

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA AUTÔNOMO
PARA ALIMENTAÇÃO DE ILUMINAÇÃO
PÚBLICA E PONTO DE CARREGAMENTO DE
APARELHOS ELETRÔNICOS

Cícero Tadeu Pereira de Freitas Matos

JOÃO MONLEVADE, MG
20 de fevereiro de 2018

Universidade Federal de Ouro Preto
Departamento de Engenharia Elétrica

IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA AUTÔNOMO PARA
ALIMENTAÇÃO DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA E PONTO
DE CARREGAMENTO DE APARELHOS ELETRÔNICOS

Cícero Tadeu Pereira de Freitas Matos

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área: Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. MSc. Welbert Alves Rodrigues

João Monlevade, MG
20 de fevereiro de 2018

M433i Matos, Cicero Tadeu Pereira de Freitas.
Implementação de um sistema autônomo para alimentação de iluminação pública e ponto de carregamento de aparelhos eletrônicos [manuscrito] / Cicero Tadeu Pereira de Freitas Matos. - 2017.

60f.: il.: color; tabs.

Orientador: Prof. MSc. Welbert Alves Rodrigues.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Energia - fontes alternativas. 2. Energia solar. 3. Sustentabilidade. 4. Iluminação municipal. I. Rodrigues, Welbert Alves . II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 620.91

Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br



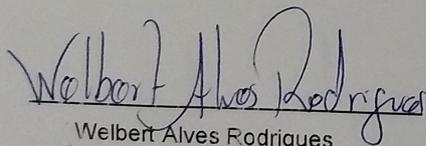
ANEXO III - ATA DE DEFESA

Aos vinte e sete dias do mês de Outubro de 2017, às 17:15 horas, no bloco B deste instituto, foi realizada a defesa de monografia pelo (a) formando (a) Cícero Tadeu Pereira de Freitas Matos, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Welbert Alves Rodrigues, Renan Fernandes Bastos e Francisco Ricardo Abrantes Couy Baracho. O (a) candidato (a) apresentou a monografia intitulada: **Implementação de um Sistema Autônomo para Alimentação de Iluminação Pública e Ponto de Carregamento de Aparelhos Eletrônicos**. A comissão examinadora deliberou, por unanimidade, pela aprovação do (a) candidato (a), com a nota média 8,5, de acordo com a tabela 1. Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da comissão examinadora e pelo (a) formando (a).

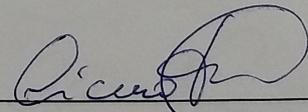
Tabela 1 – Notas de avaliação da banca examinadora

Banca Examinadora	Nota
Welbert Alves Rodrigues	8,5
Renan Fernandes Bastos	8,5
Francisco Ricardo Abrantes Couy Baracho	8,5
Média	8,5

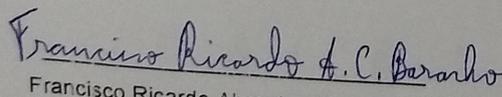
João Monlevade, 27 de Outubro de 2017.



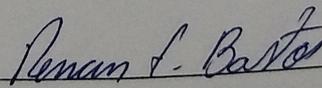
Welbert Alves Rodrigues
Professor (a) Orientador (a)



Cícero Tadeu Pereira de Freitas Matos
Aluno (a)



Francisco Ricardo Abrantes Couy Baracho
Professor (a) Convidado (a)



Renan Fernandes Bastos
Professor (a) Convidado (a)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Colegiado do Curso de Engenharia de Elétrica



ANEXO X - TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado **“Implementação de um sistema autônomo para alimentação de iluminação pública e ponto de carregamento de aparelhos eletrônicos”** é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 27 de Novembro de 2017

Lucas Toledo Pereira de Fátima
Nome completo do(a) aluno(a)

“Na plenitude da felicidade, cada dia é uma vida inteira.” - (Johann Goethe)

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer à Deus por toda proteção e sabedoria que me foi cedido.

Agradeço à toda a minha família, responsável pela minha formação como homem e profissional. Em especial à minha amada mãe, minha rainha, a quem eu devo tudo que tenho, sempre me apoiando nos melhores e piores momentos da minha vida. Agradeço ao meu pai por ser meu exemplo de pessoa e caráter, sempre me indicando as direções do certo e errado. Agradeço ao meu irmão pela lealdade e respeito, um exemplo de perseverança. À minha avó, por seu grande afeto, ao meu afilhado "Pedrinho", que desde que veio ao mundo me trouxe mais inspiração e motivação para seguir atrás dos meus sonhos. Não posso deixar de agradecer à minha madrinha Ana e à minha tia Titiana, são duas mães que eu sempre tive ao meu lado.

Gostaria de agradecer à Universidade Federal de Ouro Preto, aos professores, ao CEFET-MG e ao governo brasileiro por me assegurar um ensino de qualidade e serem peça chave em minha formação profissional.

Muito obrigado aos meus amigos do CCM, amizade eterna e alegre, aos meus amigos do CEFET-MG, uma turma que me trouxe muitas risadas e maturidade. Em especial, agradeço aos irmãos que pude fazer na República Cativoiro, que irei levar para o resto da vida, literalmente foi minha família em João Monlevade e me ajudou a me tornar um homem melhor, muito obrigado meus irmãos e essa conquista é nossa. Obrigado aos amigos e colegas que pude fazer em João Monlevade, em especial Moisés e à empresa SF Energia Solar, que foi fundamental em seu suporte e auxílio para que este trabalho pudesse ser concluído.

Enfim, meu muito obrigado a todos que contribuíram de forma direta e indireta para que esse sonho se realizasse.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Capacidade de Energia Renovável Instalada. Fonte:(PINHO; GALDINO, 2014)	1
Figura 2 – Sistema Fotovoltaico conectado à rede. Fonte:(PINHO; GALDINO, 2014)	6
Figura 3 – Sistema Fotovoltaico Autônomo.	7
Figura 4 – Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício. Fonte: (PINHO; GALDINO, 2014)	9
Figura 5 – Circuito equivalente para uma célula fotovoltaica. Fonte:(PINHO; GALDINO, 2014)	9
Figura 6 – Corrente elétrica em função da diferença de potencial aplicada em uma célula fotovoltaica de silício 156 mm x 156 mm, sob condições-padrão de ensaio. Fonte:(PINHO; GALDINO, 2014)	10
Figura 7 – Curva Potência x Tensão. Fonte:(PEREIRA, 2012)	11
Figura 8 – Painel Solar Fotovoltaico. Fonte:(PINHO; GALDINO, 2014)	13
Figura 9 – Fluxograma do método de recarga dos quatro estados. Fonte:(SILVA, 2013)	16
Figura 10 – Circuito equivalente para uma bateria. Fonte:(PEREIRA, 2012)	16
Figura 11 – Tensão em função da profundidade de descarga. Fonte:(PEREIRA, 2012)	17
Figura 12 – Ciclos em função da profundidade de descarga. Fonte:(PEREIRA, 2012)	17
Figura 13 – Bateria Estacionária.	17
Figura 14 – Controlador de carga. Fonte:(PINHO; GALDINO, 2014)	19
Figura 15 – Esquema de um SFA domiciliar. A-painel fotovoltaico; B-controlador de carga; C-banco de baterias; D-inversores; E- cargas <i>c.a.</i> ; F-caixa de conexão Fonte:(PINHO; GALDINO, 2014)	20
Figura 16 – Formas de onda na saída de um conversor <i>c.c</i> – <i>c.a</i> de ponte completa: a) onda quadrada, b) onda quadrada modificada, c) 3 pulsos. Fonte:(PINHO; GALDINO, 2014)	21
Figura 17 – Classificação dos inversores de acordo com o princípio de funcionamento. Fonte:(PINHO; GALDINO, 2014)	22
Figura 18 – Inversor de (a) meia ponte e (b) ponte completa monofásica. Fonte:(POMILIO; PAREDES; DECKMANN, 2013)	23
Figura 19 – Estratégia de controle PWM para um conversor <i>c.c</i> – <i>c.a</i> - tensões de controle $V_{ref,ca}$ e V_{tri} (a) e tensão na saída V_{carga} (b). Fonte:(PINHO; GALDINO, 2014)	24
Figura 20 – Ponte trifásica. Fonte:(PINHO; GALDINO, 2014)	24

Figura 21 – Estratégia de controle do chaveamento para PWM trifásico. Fonte:(PEREIRA, 2012)	25
Figura 22 – Inversor Senoidal.	26
Figura 23 – Esquemático da proposta descrita no Estudo de Caso.	27
Figura 24 – Radiação diária média mensal para João Monlevade. Fonte: (CRE-SESB, 2017)	28
Figura 25 – Protótipo do sistema <i>off-grid</i> proposto.	39
Figura 26 – Componente Fundamental da Tensão.	42
Figura 27 – Perfil de tensão e corrente para lâmpadas de LED	43
Figura 28 – Amplitude do pico de corrente para lâmpadas de LED.	44
Figura 29 – Perfil de corrente e tensão para celular como carga do sistema.	45
Figura 30 – Perfil de corrente e tensão para <i>notebook</i> como carga.	46
Figura 31 – Perfil de corrente e tensão para <i>Notebook</i> e celular como carga.	47

Lista de abreviaturas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CRESESB	Centro de Referência em Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
SWERA	Solar and Wind Energy Resource Assessment
SFA	Sistema Fotovoltaico Autônomo
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineer
ICEA	Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
MPPT	Maximum Power Point Tracking
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
THD	Distorção Harmônica Total

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos	3
1.1.1	Objetivos Gerais	3
1.1.2	Objetivos Específicos	3
1.2	Organização do Trabalho	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Tipos de Sistemas Fotovoltaicos	5
2.1.1	Sistema Fotovoltaico interligado à rede (<i>On-Grid</i>)	5
2.1.2	Sistema Fotovoltaico Autônomo (<i>Off-Grid</i>)	6
2.2	Módulos Solares Fotovoltaicos	8
2.3	Baterias Estacionárias	14
2.4	Controladores de Carga	18
2.5	Inversores	20
2.5.1	Conversores <i>c.c</i> – <i>c.a</i>	22
2.5.2	Conversores <i>c.c</i> – <i>c.c</i>	26
3	ESTUDO DE CASO	27
3.1	Levantamento de Carga e Consumo de energia	28
3.2	Dimensionamento	29
3.2.1	Banco de Baterias	29
3.2.2	Gerador Fotovoltaico	31
3.2.3	Controlador de Carga	32
3.2.4	Inversor	33
3.2.5	Levantamento de Materiais e Custo	34
3.3	Análise do Dimensionamento	34
4	PROTÓTIPO	35
4.1	Levantamento dos Materiais e Custo do Protótipo	35
4.1.1	Levantamento dos Materiais	35
4.1.2	Custo do Protótipo	39
4.2	Discussão e Análise dos Resultados	40
5	CONCLUSÃO	48
	REFERÊNCIAS	49

Resumo

O presente trabalho traz uma proposta de implementação de um sistema fotovoltaico autônomo para alimentação de iluminação pública e ponto de carregamento de aparelhos eletrônicos dentro do Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, localizado na cidade de João Monlevade.

Com o crescente aumento da demanda de energia elétrica, a busca por fontes renováveis de energia vem sendo uma das alternativas encontradas para solucionar esse problema. Questões ambientais e relacionadas à Sustentabilidade apoiam a busca por diferentes tipos de energia limpa como a energia eólica e a solar.

A Energia Fotovoltaica é um dos ramos da Energia Solar. Dentro do sistema fotovoltaico, há diferentes tipos de sistemas, neste trabalho foca-se no uso de um sistema fotovoltaico autônomo (SFA). Um estudo sobre SFA e seus principais componentes é feito e descrito no presente trabalho.

Um estudo de caso faz-se necessário para o projeto e dimensionamento do SFA que será implementado. Também é necessário um levantamento de cargas que serão alimentadas e um levantamento de materiais que serão utilizados nesse SFA. Tudo isso com o intuito de implementar um sistema com alto nível de confiabilidade e melhor custo possível.

O desenvolvimento de sistemas que utilizam fonte de energia renováveis é fundamental para o futuro do mundo, e o incentivo nesta área vem crescendo a cada dia que passa. Questões ambientais e de Sustentabilidade só demonstram a importância deste tipo de energia. O trabalho tem, também, como intenção incentivar os alunos do ICEA a desenvolverem interesse pela área de energia renovável e assim surgirem novas ideias e aplicações em um futuro próximo.

Palavras chave: Energia Renovável, Sistema Fotovoltaico, Sustentabilidade, Sistema Fotovoltaico Autônomo (SFA)

Abstract

The present work proposes an implementation of an Off-Grid system to supply public lightning and electronics equipments, as laptops and cellphones, inside the Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, placed in the city of João Monlevade.

With the increasing necessity of electrical energy, nowadays the search for Renewable Sources of energy has been the alternative solution to solve this problem. Environmental issues related to Sustainable support the search for different types of Clean Energy as Wind and Solar Energy.

This monograph suggests to apply an Photovoltaic System to supply the public lightning system and the plugs that will be installed in a new square builded in the present campus ICEA. Photovoltaic Energy is one of the various areas of Solar Energy. There are different types of PV systems, in this work focus in Off-Grid system. A deep study about Off-Grid system is made and described. The main components of a PV system are the Solar panels, the batteries, conversors and load controller.

A case study was necessary to show in a small scale the project and dimensioning of the off-grid system proposed. It's also necessary to list the load that will be supplied and dimension the components present in the Off-Grid system. The goal of this is implement a high reliable system with the best possible cost.

The development of systems that use Renewable Energy as source of energy is highly recommended for the future of the planet, the researchs and investments in this area have increased everyday so far. Sustainable and environmetal issues just show the importance of this type of Energy. The work's objective is support the students of ICEA to develop their interesting in Renewable Energy and bring up new ideas and applications for the close future.

Keywords: Renewable Energy, Solar System, Photovoltaic System, Off-Grid, Sustainable

1 Introdução

Recursos renováveis são recursos considerados inesgotáveis e cujas fontes de energia são capazes de se regenerar. O aumento do uso da energia renovável vem sendo notável e se oferece como uma saída para o esgotamento de recursos não renováveis. Seu uso também é uma alternativa contra os efeitos do impacto ambiental causado por recursos não renováveis como o petróleo, o carvão mineral, gás mineral e o urânio. Entre esses impactos podemos citar a poluição e o desmatamento (LANA et al., 2016).

Na Fig. 1 pode-se ver o gráfico sobre a evolução da capacidade de energia instalada de diferentes tipo de energia renovável.

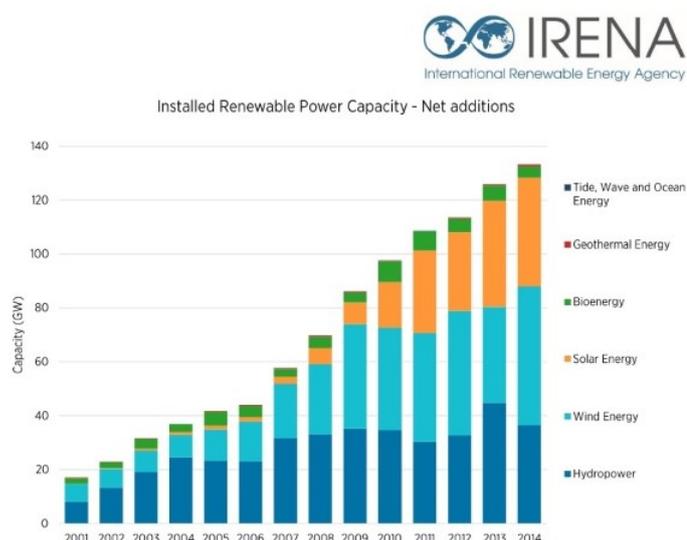


Figura 1 – Capacidade de Energia Renovável Instalada. Fonte:(PINHO; GALDINO, 2014)

A Energia Renovável, também chamada de Energia Limpa, pode ser proveniente de diferentes recursos naturais, entre eles podemos citar o Sol (Energia Solar) e as outras formas de energia que derivam dele, como o vento (Energia Eólica), rios e correntes de água (Energia Hidrelétrica), a matéria orgânica (Biomassa), entre outros.

A necessidade da diversificação das fontes de energia vem sendo necessário em países como o Brasil, e dois fatores demonstram essa necessidade: uma redução significativa na taxa de chuva anual no Brasil e, devido a essa diminuição, a necessidade de aumentar o uso das usinas termoeletricas, consequentemente um aumento no preço da energia paga pelo consumidor (LANA et al., 2016).

Tratando-se de Energia Solar (PINHO; GALDINO, 2014), pode-se resumir-la, de forma simples, como sendo a forma de energia obtida pela luz do Sol (radiação solar).

