabela 2.4 tem-se os parâmetros elétricos para o dimensionamento das cablagens.

Tabela 2.4 - Parâmetros elétricos para o dimensionamento das cablagens.

Parâmetros elétricos	Símbolo	Unidade
Comprimento do cabo	L	m
Secção transversal do cabo	S	mm ²
Condutividade elétrica ($\sigma_{Cu}=56$)	σ	m/($\Omega \cdot \text{mm}^2$)
Tensão de trabalho CC	U	V
Queda de tensão (3% CC; 1.5% AC).	e	V
Potência	P	W

Fonte: Elaborada pelo autor.

A equação que permite calcular a dimensão da seção transversal dos cabos é descrita por:

$$S = \frac{L \cdot P}{\Omega \cdot e \cdot U^2} \quad (2.12)$$

Onde:

Ω =Caracteriza a resistividade do condutor;

2.9 Tipos de Sistemas Fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos podem ser divididos em três categorias distintas: conectado à rede, isolados ou híbridos. Cada um deles poderá ser de complexidade variável, onde o sistema além dos módulos deverá ter uma unidade de controle de potência e também possuir ou não uma unidade de armazenamento.

2.9.1 Sistemas Conectados à Rede

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFVCR) podem ser de grande porte, produção acima de 1 MW, ou de pequeno porte, instalado ou integrado em telhados ou fachadas de edificações urbanas.

Para sistemas de pequeno porte, toda a energia gerada é injetada na rede de distribuição que opera como acumulador de energia elétrica. Pode-se observar na Figura 2.29 um sistema com essas características, onde a energia excedente é injetada diretamente na rede de distribuição.

Figura 2. 29 - Sistema conectado à rede elétrica.



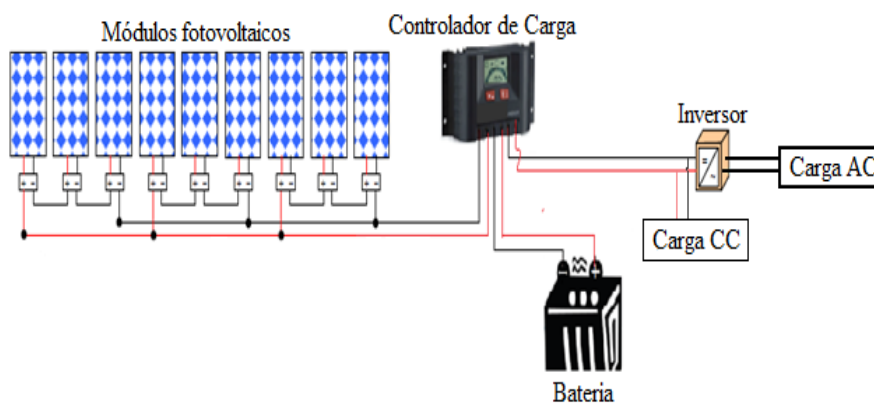
Fonte: [13].

2.9.2 Sistemas Isolados

Os sistemas fotovoltaicos autônomos (SFVA) ou isolados são geralmente utilizados onde não há abastecimento de energia elétrica. Neste tipo de sistema o aproveitamento de energia solar precisa ser ajustado a demanda energética, já que a energia produzida não corresponde a procura pontual de um consumidor, daí torna-se necessário um sistema de armazenamento (baterias). Um SFVA é composto por módulos fotovoltaicos ou painel, controladores de carga e baterias. Estes sistemas podem atender a cargas CC, ou carga CA. No caso de carga CA precisa-se de um inversor de tensão. Na Figura 2.30 apresenta-se uma configuração geral de um sistema autônomo.

Nestes tipos de sistema os controladores de carga possui uma vida útil de 10 anos. Além disso, são utilizados para prolongar a vida útil das baterias, que são de 4 anos.

Figura 2.30 - Configuração geral de um sistema autônomo de energia.

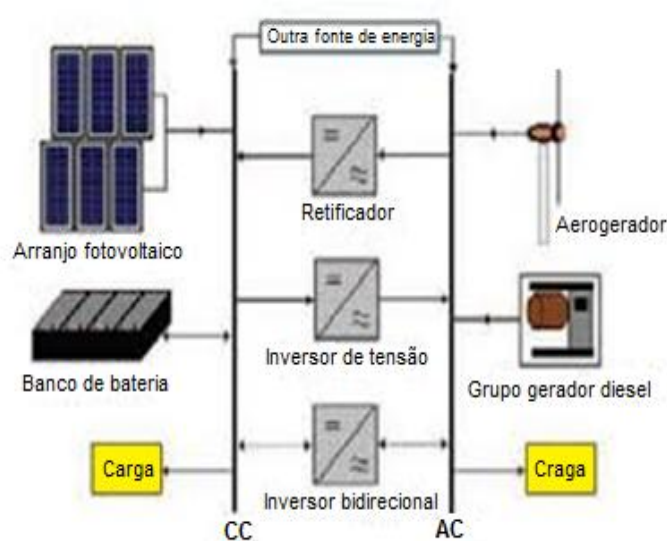


Fonte: Elaborada pelo autor.

2.9.3 Sistemas Híbridos

Sistemas híbridos são sistemas que combinam duas ou mais fontes de energia. Geralmente elas são de origem renovável, tais como energia eólica, energia da biomassa, energia solar, etc, podendo ser integrada ou complementada com fontes de produção ditas convencionais, que consomem combustíveis fósseis, tais como os grupos geradores a diesel. Na Figura 2.31 apresenta-se um sistema híbrido de geração de energia elétrica.

Figura 2.31 - Configuração geral de um sistema híbrido de energia.



Fonte: [13].

3 A ILHA NAZARÉ – CARACTERÍSTICAS DA VILA

O Rio Maracapucú é um dos principais rios do município de Abaetetuba-PA, sua extensão é dividida em duas partes: “Maracapucú-miri e Maracapucú-grande”, cujas ilhas são Nazaré e Guajará respectivamente.

A Ilha Nazaré, na qual foi feito o estudo, estima-se uma população de 1.278 moradores entre jovens, adultos e crianças. Suas principais fontes de renda são: agricultura, artesanato e manejo do açaí.

Existem cerca de 580 residências distribuídas ao longo da ilha, das quais 490 possui geração de energia elétrica própria através de grupos geradores¹.

¹ Dados fornecidos por uma líder comunitária da Ilha Nazaré.

O estudo, levantamento e dimensionamento do Sistema Solar Fotovoltaico deu-se em uma vila dentro da Ilha Nazaré localizada as suas margens, distante da cidade de Abaetetuba-PA aproximadamente 1 km, em linha reta, como pode-se observar na figura 3.1.

Figura 3.1 - Localização da vila.



Fonte: [33].

Na vila existem sete residências distribuídas uniformemente como observa-se no APÊNDICE A. Elas fazem parte de um programa do governo federal onde é obrigatório seguir o mesmo padrão e dimensões. A figura 3.2 mostra uma das casas do projeto localizada na vila.

No mesmo APÊNDICE A, ilustra as dimensões da mesma casa, que daqui em diante será chamada de “casa base” ou “casa de referência” para o estudo.

Figura 3.2 - Casa da vila (casa de referência).



Fonte: Elaborada pelo autor.

A vila possui uma população de dezesseis homens, doze mulheres e duas crianças, com renda mensal de cada família de R\$ 1.064.

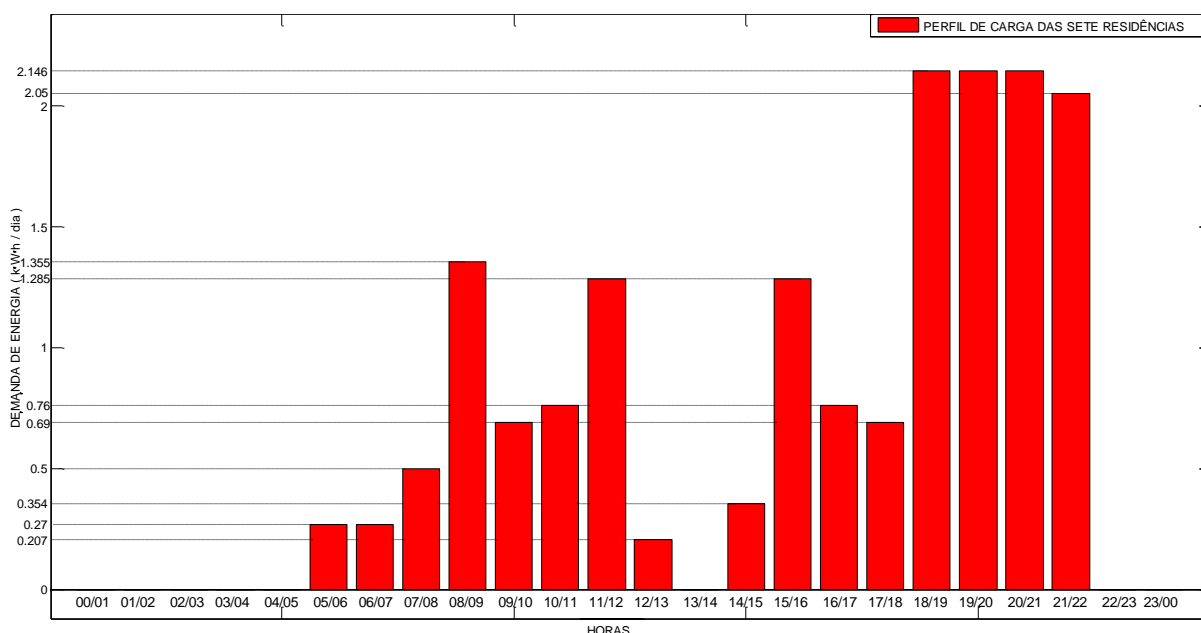
3.1 Levantamento de Carga da Vila

Realizou-se o levantamento da carga no mês de outubro de 2013. Para a determinação do consumo de energia elétrica fez-se um levantamento dos equipamentos, lâmpadas e outros aparelhos. O APÊNDICE B mostra a tabela com todos os equipamentos utilizados nas sete residências da vila bem como a carga instalada.

Para traçar o perfil de carga efetuou-se um monitoramento realizado entre os meses de novembro (2013) a fevereiro (2014), utilizou-se o auxílio de um morador da vila (voluntário), cujas aquisições de dados se deram por meio de uma planilha em que foram anotados o consumo diário de combustível (litros/hora), equipamentos ligados em determinados períodos, consumo de energia por equipamento e tempo de funcionamento do grupo gerador.

Após o tratamento dos dados adquiridos chegou-se ao seguinte perfil de carga da vila como pode-se observar na Figura 3.3.

Figura 3.3 - Estimativa do perfil de carga da vila.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Essas estimativas foram realizadas nos horários compreendidos entre 5h00min da manhã e as 22h00min. Vale ressaltar que a curva obtida representa somente os dados para os períodos mencionados e horários pontuais de consumo. Entretanto, como a vila sofre poucas modificações (quanto à carga instalada) pode-se estender essa estimativa para o período de um ano. O consumo diário é cerca de 13.112 kWh/dia, considerando o uso uniforme durante os dias da semana.

3.2 Grupo Gerador

A geração de energia elétrica ocorre por meio de um grupo gerador diesel monofásico de 12,5 kVA (10kW) que fornece uma tensão de saída de 110V ou 220 V. O combustível é comprado pelos próprios moradores, mas somente para ser consumido a noite (das 18h00min as 22h00min), o restante do período cada morador que deseja ter energia elétrica, compra novamente o diesel para atender as suas necessidades.

Segundo os moradores cada família paga por semana quinze reais (R\$ 15,00) para a compra do diesel, somente para o período noturno. O preço do litro do combustível é de três reais (R\$ 3,00), comprado na localidade. No restante do período, estima-se que cada família compra um litro e meio de diesel por dia. Existe também o óleo lubrificante cujo consumo é três litros por mês comprado a quatorze reais (R\$ 14,00) o litro. Além disso, existe o custo de

manutenção do grupo gerador, de cinquenta reais (R\$ 50,00) pagos ao mecânico a cada dois meses e quinhentos reais (R\$ 500,00) anuais para a troca do “kit” do motor NB 10. A Figura 3.4 mostra-nos o grupo gerador da vila.

Figura 3.4 - Grupo gerador da vila



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para verificar o consumo de combustível teórico para atender a vila utilizou-se a equação proposta por Skarstein e Uhlem [13].

$$F = 0.246. Pd + 0.08415. Pn \quad (3.1)$$

Onde:

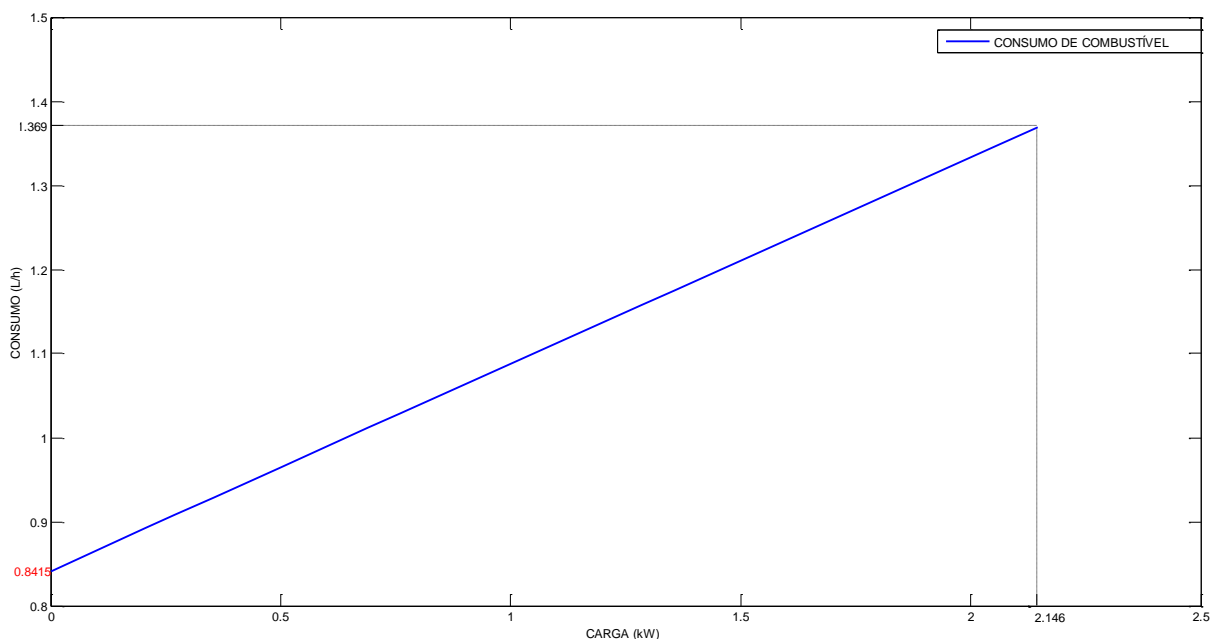
F=Consumo de combustível (litros/hora);

Pn=Potência nominal do gerador (kW);

Pd=Potência efetivamente demandada pela carga em um instante qualquer (kW) [13].

Desta forma, traçou-se a curva de consumo de combustível para a vila na Ilha Nazaré como observa-se na Figura 3.5.

Figura 3.5 - Curva de consumo de combustível do grupo gerador da vila.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se através da Figura 3.5 que o grupo gerador apresenta um consumo de combustível de 0,8415 L/h quando opera a vazio ($P_d=0$). Operando a plena carga atinge o valor máximo 1,369 L/h. Esse tipo de geração de energia elétrica é estimado com uma vida útil de 10 anos.

O grupo gerador é acionado várias vezes ao longo do dia. Vale ressaltar que a vila possui uma regra interessante, cada equipamento tem seu horário de funcionamento. Segundo um morador “não liga-se bomba d’água e máquina de bater açaí ao mesmo tempo”.

3.3 Dimensionamento

O dimensionamento do sistema fotovoltaico a ser projetado será para a casa de referência, já que existe também uma uniformidade entre as cargas instaladas em cada casa, isso permite concluir que o sistema poderá ser replicado para as demais. Entretanto, um dos principais motivos a não se dimensionar o sistema de geração de energia fotovoltaica para vila toda é o aumento no capital a ser investido no projeto, pois se deveriam comprar cabos elétricos para rede de distribuição, postes, e a construção de uma casa de comando.

Para o dimensionamento do sistema solar fotovoltaico para a casa base o levantamento da carga deu-se através do procedimento descrito no item 3.1. Fez-se o levantamento das cargas identificando-se a potência e o tempo de uso dos eletrodomésticos (ver Tabela 3.1).

Tabela 3.1- Equipamentos utilizados e consumo estimado de carga.

Equipamento	Número	Horas de uso/dia (ti)	Potência (W)	Energia diária (Wh/dia)
Aparelho de som	1	1	150	150
Bomba d'água	1	1/4	370	92,5
Freezer	1	4	100	400
Lâmpada	1	4	20	80
Lâmpada	2	4	15	120
Lâmpada	2	3	14	84
Maquina de lavar	1	0,215	290	41,4
Maquina de bater açaf	1	0,5	180	90
Receptor	1	4,75	10	47,5
Televisor 29"	1	4,75	74	351,5
Total			$\sum_{i=1}^n P_i = 1.252\text{kW}$	$E_D = 1.456,9\text{kWh/dia}$

Fonte: Elaborada pelo autor.

$$E_D = \sum_{i=1}^n P_i \cdot t_i \quad (3.2)$$

Onde:

E_D = Representa a energia total consumida por dia;

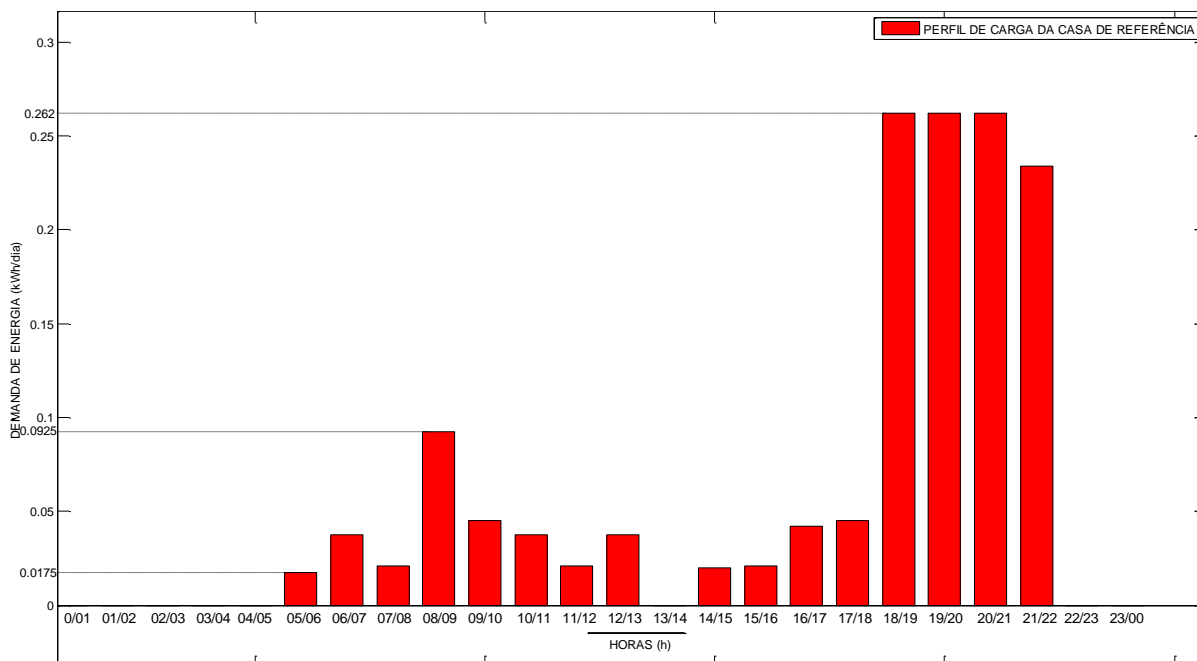
P_i = Potência dos equipamentos;

t_i = Corresponde ao intervalo de uso de um equipamento por dia (h);

n = Número de equipamentos;

Assim, a quantidade total de energia necessária para garantir a alimentação diária de todos os equipamentos é dada pela Equação 3.2 [6]. Portanto, o sistema a ser dimensionado deve gerar no mínimo 1.456,9 kW/dia.

