

INSTITUTO FEDERAL DO AMAZONAS
CAMPUS MANAUS DISTRITO INDUSTRIAL
CURSO DE TECNOLOGIA EM ELETRÔNICA INDUSTRIAL

Alessandra Freitas Santos

**PESQUISA E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO
CONECTADO A REDE COM BASE NOS DADOS DO IFAM-CMDI**

Manaus - AM

2021

Alessandra Freitas Santos

**PESQUISA E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO
CONECTADO A REDE COM BASE NOS DADOS DO IFAM-CMDI**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Instituto Federal do Amazonas como requisito parcial para a obtenção do título de Tecnólogo em Eletrônica Industrial.

Orientador: Prof. Msc. Luiz Garcia Junior.

Manaus - AM

2021

ALESSANDRA FREITAS SANTOS

**PESQUISA E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA
FOTOVOLTAICO CONECTADO A REDE COM BASE NOS DADOS
DO IFAM-CMDI**

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado como requisito para obtenção do título de Tecnólogo no curso de Tecnologia em Eletrônica Industrial do Instituto Federal do Amazonas - IFAM.

Banca Examinadora:

Orientador:

Luiz Garcia Junior, Msc.
Instituto Federal do Amazonas – IFAM.

Membros:

Ewerton Andrey Godinho, Esp.
Instituto Federal do Amazonas – IFAM.

Celso Souza Cordeiro, Esp.
Instituto Federal do Amazonas – IFAM.

Manaus, ____/____/2021

*Dedicado à minhas filhas,
Alice e Maisie, as quais confiaram
em mim e foram pacientes na
minha trajetória, me fazendo ter
perseverança para chegar até
aqui.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por nunca me abandonar, me sustentar nos momentos que enfrentei obstáculos e me fortalecer para vencer todos eles, sem Ele nada disso seria possível.

Este trabalho conta com a participação de algumas pessoas que, durante os anos de realização do mesmo, fizeram toda a diferença:

Maria José, minha mãe, que colaborou diretamente para que eu concluísse minha graduação, ficando com minha filha pra eu poder ir às aulas e arcando com as despesas eventuais.

Aos amigos que caminharam junto comigo no decorrer da jornada pelo IFAM, incentivando, segurando a mão, e ajudando a não desistir. Me ensinaram sobre a cooperação e resiliência.

E por fim, à Alice e Maisie, minhas filhas, que, pelo simples fato de me escolherem como mãe, renovaram em mim a capacidade de alcançar tudo o que desejo, é tudo por elas e para elas.

RESUMO

Com a crescente demanda de energia elétrica e a sua geração de maneira ineficiente, nosso planeta está sofrendo graves alterações climático-ambientais. Para amenizar este quadro quase irreversível, torna-se cada vez mais viável a exploração de formas de energia limpa, ou seja, sem emissão de poluentes, como é o caso da energia solar fotovoltaica. O trabalho ora apresentado explora este tipo de energia que possui como fonte geradora o astro solar (sol), puramente renovável e à disposição para a sua utilização. É apresentado um estudo para a viabilidade técnica de um sistema fotovoltaico conectado à rede para a implantação no Campus Distrito Industrial do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas.

Palavras-chave: energia fotovoltaica, azimute e irradiação.

ABSTRACT

With the growing demand for electricity and its generation inefficiently, our planet is undergoing severe climate-environmental changes. In order to ease this almost irreversible situation, it is becoming increasingly feasible to explore clean energy forms, that is, without emission of pollutants, such as solar photovoltaic energy. The work to be presented explores this type of energy that has as a source the solar star (sun), purely renewable and available for its use. A study is presented for the technical feasibility of a photovoltaic system connected to the network for deployment in the Campus Distrito Industrial of the Federal Institute of Education, Science and Technology of Amazonas.

Key-words: photovoltaic energy, azimuth and irradiation.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 OBJETIVOS	12
1.2 OBJETIVO GERAL.....	12
1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	13
2.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E O EFEITO FOTOVOLTAICO.....	13
2.1.1 ENERGIA FOTOVOLTAICA NO BRASIL	15
2.2 TIPOS DE SISTEMA FOTOVOLTAICOS.....	17
2.2.1 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS OFF-GRID.....	17
2.2.2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ON-GRID.....	18
2.3 COMPONENTES DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO	19
2.3.1 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	20
2.3.1.1 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	21
2.3.1.1 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....	22
2.3.2 INVERSORES	22
2.3.3 BATERIAS	24
2.3.3.1 BATERIAS ESTACIONÁRIAS	24
2.3.3.2 BATERIAS DE ÍON DE LÍTIO	24
2.3.4 CONTROLADORES DE CARGA	24
2.4 LEGISLAÇÃO CORRESPONDENTE AO SISTEMA ON-GRID.....	26
2.5 TARIFAÇÕES.....	27
2.6 EXEMPLO DE FATURAMENTO	29
2.7 CARACTERÍSTICAS DE DESENVOLVIMENTO.....	31
2.7.1 IRRADIAÇÃO SOLAR.....	31
2.7.2 DESVIO AZIMUTAL.....	32
2.7.3 TEMPERATURA MÁXIMA E MÍNIMA	32
3 DESENVOLVIMENTO	33
3.1 COLETA DE DADOS	33
3.1.1 LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA.....	34
3.1.2 IRRADIAÇÃO SOLAR.....	35
3.1.3 CÁLCULO DA MÉDIA DE CONSUMO MENSAL.....	36
3.1.4 AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA MÁXIMA E MÍNIMA.....	36