Diferentes tecnologias fazem uso da Energia Solar, dentre elas destaca-se a Energia Fotovoltaica, sendo essa a energia proveniente da conversão direta da luz em eletricidade. Uma das grandes vantagens no uso da Energia Fotovoltaica é a geração da energia no mesmo local de consumo. Essa energia pode ser levada a sistemas de geração distribuída e, assim, elimina-se quase todas as perdas devido ao transporte de energia (geração, transmissão e distribuição), que em geral representam cerca de 12% das perdas técnicas de um sistema elétrico (ENERGÉTICA, 2015).

O potencial fotovoltaico de países como Brasil é enorme, pois países latinos e do Caribe dispõem de uma maior quantidade de radiação solar se comparados a países europeus. Estes países fazem parte do chamado "cinturão solar" (SALAMANCA UNIVERSIDADE POLITECNICA DE MADRI, 2016).

Entre outras vantagens da Energia Fotovoltaica, deve-se citar que sua fonte energética (Sol) é gratuita e disponível para todos. Mas os equipamentos utilizados em sua instalação e a própria instalação em si, têm um custo considerável quando confrontado com outras alternativas de produção de energia (LANA et al., 2016).

Dentro do complexo da Energia Fotovoltaica, há diferentes tipos de sistemas que podem ser utilizados em diferentes locais e situações, mas todos com o intuito de gerar uma energia limpa e sustentável. Entre as aplicações dos sistemas fotovoltaicos, temos os sistemas isolados individuais, sistemas conectados à rede elétrica, sistemas híbridos e sistemas de telecomunicações e monitoramento remoto que também utilizam a Energia Fotovoltaica como alimentador (PINHO; GALDINO, 2014). Usinas fotovoltaicas estão cada vez mais presentes em nosso mundo atual. Em Pirapora, Minas Gerais, será inaugurada (previsão em 2017) a maior usina fotovoltaica da América Latina (MEGAUSINA, 2016). Durante o desenvolvimento deste trabalho serão abordados, de forma mais profunda, os sistemas fotovoltaicos autônomos (Off-Grid), ou isolado, e o sistema conectado à rede (On-Grid).

O constante crescimento da população mundial gera um ciclo natural de busca por formas alternativas e limpas de energia, pois a cada dia que passa os recursos não renováveis se extinguem. Em contrapartida, os avanços em tecnologia, o aumento do mercado consumidor e de indústrias demandam cada vez mais energia. A busca por meios alternativos de produção de energia é essencial para conseguirmos suprir a demanda energética exigida por nosso planeta, sempre visando balancear o consumo com a produção energética, sem deixar de lado as questões ambientais ligadas ao conceito de Sustentabilidade (BLOWERS, 2013).

Sustentabilidade é uma palavra já comum no dia a dia de todos. Ser sustentável já é uma necessidade para a geração atual e é de suma importância a preservação do meio ambiente para as gerações futuras. Deve-se suprir o presente, mas sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos Gerais

Após um estudo prévio sobre sistemas fotovoltaicos autônomos, deve-se elaborar o projeto e o dimensionamento de um sistema fotovoltaico autônomo (SFA) que atenda ao tema proposto neste trabalho: Implementação de um sistema autônomo para alimentação de iluminação pública e ponto de carregamento de aparelhos eletrônicos. Deve-se, também, elaborar o levantamento de materiais e custo do sistema a ser implementado. Um protótipo da proposta será desenvolvido dentro dos laboratórios do ICEA e utilizado como referência para análise de dados e apresentação do sistema.

1.1.2 Objetivos Específicos

A fim de alcançar os objetivos gerais, foca-se em objetivos específicos, sendo eles:

- i. Estudo teórico e levantamento bibliográfico sobre os componentes de um Sistema Autônomo (painéis fotovoltaicos, baterias, controladores de cargas, inversores, etc);
- ii. Estudo e Levantamento geográfico da cidade de João Monlevade, para verificar o nível de radiação e incidência solar da região;
- iii. Projeto e dimensionamento do sistema a ser implementado;
- iv. Especificação dos equipamentos que serão utilizados e levantamento de custo dos mesmos.
- v. Construção do protótipo para realizar os experimentos e coletar dados.

1.2 Organização do Trabalho

Neste trabalho será apresentada uma organização de estrutura baseada em 5 capítulos. No Capítulo 1 foi realizada uma introdução do conteúdo abordado, a importância do uso de energia renovável, dando um enfoque no uso de Energia Fotovoltaica.

O Capítulo 2 apresenta um levantamento bibliográfico sobre sistemas fotovoltaicos, com ênfase no sistema fotovoltaico autônomo, utilização dos painéis fotovoltaicos, baterias, controladores de carga, inversores, seus componentes de forma geral.

No Capítulo 3, é feito um estudo de caso onde será abordado o projeto em si, levantamento de cargas, análise de radiação na região de João Monlevade, dimensionamento, levantamento de custo e confiabilidade do sistema proposto.

O Capítulo 4 apresenta o protótipo construído, análise e discussão dos resultados práticos obtidos.

Por fim, o Capítulo 5 trará as principais conclusões e considerações finais do trabalho apresentado.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Tipos de Sistemas Fotovoltaicos

2.1.1 Sistema Fotovoltaico interligado à rede (*On-Grid*)

Sistemas Fotovoltaicos interligados à rede, ou simplesmente Sistemas On-Grid, são sistemas que trabalham convertendo a Energia Solar em Energia Elétrica, injetando a energia gerada diretamente à rede de distribuição (LANA et al., 2016).

Como este sistema está interligado, o mesmo cria uma dependência da rede para estar em funcionamento. Caso haja alguma queda de energia, o sistema será imediatamente desligado, perdendo a possibilidade de trabalhar como um sistema de backup. Outra dificuldade desse sistema pode ser percebida, por exemplo, quando deseja-se realizar uma manutenção preventiva ou corretiva. Neste caso, o sistema não pode estar em funcionamento, ou seja, a rede não pode estar energizada. Não existe seu funcionamento de forma isolada (PINHO; GALDINO, 2014).

Em relação aos componentes do sistema *On-Grid*, como não necessita de nenhum tipo de armazenamento (banco de baterias), esse sistema disponibiliza energia à rede elétrica, funcionando como um sistema de *backup* e, dessa forma, absorve a energia gerada. Já em relação aos inversores utilizados, são equipamentos mais sofisticados quando comparados aos inversores utilizados em um SFA, pois nesse sistema eles tem a função de converter um sinal em *c.c* – *c.a* e gerenciar o funcionamento do sistema. A eficiência do Sistema *On-Grid* está diretamente ligada aos inversores, quanto mais eficiente o inversor, mais eficiente será o sistema e mais potencial será aproveitado na rede de distribuição. Os inversores, em sua maioria, trabalham utilizando a técnica de *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) que, basicamente, pode-se dizer que uma técnica de rastreamento do ponto máximo de potência no qual aproveita-se a capacidade máxima de geração (BRITO et al., 2010) .

Para poder usufruir desse sistema, deve-se regulamentá-lo através do órgão responsável, no caso a ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Em Minas Gerais, o órgão que aprova o projeto para o uso de sistema *On-Grid* é a CEMIG - Companhia de Energia de Minas Gerais. De acordo com (PEREIRA, 2012) foi criada pela ANEEL uma nova regulamentação que permite os consumidores gerar energia elétrica, trata-se da Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012. Esse incentivo criou novas perspectivas para a produção de energia elétrica alternativa, criando a expectativa de um futuro promissor.

Na Fig. 2, vê-se um exemplo de sistema interligado à rede.

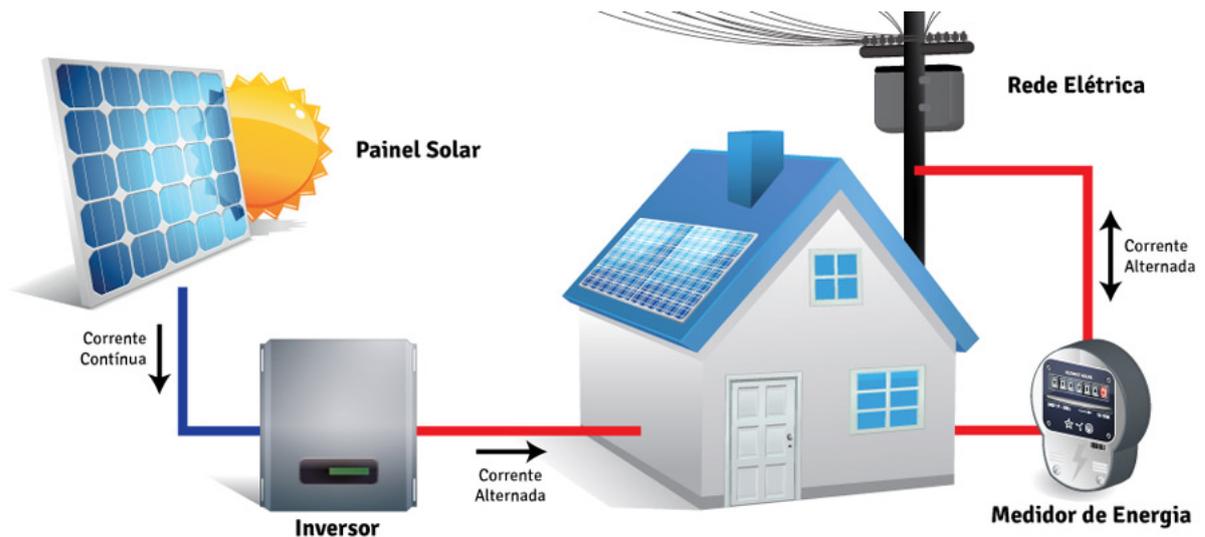


Figura 2 – Sistema Fotovoltaico conectado à rede. Fonte:(PINHO; GALDINO, 2014)

2.1.2 Sistema Fotovoltaico Autônomo (*Off-Grid*)

Diferentemente dos Sistemas *On-Grid*, os Sistemas Fotovoltaicos Autônomos (SFA), também chamados de Sistemas *Off-Grid*, não trabalham conectados à rede, mas sim de forma isolada. Este sistema necessita de um armazenamento da energia gerada, sendo este feito por bancos de baterias estacionárias. De forma geral, um SFA necessita de mais componentes para seu perfeito funcionamento, como controladores de carga, inversores *c.c – c.a*, conversores *c.c – c.c*, entre outros (PEREIRA, 2012).

O tempo de vida útil de um SFA é longo. Os módulos fotovoltaicos possuem uma garantia em torno de 20 anos em sua maioria e com vida útil podendo chegar até 40 anos (PEREIRA, 2012). Os dispositivos eletrônicos utilizados, como os inversores e controladores de carga, possuem uma vida útil superior a 10 anos. O grande obstáculo desse sistema são as baterias, que possuem um alto custo de compra e não possuem uma vida útil extensa, pode-se considerá-las como o “tendão de Aquiles” do sistema quando os pontos em questão são o custo e a durabilidade. Se o sistema for bem dimensionado, as baterias tem vida útil em torno de 4 a 5 anos (PINHO; GALDINO, 2014).

Sistemas isolados possuem diversas aplicações, entre elas destaca-se a geração de energia para cargas isoladas em instalações remotas, residências, edifícios, fazendas, zonas rurais, energização de cercas elétricas, sistema de iluminação pública, enfim, localidades onde haja uma boa exposição ao Sol e sem sombras (PEREIRA, 2012).

Os sistemas *On-Grid* constituem a maior parte da potência instalada dentro do ramo de energia fotovoltaica. Cerca de 98% da capacidade global se refere a esse tipo de sistema (SALAMANCA UNIVERSIDADE POLITECNICA DE MADRI, 2016), mas o interesse

em sistemas isolados vem aumentando e seu crescimento é notável, principalmente por seu uso em áreas remotas e de difícil acesso, fora o uso em países em desenvolvimento como, por exemplo, a Índia (KATHAIYAN, 2015).

Na Fig. 3 vê-se uma simples representação de um SFA para uma residência.

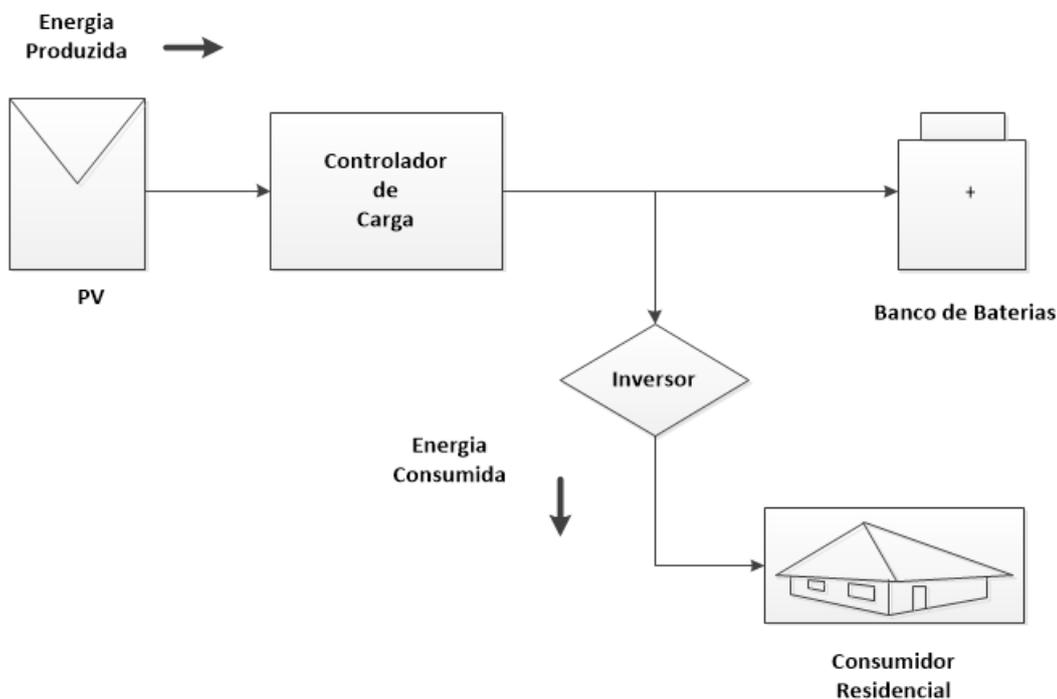


Figura 3 – Sistema Fotovoltaico Autônomo.

De forma geral, destacam-se em sistemas fotovoltaicos, sejam eles *On-Grid* ou *Off-Grid*, sua confiabilidade. Um sistema fotovoltaico não possui um grande nível de complexidade se comparado à sistemas eólicos, térmicos ou as tradicionais hidrelétricas. Praticamente não possuem partes móveis e estão quase inertes aos efeitos de descargas atmosféricas e ações da natureza como ventos fortes. Devido a fatores como este citados, os sistemas fotovoltaicos possuem um alto índice de disponibilidade. Também é válido destacar que caso ocorra alguma falha no sistema, seja qualquer tipo de falta, a mesma fica restrita à instalação específica e não abrange todo o sistema em si (PEREIRA, 2012).

Como o sistema fotovoltaico é modularizado, ele pode ser expandido conforme a necessidade, mas sempre respeitando o projeto base. Essa facilidade de expansão é levada em consideração dentro do projeto e, assim, caso necessite de um crescimento futuro no sistema, o investimento não será tão elevado. (PINHO; GALDINO, 2014)

A autonomia concedida ao consumidor de energia é algo considerável, pois o produtor também é o consumidor de energia e se torna responsável por praticamente todo o processo, como o caso de um SFA onde o sistema trabalha 100% independente da concessionária de energia.

2.2 Módulos Solares Fotovoltaicos

Um dos elementos fundamentais dentro de um sistema fotovoltaico são os módulos fotovoltaicos. Eles são responsáveis pela captação e transformação da Energia Solar em Energia Elétrica. O elemento fundamental para esta conversão é a célula solar.

De forma simples, pode-se dizer que as células fotovoltaicas são dispositivos semicondutores que geram corrente elétrica quando expostos a luz solar (radiação solar), através dos fótons (PINHO; GALDINO, 2014). Os fótons são capazes de transmitir sua energia aos elétrons de valência do semicondutor e, desta forma, tornando possível a ruptura das ligações dos semicondutores de modo que estes elétrons fiquem livres e possam se movimentar no material. A ausência do elétron devido a esta ruptura é chamada de lacuna e, também, pode-se mover através do semicondutor. Logo, pode chamar as lacunas e os elétrons como portadores de carga e são responsáveis pela condução elétrica de um semicondutor (SALAMANCA UNIVERSIDADE POLITECNICA DE MADRI, 2016).

