

Universidade Federal do Rio de Janeiro

**ESTRUTURA FOTOVOLTAICA DE APOIO A
TRABALHOS DE CAMPO**

Everton Bemfica Alves Pereira

2013



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

ESTRUTURA FOTOVOLTAICA DE APOIO A TRABALHOS DE CAMPO

Everton Bemfica Alves Pereira

Projeto de graduação apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Jorge Luiz do Nascimento, Dr.-Eng.

**RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
ABRIL DE 2013**

ESTRUTURA FOTOVOLTAICA DE APOIO A TRABALHOS DE CAMPO

Everton Bemfica Alves Pereira

**PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
ENGENHEIRO ELETRICISTA.**

Aprovada por:

Prof. Jorge Luiz do Nascimento, Dr.-Eng.
(Orientador)

Prof. Robson Francisco da Silva Dias, D.Sc.

Prof. Luís Guilherme Barbosa Rolim, Dr.-Ing.

**RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
ABRIL DE 2013**

Pereira, Everton Bemfica Alves

Estrutura fotovoltaica de apoio a trabalhos de campo/ Everton Bemfica Alves Pereira. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013.

XII, 77 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Jorge Luiz do Nascimento

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Elétrica, 2013.

Referencias Bibliográficas: p. 75-77

1. Sistema solar fotovoltaico. 2. Fontes renováveis. 3. Energia solar. 4. Fontes alternativas de energia. I. Nascimento, Jorge Luiz. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica. Curso de Engenharia Elétrica. III. Estrutura fotovoltaica de apoio a trabalhos de campo.

Dedico este trabalho a minha avó, Júlia de Azevedo, “in memoriam”, que sempre me dizia: “Você será um grande homem!”.

Agradecimentos

De início, agradeço a Deus por tudo que tenho e por todas as conquistas que Ele me concedeu. Seria impossível ser o que eu sou hoje sem a luz dele. Agradeço aos meus pais, Wilson e Jurema, por toda dedicação que tiveram ao me educar, fornecendo a mim todos os elementos necessários para que me formasse não apenas um Engenheiro, mas acima de tudo, um homem de bem.

Agradeço a Maria Ana Farinha e Betty Soares pelo enorme carinho e incentivo, que influenciaram diretamente na minha formação pessoal e acadêmica.

Agradeço a Emanuelle Oliveira pelo amor e companhia, de suma importância nesta jornada.

Agradeço a toda minha família por toda admiração, carinho e apoio. Em especial a minha avó Matilde e a minha tia Vera.

Agradeço aos meus amigos da graduação, Amanda Moraes, Thiago Brum, Severino Pedro e Davi Duque, pela valiosa amizade, por toda ajuda e incentivo, indispensáveis nesta passagem pela universidade.

Agradeço aos meus amigos de infância, a galera da rua oito, que sempre estiveram comigo.

Agradeço a Paulo Victor Oliveira pela amizade e pela ajuda com a revisão deste trabalho.

Agradeço os professores do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, que com seus grandes conhecimentos e suas experiências, buscaram me preparar para a vida profissional e me ensinaram lições que ficarão por toda a minha vida. Ao professor Jorge Luiz, um agradecimento especial, pela oportunidade de ser integrante do Laboratório de Fontes Alternativas de Energia e desta forma aprender e contribuir com meu conhecimento nas atividades desenvolvidas. Agradeço também pelo compartilhamento do conhecimento, dedicação e paciência na orientação deste trabalho.

Enfim, agradeço a todas as pessoas que me admiram, que sempre acreditaram em mim e que contribuíram de alguma forma com a minha formação.

Resumo do Projeto de Graduação apresentada à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

SISTEMA DE ENERGIA SOLAR PARA UMA BASE DE APOIO A TRABALHOS DE CAMPO

Everton Bemfica Alves Pereira

Abril/2013

Orientador: Jorge Luiz do Nascimento

Curso: Engenharia Elétrica

Existe uma demanda por energia elétrica, quando são avaliadas as possibilidades de montar um acampamento em áreas isoladas e de difícil acesso. Este suprimento é, normalmente, realizado com geradores à gasolina, que são dependentes de combustível fóssil, possuem peso e volume consideráveis, exigem manutenção mais frequente em comparação com o sistema fotovoltaico, é ruidoso e contribui com poluição para gerar energia. O objetivo deste trabalho é descrever o dimensionamento de um sistema fotovoltaico autônomo, para ser aplicado em um acampamento com fins técnicos ou científicos – trabalho de campo, que vem sendo idealizado no Laboratório de Fontes Alternativas de Energia - UFRJ. Este sistema deve alimentar cargas que são indispensáveis para um indivíduo que deseja trabalhar em um lugar isolado, distante da civilização e com pouca viabilidade para deslocamentos frequentes. A implementação de aquecimento de água também é avaliada para funcionamento na estrutura estudada.

Palavras-chave: Energia Solar, Fontes Renováveis, Sistema Solar Fotovoltaico, Fontes Alternativas de Energia.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

SOLAR ENERGY SYSTEM FOR A BASE OF SUPPORT FOR FIELD WORK

Everton Bemfica Alves Pereira

April/2013

Advisor: Jorge Luiz do Nascimento

Course: Electrical Engineering

There is a demand for electricity, when the possibilities are evaluated to set up camp in remote areas of difficult access. This supply is usually performed with gasoline generators, which are dependent on fossil fuel, have considerable weight and volume, requiring more frequent maintenance compared with the PV system is noisy and contributes pollution to generate energy. The objective of this paper is to describe the design of a standalone PV system to be applied in a camp with technical or scientific purposes - field work, which has been designed at the Laboratory of Alternative Energy Sources - UFRJ. This system should feed loads that are essential for an individual who wants to work in an isolated place, far from civilization and with little viability for frequent displacements. The implementation of heating water is also evaluated for operation in the structure studied.

Keywords: Solar Energy, Renewable, Solar Photovoltaic System, Alternative Energy Sources.

Sumário

1	Introdução.....	12
1.1	Motivação	12
1.2	Objetivo	16
1.3	Organização dos Capítulos.....	17
2	Aspectos teóricos	17
2.1	Energia Solar Fotovoltaica.....	17
2.1.1	Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica	18
2.1.2	Características da célula fotovoltaica.....	25
2.2	Sistemas fotovoltaicos	29
2.2.1	Painéis Fotovoltaicos e arranjos	29
2.2.2	Baterias	30
2.2.3	Controladores de Carga	34
2.2.4	Inversores.....	37
2.3	Aquecimento Solar da Água	39
2.3.1	Coletor Solar.....	40
2.3.2	Reservatórios Térmicos.....	42
2.3.3	Sistemas de Aquecimento Solar	43
3	Dimensionamento fotovoltaico	45
3.1	Determinação do Consumo	46
3.2	Níveis de Radiação Solar da Localidade	47
3.3	Dimensionamento do arranjo fotovoltaico	49
3.4	Dimensionamento do Banco de Baterias	53
3.4.1	Balço Energético Entre Geração e Consumo.....	53
3.4.2	Capacidade do Banco de Baterias.....	57
3.4.3	Recarga do Banco de Baterias	58
3.5	Dimensionamento do Controlador de Carga	64
3.6	Dimensionamento do Inversor	66
3.7	Dimensionamento dos Cabos.....	67
4	Dimensionamento Termosolar	68
5	Simulação.....	70
6	Conclusões.....	73
7	Referencias Bibliográficas	75

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Capacidade de geração de energia alternativa	14
Figura 1.2 - Investimento anual em energia alternativa	14
Figura 2.1 – Níveis de Energia	19
Figura 2.2 - Dopagem do Silício (a) com um átomo de fósforo; (b) com um átomo de boro.....	20
Figura 2.3 - Célula Fotovoltaica de Silício Cristalino.....	21
Figura 2.4 - Célula de Silício Monocristalino	23
Figura 2.5 - Célula de Silício Policristalino	23
Figura 2.6 - Silício Amorfo	24
Figura 2.7 - Célula fotovoltaica, módulo e arranjo de painéis	25
Figura 2.8 - Curvas típicas I-V e P-V para o módulo fotovoltaico Up-M240.....	27
Figura 2.9 - Curvas I-V e P-V para diversas temperaturas e radiação incidente de 1000 W/m ² .	29
Figura 2.10 - Bateria de Chumbo.....	31
Figura 2.11 - Ciclo de carga/descarga para uma bateria de chumbo-ácido.....	33
Figura 2.12 - Regulador série com LVD opcional.....	35
Figura 2.13 - Regulador shunt com LVD opcional.	36
Figura 2.14 - Exemplo de sistemas que utilizam MPPT: (a) Sistema CC e (b) Sistema CA.	36
Figura 2.15 - Formas de onda típicas de inversores.....	39
Figura 2.16 - Seção típica de um coletor plano.....	40
Figura 2.17 - Concentrador parabólico	41
Figura 2.18 - Esquema de funcionamento de um coletor concentrador	42
Figura 2.19 - Seção de um reservatório comumente usado	43
Figura 2.20 - Esquema de funcionamento do sistema de aquecimento por termo-sifão	44
Figura 2.21 - Esquema de funcionamento do sistema de aquecimento por circulação forçada	45
Figura 3.1 - Radiação Solar para o ângulo com maior valor mínimo mensal.....	49
Figura 3.2 - Especificações Mecânicas do Módulo Fotovoltaico EcoSolargyECO200A125M-72	52
Figura 3.3 - Curvas para o Módulo EcoSolargy ECO200A125M-72.....	52
Figura 3.4 - Controlador de carga de 20A (12V/24V) Tracer-2210RN.....	65
Figura 3.5 - Inversor Senoidal Victron Phoenix 24/350.....	66
Figura 3.6 - Esquema de Ligações do Sistema com suas Respektivas Distâncias.....	67
Figura 4.1 - Coletor de PVC	69
Figura 4.2 - Caixa de Isopor Isoeste 37 litros.....	69
Figura 4.3 - Sistema de aquecimento solar com coletor de PVC	70
Figura 5.1 - Entrada de dados para início da simulação no PVSize	71
Figura 5.2 - Circuito montado no PVSize.....	72
Figura 5.3 - Curva de Energia gerada fornecida pelo PVSize.....	72
Figura 5.4 - Curva de potência consumida fornecida pelo PVSize	73

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Especificações para o painel solar UP-M240.....	27
Tabela 3.1 - Levantamento de Cargas.....	46
Tabela 3.2 - Radiação Diária Média.....	48
Tabela 3.3 - Cálculo do Plano Inclinado	48
Tabela 3.4 - Especificações do Sistema	50
Tabela 3.5 - Especificações do Módulo Fotovoltaico	51
Tabela 3.6 - Potência Elétrica Gerada Diariamente Pelo Sistema Fotovoltaico.....	54
Tabela 3.7 - Especificações para a bateria Moura Clean Nano 12MF100.....	58
Tabela 3.8 - Comportamento do Banco de baterias no Período de 24 Horas.	59
Tabela 3.9 - Comportamento do Banco de baterias no Período de 24 Horas Para o Cenário Emergencial.....	62
Tabela 3.10 - Especificações para o Controlador de Carga Tracer-2210RN.....	65
Tabela 3.11 - Especificações do Inversor Victron Phoenix 24/350	66
Tabela 3.12 - Especificações dos cabos.....	68

Lista de Gráficos

Gráfico 3.1 - Perfil de Consumo	47
Gráfico 3.2 - Radiação solar horária	54
Gráfico 3.3 - Geração Fotovoltaica Horária.....	55
Gráfico 3.4 - Balanço Energético Diário	56
Gráfico 3.5 - Resultado do Balanço Energético entre Geração e Carga.....	56
Gráfico 3.6 - Comportamento do Banco com 100% Carga no Primeiro Horário de Geração.....	60
Gráfico 3.7 - Comportamento do Banco com 20 % da Carga no Primeiro Horário de Geração .	61
Gráfico 3.8 - Perfil de Consumo Para o Cenário Emergencial de Recarga do Banco de Baterias	62
Gráfico 3.9 - Comportamento do Banco de Baterias Para o Perfil Emergencial Proposto	64

1 Introdução

1.1 Motivação

A aplicação solar fotovoltaica é uma alternativa de geração de energia a partir de fonte renovável, capaz de contribuir substancialmente no atendimento e na sustentabilidade da demanda de energia elétrica em aplicações distantes da rede elétrica convencional, uma vez que o recurso solar está disponível em todo globo terrestre. Visando atender a demanda dos pesquisadores do Instituto de Biologia, que solicitaram uma alternativa em fonte de energia para substituir o gerador a gasolina, utilizado na pesca elétrica, um trabalho desenvolvido por Carlos Roberto José da Silva Júnior [1], surgiu a motivação para este trabalho. A ideia foi ampliada e ao invés de desenvolver um sistema de geração alternativa apenas para as necessidades de pesca elétrica, será dimensionado um sistema fotovoltaico autônomo capaz de atender cargas básicas para um acampamento de pesquisa.

No cenário descrito, o suprimento de energia é, normalmente, realizado com geradores à gasolina, que são dependentes de combustível fóssil, que é energia não renovável, possuem peso e volume consideráveis, exige manutenção frequente, é ruidoso e polui pra gerar energia. Mas os principais problemas são a manutenção e a início de operação: “já na hora da demonstração da pesca elétrica, o gerador só funcionou por conta do nosso conhecimento com motores de popa de barcos” [1].

O Sol é a mais importante fonte de energia alternativa. A energia solar chega à Terra sob a forma de radiação eletromagnética. Estas radiações localizam-se predominantemente na região do visível e infravermelho do espectro.

A energia proveniente do Sol está na origem das fontes de energia renováveis, como por exemplo, a energia eólica, a energia hídrica, a energia fotovoltaica e a biomassa, que resulta do aproveitamento das plantas.

A energia eólica é, também, uma consequência direta da energia solar. O aquecimento da atmosfera por absorção da radiação solar não é homogêneo, produzindo zonas de pressão diferenciadas, com a consequente migração de massas de ar, provocando os ventos. A energia existente nos combustíveis fósseis também é de origem solar. O petróleo e o carvão formaram-se a partir de plantas terrestres e de plâncton marinho, que ficou soterrado durante milhões de anos, entre rochas sedimentares. Assim, os combustíveis fósseis consubstanciam energia solar acumulada

por fotossíntese em vegetais e em determinados organismos que deles se nutrem, ao longo de milhões de anos.

Um estudo realizado [2] mostra que, dos 4.300 GW da geração anual em todo o mundo, 240 GW provêm de fontes renováveis.

Em 2006, foi observado um crescimento na produção de energia por diversas fontes alternativas: Eólica (25-30%), Solar – fotovoltaica (50-60%), Solar – térmica (15-20%) e Biocombustíveis (15-20%). Estima-se que o uso de energia renovável fará com que se deixe de emitir por ano cerca de cinco gigatoneladas (5Gt.) de gases responsáveis pelo aumento do efeito estufa.

A energia eólica alcançou 90 GW de capacidade acumulada em 2007 e a energia solar fotovoltaica gerou cerca de 8 GW.

Sistemas que utilizam a energia solar para o aquecimento de água são responsáveis pelo fornecimento de água quente para mais de 50 milhões de residências. Cerca de 25 milhões de residências localizadas em zonas rurais utilizam energia produzida por biogás, pequenas turbinas eólicas, energia solar e por outras tecnologias.

Mais de U\$100 bilhões aplicados no mundo todo no setor de energia renovável durante o ano de 2006 é, sem dúvida, um voto de confiança por parte dos investidores. Além disso, cerca de 50 países estabeleceram como meta o aumento no uso desse tipo de energia (13 países em desenvolvimento, todos os países da União Européia e diversas províncias dos EUA e Canadá) e 44 países/estados/províncias possuem um Renewable Electricity Standard (RES) que define que uma parcela da eletricidade produzida no futuro seja a partir de fontes renováveis.

No gráfico da Figura 1.1, observa-se a capacidade de geração de energia (em gigawatts) por fontes renováveis (excetuando-se grandes hidroelétricas) do mundo e de diferentes países e na Figura 1.2, é possível observar a evolução do investimento (em bilhões de dólares) anual realizado em energia renovável entre 1995 e 2007 [2].

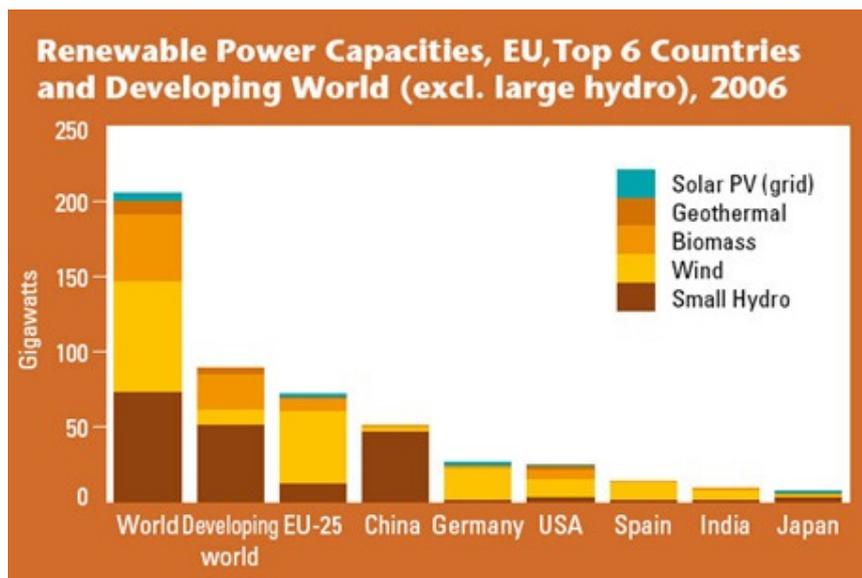


Figura 1.1 - Capacidade de geração de energia alternativa

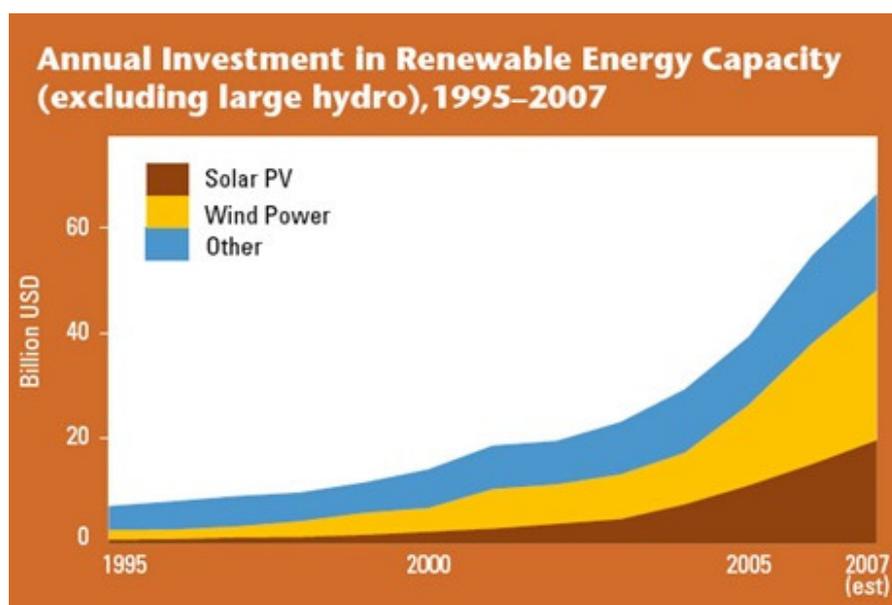


Figura 1.2 - Investimento anual em energia alternativa

FONTE: REM21, 2007

Com os dados apresentados, pode-se observar que a energia renovável já é uma realidade em todo o globo. O Brasil, detentor de uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo industrializado, mantém o ritmo de crescimento das fontes renováveis.

O Ministério de Minas e Energia, por meio da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), elabora e publica anualmente o Balanço Energético (BEN). Segundo dados

preliminares do BEN 2011 (ano base 2010), a oferta de energia elétrica cresceu 9,1% e, neste recorte, a energia renovável que mais contribuiu foi a eólica, com 50,5% de incremento, seguida pela biomassa, que teve aumento de 18,1% em relação ao ano anterior. No segmento dos combustíveis líquidos, foram registradas altas de 7,1% na produção de etanol e de 49,0% na de biodiesel. Hoje, o Brasil investe duas vezes mais em energias renováveis do que todos os 53 países africanos juntos. Entre 2005 e 2010, a capacidade instalada de geração de energia renovável no Brasil aumentou em 42%, uma das mais altas do mundo. Hoje, a energia eólica no País produz 950 MW. Apesar de o número ser apenas uma fração dos 86 mil MW gerados na Europa, o estudo mostra que a aposta do Brasil tem sido acertada.

O uso de energia solar vem sendo cada vez mais difundido no Brasil, de modo que vários fatores contribuem para tal reconhecimento. São muitas as causas que justificam a expansão da energia solar no País, tendo como a principal o clima quente com grande incidência de sol durante o ano todo [3].

O Brasil já é o sétimo no ranking mundial de utilização da energia solar e o aproveitamento dessa fonte de energia tem crescido ano após ano. Contudo, apesar do clima de otimismo e da expansão da exploração dessa matriz energética no País, ainda há uma série de desafios a serem trilhados.

A exploração da energia solar fundamenta-se na utilização dos denominados painéis solares fotovoltaicos, que são dispositivos utilizados para converter a energia da luz do Sol em energia elétrica e de coletores solares para aquecimento de água. Com relação aos painéis fotovoltaicos, estes geram energia elétrica por intermédio do uso de células solares semicondutoras, produzidas à base de silício. É justamente aí que reside um problema quando tratamos da exploração da energia solar no Brasil. Na verdade, o silício utilizado nos painéis fotovoltaicos é o chamado silício grau solar, conhecido pela sigla SiGS, uma das formas mais puras desse composto. Atualmente, o Brasil produz silício de grau metalúrgico em larga escala, o menor grau na escala de pureza. O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de silício em grau metalúrgico, sendo certo que o domínio da técnica de purificação para o grau solar, além de inserir o Brasil de forma ativa como produtor de placas fotovoltaicas propiciará o seu ingresso em um importante mercado.

