

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS  
GERAIS - CAMPUS FORMIGA  
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
IGOR CÉSAR DA SILVA**

**DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE ECONÔMICA DE UM SISTEMA  
FOTOVOLTAICO AUTÔNOMO ATUANDO EM PARALELO COM A REDE DE  
ENERGIA ELÉTRICA NA CIDADE DE FORMIGA-MG**

**FORMIGA – MG**

**2019**

**IGOR CÉSAR DA SILVA**

**DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE ECONÔMICA DE UM SISTEMA  
FOTOVOLTAICO AUTÔNOMO ATUANDO EM PARALELO COM A REDE DE  
ENERGIA ELÉTRICA NA CIDADE DE FORMIGA-MG**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

**Orientador:** Prof Msc. Rafael Vinícius Tayette da Nobrega

**FORMIGA – MG**

**2019**

**IGOR CÉSAR DA SILVA**

**DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE ECONÔMICA DE UM SISTEMA  
FOTOVOLTAICO AUTÔNOMO ATUANDO EM PARALELO COM A REDE DE  
ENERGIA ELÉTRICA NA CIDADE DE FORMIGA-MG**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Avaliado em: 17 de junho de 2019.

Nota: \_\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. MSc. Rafael Vinicius Tayette da Nobrega

---

Profa. MSc. Natália Rodrigues de Melo

---

Prof. Dr. Ricardo Carrasco Carpio

Formiga/MG, 17 de junho de 2019.

## RESUMO

Com o passar dos anos a rede de distribuição de energia elétrica tem aumentado consideravelmente em todo o Brasil, dessa forma, os equipamentos existentes na rede elétrica tornam-se obsoletos para a demanda atual. Com isso, o número de interrupções na rede elétrica tem crescido também, comprometendo assim, a confiabilidade do sistema, principalmente dos consumidores em zonas não urbanas. Com o aumento dos componentes que necessitam de energia elétrica no meio rural, faz-se necessário uma solução para aumentar a confiabilidade do sistema, culminando também em uma maior autonomia do consumidor. Assim, neste trabalho é apresentado o dimensionamento e a análise econômica de um sistema fotovoltaico autônomo atuando em paralelo com a rede de energia elétrica na cidade de Formiga-MG. Primeiramente, realizou-se um estudo sobre os componentes e fatores que fazem parte do sistema fotovoltaico autônomo, e com isso pôde-se dimensionar o mesmo, levando em conta as especificações da unidade consumidora e os valores de irradiação solar da cidade em questão. Após o dimensionamento, calculou-se o tempo de retorno do investimento inicial para implantação do sistema proposto, ressaltando que considerou-se o número de faltas anuais que geram prejuízos ao consumidor, bem como a substituição dos equipamentos ao longo de vinte e cinco anos, que é o tempo de garantia dos painéis fotovoltaicos utilizados. Por fim, comparou-se o sistema proposto com um gerador alternativo a diesel. Além do mais, os resultados obtidos evidenciaram que o sistema fotovoltaico dimensionado atende a premissa inicial de se comportar como um *nobreak* no caso de falta de energia elétrica na unidade consumidora considerada.

**Palavras-chave:** Energias Renováveis. Energias Alternativas. Sistemas Fotovoltaicos. Dimensionamento Fotovoltaico. Análise Econômica.

## ABSTRACT

Over the years the electricity distribution network has increased considerably throughout Brazil, thus, existing equipment in the power grid become obsolete to current demand. In this way, the number of interruptions in the electric network has also increased, thus compromising, the reliability of the system, mainly of the consumers in non-urban zones. Facing the increase of the components that need electric energy in the rural environment, a solution is necessary to increase the reliability of the system, culminating also in a greater autonomy of the consumer. Thus, this work presents the design and economic analysis of an autonomous photovoltaic system operating in parallel with the electric power grid in the city of Formiga-MG. Firstly, a study was carried out on the components and factors that are part of the autonomous photovoltaic system, and with this one can be sized the same, taking into account the specifications of the consumer unit and the values of solar irradiation of the city in question. After the sizing, the time of return of the initial investment for the implementation of the proposed system was calculated, noting that it was considered the number of annual absences that generate losses to the consumer, as well as the replacement of the equipment during twenty-five years, which is the warranty time of the photovoltaic panels used. Finally, the proposed system was compared with an alternative diesel generator. Moreover, the results showed that the photovoltaic system scaled meets the initial premise of behaving as a UPS in case of power outages in the consumer unit considered.

**Keywords:** Renewable Energy. Alternative Energies. Photovoltaic Systems. Photovoltaic System Sizing. Economic Analysis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz Energética Brasileira no ano de 2017. ....	11
Figura 2 – Nivel satisfatório de qualidade (DEC) por UCs em 2017.....	12
Figura 3 – Primeira célula solar fotovoltaica.....	16
Figura 4 – Crescimento da extração e do consumo de energia no mundo.. ....	17
Figura 5 – Maiores produtores de energia fotovoltaica do mundo no ano de 2017... ..	18
Figura 6 – Eficiência dos tipos de células fotovoltaicas.....	20
Figura 7 – Curva I-V de uma célula fotovoltaica, evidenciando suas principais características.....	20
Figura 8 – Profundidade de descarga e temperatura relacionado a vida útil de uma bateria. ....	24
Figura 9 – Esquemático inversor monofásico.....	26
Figura 10 – Sinal de saída de um circuito inversor monofásico. ....	27
Figura 11 – Esquemático de operação de um diodo by-pass.....	28
Figura 12 – Representação esquemática de um sistema fotovoltaico on-grid. ....	31
Figura 13 – Representação esquemática de um sistema fotovoltaico off-grid. ....	32
Figura 14 – Representação esquemática de um sistema fotovoltaico híbrido.....	33
Figura 15 – Curva de demanda de um consumidor. ....	34
Figura 16 – Indicadores de qualidade de energia na cidade de Formiga-MG no ano de 2018. ....	36
Figura 17 – Quadro de transferência automática. ....	45
Figura 18 – Custo de cada componente em relação ao custo total.....	48
Figura 19 – Valor de retorno em relação ao tempo do sistema fotovoltaico dimensionado.....	51

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados técnicos dos módulos fotovoltaicos. ....	22
Tabela 2 – Dados técnicos dos tipos de baterias. ....	23
Tabela 3 – Especificação de controladores de carga. ....	25
Tabela 4 – Latitude do local em função do ângulo de inclinação do módulo fotovoltaico. ....	38
Tabela 5 – Valores das constantes de correção e da temperatura da localidade. ....	39
Tabela 6 – Valores dos parâmetros de operação nominal da bateria. ....	40
Tabela 7 – Valores dos parâmetros de operação nominal do painel fotovoltaico. ....	42
Tabela 8 – Valores dos parâmetros na condição STC do painel fotovoltaico. ....	43
Tabela 9 – Parâmetros referentes ao inversor de frequência. ....	44
Tabela 10 – Parâmetros do quadro de transferência automática. ....	45
Tabela 11 – Levantamento do custo de mão de obra. ....	47
Tabela 12 – Valores dos componentes e da mão de obra. ....	48
Tabela 13 – Fluxo de caixa do sistema. ....	50
Tabela 14 – Parâmetros referentes ao gerador a diesel. ....	52

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

CV – Cavalo-vapor

CEPEL – Centro de Pesquisas de Engenharia Elétrica

DEC – Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora

DIC – Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora

DICRI – Duração da Interrupção Individual ocorrida em dia crítico por Unidade Consumidora

DMIC – Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora

DPS – Dispositivo de Proteção contra Surto

FEC – Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora

FIC – Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

Imp – Corrente para Máxima Potência Nominal

Isc – Corrente de Curto Circuito

kW – Quilowatt

kWh – Quilowatt-hora

NBR – Norma Brasileira

NOCT – Condições Nominais de Operação da Célula Fotovoltaica

Pmp – Máxima Potência Nominal

PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

PWM – Modulação por Largura de Pulso

SEB – Sistema Elétrico Brasileiro

SFV – Sistema Fotovoltaico

STC – Condições de Teste da Célula Fotovoltaica

UCs – Unidades Consumidoras

Vmp – Tensão para Máxima Potência Nominal

Voc – Tensão de Circuito Aberto

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	10
1.1	Problema.....	12
1.2	Justificativa .....	13
1.3	Hipótese.....	13
1.4	Objetivo Geral.....	13
1.5	Objetivos Específicos.....	14
1.6	Estrutura do Trabalho .....	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1	História da Energia Solar Fotovoltaica.....	15
2.2	Potencial Energético no Brasil e no Mundo .....	17
2.3	Componentes dos Sistemas .....	19
2.3.1	Células Fotovoltaicas.....	19
2.3.2	Painel Solar .....	21
2.3.3	Baterias.....	22
2.3.4	Controlador de Carga .....	24
2.3.5	Inversor de Frequência.....	25
2.3.6	Proteção do Sistema Fotovoltaico .....	28
2.3.7	Medidor Bidirecional Fotovoltaico .....	29
2.4	Princípio de Funcionamento .....	30
2.4.1	Sistema Fotovoltaico <i>on-grid</i> .....	30
2.4.2	Sistema Fotovoltaico <i>off-grid</i> .....	31
2.4.3	Sistema Fotovoltaico híbrido.....	32
2.5	Demanda de Energia Elétrica .....	34
2.6	Falta de Energia e Indicadores de Qualidade.....	35
3	METODOLOGIA DESENVOLVIDA.....	38
3.1	Considerações Preliminares .....	38
3.2	Dimensionamento do Sistema .....	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
4.1	Investimento Total para Implementação do Sistema .....	47
4.2	Tempo de Retorno do Investimento inicial .....	49
4.3	Comparação com Outro Gerador Alternativo .....	51
5	CONCLUSÃO.....	54
5.1	Trabalhos Futuros.....	55
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	56

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (2008), o consumo de energia é um dos principais indicadores do desenvolvimento econômico e do nível de qualidade de vida de qualquer sociedade. Ele reflete tanto o ritmo de atividade dos setores industrial, comercial e de serviços, quanto a capacidade da população para adquirir bens de serviços tecnologicamente mais avançados, como automóveis (que demandam combustíveis), eletrodomésticos e eletroeletrônicos (que exigem acesso à rede elétrica e pressionam o consumo de energia elétrica) (ANEEL, 2008).

A energia solar fotovoltaica faz uso do efeito fotovoltaico para converter a energia da radiação solar em energia elétrica. Ela apresenta um grande potencial para desenvolvimento, afinal, diariamente, incide sobre a superfície da Terra mais energia vinda do sol do que a demanda total de todos os habitantes do planeta. Ao todo, em um ano, incide sobre a Terra uma potência solar instantânea de  $1,75 \times 10^{17}$  W. Logo, em aproximadamente 12 minutos a energia incidente do sol sobre a Terra é suficiente para atender a demanda energética mundial anual (RÜTHER, 2004).

O Sistema Elétrico Brasileiro (SEB) é composto de diversas fontes de energia elétrica, sejam elas renováveis ou não. Apesar disso, no Brasil, um país com aproximadamente 207 milhões de habitantes (IBGE, 2017), ainda existem cerca de 190 mil residências familiares sem acesso à energia elétrica de acordo com o Ministério de Minas e Energia (EXAME, 2015). A Figura 1 mostra a matriz elétrica brasileira em relação as fontes de energia utilizadas no ano de 2017.

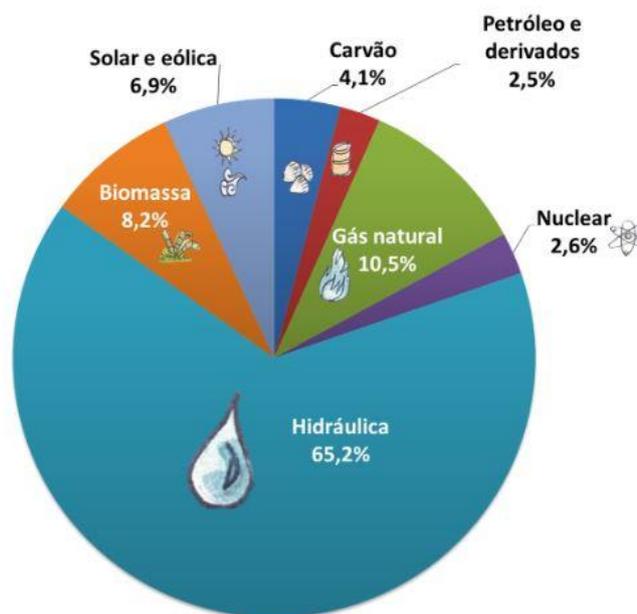


Figura 1 – Matriz energética brasileira no ano de 2017.  
Fonte: Figura extraída de (EPE, 2019).

A partir da Figura 1 é possível notar que a fonte de energia elétrica mais utilizada no Brasil é oriunda de hidrelétricas e que energias como, eólica e solar, tem pouco espaço no cenário atual, com grande potencial de crescimento a médio e longo prazo, podendo diversificar e potencializar a matriz energética brasileira para um cenário de maior autonomia.

A energia solar fotovoltaica em território nacional tem um potencial imenso para aprimoramentos e um melhor uso da mesma, podendo ser uma fonte de produção em lugares distantes. Com pouco recurso para obtenção de energia e podendo e também pode ser utilizada como fonte secundária de energia fazendo com que a concessionária não seja sobrecarregada gerando prejuízos, tanto para a mesma, quanto para produtores de bens de consumo.

A Figura 2 ilustra um estudo que considerou dados de todas as 91 distribuidoras de energia do país, que atendem 81 milhões de UCs (unidades consumidoras). Foram feitas análises nacionais e regionais no período de 2011 a 2017 do número de UCs ao longo dos anos, da quantidade de unidades afetadas pela violação dos indicadores de continuidade de serviço – considerando o DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e o FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) – e do valor limite dos indicadores (IDEC, 2018).