Os módulos mais comuns são fabricados à base de silício e sofrem um processo de dopagem, que é a inserção de impurezas de maneira controlada. Este processo de dopagem é feito para se conseguir o campo elétrico necessário para a condução. As dopagens mais comuns são com fósforo, cuja dopagem resulta em um material com elétrons livres e chamamos de silício tipo N , ou seja, uma área com densidade de elétrons maior ou simplesmente área doadora. Já a dopagem com boro resulta em um material com características inversas ou, de forma simples, um material carregado positivamente devido a falta de elétrons (átomos receptores), chamado de silício tipo P . Essa diferença de elétrons e lacunas gera o campo elétrico, e esse conjunto formado se denomina união $P-N$. A maior parte das células solares são formadas a partir desta união (SALAMANCA UNIVERSIDADE POLITECNICA DE MADRI, 2016).

Quando há incidência de luz sobre a célula, os fótons presentes na radiação solar entram em choque com os elétrons da estrutura de silício e, desta forma, os elétrons ganham energia e ficam livres para se movimentarem. Com a criação de um campo elétrico entre as camadas da união $P-N$, há uma orientação dos elétrons, que fluem da camada P para a camada N .

Através de um fio condutor externo, a camada negativa é conectada a camada positiva, gerando assim um fluxo dos elétrons na conexão, ou seja, temos uma corrente elétrica circulando. Esse fluxo de elétrons ocorre enquanto existir incidência de luz sobre as células. A intensidade da corrente elétrica gerada será proporcional a quantidade de luz incidente (PEREIRA, 2012).

Uma célula possui uma fina camada do tipo N e uma de maior espessura do tipo P , como mostrado na Fig. 4.

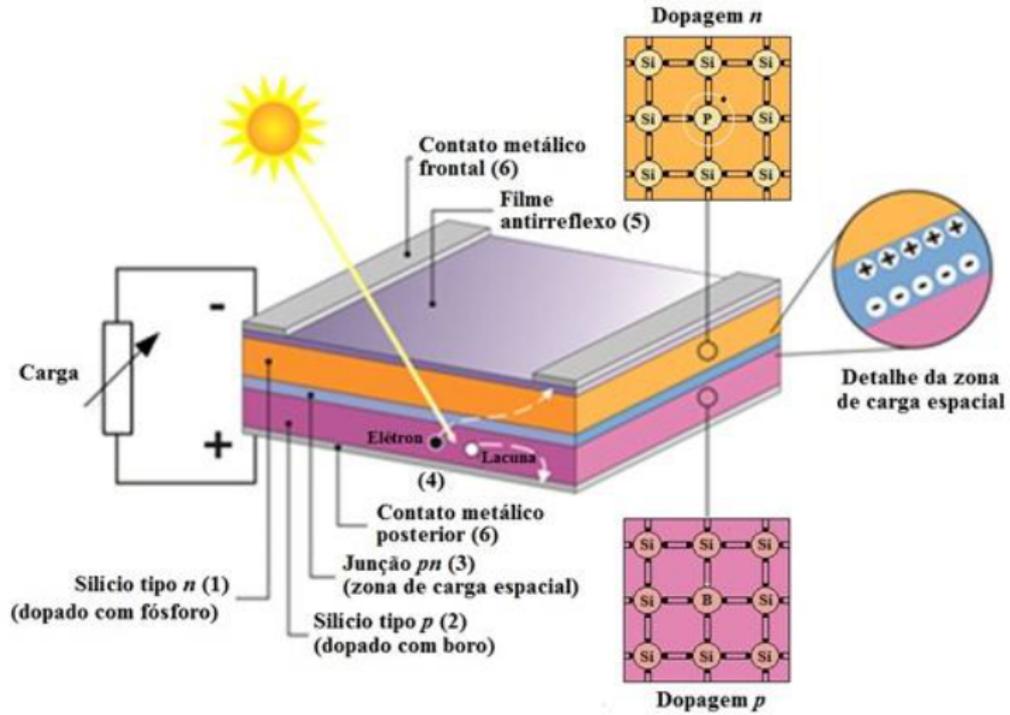


Figura 4 – Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício. Fonte: (PINHO; GALDINO, 2014)

Na Fig. 5 vê-se o circuito equivalente de uma célula fotovoltaica. R_s e R_p representam as resistências em série e paralelo, respectivamente. Pode-se ver também o diodo D , que representa a participação da junção $P - N$.

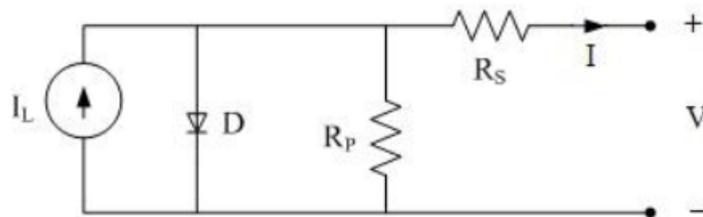


Figura 5 – Circuito equivalente para uma célula fotovoltaica. Fonte:(PINHO; GALDINO, 2014)

A seguir apresenta-se uma fórmula que pode ser utilizada para representar a curva $I \times V$ do dispositivo fotovoltaico:

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{mv_t} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (2.1)$$

Onde:

- R_s = Resistência Série;

- R_p = Resistência Paralelo;
- I_L = Corrente da Fonte;
- I_0 = Corrente Invertida de saturação do diodo;
- I = Corrente gerada pela placa;
- V = Tensão gerada pela placa;
- m = fator de idealidade do diodo.
- V_t = tensão térmica e depende da temperatura da célula (T_c).

Alguns fatores influenciam a característica da curva $I \times V$, entre eles podemos destacar a intensidade de iluminação (Irradiância) e a temperatura. O primeiro fator afeta, em sua grande parte, a corrente. Já o segundo fator tem uma influência direta sobre a tensão e potência, quando há um aumento da temperatura, ocorre uma diminuição da tensão gerada pelo módulo, conseqüentemente uma diminuição da potência (PINHO; GALDINO, 2014).

Na Fig. 7 pode-se ver as curvas de $I \times V$ e $P \times V$ típicas. Dentro dessa curva também está representado o MPP, que é o ponto de máxima produção de potência, de acordo com (BRITO et al., 2010).

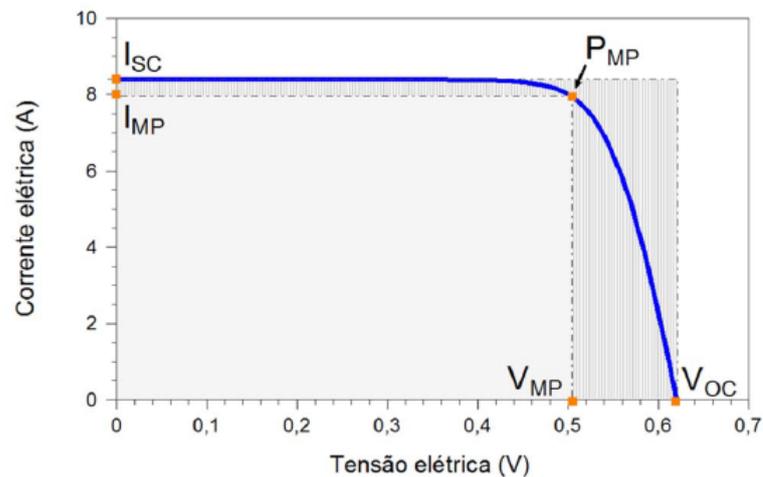


Figura 6 – Corrente elétrica em função da diferença de potencial aplicada em uma célula fotovoltaica de silício 156 mm x 156 mm, sob condições-padrão de ensaio. Fonte:(PINHO; GALDINO, 2014)

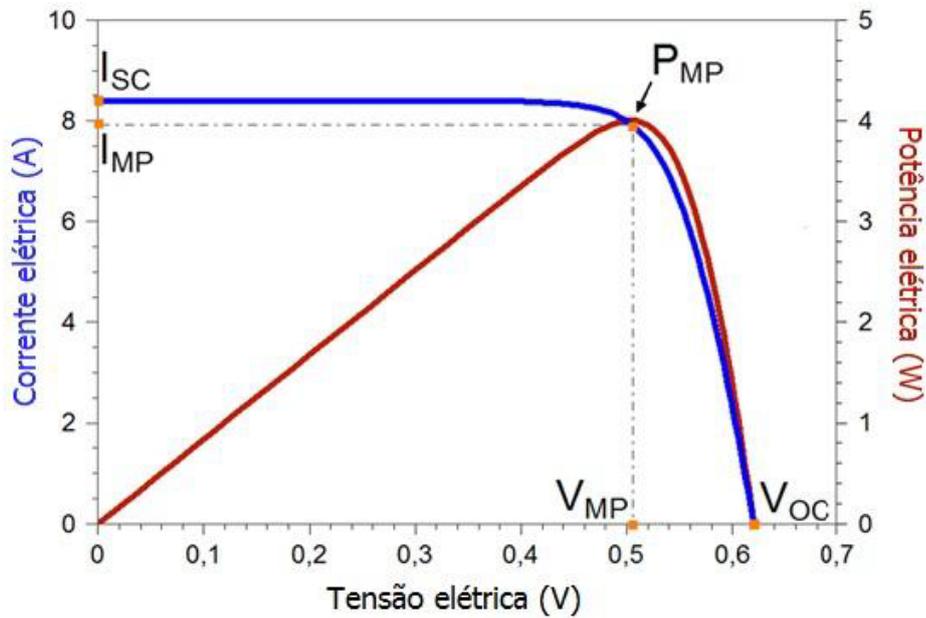


Figura 7 – Curva Potência x Tensão. Fonte:(PEREIRA, 2012)

Nestas figuras é possível perceber o ponto de máxima potência identificado pela técnica de MPP presente nos painéis. Também pode-se ver pontos importantes nesta curva como a corrente de curto-circuito (I_{sc}) e a corrente que fornece a máxima potência, identificada por I_{MMP} .

Mesmo com todas as vantagens provenientes da geração de energia através do uso dos painéis fotovoltaicos, a eficiência da conversão é baixa e o custo de sua implantação ainda é considerado elevado, por isso é sugerido utilizar técnicas como MPPT - *Maximum Power Point Tracking*. Não há apenas um ponto de máxima potência, podem existir os chamados múltiplos máximos para arranjos de vários painéis. O ponto de máxima potência varia de acordo com as condições climáticas (BRITO et al., 2012).

Como os painéis possuem características tensão versus corrente não linear, a extração deste ponto de máxima potência é uma tarefa complexa. Com o intuito de solucionar esse problema, diferentes métodos de extração da máxima potência têm sido propostos. Entre as principais técnicas de MPPT destacam-se: razão cíclica constante, tensão constante (V_{cte}), perturbação e observação ($P&O$), $P&O$ modificado, condutância incremental (IC), IC modificado, IC baseado em PI, correlação de ripple, oscilação do sistema e o método baseado em temperatura (BRITO et al., 2012). A diferença de desempenho entre os melhores métodos é tênue, sendo cada algoritmo a melhor solução para cada caso específico. O método da razão cíclica fixa representa o método mais simples pois não precisa de nenhuma realimentação, a resistência da carga é ajustada uma única vez para a potência máxima do painel e não é ajustada novamente, basicamente pode-se dizer que se trata de um método *off-line*. Também destaca-se o método $P&O$, que opera periodicamente

incrementando ou decrementando a corrente de saída do painel (ou a tensão de saída) e compara a potência obtida no ciclo atual com a potência do ciclo anterior e, desta forma, sempre tenta encontrar e operar no ponto máximo de potência (BRITO et al., 2012).

Em relação à eficiência (η) dos painéis, existem diferentes formas de definir a eficiência do módulo fotovoltaico, dependendo da área considerada do mesmo. A forma mais comum utilizada é a estimativa da eficiência em relação à área total do módulo. Segue-se sua fórmula para cálculo:

$$\eta_{areatotal} = \frac{P_{max}}{A_T \times G_T} \quad (2.2)$$

Onde:

- $\eta_{reatotal}$: eficiência com relação à área total;
- P_{max} : potência máxima que o dispositivo pode gerar;
- A_T : área total do dispositivo;
- G_T : radiação solar incidente total;

Devem-se levar em conta diferentes perdas para quantificar a eficiência dos módulos e a potência real obtida pelo Sistema Fotovoltaico. Em geral os fatores que devemos considerar são:

- Perdas por sujeira ou pó;
- Perdas angulares e espectrais;
- Perdas ôhmicas em corrente contínua e alternada;
- Perdas por rendimento do MPPT;
- Perdas por sombreamento;
- Perdas por temperatura;
- Perdas por rendimento *AC/DC* do inversor;
- Perdas por manutenção e vida útil dos equipamentos.

De acordo com (PEREIRA, 2012), durante a instalação dos módulos fotovoltaicos seguem-se alguns padrões estabelecidos pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL. A longitude é um fator que influencia diretamente no rendimento do painel solar. É sempre buscada uma inclinação em que os raios solares incidam perpendicularmente com a superfície do painel e, desta forma, tem-se um maior aproveitamento da radiação

solar. Em relação à longitude, pode-se citar como exemplo, que é aconselhável uma inclinação do painel fotovoltaico em torno de 20° para a região de Minas Gerais, devido ao deslocamento e posicionamento do Sol (CRESESB, 2017). Além de um maior aproveitamento da irradiação solar, a inclinação do painel também traz consigo benefícios extras como evitar um acúmulo de sujeira e auxílio na limpeza dos módulos, até mesmo pela própria água da chuva.

Hoje em dia já existem sistemas de rastreamento solar, que são implementados durante a instalação dos sistemas fotovoltaicos e, desta forma, obtêm-se um maior aproveitamento da energia solar do local (PINHO; GALDINO, 2014). Entre os sistemas de rastreamento destacam-se:

- Rastreamento em dois eixos;
- Rastreamento em um eixo polar;
- Rastreamento em um eixo azimutal;
- Rastreamento em um eixo horizontal.

Tem-se como função dos painéis fotovoltaicos a conversão da energia solar em energia elétrica, como dito anteriormente. Essa energia transformada é do tipo contínua e transmitida em *c.c* dentro do sistema até ser convertida em *c.a* pelos conversores. A bateria que integra o sistema isolado é carregada em *c.c*, logo a captação e transmissão em *c.c* é uma vantagem dentro do sistema isolado, olhando-se pelo ponto de vista da bateria (PINHO; GALDINO, 2014).

Em relação à fabricação das células solares, há um amplo domínio do mercado asiático, principalmente da China. Em 2006 o principal produtor de células era o Japão, com cerca de 37% do total, e a Europa com cerca de 28%. Em 2011 a China já havia superado ambos os concorrentes fabricando cerca de 57% da produção mundial (SALAMANCA UNIVERSIDADE POLITECNICA DE MADRI, 2016).



Figura 8 – Painel Solar Fotovoltaico. Fonte:(PINHO; GALDINO, 2014)

2.3 Baterias Estacionárias

A radiação solar possui uma natureza inconstante e variável em ciclos diários (dia/noite, presença de nuvens) e anuais (diferentes níveis de insolação, variáveis conforme a estação do ano), devido a isto em alguns sistemas fotovoltaicos, como o SFA por exemplo, faz-se necessário o uso de um sistema de acumulação de energia elétrica. As baterias possuem grande importância em sistemas de energia pois são responsáveis pelo armazenamento da energia proveniente dos módulos fotovoltaicos. O seu uso é necessário, pois em períodos em que a geração de energia é nula ou praticamente insuficiente, são as baterias que atendem a demanda exigida (PEREIRA, 2012).

Algumas características são desejadas em um sistema de armazenamento de energia, entre elas pode-se citar:

- Longo tempo de vida útil;
- Alto número de ciclagens (carga e descarga);
- Baixa auto-descarga;
- Pouca necessidade de manutenção;
- Resistência a períodos de baixa carga;
- Alta eficiência de carga;
- Baixo preço.

Há diferentes tipos de baterias, mas as mais utilizadas em um SFA são do tipo estacionária de chumbo-ácido (*Pb – ácido*). De forma simples, são baterias que podem ser descarregadas a uma profundidade maior e, desta forma, possuem uma vida útil maior quando comparadas as baterias convencionais. São constituídas, geralmente, por grupos de vasos de 2V que, associados, podem gerar a tensão requerida. São comuns baterias que fornecem diretamente 12V ou 24V. Algumas características são comuns a este tipo de baterias como temperatura de operação entre $-10^{\circ}C$ e $50^{\circ}C$, densidade energética situando-se entre 10Wh/kg e 30Wh/kg e número de ciclagens entre 500 e 2000 vezes, a capacidade de acumulação, normalmente, é de 50Ah e 1200Ah (SALAMANCA UNIVERSIDADE POLITECNICA DE MADRI, 2016).