O fato é que, por conta dessa defasagem tecnológica, o País ainda não possui um parque tecnológico e industrial apto a produzir os painéis fotovoltaicos, se vendo

obrigado a importá-los. Isso faz surgir outro problema: o aumento dos custos com a exploração dessa matriz energética.

Por conta das mencionadas limitações técnicas, seja no refino do silício para grau solar, seja na produção das placas fotovoltaicas, o Brasil se vê obrigado a importar os painéis utilizados na exploração da energia solar e em função disto a tecnologia ainda deve demorar um pouco a deslanchar no país. Isto por que o Brasil possui alternativas de geração a partir de fontes renováveis, como eólica, biomassa e hídrica que tem hoje custos bem menores.

Hoje, a energia solar fotovoltaica se destaca entre as fontes alternativas por vários fatores: é uma das fontes menos poluentes, é uma fonte silenciosa, modular, necessita de pouca manutenção, possui prazos de instalação e operação muito pequenos [3], impacto ambiental quase nulo e pode ser facilmente integrada às construções, gerando eletricidade localmente, sem a necessidade de linhas de transmissão que provocam perdas e alto impacto ambiental. Esses são os fatores a serem considerados para a adoção da energia solar neste trabalho. O custo não será abordado, uma vez que a energia solar fotovoltaica é a única energia alternativa capaz de suprir a demanda proposta neste trabalho.

1.2 Objetivo

De acordo com as vantagens e de todo um cenário a favor da energia solar fotovoltaica, o objetivo deste trabalho é descrever o projeto de um sistema fotovoltaico autônomo. Este será utilizado em um acampamento de pesquisa, com a finalidade de dar todo o suporte necessário ao cientista em termos energéticos, ou seja, suprir necessidades que se resumem a refrigeração, controle da temperatura ambiente, iluminação, carregador de baterias para diversos equipamentos eletrônicos e inversores para alimentar equipamentos de corrente alternada.

A metodologia consiste na pesquisa e seleção de dispositivos de uso alimentados por energia fotovoltaica, além dos dispositivos de interface entre o suprimento e as cargas. No desenvolvimento, incluem-se as seguintes etapas: concepção, cálculos, montagens e testes isolados dos dispositivos, para no final realizar um ensaio de toda a estrutura conjugada. Espera-se dimensionar e ensaiar toda a estrutura: sistema fotovoltaico, aquecimento de água e funcionamento das cargas e dispositivos de

interface. Os resultados poderão auxiliar uma vasta gama de profissionais que realizam trabalhos em locais com condições geográficas e ambientais desfavoráveis.

1.3 Organização dos Capítulos

O capítulo 2 é uma breve abordagem teórica, com a finalidade de apresentar os principais conceitos que envolvem a energia solar fotovoltaica e a termosolar, bem como sua aplicação.

O capítulo 3 consiste no dimensionamento do sistema proposto: estimativa de carga e radiação solar; dimensionamento dos módulos fotovoltaicos e do banco de baterias; definir as especificações do controlador de carga e do inversor; dimensionamento dos cabos e layout de instalação.

O capítulo 4 descreve o dimensionamento termosolar de acordo com a proposta de ser algo leve e eficiente.

O capítulo 5 trata de uma simulação com as especificações obtidas através dos cálculos de dimensionamento.

No capítulo 6, são apresentadas as conclusões deste trabalho.

2 Aspectos teóricos

2.1 Energia Solar Fotovoltaica

A Energia Solar Fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (Efeito Fotovoltaico). O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez em 1839, pelo físico francês Edmund Becquerel, numa solução de selênio. Becquerel notou o aparecimento de uma tensão entre os eletrodos de solução condutora, quando esta era iluminada pela luz solar. Mais tarde, por volta do ano de 1870, o efeito fotovoltaico foi estudado em sólidos, tal como o próprio selênio, e por volta de 1880, a primeira célula fotovoltaica foi construída utilizando-se o selênio. A eficiência desta célula era na faixa de 2%.

Na década de 50, pesquisas em aplicações práticas para a tecnologia fotovoltaica foram iniciadas nos Estados Unidos. Em 1954, o Laboratório Bell produziu a primeira célula fotovoltaica de silício de junção p-n. A partir disto focou-se na obtenção de

resultados consistentes para construção de um sistema robusto e de longa duração para sistemas de alimentação de satélites.

Com os resultados satisfatórios obtidos, as células fotovoltaicas rapidamente tornaram-se a escolha mais conveniente para esta finalidade, conceito que permanece até os dias atuais. Com base nos investimentos [4] e no desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica, a partir dos anos 70, o custo das células fotovoltaicas tem caído, incentivando o uso para a geração de eletricidade em larga escala ao redor do globo.

2.1.1 Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica

O efeito fotovoltaico permite a geração de eletricidade diretamente a partir da luz do sol, através de material semicondutor onde geralmente o elemento utilizado é o silício. A célula solar, também, conhecida como célula fotovoltaica, é o elemento básico para a transformação da radiação eletromagnética em energia elétrica e pode ser compreendida como um dispositivo semicondutor que produz uma corrente elétrica, quando exposta à luz.

Um semicondutor a zero kelvin possui uma banda preenchida por elétrons, denominada banda de valência e outra banda de nível mais alto, vazia a baixas temperaturas, chamada banda de condução. Uma pequena separação existe entre essas duas bandas, que não pode ser ocupada por elétrons, chamada de banda proibida ou *gap*. Para que o elétron passe da banda de valência para a de condução, é necessária uma quantidade mínima de energia. Desse deslocamento, dois tipos de portadores de carga são formados: o elétron agora localizado na banda de condução e uma lacuna (positiva), onde o elétron se localizava na banda de valência. Na Figura 2.1 estão representadas as faixas de condução e valência, assim como a banda proibida.



Figura 2.1 – Níveis de Energia

Fótons na faixa visível, com energia suficiente, são capazes de excitar elétrons e levá-los à banda de condução. Esta é uma propriedade fundamental para as células fotovoltaicas, esse efeito, que pode ser observado em semicondutores puros, também chamados de intrínsecos, não garante por si só o funcionamento de células fotovoltaicas. Para isto é necessário uma estrutura apropriada, em que os elétrons excitados possam ser coletados, gerando uma corrente útil.

Os elementos pertencentes ao grupo IV da tabela periódica, como o silício e o germânio, possuem como principal característica a presença de quatro elétrons de valência que se ligam aos vizinhos em ligações covalentes, formando uma rede cristalina. Ao adicionar átomos pentavalentes, como o fósforo, haverá um elétron em excesso para formar as ligações covalentes, ficando fracamente ligado ao seu átomo de origem, como ilustrado na Figura 2.2 (a). Nesse caso, será necessária apenas uma pequena quantidade de energia para liberar este elétron para a banda de condução. Desta forma, se assume que o fósforo é um elemento dopante doador de elétrons e denomina-se dopante N e o cristal dopado chama-se tipo N. Em contrapartida, se forem introduzidos elementos do grupo III da tabela periódica, como o boro, um elétron será necessário para satisfazer as ligações covalentes com os átomos de silício da rede, isso pode ser observado na Figura 2.2 (b). Essa falta de elétron é denominada lacuna, o boro é considerado um portador de elétrons, ou seja, um dopante P e, o cristal dopado, chamado de tipo P.

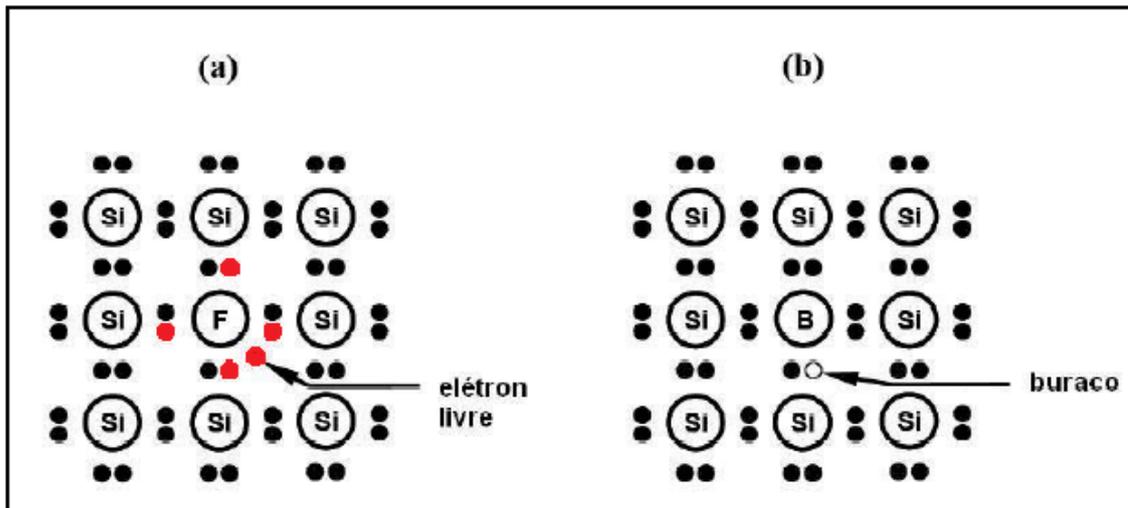


Figura 2.2 - Dopagem do Silício (a) com um átomo de fósforo; (b) com um átomo de boro.

Unindo, adequadamente, semicondutores do tipo-p e do tipo-n, temos a chamada junção PN. Na região da junção se dá uma difusão de elétrons do lado N para o lado P, devido ao elevado gradiente de concentração. Esse deslocamento estabelece uma redução de elétrons do lado N, tornando-o positivo, e um acúmulo de elétrons do lado P, tornando-o negativo, formando um campo elétrico que surge na região da junção. Esse processo alcança o equilíbrio, quando o campo elétrico forma uma barreira capaz de impedir a passagem de elétrons livres remanescentes do lado N. A tensão total através da junção é denominada de tensão de difusão, cerca de um volt.

Iluminando a região de união da junção PN, os fótons com energia igual ou maior ao *gap* do material semiconductor podem ser absorvidos e produzir elétrons livres, formando pares elétrons-lacunas que serão acelerados por efeito do campo elétrico em sentidos opostos. Este fenômeno descrito é o efeito fotovoltaico. A consequência desta separação de carga é a formação de uma diferença de potencial entre as superfícies opostas da célula. Esta tensão é chamada de tensão de circuito aberto.

Se um condutor conecta ambas as faces da célula, quando a mesma é iluminada, circulará uma corrente, cuja intensidade é proporcional à luz que incide sobre a célula, conhecida como corrente de curto-circuito. A Figura 2.3 mostra a estrutura básica desse tipo de célula.

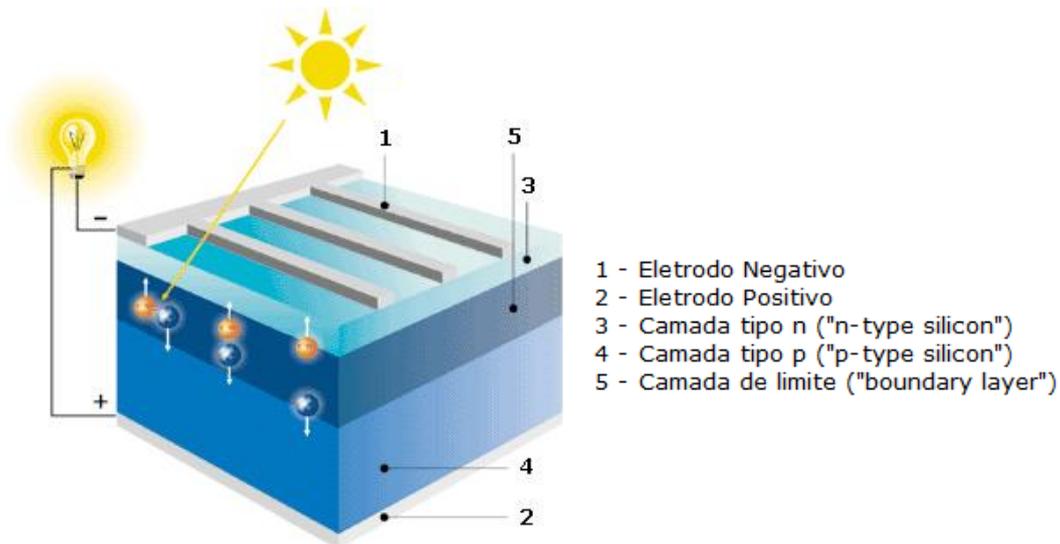


Figura 2.3 - Célula Fotovoltaica de Silício Cristalino

Outros fenômenos também influem na eficiência da célula, tais como:

- O elétron livre liberado pela absorção do fóton pode se recombinar com uma lacuna antes de atingir os contatos elétricos. Esse processo é especialmente afetado pela presença de impurezas, de defeitos na estrutura cristalina ou de interfaces que facilitam a recombinação;
- A resistência existente tanto no material semiconductor quanto na superfície de contato metálica que conecta ao circuito externo diminui a eficiência. Porém, aumentar a superfície de contato, visando reduzir essa resistência, diminui a área de absorção de luz. Logo, há um compromisso entre esses dois fatores;
- A reflexão da radiação incidente prejudica a eficiência, Para evitá-la, coberturas anti-reflexivas são colocadas sobre as células;
- A temperatura afeta o funcionamento da célula, reduzindo a eficiência à medida que aumenta. O aumento da temperatura faz com que a banda de energia do material semiconductor diminua, resultando em um acréscimo da fotocorrente gerada, de aproximadamente 0.1%. Entretanto, a tensão

de circuito aberto, decresce a uma taxa de $0.3 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$, resultando que a potência gerada diminua em 1 \% a cada 2.7 K de elevação da temperatura [6];

De acordo com o método de fabricação, as células fotovoltaicas podem ser classificadas em três tipos principais:

- Silício Monocristalino

Essas células são historicamente as mais usadas e comercializadas como conversor direto de energia solar em eletricidade e a tecnologia para sua fabricação é um processo básico muito bem constituído. A fabricação da célula de silício começa com a extração do cristal de dióxido de silício. Este material é desoxidado em grandes fornos, purificado e solidificado. Este processo atinge um grau de pureza entre 98 e 99%, o que é razoavelmente eficiente sob o ponto de vista energético. Este silício para funcionar como célula fotovoltaica, necessita de outros dispositivos semicondutores e de um grau de pureza maior, devendo chegar à faixa de 99,9999%.

O silício é então fundido juntamente com uma pequena quantidade de dopante, normalmente o boro que é do tipo P. Com um fragmento do cristal devidamente orientado e sob um controle de temperatura efetivo, vai-se extraindo do material fundido um grande cilindro de silício monocristalino levemente dopado. Este cilindro obtido é cortado em fatias finas de aproximadamente $300\mu\text{m}$.

Após o corte e limpeza das impurezas das fatias, devem-se introduzir impurezas do tipo N de forma a obter a junção. Este processo é feito através da difusão controlada onde as fatias de silício são expostas a vapor de fósforo em um forno onde a temperatura varia entre 800 a 1000°C .

Dentre as células fotovoltaicas que utilizam o silício como material, as monocristalinas são as que apresentam as maiores eficiências. As fotocélulas comerciais obtidas com o processo descrito atingem uma eficiência de até 15% podendo chegar em 18% em células feitas em laboratórios.



Figura 2.4 - Célula de Silício Monocristalino

- Silício Policristalino

As células de silício policristalino são mais baratas que as de silício monocristalino por exigirem um processo de preparação das células menos rigoroso. Juntamente com o custo, a eficiência também apresenta uma queda em comparação às células de silício monocristalino. As células policristalinas podem ser preparadas pelo corte de um lingote, de fitas ou depositando um filme num substrato, tanto por transporte de vapor como por imersão. Nestes dois últimos casos somente o silício policristalino pode ser obtido. Cada técnica produz cristais com características específicas, incluindo tamanho, morfologia e concentração de impurezas.

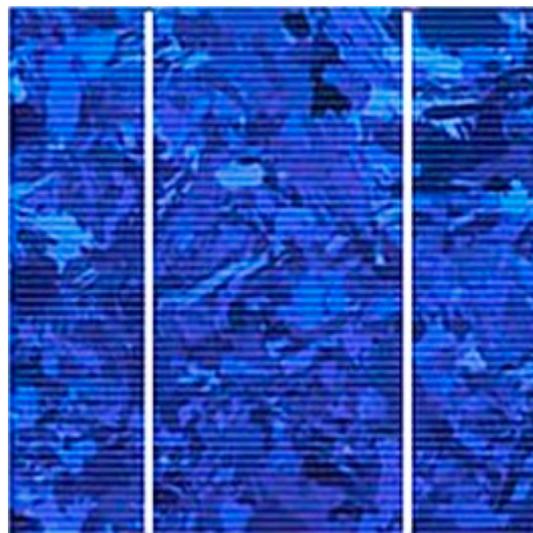


Figura 2.5 - Célula de Silício Policristalino

- Silício Amorfo

Sua confecção é feita a partir do depósito de camadas de silício sobre materiais de espessura bem reduzida, e em função disso, é também conhecido por filmes finos. Uma célula de silício amorfo difere das demais estruturas cristalinas por apresentar alto grau de desordem na estrutura dos átomos.

Por apresentar uma absorção da radiação solar na faixa do visível e podendo ser fabricado mediante deposição de diversos tipos de substratos, o silício amorfo vem se mostrando uma forte tecnologia para sistemas fotovoltaicos de baixo custo. O uso de silício amorfo apresenta duas desvantagens: a primeira é a baixa eficiência de conversão comparada às células mono e policristalinas de silício; em segundo, as células são afetadas por um processo de degradação logo nos primeiros meses de operação, reduzindo assim a eficiência ao longo da vida útil. Em contrapartida, destaca-se como vantagens, um processo de fabricação relativamente simples e de baixo custo, justificado pela menor quantidade de silício utilizado em sua construção, possibilidade de fabricação de células com grandes áreas e baixo consumo de energia na produção.

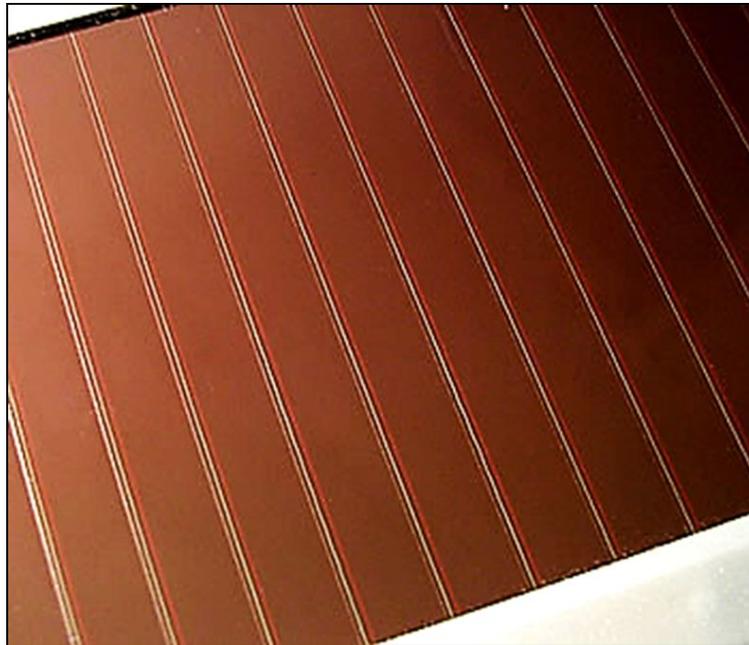


Figura 2.6 - Silício Amorfo

2.1.2 Características da célula fotovoltaica

Uma única célula fotovoltaica, isoladamente, tem capacidade reduzida de produção de energia elétrica, tipicamente entre 1 e 2 watts, correspondente a uma tensão de 0,5 volts e uma corrente de entre 2 e 4 ampères. Portanto, para atingir determinados níveis de tensão e corrente, faz-se necessária a associação de varias células através de ligações série e paralelo, formando os módulos fotovoltaicos. O módulo fotovoltaico também é popularmente chamado de “placa solar” ou “painel solar”. O termo “painel solar” às vezes também é usado para designar arranjos fotovoltaicos.

O número de células em um módulo é determinado pelas necessidades de tensão e corrente da carga a alimentar. Normalmente um módulo fotovoltaico é constituído de 33 a 36 células ligadas em série, resultando em tensão suficiente para alimentar uma bateria de 12 volts.



Figura 2.7 - Célula fotovoltaica, módulo e arranjo de painéis

Os fabricantes fornecem as especificações dos principais parâmetros de um modulo solar considerando a condição de teste padrão (Standart Test Condition ou STC), definida pela norma IEC 61215: 1000 w/m² de potência luminosa incidente total, temperatura das células de 25° e com uma distribuição espectral conhecida como massa de ar 1,5 (air mass 1,5 ou AM 1,5). Os parâmetros a serem especificados são os seguintes:

Corrente de curto-circuito (I_{SC}): é o valor máximo da corrente de carga, igual, portanto, à corrente gerada por efeito fotovoltaico.

Tensão de circuito aberto (V_{OC}): é o valor máximo da tensão nos terminais do módulo fotovoltaico quando nenhuma carga está conectada a ele.

Tensão de Máxima Potência (V_{MAX}): Corresponde à tensão no ponto de máxima potência.

Corrente de Máxima potência (I_{MAX}): Corresponde à corrente no ponto de máxima potência.

Ponto de Máxima Potência (MPP): para cada ponto na curva I-V, o produto corrente versus tensão representa a potência gerada para aquela condição de operação. Em um módulo fotovoltaico, para uma dada condição climática, só existe um ponto na curva I-V onde a potência máxima pode ser alcançada. Este ponto corresponde ao produto da tensão de potência máxima pela corrente de potência máxima.

Temperatura normal de operação (NOCT): como o módulo trabalha exposto ao sol, o fabricante fornece também a temperatura de operação normal da célula (Normal Operating Cell Temperature), medida com 800 w/m^2 de potência luminosa incidente total, temperatura ambiente de 20°C e vento de 1m/s .

Fator de forma (FF): é definido como a relação entre a potência no MPP e o produto da corrente de curto-circuito vezes a tensão de circuito aberto. Valores usuais para células solares ficam entre 70 e 80%. Esta é uma grandeza que expressa o quanto a curva característica se aproxima de um retângulo no diagrama I-V.