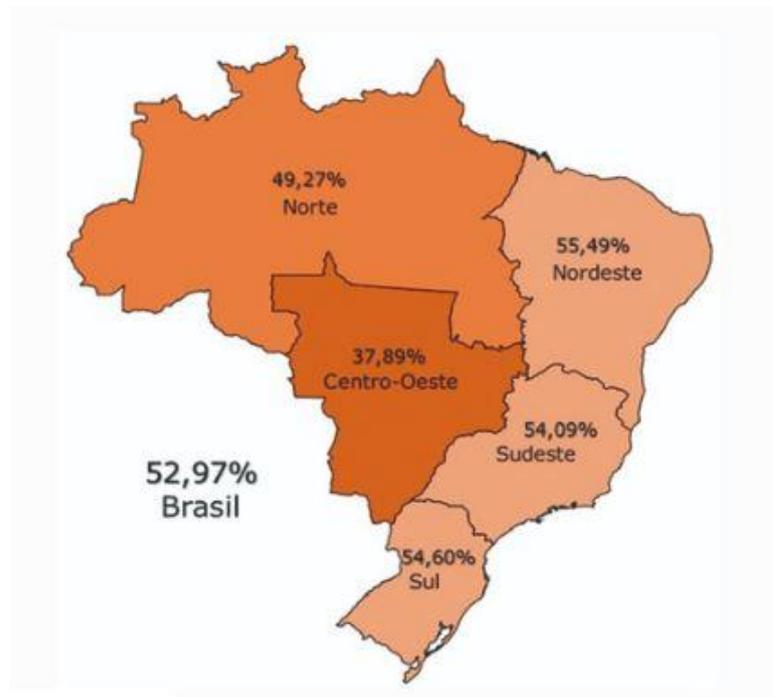


Figura 2 – Nível satisfatório de qualidade (DEC) por UCs em 2017.  
Fonte: Figura extraída de (IDEC, 2018).

Ao analisar a Figura 2, constata-se que o (DEC) apresentou um valor relativamente baixo, tendo em vista que esse nível varia de acordo com a concessionárias de energia elétrica de cada estado. Contudo, não existe uma previsão para que todas as regiões do Brasil tenham um mesmo limite devido à infraestrutura e das características de atendimento por cada concessionária.

Neste contexto, a utilização de uma fonte auxiliar de energia elétrica renovável nas UCs traria benefícios para os consumidores, evitando transtornos devido à falta de energia elétrica. Com isso, neste trabalho de conclusão de curso é proposta a implementação de um sistema fotovoltaico com usuário localizado na cidade de Formiga – MG, no intuito de reduzir prejuízos devido à falta de energia elétrica para o respectivo consumidor.

## 1.1 Problema

A falta de energia elétrica para consumidores não urbanos acarreta em prejuízos econômicos e transtornos para os mesmos. Para minimizar tal problema, no presente estudo é realizado o dimensionamento de um sistema fotovoltaico autônomo

atuando paralelamente com a rede elétrica visando a redução de prejuízos econômicos.

## **1.2 Justificativa**

As interrupções de energia elétrica em locais não urbanos, devido à falta de investimento, tornou-se um transtorno para seus consumidores, tendo em vista o uso da tecnologia para aprimoramento dos meios de construção de bens de consumo rurais, com isto, torna-se viável a utilização de um sistema atuando paralelamente a rede de distribuição. Perante a esses fatos o presente estudo propõe um sistema alternativo para suprir as faltas de energia elétrica nos locais necessários.

## **1.3 Hipótese**

Com o aumento constante da demanda de energia elétrica no Brasil tornou-se inevitável a inserção de novas formas de geração de energia para suprir as dificuldades apresentadas pelo sistema elétrico atual. Com isto, o presente trabalho mostra como um sistema fotovoltaico autônomo pode se tornar uma alternativa para resolver um dos problemas recorrentes do atual modo de distribuição de energia elétrica, auxiliando os consumidores quando ocorrer interrupção no fornecimento de energia elétrica, evitando transtornos e prejuízos econômicos.

## **1.4 Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho é realizar o dimensionamento de um sistema fotovoltaico autônomo para uma unidade consumidora localizada na zona rural da cidade de Formiga–MG, assim como desenvolver uma análise econômica do mesmo. O sistema foi dimensionado para sanar os problemas da falta de energia elétrica na

localidade que necessita da mesma para sua produção de bens de consumo, tornando assim o seu sistema mais confiável e sustentável.

### **1.5 Objetivos Específicos**

Com o objetivo geral devidamente apresentado, alguns objetivos são definidos para realizar o estudo, sendo eles:

- Realizar um estudo sobre as formas alternativas de energia;
- Entender o funcionamento do sistema fotovoltaico autônomo;
- Coletar informações preliminares sobre o tipo de sistema central;
- Especificar a energia utilizada na localidade escolhida para estudo;
- Dimensionar o painel fotovoltaico e os demais componentes do sistema;
- Analisar uma forma de transferência do sistema convencional para o sistema em questão quando necessário;
- Realizar uma análise econômica do sistema;
- Comparar os resultados obtidos com um gerador a diesel.

### **1.6 Estrutura do Trabalho**

O presente trabalho é dividido em seis capítulos. No capítulo 2 é realizado um levantamento bibliográfico dos principais conceitos para a compreensão do sistema em questão, assim como disponibilizar as informações de funcionamento, os tipos de sistema e componentes contidos em um sistema fotovoltaico autônomo. No capítulo 3 é apresentada a metodologia desenvolvida para obtenção do sistema fotovoltaico autônomo. No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos do sistema. No capítulo 5 são apresentadas as conclusões do estudo proposto, bem como os trabalhos futuros. Por fim são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas na confecção da monografia.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os estudos realizados sobre a composição do sistema fotovoltaico em questão, os tipos de sistemas que são utilizados atualmente, a utilização deste tipo de energia no Brasil e no cenário mundial, tendo ênfase o estudo proposto no presente trabalho.

### 2.1 História da Energia Solar Fotovoltaica

Energia solar fotovoltaica é aquela proveniente dos raios solares recebidos pela Terra. A quantidade recebida é influenciada por diversos fatores, como: temperatura, vegetação, quantidade de nuvens presentes durante o dia e gases presentes no ar. Ainda assim é possível transformar esta radiação em energia fotovoltaica. Sua utilização vem crescendo nos últimos anos por se tratar de uma fonte renovável de energia e não trazer danos ao meio ambiente (PORTAL ENERGIA, 2017).

O estudo da geração de energia elétrica a partir da radiação solar se iniciou em 1839, quando o físico francês Edmond Becquerel observou o surgimento de uma diferença de potencial entre as extremidades de duas placas metálicas, de platina ou prata, mergulhada em um eletrólito quando expostas à luz. Este efeito ficou conhecido como efeito fotovoltaico. Somente em 1877 os americanos W.G. Adams e R.E. Day utilizaram as propriedades semicondutoras do selênio para desenvolver o primeiro dispositivo sólido de geração de energia elétrica por exposição à luz solar. Limitada a tecnologia da época para seu crescimento, a energia fotovoltaica teve de esperar o aprimoramento de grandes trabalhos científicos, como por exemplo, a teoria do efeito fotoelétrico de Einstein em 1905, para então poder dar continuidade ao seu desenvolvimento (VALLÊRA, 2006).

No dia 25 de abril de 1954, os executivos da Bell Labs (a mesma empresa originada por Alexander Graham Bell, o inventor do telefone) impressionaram a imprensa anunciando a primeira célula solar comercial. Batizada como “Bell Solar Battery”, o equipamento era capaz de energizar um rádio transmissor de voz e música (SOLSTICIO, 2019). A Figura 3 ilustra a primeira célula solar fotovoltaica.

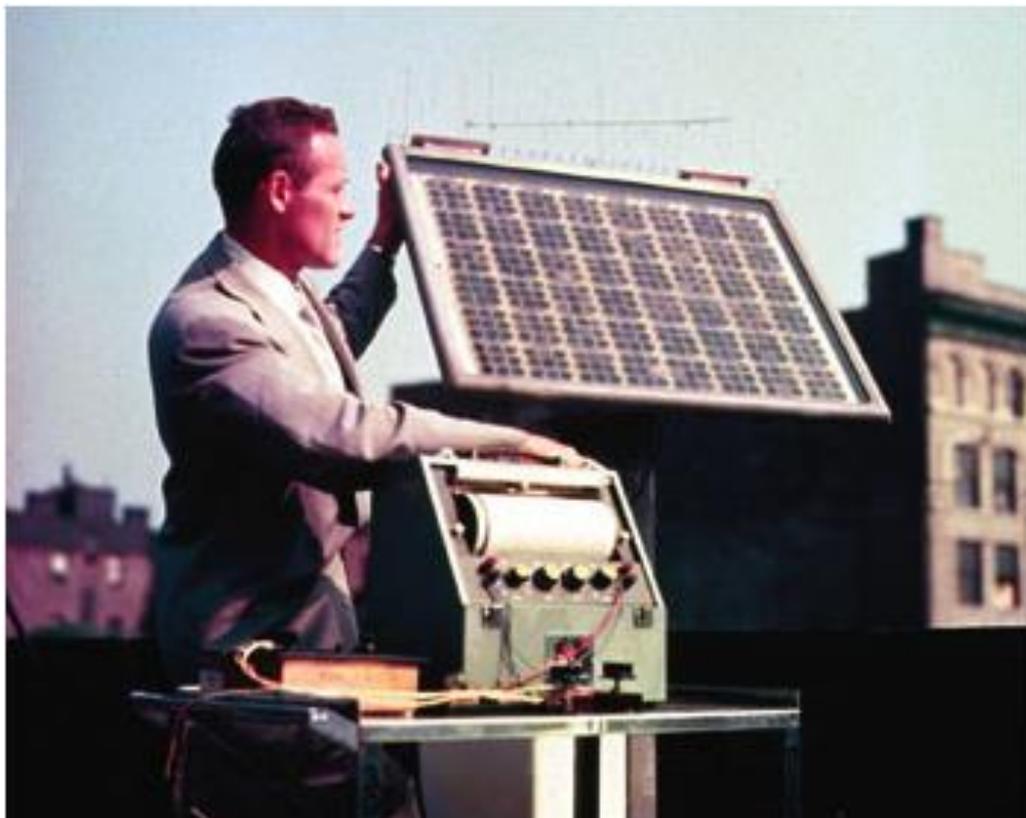


Figura 3 – Primeira célula solar fotovoltaica.  
Fonte: Figura extraída de (SOLSTICIO, 2019).

Esses são os principais marcos da história da energia solar fotovoltaica, as principais descobertas, e onde tudo origina-se, como o desenvolvimento da primeira célula como descrito na Figura 3. Existem outros pontos importantes, como a melhoria da eficiência de tais células, entretanto, neste trabalho tal efeito não é levado em conta.

Na seção a seguir é apresentado o potencial energético mundial, especialmente o enquadramento brasileiro neste cenário, tendo em vista que a incidência solar no Brasil é muito alta, tornando-o, um dos potenciais energéticos neste quesito.

## 2.2 Potencial Energético no Brasil e no Mundo

O aumento do consumo da energia elétrica no mundo, desde o início da idade contemporânea, tem revolucionado a vida da população mundial, tornando-se um item indispensável no cotidiano das pessoas e melhorando, cada dia mais, a qualidade de vida dos respectivos.

A maioria das fontes de energia utilizadas atualmente são de origens fósseis, ou seja, as mesmas são não renováveis, como o petróleo e seus derivados. Além de serem fontes de energia esgotáveis, elas comprometem a estrutura do meio ambiente, tendo em vista que, para o uso das mesmas, é necessária a extração direta na natureza, queima por combustão, entre outros males que acarretam prejuízos ao meio ambiente e à população.

A Figura 4 mostra o aumento do consumo de energia ao decorrer das décadas e os respectivos meios de adquirí-las.

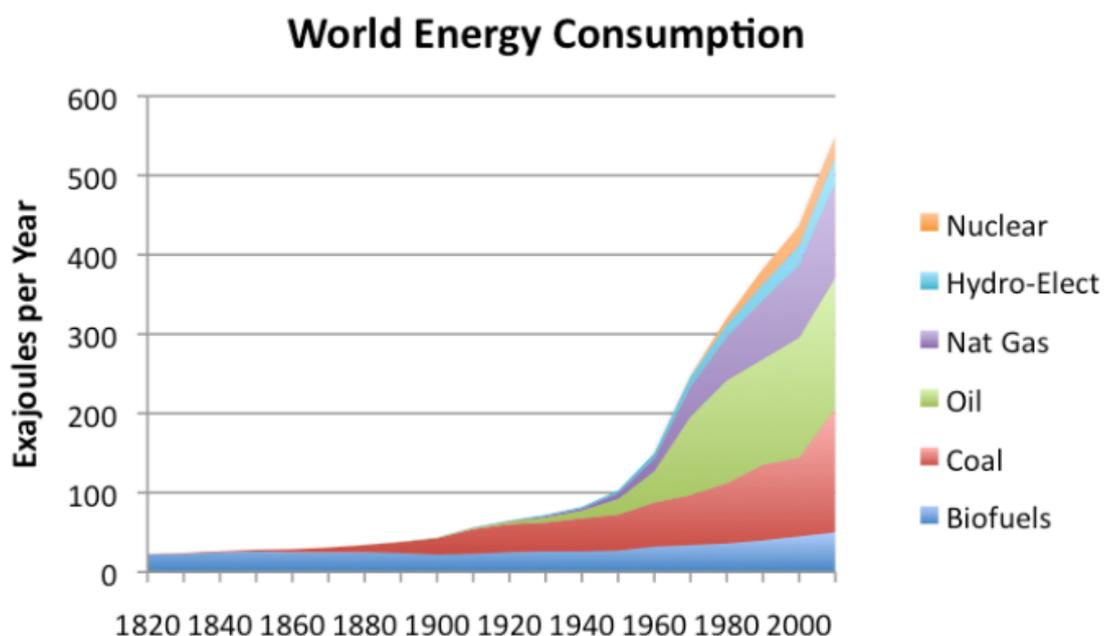


Figura 4 – Crescimento da extração e do consumo de energia no mundo.  
Fonte: Figura extraída de (IPH, 2019).

É possível notar na Figura 4 o crescimento do consumo de energia elétrica no cenário mundial, tendo um aumento em torno de 5000% desde o início da análise, e

cerca de 100% nos últimos 30 anos, tendo ênfase que a maioria do consumo se dá por combustíveis fósseis. Sendo assim torna-se evidente a necessidade da utilização de fontes de energias alternativas e renováveis para o padrão de vida humano.

A energia solar fotovoltaica é uma alternativa de fonte de energia limpa e renovável. Tendo em vista este cenário, a mesma torna-se promissora mundialmente, visando suprir energias de origens fósseis. A Figura 5 mostra os países com maior potencial de energia fotovoltaica instaladas durante o ano de 2017 e também com maiores cargas instaladas em funcionamento.