	9
3.1.5 SÍNTESE DA COLETA DE DADOS.....	37
3.2 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA.....	38
3.2.1 POTÊNCIA FOTOVOLTAICA	38
3.2.2 NÚMERO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....	39
3.2.3 ESCOLHA DO MODELO DE INVERSOR.....	39
3.2.4 CÁLCULO DA TENSÃO MÍNIMA DOS MÓDULOS.....	40
3.2.5 CÁLCULO DA TENSÃO MÁXIMA DOS MÓDULOS.....	42
3.2.6 DEFINIÇÃO DE NÚMERO DE MÓDULOS MÍNIMO E MÁXIMO	43
3.2.7 SIMULAÇÃO DO SISTEMA UTILIZANDO O SOFTWARE “SAM”	43
4 CONCLUSÃO.....	46
REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui um grande potencial para a geração de energia elétrica a partir da irradiação solar, ou seja, energia incidente por unidade de superfície de um dado plano e por possuir em seu território uma das maiores reservas de silício do mundo. Essas riquezas naturais ainda são pouco exploradas em nosso país. Além do consumo de energia elétrica e sua dependência só aumentar, devido ao grande uso industrial e comercial acarretados pelo desenvolvimento econômico mundial, devido a isso novas formas de geração e gerenciamento de energia vem sendo estudadas com intuito de desenvolver tecnologias sustentáveis que possam diminuir o impacto ambiental de forma a garantir o não esgotamento dos recursos naturais existentes (CABRAL et al, 2012). Neste contexto, foi elaborado um estudo teórico para analisar a viabilidade técnica de implantação de um sistema de energia solar fotovoltaica no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas – Campus Manaus Distrito Industrial (IFAM-CMDI).

O sol é uma fonte natural inesgotável. E o Brasil tem um enorme potencial para gerar energia solar por ser um país tropical, onde o sol aparece em todos os lugares. Segundo Paim (1994):

O Sol, além de fonte de vida, é a origem de toda as formas de energia que o homem vem utilizando durante sua história e pode ser a resposta para a questão do abastecimento energético no futuro, uma vez que aprenda a aproveitar de maneira racional a luz que esta estrela constantemente derrama sobre o planeta. Brilhando a mais de 5 bilhões de anos, calcula-se que o Sol ainda privilegiará os seres humanos por outros 6 bilhões de anos, ou seja, está apenas na metade de sua existência. (PAIM, 1994, p. 47).

O engenheiro eletricista, Marcelo Villalva que desenvolveu o primeiro conversor eletrônico nacional para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica diz sobre a energia solar: “O que se espera é que no Brasil, com o grande potencial natural que tem, esse sistema, enfim, deslanche” (VILLALVA, 2012).

Os painéis solares fotovoltaicos para a geração de energia são cada vez mais eficientes e a energia solar é uma fonte limpa e renovável, pois não necessita de

queima de combustíveis fósseis, o que gera CO₂, e, não é necessário a realização de alagamentos para a construção de barragens, como ocorre nas hidrelétricas.

Os sistemas apresentados neste estudo, são os tipos *On-grid* e *Off-grid*. No modo *On-grid* o excedente de eletricidade gerada retorna para a rede elétrica através do painel de medição. Esse painel mede a energia que é consumida da rede, quando o consumo da residência é maior do que a capacidade de geração dos módulos fotovoltaicos. A energia elétrica que vai para a rede se transforma em "créditos de energia" para serem utilizados de noite ou nos próximos 60 meses pelo consumidor. Já no modo *off-grid* a energia solar produzida durante o dia que não é utilizada é armazenada. Para isso recorre-se aos acumuladores (baterias recarregáveis) ou baterias de ácido de chumbo, como sendo os elementos mais comuns para os armazenamentos de curta duração nas instalações de energia fotovoltaica. Estas baterias têm a melhor relação preço-eficiência e podem assegurar elevadas e reduzidas correntes de carga com uma boa eficiência. Há outros tipos de baterias já comercializados, como as baterias de níquel-cádmio, de hidreto metálico ou de íons de lítio.

A instalação deste sistema fotovoltaico nas residências é um projeto complexo, pois em cada região a incidência solar possui níveis diferentes de irradiação. Por isso, é aconselhável a contratação de profissionais habilitados para a instalação destes sistemas, para que seja feito um estudo, para saber qual é o ângulo de inclinação adequado para a instalação dos painéis solares, assunto que será comentado adiante. Também é necessário dimensioná-lo corretamente, isto é, a quantidade de módulos e baterias deve enquadrar-se da melhor forma possível à demanda energética e à radiação solar do local. Da mesma forma, a análise experimental do sistema fotovoltaico e dos equipamentos que o constituem faz-se necessário para determinar o seu desempenho. Este tipo de análise possibilita uma redução no custo, pois um sistema bem dimensionado e com equipamentos de qualidade, e de preferência de baixo custo, permite um desempenho otimizado dele. (Paim, 1994), ressalta:

Em qualquer caso, o uso dos coletores solares exige um dimensionamento cuidadoso, levando em consideração pormenores das condições climáticas do local do usuário. Isto demanda medidas precisas do perfil da intensidade solar durante dias, semanas e anos. (PAIM 1994, p. 112).

1.1 OBJETIVOS

Nesta seção serão apresentados os objetivos gerais e específicos que se visa alcançar neste trabalho.

1.2 OBJETIVO GERAL

Elaborar estudo teórico, visando analisar a viabilidade técnica da implantação de um sistema de energia fotovoltaica no IFAM-CMDI.

1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Apresentar breve histórico da energia solar fotovoltaico;
2. Apresentar os tipos de sistemas fotovoltaicos;
3. Descrever os componentes básicos de um sistema fotovoltaico;
4. Apresentar as normas vigentes;
5. Coletar dados para o projeto;
6. Realizar o dimensionamento e a comprovação por software;
7. Apresentar os resultados da pesquisa e desenvolvimento.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

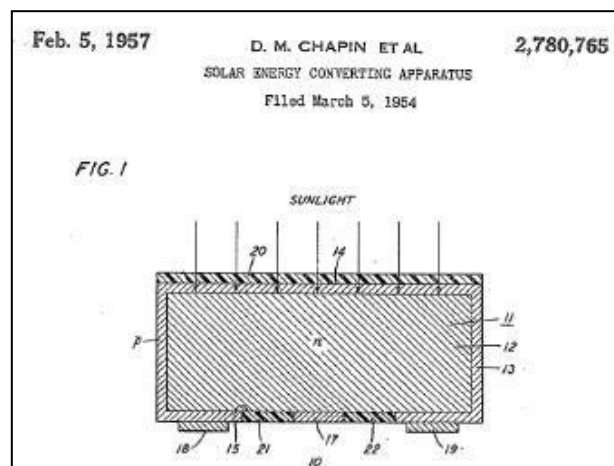
Nesta seção serão apresentados os tópicos relacionados aos fundamentos teóricos da energia solar fotovoltaica, seu histórico no Brasil, os fatores que influenciam a eficiência destes sistemas, também, as variedades que cercam o universo dos sistemas fotovoltaicos.