Figura 3.6 - Perfil de carga da casa de referência.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.1 Dimensionamento do Inversor

Para o dimensionamento do inversor é necessário saber a potência que o mesmo terá de fornecer de maneira permanente. Para isso considera-se o pior caso, ou seja, todos os equipamentos ligados simultaneamente. De acordo com Tabela 3.1 o inversor deverá possuir uma potência real mínima de 1.252 kW. Entretanto, como ele fornece sua potência considerando uma carga puramente resistiva, dimensiona-se considerando um fator de potencia (f_p) igual a 1 para a potência nominal das lâmpadas, do aparelho de som, do televisor e do receptor. Para os motores monofásicos de baixa potência como a bomba d'água, freezer, máquina de lavar e de bater açai, considera-se um fator de potência de 0,6.

Devido a carga possuir motores monofásicos, deve-se atentar para a corrente de partida (I_D) e adotar um inversor com saída senoidal pura. Considerando-se a bomba d'água como a carga com maior potência requerida, dimensiona-se levando em consideração a sua corrente de partida ($I_D=5$ A, ver APÊNDICE B), pois quando a mesma estiver em uso a máquina de bater açai, freezer e máquina de lavar não estarão ligados, dessa forma a potência aparente de partida da bomba (P_{AP}) será suficiente para suprir todos os outros equipamentos de motores monofásicos.

Será solicitado do inversor uma potência maior para a partida da bomba, conforme mostra-se através da Equação 3.3 [32].

$$P_{AP} = \frac{V_i \cdot I_D}{f_p} \quad (3.3)$$

$$P_{AP} = \frac{120V \cdot 5A}{0,6} = 1.000VA$$

$$P_{BOMBA} = 1000 \cdot 0,6 = 600W$$

Onde:

V_i = Tensão de saída do inversor;

Para uma situação crítica, por exemplo, quando a bomba d'água for acionada com as demais cargas consideradas puramente resistivas, tem-se então:

$$P_T = P_L + P_{TV} + P_R + P_{AS} + P_{BOMBA} \quad (3.4)$$

$$P_T = 78 + 74 + 10 + 150 + 600$$

$$P_T = 0,912 \text{ kW}$$

Onde:

P_T =Potência máxima exigida pelo sistema;

P_L =Potência das lâmpadas;

P_{TV} =Potência do televisor;

P_R = Potência do receptor;

P_{AS} =Potência do aparelho de som;

P_{BOMBA} =Potência da bomba;

Especifica-se o inversor do fabricante Xantrex modelo Xpower com as características indicada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2- Características do inversor Xantrex.

Modelo	Xpower
Potência contínua de saída	1.500W
Potência de surto	3.000W
Tensão de entrada	12V _{CC}
Máxima eficiência (EF)	95%
Formato de onda de saída	Senoidal pura

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a situação de pior caso, $P_T = 912 \text{ W}$, o inversor atende com confiança as especificações. Pode-se observar através da Equação 3.5 [32].

$$P_U = \frac{P_T}{P_{INVS.}} \cdot 100 = 60,8\% \quad (3.5)$$

Onde:

P_U = Potência utilizada;

$P_{INVS.}$ = Potência contínua de saída do inversor;

Desta forma o inversor estará trabalhando com uma folga de cerca de 39% da sua autonomia, o que garante uma boa eficiência, além de uma reserva para o caso de novas cargas adicionadas ao sistema.

3.3.2 Dimensionamento do Banco de Baterias

De acordo com a Tabela 3.1 o sistema solar fotovoltaico deve gerar no mínimo 1.456,9 Wh/dia para atender a demanda da casa de referência. Entretanto, o inversor possui uma eficiência máxima de 95%, portanto o valor a ser gerado diariamente pelo sistema na entrada do inversor será dado pela Equação 3.6 [32].

$$P_{SF} = \frac{1.456,9 \text{ Wh/dia}}{0.95} = 1.533 \text{ Wh/dia} \quad (3.6)$$

Onde:

P_{SF} = Potência a ser fornecida pelo sistema solar fotovoltaico;

Será adotado uma autonomia (N) de dois dias com objetivo do sistema suprir a energia em tempos de pouca ou nenhuma radiação.

Para o cálculo da capacidade útil (C_U) do banco de baterias, para dois dias de autonomia, tem-se a Equação 3.7 [32].

$$C_U = \frac{N \times P_{SF}}{V_{O/S}} = \frac{2 \times 1533 \text{Wh/dia}}{12 \text{ V}} = 255,5 \text{ Ah} \quad (3.7)$$

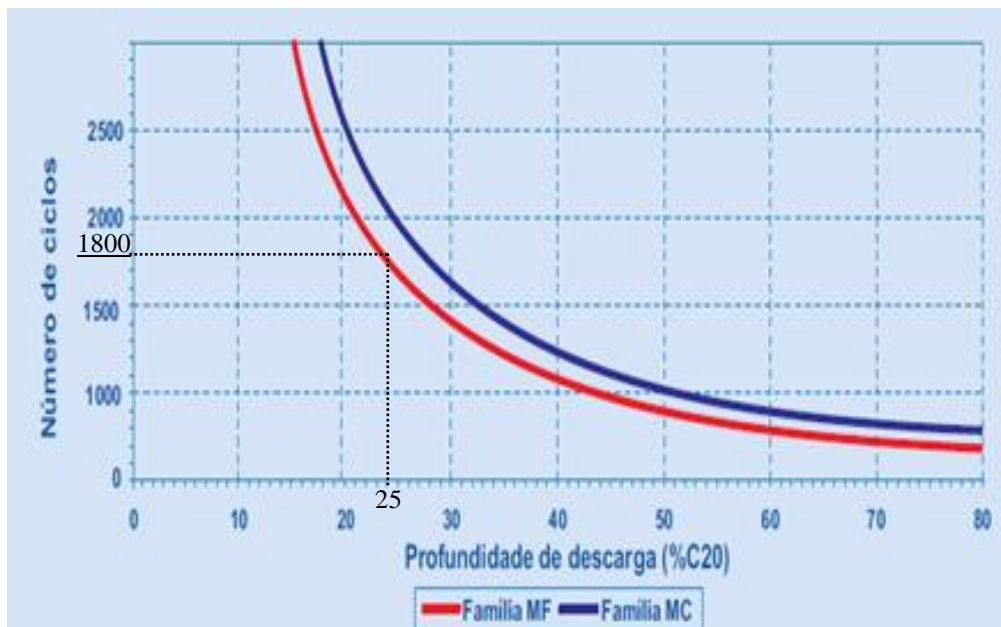
Onde:

$V_{O/S}$ = Tensão de operação do sistema;

Conforme indicado na Figura 2.26 quanto maior a profundidade da descarga (P_D) da bateria, menor será seu tempo de vida útil, para dois dias de autonomia e profundidade de descarga no fim de 50%, temos em torno de 25% de profundidade de descarga por dia.

Será adotada a bateria estacionária do fabricante Moura, modelo Moura Clean 12MF150 ($C_N=150 \text{ Ah}$), onde a possibilidade de ciclos em função da profundidade de descarga mostrada na Figura 3.7.

Figura 3.7 - Número de ciclos em função da profundidade de descarga.



Fonte: [31].

De acordo com a Figura 3.7 com uma profundidade de descarga um pouco mais de 20% tem-se uma projeção de 1.800 ciclos de carga e descarga.

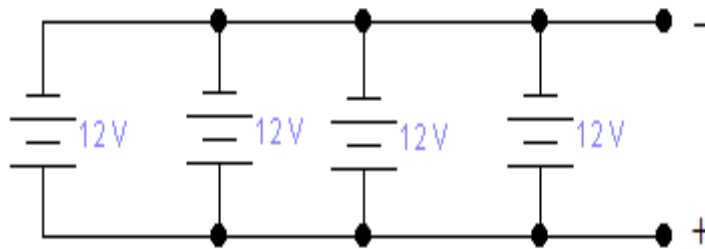
Para definir a capacidade real (C_R) do banco de baterias utiliza-se a Equação 3.8 [32].

$$C_R = \frac{C_U}{P_D} = \frac{255,5}{0,5} = 511 \text{ Ah} \quad (3.8)$$

Como o sistema irá trabalhar com tensão de $12V_{CC}$ as baterias serão conectadas em paralelo. Assim, o número de baterias (N_B) para essa configuração será definido pela Equação 3.9 [32]. A Figura 3.8 mostra-nos o diagrama das baterias estipuladas.

$$N_B = \frac{C_R}{C_N} = \frac{511\text{Ah}}{150\text{Ah}} \cong 4 \quad (3.9)$$

Figura 3.8 - Diagrama das baterias Moura Clean 12MC150 para o sistema.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.3 Estimativa de Potencial Solar

A cidade de Abaetetuba não possui dados da radiação solar para validar o estudo nem tão pouco a ilha Nazaré. Porém, por localizar-se próxima a capital do estado do Pará (Belém) cerca de 52 km em linha reta e possuir uma variação de latitude e longitude muito pequena em relação a mesma, utilizou-se os dados da radiação solar da capital do estado do Pará.

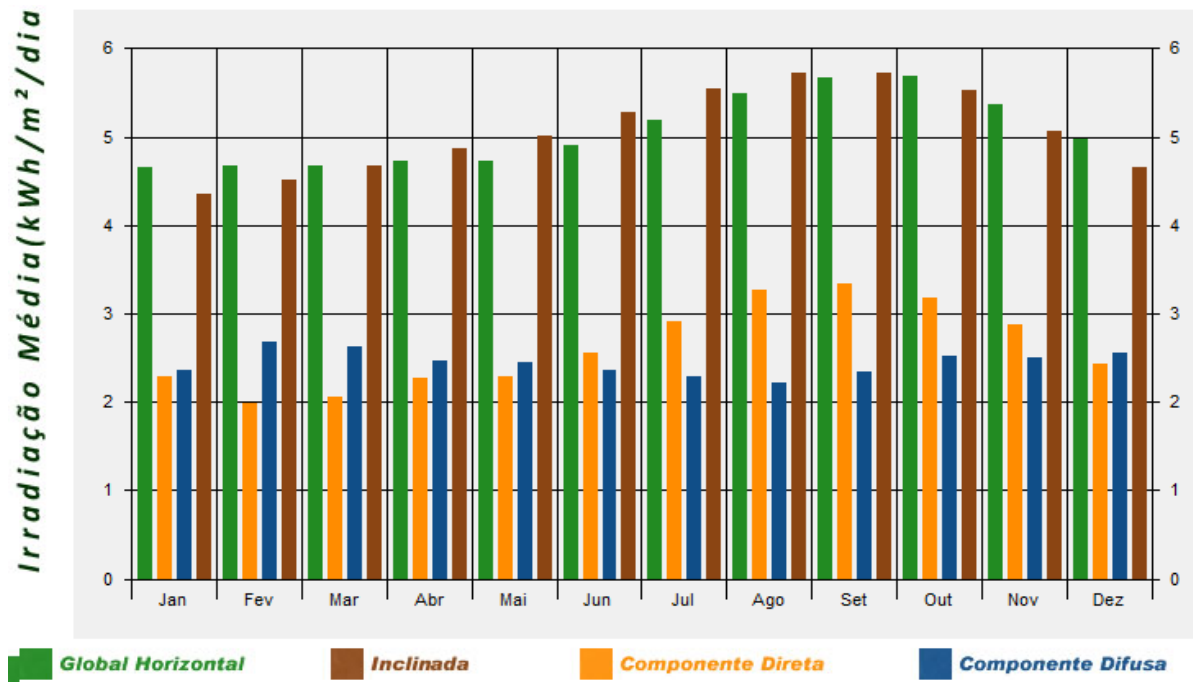
Figura 3.9 - Distância aproximada entre a vila e Belém-PA.



Fonte: [33].

A estimativa de potencial solar foi realizada através do *Software* Radiasol 2 da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). De acordo com ele a cidade de Belém - PA apresenta a seguinte irradiação média com inclinação sugerida pelo *Software* para os painéis fotovoltaicos de 10^0 no período de um ano (ver Figura 3.10).

Figura 3.10 - Irradiação média de Belém-PA.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Pode-se observar através da Figura 3.10 que existe uma ótima disponibilidade de recurso solar (irradiação inclinada) o ano todo para região comparada com outras cidades do globo terrestre, como por exemplo, Lisboa (Portugal) que apresenta uma irradiação média de 4,73 kWh/m²/dia [9]. Pode-se concluir que nessas condições o projeto é viável.

Tabela 3.3 - Irradiação média de Belém-PA.

Irradiação Média (kWh/m ² /dia)				
Mês	Global	Direta	Difusa	Inclinada
1	4,65	1,97	2,4	4,37
2	4,67	2,01	2,49	4,49
3	4,67	2,15	2,51	4,66
4	4,72	2,47	2,39	4,86
5	4,72	2,51	2,5	5,01
6	4,91	2,76	2,52	5,28
7	5,19	3,3	2,25	5,55
8	5,49	3,33	2,41	5,74
9	5,68	3,29	2,44	5,74
10	5,69	2,98	2,56	5,54
11	5,37	2,9	2,13	5,03
12	4,98	2,25	2,37	4,63

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.4 Dimensionamento dos Painéis

Adotou-se o módulo fotovoltaico do fabricante MPrime modelo M 140P-12V por apresentar-se como o melhor painel que se adequa a simulação realizada na seção 2.3.2. As características do módulo apresentou-se na Tabela 2.2.

Como a tensão do sistema solar fotovoltaico adotada para trabalho de 12 V_{CC} os painéis serão conectados somente em paralelo. A quantidade de módulo (M_P) será definida pela seguinte Equação 3.10 [32].

$$M_P = \frac{\frac{P_{SF}}{V_{mpp}}}{I_{mpp} \times EF \times \text{Irradiação inclinada(pior caso)}} = \frac{\frac{1533}{17,7}}{7,91 \text{ A} \times 0,95 \times 4,37} \cong 3 \quad (3.10)$$

Portanto será necessário a instalação de três módulos fotovoltaicos.

3.3.5 Dimensionamento do Controlador de Carga

O controlador de carga deverá suportar a corrente de curto circuito do painel. Pode-se calcular a corrente de curto circuito total através da Equação 3.11 [32].

$$I_{SC \text{ TOTAL}} = M_P \times I_{SC} = 3 \times 8,17\text{A} = 24,51 \text{ A} \quad (3.11)$$

Portanto esta deverá ser a menor corrente que o controlador deverá suportar. Adota-se o controlador de carga do fabricante Morningstar modelo ProStar PS30 12V mostrado na Figura 2.23 que possui a tecnologia PWM.

Tabela 3.4 - Características do controlador de carga.

Modelo	ProStar PS30
Corrente nominal de carga	30 A
Tensão do sistema	12/20V
Temperatura de operação	-40 °C a + 60 °C
Consumo próprio	22mA

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.6 Custo Estimado para os Componentes do Sistema Fotovoltaico Autônomo

Os custos dos componentes solares (painéis, inversor, bateria e controlador de carga) para o projeto realizou-se através de uma pesquisa pelo próprio autor onde buscou-se o preço médio de cada componente. A pesquisa deu-se nos dias 25 e 26 /02/ 2014. A Tabela 3.5 mostra os preços encontrados no mercado.

Tabela 3.5 - Custo estimado dos equipamentos.

Equipamento	Quant.	Modelo	Fabricante	Preço unit.	Total
Inversor	1	PROwatt 1500	Xantrex	R\$ 1.699,00	R\$ 1.699,00
Bateria estacionaria	4	Clean Nano 12MC150	Moura	R\$ 675,00	R\$ 2.700,00
Painel solar	3	M 140-12	MPrime	R\$ 699,00	R\$ 2.097,00
Controlador de carga	1	ProStar PS30	Morningstar	R\$ 490,00	R\$ 490,00
Total					R\$ 6.986,00

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.7 Softwares de Simulação do Sistema Solar Fotovoltaico

Desenvolveu-se a simulação e dimensionamento do sistema solar fotovoltaico com base no exposto nos itens: 3.3.1 à 3.3.5. Para validar a simulação seria necessário montar o sistema solar fotovoltaico na vila e monitorá-lo por um tempo longo que permitisse afirmar que realmente o sistema atenderia as demandas de energia. Sendo impossível realizar esta tarefa no presente trabalho, optou-se por simular em dois diferentes programas desenvolvidos por entidades com renome na área. Os resultados comparados não permite dizer que um programa é melhor que o outro ou ainda comparar a precisão de um com relação ao outro, mas permite verificar que os valores obtidos estão correlacionados. Os programas utilizados para realizar as simulações foram o *Homer* e *PVSize*.

Para realizar as comparações dos valores obtidos foram sintetizados dados da radiação de mesma base, como visto anteriormente, do *Radiasol 2*, para a entrada no *Homer* no recurso solar. O *PVSize* já está integrado com os dados da radiação do *Radiasol 2*.