A vida útil das baterias pode ser comprometida por certos fatores como o carregamento inadequado da mesma, exposição à temperaturas excessivas, recargas com níveis inadequados de tensão e problemas de sulfatação que podem reduzir em até 50% a vida útil das baterias (SILVA, 2013).

Enfatizando a sulfatação, este processo gera a formação de cristais de chumbo chamados “duro” que podem se formar nas placas da bateria, tudo isso devido ao uso incorreto

das baterias. Esse processo (sulfatação), quando ocorre em excesso é difícil de ser reduzido e pode gerar danos permanentes às células das baterias.

Em relação ao carregamento da bateria, de acordo com (SILVA, 2013) há três formas de realizar o carregamento: tensão em dois estados, corrente em dois estados e corrente pulsada.

Todos os processos são iguais durante o processo de carga lenta e carga rápida, apenas se diferenciam entre si no processo de equalização e flutuação da bateria.

A etapa de carga lenta é feita quando a bateria possui tensão abaixo de sua tensão de corte V_{off} , normalmente essa possui um valor de $1,75 V/célula$ ou conforme for especificado pelo fabricante. Nessa etapa, a corrente que vai para a bateria é limitada entre 2% e 3% da capacidade Ampére Hora da bateria C(Ah) até que a mesma atinja a tensão de corte novamente. Após a tensão da bateria ser superior a V_{off} , é iniciado o processo de carga rápida. Nesta etapa, geralmente, a corrente é limitada a 10% C(Ah) e espera-se que a tensão da bateria alcance o valor da tensão de equalização V_{equ} , correspondendo a $2,4 V/célula$ ou conforme especificação do fabricante. Quando esta etapa é concluída, a corrente da bateria será diminuída para que a sua tensão não ultrapasse V_{equ} . A tensão de equalização V_{equ} é o nível que a bateria deve atingir para finalizar o processo de carga rápida e passar para o processo de flutuação (SILVA, 2013).

Na etapa de flutuação, a bateria já se encontra carregada e deve manter o valor de tensão em um valor regulado V_{flu} . V_{flu} é um valor acima da tensão de circuito aberto para compensar as perdas por auto descarga da bateria. O estado de flutuação é o mais crítico, pois qualquer sobretensão causará uma redução na vida útil da bateria podendo até torná-la inutilizável (SILVA, 2013).

O algoritmo de tensão em dois estados também é chamado como algoritmo de quatro estados e isso porque une todos os estados de carga da bateria, combinando tensão constante e corrente constante. Sua implementação é fácil e sua utilização em um sistema de controle segue o fluxograma representado pela figura 9.

Para escolhermos a bateria correta, devemos determinar o tamanho de nosso sistema e levar em consideração fatores como a potência das cargas que serão energizadas e o tempo de autonomia que desejamos em nosso projeto. O tempo de autonomia é o tempo que o SFA consegue alimentar sua demanda sem a presença do Sol, levando em consideração dias de chuva, dias nublados, etc (SALAMANCA UNIVERSIDADE POLITECNICA DE MADRI, 2016).

Temos na Fig. 10 a representação do circuito equivalente de uma bateria.

Nesse circuito tem-se a representação da resistência interna da bateria R_{bat} , uma fonte de tensão E , ambas em série, e da diferença de potencial entre as partes, representado por V_{bat} .

A vida útil da bateria esta diretamente ligada à profundidade de descarga. De forma simples, pode-se definir profundidade de descarga como sendo a quantidade de corrente

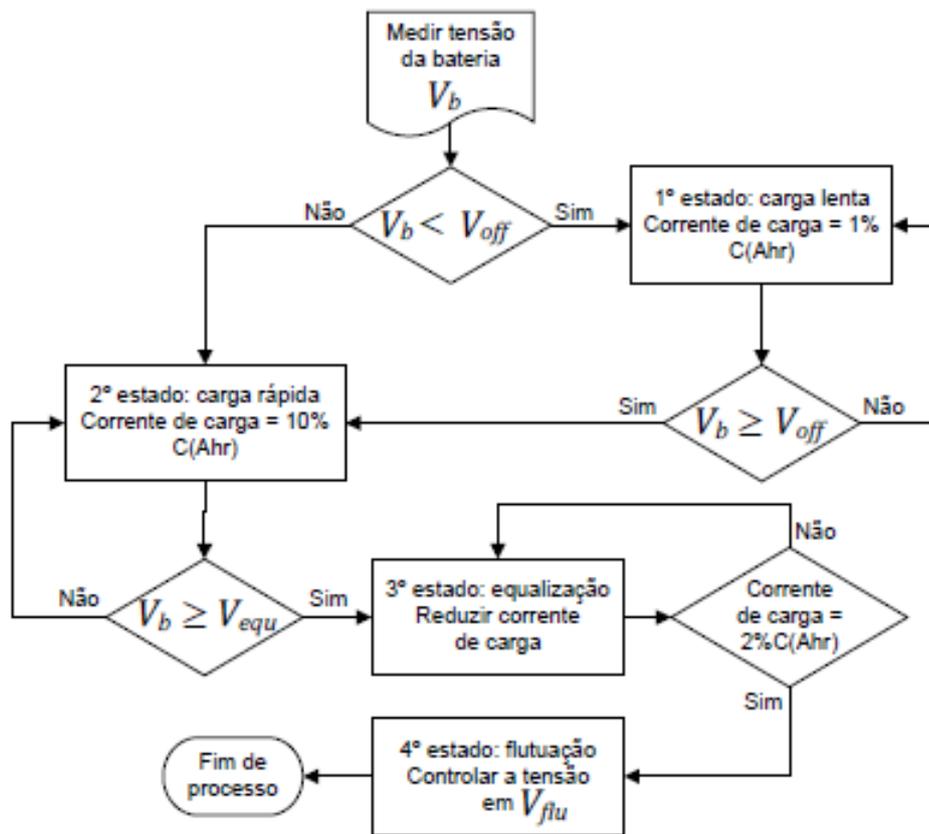


Figura 9 – Fluxograma do método de recarga dos quatro estados. Fonte:(SILVA, 2013)

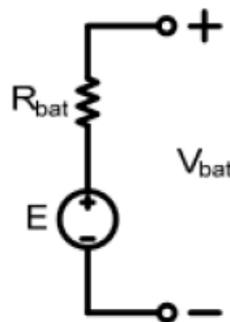


Figura 10 – Circuito equivalente para uma bateria. Fonte:(PEREIRA, 2012)

que a bateria fornece ao sistema quando ela é a fonte energética do mesmo (PEREIRA, 2012).

As Fig. 11 e Fig. 12 apresentam os gráficos de tensão em função da profundidade de descarga e de números de ciclos em função da profundidade de descarga.

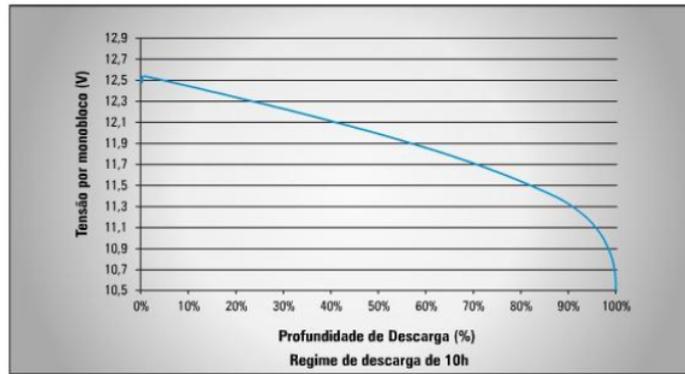


Figura 11 – Tensão em função da profundidade de descarga. Fonte:(PEREIRA, 2012)

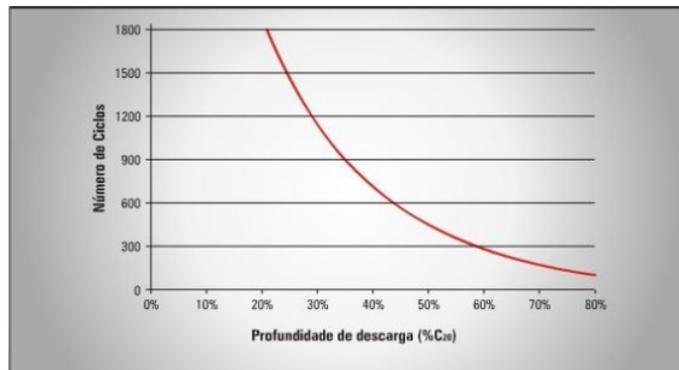


Figura 12 – Ciclos em função da profundidade de descarga. Fonte:(PEREIRA, 2012)

Percebe-se que a profundidade de descarga da bateria tem uma grande influência (exponencialmente) em sua vida útil. É aconselhado que durante o tempo máximo de autonomia a bateria não seja descarregada em níveis de profundidade superiores a 30% de sua capacidade, isso durante seu período em regime de ciclagem (SILVA, 2013).



Figura 13 – Bateria Estacionária.

2.4 Controladores de Carga

Os controladores de carga têm um papel importante dentro de um SFA pois controlam o fluxo de energia que carrega as baterias, ou seja, controlam a carga e descarga da bateria, evitando que elas sejam excessivamente carregadas ou descarregadas. Podemos assimilar sua função como de "proteção", prevenindo que a bateria se desgaste ou sofra danos que possam afetar o tempo de sua vida útil (SALAMANCA UNIVERSIDADE POLITECNICA DE MADRI, 2016).

As baterias são carregadas por energia fornecida pelos módulos fotovoltaicos e, como dito anteriormente, são responsáveis pelo armazenamento dessa energia. Os controladores de carga contribuem para uma longevidade da vida útil do sistema de armazenamento, pois como protegem as baterias, evitam distúrbios nas mesmas. Por essas razões o controlador de carga é considerado um componente crítico de um SFA, pois sua falha implica em possíveis danos irreversíveis para a bateria (PEREIRA, 2012).

Seu dimensionamento deve ser feito levando em consideração as especificidades dos diferentes tipos de baterias, pois um controlador projetado para uma bateria de chumbo-ácido não pode ser adequado para uma bateria de níquel-cádmio por exemplo. Por isso deve-se ser cuidadoso e estar sempre atento no projeto deste componente (PINHO; GALDINO, 2014).

Em sistemas que alimentam cargas com poucas variações em seu consumo, o controlador de carga não se faz necessário desde que a tensão entregue pelo gerador fotovoltaico seja compatível com a tensão da bateria. Estes sistemas são conhecidos como sistemas auto-regulados. Mas esses sistemas não são recomendados pela maioria dos especialistas porque apresentam eficiência relativamente baixa e alto risco de problemas (PINHO; GALDINO, 2014).

Os controladores de carga devem ser capazes de desconectar o gerador fotovoltaico quando a bateria alcançar sua carga plena e interromper o fornecimento de energia quando o estado de carga da bateria alcançar o seu nível mínimo de segurança (PINHO; GALDINO, 2014). Os controladores mais sofisticados são capazes de monitorar o desempenho de SFA e alertar a ocorrência de algum problema, geralmente esses controladores mais complexos possuem, incorporados, um sensor de temperatura responsável por compensar o efeito da variação da temperatura nos parâmetros das baterias (SALAMANCA UNIVERSIDADE POLITECNICA DE MADRI, 2016).

Para especificar um controlador deve-se saber o tipo de bateria que será utilizada no sistema e o regime de operação, além de determinar a tensão e a corrente de operação do SFA. Sistemas com elevados valores de corrente de operação possuem controlador mais oneroso e sua disponibilidade no mercado é reduzida significativamente se comparado a sistemas em que a corrente de operação não é tão elevada.

Há diferentes tipos de controladores de carga e podem se diferenciar quanto à gran-

deza utilizada para controle, quanto à forma de desconexão do painel fotovoltaico e quanto à estratégia de controle utilizada. Dentre as grandezas de controle, as mais utilizadas são: estado de carga, tensão e densidade do eletrólito da bateria (PINHO; GALDINO, 2014). Em relação a forma utilizada para desconectar o painel fotovoltaico da bateria, quando a bateria está à carga plena, o controlador pode ser do tipo paralelo (*shunt*) ou série. Os dois métodos são muito usados e cada um pode incorporar um número de variáveis que alteram o desempenho e aplicabilidade (SALAMANCA UNIVERSIDADE POLITECNICA DE MADRI, 2016).

Abaixo, na figura 14, temos um controlador de carga comercial.



Figura 14 – Controlador de carga. Fonte:(PINHO; GALDINO, 2014)

Controladores de carga, também conhecidos como reguladores de carga, podem utilizar a técnica de modulação por largura de pulso (PWM - *Pulse with Modulation*), que será responsável pelo controle do conversor que fará a carga e descarga da bateria. A técnica de MPPT é utilizada para reconhecer e utilizar o ponto de máxima transferência de potência e, assim, garantir que a mesma atinja sua capacidade máxima (BRITO et al., 2012).

Entre os controladores de carga comerciais, os mais simples são do tipo liga-deligia (*on-off*). Este controlador aplica diretamente a tensão e a corrente do painel sobre a bateria, não realizando qualquer tipo de regulação. Para esta situação o painel funciona como uma fonte de corrente limitada pela corrente de curto sob as condições de operação (irradiância e temperatura), e o valor de tensão é estabelecido pela bateria. O controle deste tipo de controlador é baseado na tensão instantânea nos terminais da bateria, que é comparada a dois limites. Geralmente para baterias de Chumbo-ácido, a 25°, no limite superior (2,3 a 2,5V por célula) a bateria é desconectada do arranjo por considerar que neste ponto ela está completamente carregada. Já no limite inferior (1,9 a 2,1V por célula), a carga é desconectada da bateria pois neste ponto considera-se que a bateria esteja descarregada na máxima profundidade (PINHO; GALDINO, 2014).

Para realizar a especificação dos controladores de carga deve-se obter os parâmetros

das características elétricas do painel fotovoltaico e das cargas, além das curvas características das baterias, como as de carga e descarga por exemplo. Em nosso país, normalmente são encontrados controladores de carga com correntes até 60A para operar em bancos de baterias com tensões de 12V, 24V e 48V.

Vê-se na Fig. 15 a representação de SFA e seus principais componentes.

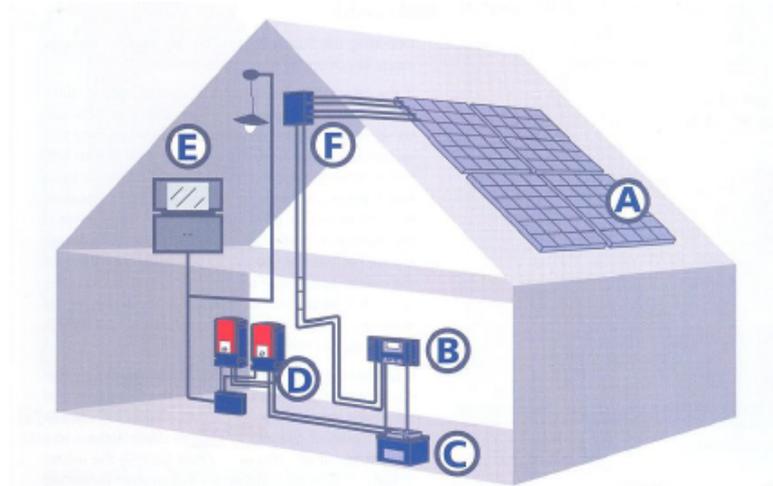


Figura 15 – Esquema de um SFA domiciliar. A-painel fotovoltaico; B-controlador de carga; C-banco de baterias; D-inversores; E- cargas *c.a.*; F-caixa de conexão
Fonte:(PINHO; GALDINO, 2014)

2.5 Inversores

O inversor é um equipamento elétrico que transforma a energia oriunda dos painéis fotovoltaicos de corrente contínua para corrente alternada. Esses inversores possuem fatores limitantes em relação à perda de energia durante a transformação de *c.c* para *c.a* e quanto à forma de onda da tensão em sua saída.