Como exemplos, na Tabela 2.1 e Figura 2.8 são apresentadas as especificações para o painel solar *Upsolar UP-M240* e as curvas características típicas I-V e P-V, respectivamente para o mesmo nas condições padrão de testes.

Tabela 2.1 - Especificações para o painel solar UP-M240

Painel Fotovoltaico	Upsolar UP-M240
Potência Máxima	240 W
Tensão de máxima potência	30.2 V
Corrente de máxima potência	7.95 A
Corrente de curto-circuito	8.40 A
Tensão em vazio	37.6 V
Coefficiente de temperatura da corrente de curto-circuito	0.05 %/°C
Corrente gerada pela radiação solar	8.4006 A
Resistência em paralelo	9246.6 Ω
Resistência em série	0.3620 Ω

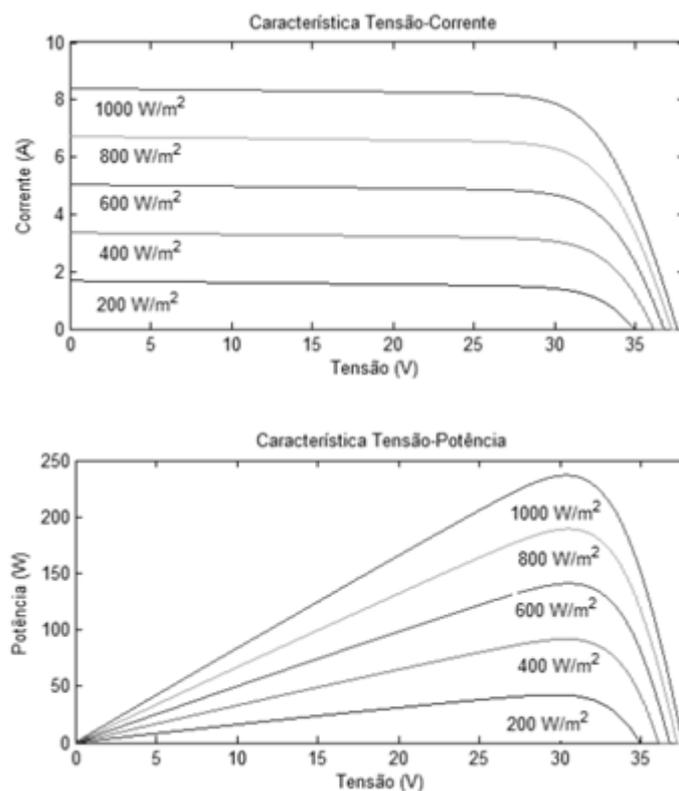


Figura 2.8 - Curvas típicas I-V e P-V para o módulo fotovoltaico Up-M240

Observa-se através das curvas que a máxima corrente fornecida pelo módulo fotovoltaico é a de curto-circuito (I_{sc}), porém, neste ponto a potência fornecida é zero, pois a tensão nos terminais é de zero volt.

Em contrapartida, o mesmo é observado no ponto em que a tensão é máxima, de circuito aberto (V_{oc}), pois nele a corrente é 0A.

Ao longo da curva característica P-V no sentido crescente da tensão um aumento linear da potência fornecida é visualizado e, desta forma, o módulo tem o comportamento de uma fonte de corrente (curva I-V). Inicialmente a corrente permanece quase constante até um ponto de máxima potência no qual a diminuição exponencial da corrente pesa mais do que o aumento linear da tensão, fazendo que a potência diminua rapidamente, e o módulo passe se a comportar como uma fonte de tensão.

Através desta análise, pode-se concluir que as características elétricas de uma célula fotovoltaica e, conseqüentemente, de um painel fotovoltaico, são influenciadas diretamente por dois fatores climáticos: intensidade da radiação solar e temperatura das células.

Com a variação da intensidade de radiação solar incidente em um painel fotovoltaico ocorre uma variação proporcional na corrente gerada por este sinal. A tensão de circuito aberto sofre poucas alterações com a variação da intensidade luminosa, exceto para os casos quando a radiação solar é muito baixa. Assim, com a diminuição da radiação incidente ocorre um deslocamento para baixo do ponto de máxima potência. Isto pode ser comprovado analisando as curvas da Figura 2.8.

Ao contrário do caso anterior, a corrente gerada pelo módulo fotovoltaico apresenta poucas variações com a alteração de temperatura da célula fotovoltaica, porém, com o aumento da temperatura da célula, a tensão de circuito aberto do módulo fotovoltaico apresenta uma diminuição de seus valores muito mais significativa, além de ocorrer um deslocamento para baixo do ponto de máxima potência, este também é deslocado significativamente para esquerda. Exemplos de curvas I-V e P-V para várias temperaturas do painel são mostrados na Figura 2.9. Através da análise dessas curvas, pode-se observar o cenário descrito.

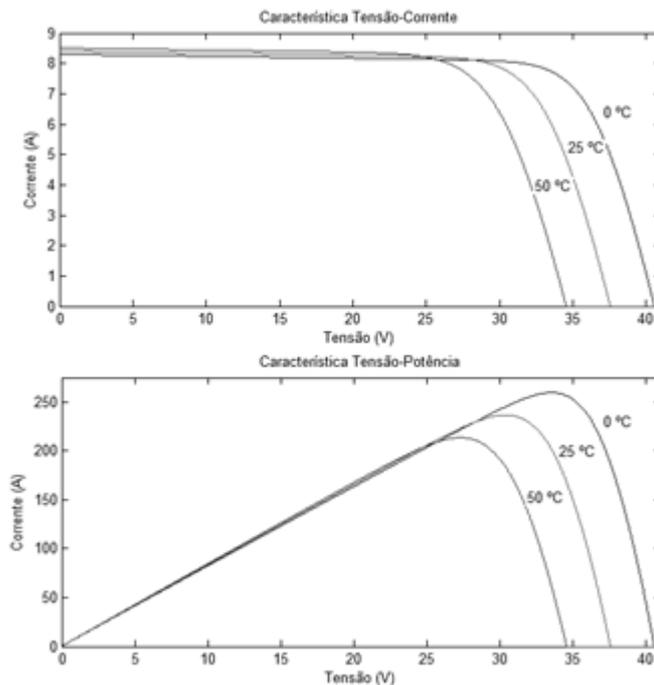


Figura 2.9 - Curvas I-V e P-V para diversas temperaturas e radiação incidente de 1000 W/m^2

2.2 Sistemas fotovoltaicos

Um sistema fotovoltaico de energia é composto por um ou mais módulos fotovoltaicos e por um conjunto de equipamentos complementares, como baterias, controladores de carga, inversores e outros equipamentos de proteção. Esses componentes variam de acordo com a aplicação do sistema fotovoltaico.

2.2.1 Painéis Fotovoltaicos e arranjos

Tal como as células, que podem se associar formando um módulo, os módulos também podem ser associados em série e/ou em paralelo. Se for necessário um aumento na tensão, associam-se módulos em série; se o objetivo é obter um aumento de corrente, associam-se módulos em paralelo. Ao conjunto de painéis dá-se o nome de arranjo fotovoltaico.

Com a finalidade de beneficiar-se da máxima captação de energia ao longo do ano, duas condições devem ser observadas. A primeira considera que, para uma

operação adequada, os módulos devem estar orientados em direção ao Equador. Para instalações localizadas no território brasileiro (Hemisfério Sul), os módulos fotovoltaicos fixos devem estar orientados em direção ao Norte [7].

A segunda condição a ser observada refere-se ao ângulo de inclinação dos arranjos fotovoltaicos. “A correta inclinação do painel pode determinar um ganho de mais de 25% em períodos de baixa insolação” [6]. O ângulo de inclinação que maximiza a geração de energia varia com a época do ano e com a latitude do local onde o sistema será instalado. Para maximizar a energia gerada ao longo do ano, a inclinação do arranjo fotovoltaico deve estar dentro de 10° no entorno da latitude do local. Por exemplo, um sistema usado, ao longo de todo o ano, em uma latitude de 35° pode ter um ângulo de inclinação de 25 a 45° , sem uma redução significativa no seu desempenho anual.

Em geral, a inclinação deve ser igual à latitude do local onde o sistema será instalado, mas nunca inferior a 10° , para favorecer a autolimpeza dos módulos [7]. Vale lembrar ainda que, em locais com muita poeira, é necessário limpar regularmente a superfície do módulo, uma vez que a sujeira afeta a captação de luz, reduzindo o seu desempenho. No entanto, deve-se cuidar para não danificar o vidro ou qualquer outro material de cobertura do módulo.

2.2.2 Baterias

As baterias eletroquímicas são uma importante forma de armazenamento de energia que pode ser utilizada em sistemas fotovoltaicos, pois elas são capazes de transformar diretamente energia elétrica em energia potencial química e posteriormente converter, diretamente, a energia potencial química em energia elétrica. As baterias, também conhecidas como acumuladores eletroquímicos, são classificadas em duas categorias: baterias primárias e secundárias. Baterias primárias são dispositivos eletroquímicos que, uma vez esgotados os reagentes que produzem energia elétrica, são descartadas, pois não podem ser recarregadas. Já as baterias secundárias podem ser regeneradas, ou seja, através da aplicação de uma corrente elétrica em seus terminais podem-se reverter as reações responsáveis pela geração de energia e assim recarregar novamente a bateria. Contudo, esta operação não pode ser repetida indefinidamente. Quanto mais energia a bateria entrega a cada descarga, menor o número de ciclos de

carga e descarga. Os sistemas fotovoltaicos de geração de energia elétrica utilizam acumuladores secundários, ou seja, baterias que podem ser recarregadas. Entre os inúmeros tipos de baterias secundárias, as mais comuns são as de chumbo-ácido e as níquel-cádmio [8].

Em comparação com as baterias de chumbo-ácido, as baterias de níquel-cádmio têm algumas vantagens, como ter uma durabilidade maior, ser menos afetadas por sobrecargas, poder ser totalmente descarregadas não estando sujeitas a sulfatação e não sofrer influencia da temperatura no seu carregamento [8], além disso as baterias de níquel-cádmio não sofrem morte súbita como as baterias de chumbo-ácido. Porém as baterias de chumbo-ácido possuem um custo muito menor que as baterias de níquel-cádmio. Em geral, seu custo chega a ser cerca de três vezes inferior às baterias de níquel-cádmio. Este fato tem determinado sua generalização e continuidade de uso, razão pelo que serão as únicas analisadas neste trabalho.

A composição básica da bateria é essencialmente, chumbo, ácido sulfúrico e materiais plásticos. O chumbo está presente na forma de chumbo metálico, ligas de chumbo, dióxido de chumbo e sulfato de chumbo. O ácido sulfúrico se encontra na forma de solução aquosa com concentrações variando de 27% a 37% em volume.

Na construção mais comum, anodo e catodo são placas retangulares planas, dispostas e interligadas alternadamente, com separadores de material poroso não condutor para evitar contato elétrico direto. O conjunto fica no interior de uma cuba, submerso no eletrólito de solução de ácido sulfúrico. A Figura 2.10 ilustra essa descrição.

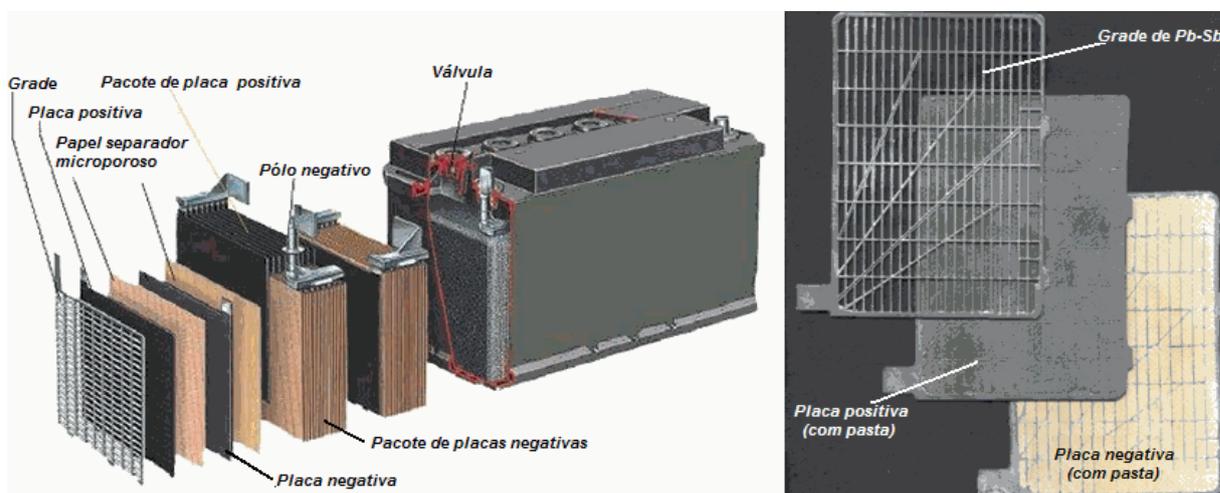


Figura 2.10 - Bateria de Chumbo

A tensão da célula possui cerca de 2 volts, de modo que para se atingir tensões maiores devem ser acopladas várias delas em série, por exemplo, agrupando 6 células pode-se formar uma bateria de 12 volts. Cada célula é composta por uma placa positiva com dióxido de chumbo (PbO_2), uma placa negativa com chumbo (Pb) e de um eletrólito de ácido sulfúrico (H_2SO_4) dissolvido em água.

Quando o circuito externo é fechado, conectando eletricamente os terminais, a bateria entra em funcionamento (descarga).

A corrente no interior da bateria provoca a dissociação do ácido sulfúrico H_2SO_4 entre seus dois componentes, os íons SO_4^- e H_2^+ . Nas placas positivas os íons SO_4^- se combinam com o chumbo Pb do dióxido de chumbo PbO_2 e formam o sulfato de chumbo $PbSO_4$, as duas moléculas de oxigênio, remanescentes do dióxido de chumbo, se combinam com íons hidrogênio H_2^+ para formar água H_2O . Nas placas negativas os íons SO_4^- se combinam com o chumbo Pb para formar também o sulfato de chumbo $PbSO_4$. Nesse processo, a composição das duas placas (a positiva inicialmente de PbO_2 e a negativa de Pb) tende a se transformar em $PbSO_4$, eliminando-se assim a dissimetria que foi a origem da corrente.

Durante a carga as reações químicas que ocorrem são exatamente as inversas das que ocorrem durante a descarga.

A corrente de carga, em sentido inverso do da descarga, dissocia o sulfato de chumbo $PbSO_4$ formado na superfície de todas as placas, sejam elas positivas ou negativas, entre seus dois componentes, os íons SO_4^- e Pb^+ . Da mesma forma, a água H_2O se dissocia em oxigênio O^- e hidrogênio H_2^+ .

Nas placas positivas, os íons SO_4^- se combinam com os íons H_2^+ para regenerar o ácido sulfúrico H_2SO_4 , os íons oxigênio se recombinaem com o chumbo Pb para restituir o peróxido de chumbo inicial PbO_2 .

Nas placas negativas, os íons SO_4^- se combinam com os íons H_2^+ , regenerando o ácido sulfúrico H_2SO_4 , da mesma forma que nas placas positivas, e o chumbo puro Pb reaparece na superfície da placa.

O sistema voltou a seu estado inicial: Foi realizado um ciclo carga/descarga, como mostra a Figura 2.11.

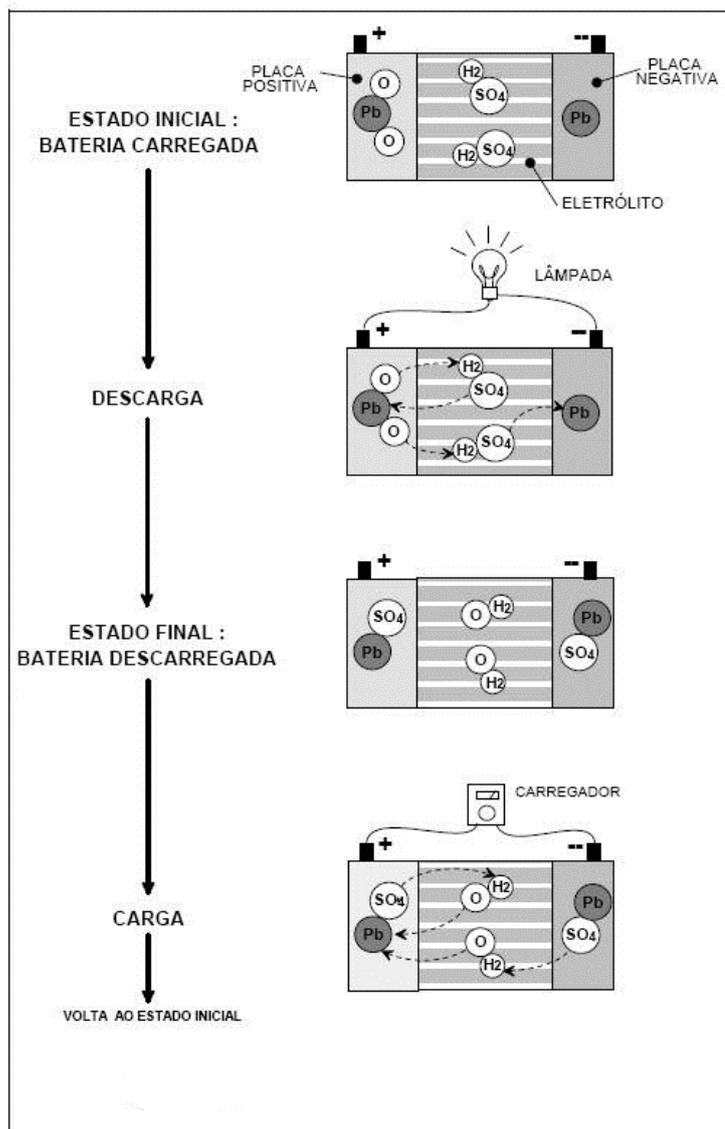
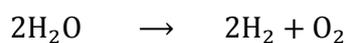


Figura 2.11 - Ciclo de carga/descarga para uma bateria de chumbo-ácido

O processo de recarga tem seu lado problemático, uma vez que pode haver a reação comum de decomposição da água pela passagem de corrente elétrica (eletrolise).



Ou seja, pode ocorrer a formação de uma mistura gasosa potencialmente explosiva e para reduzir o risco, a carga deve ser controlada. A evaporação da água torna necessária a complementação periódica com água pura. Para evitar isso, surgiram na década de 1970, as primeiras células seladas. Elas dispõem também de um composto

catalítico que produz água se houver formação de hidrogênio e oxigênio durante o processo de carga.

Quanto ao tipo, as baterias de chumbo-ácido podem ser classificadas em:

- Baterias de Partida, ou Automotivas, são utilizadas para descargas rápidas, fornecendo altas correntes por alguns segundos;
- Baterias Tracionárias, utilizadas em veículos elétricos, são desenvolvidas para grandes profundidades de descarga;
- Baterias Estacionárias, o tipo usado em sistemas fotovoltaicos, são projetadas para um funcionamento intermitente. Tem a capacidade de suportar vários ciclos de carga/descarga.

Os dois parâmetros mais importantes que caracterizam e especificam as baterias são:

- Capacidade: é a quantidade de carga elétrica que pode ser retirada da bateria em Ampères-hora. Define-se como capacidade nominal a “quantidade de carga extraível de uma bateria (ou elemento) em 20 horas, em uma temperatura média de 25 ° C, e determinada corrente, até que a tensão da bateria caia para 1,8 V/elemento (10,8 volts numa bateria de 12 volts)” [7];
- Profundidade de Descarga: “indica, em termos percentuais, quanto da capacidade nominal da bateria foi retirada a partir do estado de plena carga” [7].

2.2.3 Controladores de Carga

Um ponto a ser satisfeito para carregar um banco de baterias, é que a tensão de carga seja sempre superior à tensão da bateria, caso contrário haverá um fluxo reverso de energia das baterias para o sistema. A tensão de carregamento não deve ser superior a um determinado limite, uma vez que cargas muito rápidas diminuem a vida útil das

baterias, havendo um ponto ótimo de funcionamento. É preciso monitorar o ciclo de descarga das baterias, para que descargas muito profundas não ocorram, pois dependendo da intensidade, podem causar danos irreversíveis às baterias.

Em função dos requisitos a serem atendidos para um funcionamento correto de um banco de baterias é necessário um mecanismo que controle a tensão a ser aplicada no banco de baterias, e que não permita a circulação de corrente para os painéis. Esse mecanismo denomina-se controlador de carga. Esses dispositivos utilizam diodos de bloqueio que não permitem a circulação de corrente reversa, em geral possuem uma chave denominada LVD (do inglês Low Voltage Disconnection) que desliga a carga caso a tensão baixe a determinado nível, esses controladores podem diferir no modo de proteção das baterias contra sobre cargas basicamente através de duas formas:

- Controladores do tipo série

Nos controladores tipo série, uma chave logo após os painéis fotovoltaicos permite desconectar o sistema quando as baterias estão plenamente carregadas, como mostrado na Figura 2.12:

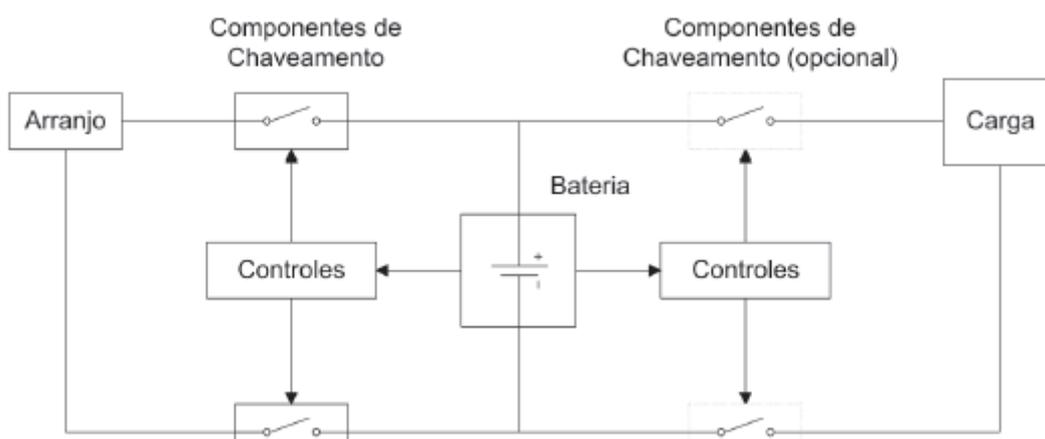


Figura 2.12 - Regulador série com LVD opcional.