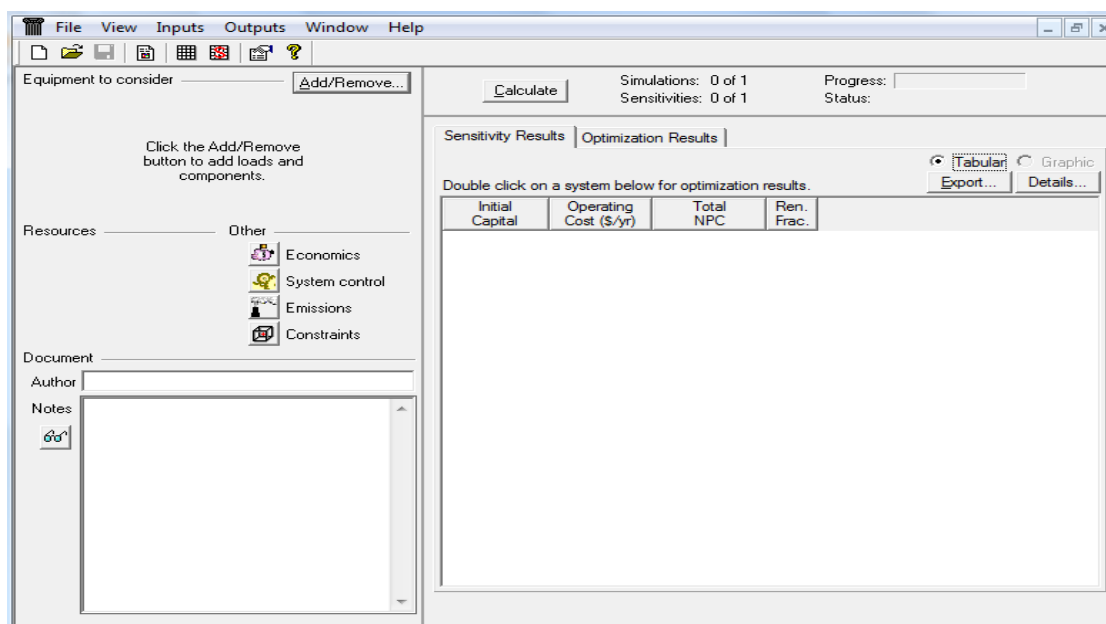
Adotou-se esse procedimento devido à aleatoriedade dos métodos para gerar estes dados, sendo que a comparação com dados de radiação diferentes seria inconsistente para o trabalho.

3.3.7.1 Software Homer

O *Software Homer* é um programa de otimização de micro centrais de energia elétrica. Para simular no *Homer*, deve-se alimenta o modelo com dados de entrada, os quais descrevem as opções de tecnologia, custos de componentes e a disponibilidade de recursos. O *Homer* usa entradas para simular diferentes configurações do sistema, ou combinações de componentes, e gera resultados que pode-se visualizar através de uma lista de possíveis configurações, as quais são ordenadas pelo custo presente líquido.

O programa *Homer* é fornecido sem custos por *Homer Energy*, através de uma licença exclusiva com o Laboratório Nacional de Energias Renováveis (NREL) por um período de quatorze dias para teste. Na Figura 3.11 tem-se aparência do programa *Homer*.

Figura 3.11 - Aparência do programa *Homer*.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.7.2 Software PVSize

O *PVSize* é um *software* livre desenvolvido pela UFRGS. Ele possibilita o usuário a dimensionar a instalação e os componentes dos sistemas fotovoltaicos através de uma interface intuitiva. O programa solicita ao projetista todos os dados da instalação de consumo e as características dos equipamentos disponíveis para a geração de energia elétrica. Como resultado de simulação horaria simplificada, apresenta a quantidade de módulos, baterias e

bitola mínima de condutores necessários. Na Figura 3.12 tem-se a aparência do programa PVSize.

Figura 3.12 - Aparência do programa PVSize.



Fonte: Elaborada pelo autor.

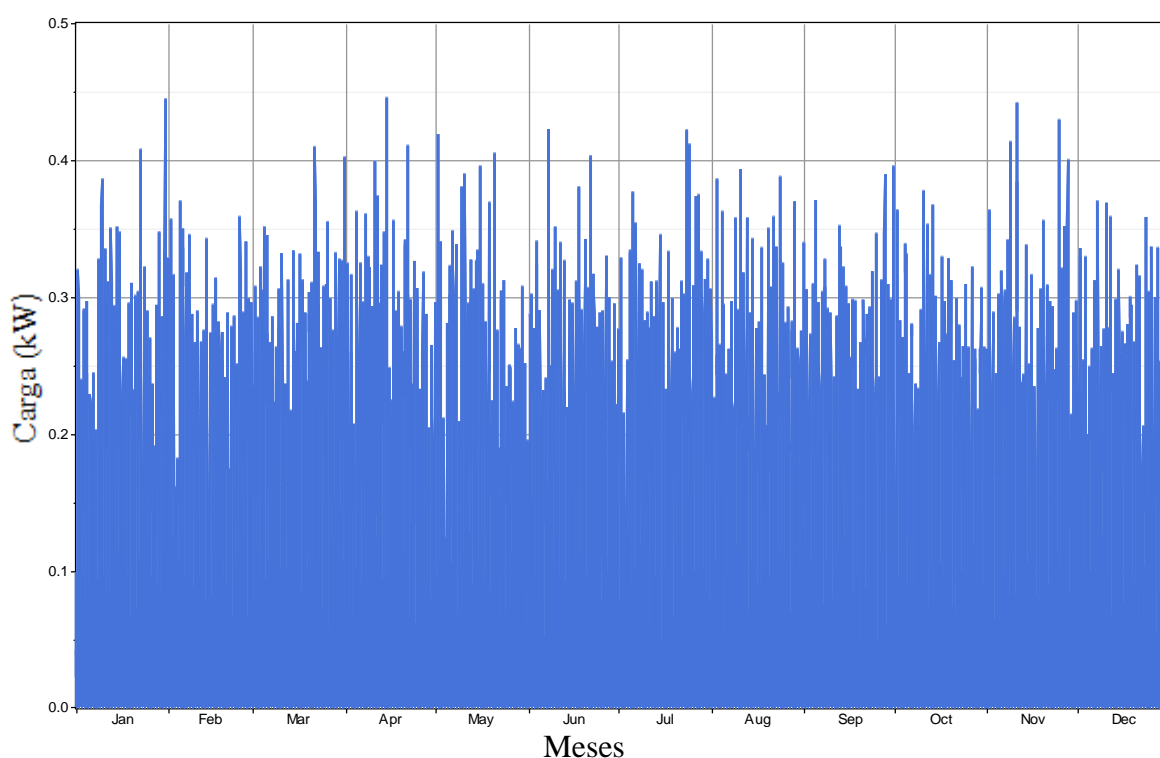
3.3.8 Procedimento de Simulação

3.3.8.1 Homer

Inicia-se a simulação clicando no botão adicionar/remover equipamento (*Add/Remove*), como pode-se observar na Figura 3.11. No APÊNDICE C (ver Figura 1) tem-se a tela para a escolha da carga.

Devido a grande quantidade de dados obtidos na simulação, apenas os gráficos serão documentados em detalhes neste trabalho.

Mostra-se na Figura 3.6 o perfil de carga da casa de referência que será a entrada para a simulação do *Homer*. Primeiro define-se a carga e a tensão em que os equipamentos da casa trabalham, (ver APÊNDICE C, Figura 2). A Figura 3.13 mostra o perfil de carga diária gerada pelo *Homer* para a casa de referência.

Figura 3.13 - Perfil de carga gerado pelo *Homer*

Fonte: Elaborada pelo autor.

No mesmo botão escolhe-se o tamanho do módulo. No APÊNDICE C (ver Figura 3) encontra-se a tela de entrada de variáveis dos painéis solares fotovoltaicos.

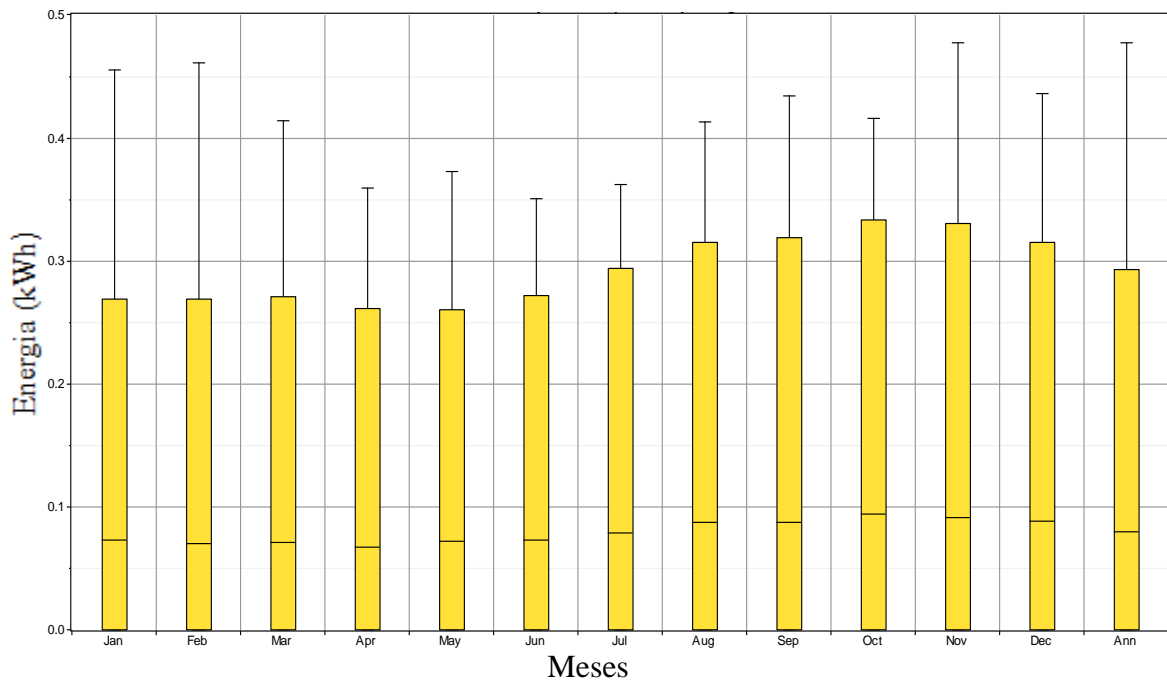
O valor do dólar convertido para a moeda corrente foi definido pela sua cotação na bolsa de valores no fechamento do dia 25/02/2014 sendo sua equivalência de R\$ 2,59, para a entrada “custos”. O custo de operação e manutenção dos painéis foi estimado, de acordo com as literaturas consultadas, é de 1% do capital investido [13].

Como dito anteriormente os dados do recurso solar será gerado pelo Radasol 2. No APÊNDICE C (ver Figura 4) pode-se observar a tela de entrada do recurso solar.

Ao clicar novamente no botão e inserindo os outros equipamentos (bateria, inversor) o sistema é então definido. Onde considerou-se o custo do inversor da seguinte maneira (inversor + controlador de carga), já que o *Homer* usa estes dois equipamentos integrados em um só. No APÊNDICE C verificam-se as telas para essas entradas do inversor (Figura 5) e para a bateria (Figura 6). A aparência da configuração do sistema é vista no mesmo APÊNDICE (Figura 7).

A Figura 3.14 mostra a variação da energia gerada pelos módulos fotovoltaicos. Os valores obtidos são função dos dados horários de irradiância incidente no painel com 10^0 de inclinação (com face voltada para o norte geográfico).

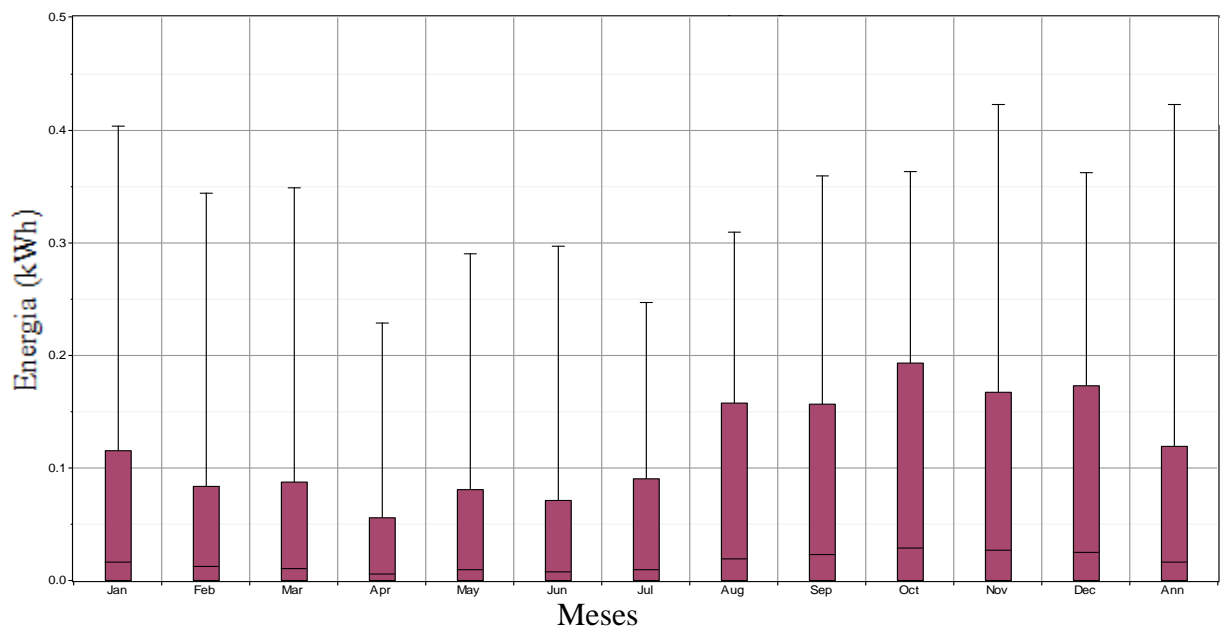
Figura 3.14 - Energia gerada pelos painéis fotovoltaicos, média mensal.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A geração de energia ocorre sempre maior que o pico de consumo do perfil de carga (ver Figura 3.6). A energia excedente em média mensal é observada na Figura 3.15.

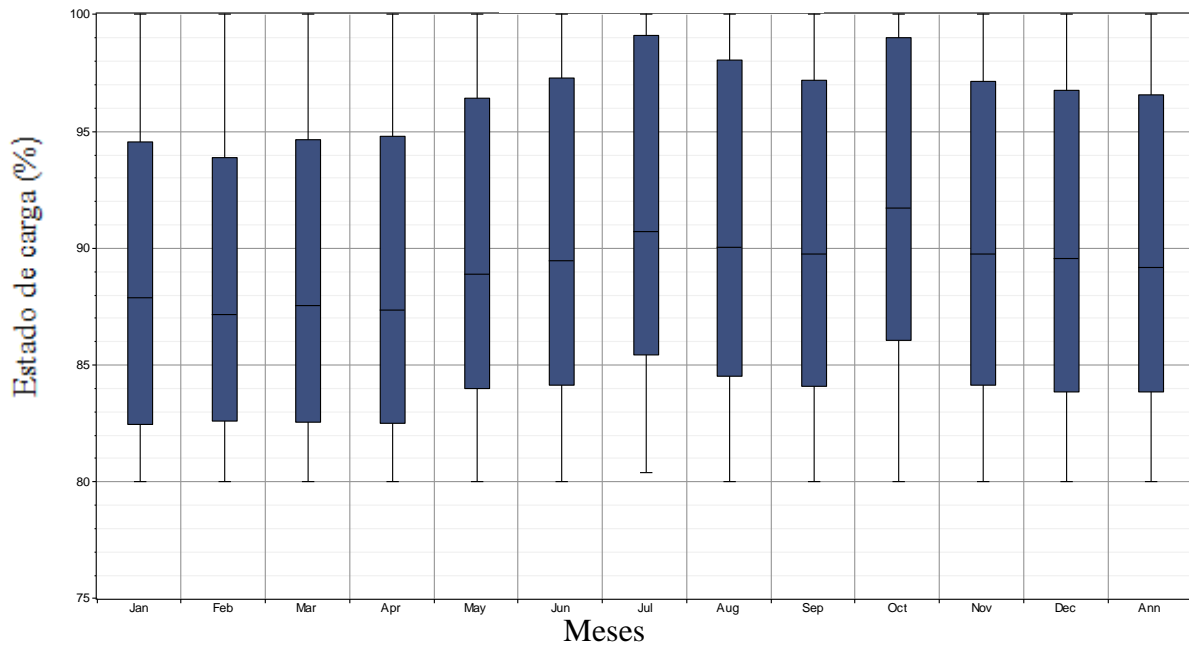
Figura 3.15 - Energia excedente gerada pelos painéis fotovoltaicos, média mensal.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Deve-se ter uma atenção especial para o estado de descarga da bateria já que não pode ultrapassar os 20% como definiu-se no projeto. A Figura 3.16 mostra-nos o estado de carga do banco de baterias.

Figura 3.16 - Estado de carga do banco de baterias.

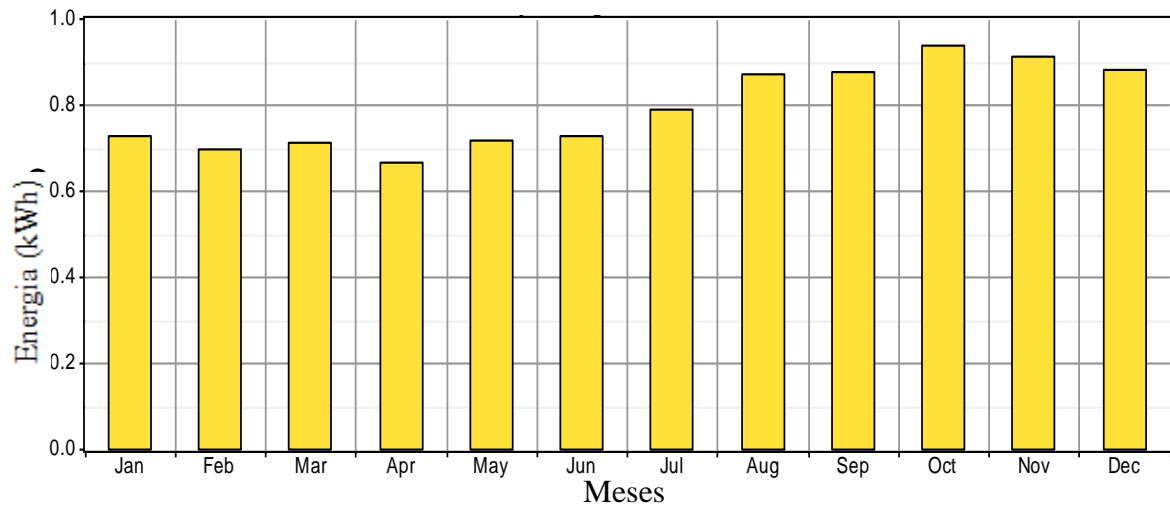


Fonte: Elaborada pelo autor.