TOP 10 COUNTRIES IN 2017				TOP 10 COUNTRIES IN 2017			
1		China	53 GW	1		China	131 GW
2		USA	10,6 GW	2		USA	51 GW
3		India	9,1 GW	3		Japan	49 GW
4		Japan	7 GW	4		Germany	42 GW
5		Turkey	2,6 GW	5		Italy	19,7 GW
6		Germany	1,8 GW	6		India	18,3 GW
7		Australia	1,25 GW	7		UK	12,7 GW
8		Korea	1,2 GW	8		France	8 GW
9		UK	0,9 GW	9		Australia	7,2 GW
10		Brazil	0,9 GW	10		Spain	5,6 GW

.Figura 5 – Maiores produtores de energia fotovoltaica do mundo no ano de 2017.  
Fonte: Figura extraída de (ABSOLAR, 2018).

A Figura 5 mostra o cenário mundial das principais potências relacionadas a energia fotovoltaica. Pode-se observar que na Ásia está concentrada a maior parte de geração da mesma.

O Brasil ultrapassou, no início de 2018, a marca de 1 GW de projetos de energia solar fotovoltaica conectados na matriz elétrica, o que colocou o país entre os 30 maiores produtores desta fonte no mundo (ABSOLAR, 2018).

Segundo Absolar (2018), o país está entre os 10 maiores produtores de energia eólica e de biomassa do mundo, com isto deve-se investir ainda mais na fonte de energia em questão, pois trata-se de um país com alto índice de irradiação solar. Sendo assim o mesmo pode gerar uma quantia muito mais significativa do que se produz atualmente. Atentando-se que essa geração corresponde apenas a projetos que estão conectados a rede, ou seja apenas projetos *on-grid*, não sendo calculado os valores para sistemas isolados.

No Brasil, o crescimento da geração fotovoltaica tem sido favorecido e impulsionado graças à iniciativa da ANEEL por meio da Resolução Normativa 687 de 24 de novembro de 2015 (ANEEL, 2015) substituindo a Resolução Normativa nº 482 de 17 de abril de 2012. Esta normativa permite a micro geração e mini geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis de energia com sistemas de geração distribuída conectados às redes elétricas de baixa tensão. Ou seja, estabelece que clientes residenciais, comerciais e empresariais possam instalar painéis fotovoltaicos e abater das suas contas de energia essa micro geração. Dessa forma, é permitido que consumidores possam investir em sistemas de geração de energia solar para serem conectados à rede de transmissão e não apenas para consumo próprio. Assim, consumidores tendem se tornar também, em fornecedores de energia (CRASP, 2014).

Ressaltando que, o governo brasileiro vem investindo em programas de incentivo nesse tipo de geração de energia, uma vez que o investimento feito para este tipo de geração ainda é relativamente alto (NASCIMENTO, 2017).

Na próxima seção são apresentados os componentes de um sistema fotovoltaico, as características de cada equipamento e seu funcionamento.

## **2.3 Componentes dos Sistemas**

Nesta seção são mostrados os componentes de um sistema fotovoltaico, seu princípio de funcionamento e sua adequação no sistema.

### **2.3.1 Células Fotovoltaicas**

Células fotovoltaicas são fabricadas a partir de um material semicondutor. Esses materiais são caracterizados por terem uma banda de valência preenchida por elétrons e uma banda de condução, onde não se possui elétrons, na temperatura de 0 K (zero absoluto). A separação entre as duas bandas é denominada banda proibida, a medida que a temperatura aumenta, os elétrons migram para a banda de condução tendo assim a movimentação das partículas, fazendo com que haja o efeito fotovoltaico. Por meio de um condutor externo pode-se manter este efeito por tempo indeterminado. (NASCIMENTO, 2004).

Existem diversos tipos de células fotovoltaicas, variando-se apenas o rendimento de uma para outra, dependendo da tecnologia de fabricação envolvida na mesma, sendo que a maioria é oriunda do silício (CEPEL, 2014). Na Figura 6 é mostrado a eficiência do tipo de semicondutor e a tecnologia desenvolvida.

Tecnologia		Eficiência (%)
Silício	Monocristalino	25,0 ± 0,5
	Policristalino	20,4 ± 0,5
	Filmes finos transferidos <sup>4</sup>	20,1 ± 0,4
Compostos III A-VA (ou 13-15)	GaAs (filme fino)	28,8 ± 0,9
	GaAs (policristalino)	18,4 ± 0,5
	InP (monocristalino)	22,1 ± 0,7
Calcogênios Compostos II B-VI A (ou 12-16)	CIQS (CuIn <sub>x</sub> Ga <sub>(1-x)</sub> Se <sub>2</sub> ) (filme fino)	19,6 ± 0,6
	CdTe (filme fino)	18,3 ± 0,5
Silício amorfo / nanocristalino	Amorfo (a-Si) (filme fino)	10,1 ± 0,3
	Nanocristalino (nc-Si)	10,1 ± 0,2
Células Sensibilizadas por Corantes (DSSC)		11,9 ± 0,4
Células Orgânicas (filme fino)		10,7 ± 0,3
Multijunção	InGaP/GaAs/InGaAs	37,7 ± 1,2
	a-Si/nc-Si/nc-Si (filme fino)	13,4 ± 0,4

Figura 6 – Eficiência dos tipos de células fotovoltaicas.  
Fonte: Figura extraída de (CEPEL, 2014).

É possível verificar na Figura 6 que o composto de Arseneto de Gálio de filme fino é o que possui maior eficiência, seguido pelo Silício monocristalizado, entretanto o GaAs possui um custo de obtenção superior ao Silício. Com isso, o silício ainda apresenta o melhor custo benefício (CEPEL, 2014).

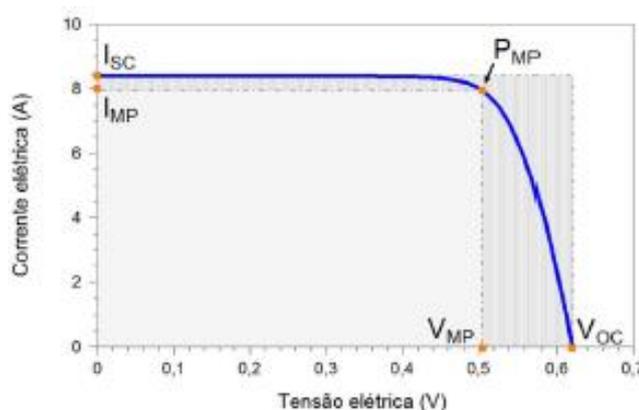


Figura 7 – Curva I-V de uma célula fotovoltaica, evidenciando suas principais características.  
Fonte: Figura extraída de (CEPEL, 2014).

Os parâmetros que representam o comportamento elétrico de uma célula fotovoltaica são mostrados na Figura 7. De acordo com Cepel (2014), os principais pontos de operação da célula fotovoltaica são:  $V_{oc}$  é a tensão de circuito aberto, ou seja, a máxima tensão de uma célula fotovoltaica,  $I_{sc}$  é a corrente de curto circuito (máxima corrente que uma célula pode gerar),  $I_{mp}$  e  $V_{mp}$  são respectivamente a tensão e corrente que podem produzir a maior potencia nominal ( $P_{mp}$ ).

### 2.3.2 Painel Solar

Os painéis solares (ou módulos fotovoltaicos) são responsáveis pelas formas de arranjos desejadas na estrutura do projeto, como tensão de operação e corrente nominal do sistema em questão, além de outros fatores que influenciam no funcionamento do sistema, como irradiância solar e temperatura, buscando uma maior viabilidade técnica e econômica para o consumidor (CEPEL, 2014).

As placas fotovoltaicas em série são conectadas umas as outras, onde o terminal negativo é conectado ao terminal positivo de outra placa. Esse método tem como intuito somar as tensões das placas e manter a corrente constante, tendo em vista que tais placas devem possuir as mesmas especificações técnicas (CEPEL, 2014).

As placas fotovoltaicas em paralelo (terminais positivos das placas conectados entre si e o mesmo para os terminais negativos) tem como objetivo manter a tensão no sistema em um valor constante, e fazer com que as correntes entre os arranjos sejam somadas. A Tabela 1 apresenta os dados técnicos das placas fotovoltaicas.

Tabela 1 - Dados técnicos dos módulos fotovoltaicos.

<b>Informação</b>	<b>Significado ou importância da informação</b>
Nome do fabricante	Responsável pela qualidade do módulo
Identificação do modelo	Identificação de dados técnicos
Número de série	Registro, qualificação, rastreabilidade e garantia do produto
Tensão máxima do sistema	Maior valor de tensão de circuito aberto
Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ )	Somatório da tensão máxima de cada módulo em série
Corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ )	Somatório da corrente máxima de cada módulo em paralelo
Tensão de máxima potência ( $V_{mp}$ )	Tensão de máxima transferência de potência
Corrente de máxima potência ( $I_{mp}$ )	Corrente de máxima transferência de potência
Potência nas condições de ensaio (STC)	Potência máxima nominal do módulo nas condições de ensaio
Temperatura nominal nas condições de operação (NOCT)	Temperatura nominal que a célula esta sujeita, irradiância $800W/m^2$ , temperatura $20^{\circ}C$
Potencia nas condições de operação ( $P_{mp}$ )	Potência máxima do módulo nas condições NOCT
Tensao de máxima potencia nas condições de operação ( $V_{mp}$ )	Tensão para máxima potência nas condições NOCT
Corrente de máxima potencia nas condições de operação ( $I_{mp}$ )	Corrente para máxima potência nas condições NOCT

Fonte – Tabela adaptada de (CEPEL, 2014).

Na Tabela 1 é possível observar dados de operação de uma placa fotovoltaica, assim como o seu significado, alguns outros dados podem ser inseridos na mesma, mas esses tratam-se dos mais importantes.

### 2.3.3 Baterias

A bateria, em sistemas isolados e em sistemas híbridos, torna-se responsável por armazenar energia para que a mesma possa ser usada em outro momento. A bateria eletroquímica nos tempos atuais é o dispositivo mais utilizado em sistemas que necessitam de dispositivos de armazenamento de energia elétrica, superando outras formas de armazenamento (CEPEL, 2014).

A bateria é um conjunto de células eletroquímicas que podem ser conectadas em série e/ou paralelo. São capazes de armazenar energia elétrica em forma de energia química e realizar o procedimento reverso quando alguma carga esta

conectada a mesma. Existem baterias recarregáveis e não recarregáveis (CEPEL, 2014). A Tabela 2 mostra os tipos de bateria, dentre outras especificações técnicas.

Tabela 2 - Dados técnicos dos tipos de baterias.

<b>Tecnologia</b>	<b>Eficiência <math>\eta</math> [%]</b>	<b>Vida útil [anos]</b>	<b>Vida cíclica [ciclos]</b>	<b>Aplicações (exemplos)</b>
Chumbo ácido	80-90	3-20	250-500	Uso estacionário, automotiva
Níquel-Cádmio	60-70	3-25	300-700	Ferramentas, veículos elétricos
Níquel-Hidreto metálico	80-90	2-5	300-600	<i>Notebooks</i> , celulares, brinquedos
Íon de lítio	90-95	-	500-1000	<i>Notebooks</i> , celulares, brinquedos
Bateria alcalina	75-90	-	20-50	Produtos de consumo, brinquedos
Cloreto de níquel e sódio	80-90	-	~1000	Veículos elétricos e híbridos

Fonte – Tabela adaptada de (CEPEL, 2014).

A Tabela 2 mostra os principais dados técnicos de uma bateria, como eficiência de cada tipo, vida útil de cada bateria, além de suas possíveis aplicações.

A profundidade de descarga e temperatura são os principais parâmetros para quantificar o tempo de vida útil de uma determinada bateria. A profundidade refere-se a quantidade de energia que pode ser retirada de uma bateria sem que a mesma sofra danos. A temperatura é outro fator importante para o tempo de vida útil da bateria, ou seja, temperaturas altas e descargas profundas, podem danificar a bateria, comprometendo assim sua utilidade (CEPEL, 2014).

A Figura 8 ilustra a variação do tempo de vida útil de uma bateria, em função de suas profundidades e temperaturas as quais os componentes são submetidos.

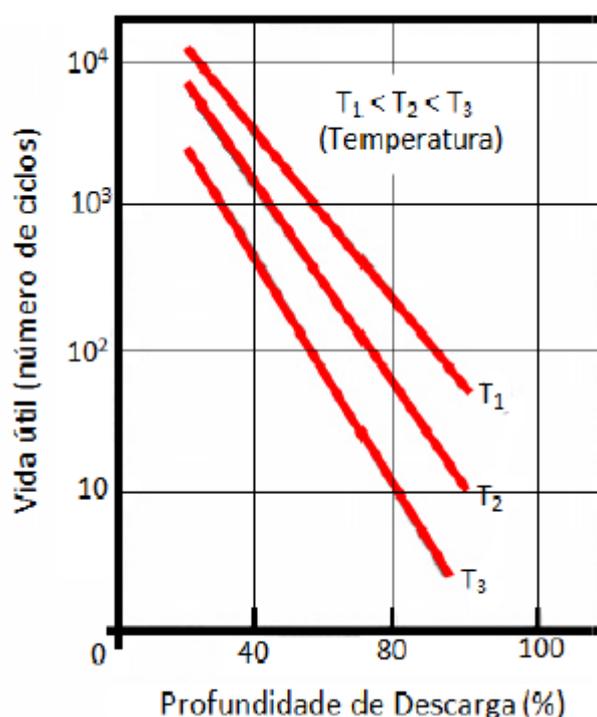


Figura 8 – Profundidade de descarga e temperatura relacionado a vida útil de uma bateria.  
Fonte: Figura extraída de (CEPEL, 2014).

Analisando a Figura 8 é possível observar que quanto maior a profundidade de descarga e a temperatura em que a bateria está submetida, menor é o tempo de vida útil de uma bateria.