2.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E O EFEITO FOTOVOLTAICO

A energia fotovoltaica, popularmente conhecida como energia solar, é obtida por meio da conversão da luz do sol em energia elétrica, através do efeito fotovoltaico. Este efeito, foi descoberto por Edmond Becquerel, em 1839, que observou a existência de uma pequena diferença de potencial nos terminais de um eletrodo metálico, mergulhado em uma solução de eletrólito, quando submetido a uma fonte de luz. Alguns anos depois, em 1877, foi desenvolvido o primeiro sólido capaz de gerar eletricidade através do efeito fotovoltaico, porém com eficiência extremamente baixa, em torno de 0,5% (BRITO, 2013).

O avanço tecnológico, juntamente com os estudos relacionados aos processos de purificação e dopagem dos semicondutores, permitiu a concepção da primeira célula solar de silício moderna em 1954 (Figura 1), esta célula possuía características semelhantes às encontradas atualmente, apesar de possuir uma eficiência em torno de 6% (BRITO, 2013).

Figura 1 – Extrato da patente da primeira célula solar



Fonte: Brito (2013, p. 2)

Inicialmente, a tecnologia fotovoltaica foi proposta para empresas do setor de telecomunicações, sendo uma fonte de energia para sistemas instalados em lugares de difícil acesso para redes elétricas convencionais (Pinho e Galdino, 2014).

Segundo Brito, 2013, um fator que impulsionou o desenvolvimento das células fotovoltaicas, foi a corrida espacial, entre Estados Unidos e União Soviética, por volta de 1950, onde percebeu-se que o elevado custo, fazendo com que sua utilização fosse destinada apenas a aplicações especiais, tais como utilização em satélites, sendo que para esta aplicação, possuía o menor custo, menor peso e maior segurança na geração de energia (Figura 2) .

Figura 2 – A primeira aplicação de uma célula solar de silício, EUA, 1955



Fonte: Brito (2013, p. 2)

Desde então, a tecnologia que envolve os sistemas fotovoltaicos segue em constante evolução. No ano de 1978, a produção da indústria fotovoltaica já ultrapassava a marca de 1 MWp/ano. No quesito de produção desta tecnologia os Estados Unidos estiveram na liderança durante a maior parte dos anos 1990 (Pinho e Galdino, 2014).

Neste período, surgiram políticas de governo na Alemanha e no Japão que resultaram em aumentos substanciais para este mercado. Em parte, tais políticas foram impulsionadas pelo protocolo de Kyoto, que firmou um compromisso com a redução na emissão de CO₂.

2.1.1 ENERGIA FOTOVOLTAICA NO BRASIL

Com forte apelo ecológico, e com custo de implantação menor, a energia fotovoltaica tem se tornado cada vez mais popular no Brasil. Segundo dados do BEN (Balanço Energético Nacional), a energia solar representa cerca de 1% da matriz energética brasileira, sendo que no ano de 2020 houve um crescimento de 61,5% na geração total de energia solar fotovoltaica em relação a 2019, chegando a 10,75 GWh, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – BEN 2021 Geração Elétrica (GWh)

Fonte	2019	2020	Δ 20/19
Hidrelétrica	397877	396327	-0,4%
Gás Natural	60448	53464	-11,6%
Eólica	55986	57051	1,9%
Biomassa	52543	56167	6,9%
Nuclear	16129	14053	-12,9%
Carvão Vapor	15327	11946	-22,1%
Derivados do Petróleo	6926	7745	11,8%
Solar Fotovoltaica	6655	10750	61,5%
Outras	14438	13696	-5,1%
Geração Total	626329	621199	-0,8%

Fonte: Adaptado de Relatório Síntese BEN (2021, p.42)

Além do crescimento expressivo na quantidade de energia elétrica gerada em 2020, houve também um considerável aumento na capacidade instalada no Brasil, como mostra a Tabela 2.

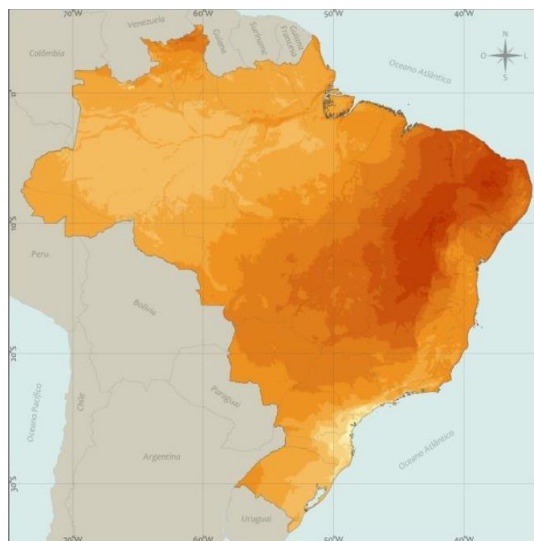
Tabela 2 – BEN 2021 Capacidade Instalada (MW)

Fonte	2019	2020	Δ 20/19
Hidrelétrica	109058	109271	0,2%
Térmica	41219	43057	4,5%
Eólica	15378	17131	11,4%
Solar	2473	3287	32,9%
Nuclear	1990	1990	0,0%
Capacidade Disponível	172137	176756	2,7%

Fonte: Adaptado de Relatório Síntese BEN (2021, p.42)

Outro fator que favorece o Brasil na produção de energia solar fotovoltaica, é a localização geográfica, que apresenta durante todos os meses do ano, grande potencial de geração (PEREIRA et al., 2006). Além disso, apresenta um alto índice de irradiação em praticamente todo seu território, conforme mostra a Figura 3, onde a média fica entre 4500 Wh/m² e 6530 Wh/m². Contudo, o país apresenta baixo aproveitamento desse benefício para geração de energia elétrica se comparado com os países europeus, nos quais a radiação solar é menor e a tecnologia fotovoltaica é muito mais difundida (PINHO & GALDINO, 2014).