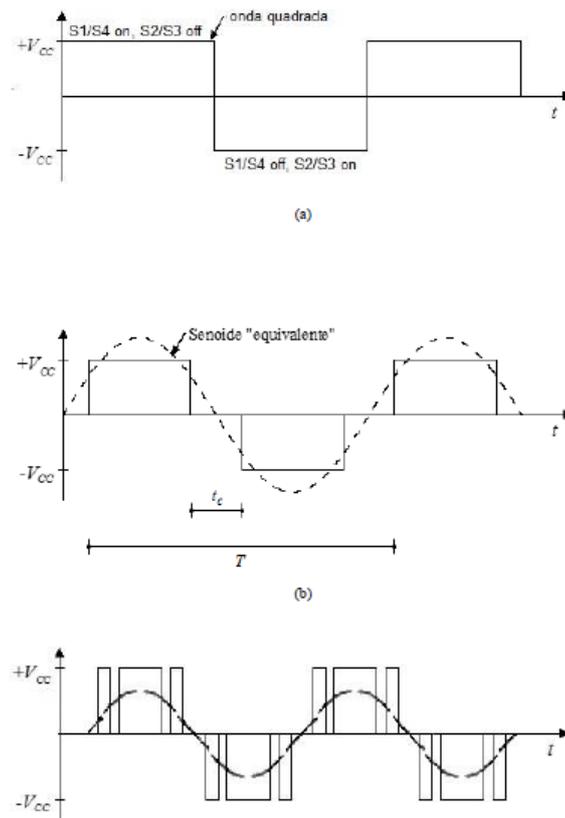


Figura 16 – Formas de onda na saída de um conversor *c.c – c.a* de ponte completa: a) onda quadrada, b) onda quadrada modificada, c) 3 pulsos. Fonte:(PINHO; GALDINO, 2014)

As ondas apresentadas na figura 16, possuem diferentes aspectos:

- Onda Quadrada: simples, não se aplica ao uso de motores, baixa eficiência e alta distorção harmônica;
- Onda Senoidal Modificada: inversor de baixo custo, se aplica em alguns motores, maior eficiência e média distorção harmônica. Para aplicações domésticas é eficiente, comum no mercado;
- Onda Senoidal Pura: mais caros, alta eficiência, se aplica em motores, possuem baixa distorção harmônica e não geram ruídos.

Em geral, os inversores disponíveis no mercado trabalham em uma faixa de tensão de entrada variando entre 12V, 24V, 36V e 48V.

Podemos classificar os inversores de acordo com o princípio de operação no qual serão aplicados. Em geral, os inversores podem ser divididos em dois grandes grupos: os comutados pela rede (comutação natural) e os auto comutados (comutação forçada) (PINHO; GALDINO, 2014). Abaixo, na figura 17 vê-se uma classificação dos inversores por princípio de operação:

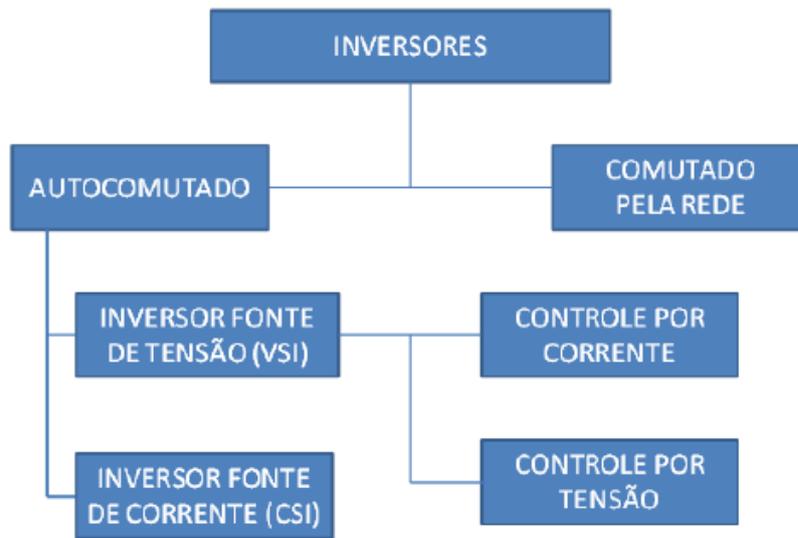


Figura 17 – Classificação dos inversores de acordo com o princípio de funcionamento.
 Fonte:(PINHO; GALDINO, 2014)

2.5.1 Conversores $c.c - c.a$

A energia elétrica gerada pelos módulos solares é contínua e, em geral, a maioria das cargas serão alimentadas por corrente alternada. Por isso é necessário o uso do inversor, ou conversor $c.c - c.a$.

Sua utilização tem por finalidade a obtenção de uma tensão em corrente alternada com suas características próprias. Entre essas características pode-se citar: o conteúdo de harmônicos, a frequência, a forma de onda, entre outros. Assim, através do uso dos conversores $c.c - c.a$, pode-se alimentar os aparelhos convencionais com tensão de 127 *Volts* ou 220 *Volts*.

Existem inversores monofásicos e trifásicos. Os inversores monofásicos podem ser do tipo meia ponte (*half bridge*) e os trifásicos do tipo ponte completa (*full bridge*), também conhecido como ponte H (*H bridge inverter*). A figura 18 traz uma representação do esquema desses conversores. As chaves S1 e S2 são representadas genericamente e representam um dispositivo semicondutor responsável pelo chaveamento do sinal de entrada. A inversão da polaridade do sinal é oriunda desse chaveamento alternado das chaves S1 e S2 numa frequência fixa, que pode ser, por exemplo, a frequência da rede elétrica (60Hz). O resultado é uma tensão alternada sobre a carga alimentada, e a forma de onda desse tipo de conversor (meia ponte) é uma onda quadrada, que varia de $-V_{cc}/2$ a $V_{cc}/2$ em 60Hz.

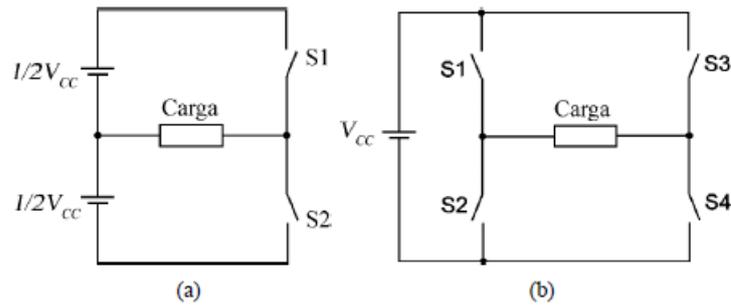


Figura 18 – Inversor de (a) meia ponte e (b) ponte completa monofásica. Fonte:(POMILIO; PAREDES; DECKMANN, 2013)

Já a topologia apresentada para o inversor de ponte completa, é utilizado 4 chaves que são acionadas aos pares e de forma alternada e sincronizada (S1 e S4, S2 e S3) em uma dada frequência (ex: 60Hz). Para um mesma tensão de entrada, o conversor de ponte completa produz uma saída com o dobro da amplitude do conversor de meia ponte, variando de $-V_{cc}$ a $+V_{cc}$. Esse sinal de saída será novamente uma onda quadrada (PINHO; GALDINO, 2014).

Caso se utilize um diferente esquema de chaveamento, onde os pares de chaves sejam acionados não simultaneamente, mas defasados entre si por um determinado ângulo, provoca certos cancelamentos de tensão em determinados intervalos de ciclo, resultando na saída do conversor uma onda quadrada modificada. Nesse caso a tensão RMS de saída pode ser controlada através do ângulo de defasagem no disparo dos chaveamentos e a forma de onda apresenta uma menor distorção harmônica (THD), cerca de 30%, e assim a forma de onda se aproxima mais de uma senoide (PINHO; GALDINO, 2014).

Esses inversores, onda quadrada e onda quadrada modificada, apresentam alto nível de distorção harmônica em sua saída. Para atenuar esses harmônicos pode-se usar filtros, mas são componentes caros, complexos e volumosos, normalmente consomem muita potência, prejudicando a eficiência do inversor. Os inversores com esse tipo de onda são indicados em SFA que alimentam cargas consideradas não críticas(PINHO; GALDINO, 2014).

Hoje em dia, nos conversores *c.c-c.a* de inversores modernos, é utilizada a estratégia de controle PWM, que consiste no acionamento dos dispositivos de chaveamento a uma frequência constante (dezenas ou centenas de kHz), mas com um ciclo de trabalho que varia durante o semiciclo, de forma proporcional ao valor instantâneo de um sinal de referência (PINHO; GALDINO, 2014).

Abaixo, na figura 19 vemos a implementação de uma das estratégias de PWM, chamada de chaveamento bipolar.

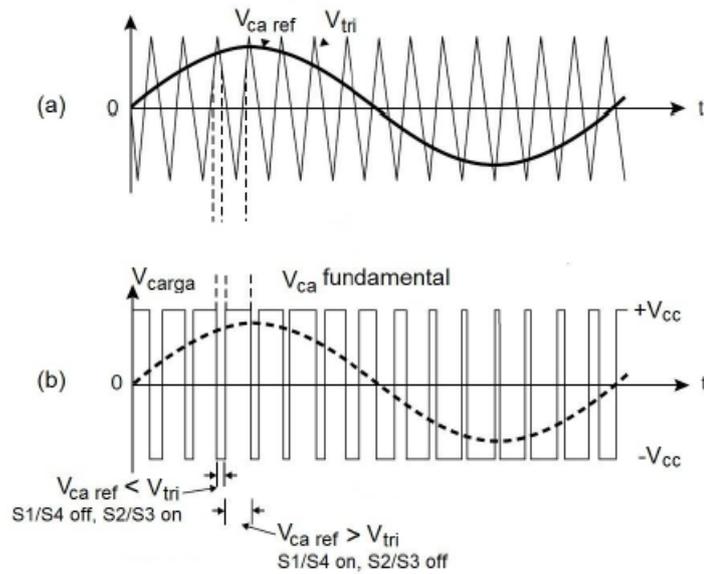


Figura 19 – Estratégia de controle PWM para um conversor *c.c – c.a* - tensões de controle $V_{ref,ca}$ e V_{tri} (a) e tensão na saída V_{carga} (b). Fonte:(PINHO; GALDINO, 2014)

Os inversores PWM apresentam baixa THD, elevada eficiência e ótima regulação de tensão de saída. São altamente indicados para equipamentos eletrônicos sensíveis. Possuem um custo mais elevado quando comparados com inversores de onda quadrada.

A Fig. 20 traz a representação de uma ponte trifásica completa de um conversor *c.c – c.a*, nele vê-se que a tensão de entrada é do tipo contínua e a saída oferecida pelo inversor é do tipo alternada. Isso ocorre graças ao processo de chaveamento realizado pelos transistores do sistema.

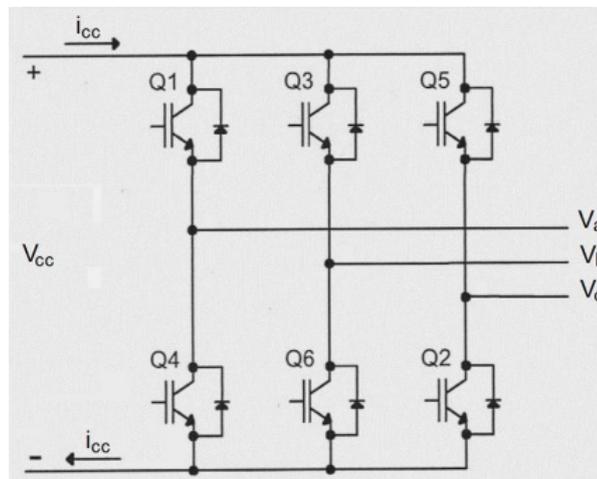


Figura 20 – Ponte trifásica. Fonte:(PINHO; GALDINO, 2014)

A Fig. 21 apresenta uma estratégia de chaveamento PWM trifásica baseada na comparação de 3 formas de onda de referência defasadas de 120° entre si com um sinal triangular que controla o acionamento dos IGBTs.

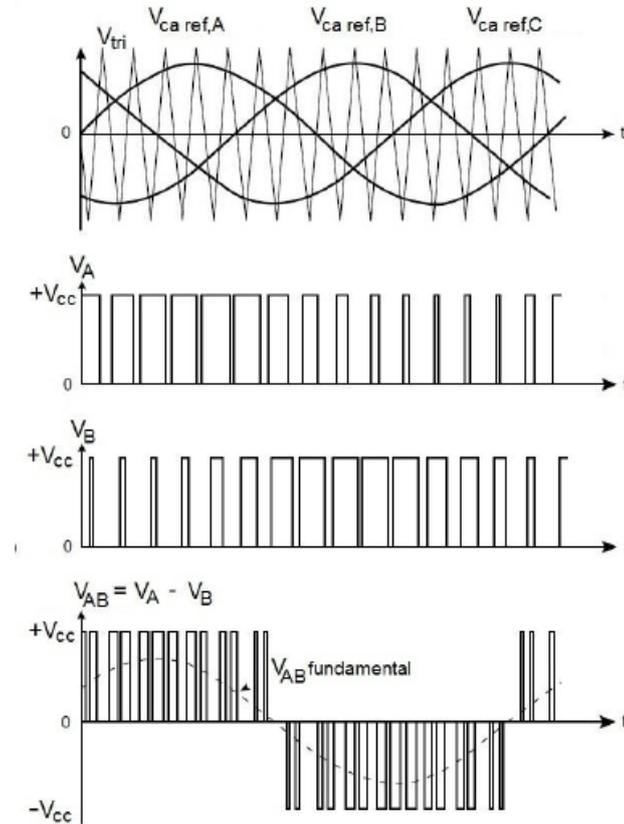


Figura 21 – Estratégia de controle do chaveamento para PWM trifásico.
Fonte:(PEREIRA, 2012)

Com relação aos critérios de qualidade de um inversor em sistemas fotovoltaicos, deve-se levar em consideração as seguintes características:

- Alta eficiência de conversão;
- Alta confiabilidade e baixa manutenção;
- Boa regulação na tensão de saída;
- Operação em uma faixa ampla de tensão de entrada;
- Forma de onda senoidal com baixo conteúdo harmônico;
- Tolerância aos surtos de partida das cargas a serem alimentadas;
- Baixa emissão de ruído audível;

Abaixo, na figura 22, pode-se ver a imagem de um inversor comercial:



Figura 22 – Inversor Senoidal.

2.5.2 Conversores $c.c - c.c$

Em sistemas onde as cargas são de corrente contínua, o uso de inversores se faz desnecessário porque, como citado anteriormente, a energia entregue pelos módulos é contínua, caso necessite diferentes níveis de corrente contínua pode-se utilizar conversores $c.c - c.c$. Pode-se usar estes inversores para elevar a tensão (conversores *boost*) quanto para abaixar a tensão (conversores *buck*). A transferência de energia se dá através do processo de chaveamento da tensão de entrada, deve-se fazer o controle da frequência de chaveamento e período dos dispositivos semicondutores para se obter a tensão de saída desejada.

Outra aplicação comum dos conversores $c.c - c.c$ é como controlador de carga de baterias a partir da energia gerada pelos módulos fotovoltaicos. Com o seu uso pode-se controlar de forma mais acurada a corrente e tensão que serão aplicadas às baterias e, desta forma, aumentar a vida útil da bateria melhorando a eficiência da transferência de energia do painel para a bateria. Geralmente, os conversores $c.c - c.c$ possuem mecanismos de proteção, garantindo uma operação segura e, em caso de falha, evita que o mesmo sofra algum dano (PINHO; GALDINO, 2014).

3 Estudo de Caso

Por se tratar de um sistema robusto, o projeto contém elementos eletrônicos com um alto valor econômico. A necessidade de realizar um estudo de caso é de vital importância para evitar um dimensionamento mal feito e, desta forma, gastos indevidos e não esperados (PEREIRA, 2012).

Essa etapa do trabalho deve ser feita de forma minuciosa e criteriosa, utilizando os recursos disponíveis para a elaboração de um bom projeto.

A proposta de estudo de caso é a elaboração de um sistema fotovoltaico autônomo que irá alimentar o sistema de iluminação e tomadas para carregamento de celulares e *laptops* dentro de uma praça que será construída futuramente no *campus* do ICEA.

Na Fig. 23 vemos um esquemático da proposta descrita em nosso Estudo de Caso.

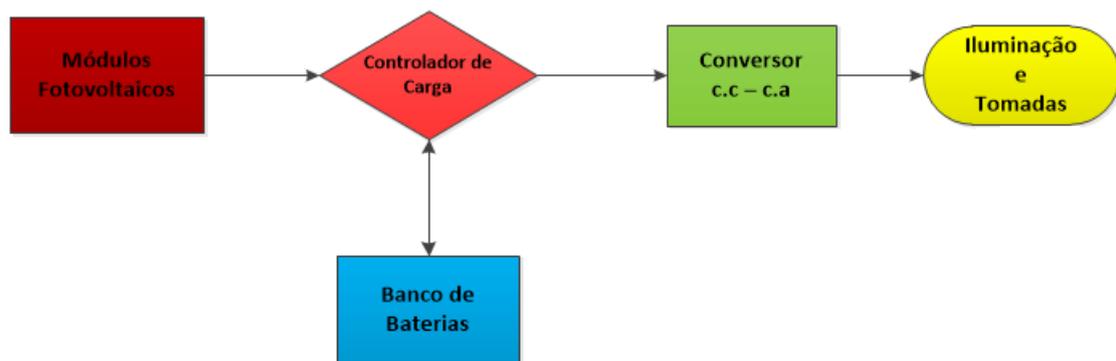


Figura 23 – Esquemático da proposta descrita no Estudo de Caso.