- Controladores tipo paralelo

Esses controladores possuem uma chave na entrada dos geradores fotovoltaicos, assim quando a tensão na bateria atinge sua tensão máxima, os painéis são curto-circuitados, ilustrado na Figura 2.13. Esse método consome menos energia e é mais eficiente com as baterias, sendo o mais comumente utilizado.

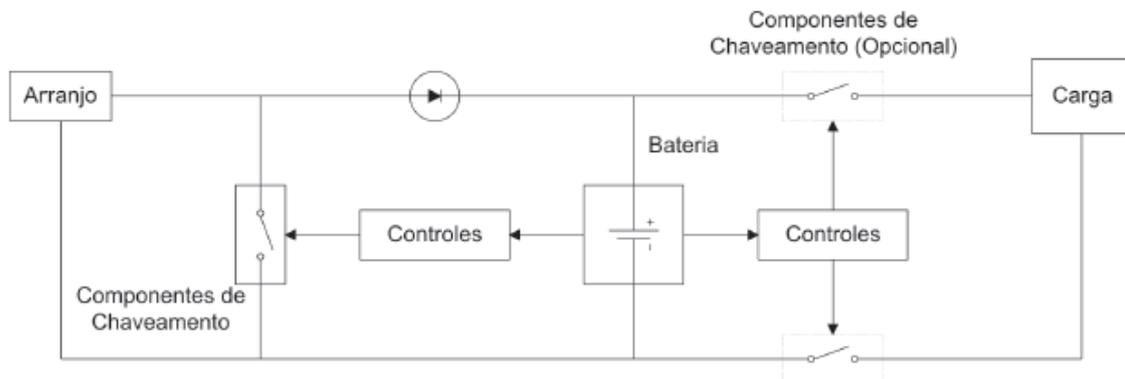


Figura 2.13 - Regulador shunt com LVD opcional.

Como nos controladores tipo série e paralelo é a tensão da bateria que determina o ponto de operação do sistema, a operação em geral se dá fora do ponto de máxima potência (MPP - Maximum Power Point), descrito no Item 2.1.2, na maior parte do tempo. Para que seja possível o rastreamento deste ponto, é necessário um dispositivo denominado MPPT (Maximum Power Point Tracker) ou seguidor do ponto de máxima potência. Esse dispositivo pode estar presente no controlador de carga ou no inversor, ou ainda, ser ele próprio mais um equipamento do sistema fotovoltaico. Geralmente, nos controladores com MPPT, um conversor CC-CC é conectado logo na saída dos painéis fotovoltaicos, e através de um sistema de rastreamento, é determinado o ponto ótimo de operação, sendo a saída do conversor ajustada para a tensão de carga da bateria, conforme mostrado na Figura 2.14. Contudo, em função de ser um dispositivo muito sofisticado, o uso do MPPT só é viável em grandes projetos que possuam sistemas de controle avançados, exigindo uma análise da sua relação custo-benefício [7]. Normalmente são adotados apenas para os sistemas com potência instalada superior a 500 W.

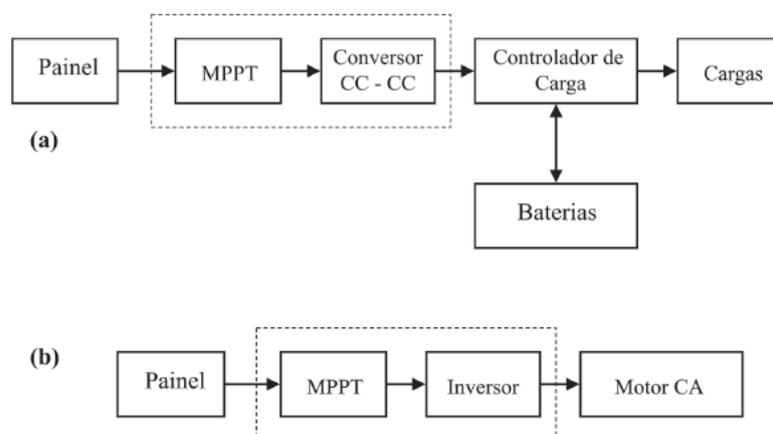


Figura 2.14 - Exemplo de sistemas que utilizam MPPT: (a) Sistema CC e (b) Sistema CA.

2.2.4 Inversores

Os Inversores, também conhecidos como conversores CC-CA, são dispositivos eletrônicos que convertem energia elétrica de corrente contínua para corrente alternada, a mesma energia encontrada na rede elétrica convencional. O principal papel dos inversores em um sistema de geração fotovoltaico é o de criar corrente alternada a partir de corrente contínua, partindo do princípio que uma célula fotovoltaica gera corrente CC. Podemos classificar os inversores quanto à forma de onda de saída, sendo os principais tipos:

Inversores de onda quadrada: A onda quadrada é a forma a mais simples de corrente alternada. Era a única alternativa economicamente acessível antes da chegada do transistor. Os inversores de onda quadrada são mais baratos, mas apresentam os seguintes inconvenientes:

1. O peso. Os Inversores dessa tecnologia usam um transformador BF (baixa frequência) muito pesado.
2. Não pode alimentar motores. O torque de partida de um motor monofásico depende do valor do pico da onda (162 v na onda senoidal de 115 vca). O valor de pico da onda quadrada, limitado a 115 v, não permite dar partida a motores.
3. Distorção harmônica (mede, em %, a diferença entre a forma de uma onda qualquer e a da senóide pura de mesmo valor). No caso da onda quadrada, a distorção harmônica é máxima. Isso é incompatível com inúmeras aplicações; gera ruídos, aquecimento e funcionamentos defeituosos quando conseguir funcionar.
4. O rendimento é baixo: da ordem de 50%.

Inversores de onda senoidal modificada ou retangular: A onda semi-senoidal tem uma forma intermediária entre a onda quadrada e a onda senoidal pura. Todas as vantagens da tecnologia HF vêm da permanência do sinal no valor zero cada vez que o sinal muda de sentido. Isso permite reduzir drasticamente a distorção harmônica, aumentar o valor de pico até o da senóide pura, e aumentar consideravelmente o rendimento. Dessa forma, quase todos os inconvenientes da onda quadrada desaparecem.

Os inversores de tecnologia HF e de onda semi-senoidal são atualmente os mais populares por serem baratos, leves, de fácil manuseio, e atender a maioria das necessidades domésticas e profissionais de pequeno porte. Esses inversores apresentam a melhor relação custo-benefício. Podem ser usados em quase todos os aparelhos, a exceção dos mais sofisticados. Eles possuem rendimentos em torno de 90%.

Inversores de onda senoidal pura: Senóide pura se diz de uma onda de uma frequência só, ou seja, de distorção harmônica nula. Na prática, como já citado anteriormente, é a forma da corrente distribuída pelas redes convencionais. Todos os equipamentos elétricos previstos para ser alimentados por essas redes foram projetados de acordo com essa forma de onda. É com inversores de onda senoidal que aparelhos eletroeletrônicos têm o seu desempenho máximo.

Inversores de onda senoidal são mais sofisticados e, como consequência, são mais caros que os de onda semi-senoidal. São destinados mais especificamente à alimentação de aparelhos sensíveis que não funcionam, ou não funcionam corretamente, com uma onda semi-senoidal, tais como aparelhos de regulação de laboratório, equipamentos aeronáuticos, aparelhos de teste, certos aparelhos de som ou vídeo, entre outros.

Inversores de onda senoidal não geram ruídos ou distorções, é a solução ideal para os mais exigentes. Também, não geram parasitas eletromagnéticos que poderiam interferir com outros equipamentos, em aeronaves, por exemplo.

A Figura 2.15 mostra claramente as diferenças entre as formas de onda. Observe que a forma de onda retangular é sensivelmente mais próxima da senóide que os de onda quadrada, o que a torna mais adequada para a maioria das aplicações.

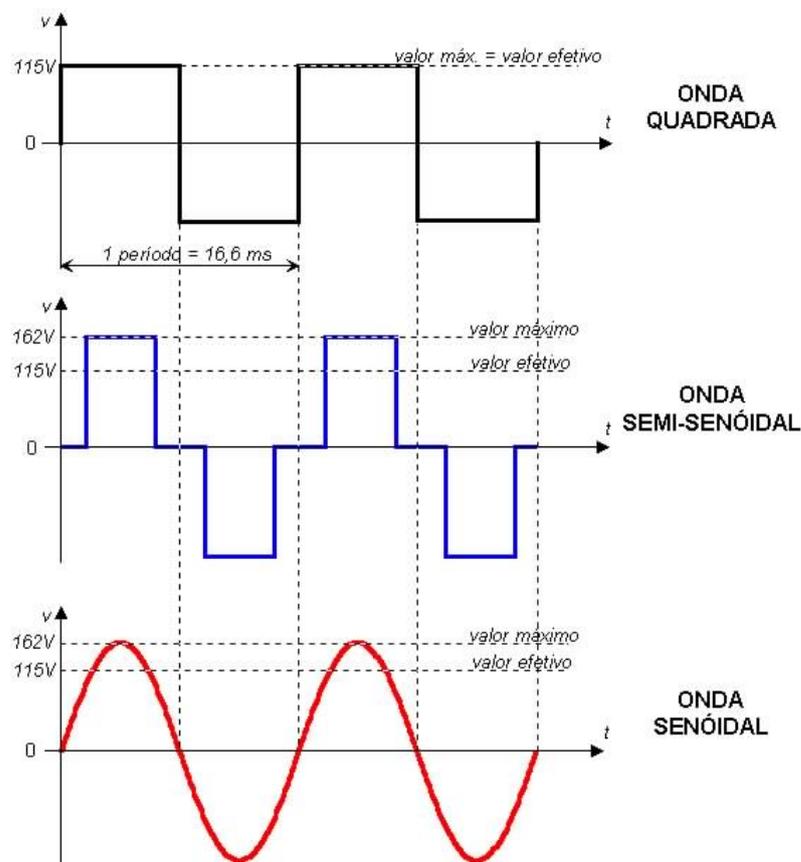


Figura 2.15 - Formas de onda típicas de inversores

2.3 Aquecimento Solar da Água

Atualmente o aquecimento de água é um dos grandes consumidores de energia. Há uma grande demanda de energia elétrica a ser atendida devido à utilização em larga escala de chuveiros elétricos e outros dispositivos de aquecimento de água. O uso do aquecimento solar de água é uma técnica bastante conveniente, tratando-se de um recurso renovável, abundante e ilimitado. A energia solar térmica é uma velha conhecida da humanidade, porém para se ter sucesso na utilização desta tecnologia, é preciso alguns conceitos básicos, pois receber a luz do sol e dela obter trabalho tem suas dificuldades, visto que, a energia incidente na Terra se dá de forma espalhada e sua utilização implica em saber captá-la e armazená-la. Além disso, seu aproveitamento dependerá de muitos fatores climatológicos da região, onde se inclui a hora do dia, a estação do ano, a latitude do local e se o céu está limpo ou nublado.

Esse sistema de aquecimento é basicamente constituído por conjunto de coletores solares e um reservatório térmico. O reservatório se faz necessário porque a

demanda por água quente geralmente não coincide com os horários de insolação, sendo que a demanda geralmente ocorre no período da noite.

2.3.1 Coletor Solar

O coletor é o dispositivo responsável pela captação de energia pelo sol e sua conversão em energia utilizável.

Os coletores podem ser planos ou de concentração.

O coletor plano recebe e utiliza a radiação solar na mesma superfície. Sendo que é composto por uma placa absorvedora na cor preta, tubulações por onde escoo o fluido a ser aquecido, isolamento térmico e cobertura transparente.

A placa absorvedora converte a energia em calor, transfere para as tubulações e em seguida para o fluido. Tanto as placas quanto as tubulações são construídas com metais de alta condutibilidade térmica, como por exemplo: cobre, aço ou alumínio.

A cobertura transparente, feita de vidro comum reduz as perdas radiativas da placa absorvedora, sendo responsável pelo efeito estufa ao refletir de volta a radiação infravermelha para a placa.

Como fluido a ser aquecido nas tubulações pode se utilizar a própria água ou outro líquido quando é necessária proteção contra o congelamento. Atualmente se utiliza etileno glicol como fluido de transferência.

Os materiais isolantes mais utilizados são fibra mineral, fibra cerâmica, espuma de plástico, ou fibra de vidro. As propriedades dos coletores planos podem ser melhoradas utilizando-se filme de teflon, vidro, tratamento anti-reflexivo e um refletor.

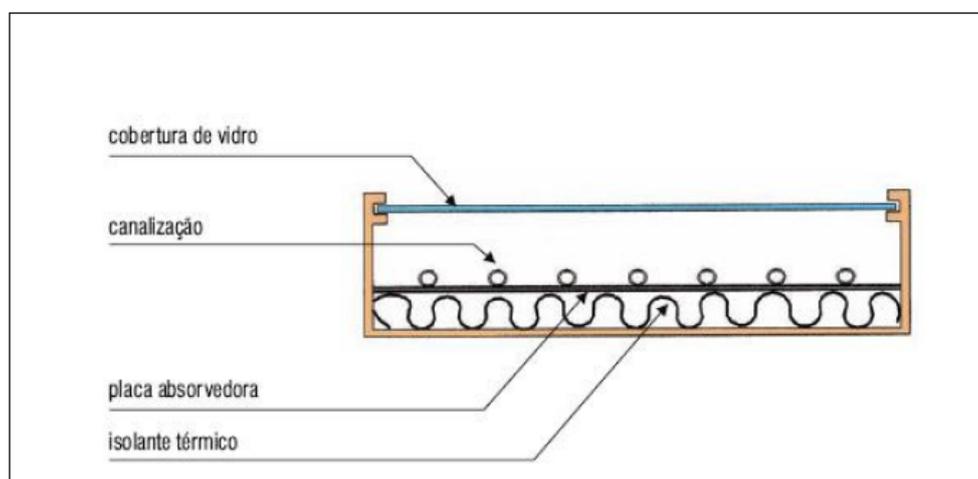


Figura 2.16 - Seção típica de um coletor plano

Nos sistemas de coletores solares com concentração, como o próprio nome já diz, ter-se-á uma ampliação da quantidade de raios que alcançarão o absorvedor, que é o elemento receptor de energia. Este absorvedor por sua vez pode também se apresentar em diversos formatos, o cilíndrico é o mais comumente usado. Os módulos concentradores apresentam diversos aspectos, normalmente derivado da forma de um paraboloide. Os mais conhecidos são em forma de calha e perfil parabólico simples ou composto. Por possuir um revestimento em sua estrutura externa o absorvedor conseguirá atingir temperaturas muito superiores a conseguida por coletores planos, sendo, portanto de uso recomendável para certas aplicações industriais onde se busque temperaturas mais elevadas.

Acontece que, quanto maior é a concentração, menor é o ângulo com a superfície dos coletores segundo o qual têm que incidir os raios solares para serem captados pelo que o coletor tem de se manter sempre perpendicular aos raios solares, seguindo o sol no seu movimento aparente diurno. Esta é uma desvantagem, pois o mecanismo de controle para fazer o coletor seguir a trajetória do sol é bastante dispendioso e sofisticado, além de só permitir a captação da radiação direta.



Figura 2.17 - Concentrador parabólico

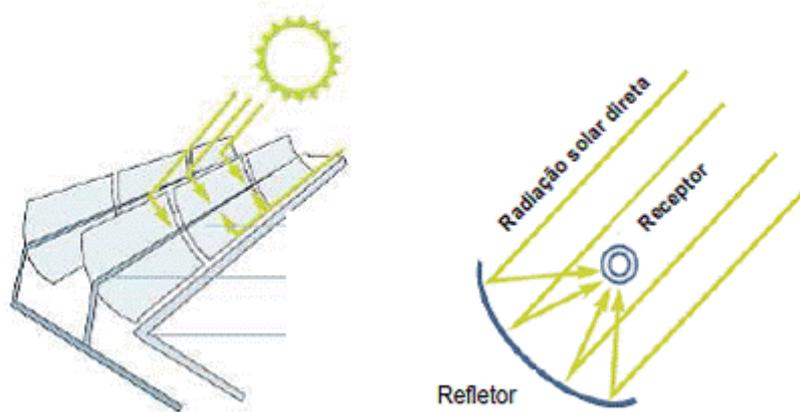


Figura 2.18 - Esquema de funcionamento de um coletor concentrador

No escopo deste trabalho será adotado o conceito de coletor plano devido às suas vantagens em relação aos demais tipos: a simplicidade de construção, relativo baixo custo, nenhuma parte móvel, sem dificuldade de operar em dias nublados, relativa facilidade de reparo e durabilidade.

2.3.2 Reservatórios Térmicos

Devido ao fato da radiação solar não ser constante ao longo do dia, se faz necessário o uso de um reservatório térmico capaz de armazenar a energia absorvida para possibilitar o uso do sistema em períodos sem radiação solar, ou quando esta é muito baixa.

Para manter a água aquecida, o reservatório deve contar com um baixo coeficiente de trocas térmicas com o ambiente, usar materiais que sejam resistentes a corrosão, que tenham uma boa rigidez estrutural e suportem temperaturas entre 60°C e 80°C, faixa normalmente utilizada sistemas domésticos.

Dentre os reservatórios mais utilizados temos: caixa d'água de cimento amianto, caixa termoplástica e as de resina, além de outros tipos de embalagens industriais, que após algumas alterações podem ser utilizados como reservatório térmico. Caso a caixa utilizada para montar o reservatório seja de EPS (Isopor) recomenda-se impermeabilizar seu interior com filme plástico pneumático, evitando vazamentos, encharcamento do EPS e contaminação da água.

Entretanto, o aço inoxidável é o que melhor atende os requisitos, e a partir deste é que são construídos os reservatórios comerciais. Devido ao alto custo deste, outros

metais como o cobre, apesar de seu alto coeficiente de condução térmica (385 W/mK), também são utilizados. Na Figura 2.19 é mostrada a seção de um reservatório comercial.

Para garantir um bom isolamento térmico, o tanque metálico é normalmente recoberto por um bom material isolante (lã de vidro e poliuretano), com coeficientes de condução térmica na ordem de $0,03$ a $0,04 \text{ W/mK}$. Um encapsulamento de aço galvanizado ou alumínio garante um bom acabamento e certa rigidez ao sistema.

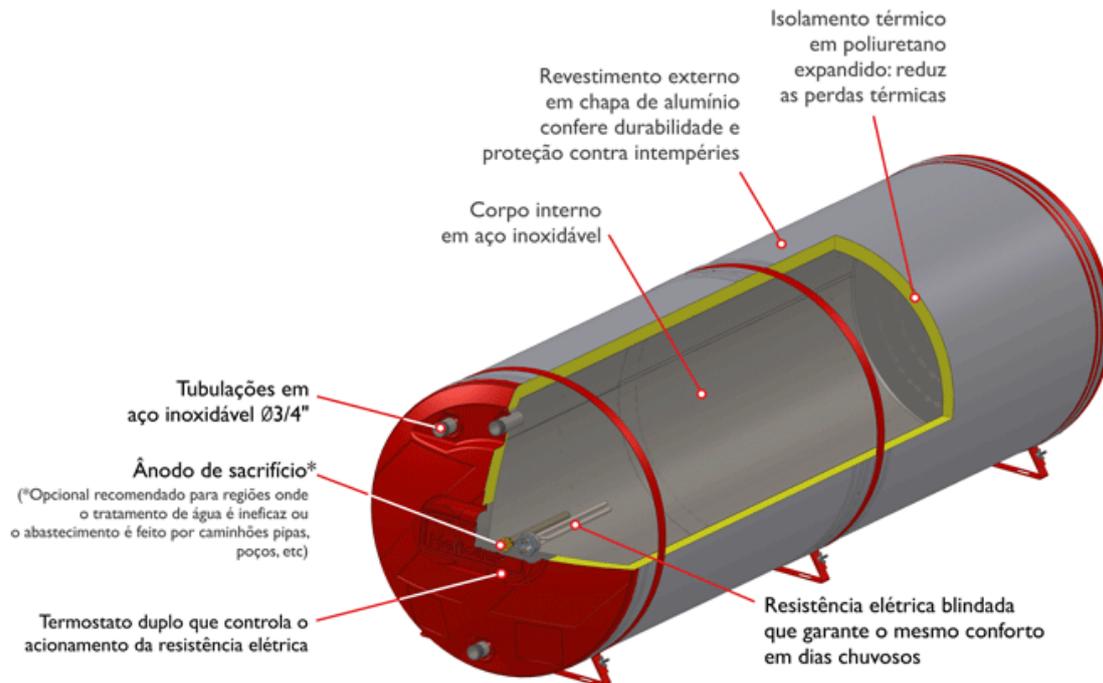


Figura 2.19 - Seção de um reservatório comumente usado

2.3.3 Sistemas de Aquecimento Solar

Os sistemas de aquecimento solar mais utilizados são:

- Circulação em termo-sifão.
- Circulação forçada.

Na circulação por termo-sifão o mesmo fluido a temperaturas diferentes tem também densidades diferentes, quanto maior é a sua temperatura menor a sua densidade. Por isso, quando se aquece um fluido, este tem tendência a estratificar-se ficando a parte mais quente na zona superior. No sistema de termo-sifão a água aquecida pelo sol no coletor sobe empurrando a água mais fria do depósito, forçando-a a tomar o seu lugar,

descendo, para subir novamente quando, por sua vez for aquecida. O depósito deve ficar acima do coletor, senão dá-se o fenômeno inverso quando já não houver sol (termo-sifão invertido). Na Figura 2.20 apresenta um esquema de funcionamento deste sistema.