Figura 3 – Total diário irradiação global horizontal – média anual Brasil



Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar, INPE (2017)

2.2 TIPOS DE SISTEMA FOTOVOLTAICOS

Esses sistemas podem ser divididos em duas classificações, sistemas do tipo “Off-Grid”, desconectados da rede elétrica, e sistemas “On-Grid”, conectados a rede elétrica da concessionária.

2.2.1 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS OFF-GRID

Com custos mais elevados que os sistemas “On-Grid”, os sistemas “Off-Grid”, também considerados sistemas isolados, são caracterizados por não serem conectados à rede elétrica, ou seja, o sistema se autossustenta através da utilização de banco de baterias para armazenamento da energia gerada.

Por esse motivo, esse sistema é completo, e inclui todos os componentes citados abaixo:

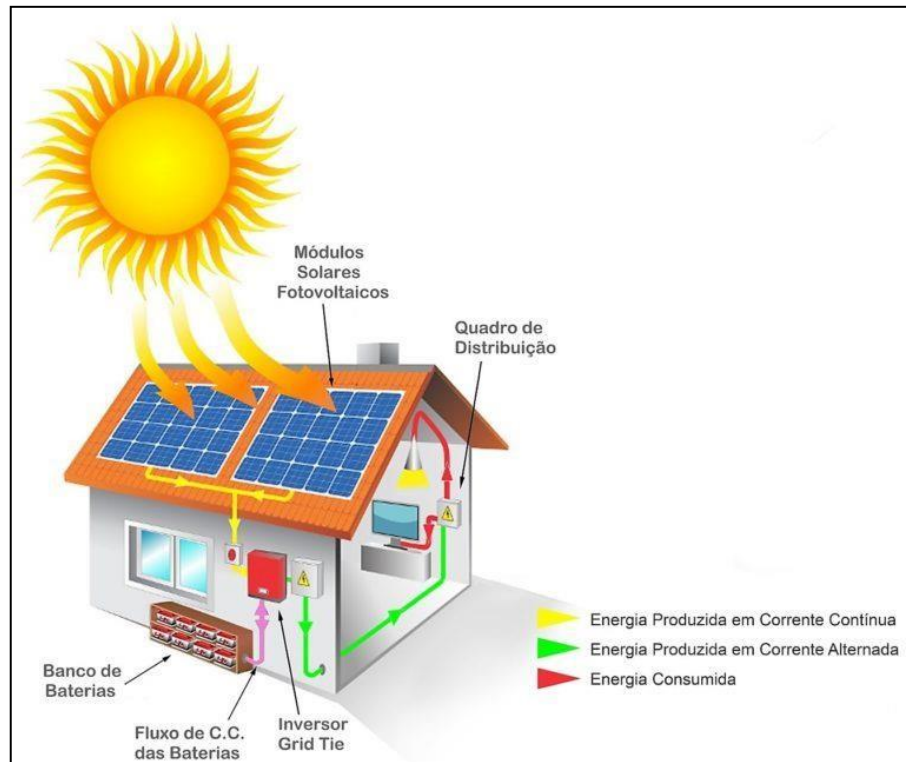
- Bloco gerador: painéis solares; cabos; estrutura de suporte;
- Bloco de condicionamento de potência: inversores; controladores de carga;
- Bloco de armazenamento: baterias.

Estes sistemas são amplamente utilizados em locais onde não exista, ou se torne muita cara a instalação de rede elétrica, por exemplo, fazendas, torres de telefonia, entre outros.

A energia gerada por estes sistemas é armazenada por baterias, que por sua vez garantem o funcionamento do sistema em períodos com pouca, ou sem irradiação solar, como dias nublados, chuvosos ou em períodos noturnos. Ou seja, durante o dia, em momentos em que a geração de energia supera o consumo, o excedente é armazenado no banco de baterias para que, no momento que a demanda for maior que a geração do sistema, a energia passe a ser fornecida também pelo sistema de armazenamento.

Devido ao banco de baterias ser a única fonte de energia para momentos sem irradiação solar, é necessário dimensioná-lo corretamente, levando em consideração características climáticas do local e a demanda de energia do sistema. Na figura 4 observa-se o esquema de funcionamento de um sistema fotovoltaico Off-Grid.

Figura 4 – Esquema de um sistema fotovoltaico Off-Grid



Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar, INPE (2017)

2.2.2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ON-GRID

Sistemas On-Grid, são também conhecidos como sistemas conectados a rede. Nesse tipo de sistema a potência gerada é diretamente fornecida a rede da concessionária, dispensando assim o uso de acumuladores. Sistemas fotovoltaicos deste tipo vêm se tornando cada vez mais populares, tanto no Brasil, quanto em diversos países na Europa e América do Norte (PINHO & GALDINO, 2014).

No Brasil, os sistemas fotovoltaicos, considerados como microgeração e minigeração devem atender as regulamentações da Resolução Normativa ANEEL N° 482/2012, que posteriormente foi revisada pela Resolução Normativa N° 687/2015, devem atender também aos procedimentos de distribuição (PRODIST), e por último, atender as normas de acesso das distribuidoras de energia locais (PINHO & GALDINO, 2014).

A resolução da ANEEL define como sistema de microgeração, sistema com potência instalada menor ou igual à 75KW. Já sistemas de minigeração, potência instalada acima de 75KW e menor ou igual a 5 MW. A resolução de 2015, prevê

também, além da utilização de energia fotovoltaica, todo tipo de energia renovável a sistemas de microgeração e minigeração (ANEEL, 2018).

Também é previsto na RN N°482/2012 o sistema de compensação de créditos de energia, onde a unidade consumidora que produz energia elétrica que excede o próprio consumo, deverá ser creditada para uso futuro, expirando no prazo de 60 meses. Tais créditos poderão ser utilizados para abater o consumo de outras unidades consumidoras, desde que ambas tenham a mesma titularidade (PINHO & GALDINO, 2014).

Na figura 5, é exemplificado graficamente os componentes de um sistema fotovoltaico On-Grid, onde a energia é gerada pelos módulos fotovoltaicos, passa pelo inversor, que realiza a alimentação da residência e o excedente é enviado a rede elétrica.