### 2.3.4 Controlador de Carga

O controlador de carga tem como principal objetivo proteger o banco de baterias contra cargas e descargas excessivas. Controlando assim sua alimentação e sua profundidade de descarga. Os controladores são de suma importância em sistemas fotovoltaicos isolados, seu mal funcionamento ou dimensionamento inadequado, pode prejudicar diretamente a vida útil do sistema. Os controladores devem desconectar o painel fotovoltaico quando o nível da bateria estiver completo e também desconectar o inversor de frequência do sistema, caso o nível do banco de baterias esteja abaixo do limiar desejado no projeto (OLIVEIRA, 2005).

No carregamento a tensão constante, a corrente gerada pelo módulo fotovoltaico é regulada pelo controlador, de modo que a tensão nos terminais da bateria é mantida, a partir do ponto de regulação de tensão, em um valor constante

(OLIVEIRA, 2005). Na Tabela 3 são mostradas as principais características de um controlador em suas variações de tensão.

Tabela 3 – Especificação de controladores de carga.

Parâmetros	Tensão Nominal (V)			
	Unidades	12	24	48
Maxima tensão de circuito aberto	V	22	44	88
Queda de tensão	V	0,55	0,55	0,9
Termino de carregamento	V	14,3 ± 0,2	28,6 ± 0,4	57,2 ± 0,8
Reinício de carregamento	V	13,2 ± 0,3	26,4 ± 0,6	52,8 ± 1,2
Consumo de corrente	mA	10	10	10
Desconexão de carga	V	11,5 ± 0,2	23,0 ± 0,4	46,0 ± 0,8
Reconexão da carga	V	13,0 ± 0,2	26,0 ± 0,4	52,0 ± 0,8

Fonte – Tabela adaptada de (CEPEL, 2014).

Na Tabela 3, é possível obter os principais parâmetros de utilização de um controlador de carga em sistemas fotovoltaicos.

### 2.3.5 Inversor de frequência

O principal objetivo de um inversor de frequência é converter potência CC em potência AC com frequência e tensão de acordo com o desejado, sendo pré especificado pelo fabricante (UNESP, 2002). A Figura 9 representa o princípio de funcionamento dos circuitos monofásicos, onde a estrutura é mais simples de ser explicada e o princípio de funcionamento para sistemas bifásicos e trifásicos são similares.

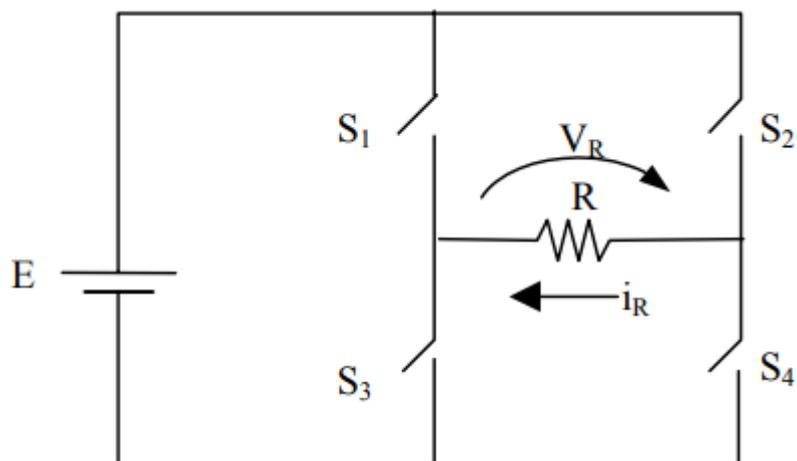


Figura 9 – Esquemático inversor monofásico.  
 Fonte: Figura extraída (UNESP, 2002).

O circuito apresentado na Figura 9 representa um inversor monofásico, composto por 4 chaves de comando e uma carga, além da fonte de tensão oriunda do sistema. Na Figura 10 mostra-se o sinal de saída da tensão e da corrente, onde nota-se uma onda quadrática, devido a capacidade de chaveamento do sistema. Quanto maior essa capacidade em um ciclo, maior será a aproximação de uma senoide. Nota-se que este circuito é de apenas um pulso, ou seja, quando  $S_1$  e  $S_4$  estão fechadas,  $S_2$  e  $S_3$  estão abertas e assim sucessivamente em cada ciclo. Na figura,  $d$  representa o ângulo de atraso do chaveamento.

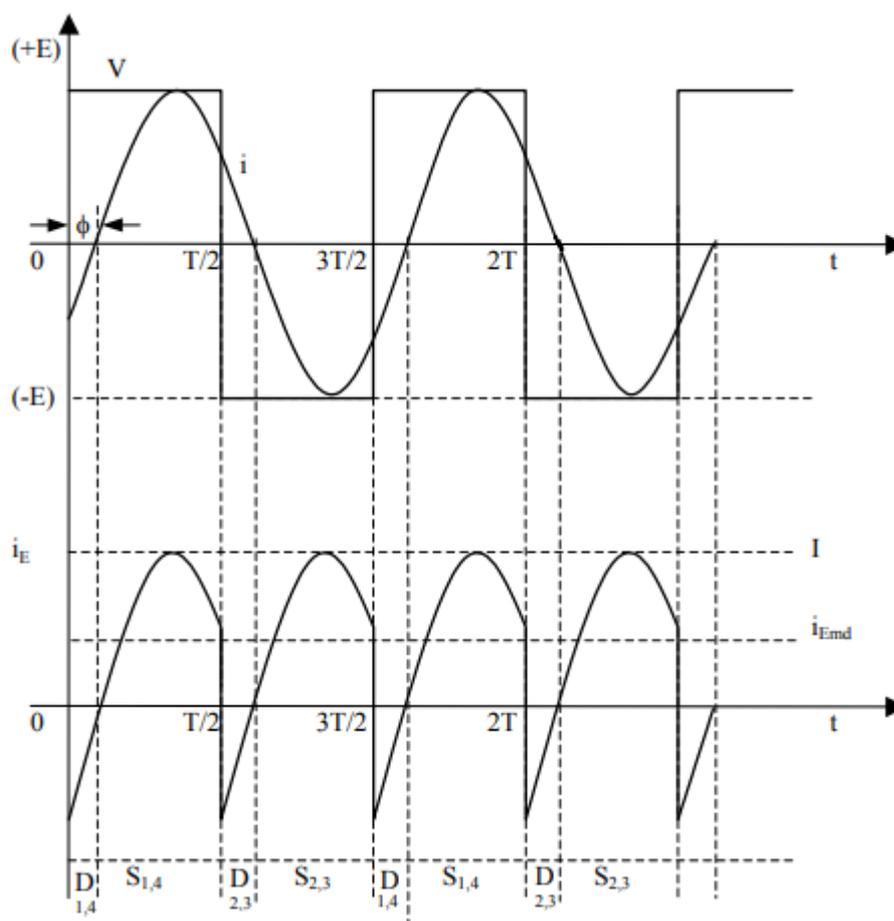


Figura 10 – Sinal de saída de um circuito inversor monofásico.  
 Fonte: Figura extraída (UNESP, 2002).

É possível verificar na Figura 10 que a onda representada na saída não ilustra uma senóide. Para isso faz-se necessário uma maior quantidade de pulsos por ciclo para se representar uma melhora na qualidade senoidal de saída do sistema, onde tem-se sistemas com 6 pulsos, 12 pulsos, dentre outros tipos (UNESP, 2002).

Outro tipo de sistema utilizado para controle de inversor de frequência trata-se do PWM, que tem como fundamento o controle da tensão definida por modulação por largura de pulso. Na modulação por largura de pulso senoidal a tensão de saída é controlada pela variação dos períodos nos estados ligados e desligados (AHMED, 2000). O controle PWM é o que mais aproxima de uma senóide pura, fazendo com que seja o mais utilizado a fim de diminuir distorções harmônicas, trazendo menos transtornos a rede.

De acordo com Unesp (2002), os inversores devem ser especificados de acordo com sua forma de utilização, do modo operante do sistema, do orçamento do

consumidor e também para uma melhor qualidade da energia elétrica do sistema fotovoltaico.

Alguns fatores importantes devem ser considerados, como a forma de onda e distorção harmônica. A forma de onda deve-se assimilar a uma senóide pura, e a distorção harmônica total de um inversor não deve ultrapassar o valor de 5%. A eficiência de potência de um inversor pode variar de 50% a 95% devido a seu modo de operação, sendo máxima na sua potência nominal do aparelho. Outros fatores são fornecidos pelo fabricante, como potência nominal de saída, máxima tensão de entrada, máxima tensão de saída, entre outros parâmetros importantes. É necessário dimensionar o sistema para uma escolha correta do equipamento (UNESP, 2002).

### 2.3.6 Proteção do Sistema Fotovoltaico

Os sistemas fotovoltaicos estão sujeitos a sobrecargas e correntes de fuga. Assim faz-se necessário o uso de equipamentos que protejam o protejam. A Figura 11 representa o modo de operação de um diodo *bypass*.

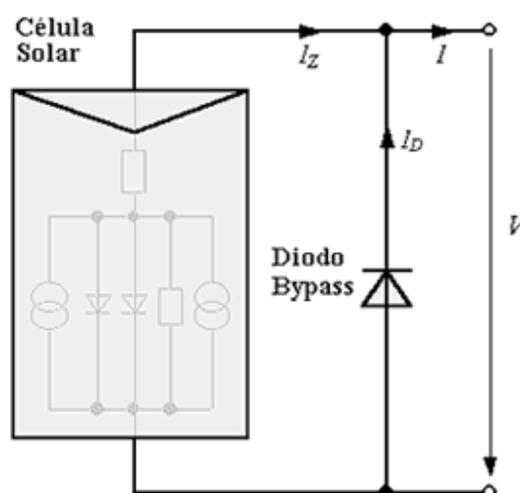


Figura 11 – Esquemático de operação do diodo bypass.  
Fonte: Figura extraída de (CRESESB, 2014).

As instalações de células fotovoltaicas devem inserir o diodo *bypass* ou também conhecido como diodo de roda livre. Os mesmos são conectados em paralelo com a célula, podendo assim isolar uma célula danificada evitando que a mesma afete

outras em transtornos como uma corrente de retorno. Caso ocorra tal transtorno, o diodo fará com que a célula em questão se desconecte das outras (CRESESB, 2014).

Já os fusíveis fotovoltaicos são componentes de proteção que possuem a função de proteger as *strings* do fluxo de corrente reversa de um conjunto de tensão maior para um de menor tensão. Ele deve ser dimensionado para uma corrente menor que a corrente reversa que o módulo suporta. Os fusíveis são alojados na saída das séries, nos pólos positivos e negativos e devem ser para CC, preferencialmente, do tipo gFV, pois possuem maior durabilidade. Visto que os diodos de bloqueio apresentam falhas que prejudicam o desempenho do SFV, os fusíveis fotovoltaicos são uma alternativa para sua substituição (CEPEL, 2014).

Por fim, o DPS é o dispositivo preconizado pela norma ABNT 5410 e 5419 para proteger as instalações elétricas e os equipamentos eletro-eletrônicos contra surtos, sobretensões ou transientes, diretos ou indiretos, independentemente da origem, se por descargas atmosféricas ou por manobras da concessionária (AVILA, 2010).

Sendo assim, de acordo com Avila (2010), o DPS deve ser colocado em um sistema fotovoltaico, na entrada CC da instalação, isto é na entrada contínua do inversor de frequência, protegendo assim o sistema, e também na entrada AC da instalação, na entrada de energia da instalação elétrica, aglomerando assim todo sistema, em uma malha de aterramento, pois só assim as sobrecargas terão um escoamento adequado, não danificando o sistema.

### **2.3.7 Medidor Bidirecional Fotovoltaico**

O medidor bidirecional é utilizado em sistemas fotovoltaicos conectados a rede (*on-grid*) e em sistemas híbridos. Ao contrario do medidor convencional, o mesmo mede tanto a energia consumida em uma instalação elétrica quanto a quantidade de energia injetada na rede elétrica pelo sistema em questão. Com isso, será subtraído da energia consumida a energia fornecida pela instalação. O ideal é que as duas sejam iguais ou próximas, fazendo-se assim que o consumidor não crie um déficit ou bônus de energia perante a concessionária. Vale ressaltar que a medida de energia pelo medidor se dá pela energia fornecida a rede, e que a mesma só será utilizada caso a rede necessite de energia no dado momento (COPEL, 2019).

Os medidores devem atender as características constantes nesta especificação e as condições mínimas exigíveis nas Normas Brasileiras relacionadas a seguir NBR 14519 – Medidores eletrônicos de energia elétrica (estáticos) – Especificação; NBR 14520 – Medidores eletrônicos de energia elétrica (estáticos) – Método de Ensaio; NBR 14521 – Aceitação de lotes de medidores eletrônicos de energia elétrica – Procedimento; Portaria INMETRO referente ao Regulamento Técnico Metrológico – RTM, vigente (COPEL, 2019).

Na próxima seção são apresentados os princípios de funcionamento dos sistemas fotovoltaicos.

## **2.4 Princípio de Funcionamento**

Na presente seção são apresentados os conceitos dos sistemas fotovoltaicos mais utilizados atualmente.

### **2.4.1 Sistema fotovoltaico *on-grid***

Sistema fotovoltaico *on-grid* é aquele que trabalha simultaneamente com a rede de energia elétrica, ou seja, o sistema é capaz de gerar energia para suprir a demanda solicitada, e também injetar potência na rede, dependendo do tipo de medidor utilizado no sistema. No caso para poder fornecer energia a rede elétrica necessita-se de um medidor bidirecional, esse tipo de fornecimento gera créditos ao consumidor, podendo assim reduzir a conta de energia elétrica, ou acumular créditos para contas futuras.

A Figura 12 demonstra o princípio de funcionamento de uma geração de energia fotovoltaica *on-grid* (conectada a rede).