Para alcançar o objetivo da monografia, deve-se seguir algumas etapas. Primeiramente deve-se levantar a quantidade de energia disponível por metro quadrado por dia ($KWh/m^2.dia$), ou horas de sol pleno, da cidade de João Monlevade. Necessita-se definir o local onde será feita a instalação dos painéis fotovoltaicos, lembrando sempre evitar locais que possuam sombreamento. É necessário avaliar o espaço físico disponível em relação à área, orientação e inclinação.

Em relação aos painéis, é sempre recomendado, para a região de Minas Gerais, instalar os painéis orientados para o norte verdadeiro (norte deslocado a 20° do norte magnético, válido para a cidade de João Monlevade) e com a inclinação igual a latitude do local (ENERGIA, 2016).

Para coletar os dados referentes a radiação média mensal da cidade de João Monlevade pode-se utilizar *websites* como o CRESESB - Centro de Referência para Energia

Solar e Eólica Sérgio Brito e SWERA - *Solar and Wind Energy Resource Assessment*. Os dados de João Monlevade, conforme o CRESESB, são mostrados na figura 24:

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
✓	Plano Horizontal	0° N	5,28	5,25	4,78	4,11	3,69	3,47	3,89	4,44	4,11	4,67	4,56	4,86	4,43	1,81
✓	Ângulo igual a latitude	20° N	4,83	5,02	4,86	4,51	4,36	4,27	4,75	5,08	4,28	4,55	4,24	4,41	4,60	,84
✓	Maior média anual	19° N	4,86	5,04	4,87	4,50	4,33	4,24	4,72	5,06	4,28	4,57	4,26	4,44	4,60	,82
✓	Maior mínimo mensal	20° N	4,83	5,02	4,86	4,51	4,36	4,27	4,75	5,08	4,28	4,55	4,24	4,41	4,60	,84

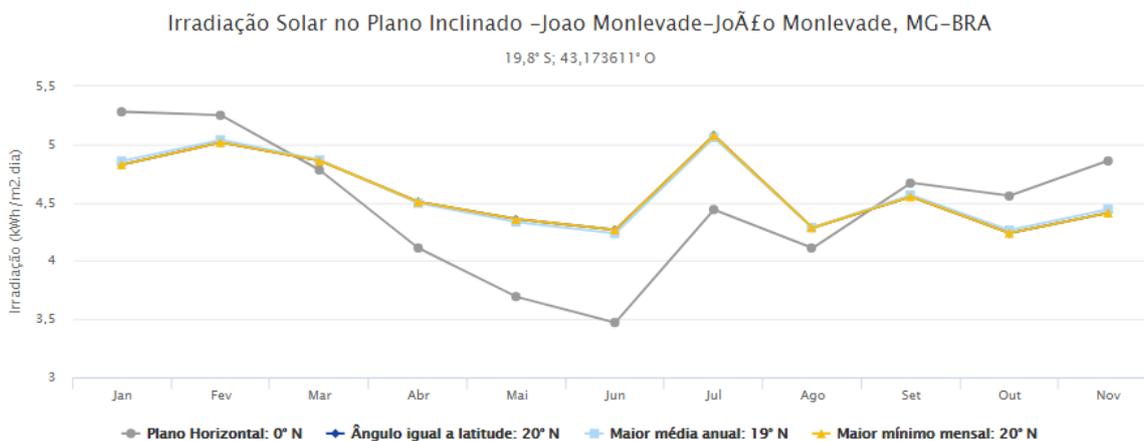


Figura 24 – Radiação diária média mensal para João Monlevade. Fonte: (CRESESB, 2017)

Será utilizado o método do mês crítico para realizar o dimensionamento do sistema proposto. Esse método utiliza o pior valor de radiação médio mensal dentro dos cálculos de dimensionamento e, assim, garante que o sistema funcione normalmente mesmo com o menor valor de horas plena diária (ENERGIA, 2016). O mês crítico com menor irradiação Solar é o mês de Novembro, com uma irradiação solar diária média de 4,24 kWh/m².dia.

3.1 Levantamento de Carga e Consumo de energia

Realizar um levantamento de carga é essencial para o bom dimensionamento do sistema. A tabela abaixo traz de forma simples uma estimativa do levantamento das cargas que serão alimentadas por nosso SFA. Quando usa-se o termo carga, refere-se ao sistema de iluminação e aos aparelhos eletrônicos (*notebooks* e celulares) que serão alimentados.

Como pode-se ver pela tabela 1, há um consumo diário total de aproximadamente 5,27 kW/dia, e mensal de 157,95 kW/mês, isso considerando que os aparelhos celulares e *notebooks* ficam ligados por 3 horas diárias e as lâmpadas 12 horas diárias (de 18:00 horas às 06:00 horas), sendo que por 6 horas as lâmpadas de LED funcionam com total potência (18:00 - 00:00 horas) e nas 6 horas posteriores (00:00 - 06:00 horas), onde o fluxo

de pessoas dentro do *campus* é praticamente nulo, as lâmpadas de LED funcionam com metade da sua potência nominal.

Tabela 1 – Levantamento total do Consumo

Aparelho	Qtd	Tensão(V)	Potência(W)	Uso hrs/dia	Wh/dia	kWh/mês
Celular	3	220	5	3	45	1,35
Notebook	3	220	90	3	810	24,3
Lamp. LED	7	220	70	6	2940	88,2
Lamp. LED	7	220	35	6	1470	44,1
Total					5.265	157,95

3.2 Dimensionamento

Neste projeto será utilizado, como dito anteriormente, o método do mês crítico para realizar o dimensionamento do sistema autônomo. Na cidade de João Monlevade o mês crítico é Novembro com $4,24 \text{ Kwh}/\text{m}^2.\text{dia}$.

Nesta etapa deve-se dimensionar todos os componentes do SFA. Sendo eles:

3.2.1 Banco de Baterias

Com o objetivo de realizar o dimensionamento, deve-se calcular a energia ativa consumida diariamente (C), por isso é necessário levar em conta o consumo diário das cargas em corrente contínua e em corrente alternada (ENERGIA, 2016). Para o estudo de caso em questão só serão levadas em consideração as cargas em corrente alternada.

O cálculo da energia ativa consumida é dado por:

$$C = \left(\frac{C_{cc}}{\eta_{Bat}} \right) + \left(\frac{C_{ca}}{\eta_{bat} \times \eta_{inv}} \right) \quad (3.1)$$

Onde:

- C_{cc} - (Wh/dia) Carga consumida em corrente contínua;
- C_{ca} - (Wh/dia) Carga consumida em corrente alternada;
- η_{bat} - Eficiência Global da Bateria (86%);
- η_{inv} - Eficiência do Inversor (85%).

Para o nosso estudo de caso temos a seguinte equação:

$$\left(\frac{5,27 \text{ kWh}/\text{dia}}{0,85 \times 0,86} \right) = 7,2025 \text{ kWh}/\text{dia} \quad (3.2)$$

Para dimensionar o banco de baterias, deve-se levar em consideração o valor de consumo de carga corrigido e as equações:

$$C_{C20}(Wh) = \frac{C \times dias - de - autonomia}{P_d} \quad (3.3)$$

$$CBI_{C20}(Ah) = \frac{CB_{C20}(Wh)}{V_{sist}} \quad (3.4)$$

Onde:

- $CB_{C20}(Wh)$ = Capacidade em Wh do banco de baterias em descarga de 20h;
- $CBI_{C20}(Ah)$ = Capacidade em Ah do banco de baterias em descarga de 20h; (OBS: a letra "I" refere-se ao índice da corrente)
- dias de autonomia = dias que o banco de bateria irá fornecer energia ao sistema sem a presença do Sol (dias nublados, chuvosos, etc);
- P_d = profundidade de descarga da bateria. Valor máximo que será utilizada a bateria.
- V_{sist} = Tensão do sistema.

Como citado acima, os dias de autonomia são dias em que o banco de bateria irá fornecer energia ao sistema, são dias nublados, sem a presença do Sol ou chuvosos. Em nosso projeto será considerado 3 dias de autonomia.

Em relação à profundidade de descarga da bateria, são considerados como ciclos rasos, ciclos que variam entre 20% a 40% e ciclos profundos, os ciclos de 50% a 80%. Em nosso estudo de caso iremos utilizar um fator de 40% para aumentar a vida útil do banco de baterias.

Para nosso estudo temos:

$$C_{C20}(Wh) = \frac{7,2025kWh/dia \times 3}{0,6} = 36,0465kWh \quad (3.5)$$

$$CBI_{C20}(Ah) = \frac{36,0465kWh}{12} = 3,0039kAh \quad (3.6)$$

Dentro dos tipos de baterias estacionárias disponíveis no mercado, iremos utilizar a Bateria Estacionária 220Ah Moura *Clean* - 12MF220, que custa R\$ 1.199,00 a unidade (MINHACASASOLAR, 2017).

Após determinar a capacidade do banco de baterias, deve-se definir o arranjo série e paralelo do banco de baterias. Para determinar a quantidade de baterias em paralelo:

$$\text{Número máximo de baterias em paralelo} = \frac{CBI_{C20}(Ah)}{CBI_{bat}(Ah)} = \frac{3,0039kAh}{220} = 13,6540 \simeq 14baterias \quad (3.7)$$

Para determinar o número de baterias em série:

$$\text{Número máximo de baterias em série} = \frac{V_{sist}}{V_{bat}} = \frac{12}{12} = 1 \quad (3.8)$$

Na tabela 2 seguem as principais especificações da bateria utilizada conforme o fabricante:

Tabela 2 – Especificações Bateria Estacionária 220Ah Moura *Clean*

Capacidade	220Ah (20hr/1,75Vpe)
I _{cc} (A)	4840
R _{int} (mOhm)	2,5
Tipo de Terminal	L
Peso	57,8Kg
Dimensões	517 x 272 x 246 mm

3.2.2 Gerador Fotovoltaico

Para poder gerar a quantidade de energia ativa que será consumida diariamente é necessário levantar a potência do gerador (P_{ger}) que atenderá essa demanda. A equação que define a potência necessária ao gerador é dada por:

$$P_{ger} = \left(\frac{C}{H_{sp} \times Red_1 \times Red_2} \right) \quad (3.9)$$

Onde:

- C - (Wh/dia) Carga Consumida;
- H_{sp} - (horas/dia) Horas de sol pleno;
- Red_1 - rendimento do sistema (75%);
- Red_2 - rendimento agregado dos componentes individualmente (90%);

Para o estudo de caso em questão:

$$P_{ger} = \left(\frac{5,27k}{4,24 \times 0,75 \times 0,9} \right) = 1,8396kWp \quad (3.10)$$

Com estes dados em mãos deve-se fazer a seleção dos painéis que serão utilizados. Deve-se escolher em função da disponibilidade de mercado, assistência técnica, reconhecimento Inmetro e preço (ENERGIA, 2016). Será utilizado o painel de 320 Wp Canadian Solar - CS6U-320P.

Na tabela 3 seguem-se algumas especificações deste painel:

Tabela 3 – Especificações painel de 320 Wp Canadian Solar - CS6U-320P

Potência máxima (Pmax)	320Wp
Tolerância	0% a +5%
Tensão em circuito aberto (Voc)	45,3V
Tensão de Pico (Vmpp)	36,8V
Corrente de curto-circuito (Isc)	9,26A
Corrente de Pico (Impp)	8,69A
Voltagem máxima do sistema	1500V
Tipo de célula	Silício Policristalino
Dimensões do painel	1960 x 992 x 40 mm
Moldura	Alumínio
Peso	22,4Kg

É importante estar atento à tensão de associação dos módulos. A tensão do sistema será de 12V, logo deve-se associar os painéis em paralelo para equilibrar o sistema.

Para definir a quantidade de painéis que serão conectados em paralelos deve-se seguir a seguinte equação:

$$\text{Número de módulos em paralelo} = \left(\frac{P_{ger}}{\text{Número de módulos em série} \times P_{mod}} \right) \quad (3.11)$$

No estudo de caso em questão tem-se:

$$\text{Número de módulos em paralelo} = \left(\frac{1,8396}{1 \times 320} \right) = 5,7488 \simeq 6 \text{ paineis} \quad (3.12)$$

Logo serão utilizados 6 painéis fotovoltaicos da marca Canadian Solar - CS6U-320P em paralelo com o objetivo de abastecer o sistema.

3.2.3 Controlador de Carga

Após definir o gerador, deve-se especificar o controlador de carga que será utilizado no sistema. Para definir o controlador, necessita-se calcular a corrente do lado dos painéis e a corrente do lado das cargas, para isso:

$$\text{Corrente dos paineis} = I_{sc}(A) \times \text{Número de paineis em paralelo} \quad (3.13)$$

Conforme detalhado anteriormente, a corrente de curto circuito do painel Canadian Solar - CS6U-320P é de 9,26A. Logo o controlador de carga deve ser capaz de fornecer uma corrente de:

$$\text{Corrente dos paineis} = 9,26 \times 6 = 55,56A \quad (3.14)$$

Existem controladores de carga convencionais disponíveis no mercado de 60A. O controlador de carga escolhido foi o Controlador de Carga 60A (12V/24V/36V/48V) Mppt - ITRACER IT6415ND, que custa R\$ 3.590,00 a unidade (MINHACASASOLAR, 2017).

Como não existem cargas *c.c* neste sistema, não é necessário realizar o cálculo para este tipo de carga.

Abaixo, na tabela 4 seguem as especificações do controlador de carga escolhido:

Tabela 4 – Especificações Controlador de Carga MPPT - ITRACER IT6415ND

Tensão nominal	12V/24V/36V/48V
Corrente máxima de carga	60A
Tensão solar máxima na entrada	150Vcc
Potência máxima solar na entrada em 12V	800W
Aterramento	Negativo
Consumo próprio	1,4W a 2,2W
Comunicação	RS232, RS485, CAN BUS
Bitola máxima do cabo elétrico	35 mm ²
Dimensões	382 x 231 x 107 mm
Faixa de temperatura ambiente	-25° C + 55° C
Umidade	95% NC
Peso	4,6 Kg
Grau de proteção	IP20
Garantia	01 ano

3.2.4 Inversor

Para realizar a última etapa do dimensionamento deve-se especificar o inversor que será usado. O sistema proposto não possui cargas alimentadas por corrente contínua, e nem será necessário ter diferentes níveis de corrente contínua para alimentar a bateria, logo o uso de um conversor *c.c – c.c* não se faz necessário.

No estudo de caso as cargas são alimentadas em 220V, e a potência total das cargas alimentadas pelo inversor é de 775W, de acordo com a tabela de Consumo. Por questões de segurança, deve-se escolher um inversor com um fator de 10% a mais de potência (ENERGIA, 2016). Para satisfazer o estudo de caso proposto, foi escolhido o inversor de Inversor de 1000W 12V/220V, Onda Senoidal Hayonik, menor inversor comercial encontrado que atende a demanda de potência próxima a de 775W e fornece como tensão de saída 220V (MINHACASASOLAR, 2017). Seu custo é de R\$ 1.159,00 reais.

Deve-se observar que ao conectar o inversor no sistema autônomo ele deve estar em paralelo com a bateria estacionária, logo não se pode conectar o inversor diretamente no controlador de carga (ENERGIA, 2016).

Abaixo segue na tabela 5 as principais especificações do inversor escolhido:

Tabela 5 – Especificações do Inversor de 1000W 12V/220V Onda Senoidal Hayonik

Potência Máxima CA	1000 W
Forma de Onda	Onda senoidal pura
Tensão de entrada (faixa)	11 a 15 Vcc
Frequência de saída	220 Vca RMS +/- 10%
Saída USB	5V/500 mA
Eficiência	80%
Alarme de bateria baixa	Sonoro, 10,5 +/- 0,5 Vcc
Desligamento da saída por baixa tensão	10 +/- 0,5 Vcc
Dimensões	315 x 210 x 90 mm

3.2.5 Levantamento de Materiais e Custo

Após a etapa do dimensionamento, deve-se realizar o levantamento dos materiais e equipamentos que serão utilizados, juntamente com o valor dos mesmos e estimar o custo total do sistema *off – grid* projetado.