Figura 5 – Esquema de um sistema fotovoltaico On-Grid



Fonte: Portal Solar, 2018

2.3 COMPONENTES DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO

Nesta seção, serão apresentados os componentes que pertencem aos sistemas fotovoltaicos, tanto Off-Grid, quanto On-Grid. Será explanado sobre os módulos fotovoltaicos, os inversores utilizados para a aplicação, os controladores de

carga e por último sobre os acumuladores de energia, também conhecidos como baterias.

2.3.1 MODULOS FOTOVOLTAICOS

Os módulos fotovoltaicos são compostos por células fotovoltaicas conectadas em arranjos para produzir tensão e corrente suficiente para a utilização a qual foi projetada, ao mesmo tempo em que promove a proteção das células (PINHO & GALDINO, 2014).

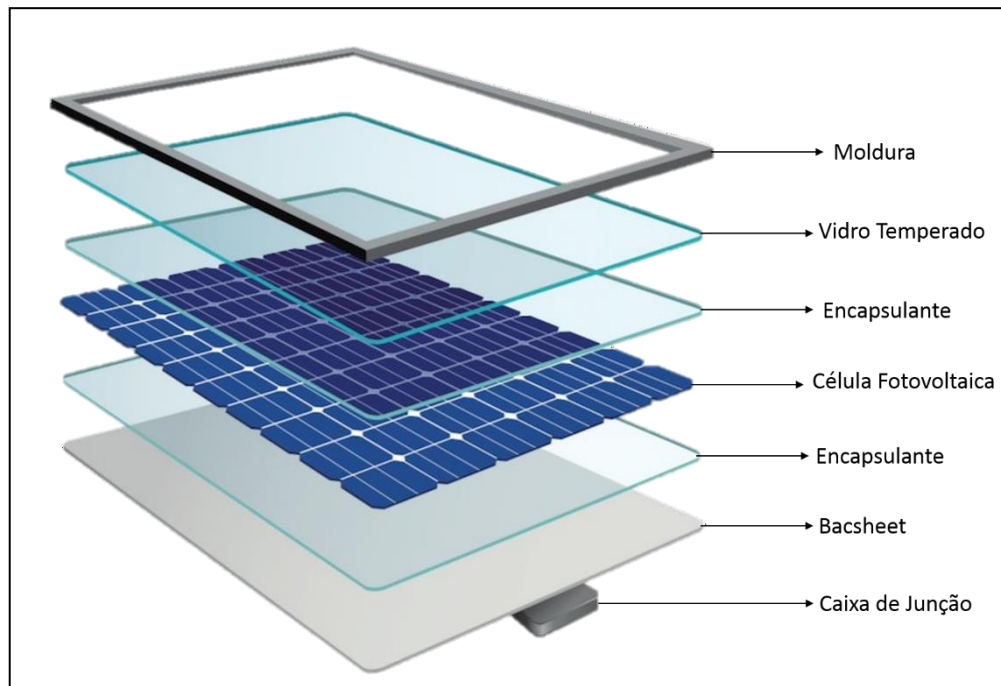
Uma célula fotovoltaica simples, consiste basicamente em um diodo de grande área, e um substrato de material semicondutor onde é criado um campo elétrico interno permanente, situado na junção dos materiais onde existe a barreira de potencial, também conhecida como camada de depleção. Quando a radiação atinge um átomo do semicondutor, este por sua vez, libera um elétron que pode ser conduzido pelo campo elétrico interno para os contatos, contribuindo assim para a corrente produzida pela célula fotovoltaica (MIGUEL & SILVA, 2006).

O silício que utilizado para fabricar células fotovoltaicas provém do dióxido de silício. O material passa por um processo de fundição, onde é purificado utilizando fluxo de oxigênio, sendo solidificado posteriormente em lingotes. Seu grau de pureza é da ordem de 98 ou 99%. A indústria das células fotovoltaicas, precisa não só de silício muito puro, mas também que este se encontre em forma cristalina. Segue-se, portanto, um processo de cristalização. Existem diversas tecnologias, que produzem monocristais (um lingote com um só cristal), multicristais (um lingote com vários cristais) ou fitas de silício multicristalino (finas folhas de silício já com a espessura necessária). Em seguida, procede-se ao corte das folhas em pequenas fatias, ou bolachas (*wafers*) com alguns décimos de milímetro de espessura, estes por sua vez são utilizados para produzir as células fotovoltaicas (MIGUEL & SILVA, 2006).

O processo de fabricação das células em si consiste em dois passos. Primeiro faz-se a deposição dos dopantes para criar a junção pn (o campo elétrico intrínseco à célula, que vai recolher as cargas produzidas pela radiação no silício) e depois procede-se à deposição dos contatos elétricos na superfície da célula, para enviar essas cargas para o sistema que se pretende alimentar (ou eventualmente armazenar). As células são depois montadas em série num módulo e encapsuladas,

para proteção mecânica e isolamento elétrico, na Figura 6 é representado os componentes de um módulo fotovoltaico (MIGUEL & SILVA, 2006).

Figura 6 – Esquema montagem de um modulo fotovoltaico



Fonte: Casa Solar, 2019

2.3.1.1 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Os módulos fotovoltaicos podem ter diferentes valores para tensão e corrente nominal, isso depende da associação e das características das células. Para cada aplicação, deverá ser observado um determinado nível de tensão, por exemplo para carregar completamente baterias de chumbo-ácido de 12 V é necessária uma tensão mínima de 14 V, sendo que os módulos de vem produzir aproximadamente 16V, devido as perdas existentes no sistema, já para sistemas conectados à rede os níveis de tensão necessários são muito variáveis e diversas vezes exigem a associação de vários módulos em serie (PINHO & GALDINO, 2014).

Com o avanço das tecnologias nos meios de produção, é possível atualmente realizar a produção em grande escala, trazendo assim uma significativa redução no preço dos módulos e acarretando numa melhor qualidade e padrão em sua fabricação (PINHO & GALDINO, 2014).

2.3.1.1 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Comumente, os módulos são identificados pela sua potência elétrica de pico (Wp), porém, deve-se observar um conjunto de características compatíveis com a determinada aplicação. A definição da potência de pico, é realizada nas condições padrões de ensaio, considerando irradiância solar de 10 W/m², sob uma distribuição espectral padrão para AM 1,5 e temperatura de célula de 25°C (PINHO & GALDINO, 2014).