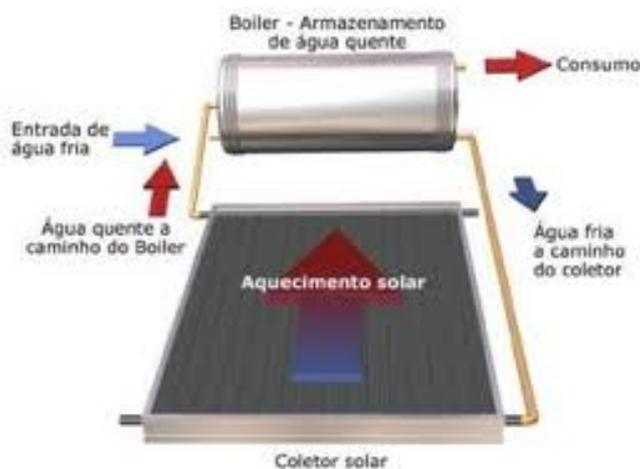


Figura 2.20 - Esquema de funcionamento do sistema de aquecimento por termo-sifão

Nas situações em que não é viável a utilização do depósito acima da parte superior dos coletores e para os grandes sistemas em geral é necessário usar bombas eletrocirculadoras para movimentar o fluido térmico. A bomba poderá ser comandada por um sistema de controle automático.

O sistema de controle (comando diferencial) está regulado de modo a colocar a bomba em funcionamento logo que a diferença de temperatura entre os coletores e o depósito atinja 5°C . Estes sistemas são compostos pelo coletor solar, depósito acumulador, bomba eletrocirculadora, controlador diferencial, purgador, vaso de expansão e outros pequenos acessórios. Pode-se visualizar na Figura 2.21, um exemplo ilustrativo, para melhor entendimento do sistema de aquecimento por circulação forçada.

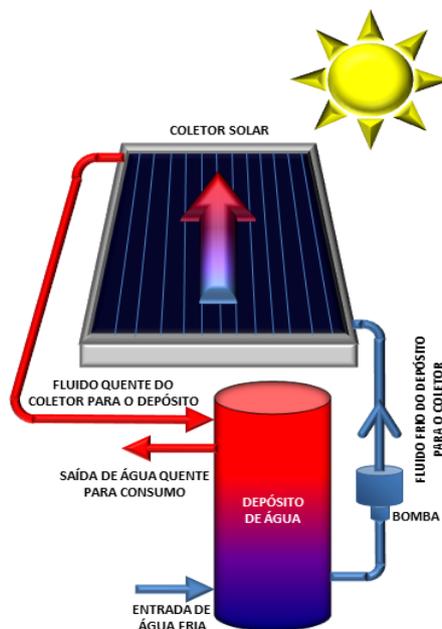


Figura 2.21 - Esquema de funcionamento do sistema de aquecimento por circulação forçada

3 Dimensionamento fotovoltaico

Com a finalidade de dimensionar corretamente todos os componentes do sistema, é necessário conhecer, além das condições de radiação da localidade na qual o sistema vai ser implantado, as características da carga e outros parâmetros também importantes. É importante definir quais serão os níveis de tensão em que o sistema irá operar e considerar as perdas estimadas dos componentes do sistema fotovoltaico.

O consumo de energia diária esperada será definido considerando um sistema fotovoltaico autônomo de baixa potência elétrica de acordo com caso de estudo definido e serão dimensionados todos os componentes do sistema, visando obter um bom casamento entre a energia fornecida pelo sol e a demanda esperada de energia, requerimento necessário de qualquer projeto fotovoltaico [4].

Como já foi falado anteriormente, além do conhecimento do consumo diário do sistema e da potência instalada, outro dado indispensável para um bom projeto de um sistema fotovoltaico são os índices de incidência de radiação solar na localidade onde o sistema será implantado.

O banco de dados do CEPTEL fornece os índices de radiação para três ângulos diferentes de instalação dos módulos solares; para o plano horizontal, para o ângulo no qual se obtém a maior média diária de incidência solar e para o ângulo que fornece o maior valor mínimo mensal de radiação solar.

3.1 Determinação do Consumo

Para determinar o consumo diário esperado de energia elétrica do acampamento, foram adotadas cargas básicas para atender as necessidades deste trabalho tais como:

- Lâmpadas LED de alta eficiência da Osram [9].
- Rádio comunicador móvel da Motorola [10].
- Notebook HP Pavilion DV5 [11].
- Refrigerador Midea MRA-06b [12].
- Ventilador Ventisol Mini20cm [13].
- Estufa elétrica.
- Carregadores de pilhas para lanternas e aparelhos de medição.

As especificações de consumo das cargas sugeridas podem ser verificadas em suas referências, em relação a estufa e o carregador de pilhas, com base em medidas feitas em laboratório, a estufa possui um consumo médio de 70 watts e o carregador em funcionamento pleno, 15 Watts.

Os tempos de utilização padrão foram fornecidos pelo perfil de consumo que pode ser visualizado na Tabela 3.1 abaixo. A mesma tabela mostra que a carga instalada para o acampamento sugerido é de 225 watts e o consumo de energia diário corresponde, aproximadamente, a 1103 (wh/dia). No Gráfico 3.1 é apresentado o perfil de consumo para que seja possível visualizar a simultaneidade entre as cargas.

Tabela 3.1 - Levantamento de Cargas

Cargas	Tensão (V)	Potência (W)	Uso (h/dia)	Energia (Wh/dia)
Notebook	110 CA	20	5	100
Rádio Comunicador	110 CA	40	2	80
Ventilador	110 CA	14	8	112
Lâmpadas (2unid de 3W)	110 CA	6	6	36
Carregadores Diversos	110 CA	15	3	45
Refrigerador	110 CA	55	--	520
Estufa	110 CA	70	3	210
Total		225		1103

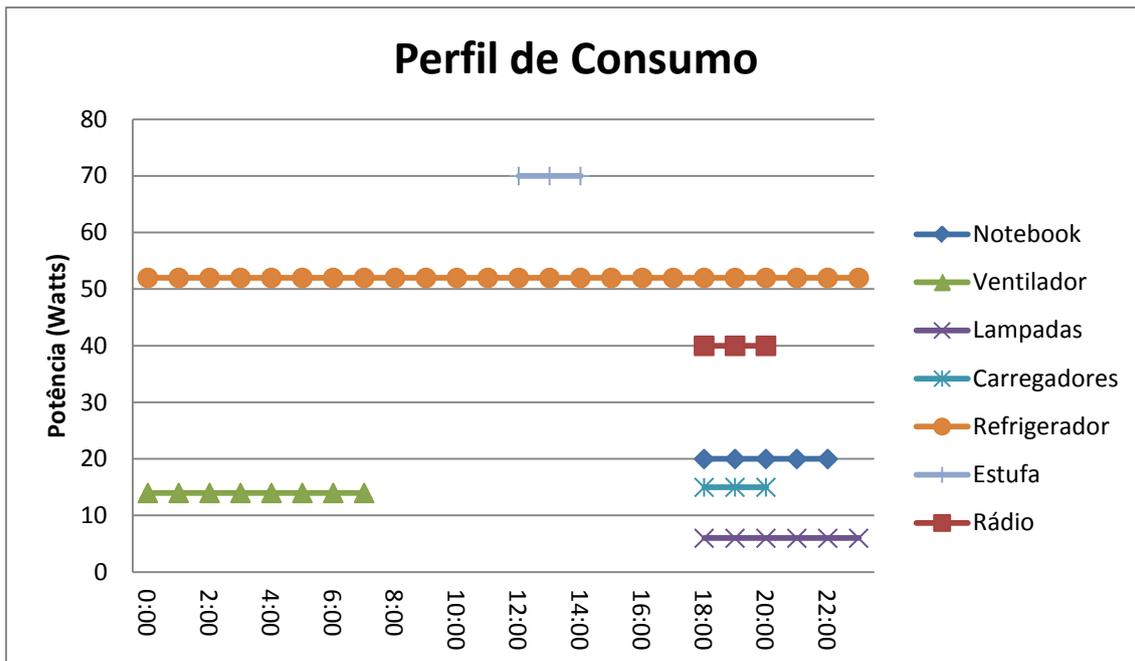


Gráfico 3.1 - Perfil de Consumo

3.2 Níveis de Radiação Solar da Localidade

Conforme citado anteriormente, é necessário saber, além do consumo diário do acampamento e da potência instalada, os índices de incidência de radiação solar na localidade onde o sistema será implantado, outro dado indispensável para um bom projeto de um sistema fotovoltaico.

O programa SunData, do CEPEL [14], destina-se ao cálculo da radiação solar diária média mensal em qualquer ponto do território nacional, este fornece os índices de radiação para três ângulos diferentes de instalação dos módulos solares; para o plano horizontal, para o ângulo no qual se obtém a maior média diária de incidência solar e para o ângulo que fornece o maior valor mínimo mensal de radiação solar.

Foi escolhida uma localidade padrão para o início dos cálculos de dimensionamento do sistema:

A localidade: Pinheiral – RJ – Brasil

Latitude: 22,51° sul

Longitude: 44,00° oeste

Tabela 3.2 - Radiação Diária Média

Latitude: 22,510000° Sul
Longitude: 44,000000° Oeste

		Radiação diária média [kwh/m ² .dia]													
#	Município	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta
<input checked="" type="checkbox"/>	Pinheral	5,42	5,14	4,94	3,92	3,61	3,33	3,61	3,97	4,22	4,75	5,39	5,28	4,46	2,09

Tabela 3.3 - Cálculo do Plano Inclinado

		Radiação diária média mensal [kwh/m ² .dia]												
Ângulo	Inclinação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
Plano Horizontal	0° N	5,42	5,14	4,94	3,92	3,61	3,33	3,61	3,97	4,22	4,75	5,39	5,28	4,46
Ângulo igual a latitude	23° N	4,90	4,90	5,07	4,38	4,43	4,28	4,58	4,63	4,46	4,63	4,94	4,72	4,66
Maior média anual	20° N	5,00	4,96	5,08	4,35	4,35	4,19	4,48	4,58	4,46	4,67	5,03	4,82	4,66
Maior mínimo mensal	31° N	4,61	4,69	4,98	4,42	4,59	4,50	4,78	4,74	4,42	4,47	4,66	4,42	4,61

Estas são geralmente as inclinações mais favoráveis para a instalação dos módulos fotovoltaicos. A escolha de uma dessas inclinações depende principalmente da atividade final da instalação e dos requisitos do projeto, por exemplo: doméstica, turismo, industrial, etc. O ângulo igual à latitude é uma inclinação padrão, usada normalmente para locais onde são desenvolvidas atividades de caráter permanente como residências e postos de saúde. O ângulo com o maior valor médio diário anual de irradiação solar costuma ser usada quando se deseja maximizar a geração anual de energia, com o objetivo de maximizar a produtividade anual do sistema fotovoltaica. E por fim, o ângulo com maior valor mínimo diário anual de irradiação solar costuma ser uma medida conservadora, usado em situações onde o fornecimento contínuo de energia elétrica é crítico para atividade fim e por isso procura-se minimizar o risco de falta de energia, aumentando a dimensão do sistema geração fotovoltaica quando comparada ao ângulo de inclinação com a maior média anual. Neste trabalho os cálculos serão feitos com base nos valores do maior mínimo mensal, ou seja, os valores correspondentes de inclinação de 31° em relação à horizontal e direcionado ao norte geográfico.

Analisando os valores da radiação para o plano inclinado a 31°N, conclui-se que o pior caso, ou seja, o mês de menor insolação é dezembro, com uma taxa diária de 4,42 kWh/m². Assim, o projeto deverá ser realizado considerando uma radiação incidente de 4,42 kWh/m².

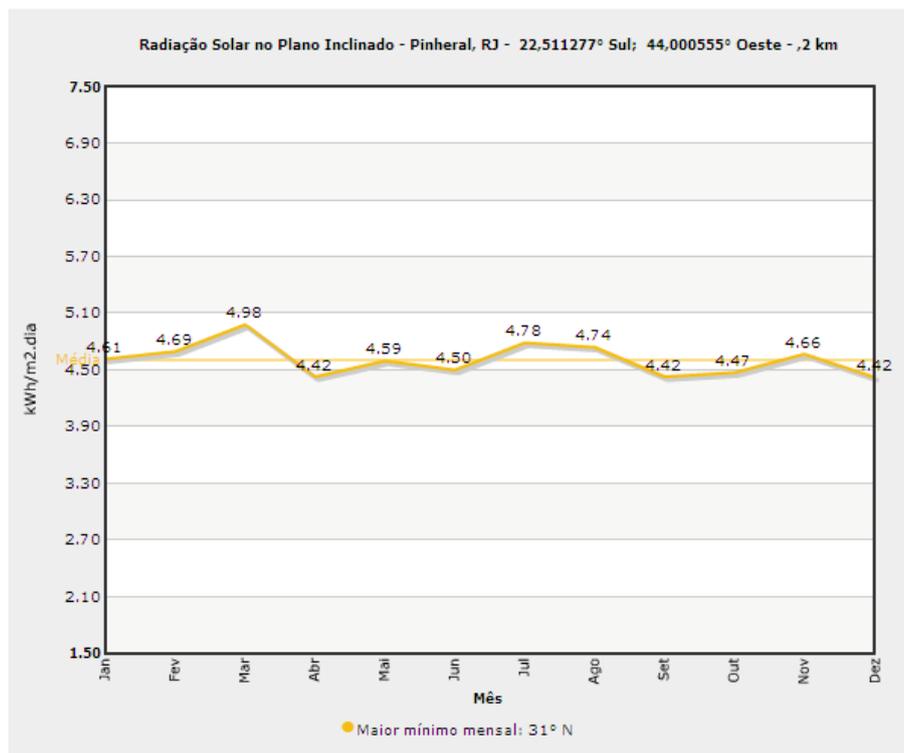


Figura 3.1 - Radiação Solar para o ângulo com maior valor mínimo mensal

3.3 Dimensionamento do arranjo fotovoltaico

Além de saber das características da carga, das condições de radiação da localidade onde o sistema será implantado e outras especificações importantes, é preciso saber os níveis de tensão em que o sistema irá operar e quais serão as perdas estimadas dos componentes do sistema fotovoltaico.

Define-se a tensão do sistema em 24 volts, com o objetivo de reduzir a corrente CC e desta forma reduzir a bitola dos fios utilizados nas ligações do sistema fotovoltaico e as perdas nos componentes do sistema. Um fator a ser observado ao se utilizar uma tensão de 24 volts é a variedade de dispositivos inversores disponíveis no mercado que trabalham com essa tensão de entrada, facilitando a escolha deste componente.

O cálculo da capacidade mínima de geração dos módulos fotovoltaicos é determinado por meio da energia solar acumulada durante o dia, na localidade onde o sistema será instalado. Uma forma conveniente de se expressar o valor acumulado desta energia é através do número de horas do sol pleno. Esta grandeza reflete o número de horas em que a radiação solar deve permanecer constante e igual a 1 kW/m² de forma que a energia resultante seja equivalente à energia acumulada durante o dia. Pelas

razões expostas anteriormente, utiliza-se para o dimensionamento dos painéis uma taxa diária de insolação de 4,42 kWh/m².

Para a localidade de Pinheiral, o número de horas de sol pleno (SP) para o pior caso, já citado anteriormente é:

$$SP = \frac{4.42 \text{ kWh/m}^2}{1 \text{ kW/m}^2} = 4,42 \text{ horas}$$

Pode-se dizer então que o valor de 4.42 kWh/m² de radiação diária é produzido por 4.42 horas de potência incidente constante e igual a 1000 W/m² (condição padrão).

Para as perdas na fiação, no banco de bateria, no conversor CC/CC e no inversor, foram utilizados valores padrão sugeridos em [8].

Na Tabela 3.4, temos todas as especificações necessárias para o início do dimensionamento.

Tabela 3.4 - Especificações do Sistema

Especificações do Sistema	
Carga Instalada	225 W
Consumo Diário	1103 Wh
Horas de Sol Pleno	4,42 horas
Tensão de Operação CA	110 Volts
Tensão de Operação CC	24 Volts
Eficiência dos Fios	98%
Eficiência do Banco de Baterias	95%
Eficiência do Controlador de Carga	85%
Eficiência do Inversor	80%

Para a potência mínima do gerador fotovoltaico, temos:

$$P_{min} = \frac{1103Wh}{4,42h} = 249,55 W$$

Este valor agora deve ser corrigido, considerando as perdas (retiradas da Tabela 3.4):

$$Potência\ M\acute{in}Corrigida(Wp) = \frac{249,55\ W}{0,98 * 0,95 * 0,85 * 0,80} = 394,18\ W$$

Devido a grande diversidade de painéis fotovoltaicos encontrados atualmente, a escolha adequada da potência dos painéis irá influenciar diretamente no número de painéis necessários para a geração exigida pela carga e, conseqüentemente, nos custos do sistema fotovoltaico. Para este projeto serão adotados dois painéis de 200 watts de potência nominal, obtendo desta forma uma potencia total de 400 watts em módulos fotovoltaicos, ligados em paralelo fornecendo uma tensão de 24 volts. Módulo sugerido para utilização é o ECO200A125M-72 do fabricante Ecosolargy [15]. As características elétricas deste painel são apresentadas na Tabela 3.5. As especificações mecânicas e suas curvas podem ser observadas nas Figuras 3.2 e 3.3, respectivamente.

Tabela 3.5 - Especificações do Módulo Fotovoltaico

Especificações do Módulo Ecosolargy ECO200A125M-72	
Potência Máxima (W)	200
Corrente em Potência Máxima (A)	5,35
Tensão em Potência Máxima (V)	37,39
Corrente de Curto-Circuito (A)	5,65
Tensão de Circuito Aberto (V)	45,87
Peso (kg)	15

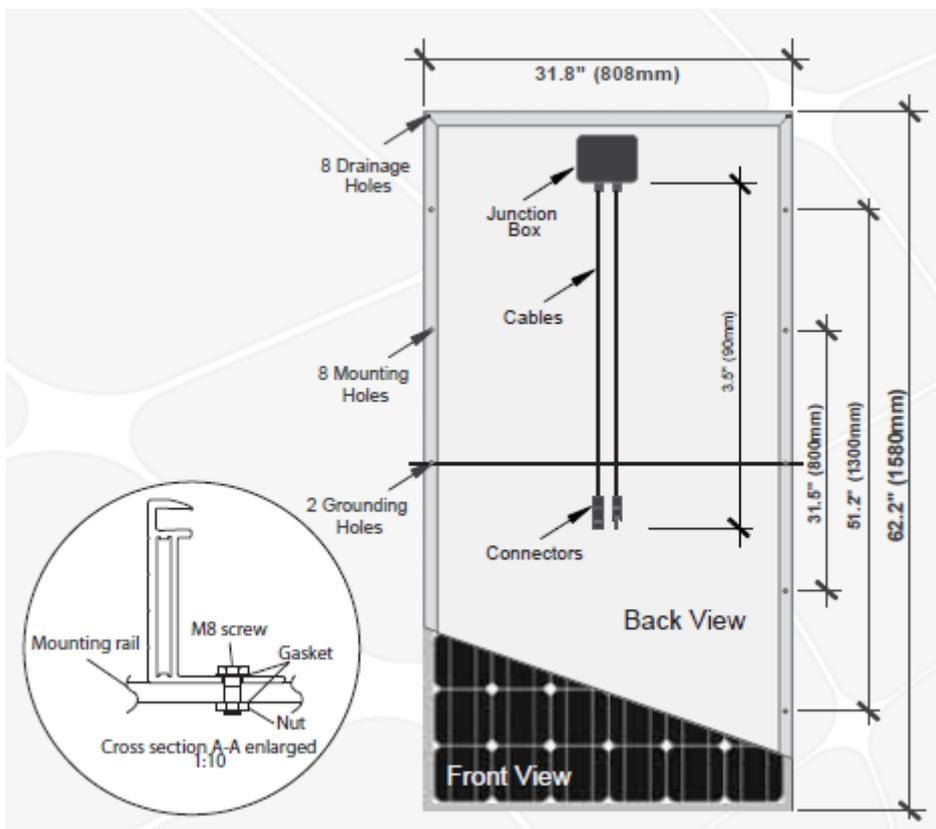


Figura 3.2 - Especificações Mecânicas do Módulo Fotovoltaico EcoSolargyECO200A125M-72

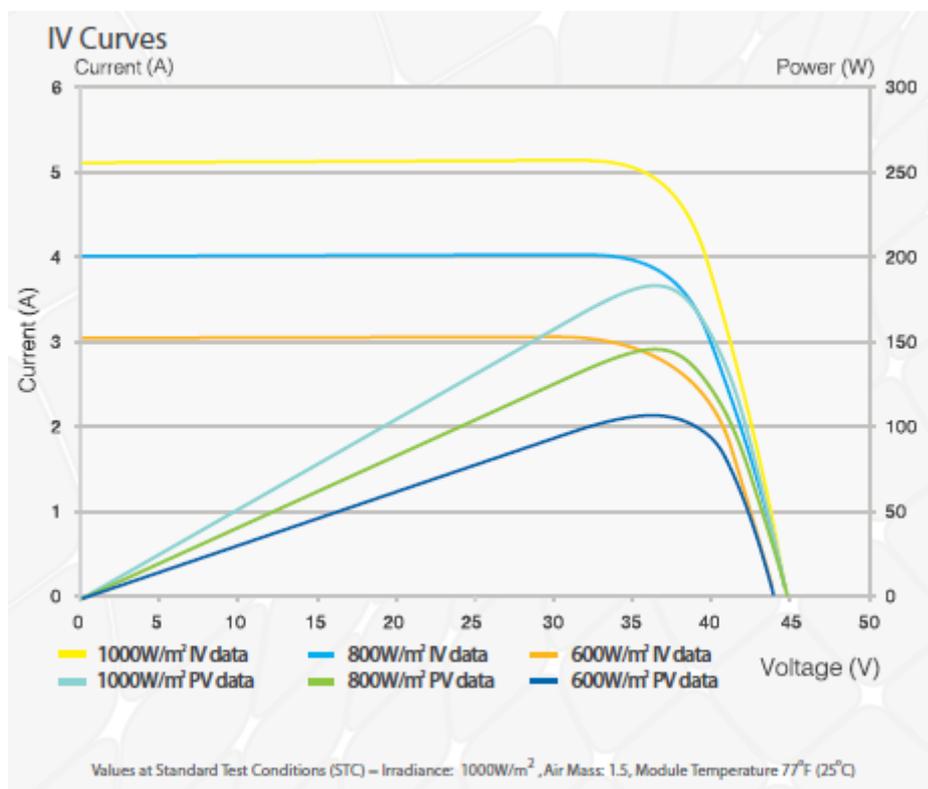


Figura 3.3 - Curvas para o Módulo EcoSolargy ECO200A125M-72

3.4 Dimensionamento do Banco de Baterias

Em um sistema fotovoltaico, utilizar um sistema de armazenamento de energia que mantenha a alimentação da carga durante a noite ou em períodos de variação solar é indispensável. Existe no mercado uma grande variedade de baterias, com diversas capacidades de armazenamento, estas podem ser arranjadas em série e/ou paralelo de acordo com as especificações do sistema.