Pode-se observar na Figura 3.16, como foi dimensionado, que o banco de bateria atende a necessidade de geração de energia para a casa de referência. Além disso, possui um estado de carga acima de 80% o que aumenta a vida útil dos acumuladores de carga.

A produção total de energia pelo sistema é mostrada na Figura 3.17.

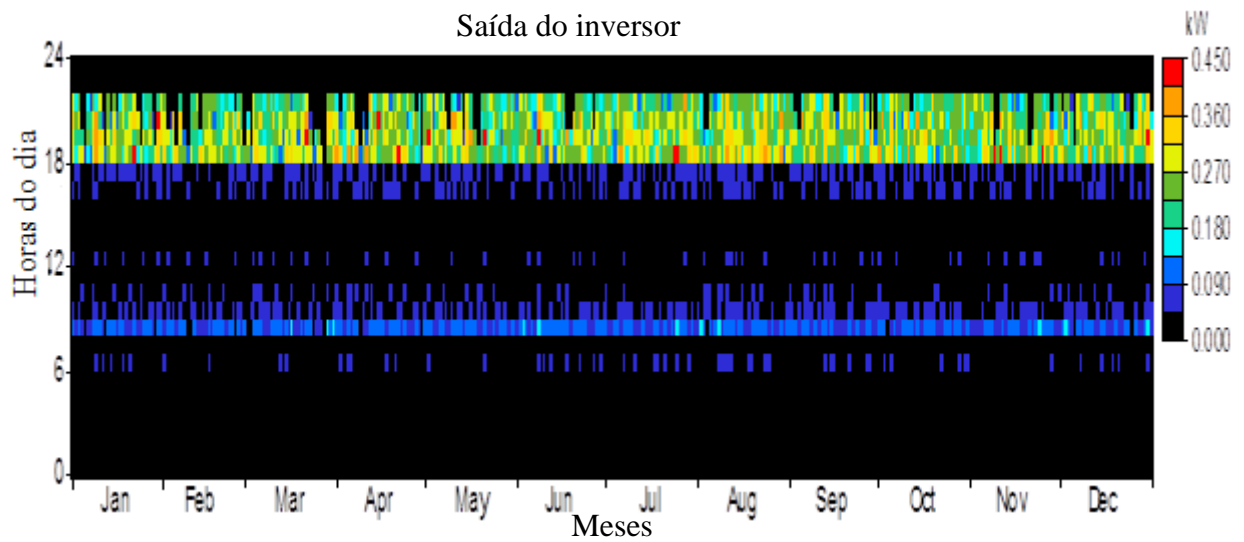
Figura 3.17 - Produção total de energia gerado pelo sistema solar fotovoltaico.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os horários de maior trabalho requisitado do inversor e mostrado na Figura 3.18 onde os pontos em vermelho indicam a maior potência requerida.

Figura 3.18 - Condições de trabalho do inversor



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.8.1.1 Conclusão da Simulação Realizada pelo Homer

A principal motivação da utilização dos gráficos disponibilizados pelo *software* é a visualização de tendências gerais do sistema. Uma vez que os gráficos são baseados apenas no ponto ótimo em determinadas condições isso mostra se o sistema irá ou não atender a demanda de energia naquele ponto em que o sistema está operando. Esses valores consideram todas as combinações possíveis com as entradas fornecer o menor custo que seja compatível com as especificações técnicas definidas. Segundo a simulação realizada pelo *Homer* os componentes descritos nos itens 3.31 a 3.3.5 atendem aos requisitos de geração de energia para a casa de referência com boa segurança. A Tabela 3.6 mostra-nos os componentes sugeridos pelo *Homer*.

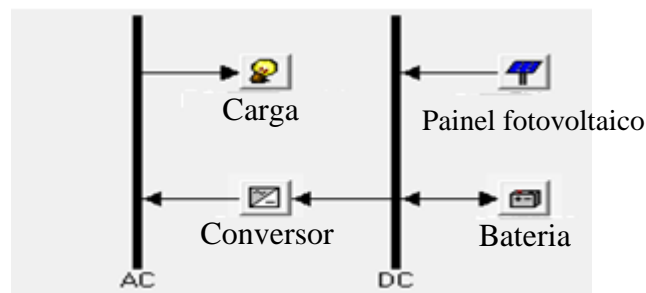
Tabelas 3.6 - Componentes sugeridos para o sistema solar fotovoltaico gerado pelo *Homer*.

	Painel Fotovoltaico	Baterias	Conversor (kW)
1	0.35	0	0.0
2	0.40	1	1.5
3	0.42	3	1.8
4	0.45	4	2.0
5		5	

Fonte: Elaborada pelo autor.

Pode-se concluir então, que o sistema dimensionado atenderá a demanda de energia para a casa de referência. A Figura 3.19 mostra-nos os elementos modelados no sistema.

Figura 3.19 - Elementos modelados no sistema.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.8.2 PVSize

Dá-se início ao programa definindo a tensão do sistema como mostra-se na Figura 3.20 com a qual abre-se a tela que permite o ingresso das cargas que formam o sistema.

Figura 3.20 - Tela de identificação do projeto.

Projeto

Identificação / Propriedades

Projeto: Estudo, levant. e dimen. de um sistema solar fotovoltaico

Local: Ilha Nazaré, Rio Maracapucú, Abaetetuba-PA

Tipo: Autônomo

Data: 20/02/2014 Responsável: Marinaldo de Jesus

Tipo de Corrente no projeto: Alternada

Tensão do Projeto: 12 V

Tensão de Consumo: 127 V

OK Atualiza Cancelar

Fonte: Elaborada pelo autor.

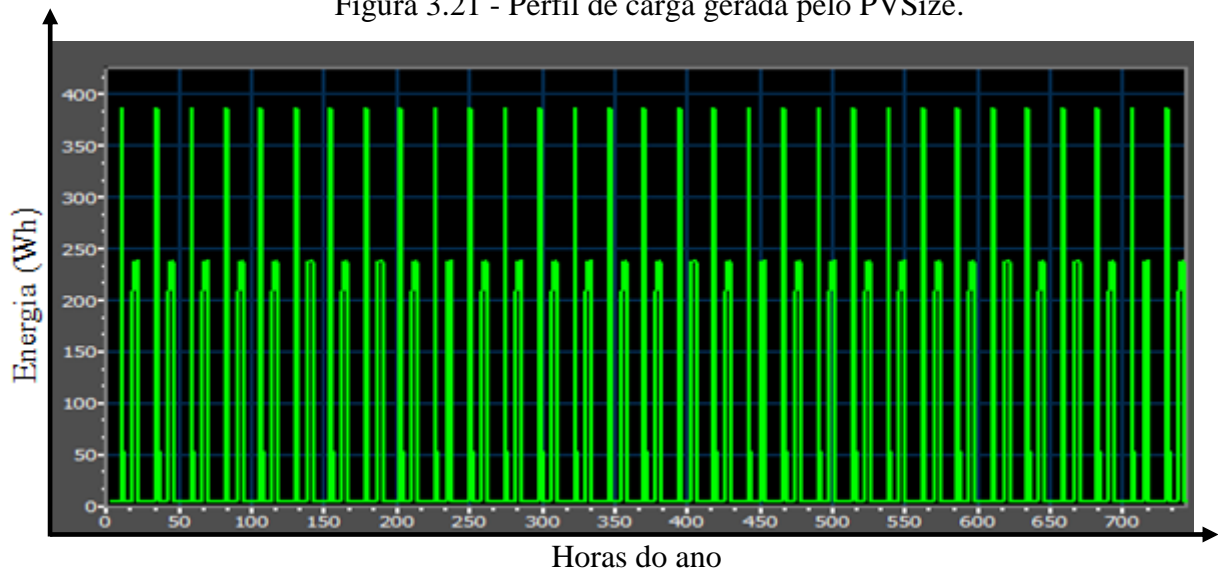
Selecionando-se os equipamentos, APÊNDICE C (ver Figura 8), e clicando com o botão direito do mouse sobre a carga define-se o perfil de carga, para cada aparelho da casa de referência. Para confirmar a carga clica-se no botão “confirmar consumo”, após essa etapa definem-se os componentes do sistema.

Definem-se os módulos fotovoltaicos clicando no desenho de um módulo fotovoltaico, onde insere-se o módulo adotado no projeto. O APÊNDICE C (ver Figura 9) mostra-nos o formulário com os parâmetros elétricos do módulo. Inserem-se os dados do módulo já simulado na seção 2.3.2.

Escolhendo a opção “inversor” no APÊNDICE C (ver Figura 10) e inserindo os valores definidos no projeto, define-se este componente. Da mesma forma são inseridos o controlador de carga (Figura 11) e o banco de baterias (Figura 12).

A Figura 3.21 mostra o perfil de carga diária gerada pelo PVSize para a casa de referência.

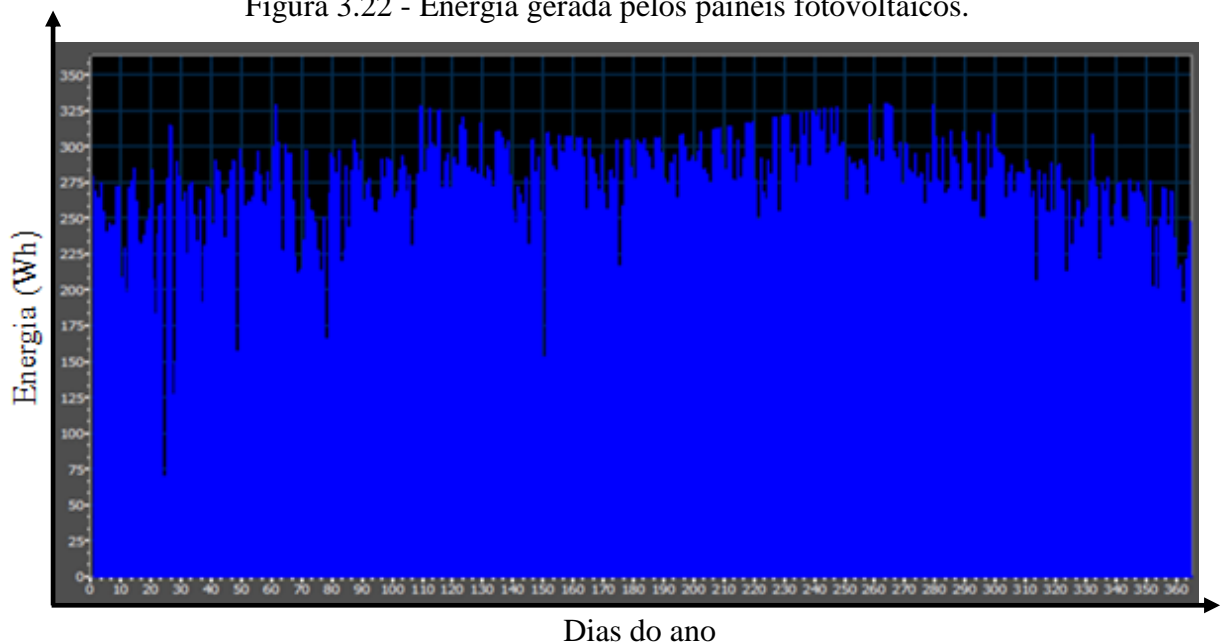
Figura 3.21 - Perfil de carga gerada pelo PVSize.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 3.22 mostra a variação da energia gerada pelos módulos fotovoltaicos. Os valores obtidos em função dos dados horários de irradiância incidente no painel com 10° de inclinação.

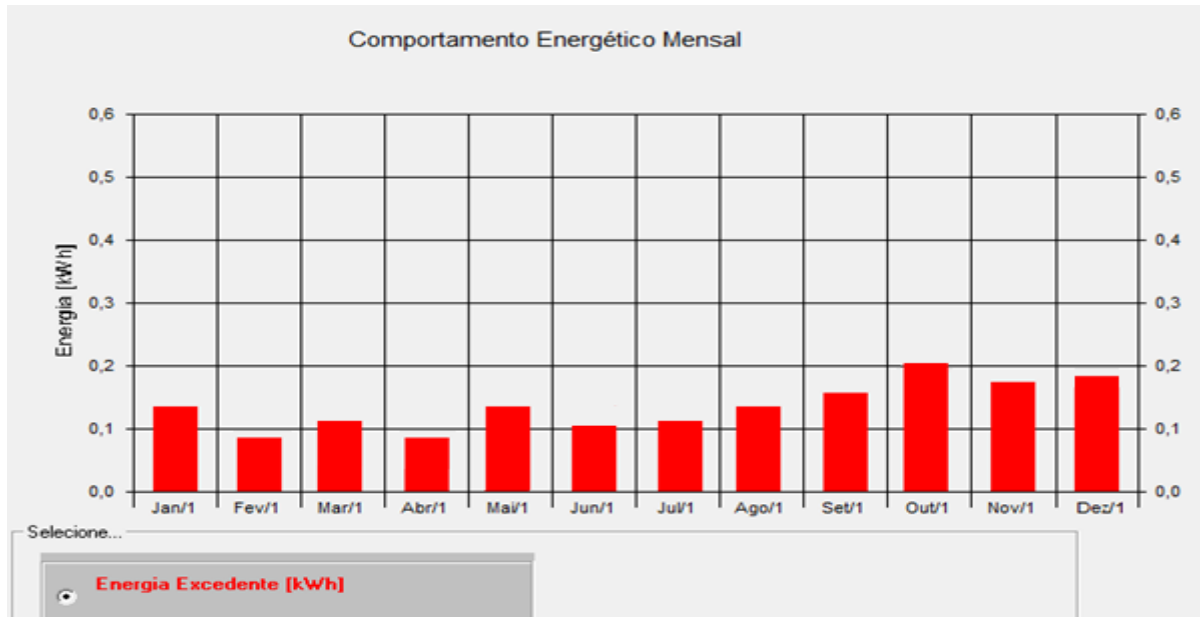
Figura 3.22 - Energia gerada pelos painéis fotovoltaicos.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A geração de energia ocorre sempre maior que o pico de consumo. A energia excedente em média mensal é observada na Figura 3.23.

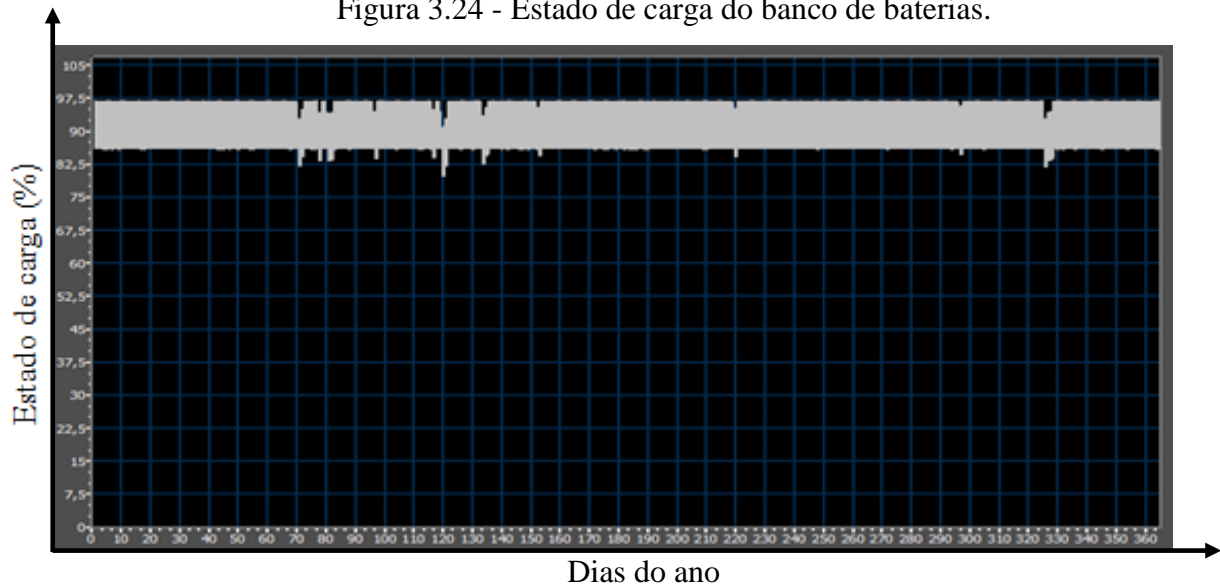
Figura 3.23 - Excedente de energia gerado pelo PVSize.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Como descrito anteriormente, deve-se ter uma atenção especial para o estado de descarga da bateria já que não pode ultrapassar os 20% como foi definido no projeto. A Figura 3.24 mostra-nos o estado de carga do banco de baterias simulado pelo PVSize.

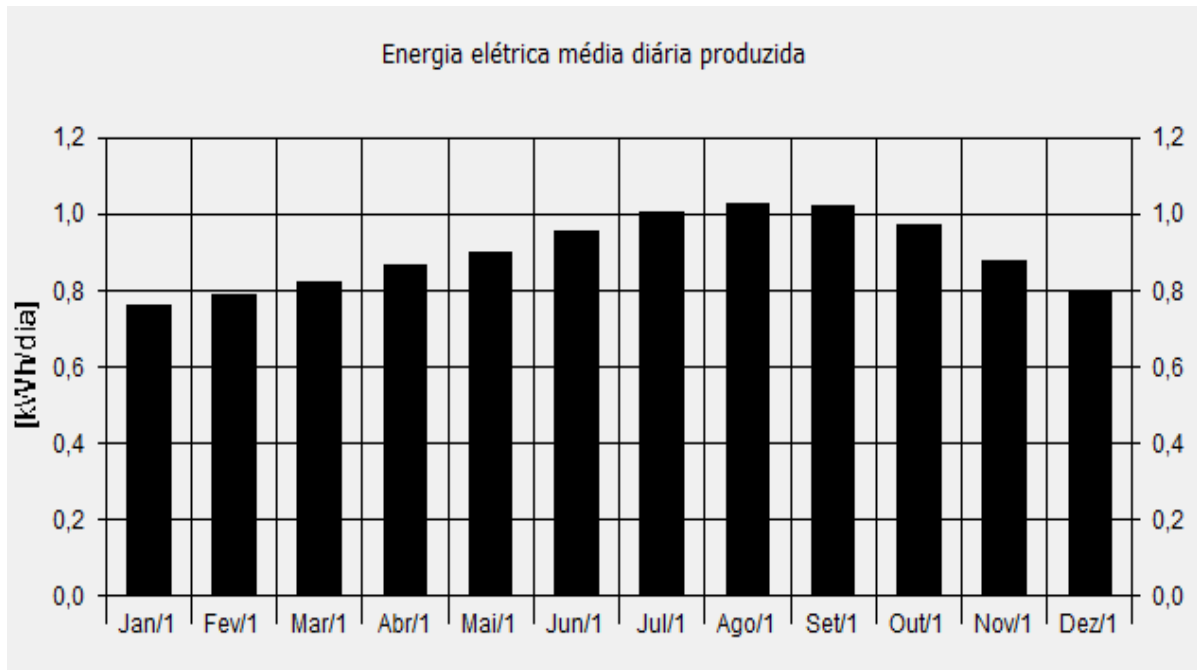
Figura 3.24 - Estado de carga do banco de baterias.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Pode-se observar na Figura 3.24 que o banco de bateria simulado pelo PVSize também atende a necessidade de geração de energia para a casa de referência. Além disso, possui um estado de carga em média de 83%. A produção total de energia pelo sistema é mostrada na Figura 3.25.