Deve-se levar em consideração o custo de mão de obra e horas de trabalho do engenheiro que será responsável pelo projeto. Um engenheiro júnior de projetos, deve ter um salário mensal variando de R\$ 5.120,00 a R\$ 6.481,00 reais, de acordo com (CREA-MG, 2017).

Na tabela 6 pode-se observar o levantamento total do projeto proposto.

Tabela 6 – Levantamento total do projeto

Qtd	Materiais e Equipamentos	Marca	Custo (R\$)
6	Placa Fotovoltaica	Canadian Solar - CS6U-320P	4.290,00
14	Bateria Estacionária	Freedom DF2500	16.786,00
1	Controlador de Carga	ITRACER IT6415ND	3.590,00
1	Inversor	Hayonik	1.159,00
-	Estrutura, Mão de Obra, Projeto	-	3.000,00
Total			28.825,00

3.3 Análise do Dimensionamento

O custo total final do SFA dimensionado foi de R\$ 28.825,00 reais, ou seja, aproximadamente R\$ 30.000,00 reais. Levando em conta todos os componentes que serão utilizados, a hora do engenheiro envolvido, mão de obra e projeto.

4 Protótipo

4.1 Levantamento dos Materiais e Custo do Protótipo

4.1.1 Levantamento dos Materiais

Foi proposto a criação de um protótipo que represente em escala reduzida o sistema fotovoltaico autônomo dimensionado para o *campus*. Abaixo, seguem-se os detalhes do protótipo.

- **Módulo Solar Fotovoltaico:**

O módulo solar fotovoltaico ReneSola de 150W é ideal para sistemas isolados com baterias (*off-grid*) com um controlador de carga PWM adequado(SOLAR,2017, 2017).

O painel solar, modelo JC150M-12/GB, possui estrutura em alumínio anodizado. Pesa 11,6Kg e tem dimensões de 1485 x 668 x 35 (mm) (Figura 8). Este módulo fotovoltaico foi certificado pelo INMETRO com nota “A”, apresentando eficiência de 15,12%. As células fotovoltaicas são protegidas por uma resistente camada de vidro temperado a moldura em alumínio e já vem com as furações para fixação. Este módulo solar fotovoltaico produz 150W, 8,06A e 18,6V em corrente contínua em condições ideais.

Tabela 7 – Geração de Energia Diária - ReneSola 150W

Insolação média diária	Watts	Ampéres
4 horas de sol	600	32,24
5 horas de sol (média Brasil)	750	40,30
6 horas de sol	900	48,36
Produção média mensa de energia	18,76 kWh/mês	

Em relação à instalação do painel, deve-se instalá-lo em local ensolarado e sem sombras, orientado para a direção norte, com inclinação de 20°, que é a latitude referente ao estado de Minas Gerais. A fixação deve ser feita em suportes resistentes a fatores externos como: corrosão, exposição ao Sol e a ventos fortes e tempestades. Estes detalhes fazem com que a vida útil do painel seja mais longa.

Especificações Técnicas da Placa Fotovoltaica:

- Potência máxima (P_{max}): 150Wp;
- Tolerância: 0% a +3%;
- Tensão em circuito aberto (V_{oc}): 22,19V;

- Tensão de Pico (V_{mpp}): 18,61V;
- Corrente de curto-circuito (I_{sc}): 8,62A;
- Corrente de Pico (I_{mpp}): 8,06A;
- Voltagem máxima do sistema: 1000V;
- Tipo de célula: Silício Policristalino;
- Dimensões painel: 1485 x 668 x 35 (mm);
- Moldura: Alumínio;
- Peso: 11,6kg.

● **Inversor:**

O inversor utilizado nesse projeto funciona até 300 Wp de potência. Esse inversor está orçado em aproximadamente R\$599,00. O inversor atende as especificações do projeto, isto é, fornecer potência para alimentar as lâmpadas de LED e, também, um *notebook* e um celular.

Segue abaixo algumas especificações do inversor utilizado no protótipo.

- Tensão nominal de entrada: 9,5 V_{CC} a 15,5 V_{CC}
- Tensão de saída: 115 V_{CA} +/-10%
- Potência de saída (uso contínuo): 300 W
- Potência de Surto: 600 W
- Frequência de Saída: 60 +/- 1% Hz
- Forma de onda na saída: Senoidal pura, THD < 4%
- Consumo próprio: Inversor ligado e sem carga: 450 mA Inversor desligado: 25 mA Em espera: 55 mA
- Eficiência máxima: 92%
- Proteções: desligamento automático por baixa ou alta tensão, por sobrecarga ou superaquecimento.
- Dimensões: 213x152x105mm
- Peso: 4,5Kg
- Gabinete: IP20

O inversor com onda senoidal de 300W *MorningStar* conta com dispositivos de desligamento automático e indicadores visuais LED. Caso ocorra um curto-circuito na saída ou se a potência requerida pelo equipamento elétrico exceder a capacidade do inversor ele é automaticamente desligado. O inversor também protege a bateria e aumenta sua vida útil, desligando automaticamente quando a bateria está muito descarregada. Este equipamento possui uma garantia de 2 anos.

- **Controlador de Carga:**

O controlador utilizado no protótipo é do tipo PWM, modelo VS-A controller, que suporta 3 tipos de bateria: *sealed*, gel e *flooded*. O equipamento também possui a opção de controle de temperatura remoto.

Abaixo estão descritas as funções e características do controlador conforme (MINHACASASOLAR, 2017).

- i. Prevenção sobrecargas

O controlador tem a função de regular o fluxo de energia que vai para a bateria e quando a mesma se encontra totalmente carregada, ele deve parar de enviar carga. Se isso não ocorrer pode acontecer algum dano a bateria ou uma explosão da mesma, isso tudo devido a alta temperatura. Para isso não ocorrer deve haver uma diminuição do fluxo de energia que vai para a bateria, trazendo-a para um nível de tensão abaixo do máximo permitido.

O controlador usado no protótipo realiza essa função de regulação essa função por meio da modulação por largura de pulso (PWM). Esse tipo de controle deixa a tensão mais constante em relação aos outros controladores existentes no mercado.

- ii. Bloqueio de corrente inversa

Durante a noite podem ocorrer correntes inversas, ou seja, correntes contrárias ao sentido da corrente que os painéis fotovoltaicos gera. O controlador realiza a função de evitar essas correntes através dos transistores, diodos ou relés.

- iii. Controle de carga x temperatura da bateria

O controlador usado neste projeto liga a saída em situações onde a temperatura é menor do que 55 graus Celsius e desliga a saída em situações onde a temperatura ultrapassa 65 graus Celsius e tem a opção de medição remota.

Existe um sensor no controlador que mede a temperatura e envia um comando para aumentar ou diminuir o fluxo do carregamento. Quando a temperatura esta muito alta, o controlador diminui o carregamento da bateria, e quando ocorre a situação inversa, o controlador aumenta o fluxo de energia, carregando a bateria. Há controladores com sensores remotos e assim realizando medições na bateria à longas distâncias. Mas existem também controladores com sensores de temperatura interno fazendo com que o controlador esteja próximo à bateria.

- iv. Controle de carga x tipo da bateria

Normalmente os controladores possuem a opção de selecionar o tipo de bateria a ser usada. Neste protótipo, o controlador permite selecionar três tipos de

baterias, mas o importante mesmo é nunca usar baterias diferentes das especificadas no manual do fabricante do controlador.

v. Proteções

É comum alguns controladores possuírem proteções contra sobrecarga, curto circuito e polaridade invertida. O controlador usado dentro do protótipo possui proteções contra polaridade invertida, alta temperatura e sobrecarga.

vi. Interface

O controlador possui a IHM - interface homem máquina, onde o usuário pode parametrizar o controlador, tudo isso através do *display* de LCD que vem acoplado ao equipamento. No *display* é possível ver o status de carregamento da bateria, a potência ativa da carga, temperatura, tensão e corrente na bateria, ou seja, toda a comunicação necessária para o controle. No *display* também é indicado se é dia ou noite.

• **Bateria:**

Para armazenar a energia oriunda dos painéis fotovoltaicos é necessário utilizar baterias. A bateria escolhida para compor o protótipo foi bateria estacionária da Bosh 65 Ah - 12V. A Bosh é uma marca confiável com experiência no mercado. Há uma limitação física quanto à energia que a bateria fornece, logo quanto mais horas a bateria tiver para fornecer energia, mais energia ela será capaz de fornecer. Mas este problema não é comum pois raras vezes existe uma demanda concentrada de consumo.

Abaixo, seguem as especificações da bateria utilizado no protótipo.

Tabela 8 – Especificações da Bateria Bosh

Capacidade de carga	Tempo (h)	Corrente (A)
C-10	10	54
C-20	20	60
C-100	100	65

• **Carga:**

As cargas utilizadas no protótipo foram: lâmpada LED de 9W, refletor LED de 10W, *notebook* e um celular.

• **Cabos e Conexões:**

Em sistemas solares não se pode usar cabos comuns, os cabos que são utilizados em sistemas solares possuem uma camada que protege contra raios solares, e normalmente estes cabos sempre estão em exposição ao Sol. Os conectores utilizados na construção do protótipo são do tipo MC4 e a estrutura utilizada para fixar os componentes do protótipo foi de MDF.

4.1.2 Custo do Protótipo

De forma resumida, segue-se abaixo, na tabela 9, os equipamentos utilizados para construção do protótipo e o custo do mesmo. O custo total do protótipo foi de R\$ 3.460,10 reais. Na figura 25, tem-se a imagem do protótipo construído para atender a proposta deste projeto.

Tabela 9 – Custo e Componentes utilizados no protótipo

Orçamento	
Equipamentos	Custo
Painel Solar ReneSola JC150M-12/Gb (150 Wp)	397,00
2 Baterias Estacionárias P5 Bosh 65 Ah - 12V	958,00
Inversor de Frequência SureSine (MorningStar) 300W	599,00
Controlador de Carga ViewStar AU 30A	599,00
Lâmpada LED 9W	14,60
Refletor LED 10W	42,50
Estrutura, Suporte, Cabos	50,00
Mão de Obra (Engenheiro Júnior) 20h	800,00
TOTAL	3460,10



Figura 25 – Protótipo do sistema *off-grid* proposto.

4.2 Discussão e Análise dos Resultados

Antes de realizar uma análise dos resultados coletados dentro do laboratório deve-se levar em consideração os problemas na qualidade da energia. Esses problemas estão relacionados principalmente a sensibilidade e vulnerabilidade dos equipamentos envolvidos (GALHARDO; PINHO, 2004).

Entre os problemas de qualidade de energia presentes em sistemas renováveis de pequeno porte destacam-se:

- **Harmônicos**

Correntes geradas por cargas não-lineares possuem conteúdo harmônico, e estas influenciam na tensão de alimentação, introduzindo componentes harmônicos na tensão. A influência de harmônicos é maior em sistemas de geração de energia de pequeno porte porque eles possuem baixa capacidade de curto-circuito, onde a demanda é próxima à potência de suprimento do sistema. Em várias aplicações a alimentação é feita por inversores de onda não senoidal, como de onda quadrada e quadrada modificada, nos quais a tensão de alimentação já possui uma alta THD - Distorção Harmônica Total (GOMES, 2015).

Em relação aos níveis de tensão disponibilizados aos consumidores, existem diferentes faixas de valores dependendo se o consumidor é atendido em alta, média ou baixa tensão. Qualquer valor que esteja fora da faixa estabelecida são chamados de sobretensões ou subtensões e podem ter curta duração (< 1 minuto) ou longa duração (> 1 minuto).

Distorções harmônicas na tensão e na corrente são devidas à presença de frequências harmônicas junto à onda fundamental. Harmônicos de ordem ímpar são mais significativos e provocam as distorções das ondas. Os harmônicos surgem devido ao acionamento de cargas não lineares e, no caso de nosso sistema que possui frequência fundamental de 60Hz, existem harmônicos de frequências múltiplas da fundamental (180Hz, 300Hz, 420Hz, 540H, etc). Harmônicos pares não são considerados pois apresentam amplitudes desprezíveis (JUNIOR et al., 2010).

Quando a amplitude das frequências múltiplas é medida, é estabelecido uma relação percentual destas amplitudes em relação à fundamental. Assim consegue-se a influência individual de cada harmônico e seu conjunto representa a THD, que pode ser calculada por:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\text{inf}} Y_h^2}}{Y_1} \quad (4.1)$$

Onde Y é um vetor que representa um sinal distorcido, relacionando a quantidade de harmônicos e a intensidade da corrente fundamental para informar a influência das correntes harmônicas da carga não-linear.

A influência da THD sobre o fator de potência é dado por:

$$FFP = \frac{\cos\phi}{\sqrt{1 + THD^2}} \quad (4.2)$$

Onde $\cos\phi$ é o ângulo entre a corrente e a tensão. E a corrente pode ser demonstrada por:

$$I_{total} = I_{fundamental} * \sqrt{1 + THD^2} \quad (4.3)$$

Nesta equação pode-se ver a influência da THD sobre a corrente total, pois a mesma multiplica a corrente fundamental (GOMES, 2015).

A THD pode ser vista em relação à corrente (THD_i) ou a tensão (THD_v), conforme:

$$THD_i = \frac{\sqrt{I_{ef2} + I_{ef3} + I_{ef4} + \dots + I_{efn}}}{I_{ef1}} \quad (4.4)$$

$$THD_v = \frac{\sqrt{V_{ef2} + V_{ef3} + V_{ef4} + \dots + V_{efn}}}{V_{ef1}} \quad (4.5)$$

Os dispositivos eletrônicos são as principais fontes de distorção de onda de corrente e isso porque fazem uso de componentes a base de semicondutores como transistores e diodos. Esses componentes são não lineares e levam em consideração a distorção das ondas de corrente e tensão em relação a senoide original (GOMES, 2015).

- **Interrupções no fornecimento**

Dependendo da forma como foi projetado o sistema, ele pode atender a demanda requerida por apenas um determinado período do dia e é utilizado até que ocorra o corte do fornecimento pelo inversor, devido à queda de tensão do banco de baterias. Isso torna a geração renovável insuficiente para recarregar os bancos de baterias, isso tudo porque a energia demandada pela carga varia conforme mudanças de clima (dias chuvosos, ventos fortes, etc) ou dias atípicos, onde haja um maior consumo do que o previsto. Devido à fatores como esses citados, sistemas renováveis de pequeno porte estão expostos a interrupção do fornecimento de energia elétrica às cargas (GOMES, 2015).

- **Desequilíbrios do sistema**

Os desequilíbrios de tensão existentes são muitas vezes devido à natureza das cargas a serem alimentadas. A maior parte das cargas alimentadas por sistemas renováveis

de pequeno porte são monofásicas ou bifásicas e com características não-lineares (aparelhos de TV, *notebooks*, celulares, iluminação fluorescente). Mesmo havendo um equilíbrio razoável das cargas nas fases do sistema, existirá correntes com conteúdo harmônico no condutor neutro (GOMES, 2015).

- **Variação do valor RMS da tensão de saída do inversor**

A tensão de saída dos inversores usados em sistemas de pequeno porte depende do valor de tensão de saída instantânea do banco de baterias. Com um menor consumo, há um decaimento da tensão do banco e a tensão RMS de saída tende a diminuir, ou seja, a tensão efetiva diminui, diminuindo a eficiência do sistema. Quando um inversor não possui um sistema de regulação de saída, ele pode estar sendo prejudicial à vida útil da carga alimentada, isso tudo devido as variações de tensão indesejáveis (GOMES, 2015).

Foram realizados testes para diferentes situações, aproximando-se de cenários mais reais possíveis. Primeiramente foi feito um ensaio com o sistema operando a vazio, depois com diferentes cargas, sendo elas: lâmpadas LED, *notebook*, carregador de celular e por último o sistema operando com um *notebook* e celular juntos.

Para a coleta dos dados foi utilizado um Osciloscópio digital TEKTRONIX modelo TPS2012, que possui o *software* TPS2PWR1 específico para análise de medidas de potência.

Os parâmetros em análise são os relativos a qualidade de energia elétrica (Distorção Harmônica Total da Tensão - THD_v , Distorção Harmônica Total da Corrente - THD_i , tensão e frequência).

Abaixo seguem os cenários e os principais resultados obtidos:

- Sistema Operando a Vazio**

Na figura 26 pode-se ver a forma de onda da tensão fornecida pelo osciloscópio para o teste à vazio.