Para o projeto do banco de baterias, devem ser considerados dois parâmetros importantes; a autonomia do sistema e a profundidade de descarga aceita pelas baterias. A autonomia do sistema corresponde ao número de dias consecutivos nublados ou chuvosos, no qual a energia armazenada no banco de baterias é suficiente para suprir a demanda sem nenhuma reposição de energia pelos painéis fotovoltaicos [8]. Este parâmetro representa a confiabilidade do sistema fotovoltaico, entretanto o aumento do número de dias de autonomia do sistema acarreta em um aumento direto da capacidade do banco de baterias e com isso no seu peso e volume. De acordo com Agência Nacional de Energia Elétrica, a ANEEL, a autonomia mínima dos Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes - SIGFI é fixada para dois dias [5]. Para o cenário abordado neste trabalho, não é conveniente um aumento de peso e volume do banco de baterias e por isso será considerado apenas um dia de autonomia. A determinação desses parâmetros será feita através de um estudo de comparação entre geração e consumo de energia por dia para que desta forma, seja possível dimensionar a necessidade de armazenamento de acordo com a flutuação da geração. Uma vez conhecido o excedente de energia da geração, será verificado se essa energia de sobra será suficiente para recarregar as baterias. Para isso será necessário conhecer a geração diária de energia e o consumo da carga ao longo do dia.

3.4.1 Balanço Energético Entre Geração e Consumo

Através do software Radiasol [21], foi possível obter os dados da radiação solar diária para a localidade de Pinheiral, para o mês de dezembro, o pior caso. A curva com essas informações pode ser observada através do Gráfico 3.2.

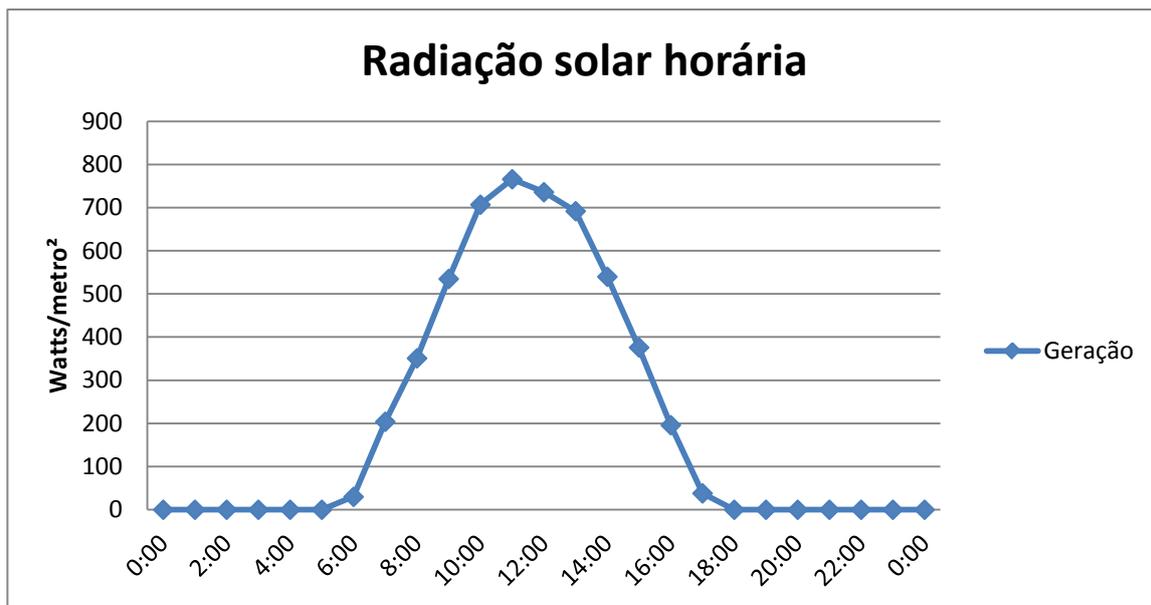


Gráfico 3.2 - Radiação solar horária

Com a curva da radiação solar diária e a potência nominal da unidade geradora pode-se estipular uma distribuição de potência diária. Os módulos foram projetados para que a potência produzida seja igual a 200 watts quando uma radiação de 1000 w/m² for aplicada aos módulos fotovoltaicos. Tem-se a distribuição diária de geração mostrada na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Potência Elétrica Gerada Diariamente Pelo Sistema Fotovoltaico

Horas do dia	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
Potência Gerada (W)	12	81,6	140,4	214	282,8	306,4	294,4	276,8	216	150,4	78,4	15,2	12

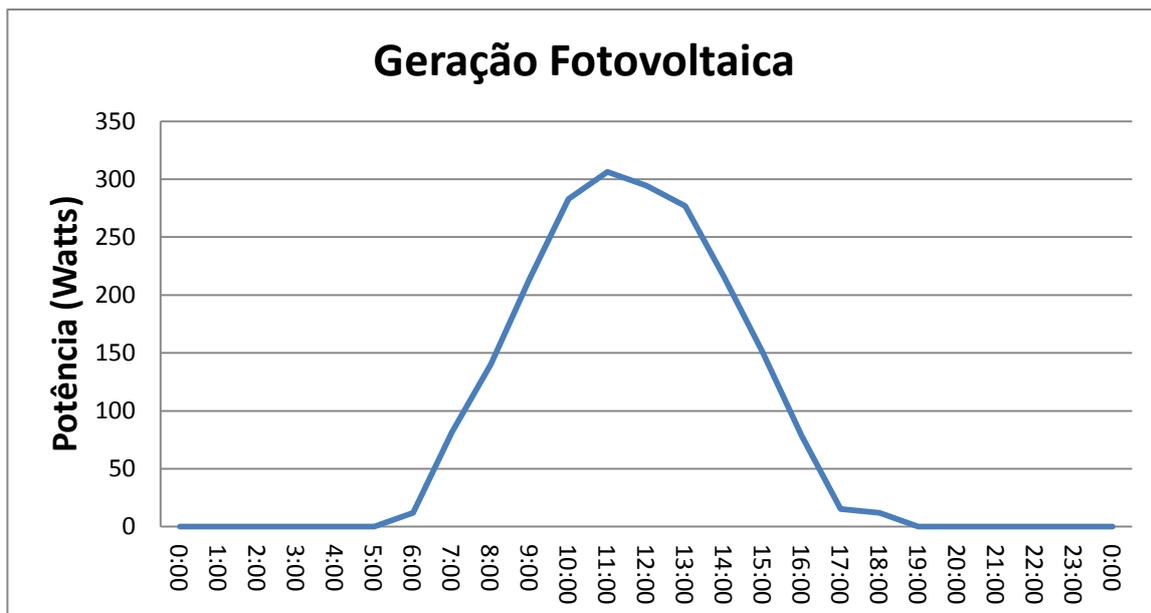


Gráfico 3.3 - Geração Fotovoltaica Horária

Através dos dados de geração fotovoltaica horária, presentes na Tabela 3.6, é possível obter a geração diária de energia fazendo a soma da energia média gerada em cada hora do dia, logo, a produção média de energia por dia é de 2080,4 Wh/dia.

Sobrepondo a curva da potência elétrica gerada ao longo do dia e a curva do perfil de consumo para o mesmo período, pode-se observar o balanço de energia entre geração e carga conforme mostrado no Gráfico 3.4. Como as cargas do sistema serão alimentadas por corrente alternada através de um inversor, é necessário considerar o rendimento do mesmo no cálculo do balanço de energia. Para isso a carga elétrica foi aumentada dividindo o consumo de energia diário pelo rendimento do inversor, onde o valor adotado para este é de 80%. A energia total de consumo da carga no dia, aumentada pelo rendimento do inversor, é igual a 1378,75 Wh.

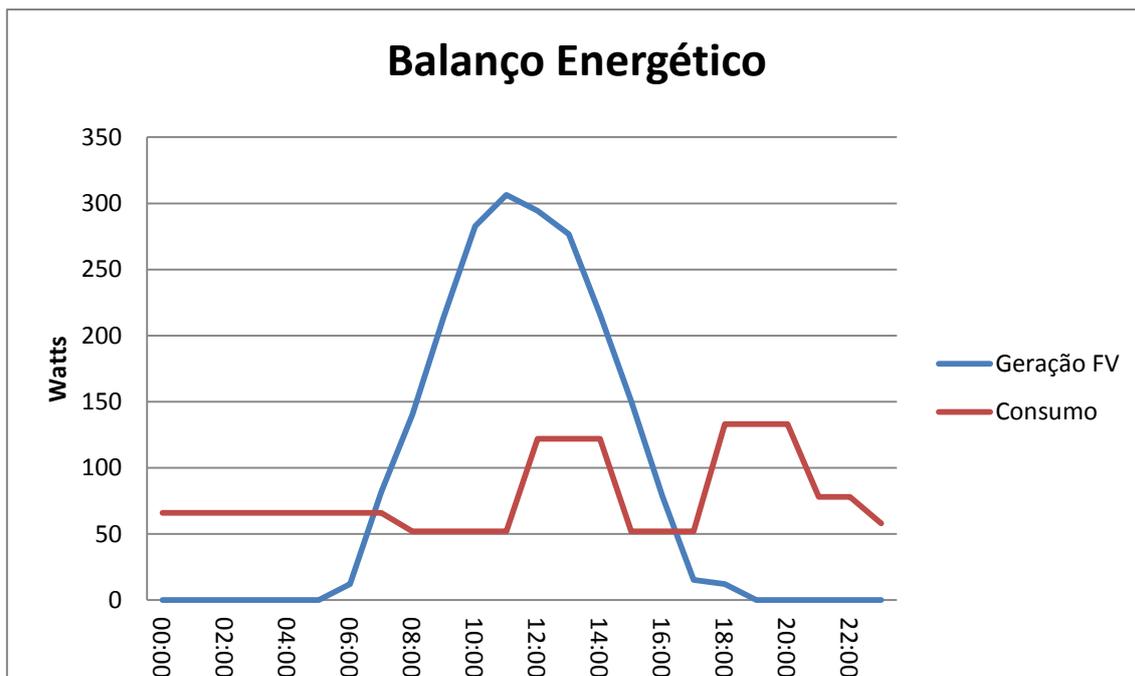


Gráfico 3.4 - Balanço Energético Diário

No Gráfico 3.5, onde o balanço entre geração e a carga pode ser visualizado, o excedente de energia da geração, representado pelos valores positivos do gráfico, corresponde a um valor de 1297,2 Wh. Já os valores negativos do gráfico representam a quantidade de energia que o sistema fotovoltaico não é capaz de fornecer para atender a carga. Logo o banco de baterias deverá oferecer no mínimo esta quantidade de energia, que corresponde a 1087,8 Wh.

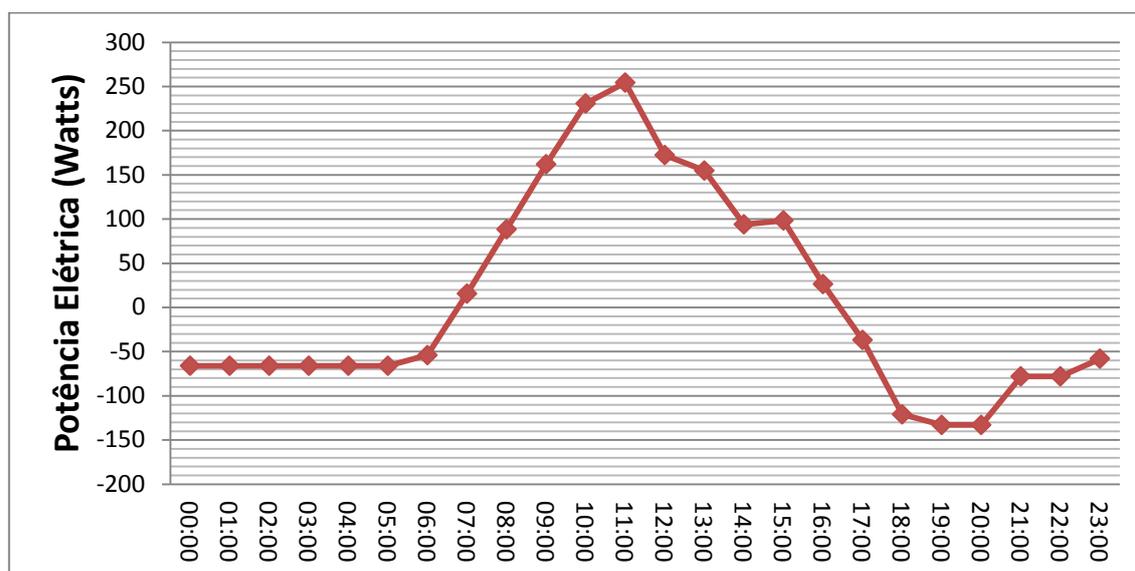


Gráfico 3.5 - Resultado do Balanço Energético entre Geração e Carga

3.4.2 Capacidade do Banco de Baterias

O principal fator relevante para o cálculo da capacidade de armazenamento de um banco de baterias é a profundidade de descarga das baterias, também conhecida por DoD (Depth of Discharge). Refere-se à quantidade de carga retirada da bateria num ciclo típico de funcionamento, expressa em percentagem da capacidade nominal desta. Quanto menor for a profundidade de descarga maior será a vida útil das baterias.

A capacidade de armazenamento necessária de um banco de baterias pode ser calculada da seguinte forma:

$$C_{\text{Banco de Baterias}} \geq \frac{\text{Consumo } \left(\frac{\text{Ah}}{\text{dia}}\right)}{\text{Profundidade de descarga}}$$

Primeiramente, é preciso saber a quantidade de energia que a carga precisará nos horários do dia em que a energia gerada não é suficiente para atendê-la. A parcela da energia faltante para alimentar a carga, já ilustrada no Gráfico 3.5, é de 1087,8 Wh.

Considerando que a tensão do banco é 24 volts com profundidade de descarga de 80%, temos:

$$C_{\text{diário}} = \frac{1087,8 \text{ Wh}}{24 \text{ V}} = 45,33 \text{ Ah}$$

Este valor agora deve ser corrigido, considerando os fatores de eficiência dos fios (98%), das baterias (95%) e do controlador de carga (85%). O fator de eficiência do inversor já foi considerado e não estará envolvido neste cálculo.

$$C_{\text{Corrigido}} = \frac{45,33 \text{ Ah}}{0,98 * 0,95 * 0,85} = 57,30 \text{ Ah}$$

$$C_{\text{Banco de Baterias}} \geq \frac{57,3}{0,8} = 71,63 \text{ Ah}$$

Ou seja, o banco de baterias deve ser capaz de armazenar uma energia mínima de 1719,12 Wh.

Com base nos cálculos acima, são sugeridas para este sistema duas baterias da marca Moura Clean Nano modelo 12MF100 [16]. Elas serão conectadas em série para fornecer a tensão de 24 volts requerida no barramento CC, será considerado um perfil de descarga de 10 horas, que é o mais adequado para a aplicação. Nesta condição, cada bateria possui uma capacidade de 92 Ah formando um banco de baterias com capacidade para 2208 Wh.

As especificações da bateria podem ser observadas na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Especificações para a bateria Moura Clean Nano 12MF100

Especificações da bateria Moura Clean Nano 12MF100	
Tensão Nominal (V)	12
Capacidade 10 horas (Ah)	92
Comprimento (mm)	397
Largura (mm)	105
Altura (mm)	280
Peso (kg)	25,4

3.4.3 Recarga do Banco de Baterias

Através da análise do balanço de energia feita no item 3.4.1, é possível notar que em alguns momentos existe um excedente de energia, ou seja, a quantidade de energia gerada é maior que a demanda das cargas. O banco de baterias é sempre recarregado nos instantes em que existe este excesso e sua recarga é finalizada ao atingir a sua capacidade máxima de armazenamento. Nos períodos em que o sistema fotovoltaico não é mais capaz de atender as cargas, devido a ausência de radiação solar, o banco de baterias alimentará as cargas até o momento de um novo excedente ou até atingir seu limite de descarga.

Como descrito no item 2.2.6, será necessário utilizar um controlador de carga para gerenciar e controlar o processo de carga e descarga das baterias. Este deverá limitar a descarga das baterias do banco até o valor de 20% (profundidade de descarga de 80%) da capacidade do banco de baterias e desta forma, garantido uma longa vida útil das baterias.

Em função banco de baterias estar sempre carregando nos momentos em que há excedente de geração, será feito um estudo para verificar quanto tempo é necessário para repor a energia que o banco de baterias perdeu. Este estudo do processo de

descarga e recarga do banco de baterias, quando o sistema fotovoltaico está submetido ao perfil de radiação considerado, pode ser visualizado na Tabela 3.8. A penúltima coluna mostra o comportamento do banco de baterias ao primeiro horário de geração completamente carregado e a última coluna mostra o seu comportamento o mesmo período descarregado, com apenas 20% da sua capacidade de armazenamento.

Tabela 3.8 - Comportamento do Banco de baterias no Período de 24 Horas.

Hora do dia	Energia Gerada (Wh)	Consumo da Carga (Wh)	Balço de Energia (Wh)	Energia Fornecida pelo Sistema PV (Wh)	Energia Fornecida pelas baterias (Wh)	Banco de Baterias Carregado (Wh)	Banco de baterias descarregado até 20% da capacidade
06:00	12	66	-54	12	54	2208	441,6
07:00	81,6	66	15,6	66	0	2154	387,6
08:00	140,4	52	88,4	52	0	2169,6	403,2
09:00	214	52	162	52	0	2208	491,6
10:00	282,8	52	230,8	52	0	2208	653,6
11:00	306,4	52	254,4	52	0	2208	884,4
12:00	294,4	122	172,4	122	0	2208	1138,8
13:00	276,8	122	154,8	122	0	2208	1311,2
14:00	216	122	94	122	0	2208	1466
15:00	150,4	52	98,4	52	0	2208	1560
16:00	78,4	52	26,4	52	0	2208	1658,4
17:00	15,2	52	-36,8	15,2	36,8	2208	1684,8
18:00	12	133	-121	12	121	2171,2	1648
19:00	0	133	-133	0	133	2050,2	1527
20:00	0	133	-133	0	133	1917,2	1394
21:00	0	78	-78	0	78	1784,2	1261
22:00	0	78	-78	0	78	1706,2	1183
23:00	0	58	-58	0	58	1628,2	1105
00:00	0	66	-66	0	66	1570,2	1047
01:00	0	66	-66	0	66	1504,2	981
02:00	0	66	-66	0	66	1438,2	915
03:00	0	66	-66	0	66	1372,2	849
04:00	0	66	-66	0	66	1306,2	783
05:00	0	66	-66	0	66	1240,2	717
06:00	12	66	-54	0	54	1174,2	651

Pelo estudo realizado na Tabela 3.8 verificou-se que para o perfil radiação adotado, se o banco de baterias iniciar o período de geração completamente carregado, ele é capaz de fornecer a energia pedida pela carga e após 24 horas terá a capacidade de

1174,2 Wh. Como o excedente gerado para o perfil de radiação proposto é de 1297,2 Wh e faltam 1033,8 Wh para completar a capacidade de 2208 Wh do banco, este irá se recarregar totalmente no dia seguinte entre 15:00 e 16:00.

O Gráfico 3.6 ilustra o comportamento do banco de baterias para o intervalo de 36 horas, onde o cenário exibido no gráfico é para o banco totalmente carregado no primeiro horário de geração.

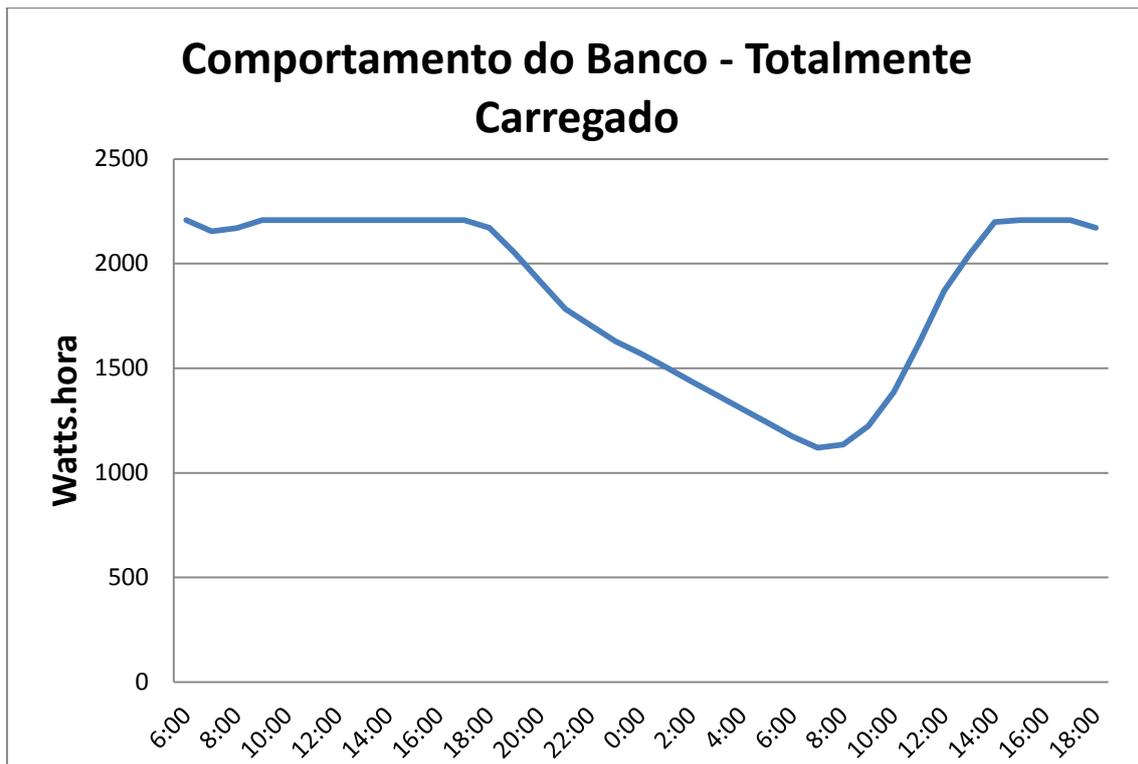


Gráfico 3.6 - Comportamento do Banco com 100% Carga no Primeiro Horário de Geração

Se o banco iniciar o período de geração com apenas 20% da sua capacidade, este será capaz de se recarregar o suficiente para atender as cargas do dia, mas a capacidade do banco ainda será muito reduzida, completando o período de 24 horas com apenas 651 Wh.