Alguns fatores podem alterar as características elétricas dos módulos fotovoltaico, um deles é a irradiância solar, onde a corrente elétrica gerada pelo módulo aumenta conforme aumenta a irradiância solar, em outras palavras, em dias com tempo aberto e com grande presença de sol, o sistema tenderá a gerar energia muito mais próximo ao ponto máximo ao qual foi projetado (PINHO & GALDINO, 2014).

Outro fator que altera as características do sistema é a variação de temperatura. Quando a temperatura ambiente se eleva há uma queda de tensão, a corrente gerada sofre uma pequena elevação, porém, não compensa as perdas causadas pela perda de tensão (PINHO & GALDINO, 2014).

2.3.2 INVERSORES

Os inversores são dispositivos eletrônicos que fornecem energia elétrica em corrente alternada (c.a.), a partir de uma fonte de energia elétrica em corrente contínua (c.c.). No caso deste projeto, a energia c.c. é proveniente dos módulos fotovoltaicos (PINHO & GALDINO, 2014).

A tensão de saída do inversor, deve ter a amplitude, frequência e conteúdo harmônico adequados as cargas que serão alimentadas, no caso, todos os eletrodomésticos e circuitos presentes na edificação onde o sistema estiver instalado (PINHO & GALDINO, 2014).

Os inversores CC-CA para sistemas fotovoltaicos possuem algumas características, como descritas abaixo.

Potência nominal e potência máxima, respectivamente, é a potência normal de operação a qual o inversor foi projetado, e a potência que o inversor pode fornecer em situações de sobrecarga. A potência nominal deve ser definida com base nos

equipamentos que serão alimentados no sistema, já a potência máxima é útil para alimentar equipamentos que utilizam motores elétricos, como refrigeradores e bombas d'água, pois os motores requerem corrente e potência maiores no momento da partida (VILLALVA, 2012).

A tensão de entrada, é a tensão a qual o inversor é alimentado pelo circuito de placas fotovoltaicas, sendo comum tensões de 12 V, 24 V e 48 V. A tensão de saída é a tensão que o inversor fornece aos equipamentos que ele alimenta, o nível de tensão neste caso, dependerá da tensão da rede elétrica no local de instalação, sendo no Brasil 127 ou 220V. Outra característica, é a frequência de saída, que assim como a tensão, depende de onde será utilizada para definir se será 50 Hz ou 60 Hz (VILLALVA, 2012).

Outra característica importantíssima dos inversores, que deve ser observada no projeto de sistemas fotovoltaicos, é a eficiência, que nada mais é que a relação entre a potência de saída e a potência de entrada do inversor. Bons inversores possuem eficiência acima de 90%, e essa informação é facilmente encontrada nos manuais do fabricante do inversor (VILLALVA, 2012). Um modelo de inversor pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 – Modelo de Inversor Fotovoltaico



Fonte: WEG, 2021

2.3.3 BATERIAS

As baterias, muito comuns em diversos tipos de equipamentos, também tem sua aplicação nos sistemas fotovoltaicos, especificamente no sistema off-grid, que não está conectado à rede da concessionária, dessa maneira a energia gerada durante o dia que não é consumida, pode ser armazenada para utilização em períodos que não existe irradiação solar suficiente para suprir a demanda de energia do circuito a qual esse sistema está conectado.

2.3.3.1 BATERIAS ESTACIONÁRIAS

As baterias estacionárias, também conhecidas como Chumbo-Ácido, são as baterias mais encontradas e as que estão a mais tempo no mercado. Além da energia fotovoltaica esse tipo de bateria também pode ser utilizado em diversas aplicações como, sistemas UPS, centrais telefônicas, alarmes, iluminação de emergência, ou qualquer outra aplicação que demande corrente moderada por mais tempo, ao invés de uma grande quantidade de corrente por um curto período. Essas baterias duram em torno de 4 anos, e dependendo dos seus ciclos de carga e temperatura do ambiente podem chegar até 10 anos de duração (PINHO & GALDINO, 2014).

2.3.3.2 BATERIAS DE ÍON DE LÍTIO

As baterias de íon de lítio surgiram com a proposta de melhorar, e muito, o armazenamento de energia elétrica em sistemas fotovoltaicos. Essa bateria se destaca entre as formas de armazenamento devido a sua alta densidade energética, cerca de 80-150 Wh/Kg, sendo essa a relação de quantidade de energia disponível no sistema, obtida por reação eletroquímica pela massa ou volume do sistema. Outra característica é a durabilidade dessas baterias, que podem chegar até 20 anos, porém possuem um custo maior e relação as baterias estacionárias (PINHO & GALDINO, 2014).

2.3.4 CONTROLADORES DE CARGA

Em sistemas Off-Grid, é necessária a utilização de um dispositivo denominado, controlador de carga. Este equipamento é o elemento mais complexo dos sistemas

fotovoltaicos. Sua função é controlar o processo de carga e descarga da bateria, a fim de evitar que exista sobrecarga ou então descarga profunda, sendo que ambos podem trazer danos irreversíveis a bateria.

Existem diversos tipos de controladores de carga disponíveis no mercado. Alguns determinam o estado de carga da bateria integrando a corrente que está entrando ou saindo, ao longo do tempo. Outros indicam o estado de carga da bateria através da densidade do eletrólito. Porém, o tipo mais comum, estima o estado de carga medindo a tensão nos seus terminais. Neste caso, a tensão da bateria é permanentemente monitorada para que seja mantida entre os valores mínimo e máximo definidos no projeto do controlador. Quando a tensão máxima na bateria é alcançada, o controlador interrompe o fluxo de corrente elétrica gerada pelo módulo fotovoltaico. Por outro lado, o controlador desliga o módulo alimentado quando a tensão na bateria atinge o valor mínimo (SILVA, 2012).

Existem alguns tipos de controladores de cargas, sendo que estes se diferenciam pelo tipo de construção física, série ou paralelo e pelas estratégias de algoritmos de controle de carga, "On/Off" ou tensão constante (cv).