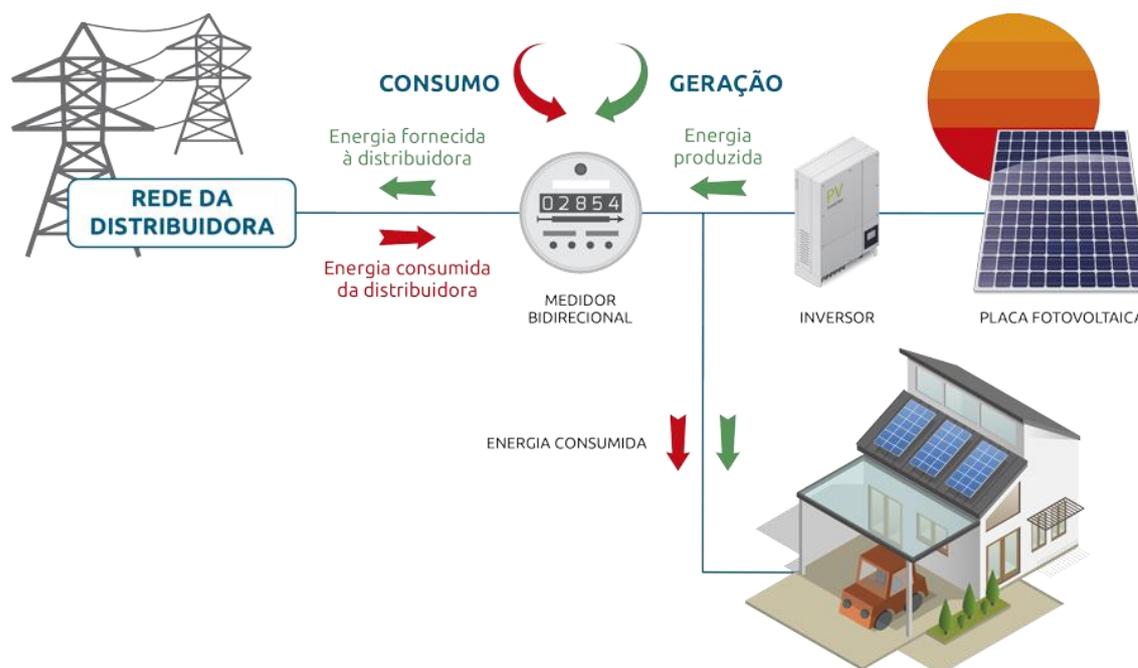


Figura 12 – Representação esquemática de um sistema fotovoltaico *on-grid*.  
Fonte: Figura extraída de (INOVACARE SOLAR, 2019).

A placa fotovoltaica é responsável pela captação da energia solar, sua saída possui uma tensão CC que não é capaz de alimentar a maioria dos equipamentos utilizados em empresas, comércios e/ou residências. Para fazer a transformação de tensão CC-CA é usado um inversor de frequência, que é capaz de alimentar o sistema. Caso o mesmo não seja capaz de suprir o consumo total do consumidor, a rede se encarrega do faltante. Caso o consumidor não utilize toda a energia oriunda do sistema, o medidor bidirecional injetará o restante de energia na rede de energia elétrica.

Dessa forma, tem-se um cenário propício para geração de energia fotovoltaica residencial, contribuindo com a redução dos gastos com a energia elétrica e aumentando significamente a sua utilização na matriz energética brasileira (ALMEIDA, 2018).

#### 2.4.2 Sistema fotovoltaico *off-grid*

O sistema fotovoltaico *off-grid* (isolado) é caracterizado por não ter influência da rede elétrica, e também não ser necessário um projeto aprovado pela distribuidora

de energia elétrica. O mesmo tem como finalidade gerar energia elétrica em lugares de difícil acesso, ou em locais onde não possui a mesma (ALBRATZ, 2017).

A Figura 13 ilustra o princípio de funcionamento de uma geração de energia fotovoltaica *off-grid*.

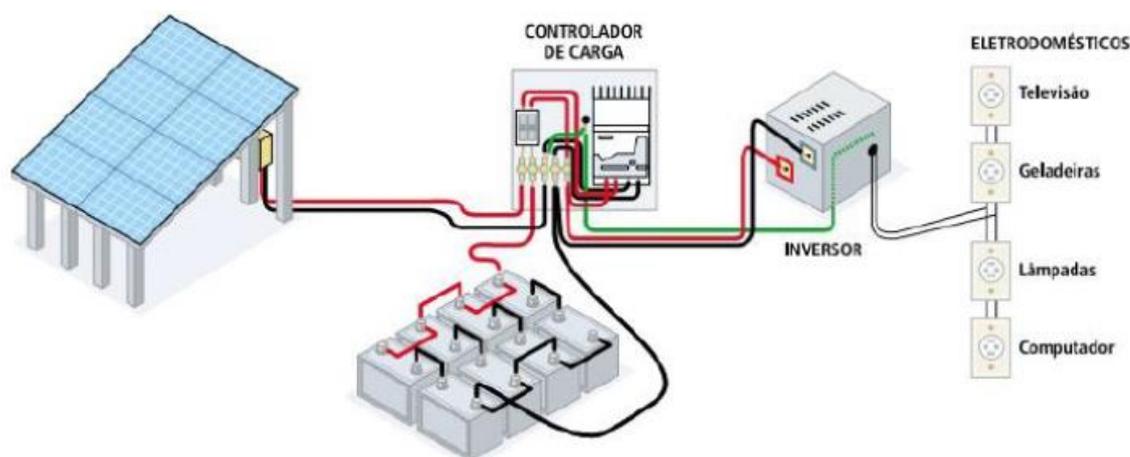


Figura 13 – Representação esquemática de um sistema fotovoltaico *off-grid*.  
Fonte – Figura extraída de (ALBRATZ, 2017).

Como mencionado anteriormente, a placa fotovoltaica é responsável pela captação de energia, a mesma é encarregada por alimentar as baterias do sistema, tendo em vista que as duas tem que trabalhar no mesmo valor de tensão contínua, a partir disso. O controlador de carga é responsável por limitar a tensão na bateria, sendo responsável por não sobrecarregar a mesma e também responsável pelo nível de descarga da bateria, fazendo assim que o sistema só gere energia para o inversor a partir de uma determinada tensão na bateria.

### 2.4.3 Sistema fotovoltaico híbrido

O sistema fotovoltaico híbrido é aquele que agrupa os dois sistemas citados anteriormente. E é conectado a rede de energia elétrica e, em caso de falta de energia elétrica, usa-se o sistema isolado, garantindo uma maior confiabilidade para cargas prioritárias; usa-se em ocasiões especiais, em que não se pode faltar energia elétrica, funcionando assim como um *nobreak* em caso de falta.

A Figura 14 representa o princípio de funcionamento de um sistema de geração fotovoltaico híbrido.



Figura 14 – Representação esquemática de um sistema fotovoltaico híbrido.

Fonte: Figura extraída de (PORTAL ENERGIA, 2017).

O sistema apresentado na Figura 14 é um sistema fotovoltaico híbrido bi-modal, ou seja, o inversor/carregador funciona de duas maneiras distintas, um com o uso direto da rede de energia elétrica, ou seja *on-grid*, e outra com o uso das baterias, fazendo-se assim o *nobreak* com a utilização do modo *off-grid*. No funcionamento como *nobreak* o mesmo não injeta carga no sistema, bloqueando a alimentação da rede. Os sistemas solares híbridos All-in-One contam com um inversor interativo e outro autônomo. Este é o sistema mais indicado para quem necessita de uma alimentação de cargas prioritárias em instalações e equipamentos que devem funcionar de forma ininterrupta (SOLIENS, 2019).

As vantagens deste tipo de sistema é a confiabilidade e autonomia para sistemas prioritários, é uma solução viável de implementação em hospitais e outros locais onde o fornecimento de energia elétrica é de suma importância. A desvantagem é o custo de instalação do mesmo, além da manutenção devido ao banco de baterias. Os Sistemas fotovoltaicos híbridos oferecem uma gama de aplicações específicas, assim como sua composição de ativos e equipamento podem variar conforme aplicação (CSR, 2017).

## 2.5 Demanda de Energia Elétrica

A potência instalada de uma determinada instalação elétrica se dá pela soma das potências nominais instaladas de todos os equipamentos elétricos presentes no sistema em questão, porém nem todos os equipamentos são ligados respectivamente no ambiente, logo não é viável especificar os equipamentos e proteção do sistema através da potência máxima da instalação a ser projetada (SOUZA, 2016).

A demanda é dada pela média das potências ativas ou reativas entregues ao consumidor em função da carga da unidade consumidora, por um intervalo de tempo. No Brasil, a demanda é definida como a demanda registrada ao longo de 15 minutos consecutivos conforme Decreto nº 62.724 de 17 de maio de 1968 (SOUZA, 2016). A Figura 15 correlaciona potência instalada, demanda máxima e demanda média, relacionadas ao tempo.

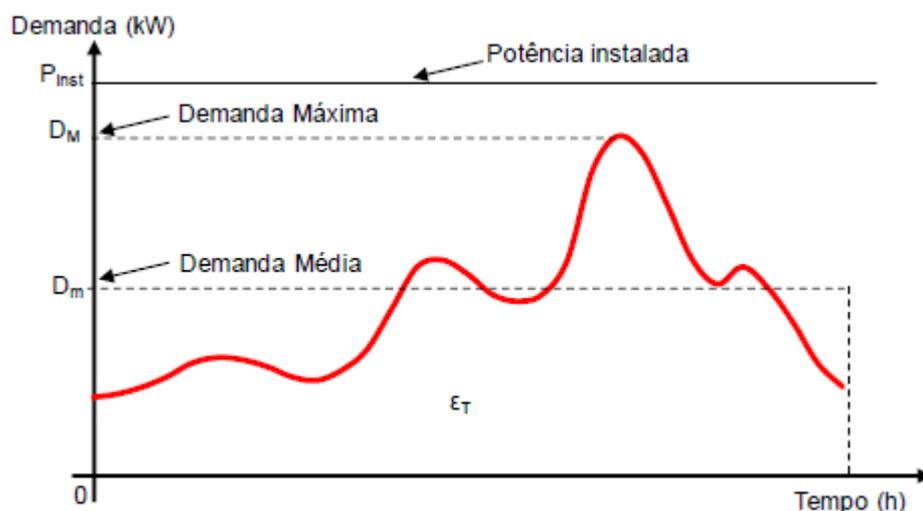


Figura 15 – Curva de demanda de um consumidor.  
Fonte: Figura extraída de (BECKER, 2014).

Analisando a Figura 15 é possível verificar que a potência instalada é a máxima de todos os sistemas. A demanda máxima se dá através do pico de consumo dos equipamentos utilizados simultaneamente, essa especificação é necessária para a proteção de determinado sistema, como disjuntores. A demanda média é a soma das potências instantâneas pelo intervalo de tempo em que as mesmas foram medidas.

O consumo de energia elétrica é medido em (kWh), que é uma unidade que relaciona a potência de um dado aparelho (kW) em relação ao seu tempo de funcionamento (h).

De acordo com AEDB (2016), para se ter um melhor projeto faz-se o uso do levantamento de carga, para que se possa obter uma curva de demanda, ou seja, relaciona o período do dia com a potência naquele dado espaço de tempo, com isso pode-se enquadrar o projeto em um determinado sistema de tarifação adequado.

A tarifa de energia é o valor cobrado por unidade de energia, dado em R\$/kWh (reais/quilowatts-hora), faturado mensalmente pelas concessionárias administradoras do sistema de transmissão/distribuição em que a empresa está conectada. O preço da energia elétrica é formado basicamente pela soma dos custos dos sistemas de geração, transmissão e distribuição, até sua disponibilidade aos consumidores no ponto de entrega (AEDB, 2016).

## **2.6 Falta de Energia e Indicadores de Qualidade**

A falta de energia elétrica atinge os consumidores, causando transtornos e prejuízos econômicos, principalmente consumidores em áreas não-urbanas, como é o caso dos produtores de leite e outros consumidores que dependem diretamente da energia elétrica para que seus produtos não sejam desperdiçados (EXAME, 2019).

A continuidade do fornecimento é avaliada pela ANEEL através de subdivisões das distribuidoras, denominadas Conjuntos Elétricos. Existem limites para indicadores associados a cada conjunto. Ressalta-se que o conjunto elétrico pode ter abrangência variada. Conjuntos grandes podem abranger mais de um município, ao mesmo tempo em que alguns municípios podem possuir mais de um conjunto (ANEEL, 2019).

Para manter a qualidade do fornecimento de energia, a ANEEL estipula alguns indicadores individuais e coletivos para a distribuição de energia elétrica. Anualmente a ANEEL publica um Indicador de Desempenho Global de Continuidade, que tem como responsabilidade comparar as concessionárias em relação aos indicadores coletivos (ANEEL, 2019).

Segunda a ANEEL (2019), os indicadores coletivos são divididos em dois: DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e FEC (Frequência

Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora), indicados no módulo 8 da PRODIST.

Os indicadores individuais são divididos em quatro: DIC (Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora), FIC (Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora), DMIC (Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora ou Ponto de Conexão) e DICRI (Duração da Interrupção Individual Ocorrida em Dia Crítico por Unidade Consumidora ou Ponto de Conexão) (ANEEL, 2019).

Na Figura 16 é possível observar os indicadores individuais e coletivos para a cidade de Formiga/MG no ano de 2018, em cenário urbano e não-urbano, esse levantamento pode ser feito na página da ANEEL (ANEEL, 2019).

Todos os indicadores associados à distribuição podem ser consultados na página "Indicadores da Distribuição".

MG - MINAS GERAIS    FORMIGA    2018    FORMIGA

Urbano

CEMIG Distribuição S/A	DIC (em horas)					FIC (número de interrupções)			DMIC (em horas)	DICRI (em horas)
	Conjunto	DEC	FEC	ANUAL	TRIM.	MENSAL	ANUAL	TRIM.	MENSAL	MENSAL
Formiga	8	6	19,34	9,67	4,83	12,45	6,22	3,11	2,69	12,22

Não urbano

CEMIG Distribuição S/A	DIC (em horas)					FIC (número de interrupções)			DMIC (em horas)	DICRI (em horas)
	Conjunto	DEC	FEC	ANUAL	TRIM.	MENSAL	ANUAL	TRIM.	MENSAL	MENSAL
Formiga	8	6	40,03	20,01	10,00	29,49	14,74	7,37	5,28	16,60

Figura 16 – Indicadores de qualidade de energia na cidade de Formiga-MG no ano de 2018.  
Fonte: Figura extraída de (ANEEL, 2019).

Analisando a Figura 16, é possível constatar que os indicadores coletivos DEC e FEC são iguais tanto para a região urbana, quanto para a região não-urbana. O maior problema está relacionado aos indicadores individuais de continuidade de energia elétrica. Nota-se que o DIC é maior que o dobro na região não urbana, se comparado a região urbana do município. O mesmo acontece de forma semelhante para os outros indicadores individuais.