Figura 3.25 - Energia total produzida pelo sistema.

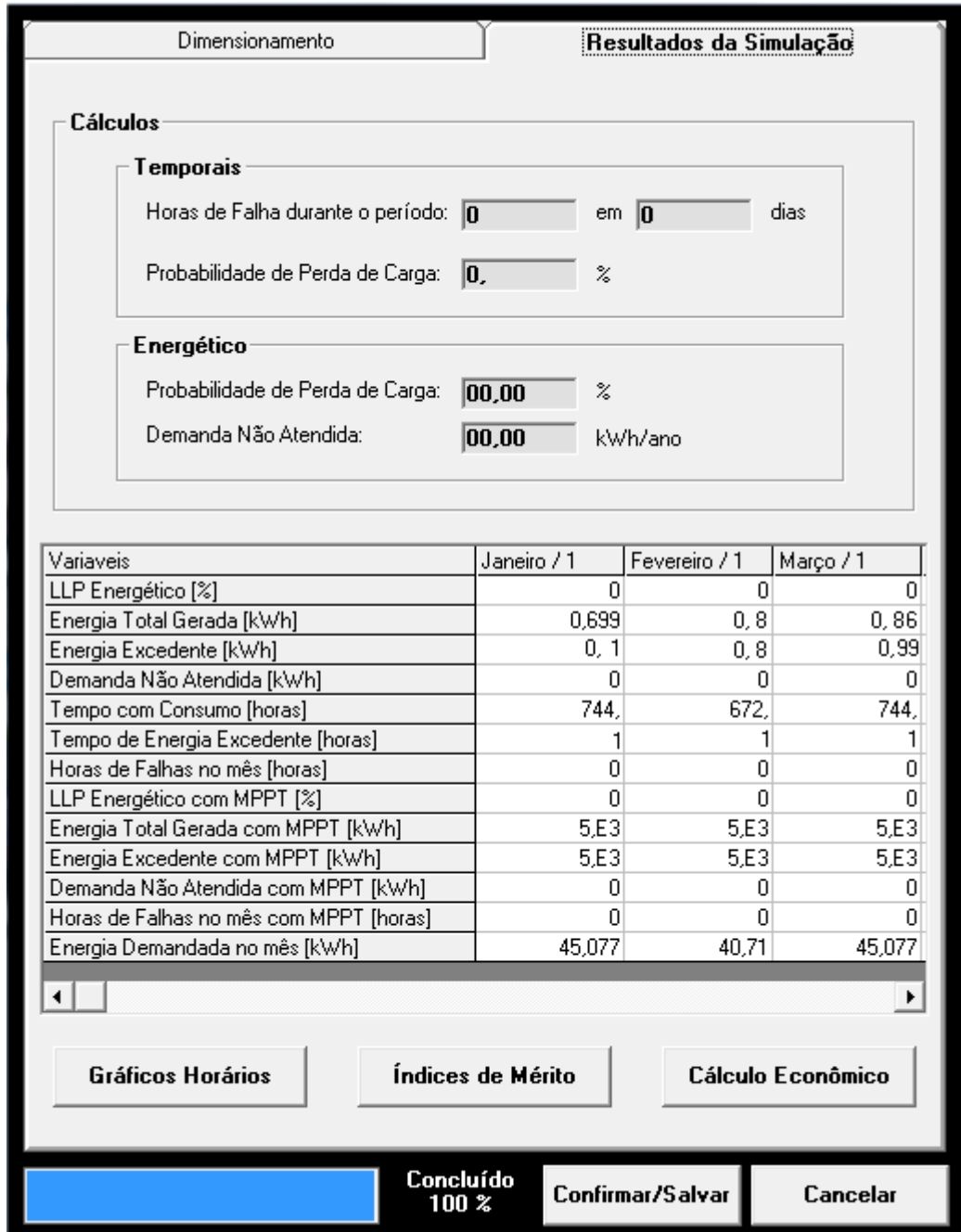


Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.8.2.1 Conclusão da Simulação Realizada pelo PVSize

Para analisar os valores obtidos pela simulação do sistema utilizou-se a ferramenta gráfica do PVSize que nos permite visualizar os resultados atingidos. Mas uma vez, concluiu-se que o sistema dimensionado com as especificações técnicas dos componentes solares superou as demandas energéticas da casa de referência. A Figura 3.26 mostra-nos o resultado da simulação realizada pelo PVSize.

Figura 3.26 - Resultado da simulação realizada pelo PVSize.



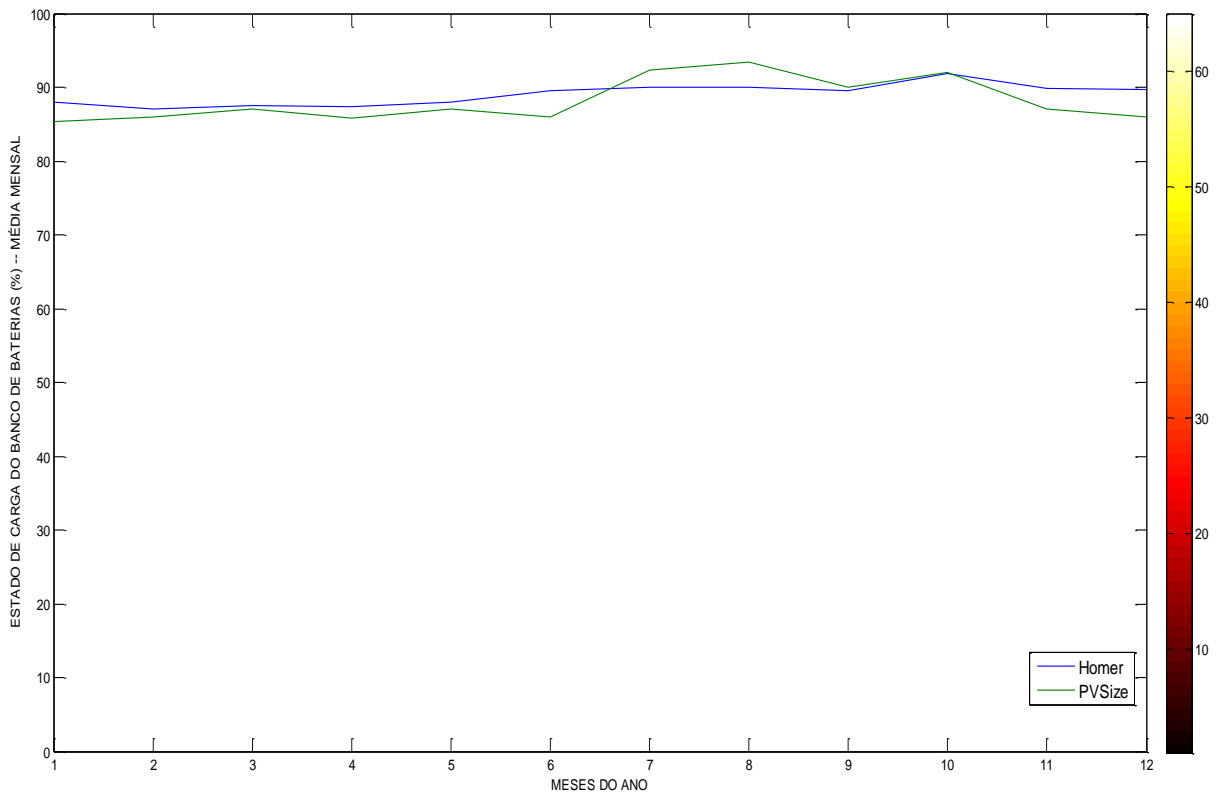
Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.9 Análise de Simulação

3.3.9.1 Estado de Carga

A Figura 3.27 mostra a variação do estado de carga do banco de baterias ao longo da simulação por um ano. Compara-se esta variação através dos métodos realizados e sintetizados os valores da Figura 3.16 e 3.24.

Figura 3.27 - Estado de carga do banco de baterias obtido com o PVSize e o *Homer*.



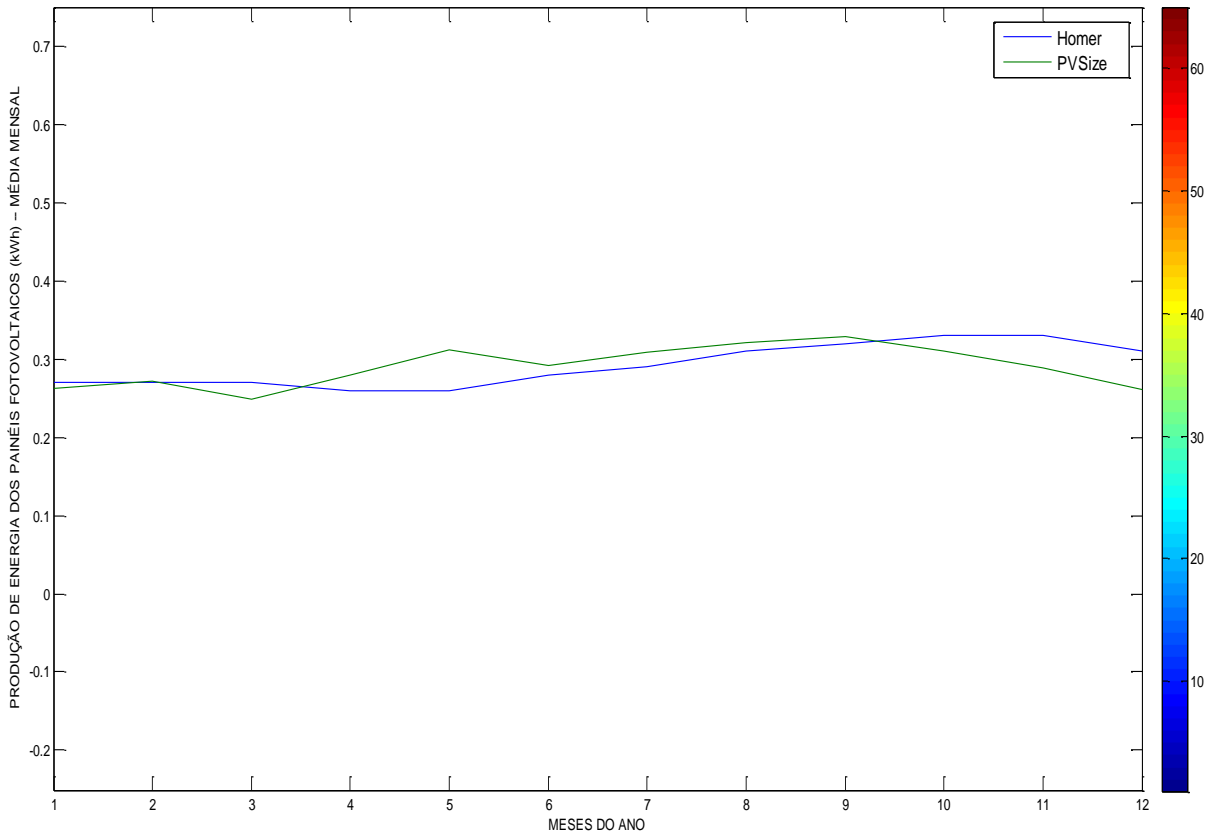
Fonte: Elaborada pelo autor.

Percebe-se através da Figura 3.27 que o comportamento das curvas é similar. O *Homer* apresenta uma curva geral abaixo que a do PVSize, isso pode ser explicado pelo método utilizado PVSize que considera a máxima corrente fornecida pelo gerador fotovoltaico.

3.3.9.2 Energia Gerada pelo Gerador Fotovoltaico

A Figura 3.28 mostra a variação da geração de energia pelo gerador fotovoltaico ao longo da simulação por um ano. Esta simulação faz a comparação pelos dois *softwares*.

Figura 3.28 - Potência gerada pelo PVSize e o *Homer*.



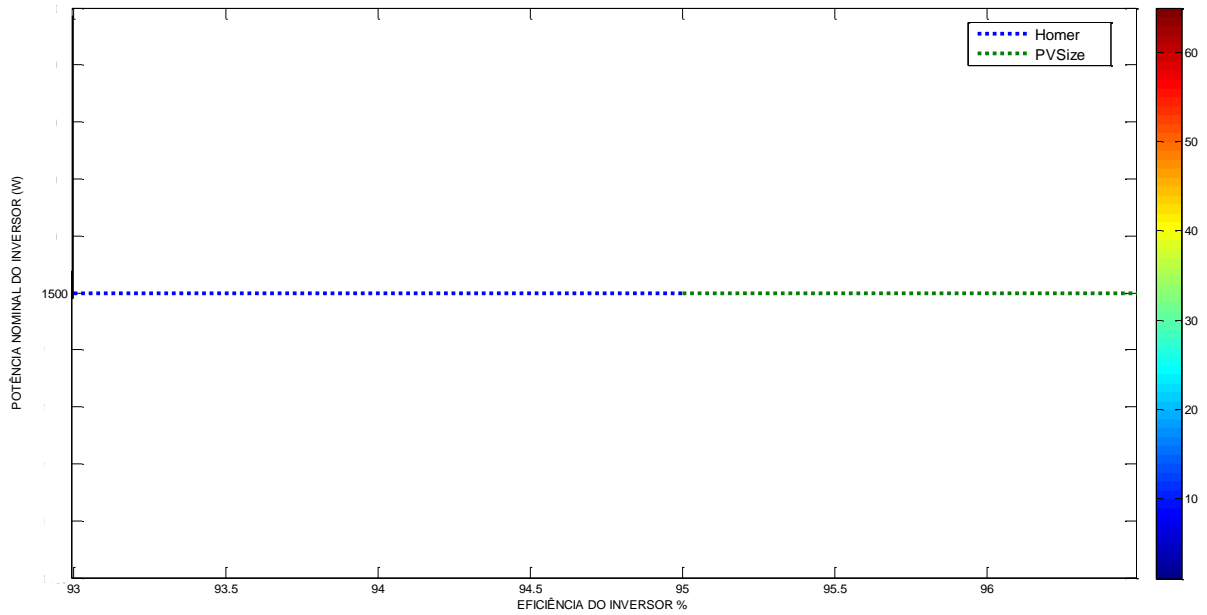
Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se através da Figura 3.28 pouca discrepância entre as curvas geradas pelos programas, com cruzamentos em certos períodos ao longo do ano.

3.3.9.3 Eficiência do Inversor

Pode-se observar na Figura 3.29 que o *Homer* trabalha com eficiência do inversor variando 93 a 95% otimizando o sistema. Já o PVSize utiliza uma eficiência de 95 a 96% , que também esta dentro de uma zona de conforto para o sistema.

Figura 3.29 - Variação da eficiência do inversor, PVSize e do *Homer*.

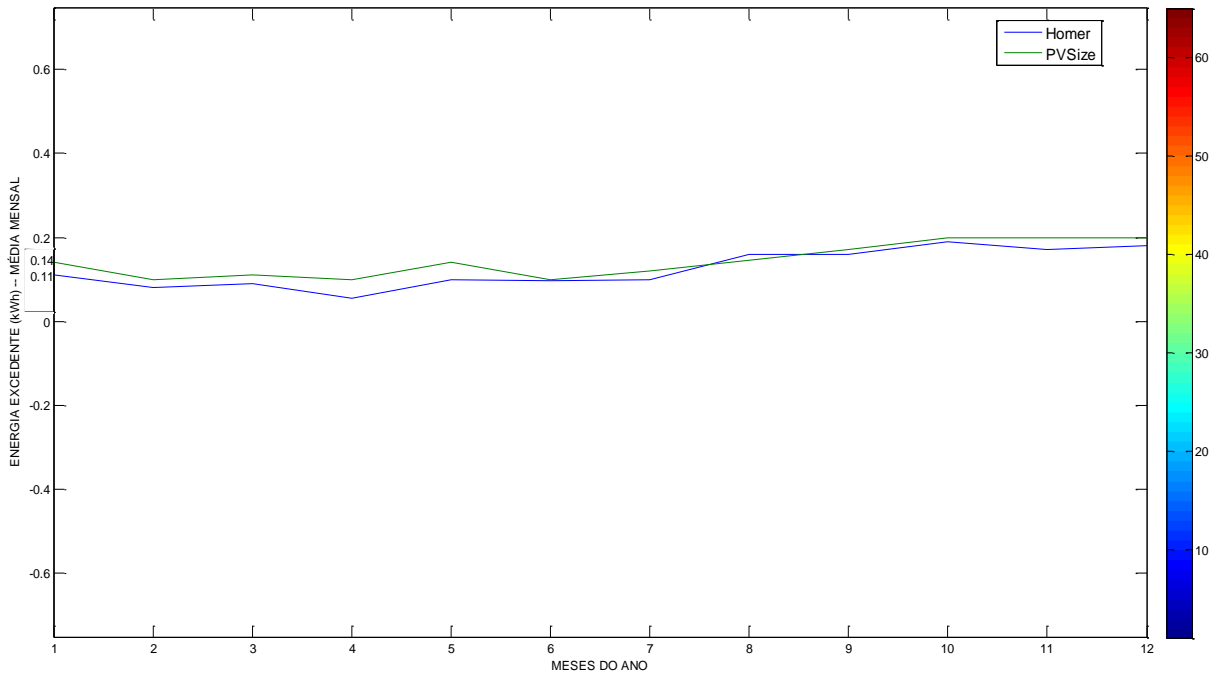


Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.9.4 Energia Excedente

A energia excedente gerada pelos dois *softwares* são suposições de demanda de pico esperada para cada mês. Cada programa utiliza um fator de segurança para gerar esses dados, mas observa-se através da Figura 3.30 que as curvas estão correlacionadas.