Nos controladores em série, a chave que controla o fluxo de corrente gerada pelo módulo fotovoltaico, fica em série com o módulo alimentado. Nos controladores em paralelo, a chave, como o próprio nome sugere, fica em paralelo com o módulo fotovoltaico. Neste caso, quando a bateria atinge o valor máximo de carga, a chave é fechada e como o módulo fotovoltaico continua gerando energia elétrica, a corrente é curto-circuitada, sendo dissipada por um shunt, elemento dissipador do controlador de carga, neste momento a energia gerada pelo módulo passa a ser dissipada na forma de calor (SILVA, 2012).

Além dos dois métodos de controle de carga citados acima, existe um terceiro, cujo a tecnologia é considerada a mais moderna para controle de sistemas fotovoltaicos, é denominado MPP (Ponto de Potência Máxima). Quando são utilizados controladores em série ou em paralelo podem ocorrer perdas de energia na ordem de 10% a 40 %, devido a tensão de do módulo de armazenamento determinar o ponto de operação do sistema fotovoltaico.

O controlador de carga MPP, realiza a avaliação da curva de operação do módulo fotovoltaico, e determina o ponto de máxima potência. Esse tipo de controlador é aconselhável a ser utilizado para módulos fotovoltaicos com potências

superiores a 200 W, isso devido a módulos de menor potência possuírem perdas maiores do que os ganhos obtidos com o controlador MPP.

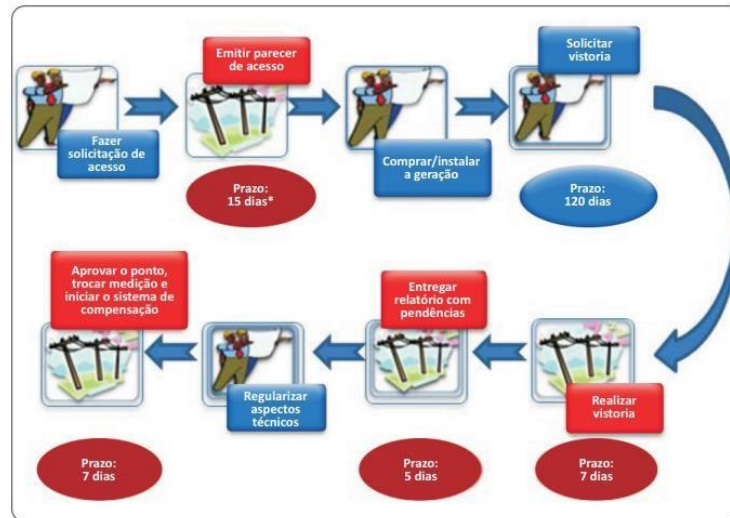
Quanto as estratégias de controle existem dois tipos, considerados os mais comuns. O primeiro é o método “On-Off”, sendo o mais simples e de menor custo, utiliza chaves (Mosfet ou relé eletromecânico) para interromper o fluxo de corrente oriunda do módulo fotovoltaico para as baterias quando esta atinge o valor máximo ($V_{m\acute{a}x}$). O segundo método, é o método da tensão constante, onde o controlador regula a corrente que carrega a bateria com o objetivo de manter a tensão na bateria no valor constante igual a tensão máxima ($V_{m\acute{a}x}$) suportada por ela. Existem dois tipos de estratégia de controle a tensão constante: controle linear e a PWM (Modulação por Largura de Pulso) (SILVA, 2012).

2.4 LEGISLAÇÃO CORRESPONDENTE AO SISTEMA ON-GRID

Com o objetivo de reduzir barreiras para a conexão de pequenas centrais geradoras na rede de distribuição, a ANEEL publicou a Resolução Normativa nº 482/2012 estabelecendo os procedimentos para acesso de micro e mini geradores ao sistema de distribuição. Por definição, a microgeração distribuída refere-se a uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 quilowatts (kW), enquanto a mini geração distribuída diz respeito às centrais geradoras com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 megawatt (MW), para a fonte hídrica, ou 5 MW para as demais fontes. (ANEEL, 2014)

Para que a central geradora seja caracterizada como micro ou mini geração distribuída, são obrigatórias as etapas de solicitação e de parecer de acesso. A solicitação de acesso é o requerimento formulado pelo consumidor, e que, uma vez entregue à distribuidora, implica a prioridade de atendimento, de acordo com a ordem cronológica de protocolo. A Figura abaixo ilustra as etapas e prazos do procedimento de acesso que devem ser seguidos pelo consumidor (destacados em azul) e pela distribuidora (destacados em vermelho). (ANEEL, 2014)

Figura 8 – Procedimentos e etapas de acesso



Fonte: ANEEL, 2014

2.5 TARIFAÇÕES

Uma importante inovação trazida pela Resolução Normativa nº 482/2012 é o Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Esse sistema permite que a energia excedente gerada pela unidade consumidora com micro ou minigeração seja injetada na rede da distribuidora, a qual funcionará como uma bateria, armazenando esse excedente. Quando a energia injetada na rede for maior que a consumida, o consumidor receberá um crédito em energia (kWh) a ser utilizado para abater o consumo em outro posto tarifário ou na fatura dos meses subsequentes. Os créditos de energia gerados continuam válidos por 60 meses. (ANEEL, 2014)

Há possibilidade de o consumidor utilizar esses créditos em outras unidades previamente cadastradas dentro da mesma área de concessão e caracterizada como autoconsumo remoto, geração compartilhada ou integrante de empreendimentos de múltiplas unidades consumidoras (condomínios), em local diferente do ponto de consumo, definidas da seguinte forma:

Geração compartilhada: Caracterizada pela reunião de consumidores, dentro da mesma área de concessão ou permissão, por meio de consórcio ou cooperativa, composta por pessoa física ou jurídica, que possua unidade consumidora com micro geração ou mini geração distribuída em local diferente das unidades consumidoras nas quais a energia excedente será compensada.

Autoconsumo remoto: caracterizado por unidades consumidoras de titularidade de uma mesma pessoa (Física ou Jurídica) que possua unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída em local diferente das unidades consumidoras, dentro da mesma área de concessão ou permissão, nas quais a energia excedente será compensada.

Importante ressaltar que, para unidades consumidoras conectadas em baixa tensão (grupo B), ainda que a energia injetada na rede seja superior ao consumo, será devido o pagamento referente ao custo de disponibilidade e tarifas mínimas.