Para encontrar o número de dias necessários para uma recarga completa do banco de baterias após o 1º dia de recarga, considerando o mesmo perfil de radiação solar para os próximos dias, é necessário saber a diferença entre a capacidade total do banco e a energia de sobra de cada dia após o 1º dia de recarga e em seguida fazer a divisão pelo excedente de energia de cada dia após o 1º dia de recarga. A soma do 1º dia

de recarga com o resultado da divisão resulta no número de dias que serão necessários para carregar o banco de baterias de reserva por completo.

$$N^{\circ} \text{ de Dias}_{\text{Recarga } 20\%} = 1 + \frac{C_{\text{total}} - C_{\text{restante } 1^{\circ} \text{ dia}}}{C_{\text{excedente/dia}}}$$

Como o excedente da geração diário é de 1297,2 Wh e a energia que sobra do primeiro dia de recarga é de 209,4 Wh, serão necessários mais de dois dias para uma recarga completa:

$$N^{\circ} \text{ de Dias}_{\text{Recarga } 20\%} = 1 + \frac{2208 - 209,4}{1297,2} = 2,55 \text{ dias}$$

O Gráfico 3.7 mostra a curva que descreve o comportamento do banco de baterias para o banco com 20% de sua capacidade no primeiro horário da geração, para um período de 36 horas.

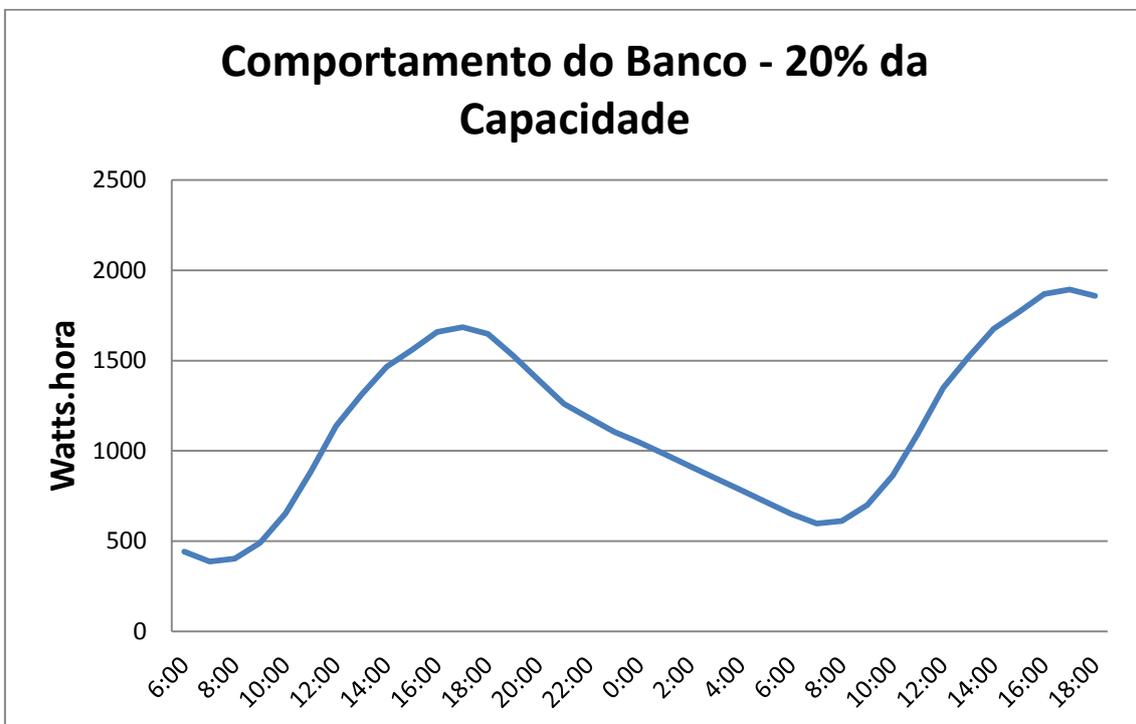


Gráfico 3.7 - Comportamento do Banco com 20 % da Carga no Primeiro Horário de Geração

Deste modo, para este cenário emergencial, é sugerido um plano de contingência para diminuir esse tempo de recarga. Este plano consiste em utilizar um conjunto mínimo de cargas e acelerar a recarga total do banco de baterias.

Traçando um novo perfil de consumo, serão utilizadas apenas cargas consideradas indispensáveis como a iluminação, circulação de ar e o carregador de pilhas. Este perfil pode ser observado no Gráfico 3.8.

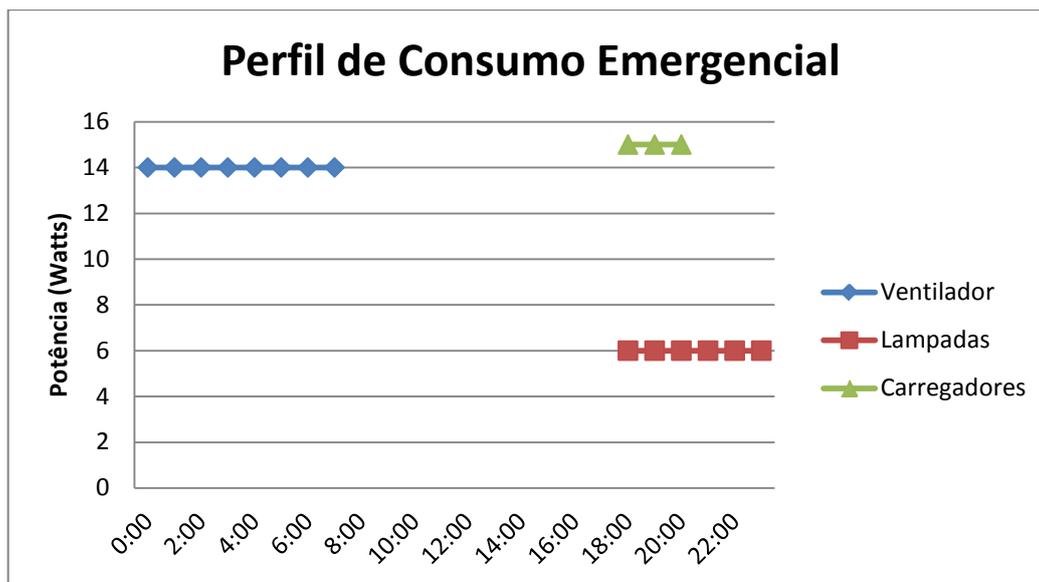


Gráfico 3.8 - Perfil de Consumo Para o Cenário Emergencial de Recarga do Banco de Baterias

Então o estudo de carga e descarga do banco de baterias foi feito novamente com base neste perfil de consumo emergencial, para que desta forma seja possível otimizar o banco e diminuir este tempo de recarga. A tabela 3.9 exhibe esses resultados.

Tabela 3.9 - Comportamento do Banco de baterias no Período de 24 Horas Para o Cenário Emergencial.

Hora do dia	Energia Gerada (Wh)	Consumo da Carga (Wh)	Balanco de Energia (Wh)	Energia Fornecida pelo Sistema PV (Wh)	Energia Fornecida pelas baterias (Wh)	Banco de baterias descarregado até 20% da capacidade
06:00	12	14	-2	12	2	441,6
07:00	81,6	14	67,6	14	0	439,6
08:00	140,4	0	140,4	0	0	507,2
09:00	214	0	214	0	0	647,6
10:00	282,8	0	282,8	0	0	861,6
11:00	306,4	0	306,4	0	0	1144,4
12:00	294,4	0	294,4	0	0	1450,8

13:00	276,8	0	276,8	0	0	1745,2
14:00	216	0	216	0	0	2022
15:00	150,4	0	150,4	0	0	2208
16:00	78,4	0	78,4	0	0	2208
17:00	15,2	0	15,2	0	0	2208
18:00	12	21	-9	12	9	2208
19:00	0	21	-21	0	21	2199
20:00	0	21	-21	0	21	2178
21:00	0	6	-6	0	6	2157
22:00	0	6	-6	0	6	2151
23:00	0	6	-6	0	6	2145
00:00	0	14	-14	0	14	2139
01:00	0	14	-14	0	14	2125
02:00	0	14	-14	0	14	2111
03:00	0	14	-14	0	14	2097
04:00	0	14	-14	0	14	2083
05:00	0	14	-14	0	14	2069
06:00	12	14	-2	0	2	2055

Analisando os dados contidos na tabela, pode-se observar o sucesso do plano de contingência para recarga do banco de baterias em tempo ótimo. Ao utilizar o sistema fotovoltaico no primeiro horário de geração, com 20% da capacidade do banco, temos o banco com carga completa às 15 horas do mesmo dia, podendo adotar novamente o perfil padrão de consumo, isto é, com todas as cargas sugeridas no item 3.1. Se o perfil emergencial for mantido mesmo após o banco ter sua carga completa, às 9 horas do dia seguinte, após o consumo noturno, o banco está completamente carregado. O Gráfico 3.9 ilustra o comportamento do banco para o perfil emergencial em um período de 36 horas.

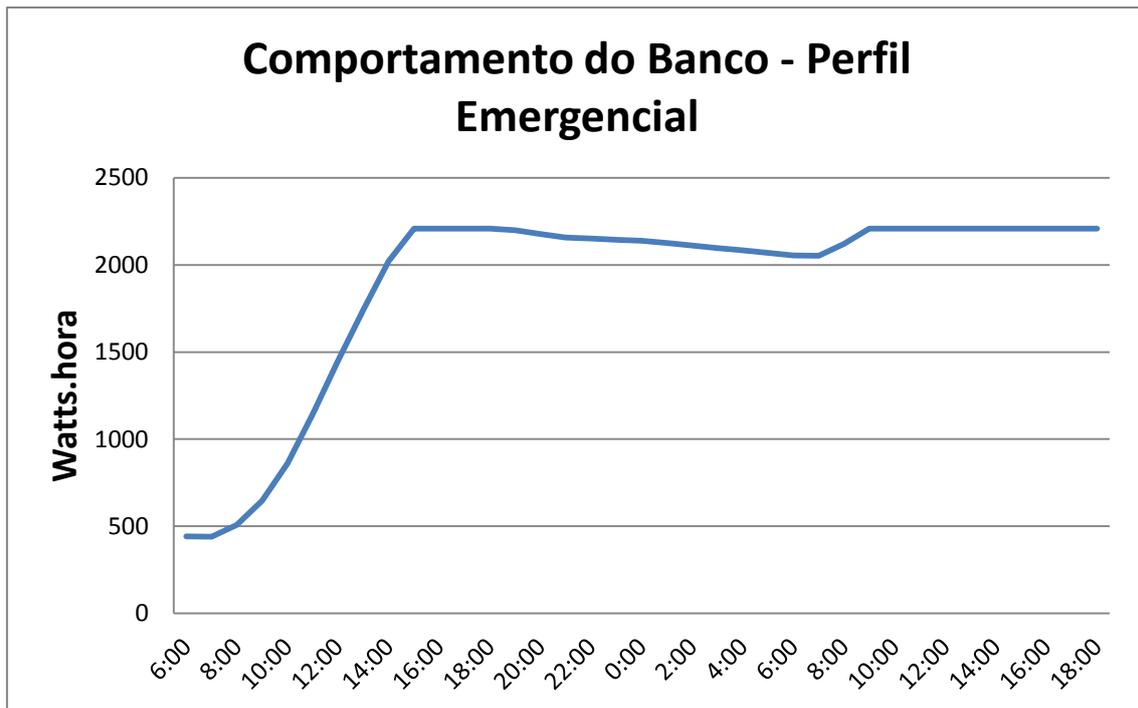


Gráfico 3.9 - Comportamento do Banco de Baterias Para o Perfil Emergencial Proposto

3.5 Dimensionamento do Controlador de Carga

O controlador de carga é responsável pela carga otimizada das baterias, devendo protegê-las contra sobrecargas, prevenir descargas indesejáveis, protegê-las der descargas profundas, além de informar o estado de carga da bateria.

Com isso tudo, aumenta-se em muito a vida útil das baterias e se protege os painéis fotovoltaicos contra correntes reversas.

Para o dimensionamento do controlador de carga deve-se verificar quais são as correntes máximas que ele deverá suportar tanto do lado dos módulos quanto do lado das cargas.

Para o cálculo da corrente do controlador de carga, do lado das cargas, temos:

$$I_{carga} = \frac{\text{Consumo Máximo (W)}}{\text{Tensão do Banco de Baterias}}$$

$$I_{carga} = \frac{225 \text{ watts}}{24 \text{ volts}} = 9,375 \text{ A}$$

Para cálculo da corrente do controlador de carga no lado dos módulos, temos:

$$I_{Arranjo} = \text{Corrente CC do Módulo} * \text{Número de Módulos em Paralelo}$$

$$I_{Arranjo} = 5,35 * 2 = 10,7A$$

É necessário um controlador de carga que suporte uma corrente de 10,7A, desta forma é sugerido o controlador de carga Tracer-2210RN do fabricante EPSolar [17], suas especificações podem ser verificadas na Tabela 3.10:



Figura 3.4 - Controlador de carga de 20A (12V/24V) Tracer-2210RN

Tabela 3.10 - Especificações para o Controlador de Carga Tracer-2210RN

Especificações para o Controlador de carga com MPPT – Tracer-2210RN	
Tensão Nominal (V)	12V/24V
Corrente máxima de carga (A)	20
Corrente máxima na saída (A)	20
Tensão solar máxima na entrada (Vcc)	100
Potência máxima solar na entrada em 12V (W)	260
Potência máxima solar na entrada em 24V (W)	520
Consumo próprio (mA)	10
Tensão máxima das baterias (V)	20
Bitola máxima do cabo elétrico (mm ²)	10
Dimensões (mm)	169 x 118 x 83
Furos de fixação (mm)	160 x 80
Peso (kg)	0,95

3.6 Dimensionamento do Inversor

Para o dimensionamento do inversor, deve-se observar a potência máxima simultânea, ou seja, soma das potências de cada aparelho a ser alimentado. A tensão de entrada deve ser igual à tensão das baterias e a de saída igual à tensão das cargas de corrente alternada.

Com base nas especificações contidas na Tabela 3.4, será necessário um inversor que suporte uma tensão de entrada de 24 volts e tensão de saída de 110 volts. Este inversor deve fornecer uma potência mínima 225 w, e para este dimensionamento, será utilizado um inversor de onda senoidal pura.

Sendo assim, será adotado o inversor Phoenix 24/350 da Victron Energy [18] e suas especificações podem ser visualizadas na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 - Especificações do Inversor Victron Phoenix 24/350

Especificações do Inversor Phoenix 24/350	
Potência Contínua de Saída com 25 °C (VA)	350,0
Potência Contínua de Saída com 25 °C/ 40 °C (W)	300/250
Potência de Pico (W)	700
Tensão de Saída (VAC)	110 +/- 3%
Frequência de Saída (Hz)	60 +/- 0,1%
Alarme de Bateria Baixa (VDC)	22
Desligamento da bateria (VDC)	21
Recuperação Automática (VDC)	25
Operação da Escala de Temperatura (°C)	-20 a +50
Eficiência (%)	89
Peso (kg)	3,5



Figura 3.5 - Inversor Senoidal Victron Phoenix 24/350

3.7 Dimensionamento dos Cabos

Para este tipo de sistema as bitolas dos cabos deverão ser dimensionadas levando em consideração a queda de tensão relativa ao comprimento dos cabos, principalmente nos ramais onde a tensão é de 24 volts CC, pois nestes casos a corrente será bem maior em comparado aos ramais onde a tensão é de 110 volts CA. Para o projeto proposto as distâncias são definidas conforme o layout de instalação ilustrado na Figura 3.6.

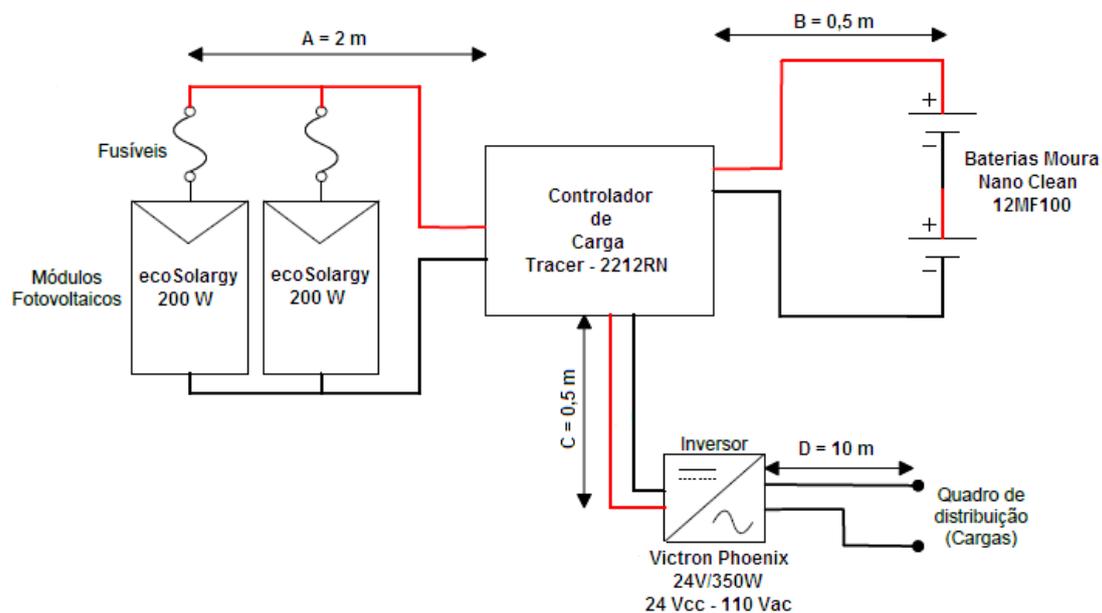


Figura 3.6 - Esquema de Ligações do Sistema com suas Respectivas Distâncias

Utilizaremos uma queda de tensão máxima admissível de 2% em todos os trechos do layout proposto na Figura 3.6. Assim, a seção mínima do condutor será dada pela expressão:

$$S \geq 2\rho \times \frac{p \times l}{e(\%) \times V^2}$$

Onde:

- S é a seção mínima do condutor em mm^2 ;
- ρ é a resistividade do cobre ($=1/58 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$);
- p é a potência em watts;
- l é distância até a carga em metros;
- $e(\%)$ é a queda de tensão aceitável em %;
- V é a tensão em volts;

Na tabela 3.12 são apresentados os cálculos referente as bitolas dos cabos e as bitolas especificadas para o projeto conforme padrão disponível de mercado.

Tabela 3.12 - Especificações dos cabos

Cabos entre os trechos	Comprimento (m)	Componentes	Tensão no trecho	Potência (W)	Ø Calculado (mm ²)	Ø Especificado (mm ²)
(A+B)	2,5	Gerador/ Baterias	24 VCC	400	2,99	4
(B+C)	1	Baterias/ Inversor	24 VCC	225	0,67	2,5
D	10	Inversor/ Cargas	110 VCA	225	0,32	2,5

4 Dimensionamento Termosolar

Os coletores solares são tradicionalmente usados em aplicações residenciais e comerciais (hotéis, restaurantes, clubes, hospitais etc.) para o aquecimento de água (higiene pessoal e lavagem de utensílios e ambientes). No contexto deste trabalho, deve-se pensar no peso e na eficiência destes sistemas de aquecimento e pesquisar uma alternativa aos coletores comerciais, como os já conhecidos coletores de PVC [19] e garrafas PET [20]. Serão adotados coletores de placas de PVC.

Os coletores são fabricados com placas de forro modular de PVC, denominadas de alveolares. São forros especiais. Esses coletores de PVC se diferem dos comerciais por não utilizarem caixa e cobertura de vidro, que permitem a obtenção do efeito estufa (aquecimento adicional). A obrigatória ausência da cobertura de vidro não permite que a água aqueça demais, o que afetaria a integridade dos componentes de PVC, que tem limite de temperatura. Isto traz vantagens como: redução do perigo da água quente causar ferimentos e a possibilidade do uso de tubos de PVC de água fria, entre outras. De acordo com o manual de construção deste coletor [19], uma unidade do mesmo é dimensionada para aquecer 100 litros de água. Desta forma será utilizado um coletor de PVC com 1,25 metros de comprimento e 0,62 metros de largura [19].



Figura 4.1 - Coletor de PVC

Na construção deste sistema de aquecimento, os reservatórios mais comumente usados são caixas d'água de cimento amianto, caixa termoplástica e as de resina, além de outros tipos de embalagens industriais, que após algumas alterações serviram como reservatório térmico. Para este trabalho a caixa sugerida para montar o reservatório será de EPS (Isopor) com capacidade de 37 litros, quantidade razoável para uma pessoa, e suas dimensões são 455 mm de comprimento, 370 mm de largura e 367 mm de altura. Recomenda-se impermeabilizar seu interior com filme plástico pneumático, evitando vazamentos, encharcamento do EPS e a contaminação da água [19].



Figura 4.2 - Caixa de Isopor Isoeste 37 litros

Este sistema tem o mesmo princípio de funcionamento do sistema tradicional de aquecimento solar de água, diferenciando-se do mesmo pelo tipo de material utilizado e da possibilidade de autoconstrução. O funcionamento se inicia quando a energia solar irradiante incide sobre a superfície preta dos coletores. A energia absorvida transforma-se em calor e aquece a água que está no interior dos coletores. A água aquecida diminui

a sua densidade e começa a se movimentar em direção à caixa, dando início a um processo natural de circulação da água, chamado de termo-sifão. Para tanto o reservatório deve estar mais alto que os coletores. Esse processo é contínuo, enquanto houver uma boa irradiação solar ou até quando toda água do circuito atingir a mesma temperatura. Os tubos que geralmente são utilizados nas ligações entre os coletores e o reservatório são os tradicionais tubos de PVC utilizados normalmente em instalações hidráulicas residenciais. Na Figura 4.3 é apresentada uma ilustração das ligações do sistema de aquecimento.