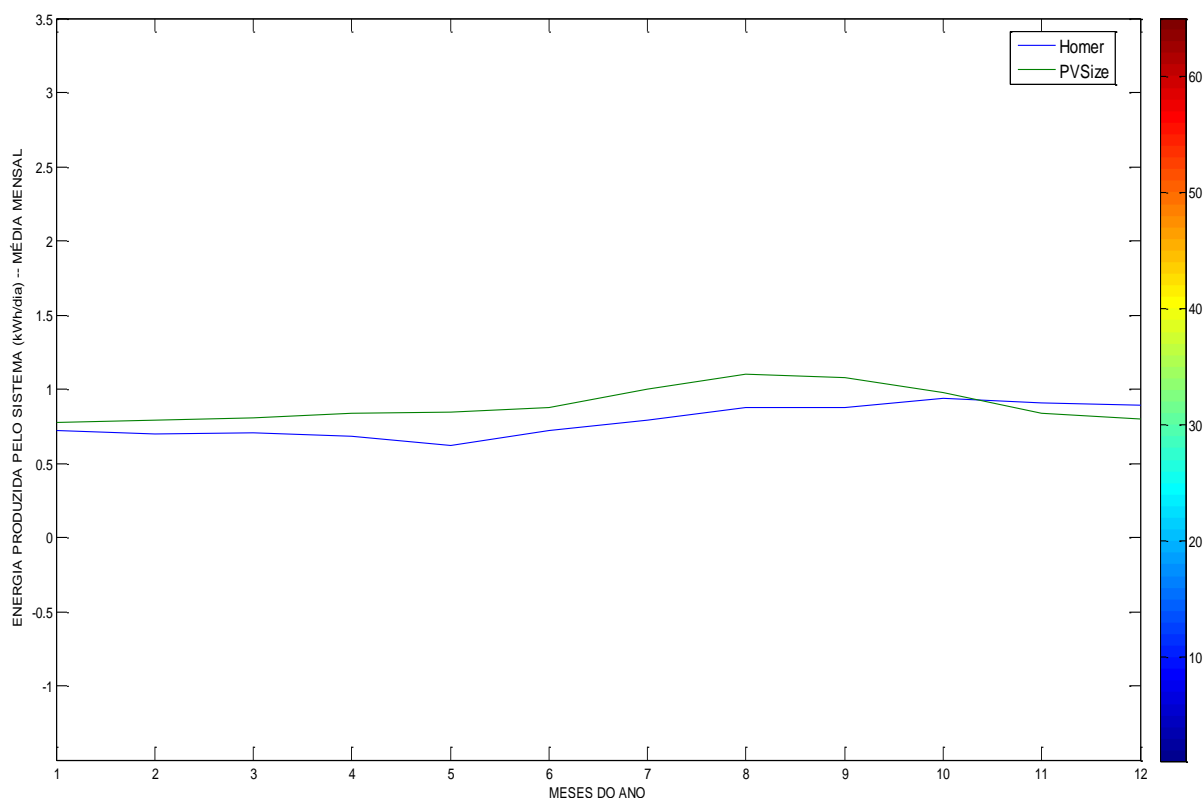
Figura 3.30 - Energia excedente gerada pelo PVSize e o *Homer*.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.9.5 Energia Total Gerada pelo Sistema

A energia total gerada corresponde a toda a produção do sistema solar fotovoltaico incluindo energia excedente e energia útil. Como pode-se observar na Figura 3.31 a produção de energia do *Homer* é menor que a do PVSize. Isso porque o *Homer* possui um fator denominado “Fator de redução” o qual é um fator de escala aplicado a potência de saída do gerador que leva em conta perdas.

Figura 3.31 - Energia total gerada pelo sistema dos *softwares*

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.10 Dimensionamento das Bitolas dos Cabos

Deve-se dimensionar as bitolas dos cabos levando em consideração a queda de tensão relativa ao comprimento dos cabos, principalmente nos ramais onde a tensão é de 12 V, pois a corrente é bem maior em comparação com os ramais onde a tensão é de 120 V.

Utilizando-se a Equação 2.12 e considerando 3% de perdas percentuais da linha tem-se na Tabela 3.7 os cálculos referentes às bitolas dos cabos e as bitolas especificadas conforme padrão disponível no mercado.

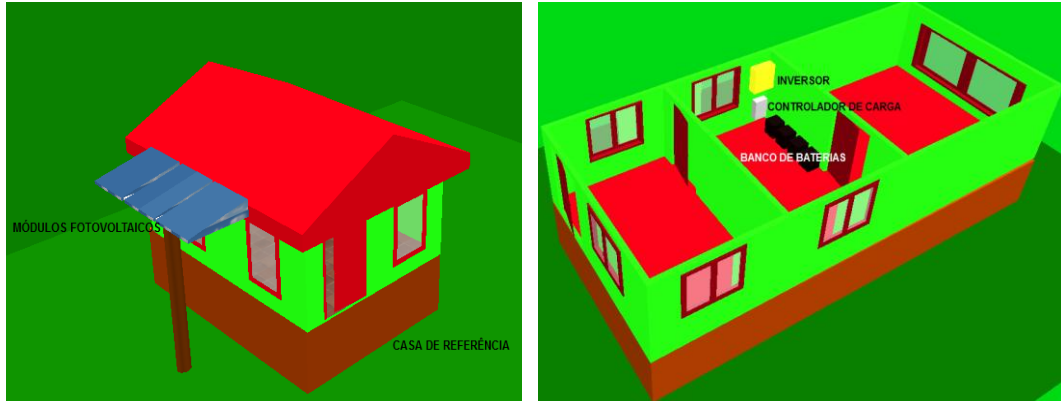
Tabela 3.7 - Dimensionamento das bitolas dos cabos.

Cablagem	Compr.(m)	Componentes	Tensão	Potência (W)	Calculado mm ²	Especificado mm ²
(A+B)	9	Gerador/Bateria	12V _{CC}	420	15,62	16
(B+C)	4	Bateria/Inversor	12V _{CC}	1312	21,69	25
(D)	1	Inversor/Quadro	120V _{AC}	1312	0,06	1,5

Fonte: Elaborada pelo autor.

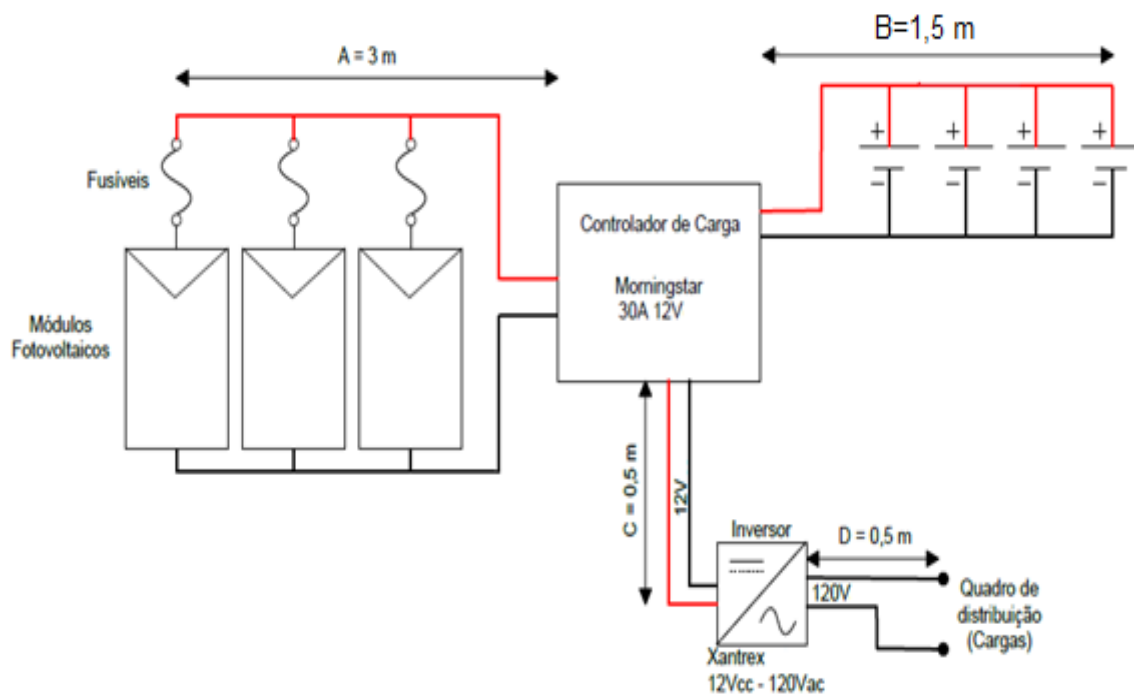
Como pode-se observar na Figura 3.32 em primeiro momento a melhor opção é instalar os painéis do lado direito da casa de referência.

Figura 3.32 - Simulação de instalação dos painéis fotovoltaicos e equipamentos do sistema solar.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 3.33 - Distâncias e layout de instalação do sistema.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4 ANÁLISE DE CUSTO

Considerando-se que uma família da vila queira implantar o sistema solar fotovoltaico em substituição à geração de energia a diesel. Faz-se o seguinte questionamento: qual dos dois tipos de geração de energia elétrica é mais viável para se investir, dadas às condições da localidade?

Na Tabela 4.1 são sugeridos os custos dos componentes solares para os desenvolvimentos dos cálculos a serem realizados.

Tabela 4.1 - Custos dos equipamentos solares

Equipamento	Quant.	Preço unit.	Total
Inversor	1	R\$1.699,00	R\$ 1.699,00
Bateria estacionaria	4	R\$ 675,00	R\$ 2.700,00
Painel solar	3	R\$ 699,00	R\$ 2.097,00
Controlador de carga	1	R\$ 490,00	R\$ 490,00
			R\$ 6.986,00

Fonte: Elaborada pelo autor.

O desenvolvimento de uma análise econômica entre dois tipos de sistema de geração de eletricidade deve considerar as figuras de méritos econômico-financeiros, os custos de investimento inicial, operação e manutenção e a vida útil dos componentes do sistema.

Nesse sentido surge a necessidade de criação de uma relação de equivalência entre o valor monetário presente e o valor monetário no futuro.

4.1 Valor Presente Líquido (VPL)

Corresponde a um método baseado em séries de valores futuros trazidos ao presente, aplicável a situação onde certa alternativa que, além do investimento inicial, apresenta ao longo do horizonte de planejamento receitas e despesas distribuídas sob a forma de anuidades e custos não uniformes [6].

Pode-se calcular o VPL utilizando a Equação 4.1 [6]

$$VPL = I + CR_P + \sum_{k=1}^n VP_{(O/M)} \quad (4.1)$$

Onde:

n = Horizonte de planeamento;

I =Investimento inicial;

CR_p = Soma dos custos de reposição trazidos ao presente, dado pela Equação 4.2 [6].

$$CR_p = \sum_{j=1}^k \left(\sum_{m=1}^{R_i} \left(\frac{I_j}{(1+TMA)^{mT_j}} \right) \right) \quad (4.2)$$

Onde:

k = É o número de componentes do sistema;

I_j =Custo do componente j ;

T_j = Vida útil contábil do componente;

R_i =Número de reposições durante o horizonte de planeamento.

TMA =Taxa mínima de atratividade.

$VP_{(O/M)}$ =Valor presente associado ao custo de operação e manutenção, dado pela Equação 4.3 [6].

$$VP_{(O/M)} = a \cdot \frac{(1 + TMA)^n - 1}{TMA \cdot (1 + TMA)^n} \quad (4.3)$$

Onde:

a = Soma dos custos totais de operação e manutenção;

Uma variação do método do VPL é o valor presente líquido anualizado (VPL_A), que corresponde a um valor médio do VPL, dado pela Equação 4.4 [6].

$$VPL_A = VPL \cdot \frac{TMA \cdot (1 + TMA)^n}{(1 + TMA)^n - 1} \quad (4.4)$$

Pode-se calcular o custo de energia elétrica (CE) através da seguinte Equação 4.5 [6]

$$CE = \frac{VPL_A}{E_C} \quad (4.5)$$

Onde:

E_C =Energia elétrica consumida no período de um ano;

4.2 Análise de Custo do Gerador Fotovoltaico

Considerando um horizonte de planejamento de 20 anos, tomando-se como referência o tempo do componente de vida útil mais longo do sistema, os módulos fotovoltaicos, taxa de atratividade mínima de 12%. O custo de operação e manutenção estimado em 1% do capital inicial do sistema (R\$ 69,86) [6].

Pode-se calcular os custos de operação e manutenção trazidos ao presente através da Equação 4.3, tem-se:

$$VP_{(O/M)} = 69,86 \cdot \frac{(1 + 0,12)^{20} - 1}{0,12 \cdot (1 + 0,12)^{20}} = \text{R\$ } 582,16$$

Utilizando-se a Equação 4.2 para calcular o custo de reposição trazido para o presente do banco de baterias, tem-se:

$$2.700 \times \left(\frac{1}{(1 + 0,12)^{1 \times 4}} + \frac{1}{(1 + 0,12)^{2 \times 4}} + \frac{1}{(1 + 0,12)^{3 \times 4}} + \frac{1}{(1 + 0,12)^{4 \times 4}} \right) = \text{R\$ } 3.940,41$$

Da mesma forma calcula-se a reposição do inversor e o controlador de carga, considerando o custo total dos dois componentes (controle/ inversão de tensão).

$$2.189,00 \times \left(\frac{1}{(1 + 0,12)^{1 \times 10}} + \frac{1}{(1 + 0,12)^{2 \times 10}} \right) = \text{R\$ } 913,70$$

Assim o custo de reposição trazido para o presente total será de:

$$CR_p = (3.940,41 + 913,70) = \text{R\$ } 4.854,11$$

Utilizando-se a Equação 4.1, tem-se:

$$VPL = 6.986,00 + 582,16 + 4.854,11 = \text{R\$ } 12.422,00$$

Utilizando-se a Equação 4.4 tem-se:

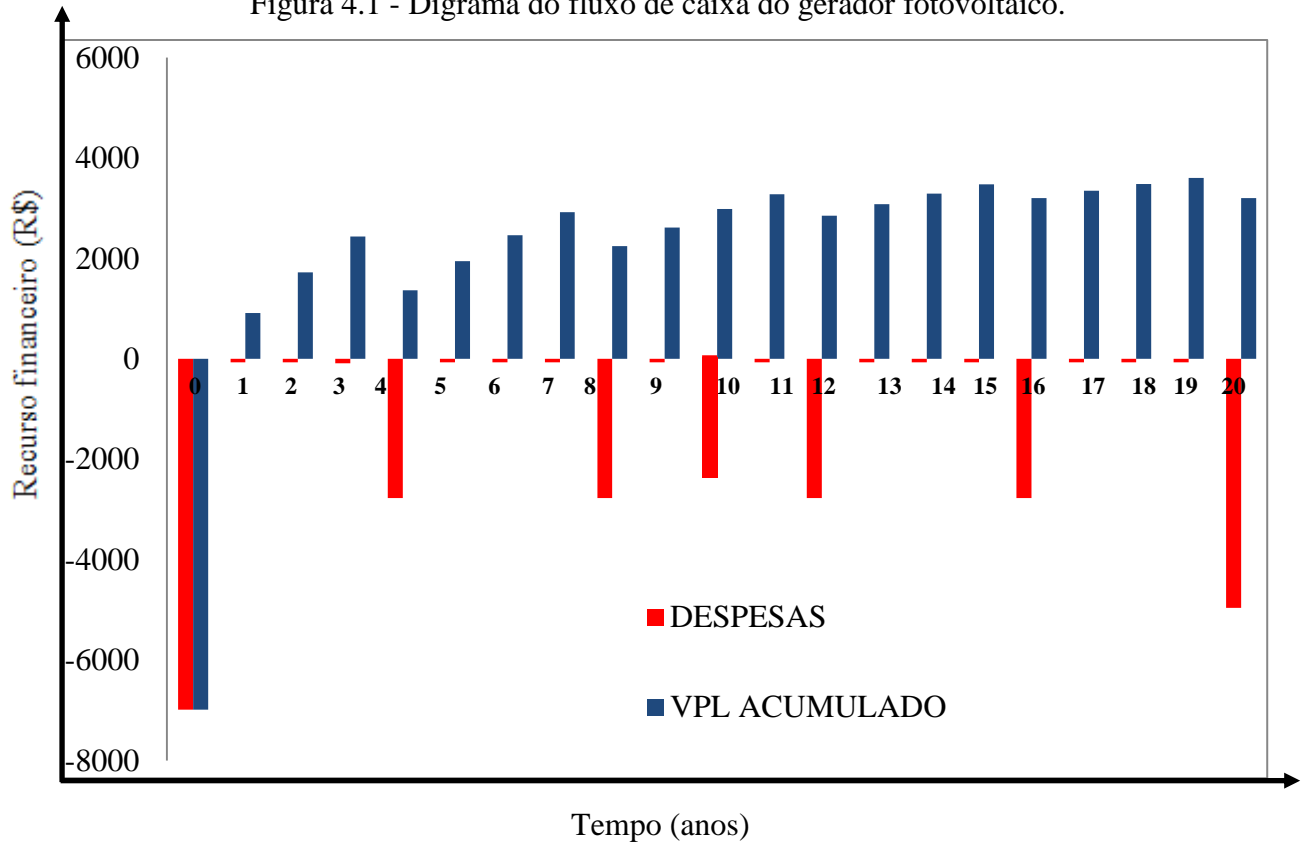
$$VPL_A = 12.422,00 \times \frac{0,12 \cdot (1 + 0,12)^{20}}{(1 + 0,12)^{20} - 1} = R\$ 1.670,9$$

Considerando 531,76 kWh o consumo de energia elétrica consumida no período de um ano (ver Tabela 3.1), o custo de energia será de:

$$CE = \frac{R\$ 1.670,9}{531,76 \text{ kWh}} = R\$ 3,14/\text{kWh}$$

O diagrama da Figura 4.1 mostra-nos todas as receitas e despesas do gerador fotovoltaico.

Figura 4.1 - Diagrama do fluxo de caixa do gerador fotovoltaico.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3 Análise de Custo do Gerador Diesel

Considerando-se o mesmo cenário do gerador fotovoltaico e os custos de operação e manutenção dados no item 3.2 para uma família, chegando-se a um valor de R\$ 2.575,648 por ano. E ainda levando em consideração o capital inicial para aquisição do gerador a diesel de R\$ 6.000,00 que leva-nos a R\$ 858,00 por família.