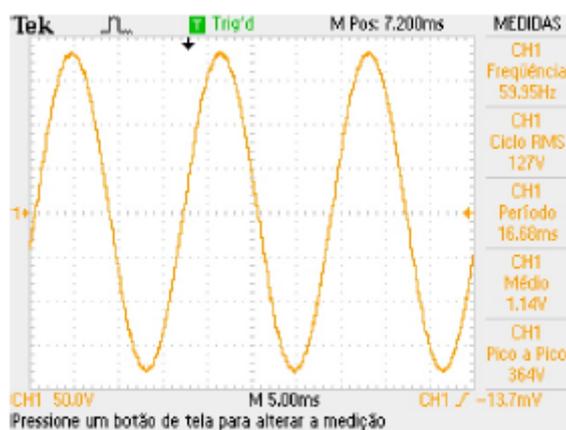


Figura 26 – Componente Fundamental da Tensão.

Abaixo, na Tabela (10), são apresentados os dados relativos a TDH para tensão com o sistema operando a vazio. São ilustradas as componentes harmônicas fundamental, 3^a, 5^a, 7^a, 9^a e 11^a.

Tabela 10 – THD_v para sistema a vazio

Frequência [Hz]	THD_v [%]
60	1,00
180	1,10
300	1,11
420	1,10
540	1,08
660	1,07

No teste à vazio pode-se coletar importantes informações sobre o inversor utilizado no protótipo. De acordo com as especificações fornecidas pelo fabricante, este inversor fornece uma onda em sua saída do tipo senoidal pura e a componente fundamental da tensão está de acordo com as especificações do fabricante. O inversor entrega uma onda senoidal com THD de 1,10%. Este valor obedece a especificação de THD menor que 4%, isso com componentes harmônicos de elevada ordem e com baixas amplitudes.

ii. Lâmpadas de LED

As lâmpadas de LED, assim como celular e notebooks são cargas não lineares e geram harmônicos na rede. Isso devido esses componentes possuírem em sua composição conversores *c.c-c.a*, geralmente do tipo de tensão controlada, dando ao componente uma característica mais capacitiva.

A forma de onda da corrente e da tensão para cargas capacitivas, como uma lâmpada de LED, é distorcida e não apresenta um perfil senoidal puro.

A figura 27 apresenta o perfil da tensão e corrente.

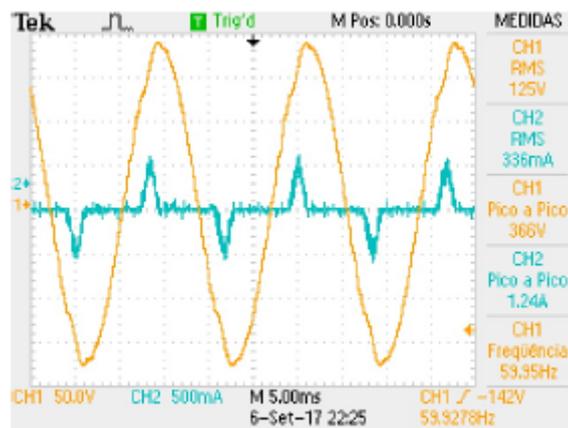


Figura 27 – Perfil de tensão e corrente para lâmpadas de LED

Pode-se ver pela Tabela (11) um aumento de amplitude nas harmônicas de ordem superiores. Esses tipos de cargas, analisando a tabela, possuem grandes taxas de distorção na corrente, devido aos conversores presente e mencionados anteriormente.

Tabela 11 – THD_v e THD_i para sistema com lâmpadas de LED como carga

Frequência [Hz]	THD_v [%]	THD_i [V]
60	1,00	1,00
180	1,28	0,79
300	1,28	0,74
420	1,28	0,71
540	1,28	0,66
660	1,29	0,73

De acordo com a Figura 28, percebe-se que a duração do pico de corrente é devido ao elemento capacitor presente nos conversores encontrados nesse tipo de carga. A corrente tem pequena duração no ciclo e surge como um pico que rapidamente decai, isso devido a tensão do capacitor, nesse momento, ser equivalente à tensão da rede. Seu surgimento é apenas durante o momento de carga do capacitor.

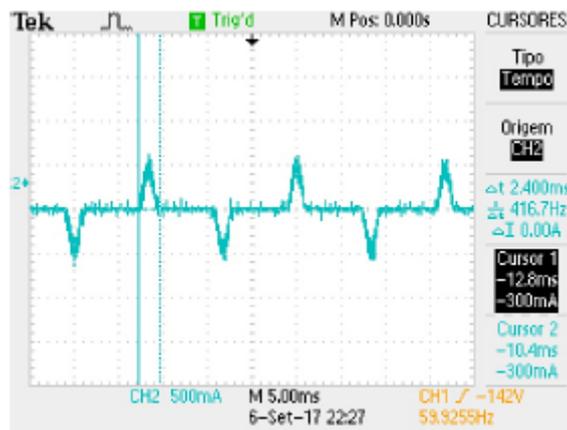


Figura 28 – Amplitude do pico de corrente para lâmpadas de LED.

O osciloscópio coletou um valor de 2,400 ms, que ao ser convertido para graus elétricos, equivale a 25,00°, significando que durante um semiciclo de 180°, a corrente circula pela fonte somente em 25,00° e com um valor de pico grande se comparado ao valor rms da mesma.

Quando comparado o valor dos componentes harmônicos presentes na corrente, percebe-se que o terceiro harmônico tem amplitude maior que o fundamental e o quinto, evidenciando a distorção harmônica. Já o sétimo harmônico tem valores aproximadamente iguais ao fundamental, ou seja, a corrente total é composta basicamente por componentes harmônicos.

iii. Celular

Na Figura 29 apresenta-se o comportamento da corrente e a tensão para este tipo de carga. A corrente total é formada em sua maior parte por componentes harmônicos.

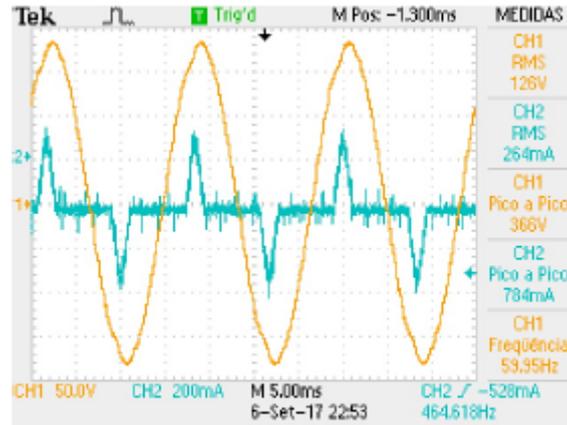


Figura 29 – Perfil de corrente e tensão para celular como carga do sistema.

A carga apresentou um perfil não senoidal de corrente e componentes harmônicos significativos de ordem elevada. Observa-se a diminuição do terceiro harmônico, isso devido à presença de um transformador antes do conversor, que atua como um filtro e, dependendo de sua eficiência, diminui a amplitude do terceiro harmônico. Os resultados obtidos foram semelhantes aos resultados das lâmpadas de LED, e podem ser vistos pela tabela 12.

Tabela 12 – THD_v e THD_i para sistema com celular como carga

Frequência [Hz]	THD_v [%]	THD_i [%]
60	1,00	1,00
180	0,23	0,57
300	0,11	0,67
420	0,23	0,70
540	0,23	0,61
660	0,23	0,65

iv. Notebook

Na Figura 30 vê-se a onda obtida do teste. A forma de onda da corrente para esse cenário não é uma onda senoidal pura, mas pode-se perceber que a distorção diminuiu consideravelmente quando comparado com as duas cargas anteriores.

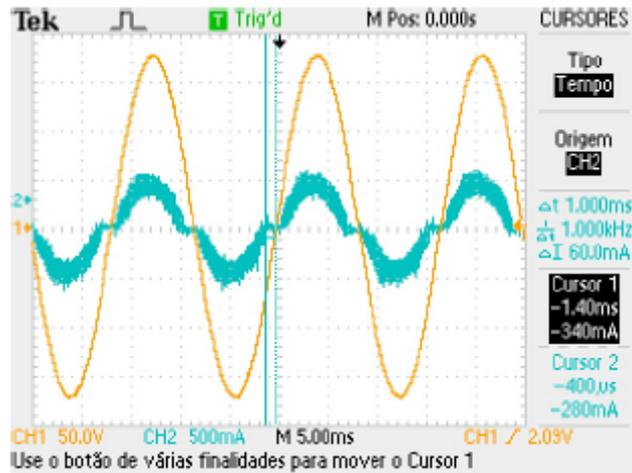


Figura 30 – Perfil de corrente e tensão para *notebook* como carga.

Na tabela 13 são mostrados os resultados obtidos. As amplitudes dos harmônicos continuam consideráveis, entretanto diminuíram em relação ao casos anteriores. Pode-se atribuir essa diminuição ao conjunto transformador e a técnica de modulação aplicada na fonte do *notebook*.

Tabela 13 – THD_v e THD_i para sistema com *notebook* como carga

Frequência [Hz]	THD_v [%]	THD_i [%]
60	1,00	1,00
180	0,81	0,30
300	0,18	0,29
420	0,18	0,30
540	0,18	0,29
660	0,18	0,29

As fontes utilizadas em *notebooks* são fontes chaveadas, onde aplica-se uma técnica de modulação com o objetivo de deixar o mais estável possível a tensão fornecida pela fonte ao *notebook*. O chaveamento de transistores em alta frequência permite um controle mais fino do sistema. A presença do transformador contribui para a diminuição dos componentes harmônicos em amplitude, tornando a onda de corrente um pouco menos distorcida se comparada a uma onda senoidal.

v. Celular e *Notebook*

Na Figura 31 e na tabela 14 são mostrados os efeitos dos componentes de elevada ordem, principalmente, na onda de corrente, mostrada na cor azul. Os resultados obtidos dentro deste cenário comprovam os efeitos harmônicos na rede de um sistema fotovoltaico isolado.

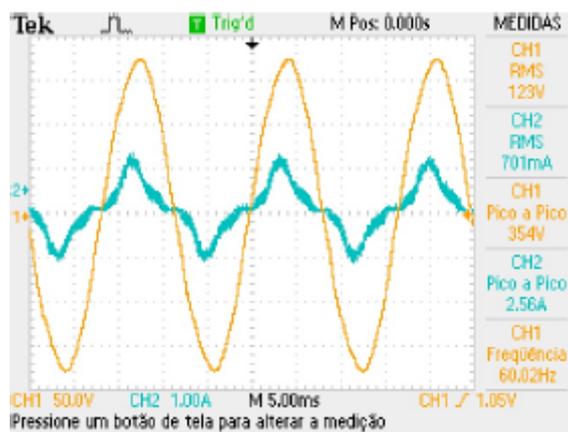


Figura 31 – Perfil de corrente e tensão para *Notebook* e celular como carga.

Tabela 14 – THD_v e THD_i para sistema com celular e *Notebook* como carga.

Frequência [Hz]	THD_v [%]	THD_i [%]
60	1,00	1,00
180	0,25	0,36
300	0,24	0,37
420	0,24	0,37
540	0,24	0,36
660	0,25	0,35

5 Conclusão

A implementação de um sistema *Off-Grid* é indicada para locais de difícil acesso, áreas remotas, lugares onde existe uma inviabilidade de instalação de torres e linhas de transmissão. Mas seu uso não se resume apenas a estas localidades. Hoje em dia, a expansão desse tipo de sistema é notável e já existem praças públicas que utilizam sistema fotovoltaico autônomo para alimentar o circuito de iluminação, por exemplo.

Uma nova praça será construída dentro do Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto e o presente trabalho foi motivado com o intuito de implementar um SFA para alimentar o sistema de iluminação e os pontos de carregamento de aparelhos eletrônicos que poderão ser usados dentro desta praça. Realizou-se um estudo teórico sobre sistemas fotovoltaicos, em especial sistemas *Off-Grid* e seus componentes.

Foi realizado o dimensionamento do SFA para a futura praça e seu custo final ficou em aproximadamente R\$ 30.000,00 reais. Um valor consideravelmente alto quando comparado a outro tipo de sistema que pode ser aplicado para energizar essa praça, como por exemplo à própria rede elétrica tradicional disponível. Uma comparação de valores não foi apresentada nesta monografia, mas o alto custo do sistema fotovoltaico autônomo se deve muito ao alto custo das baterias estacionárias e sua "curta" vida útil, geralmente de 4 a 5 anos.

Com o intuito de demonstrar, em pequena escala, o SFA dimensionado, foi construído um protótipo para realizar os testes e coletar os dados para análise da qualidade da energia entregue pelo mesmo. O protótipo teve um custo total de R\$ 3460,10. Custo relativamente alto devido ao preço dos componentes, mas deve-se salientar que o protótipo não possui finalidade comercial. Foram propostos diferentes cenários para realizar testes e o resultado obtidos atenderam as expectativas, e pode-se observar a não-linearidade das cargas apresentadas, conforme previsto. Os elevados níveis dos componentes harmônicos para as cargas testes demonstraram os problemas de qualidade de energia, assunto de grande pesquisa atualmente no mercado de Engenharia.

O alto custo dos sistemas fotovoltaicos autônomos tende a ser uma situação temporária, pois a cada dia que passa ocorrem avanços tecnológicos na área de Energia Renovável. Avanços na eficiência dos painéis fotovoltaicos, na qualidade da onda de saída dos conversores entre outros. Com esses progressos, a acessibilidade de sistemas considerados caros hoje em dia será maior e, conseqüentemente, seu custo menor.

Um objetivo paralelo deste trabalho é inspirar e incentivar os estudantes de Engenharia Elétrica do presente *campus* a fomentar novas ideias na área de Energia Renovável e, desta forma, continuar contribuindo e agregando mais valores ao conceito de Sustentabilidade.

Referências

- BLOWERS, A. *Planning for a sustainable environment*. [S.l.]: Routledge, 2013.
- BRITO, M. et al. Contribuição ao estudo dos principais algoritmos de extração da máxima potência dos painéis fotovoltaicos. *Eletronica de Potencia*, v. 17, n. 3, p. 592–600, 2012.
- BRITO, M. A. D. et al. Avaliação das principais técnicas para obtenção de mppt de painéis fotovoltaicos. In: IEEE. *Industry Applications (INDUSCON), 2010 9th IEEE/IAS International Conference on*. [S.l.], 2010. p. 1–6.
- CREA-MG. 2017. Disponível em: <<http://www.crea-mg.org.br/>>.
- CRESESB. 2017. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php#localidade_165>. Acesso em: 07/08/2017.
- ENERGIA, S. S. em. *Curso de Projetista de Sistemas Fotovoltaicos*. [S.l.]: SolSist, 2016.
- GALHARDO, M. A. B.; PINHO, J. T. Avaliação da qualidade da energia fornecida por sistemas renováveis isolados de pequeno porte. *Proceedings of the 5th Encontro de Energia no Meio Rural*, SciELO Brasil, 2004.
- GOMES, V. O. Estudo dos impactos da geração alternativa residencial de energia elétrica na rede de distribuição. 2015.
- JUNIOR, J. U. et al. Sistemas fotovoltaicos conectados a redes de distribuição urbanas: sua influência na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade. 2010.
- KATHAIYAN, D. Bringing off-grid electricity to rural villages in india: Opportunities and pitfalls for solar photovoltaics. In: IEEE. *Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2015 IEEE 15th International Conference on*. [S.l.], 2015. p. 1795–1799.
- LANA, L. T. C. et al. Energia solar fotovoltaica: Revisão bibliográfica. *Engenharias Online*, v. 1, n. 2, p. 21–33, 2016.
- MEGAUSINA. 2016. Disponível em: <http://www.em.com.br/app/noticia/economia/2016/02/15/internas_economia,734129/minas-tera-megausina-solar-em-pirapora.shtml>.
- MINHACASASOLAR. 2017. Disponível em: <<https://www.minhacasasolar.com.br/controlador-de-carga>>.
- PEREIRA, A. C. Geração de energia para condomínio utilizando sistema fotovoltaico autônomo-estudo de caso em edifício residencial com seis pavimentos. 2012.
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. *Rio de Janeiro: Cepel-Cresesb*, 2014.
- POMILIO, J. A.; PAREDES, H. K. M.; DECKMANN, S. M. *Eletrônica de Potência para Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica*. [S.l.]: UNICAMP, 2013.

SALAMANCA UNIVERSIDADE POLITECNICA DE MADRI, C. C. e. p. F. C. Universidade de. *Energia Solar Fotovoltaica*. [S.l.]: ONUDI, 2016.

SILVA, W. W. A. G. *Estudo e implementação de um conversor bidirecional como interface na regulação de tensão em barramento cc e carregamento de baterias em um Sistema Nanorrede*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.

SOLAR,2017. 2017. Disponível em: <<http://www.portalsolar.com.br/o-inversor-solar.html>>. Acesso em: 15/08/2017.