A razão para tal diferença, é a distância do centro de distribuição de energia do município, sendo quanto maior distância da linha, maior será a possibilidade de

ocorrer falta de energia elétrica, por eventos naturais, ou falta de manutenção nas linhas, comprometendo seu funcionamento.

Com os fatos apresentados anteriormente, para consumidores que dependem da energia elétrica para produção ou extração de bens de consumo em centros não urbanos, faz-se necessário o uso de fontes ou geradores alternativos.

Dessa forma, no próximo capítulo é apresentada a metodologia necessária para o dimensionamento de um sistema de potência localizado na cidade de Formiga-MG, com finalidades de sanar problemas devido a falta de energia elétrica em locais mais afastados da zona urbana da cidade.

### 3 METODOLOGIA DESENVOLVIDA

Neste capítulo são apresentados os cálculos para dimensionamento de um sistema de potência localizado na cidade de Formiga-MG, com finalidades de sanar problemas devido a falta de energia elétrica em locais mais afastados da zona urbana da cidade, operando em paralelo com a rede de energia elétrica, ou seja, em condições de falta de energia elétrica pela rede, o sistema irá suprir o abastecimento da mesma. O conjunto consiste em uma potência diária de 20 kWh. Para dimensionamento do sistema utilizou-se os indicadores de qualidade disponibilizados pela ANEEL.

#### 3.1 Considerações preliminares

Para um dimensionamento adequado do sistema, usa-se as coordenadas geográficas do local. No caso utilizou-se as coordenadas da cidade de Formiga/MG: Latitude: 20°27' 52" S e Longitude: 45° 25' 35" W.

A Tabela 4 apresenta a relação entre a latitude do local de instalação e também o ângulo recomendado para instalação dos painéis fotovoltaicos.

Tabela 4 – Latitude do local em função do ângulo de inclinação do módulo fotovoltaico.

Latitude no Local de Instalação	Ângulo de inclinação recomendado
0° a 10°	$\alpha = 10^\circ$
11° a 20°	$\alpha = \text{latitude}$
21° a 30°	$\alpha = \text{latitude} + 5^\circ$
31° a 40°	$\alpha = \text{latitude} + 10^\circ$
41° ou mais	$\alpha = \text{latitude} + 15^\circ$

Fonte: Tabela adaptada de (HADAR, 2015).

Com as informações das coordenadas geográficas e da Tabela 4, pode-se determinar que a inclinação dos módulos será de 20°. A Tabela 5 mostra os valores

das constantes de correção do sistema, K, HSP e HSP.K e a temperatura máxima ao longo do ano para o município em consideração.

Tabela 5 – Valores das constantes de correção e da temperatura da localidade.

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
<b>K</b>	0,93	0,98	1,05	1,11	1,16	1,16	1,13	1,09	1,04	0,98	0,93	0,91
<b>HSP</b>	5,2	5,7	5	5	4,6	4,4	4,5	5,3	5,5	5,6	5	5
<b>HSP.K</b>	4,83	5,58	5,25	5,55	5,33	5,1	5,08	5,77	5,72	5,49	4,65	4,55
<b>Temp max (°C)</b>	23,1	23,1	22	2	18	17	17,8	19,3	21,1	22	22,2	21,6

Fonte: Tabela adaptada de (CRESESB, 2000).

A partir dos valores da Tabela 5, calculou-se os valores médios de K, HPS e HSP.K, que respectivamente são, 1,04, 5,06, 5,12. O valor da correção de 5,12 é utilizado nos métodos, calculando a potência diária que o módulo fotovoltaico produz.

### 3.2 Dimensionamento do Sistema

O sistema tem como finalidade atender uma carga de 20 kWh diário, totalizando em 600 kWh mensais. Esse sistema é capaz de suprir um consumidor que tem uma produção diária de aproximadamente mil litros de leite, ou outro tipo de alimento com alto índice de perecibilidade. O conjunto contém um resfriador de 1 cv, motor de bombeamento de 1 cv, uma bomba de sucção da ordenha de 2 cv além da iluminação do recipiente e pontos de tomadas em geral. O sistema será autônomo por 24 horas, esse valor se dá pelo DICRI do sistema. Tem-se que o índice no ano de 2018 foi de 16,6 horas, com isso o sistema terá um dia de autonomia.

Considerando que a energia diária fornecida às cargas sem perdas é de 20 kWh tendo em vista que o rendimento (R) do sistema fotovoltaico em questão é de 89% e a eficiência ( $\eta$ ) do inversor de frequência é de 90% tem-se, pela Equação (1), a energia do inversor.

$$E_i = \frac{E_d}{\eta} \quad (1)$$

$$E_i = \frac{20000}{0,9} = 22,222 \text{ kWh}$$

Sendo  $E_i$  a energia do inversor de frequência,  $E_d$  a energia diária de instalação e  $\eta$  a eficiência do inversor de frequência. A partir do cálculo presente na Equação (1), é possível calcular a energia real a ser produzida pelo sistema como mostra a Equação (2)

$$E_r = \frac{E_i}{R} \quad (2)$$

$$E_r = \frac{22222,22}{0,89} = 24,968 \text{ kWh}$$

O banco de baterias é responsável por armazenar energia proveniente dos módulos fotovoltaicos para posteriormente alimentar o inversor de frequência, alimentado assim as cargas. Baterias conectadas em série tem como objetivo aumentar a tensão do sistema, as mesmas conectadas em paralelo aumentam a corrente do sistema. A seguir fez-se o dimensionamento do banco de baterias para o caso (CEPEL, 2014).

Considerando a autonomia de um dia para o sistema, a tensão nominal do sistema de 24 V, a tensão nominal da bateria de 24 V, a mesma com capacidade de 100 Ah para um carregamento de 10 horas, considerando também a profundidade de descarga do banco de bateria de 80%, calculou-se a capacidade útil do banco de baterias além da capacidade real do mesmo. A Tabela 6 mostra os parâmetros da bateria UPLFP24 – 100C utilizados nos cálculos.

Tabela 6 – Valores dos parâmetros de operação nominal da bateria.

Parâmetros	Valor
Tensão (V)	25,6
Capacidade (Ah)	100
Energia (Wh)	2560
Comprimento (mm)	520
Largura (mm)	269
Altura (mm)	208
Tipo terminal	M8
Peso (Kg)	31,9
Garantia (anos)	5

Fonte: Tabela adaptada de (UNIPOWER, 2019).

A capacidade útil ( $C_u$ ) do banco de baterias pode ser calculada da seguinte maneira,

$$C_u = \frac{E_r \times N}{V_i} \quad (3)$$

$$C_u = \frac{24968,79 \times 1}{24} = 1040 \text{ Ah}$$

onde  $E_r$  é a energia real do sistema,  $N$  é a quantidade de módulos conectados em série e  $V_i$  é a tensão do sistema.

A capacidade real do banco de baterias é,

$$C_r = \frac{C_u}{P_d} \quad (4)$$

$$C_r = \frac{1040}{0,8} = 1300 \text{ Ah}$$

onde  $P_d$  é a profundidade de descarga de bateria.

Agora, pode-se calcular a quantidade de baterias conectadas em série,  $B_s$  Eq. (5), paralelo,  $B_p$  Eq. (6) e a quantidade de baterias necessárias,  $N_b$  Eq. (7) para o armazenamento adequado do sistema,

$$B_s = \frac{V_i}{V_b} \quad (5)$$

$$B_s = 1 \text{ bateria}$$

onde  $V_i$  é a tensão do sistema e  $V_b$  é a tensão da bateria,

$$B_p = \frac{C_r}{C_d} \quad (6)$$

$$B_p = \frac{1300}{100} = 13 \text{ baterias}$$

onde  $C_r$  é a capacidade real do banco de baterias e  $C_d$  é a capacidade de descarga máxima da bateria,

$$N_b = B_s \times B_p \quad (7)$$

$$N_b = 1 \times 13 = 13 \text{ baterias}$$

onde  $B_s$  é o número total de baterias conectadas em série e  $B_p$  é o número total de baterias conectadas em paralelo.

Após o cálculo do banco de baterias, dimensionou-se a quantidade de módulos conectados no sistema, tendo como parâmetros a potência de cada módulo e o fator de correção correspondente ao município de Formiga, citado anteriormente. A Tabela 7 apresenta os parâmetros do módulo fotovoltaico CS6U- 325, módulo escolhido para o dimensionamento, nas condições de operação nominal.

Tabela 7 – Valores dos parâmetros de operação nominal do painel fotovoltaico.

<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>
Potência máxima (W)	239
Tensão para máxima potência (V)	34
Corrente para máxima potência (A)	7,03
Tensão de circuito aberto (V)	42,4
Corrente de curto circuito (A)	7,54

Fonte: Tabela adaptada de (CANADIANSOLAR, 2019).

A potência do módulo fotovoltaico em razão da tensão do sistema, é dada por:

$$P_m = V_i \times I_{mp} \quad (8)$$

$$P_m = 34 \times 7,03 = 239 \text{ W}$$

onde  $V_i$  é a tensão do módulo fotovoltaico e  $I_{mp}$  é a corrente para máxima potência do módulo em questão.

A energia fornecida pelo painel fotovoltaico diariamente pode ser calculada da seguinte maneira, considerando o fator de correção diário de 5,12 calculado através da Tabela 5:

$$E_p = P_m \times H_s$$

(9)

$$E_p = 239 \times 5,12 = 1223,68 \text{ W}$$

onde  $P_m$  é a potência máxima do módulo nas condições nominais e  $H_s$  é fator de correção.

De posse do valor de energia fornecido por um módulo fotovoltaico, calculado anteriormente, em sequência calculou-se a quantidade de módulos necessários para o fornecimento da energia necessária para um dia de autonomia,

$$m_p = \frac{E_d}{E_p} \quad (10)$$

$$m_p = \frac{24968}{1123,68} = 20,4 \text{ módulos}$$

onde  $E_d$  é a energia diária do sistema e  $E_p$  é a energia produzida diariamente pelo módulo fotovoltaico.

Analogamente ao valor calculado no banco de baterias, o número de módulos conectados em série será de 1 painel fotovoltaico, obtendo assim um valor total de 21 módulos para o sistema.

Na Tabela 8 é apresentado os parâmetros do módulo fotovoltaico CS6U- 325 nas condições de STC.

Tabela 8 – Valores dos parâmetros na condição STC do painel fotovoltaico.

Parâmetros	Valor
Potência máxima (W)	325
Tensão para máxima potência (V)	37
Corrente para máxima potência (A)	8,78
Tensão de circuito aberto (V)	45,5
Corrente de curto circuito (A)	9,34

Fonte: Tabela adaptada de (CANADIANSOLAR, 2019).

De posse do banco de baterias e do painel fotovoltaico do sistema considerado, faz-se o dimensionamento do controlador de carga para o mesmo.

A corrente máxima fornecida por cada módulo na condição STC vale 8,78 A. Com 21 *strings* conectadas em paralelo, a corrente elétrica máxima do sistema será de 184,38 A, com um fator de segurança de 20%, tem-se o valor de 221,25 A.

Com o valor da corrente máxima calculada, dimensionou-se o sistema em relação a mesma e também em relação a tensão de operação do sistema, logo um controlador de carga de 24V/240 A. Como esse modelo não é comercial, adotou-se 3 controladores de 24V e 80A conectados em paralelo.

Após os cálculos anteriores, dimensionou-se o inversor de frequência, trata-se do componente mais caro do sistema, com isso pode superdimensionar o mesmo, tendo em vista que a carga pode ser ampliada posteriormente pelo consumidor. Para isso, calculou-se o valor da potência instantânea máxima do sistema, que representa

a soma das cargas atuando juntamente com o refrigerador, o motor e a iluminação do sistema, obtendo-se uma potência máxima de aproximadamente 3 cv ou 2,21 kW. Dessa forma pode-se determinar o inversor de frequência, e suas especificações técnicas são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Paramêtros referentes ao inversor de frequência.

<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>
Potência nominal	4000W
Potência de pico	8000W
Tensão de entrada	12V / 24V / 48V
Tensão de saída	110V / 220V
Rendimento	90%
Frequência	50Hz / 60Hz
Dimensões do inversor	460x180x128mm
Peso	7,72Kg

Fonte: Tabela adaptada de (JAY ENERGY, 2019).

O valor da potência nominal do inversor se dá através da máxima potência utilizada em um determinado instante de tempo, atentando-se ao fato de possíveis aumentos de cargas futuramente. Sendo assim, o mesmo poderá ser usado até seu limite nominal.

Após o dimensionamento do inversor de frequência, é necessário apresentar uma forma de transferir energia da rede elétrica para o gerador fotovoltaico. Dessa forma, utilizou-se um contator de transferência automática e um relé de tempo.

Na Figura 17 pode-se visualizar o modo operante da transferência automática para um sistema bifásico, quando ocorre falta de energia elétrica pela rede, o sistema irá transferir as cargas para o gerador fotovoltaico, além da transferência automática, o sistema também conta com uma transferência manual, fazendo com que o consumidor possa utilizar a fonte fotovoltaica, quando existir energia disponível.



Figura 17 – Quadro de transferência automática.  
Fonte: Figura extraída de (GN AUTOMAÇÃO, 2019).

Para o dimensionamento do modo operante de transferência automática deve-se considerar a corrente máxima de operação do sistema, levando em conta a potência de pico do inversor,

$$I_{max} = \frac{P_p}{V} \quad (11)$$

$$I_{max} = \frac{8000}{127} = 63 \text{ A}$$

onde  $I_{max}$ , é a corrente do módulo de transferência,  $P_p$  é a potência de pico e  $V$  é a tensão do sistema.

A Tabela 10 mostra os parâmetros do quadro de transferência automática.

Tabela 10 – Parâmetros do quadro de transferência automática.

Parâmetros	Valor
Corrente nominal (A)	70
Tensão de referência (V)	127/220
Tentativas de partida (un)	3
Teste periódico (min)	10
Vida mecânica (manobras)	20

Fonte: Tabela adaptada de (GN AUTOMAÇÃO, 2019).

De posse das informações obtidas neste capítulo, tem-se o sistema fotovoltaico autônomo dimensionado para a unidade consumidora em questão, com os devidos componentes especificados. No próximo capítulo, são apresentados os resultados e discussões referentes ao estudo.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo é apresentado um levantamento de custo para implementação do sistema dimensionado no capítulo 3. Posteriormente, é realizada uma análise econômica do sistema, com intuito de identificar os pontos positivos e de possíveis melhorias do sistema fotovoltaico dimensionado. Além disso apresentou-se uma comparação do sistema desenvolvido com um sistema costumeiramente utilizado, o gerador a diesel.