Calculando-se o $VP_{(O/M)}$ para o gerador a diesel, tem-se:

$$VP_{(O/M)} = 2.575,648 \cdot \frac{(1 + 0,12)^{20} - 1}{0,12 \cdot (1 + 0,12)^{20}} = \text{R\$ } 19.238,66$$

Para o custo de reposição trazido para o presente, utiliza-se a Equação 4.2.

$$858,00 \times \left(\frac{1}{(1 + 0,12)^{1 \times 10}} + \frac{1}{(1 + 0,12)^{2 \times 10}} \right) = \text{R\$ } 377,52$$

Então o VPL será de:

$$\text{VPL} = 858,00 + 377,52 + 19.238,66 = \text{R\$ } 20.474,18$$

Assim, o VPL_A será de:

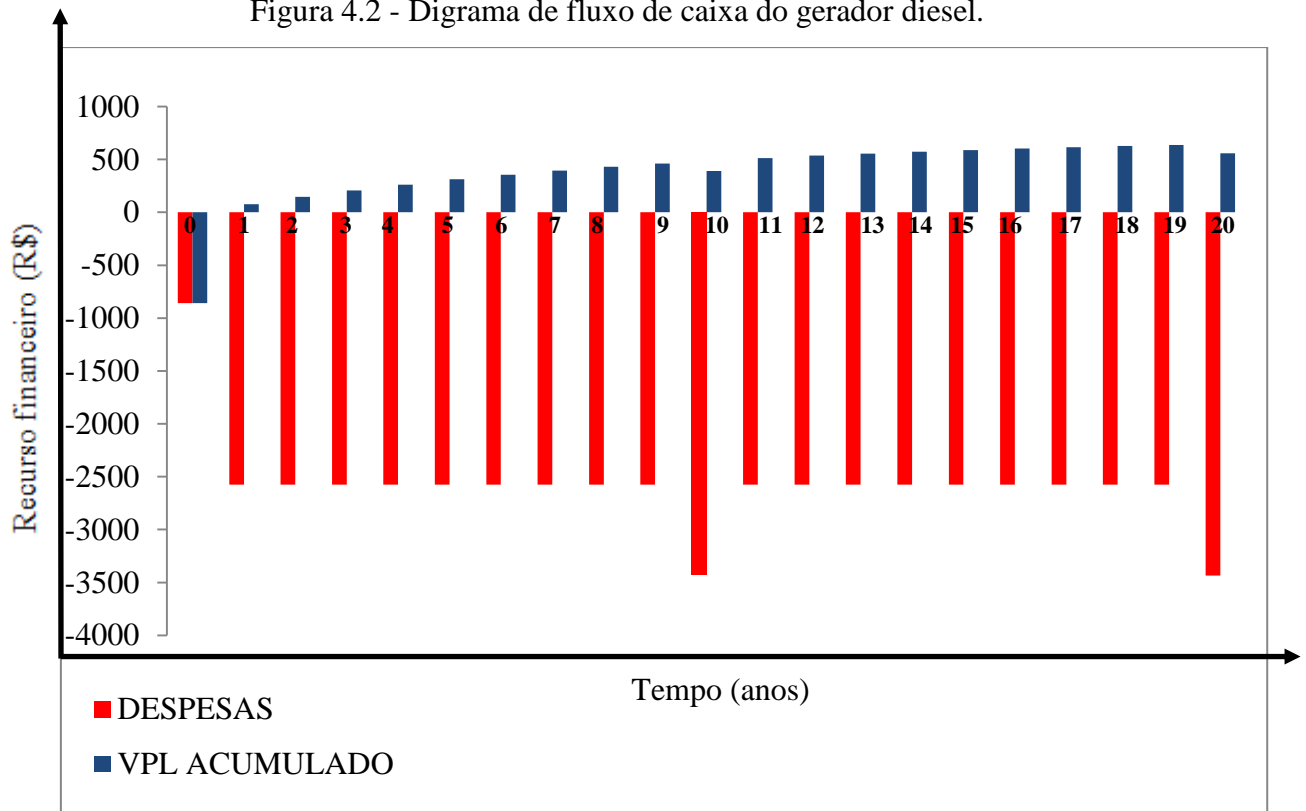
$$\text{VPL}_A = 20.474,18 \times \frac{0,12 \cdot (1 + 0,12)^{20}}{(1 + 0,12)^{20} - 1} = \text{R\$ } 2.754,00$$

Onde o Custo de Energia será de:

$$\text{CE} = \frac{\text{R\$ } 2.754,00}{531,76 \text{ kWh}} = \text{R\$ } 5,18/\text{kWh}$$

O diagrama da Figura 4.2 mostra-nos todas as receitas e despesas do gerador diesel.

Figura 4.2 - Digrama de fluxo de caixa do gerador diesel.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Isso nos mostra que a geração de energia fotovoltaica para esse cenário é cerca de 60% mais barata que a diesel e, portanto muito mais viável a sua utilização do que a geração de energia através do grupo gerador. Além disso, é uma fonte de energia livre, limpa, sem fonte de poluição, os painéis fotovoltaicos podem operar durante anos com pouca manutenção necessária, só é necessário manter os painéis limpos de poeiras que impeçam a absorção da luz solar. Não se tem hoje no mundo fonte tão abundante de energia, principalmente por se tratar de uma alternativa renovável e limpa. Dessa forma recomenda-se a implantação do sistema solar fotovoltaico para a casa de referência e também para a vila.

4.4 Conclusão

A geração de energia solar fotovoltaica apresenta-se como uma forma promissora de evitar os gargalos que a matriz energética brasileira vem sofrendo. Entretanto, mesmo o Brasil tendo um elevado potencial solar nas suas regiões, com pequena variação sazonal, ainda investe pouco em pesquisa e tecnologia nessa área, enquanto que países com um nível de irradiação solar inferior, a exemplo dos países europeus, têm aplicações e investimento bem maiores.

Este trabalho teve como objetivo central o estudo, levantamento e dimensionamento de um sistema solar fotovoltaico autônomo mostrando a viabilidade em comparação com grupos geradores a diesel. Mostrou-se também um resumo das principais características da energia solar, apresentadas através de equações e ângulos solares bem como os equipamentos que medem o recurso solar.

Usou-se dois *softwares* (*Homer* e *PVSize*) que permitiu a simulação do sistema onde foram obtidos resultados que estão correlacionados entre os dois programas e também com as equações dos dimensionamentos dos componentes solares que mostrou ser confiável. Diante dos resultados obtidos pela metodologia desenvolvida, constatou-se que mesmo com as limitações, descreveu-se de forma satisfatória a relação entre a demanda de energia elétrica e o consumo em comunidades “isoladas” com uma boa margem de confiabilidade.

Para obtenção da irradiância utilizou-se o *software* *Radiasol 2*. Esse se mostrou didático e de fácil utilização que tornou mais simples o processo de dimensionamento dos componentes solares.

O estudo avaliou o montante financeiro envolvido nos dois sistemas de geração através da ferramenta VPL. Percebendo que apesar do SFVA ter um investimento inicial caro em relação ao diesel, torna-se atrativo pelo seu baixo custo de manutenção e operação, sendo seu capital de investimento diluído ao longo de sua vida útil.

Finalizando, convém chamar atenção para o fato de que a validação deste trabalho foi feita de forma teórica, ou seja, os resultados das simulações foram comparados a dados abstratos, retirados de cálculos matemáticos, e devem servir de ponto de partida para estudos complementares sobre o tema aqui tratado. Naturalmente, é de extrema importância que se realize uma experiência real, utilizando elementos concretos (módulos fotovoltaicos, inversor, controlador de carga e baterias) como parâmetros de comparação para que sejam feitos ajustes adequados e se promova a validação definitiva deste manuscrito.

Um ponto importante a destacar-se nesse estudo são ideias surgidas durante o desenvolvimento do trabalho que servirão como propostas para trabalhos futuros, que são:

- Estudo e implantação de sistema híbrido na Ilha Nazaré;
- Estudo da influência da temperatura sobre células fotovoltaicas de geração de energia elétrica em sistemas autônomos;
- Estudo de uma técnica de bombeamento de fluídos utilizando a energia solar fotovoltaica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CETATTO, José, **Introdução à Astronomia e Astrofísica**, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Paulo, 2003.
- [2] JATENCO, Vera, **O céu que Nos Envolve**. 1ª edição, São Paulo, Odysseus Editora Ltda, 2011.
- [3] Google imagens. In: Estrutura do Sol. Disponível em: <<http://www.cdcc.sc.usp.br/cda/producao/sbpc94/>>. Acesso em 10 nov. 2013.
- [4] ZILLES, R. et.al. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.
- [5] REVISTA BRASILEIRA DE ENSINO DE FÍSICA. Rio de Janeiro: Vol. 3,2001.
- [6] PINHO, J.T. et. al. **Sistemas Híbridos - Soluções Energéticas para a Amazônia**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008.
- [7] GRUPO DE TRABALHO DE ENERGIA SOLAR - GTES. **Manual de Engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Ed. especial. Rio de Janeiro, 2004.
- [8] Google imagens. In: Componentes da radiação solar. Disponível em:< <http://filipefs.weebly.com/tecnologia-fv.html>>. Acesso em 30 nov. 2013.
- [9] ALTENER. **Energia Fotovoltaica – Manual sobre Tecnologia, Projetos e Instalações**. 2004
- [10] FRAIDENRAICH, N.et.al. **Energia Solar - Fundamentos e Tecnologias de Conversão Heliotermoeletrica Fotovoltaica**. Recife-PE: Ed. Universidade da UFPE, 1995.
- [11] DUFFIE, J.e W.Beckman, **Solar Engineering of Thermal Processes, John Willey &Sons, 1991**.
- [12] Google imagens. In: Radiação solar ao nível do solo. Disponível em:<< <http://www.cresesb.cepel.br/content.php?cid=301>>>. Acesso em 12 dez. 2013.

- [13] Google imagens. In: Declinação do Sol. Disponível em: <<<http://www.feiradeciencia.com.br/imagem/gif>>>. Acesso em 12 dez. 2013.
- [14] Google imagens. In: Ângulos do Sol. Disponível em: << http://www.angulo_de_altitude_solar/imagens.com.br/imagem/jpgr>>. Acesso em 15 dez. 2013.
- [15] RODRIGUES, M. **Estudo de Ângulos Solares para a Estimativa de Irradiância Solar em Projetos de Energia Solar na Cidade de Abaetetuba-PA**. Artigo apresentado a II Semana Acadêmica do baixo Tocantins-Pará. Universidade Federal do Pará, 2013.
- [16] Google imagens. In: Ângulos do sol. Disponível em: < <http://www.inclinacaodocoletor.com.br./gimagem/gif>>. Acesso em 20 dez. 2013.
- [17] Google imagens. Heliógrafo Disponível em: < <http://pt.wikipedia.org/wiki/Heliografo>>. Acesso em 22 dez. 2013.
- [18] Google imagens. In: Actonógrafo. Disponível em: < http://sonda.ccst.inpe.br/fotos/CAI/2002/caico_06.html>. Acesso em 30 nov. 2013
- [19] Google imagens. In: Piranômetro. Disponível em: < <http://ambiente-sec21.blogspot.com.br/2010/11/reflexao-da-utilizacao-de-energia-no.html>>. Acesso em 30 nov. 2013
- [20] Google imagens. In: Sensores Fotovoltaicos. Disponível em: <http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID3B07084138D92038/fronius_brasil/hs.xsl/7552_8446.htm>. Acesso em 22 dez. 2013.
- [21] Google imagens. In: Pireliômetro. Disponível em: <http://sonda.ccst.inpe.br/fotos/rolimmoura_08.html>>. Acesso em 23 dez.2013.
- [22] BOYLESTAD, R. L. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**, Prentice-Hall do Brasil, 1998.
- [23] Google imagens. In: Equipamentos de medição solar. Disponível em:<<http://educacao.uol.com.br/disciplinas/fisica/semicondutores-tipos-mais-comuns-de-semicondutores.htm>>. Acesso em 28 dez. 2013.

[24] Google imagens. In: Célula fotovoltaica de Silício cristalino. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAeiccAE/energia-solar-fotovoltaica?part=2>>. Acesso em 28 dez. 2013.

[25] Google imagens. In: Lingotes de Silício. Disponível em: <http://www.newhome.com.br/htmls/ekohome/Solar/Fotovoltaico/Cristalino/fabrica_fotovolt.htm>. Acesso em 29 dez. 2013.

[26] BRAGA, R.P. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos e Aplicações**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

[27] Google imagens. In: Célula de Silício policristalino. Disponível em: <<http://www.blue-sol.com/energia-solar/energia-solar-como-funciona-tipos-de-celulas-fotovoltaicas/>>. Acesso em 30 dez. 2013.

[28] KAZMERSKI, L.L. **Photovoltaic devices: a 2000 overview**. Journal of Crystal Growth 197, 1999.

[29] Google imagens. In: Célula de Arseneto de Gálio. Disponível em: <http://www.sharp-solar.com/br/history/2009_2.html>. Acesso em 30 dez. 2013.

[30] SEGUEL, J.L. **Projeto de Um Sistema Fotovoltaico Autônomo de Suprimento de Energia Usando Técnica MPPT e Controle Digital**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.

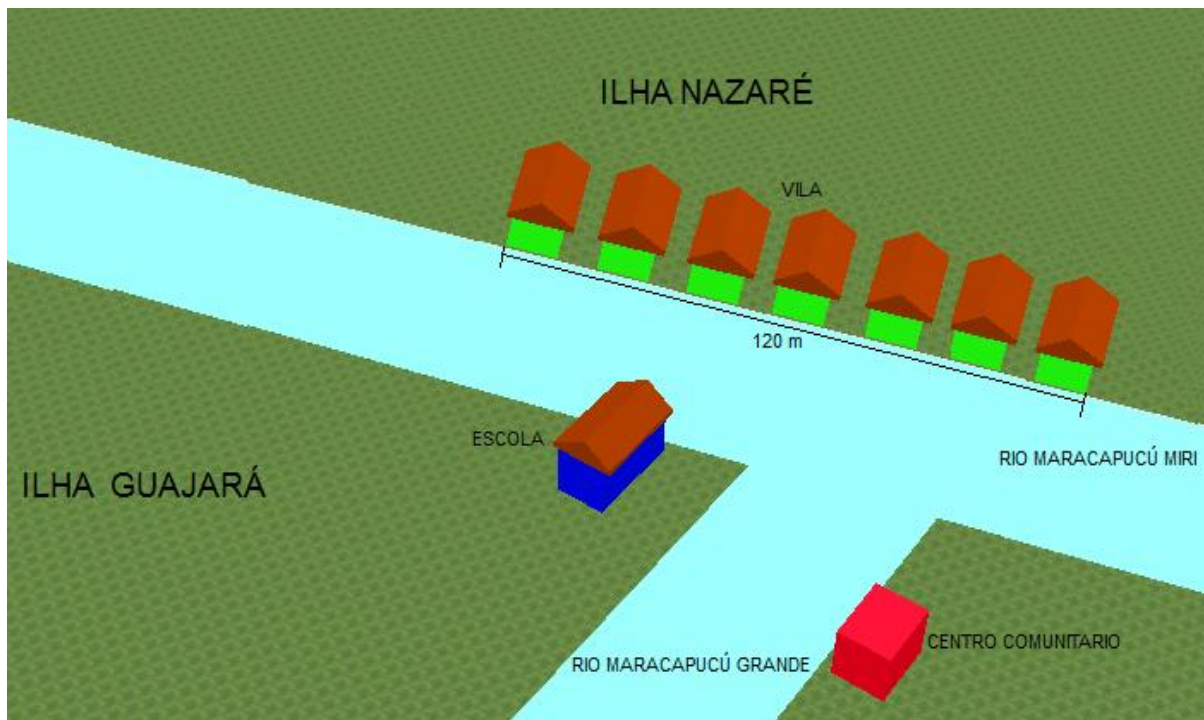
[31] Google: equipamentos solares. Disponível em: <<http://minhacasasolar.lojavirtualfc.com.br/prod,IDLoja,Categoria,113695,painel-solar-fotovoltaico?controlados-de-carga?inversores?baterias-estacionarias-rA>>. Acesso em 30 jan. 2014.

[32] PEREIRA, A.C. **Geração de Energia Para Condomínio Utilizando Sistema Fotovoltaico Autônomo-Estudo de Caso em Edifício Residencial Com Seis Pavimentos**. Curso de Especialização em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

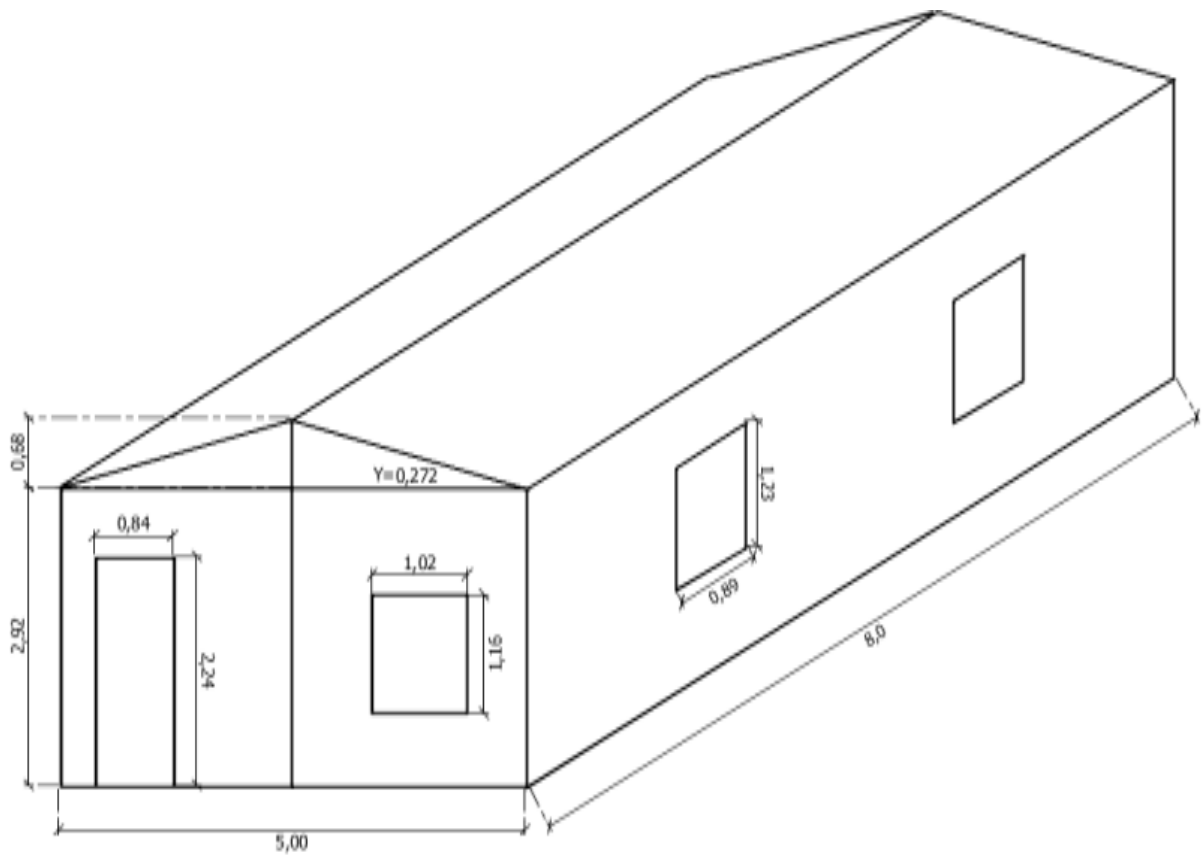
[33] Google: mapa de Abaetetuba-PA. Disponível em: <<https://www.google.com.br/search?ilhasdebaetetuba-pabZ4>>. Acesso em 30 jan. 2014.