Figura 4.3 - Sistema de aquecimento solar com coletor de PVC

5 Simulação

Em uma simulação de sistemas fotovoltaicos através de um software utilizam-se modelos de fluxo energético que mostram como os componentes do sistema interagem entre si, dando como resultados os pontos de operação em cada instante e os balanços energéticos ao longo do tempo, o que permite conhecer a desempenho do sistema.

O PVSize [22] é um dos componentes do SolarCad, o SolarCad é um pacote de softwares para projeto de sistemas de energia solar, abrangendo tantos sistemas térmicos quanto fotovoltaicos, e foi idealizado como uma ferramenta prática sob base científica que facilitaria a concepção de sistemas fotovoltaicos autônomos. O programa visa o dimensionamento e simulação de sistemas fotovoltaicos autônomos com cargas em corrente contínua assim como alternada. Uma abordagem mais extensa sobre o PVSize pode ser vista na tese de mestrado de Luis Horacio Vera [23].

Os dados de entrada requeridos para começar a simulação, ilustrado na Figura 5.1, são:

- Esquema do circuito elétrico e especificações das cargas.
- Seleção do módulo.
- Seleção do Inversor.
- Seleção da bateria.
- Seleção do controlador de carga.
- Localidade.

Essas informações já são conhecidas através das análises do capítulo 3, de dimensionamento fotovoltaico.

No momento de montar o circuito para fazer a simulação, pode-se visualizar algumas cargas que o programa dispõe para montagem do circuito, neste instante percebeu-se que algumas cargas envolvidas neste projeto, não estavam disponíveis como o rádio comunicador e a estufa. Essas cargas foram substituídas na simulação pelo que o software tinha disponível com o comportamento elétrico mais próximo, logo, o rádio comunicador foi substituído por um aparelho de som e a estufa por uma cafeteira, a Figura 5.2 ilustra o circuito montado no PVSize.

Para analisar os valores obtidos pela simulação do sistema, tem-se uma ferramenta gráfica que permite visualizar os resultados atingidos. Essas curvas podem ser visualizadas abaixo, através das Figuras 5.3 e 5.4.

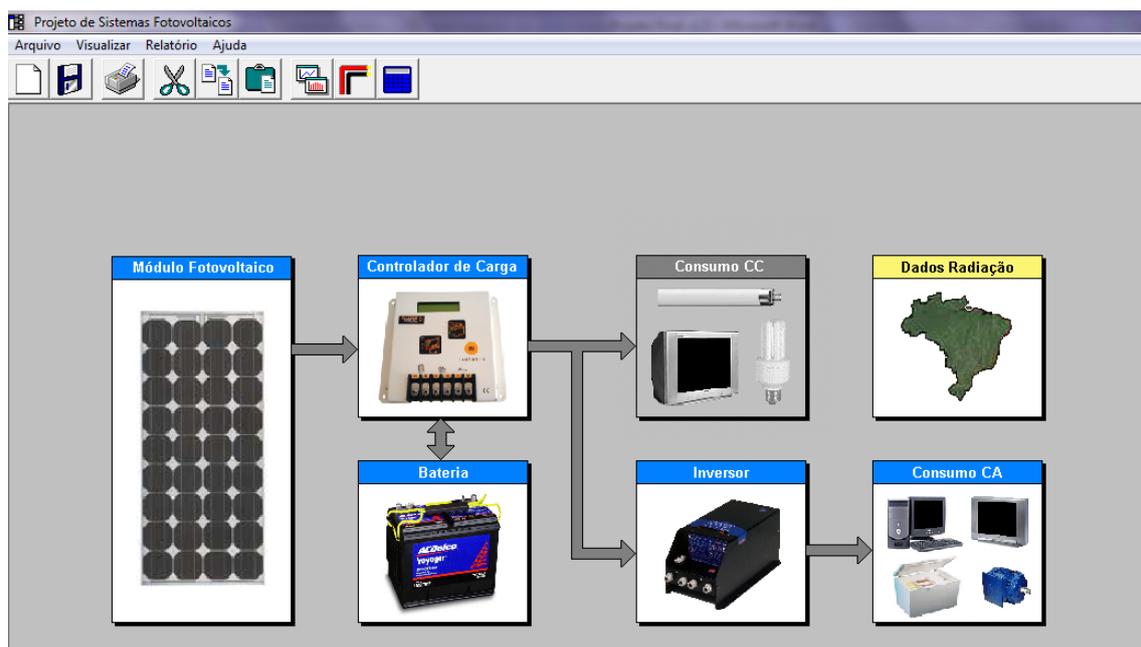


Figura 5.1 - Entrada de dados para início da simulação no PVSize

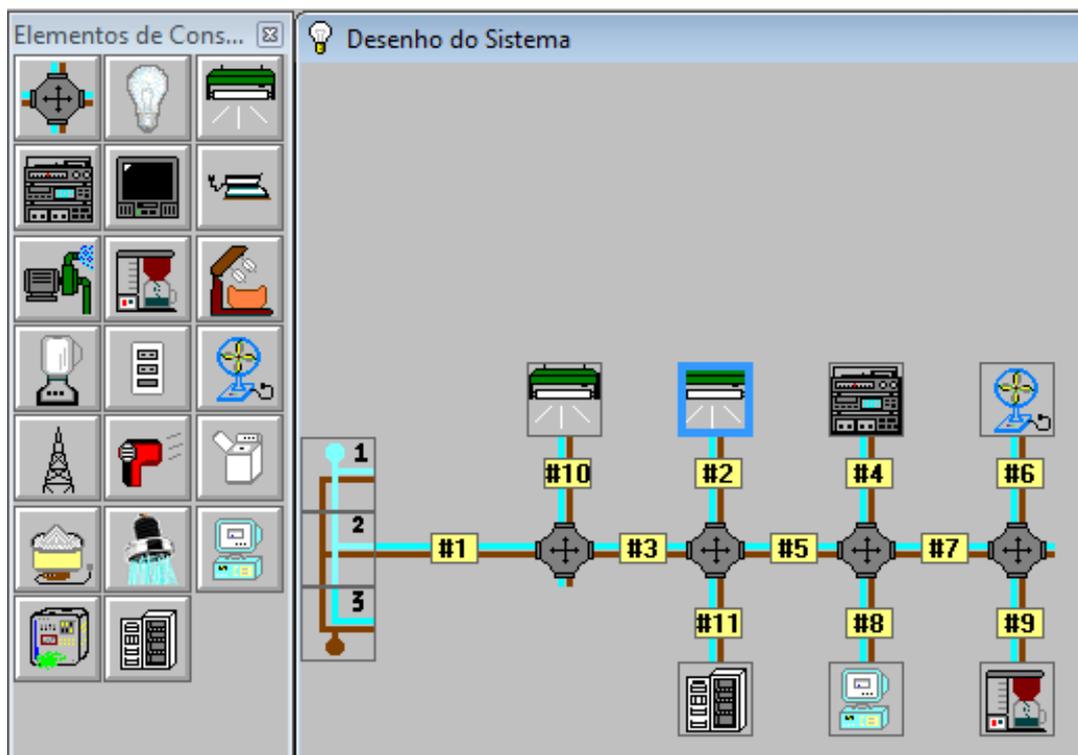


Figura 5.2 - Circuito montado no PVSizer

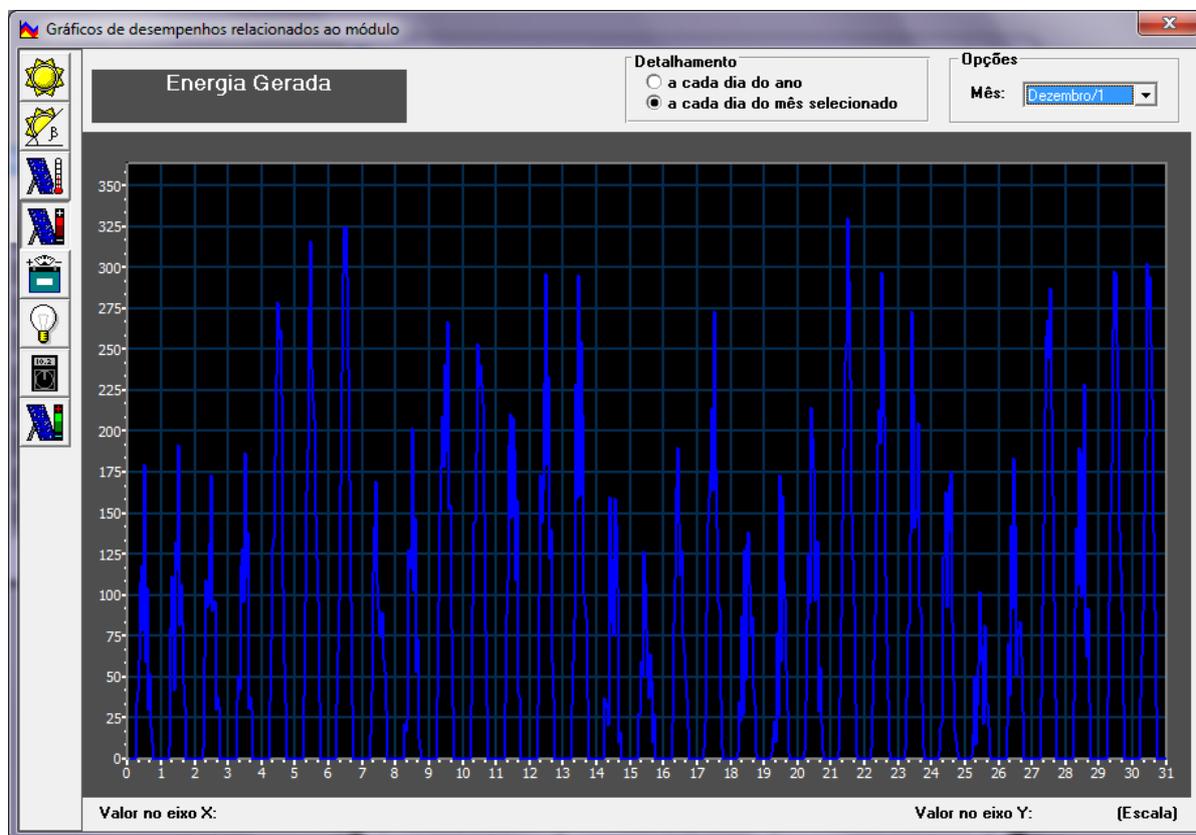


Figura 5.3 - Curva de Energia gerada fornecida pelo PVSizer

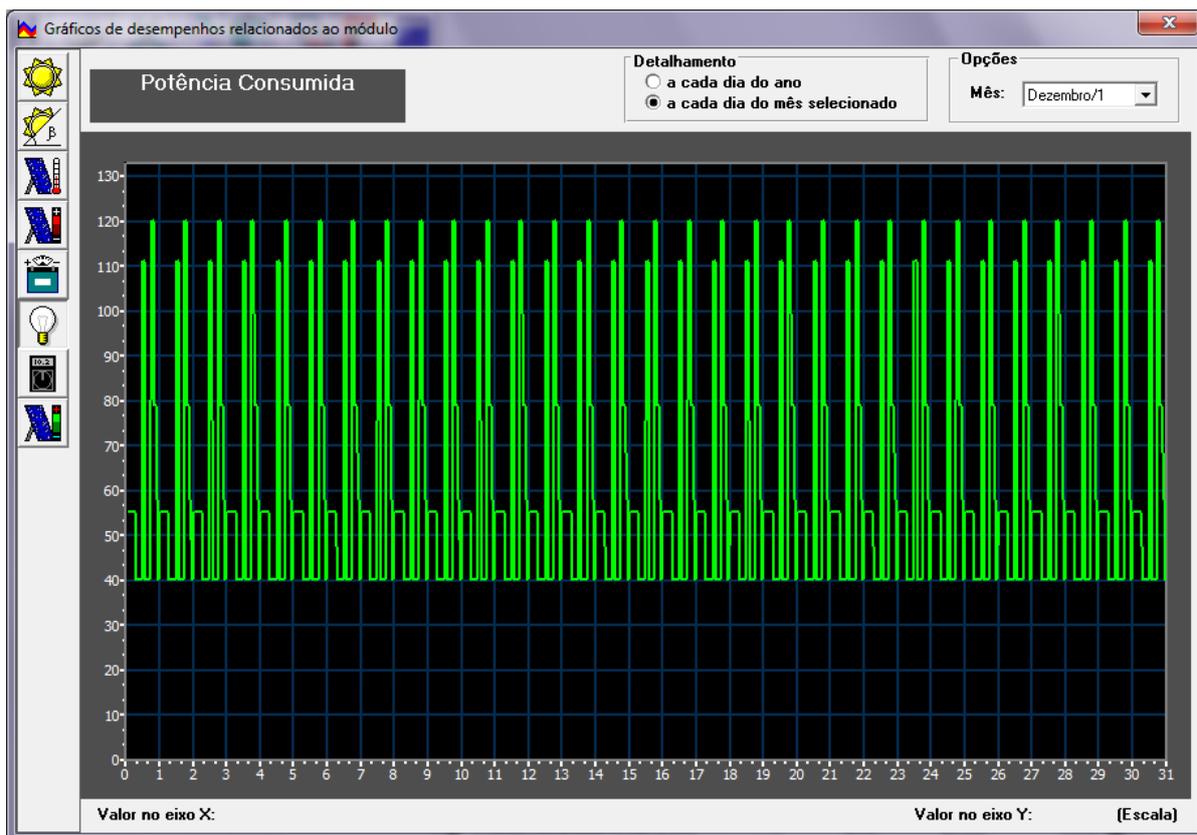


Figura 5.4 - Curva de potência consumida fornecida pelo PVSize

Fazendo um breve comparativo entre os valores dimensionados e as curvas fornecidas pela simulação do PVSize, é possível observar valores semelhantes e um comportamento próximo do especificado no capítulo 3. Desta forma pode-se estimar que o sistema desenvolvido neste trabalho irá se comportar de maneira satisfatória e cumprir com a proposta do mesmo.

6 Conclusões

Neste trabalho foram abordados conceitos fundamentais para os estudos referentes à energia fotovoltaica. Os dispositivos de geração, controle, conversão e armazenamento foram apresentados assim como suas tecnologias de funcionamento. Há um conteúdo breve sobre energia termosolar, que mostra seus conceitos teóricos e funcionais e uma descrição de seus componentes.

O trabalho apresentou um sistema de geração de energia fotovoltaica para atender as necessidades de trabalho, conforto e lazer em um acampamento com fins

científicos. Este sistema foi dimensionado e através do seu desenvolvimento é possível concluir que este está apto a cumprir sua proposta, melhorando a logística de transporte de carga e da energia limitada fornecida pelos geradores.

Os dados do perfil de radiação solar do local da instalação são indispensáveis para um dimensionamento satisfatório e a obtenção destas informações foram umas das dificuldades encontradas neste trabalho. Obter esses dados com os instrumentos de medição adequados seria a alternativa que forneceria as informações mais confiáveis, que resultaria em incertezas e erros menores e resultados mais exatos. Contudo isso parece ser inviável em função de todo o esforço demandado para realizar essas medidas.

Em função disso foi necessário recorrer à bancos de dados como o SunData, software do CEPEL, fornece os dados de radiação solar diária média mensal em qualquer ponto do território nacional. A necessidade de se obter as informações da radiação solar horária diária, fez com o que o SunData não fosse o suficiente e desta forma foi utilizado o Radiasol, um software desenvolvido pelo Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, que fornece os referidos dados estimados em função da localidade para que fosse possível prosseguir com o estudo de balanço energético e com o dimensionamento do banco de baterias.

A necessidade usar dispositivos mais leves se configurou em outra dificuldade, pois não há muitas opções que atendam as especificações e possuem peso e volume aceitáveis para o transporte, principalmente painéis fotovoltaicos e baterias.

O estudo de balanço energético entre geração e carga permitiu dimensionar o banco de baterias com uma perspectiva real do seu comportamento, foi possível estimar os momentos de carga completa e observar a variação da capacidade do banco de baterias ao longo da utilização das cargas. Através desta análise foi possível traçar um plano de contingência para uma situação emergencial, onde o banco de baterias estaria com sua capacidade muito reduzida. Este plano se mostrou muito eficiente recarregando o banco de baterias com sua capacidade máxima no menor tempo possível.

O projeto elaborado foi simulado e os resultados mostraram viabilidade de operação e de execução.

São sugeridos alguns itens que não foram abordados neste trabalho e podem ser estudados posteriormente em trabalhos que poderão dar continuidade a este, tais como:

- Estudo do custo de implementação do sistema.
- Desenho de uma estrutura física para os componentes do sistema.

- Levantamento dos componentes que possuem ótima relação peso/desempenho.
- Comparação dos resultados obtidos experimentalmente com os calculados teoricamente.

Espera-se que este projeto contribua com o desenvolvimento de pesquisas e trabalhos de profissionais das diversas áreas do meio acadêmico, gerando energia elétrica necessária para tal fim, através da energia do sol. O conteúdo apresentado neste trabalho pode ser utilizado como um manual para montar o sistema como também pode ser utilizado como um guia básico e acessível sobre o sistema fotovoltaico e seu dimensionamento.

7 Referencias Bibliográficas

- [1] Carlos Roberto José da Silva Junior, "Projeto de um sistema fotovoltaico para energização de um equipamento de pesca com eletricidade," Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Setembro, 2008.
- [2] Estudo realizado pela REN21 (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century) juntamente com o Worldwatch Institute. Disponível em:<http://qualenergia.it/UserFiles/Files/REN21_GSR2007_Prepub_web.pdf>. Acesso em 15 de março de 2013.
- [3] Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 2ª ed. Brasília: ANEEL, 2005.
- [4] Johninon Imhoff, "Desenvolvimento de Conversores Estáticos para Sistemas Fotovoltaicos Autônomos", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Julho de 2007.
- [5] ANEEL. Estabelece os procedimentos e as condições de fornecimento por intermédio de Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes - SIGFI. Resolução Normativa nº. 83, de 20 de setembro de 2004. Lex: D.O de 24.09.2004, seção 1, p. 126, v. 141, n. 185.
- [6] SOUZA, Ronilson di. Treinamento Energia Solar Fotovoltaica. 24-25 de maio de 2011. 39 f. Notas de Aula. Material impresso.
- [7] CEPEL/CRESESB. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CRESESB, 1999.
- [8] A. P. C. Guimarães, C. M. Ribeiro, L. E. G. Bastos, L. C. G. Valente, P. C. D. Silva, and R. X. D. Oliveira, "Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos," CEPEL - CRESESB, 2004.

[9] Folha de Dados para Lâmpadas Led Osram.

Disponível em:

<http://www.osram.com/osram_com/products/led-technology/lamps/consumer-led-lamps-with-classic-bulbs/led-star-classic-a/index.jsp>.

Acesso em: 15 de março de 2013.

[10] Dados do rádio comunicador móvel Motorola DGM4100.

Disponível em:

<http://www.motorola.com/web/Business/Product%20Lines/MOTOTrbo/_Documents/LP-MTRBO-4100-PS-LR.pdf>.

Acesso em: 15 de março de 2013.

[11] Informações de consumo do Notebook HP Pavilion.

Disponível em:

<<http://sistemas.ib.unicamp.br/be310/index.php/be310/article/viewFile/285/221>>.

Acesso em: 15 de março de 2013.

[12] Informações de consumo para o refrigerador Midea MRA-06b.

Disponível em:

<<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/refrigeradores.pdf>>.

Acesso em: 15 de março de 2013.

[13] Informações sobre o Ventilador Ventisol Mini20.

Disponível em:

<<http://www.ventisol.com.br/produto.php?linha=3&item=90>>.

Acesso em: 15 de março de 2013.

[14] CEPEL/CRESESB. Potencial Energético Solar - SunData. Dados da radiação solar no Brasil.

Disponível em:

<<http://www.cresesb.cepel.br/sundata/index.php>>.

Acesso em: 10 de março de 2013.

[15] Especificações para o módulo fotovoltaico ecoSolargy ECO200A125M-72.

Disponível em:

<<http://www.ecosolargy.com/pdf/products/ecoAlpha-Series.pdf>>.

Acesso em: 15 de março de 2013.

[16] Especificações para a família de baterias Moura Clean Nano.

Disponível em:

<<http://www.moura.com.br/pt/produtos/cleannano2>>.

Acesso em: 15 de março de 2013.

[17] Especificações para o controlador de carga Tracer-2210RN.

Disponível em:

<http://epsolarpv.com/en/index.php/Product/pro_content/id/157/am_id/136>.

Acesso em: 15 de março de 2013.

[18] Especificações para o inversor Phoenix 24/350.

Disponível em: <<http://www.victronenergy.com.br/upload/documents/Datasheet%20->

%20Phoenix%20Inverter%20180VA%20-%201200VA%20-%20rev%2005%20-%20BRPT.pdf>.

Acesso em: 15 de março de 2013.

[19] Manual de instrução de manufatura e instalação experimental do aquecedor solar de baixo custo. Disponível em:

<http://www.sociedadedosol.org.br/asbc/asbc_online.htm>.

Acesso em: 15 de março de 2013.

[20] Manual de construção de um aquecedor solar com material reciclável. Disponível em:

<<http://www.slideshare.net/livreinatural/como-construir-um-aquecedor-solar>>.

Acesso em: 15 de março 2013.

[21] Radiasol - LABORATÓRIO DE ENERGIA SOLAR - Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Disponível em:

<<http://www.solar.ufrgs.br/#softwares>>.

Acesso em: 15 de março de 2013.

[22] PVSize - LABORATÓRIO DE ENERGIA SOLAR - Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Disponível em:

<<http://www.solar.ufrgs.br/#softwares>>.

Acesso em: 15 de março de 2013.

[23] Luis Horacio Vera, "Programa computacional para dimensionamento e simulação de sistemas fotovoltaicos autônomos," Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Junho, 2004.