### 4.1 Investimento Total para Implementação do Sistema

Para determinar o custo da implementação do sistema dimensionado anteriormente, necessitou-se do valor de cada componente do sistema em questão, além de valores de mão de obra especializada. A Tabela 11 mostra os valores utilizados para estimar o custo de mão de obra em função das porcentagens dos equipamentos que compõem o sistema.

Tabela 11 – Levantamento do custo de mão de obra.

PARAMÉTRIOS	VALORES
Suporte de fixação de painéis	R\$120,00
Projeto elétrico e encargos da empresa	20% do valor (painéis + inversor +bateria)
Painel de proteção	2,5% do valor (painéis + inversor +bateria)
Instalação dos painéis	16,4% do valor (painéis + inversor)
Instalação banco de bateria	16,4% do valor (bateria + inversor)

Fonte: Adaptado de (MACEDO, 2017).

Após determinar o custo de mão de obra, além de outros serviços, especificou-se os valores dos componentes dimensionados no sistema, agregando-se ao valor citado anteriormente.

Tabela 12 – Valores dos componentes e da mão de obra.

Parâmetros	Quantidade (un)	Valor unidade (R\$)	Valor total (R\$)
Painel fotovoltaico	21	689	14469
Inversor	1	1959	1959
Quadro de transferência	1	2204	2204
Baterias	13	1799,98	23399,74
Controladores de carga	3	159	477
Instalação dos painéis, suporte	1	2372,92	2372,92
Projeto elétrico e encargos da empresa	1	7965,55	7965,55
Painel de Proteção	1	995,7	995,7
Instalação Banco de Baterias	1	4158,84	4158,84
<b>Total</b>	-	-	<b>58001,75</b>

Fonte: (Acervo do autor, 2019).

Como os valores de mão de obra e demais serviços dependem dos custos dos equipamentos do sistema, na Tabela 12 é possível visualizar os valores dos equipamento e serviços necessários para implementação do sistema dimensionado.

A Figura 18 demonstra os valores de cada componente em relação ao custo total.

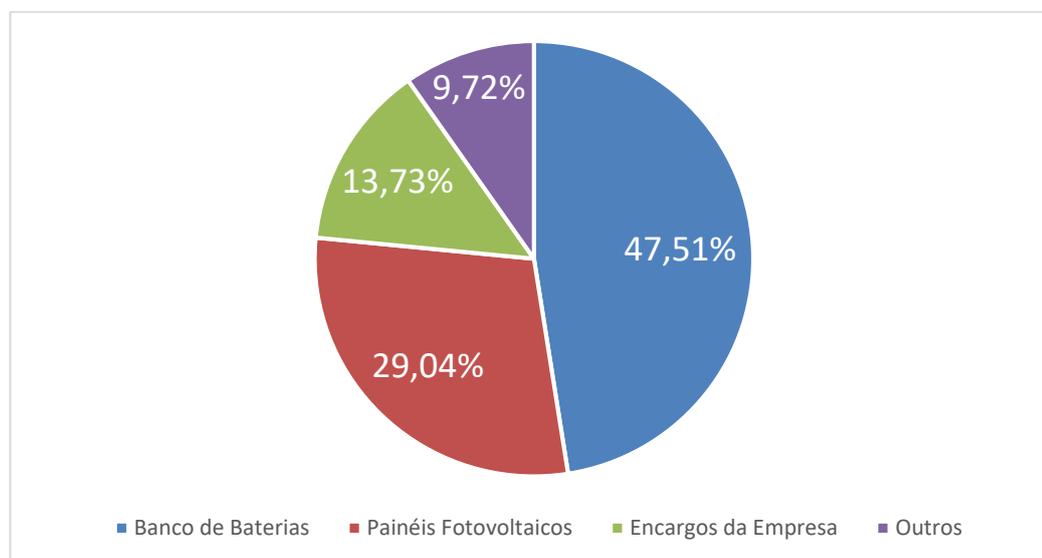


Figura 18 – Custo de cada componente em relação ao custo total

Fonte: (Acervo do autor, 2019).

Na Figura 18 nota-se que o maior custo do sistema é oriundo das baterias e da sua instalação no investimento inicial. A troca das baterias devem ser realizadas a cada 5 anos evitando assim, interrupções no sistema. O segundo maior custo é devido aos painéis fotovoltaicos. Os encargos da empresa representa o terceiro maior custo, o quarto maior custo é referente aos seguintes equipamentos: inversor de frequência, quadro de transferência, painel de proteção e controladores de carga (NEOSOLAR, 2019).

Após cálculo do valor do investimento inicial necessário para implementar o sistema dimensionado neste trabalho, na próxima seção é desenvolvida sua análise econômica.

#### 4.2 Tempo de retorno do investimento inicial

O tempo de retorno para o investimento depende diretamente dos valores dos indicadores de qualidade de energia elétrica do município, numa área não urbana. Com isso, o cálculo do mesmo terá como referência o ano de 2018 e seus indicadores. Assumiu-se que, a cada 2 meses ocorre uma falta que gere a perda da produção diária de leite ou outro alimento perecível, considerando um prejuízo de aproximadamente R\$1.500,00 dia, ou seja R\$9.000,00 ano, com isso o tempo de investimento é dado pela Equação (12),

$$n = \frac{V_i}{V_p} \quad (12)$$

onde  $n$  é o tempo de investimento (anos),  $V_i$  é o valor investido (R\$) e  $V_p$  é o valor das perdas (R\$).

Após determinar o valor das perdas anuais na instalação e também o valor do sistema como um todo, desconsiderando troca de componentes, tem-se que o tempo de retorno para o investimento é de,

$$n = \frac{58001,75}{9000} = 6,44 \text{ anos}$$

A garantia da bateria é de apenas 5 anos e do inversor de frequência é de 10 anos. A troca dos painéis fotovoltaicos deve ser realizada com 25 anos de utilização. Dessa forma, tem-se quatro trocas de baterias e duas trocas de inversor de frequência ao longo de 25 anos. Na Tabela 13 pode-se notar o fluxo de caixa do sistema dimensionado, do ano 0 que representa o valor inicial investido no sistema fotovoltaico dimensionado, até o ano 25. Ao longo do tempo deve-se verificar que a cada cinco anos tem uma troca de baterias, nos anos 6, 11, 16, 21 e a cada dez anos tem-se uma troca de inversores, nos anos 11 e 21. Vale ressaltar que neste fluxo de caixa não são contabilizados os custos de manutenção do sistema.

Tabela 13 – Fluxo de caixa do sistema.

<b>Anos</b>	<b>Saldo(R\$)</b>
0	-58.001,75
1	-49.001,75
2	-40.001,75
3	-31.001,75
4	-22.001,75
5	-13.001,75
6	-31.560,33
7	-22.560,33
8	-13.560,33
9	-4.560,33
10	4.439,67
11	-16.077,91
12	-7.077,91
13	1.922,09
14	10.922,09
15	19.922,09
16	1.363,51
17	10.353,51
18	19.363,51
19	28.363,51
20	37.363,51
21	16.845,93
22	25.845,93
23	34.845,93
24	43.845,93
25	52.845,93

Fonte: (Acervo do autor, 2019).

Na Figura 19 pode-se visualizar a evolução do fluxo de caixa da unidade consumidora ao longo de 25 anos, considerando as trocas de baterias e inversor de frequência, bem como os valores de mão de obra.

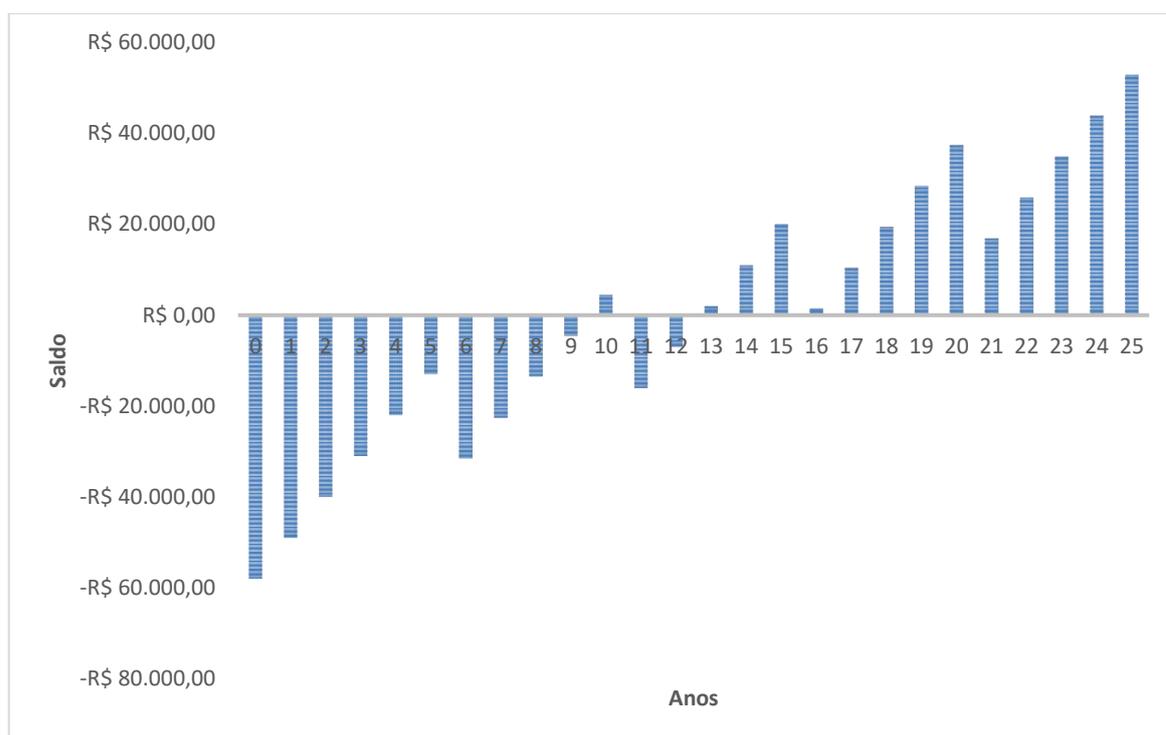


Figura 19 – Valor de retorno em relação ao tempo do sistema fotovoltaico dimensionado  
Fonte: (Acervo do autor, 2019).

Ao analisar a Tabela 13 e a Figura 19 é possível constatar que o sistema dimensionado apresenta um ponto de retorno a partir do décimo terceiro ano e, no final de 25 anos tem-se uma economia de cerca de R\$53.000,00. É perceptível que ao decorrer dos anos, o saldo torna-se positivo, o que caracteriza um sistema viável para aplicação no cenário demonstrado. Na próxima subseção é realizado a comparação do sistema fotovoltaico dimensionado com um gerador alternativo em caso de falta de energia elétrica.

### 4.3 Comparação com outro gerador alternativo

Para fins de comparação com outro gerador alternativo em caso de falta de energia elétrica, a Tabela 14 determina os parâmetros de um gerador elétrico à diesel.

Tabela 14 – Parâmetros referentes ao gerador a diesel.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valores</b>
Potência nominal (KVA)	5,5
Potência máxima (KVA)	6
Tensão de saída (V)	110/220
Frequência nominal (Hz)	60
Corrente nominal (A)	25
Partida	Elétrica
Capacidade do Tanque (L)	15
Autonomia (50% da carga) (Hs)	8
Nível de ruído (db)	70
Garantia (meses)	3
<b>Preço (R\$)</b>	<b>4.859,10</b>

Fonte: Tabela adaptada de (Agrotama, 2019).

Como mostrado na Tabela 14 o valor para aquisição do gerador a diesel é extremamente inferior ao investimento necessário para a instalação do sistema fotovoltaico dimensionado neste trabalho (cerca de R\$ 58.001,75). Entretanto, o tempo de garantia deste gerador é relativamente pequeno, apenas três meses, e assim, pode-se culminar em possíveis manutenções. Dessa forma, o sistema com gerador elétrico a diesel torna-se um sistema propenso a maiores transtornos, podendo não ser a solução adequada para sanar a falta de energia elétrica. Além do mais, o combustível utilizado para o funcionamento do gerador é um derivado do petróleo, e assim, tal solução é contrária a evolução das energias renováveis, colaborando ainda com o aumento da poluição ambiental.

Com isso, o sistema dimensionado no presente trabalho apresenta relativas vantagens em relação ao gerador alternativo, são elas: o uso de energia renovável e inesgotável, maior confiabilidade e possibilidade em utilizar o sistema de forma automatizada e manual. O modo automatizado funciona quando houver falta de energia e o manual pode ser acionado pelo consumidor quando for necessário, acarretando assim em uma maior economia em relação ao gasto com energia elétrica.

Pode-se elencar também a principal desvantagem do sistema fotovoltaico dimensionado, na qual é destacada a falta de especificação exata de falhas que ocasionam prejuízos ao consumidor cujo valor foi estimado para realizar a análise econômica. Com isso, é possível ter valores maiores ou menores de prejuízo em

relação a falta no decorrer do ano. Além do mais, o sistema proposto não utiliza de maneira eficiente a energia gerada e injetada na rede da concessionária, o que acarretaria em um melhor cenário de viabilidade econômica.

Por fim, com as vantagens e desvantagens supracitadas, verificou-se que o sistema fotovoltaico dimensionado atende a premissa inicial de ser um sistema autônomo e de atuar como um *nobreak* no caso de falta de energia elétrica em uma unidade consumidora. Salieta-se que o mesmo pode ser otimizado para diminuir o tempo de retorno do investimento inicial do consumidor, cujo desenvolvimento será objeto de estudo de um próximo trabalho.

## 5 CONCLUSÃO

As interrupções de energia elétrica oriundas de forma natural ou pela falta de investimento nas redes de Distribuição de Energia Elétrica geram transtornos para todos os consumidores. Entretanto, os não-urbanos são os mais afetados devido a sua distância da linha e pelo fato de uma falta prejudicar todo o restante do sistema. Tais interrupções podem gerar prejuízos econômicos, comprometendo o funcionamento de equipamentos e afetando, assim, a produção diária de bens de consumo.