[34] OLIVEIRA, E. M. **Dimensionamento de um sistema fotovoltaico fixo conectado à rede: estudo de caso do campus universitário de Abaetetuba.** Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Pará, 2013.

APÊNDICE A - FOTOS DA VILA E DIMENSÕES DA CASA DE REFERÊNCIA







APÊNDICE B - EQUIPAMENTOS DAS SETE CASAS DA VILA

Equipamento	Número	Potência (W)	Tensão (V)	Frequência (Hz)	Corrente (A)	Potência Total (W)
Aparelho de som	1	350	127-220	50/60	-	350
Aparelho de som	2	150	127	50/60	-	300
Bomba d'água	1	740	127-220	60	7	740
Bomba d'água	2	370	~110	60	5	740
Cafeteira	1	550	127	60	-	550
DVD	1	16	100-240	50/60	-	16
DVD	2	15	100-240	50/60	-	30
DVD	2	10	100-240	50/60	-	20
DVD	2	8	110-240	50/60	-	16
Freezer	1	370	127	-	-	370
Freezer	3	100	127	-	-	300
Liquidificador	1	400	127	60	-	400
Liquidificador	2	370	127	60	-	740
Liquidificador	2	350	127	60	-	700
Lâmpada fluorescente	17	25	127	50/60	340mA	425
Lâmpada fluorescente	3	20	127	50/60	249,8mA	60
Lâmpada fluorescente	14	15	127	50/60	191mA	210
Lâmpada fluorescente	10	14	127	50/60	195mA	140
Lâmpada incandescente	4	60	127	-	-	240
Maquina de lavar	2	400	127-220	60	-	800
Maquina de lavar	1	370	127-220	60	-	370
Maquina de lavar	4	290	127-220	60	-	1160
Maquina de costura	1	90	127	50/60	-	90
Maquina de açaí	5	180	127	60	-	900
Receptor	5	10	127	60	-	50
Sanduicheira	1	750	127	50/60	-	750
sanduicheira	1	700	127	50/60	-	700
Televisor 42"	1	56	100-240	50/60	-	56
Televisor 32"	1	45	127	50/60	-	45
Televisor 29"	1	80	100-220	50/60	-	80
Televisor 29"	1	74	100-250	50/60	-	74
Televisor 21"	2	54	100-250	50/60	-	108
Televisor 20"	1	48	100-240	50/60	-	48
Televisor 14"	2	65	100-240	50/60	-	130
Total = 11,358 kW						

APÊNDICE C - SIMULAÇÃO

Figura 1 - Tela para escolha de carga

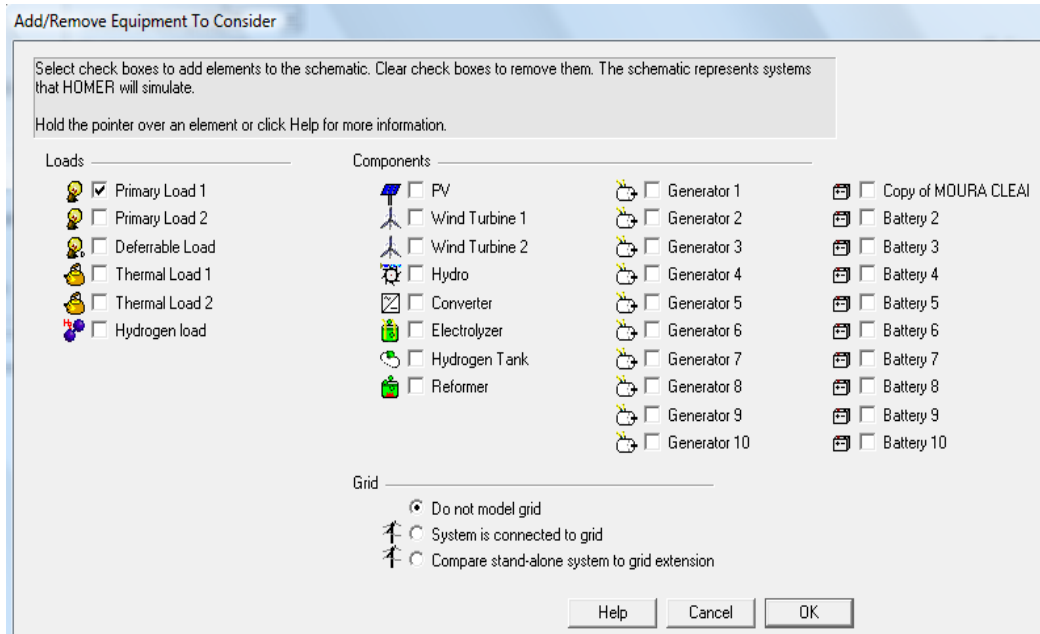


Figura 2 - Tela para definição da tenção

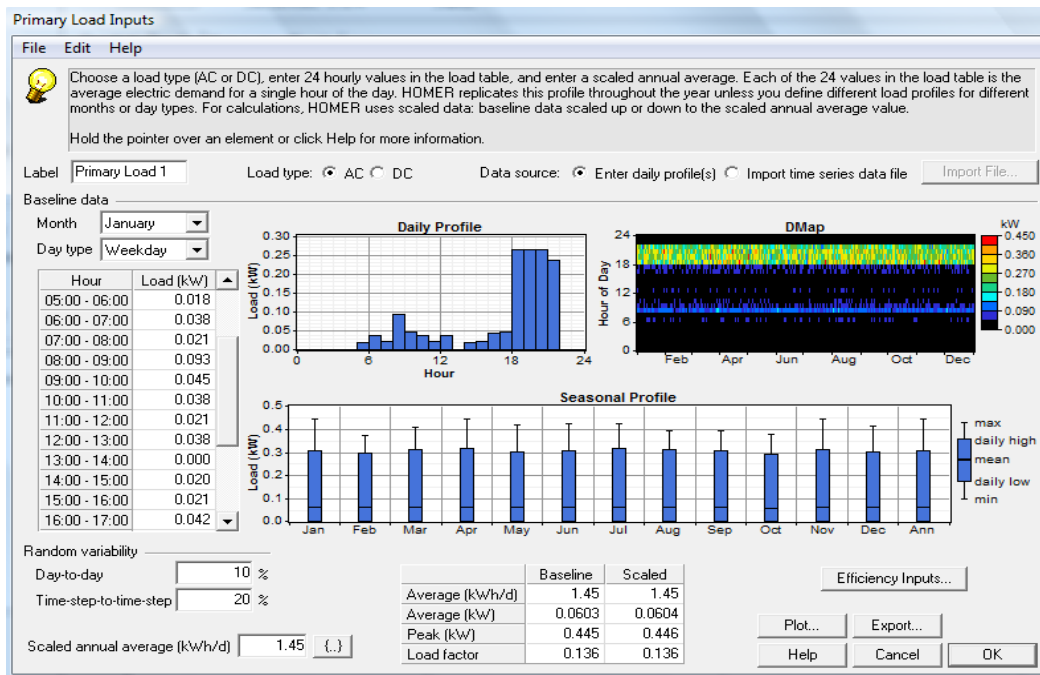


Figura 3 - Tela para escolha do módulo fotovoltaico

PV Inputs

File Edit Help

Enter at least one size and capital cost value in the Costs table. Include all costs associated with the PV (photovoltaic) system, including modules, mounting hardware, and installation. As it searches for the optimal system, HOMER considers each PV array capacity in the Sizes to Consider table.

Note that by default, HOMER sets the slope value equal to the latitude from the Solar Resource Inputs window.

Hold the pointer over an element or click Help for more information.

Costs

Size (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/yr)
0.420	809	809	15
(.)	(.)	(.)	(.)

Sizes to consider

Size (kW)
0.350
0.400
0.420
0.450

Properties

Output current AC DC

Lifetime (years) (.)

Derating factor (%) (.)

Slope (degrees) (.)

Azimuth (degrees W of S) (.)

Ground reflectance (%) (.)

Advanced

Tracking system

Consider effect of temperature

Temperature coeff. of power (%/°C) (.)

Nominal operating cell temp. (°C) (.)

Efficiency at std. test conditions (%) (.)

Help Cancel OK

Figura 4 - Tela para entrada do recurso solar

Solar Resource Inputs

File Edit Help

HOMER uses the solar resource inputs to calculate the PV array power for each hour of the year. Enter the latitude, and either an average daily radiation value or an average clearness index for each month. HOMER uses the latitude value to calculate the average daily radiation from the clearness index and vice-versa.

Hold the pointer over an element or click Help for more information.

Location

Latitude ° North South Time zone

Longitude ° ' East West

Data source: Enter monthly averages Import time series data file

Baseline data

Month	Clearness Index	Daily Radiation (kWh/m ² /d)
January	0.430	4.405
February	0.408	4.281
March	0.432	4.550
April	0.434	4.387
May	0.516	4.900
June	0.555	5.056
July	0.592	5.475
August	0.603	5.908
September	0.551	5.677
October	0.560	5.846
November	0.538	5.517
December	0.521	5.265
Average:	0.511	5.112

Scaled annual average (kWh/m²/d) (.)

Plot... Export... Help Cancel OK

Figura 5 - Tela para entrada do inversor

Converter Inputs

File Edit Help

A converter is required for systems in which DC components serve an AC load or vice-versa. A converter can be an inverter (DC to AC), rectifier (AC to DC), or both.

Enter at least one size and capital cost value in the Costs table. Include all costs associated with the converter, such as hardware and labor. As it searches for the optimal system, HOMER considers each converter capacity in the Sizes to Consider table. Note that all references to converter size or capacity refer to inverter capacity.

Hold the pointer over an element or click Help for more information.

Costs

Size (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/yr)
1.500	845	845	30
(.)	(.)	(.)	(.)

Sizes to consider

Size (kW)
0.000
1.500
1.800
2.000

Inverter inputs

Lifetime (years) (.)

Efficiency (%) (4)

Inverter can operate simultaneously with an AC generator

Rectifier inputs

Capacity relative to inverter (%) (.)

Efficiency (%) (.)

Help Cancel OK

Figura 6 - Tela para entrada das baterias

Battery Inputs

File Edit Help

Choose a battery type and enter at least one quantity and capital cost value in the Costs table. Include all costs associated with the battery bank, such as mounting hardware, installation, and labor. As it searches for the optimal system, HOMER considers each quantity in the Sizes to Consider table.

Hold the pointer over an element or click Help for more information.

Battery type **Moura** Details... New... Delete

Battery properties

Manufacturer: Vision Battery
Website: www.vision-batt.com

Nominal voltage: 12 V
Nominal capacity: 150 Ah (1.8 kWh)
Lifetime throughput: 917 kWh

Costs

Quantity	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/yr)
1	260	260	0.00
(.)	(.)	(.)	(.)

Sizes to consider

Batteries
0
1
3
4
5
6

Advanced

Batteries per string (12 V bus)

Minimum battery life (yr) (.)

Help Cancel OK

Figura 7 - Tela de aparência do sistema

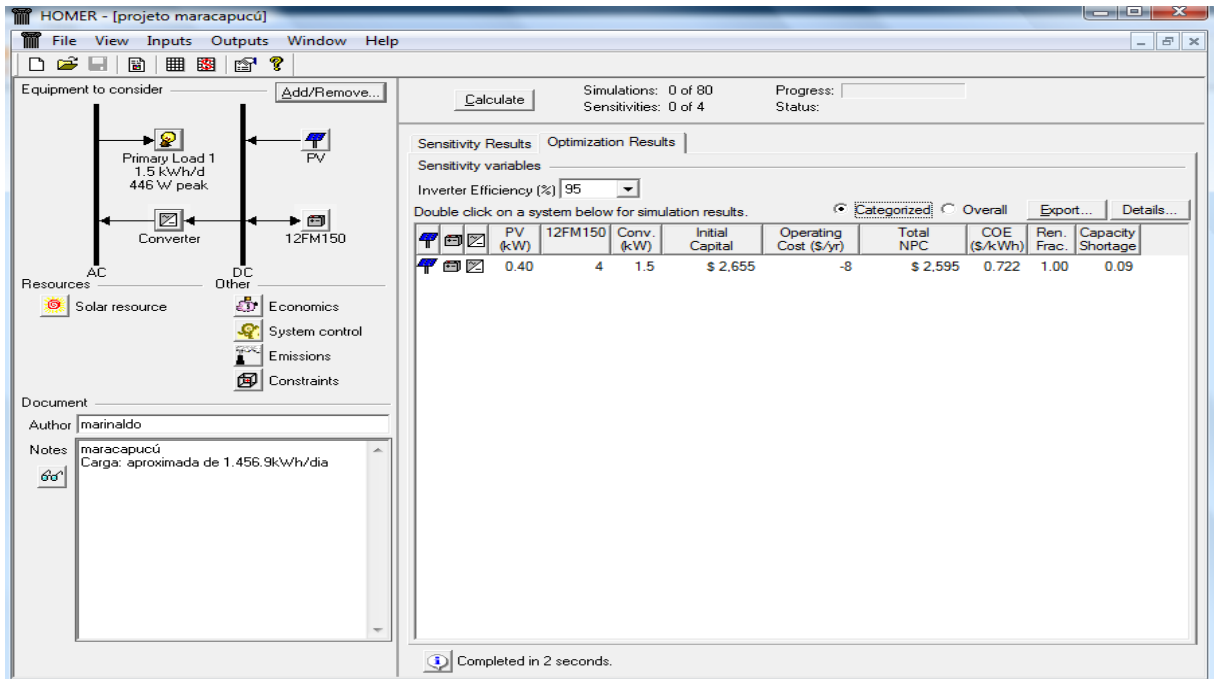


Figura 8 - Tela para definição do sistema

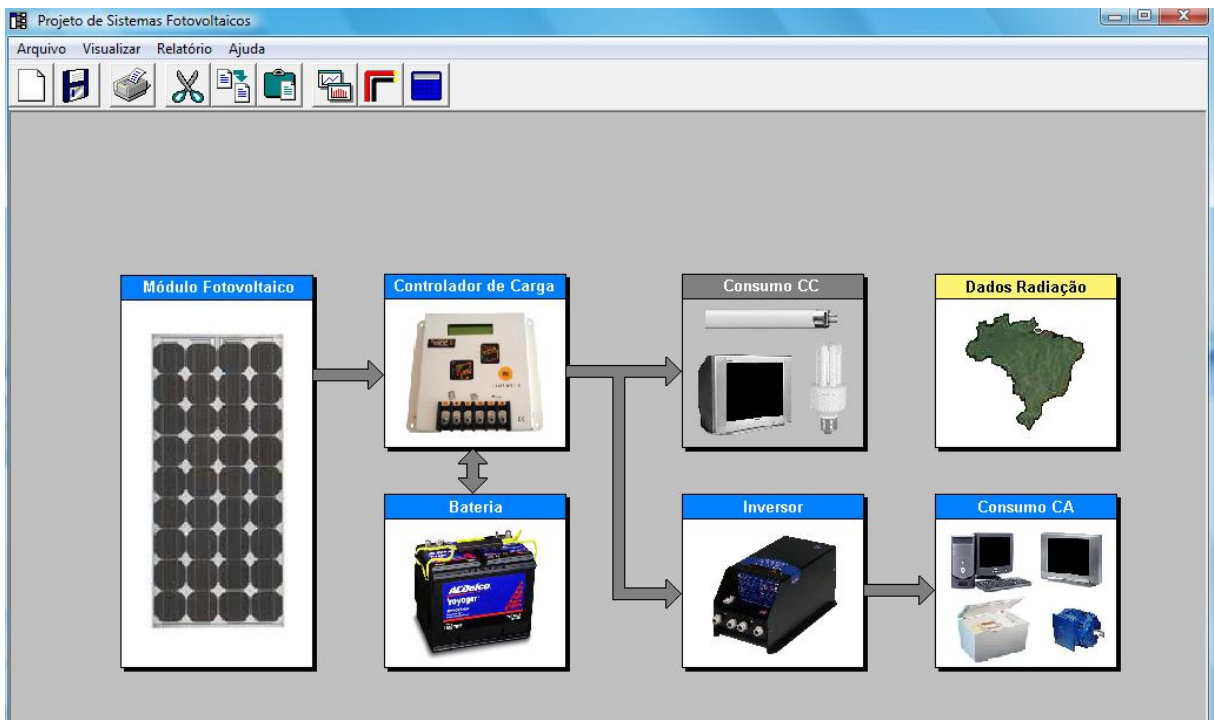


Figura 11 - Tela para a definição do regulador

Figura 12 - Tela para a definição das baterias

MARINALDO DE JESUS DOS SANTOS RODRIGUES

ESTUDO, LEVANTAMENTO E DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO DE GERAÇÃO DE ENERGIA, UTILIZANDO OS SOFTWARES HOMER E PV SIZE NA ILHA DE NAZARÉ MARACAPUCÚ – ABAETETUBA -PA.

Esse trabalho de conclusão de curso foi julgado e aprovado, para obtenção de Título de Bacharelado em Engenharia Industrial pelo corpo docente da Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Pará, Campus Universitário do Baixo Tocantins.

Abaetetuba, 13 de Junho de 2014



Prof. Dr. Silvio Bispo do Vale
UFPA
Orientador



Prof. Me. Hallan Max Silva Souza
UFPA
(Avaliador)



Prof. Me. Eliomar Azevedo do Carmo
UFPA
(Avaliador)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ABAETETUBA
FACULDADE DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
Rua Manoel de Abreu, s/n, Bairro: Mutirão, CEP: 68.440-000
FONE/FAX: (91)3751-1131/3751-1107, ramal externo: 212
Abaetetuba - Pará



DECLARAÇÃO

Declaro para os devidos fins, que o discente **MARINALDO DE JESUS DOS SANTOS RODRIGUES** do Curso de Engenharia Industrial, da Universidade Federal do Pará, Campus de Abaetetuba, defendeu seu Trabalho de Conclusão de Curso intitulado: **ESTUDO, LEVANTAMENTO E DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO DE GERAÇÃO DE ENERGIA, UTILIZANDO OS SOFTWARES HOMER E PV SIZE NA ILHA DE NAZARÉ MARACAPUCÚ - ABAETETUBA -PA**, no auditório Cabanagem - Campus UFPA- Abaetetuba no dia 13 de Junho de 2014, sob orientação do professor Doutor **Silvio Bispo do Vale**.

Abaetetuba, 13 de Junho de 2014.

Suellen Cristina D. Arruda

Suellen Cristina Queiroz Arruda
Diretora da Faculdade de Ciências
Exatas e Tecnologia
Portaria nº 1239/2013 REITORIA

FACULDADE DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
ABAETETUBA / UFPA-PARÁ