Perante os transtornos gerados a esses consumidores, o presente trabalho apresentou uma possível solução para melhorar a confiabilidade do sistema, bem como prover autonomia para a unidade consumidora em questão. Sendo assim, inicialmente é dimensionado um sistema fotovoltaico autônomo, com o intuito de atuar paralelamente a rede elétrica, resolvendo, desta maneira, o problema da falta de energia elétrica no cenário considerado.

Posteriormente, é feito o levantamento de custo para a implantação do sistema proposto, bem como o cálculo do tempo de retorno do investimento inicial considerando um determinado número de faltas que geram prejuízos, trocas de baterias a cada cinco anos, troca de inversor a cada dez anos para um tempo de vida útil dos painéis de vinte e cinco anos. Todos esses procedimentos foram calculados desconsiderando-se o mal uso dos equipamentos e as manutenções do sistema. Desta maneira é obtido um *payback* de treze anos e uma economia de R\$ 53.000,00 obtida no final do vigésimo quinto ano.

Em seguida, como forma de enaltecer o trabalho, é comparado o sistema fotovoltaico dimensionado com um sistema utilizando um gerador alternativo à diesel, que geralmente é o equipamento utilizado para suprir a falta de energia elétrica nestas localidades. Com essa comparação é possível observar que o sistema fotovoltaico possui relevantes vantagens econômicas e estruturais perante o sistema alternativo.

Por fim, destaca-se que os resultados obtidos evidenciam que o sistema fotovoltaico dimensionado atende a premissa inicial de se comportar como um *nobreak* no caso de falta de energia elétrica na unidade consumidora considerada. Além do mais, o sistema tem um retorno financeiro que depende diretamente do número de faltas que gera prejuízos, isto é, o mesmo pode ser otimizado para um

melhor uso quando não se tem falta, aumentando-se, assim, a sua viabilidade econômica, bem como sua autonomia.

## 5.1 Trabalhos Futuros

A seguir são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Desenvolver uma ferramenta estatística para prever as faltas de energia elétrica, bem como estimar os seus prejuízos, otimizando assim a análise econômica do sistema proposto;
- Considerar a quantidade de energia elétrica gerada pelo sistema fotovoltaico autônomo e refazer a análise econômica do sistema;
- Analisar outros tipos de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos autônomos;
- Interligar o sistema proposto a outro sistema conectado a rede, tornando-o em um sistema híbrido;
- Analisar a viabilidade econômica do sistema proposto para diferentes potências instantâneas e diárias.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional –PRODIST: Módulo 1 –Introdução**. Revisão 9. 01 Mar. 2016.

\_\_\_\_\_. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil** / Agência Nacional de Energia Elétrica. Ed. – Brasília: ANEEL, 2008. 236p.

\_\_\_\_\_. **Indicadores Individuais de Continuidade por Município**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/limites-dos-indicadores-de-continuidade-por-municipio>>. Acesso em: 20 abr. 2019.

\_\_\_\_\_. **Resolução Normativa nº 482/2012**.

\_\_\_\_\_. **Resolução Normativa nº 687/2015**.

AGROTAMA. **Gerador de Energia a Diesel Silenciado 6KVA Monofásico Partida Elétrica/ Datasheet**. Disponível em: <[https://www.agrotama.com.br/produtos/gerador-de-energia-a-diesel-silenciado-6-kva-monofasico-partida-eletrica-nd7100es/nagano-ND7100ES,26,878/?gclid=Cj0KCQjw2v7mBRC1ARIsAAiw34-j5v0q70Rg0snIG7ymJQxlr6IKpW47\\_6y7I\\_zCNgkYSwUE2G-hteAaAorGEALw\\_wcB](https://www.agrotama.com.br/produtos/gerador-de-energia-a-diesel-silenciado-6-kva-monofasico-partida-eletrica-nd7100es/nagano-ND7100ES,26,878/?gclid=Cj0KCQjw2v7mBRC1ARIsAAiw34-j5v0q70Rg0snIG7ymJQxlr6IKpW47_6y7I_zCNgkYSwUE2G-hteAaAorGEALw_wcB)>. Acesso em: 11 abr. 2019.

AHMED, A. **Eletrônica de Potência**. São Paulo, 2000.

ALBRATZ SOLUÇÕES EM ENERGIA. **Energia Solar**. São Paulo. 2017. Disponível em: < <http://albratz.com.br/energia-solar/>>. Acesso em: 09 abr. 2019.

ALMEIDA, A.B. **Análise Econômica da Geração Fotovoltaica de uma Residência na Cidade de Divinópolis – MG**. 2018. 67f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Minas Gerais, Formiga, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ABSOLAR). **Energia Solar Fotovoltaica: Leilões A-6 e Realização de Ler 2018**. São Paulo, 2018. Disponível em: <[https://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/comissoes/comissoes-permanentes/cme/audiencias-publicas/2018/20-06-2018-esclarecer-a-nao-inclusao-da-energia-solar-fotovoltaica-no-leila-a-6-2018-1/apresentacoes/3\\_ABSOLAR%20-%20Energia%20Solar%20Fotovoltaica%20-%20Ricardo%20Barros\\_rev02.pdf](https://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/comissoes/comissoes-permanentes/cme/audiencias-publicas/2018/20-06-2018-esclarecer-a-nao-inclusao-da-energia-solar-fotovoltaica-no-leila-a-6-2018-1/apresentacoes/3_ABSOLAR%20-%20Energia%20Solar%20Fotovoltaica%20-%20Ricardo%20Barros_rev02.pdf)>. Acesso em: 27 mar. 2019.

\_\_\_\_\_. **A Aceleração da Energia Solar Fotovoltaica no Mundo**. São Paulo, 2018. Disponível em: <<http://www.absolar.org.br/noticia/noticias-externas/a-aceleracao-da-energia-solar-fotovoltaica-no-mundo.html>>. Acesso em: 24 mar. 2018.

ASSOCIAÇÃO EDUCACIONAL DOM BOSCO (AEDB). **Análise Tarifária e Avaliação do Fator de Carga Para Auxílio a Decisão: Estudo de Caso em Indústria Siderúrgica**. Disponível em: <<https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos16/1172488.pdf>>. Acesso em: 22 mar. 2019.

AVILA, C.E.S. DPS – **Dispositivos de Proteção Contra Surtos e Suas Aplicações em CFTV e em Telecomunicações**. 2010. 64f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade São Francisco, Itatiba, 2010.

BECKER, T.V. **Otimização da Demanda e Consumo de Energia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Medianeira**. 2014. 67f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Gestão Ambiental em Municípios) – UTFPR, Medianeira – PR, 2014.

BORJA, E.N. **Energia hidrelétrica e seus principais riscos hoje no Brasil: o caso das PCH's**. 2015. 88f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

CANADIAN SOLAR. **Maxpower CS6U-325/ Datasheet**. Disponível em: <<https://recursos.minhacasasolar.com.br/MediaCenter/Datasheet-Painel-Solar-Canadian-Solar-330W-CS6U-330P.pdf>>. Acesso em: 17 abr. 2019.

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA (CEPEL). **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro. 2014. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual\\_de\\_Engenharia\\_Fv\\_2014.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_Fv_2014.pdf)>. Acesso em: 07 abr. 2019.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE S. BRITO (CRESESB). **Atlas Solarimétrico**. 2018. Disponível em: <[http://www.cemig.com.br/ptbr/A\\_Cemig\\_e\\_o\\_Futuro/inovacao/Alternativas\\_Energeticas/Documents/atlas\\_solarimetrico.pdf](http://www.cemig.com.br/ptbr/A_Cemig_e_o_Futuro/inovacao/Alternativas_Energeticas/Documents/atlas_solarimetrico.pdf)>. Acesso em: 27 fev. 2019.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA (COPEL). **Especificação Técnica Para Medidor Eletrônico Bidirecional**. 2019. Disponível em: <[https://www.copel.com/hpcopel/root/pagcopel2.nsf/0/19F31F801B64E37203257C4E003EB572/\\$FILE/ETC%204.15%20Medidor%20eletronico%20BIDIRECIONAL.pdf](https://www.copel.com/hpcopel/root/pagcopel2.nsf/0/19F31F801B64E37203257C4E003EB572/$FILE/ETC%204.15%20Medidor%20eletronico%20BIDIRECIONAL.pdf)>. Acesso em: 10 mar. 2019.

CONSELHO REGIONAL DE ADMINISTRAÇÃO DE SÃO PAULO (CRASP). **Perspectivas Para a Energia Solar no Brasil. São Paulo, 2014.** Disponível em: <<https://www.crasp.gov.br/centro/conteudo/old/uploads/Artigo-Perspectivas-para-a-energia-solar-no-Brasil.pdf>>. Acesso em: 27 mar. 2019.

CSR ENERGIA SOLAR. **Sistema Fotovoltaico Híbrido (ON-GRID e OFF-GRID).** Serra – ES, 2017. Disponível em: < <http://www.csrenergiasolar.com.br/blog/sistema-fotovoltaico-hibrido-on-grid-e-off-grid>>. Acesso em : 25 mar. 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). 2019. **Matriz Energética e Elétrica.** Disponível em: <<http://epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 22 mar. 2019.

EXAME. **1,5 bilhão de pessoas vive sem energia elétrica no mundo.** 2015. Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/mundo/1-5-bilhao-de-pessoas-vive-sem-energia-eletrica-nomundo/>>. Acesso em: 23 fev. 2019.

GN AUTOMAÇÃO. **Quadro de Transferência Automática 70A / Datasheet.** Disponível em: <<http://www.gnautomacao.com.br/wp-content/uploads/2017/10/MANUAL-DE-INSTALA%C3%87%C3%83O-PAINEL-QTA-70A.pdf>>. Acesso em: 03 mai. 2019.

HADAR, R; ARDITI, S. **Systems and Methods for na Enhanced Watchdog in Solar Module Installations.** Estados Unidos, 2015.

INOVACARE SOLAR. **Tecnologia.** São Paulo, 2019. Disponível em: <<http://www.inovacare.solar/tecnologia>>. Acesso em: 29 abr. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE DEFESA DO CONSUMIDOR. 2018. **Brasil tem Problema Grave de Fornecimento de Energia Elétrica**. Disponível em: <<https://idec.org.br/pesquisa-do-idec/brasil-tem-problema-grave-de-fornecimento-de-energia-eletrica>>. Acesso em: 03 mar. 2019.

INSTITUTO DE PESQUISAS HOSPITALARES (IPH). **Sistemas Fotovoltaicos conectados à rede: breve histórico e aplicações em ambiente hospitalar**. São Paulo, 2019. Disponível em: <<http://www.iph.org.br/revista-iph/materia/sistemas-fotovoltaicos-conectados-a-rede-breve-historico-e-aplicacoes-em-ambiente-hospitalar>>. Acesso em: 22 mar. 2019.

JAY ENERGY. **Inversor de Frequência 4KW/ Datasheet**. Disponível em: <[https://drive.google.com/file/d/16vu85\\_lvOlrFYZUW4LSUG3epoFQ3L2Ck/view](https://drive.google.com/file/d/16vu85_lvOlrFYZUW4LSUG3epoFQ3L2Ck/view)>. Acesso em: 13 mai. 2019.

MACEDO, C. F. C. **Dimensionamento e Análise de Viabilidade Econômica de um Sistema Solar Fotovoltaico Residencial Conectado à Rede Elétrica em Arcos – MG**. 2017. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Minas Gerais, Formiga, 2017.

MAESTRI, Hugo Guilherme et al. **Dimensionamento de um sistema fotovoltaico autônomo para alimentação de um dispositivo de monitoramento de parâmetros elétricos em linhas de transmissão**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

NEOSOLAR. **Baterias**. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/baterias-estacionarias>>. Acesso em: 04 mai. 2019.

NASCIMENTO, A. C. do. **Princípio de Funcionamento da Célula Fotovoltaica**. Monografia (Pós-Graduação *Lato-Sensu* em Fontes Alternativas de Energia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

NASCIMENTO, Rodrigo Limp. Energia solar no Brasil: situação e perspectivas. **Camara dos Deputados. Brasil., Tech. Rep**, 2017.

OLIVEIRA, L.G.M. **Estratégias de Controle de Cargas e Descargas em Sistemas Fotovoltaicos Domiciliares**. São Paulo – SP. 2005. 123f. Dissertação de Mestrado (Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia) – USP, São Paulo, 2005.

PORTAL ENERGIA. **Vantagens e Desvantagens da Energia Solar**. 2017. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/vantagens-e-desvantagens-da-energia-solar/>>. Acesso em: 16 fev. 2019.

RÜTHER, Ricardo. Edifícios Solares Fotovoltaicos: **O potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede Elétrica Pública no Brasil**. Florianópolis: Labsolar, 2004. 114 p.

SOLIENS. **Entenda o que é Sistema Solar Híbrido**. Belo Horizonte – MG, 2019. Disponível em: <<https://www.solien.com.br/blog/energia-fotovoltaica/entenda-o-que-e-sistema-solar-hibrido/>>. Acesso em: 23 abr. 2019.

SOLSTICÍCIO. **Um Pouco de História: A Célula Fotovoltaica Faz 60 Anos**. Campinas – SP, 2019. Disponível em: <<https://www.solsticioenergia.com/2014/04/25/celula-fotovoltaica-faz-60-anos/>>. Acesso em: 14 mar. 2019.

SOUZA, V. G. M. **Avaliação da Adequação Tarifária do Uso de Energia Elétrica de uma Empresa Municipal de Captação e Distribuição de Água**. 2016. 69f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação) – EESC/USP. São Carlos – SP.

UNESP, 2002. **Teoria Básica dos Inversores de Tensão**. Disponível em: <<https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/lepnovo/curso2002/cap9.pdf>>. Acesso em 25 mar. 2019.

UNIPOWER. **Bateria UPLFP24 – 100C/ Datasheet**. Disponível em: <<https://unipower.com.br/categoria-produto/produtos/baterias/bateria-selada/>>. Acesso em: 13 mai. 2019.

VALLÊRA, A. M. **Meio Século de História Fotovoltaica. Solar, 2006**. Disponível em: <<https://www.tisst.net/documentos/sistemas-solares-termicos/>>. Acesso em: 05 mar. 2019.

VILLALVA, M.; GAZOLI, J. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. São Paulo: Erica, 2012.