Figura 9 – Sistema de compensação de energia elétrica



Fonte: ANEEL, 2014

O sistema de compensação de energia pode-se resumir aos seguintes procedimentos adotados, quando a geração está instalada no mesmo local de consumo:

A energia injetada em determinado posto tarifário (ponta, fora de ponta ou intermediário), se houver, deve ser utilizada para compensar a energia consumida nesse mesmo posto.

Se houver excedente, os créditos de energia ativa devem ser utilizados para compensar o consumo em outro posto horário, se houver, na mesma unidade consumidora e no mesmo ciclo de faturamento.

O valor a ser faturado é a diferença positiva entre a energia consumida e a injetada, considerando-se também eventuais créditos de meses anteriores, sendo que caso esse valor seja inferior ao custo de disponibilidade, para o caso de consumidores do Grupo B (baixa tensão), será cobrado o custo de disponibilidade.

Para os consumidores do Grupo A (alta tensão), não há valor mínimo a ser pago a título de energia. Contudo, os consumidores continuam sendo normalmente faturados pela demanda.

Após a compensação na mesma unidade consumidora onde está instalada a micro ou minigeração distribuída, se ainda houver excedente, um percentual dos créditos poderá ser utilizado para abater o consumo de outras unidades escolhidas pelo consumidor no mesmo ciclo de faturamento.

Os créditos remanescentes podem ser utilizados por até 60 meses após a data do faturamento (ANEEL, 2014).

2.6 EXEMPLO DE FATURAMENTO

No intuito de demonstrar a dinâmica do sistema de compensação de energia elétrica, será apresentado o faturamento “hipotético” de uma residência.

Será considerada a existência de uma unidade consumidora trifásica (custo de disponibilidade igual ao valor em reais equivalente a 100 kWh), que tenha instalado equipamentos de microgeração solar fotovoltaica com potência de 2 kW (pico), e cujo consumo médio mensal seja de 418 kWh. Para efeitos de cálculo, hipotético, foi utilizada a tarifa de 0,51 R\$/kWh.

Com base nos níveis mensais de irradiação solar na localidade, foi estimada para a unidade consumidora (UC) a geração de energia (injetada), conforme apresentado na Figura 10.

Figura 10: Consumo e geração do primeiro trimestre

Mês	Consumo (kWh)	Injetado (kWh)	Crédito acumulado (kWh)	Fatura sem GD*	Fatura com GD*	Diferença
Jan	330	353	23	R\$ 168,30	R\$ 51,00	R\$ 117,30
Fev	360	360	23	R\$ 183,60	R\$ 51,00	R\$ 132,60
Mar	460	335	0	R\$ 234,60	R\$ 52,02	R\$ 182,58

$$\text{Fatura março} = (\text{Consumo} - \text{Injetado} - \text{Crédito utilizado}) \times \text{Tarifa energia}$$

$$\text{Fatura março} = (460 - 335 - 23) \times 0,51 = \text{R\$ } 52,02$$

Fonte: ANEEL 2014

Conforme pode ser observado no quadro anterior, no mês de janeiro o consumo da unidade consumidora (330 kWh) foi menor do que a energia ativa injetada na rede (353 kWh), resultando disso um crédito (23 kWh) a ser utilizado em faturamento posterior. No mês de janeiro, portanto, o faturamento será apenas pelo custo de disponibilidade. Como esse custo é o valor em reais equivalente a 100 kWh, para uma tarifa de 0,51 R\$/kWh, o custo de disponibilidade será de R\$ 51,00.

No mês de fevereiro, a energia ativa injetada na rede (360 kWh) foi igual ao consumo medido. Dessa forma, o crédito do mês anterior não foi aproveitado (e, novamente, a UC foi faturada pelo custo de disponibilidade).

Em março, o consumo (460 kWh) foi maior do que a energia ativa injetada na rede (335 kWh), circunstância que propiciou a utilização do crédito de 23 kWh gerados no mês de janeiro.

O perfil anual de consumo e geração da unidade consumidora hipotética está retratado na Figura 11.

Figura 11: Consumo e geração anual

Mês	Consumo (kWh)	Injetado (kWh)	Crédito acumulado (kWh)	Fatura sem GD*	Fatura com GD*	Diferença
Jan	330	353	23	R\$ 168,30	R\$ 51,00	R\$ 117,30
Fev	360	360	23	R\$ 183,60	R\$ 51,00	R\$ 132,60
Mar	460	335	0	R\$ 234,60	R\$ 52,02	R\$ 182,58
Abr	440	357	0	R\$ 224,40	R\$ 51,00	R\$ 173,40
Mai	450	333	0	R\$ 229,50	R\$ 59,67	R\$ 169,83
Jun	390	308	0	R\$ 198,90	R\$ 51,00	R\$ 147,90
Jul	350	360	10	R\$ 178,50	R\$ 51,00	R\$ 127,50
Ago	476	370	4	R\$ 242,76	R\$ 51,00	R\$ 193,80
Set	484	380	0	R\$ 246,84	R\$ 51,00	R\$ 183,60
Out	480	378	0	R\$ 244,80	R\$ 52,02	R\$ 192,78
Nov	430	338	0	R\$ 219,30	R\$ 51,00	R\$ 168,30
Dez	390	332	0	R\$ 198,90	R\$ 51,00	R\$ 147,90
Total	5.100	4.204	-	R\$ 2.560,20	R\$ 622,71	R\$ 1.937,49

Fatura agosto = $(476 - 370 - 6) \times 0,51 = \text{R\$ } 51,00$

Fonte: ANEEL, 2014

Nota-se que, no mês de julho, novamente o consumo (350 kWh) foi menor do que a energia ativa injetada na rede (360 kWh), o que gerou um crédito de 10 kWh.

Já no faturamento de agosto, a energia injetada foi de 370 kWh e o consumo foi maior (476 kWh). A diferença entre o consumo e a geração (106 kWh) seria, portanto, o valor a faturar naquele mês. Todavia, há 10 kWh de créditos gerados no mês anterior (julho) e, assim sendo, eles podem ser utilizados para abater o valor a faturar.

Nesse caso, no entanto, basta que sejam utilizados 6 kWh (dos 10 kWh de crédito) para que a quantidade de kWh a faturar seja igual à quantidade mínima que deve ser faturada (100 kWh – custo de disponibilidade). Logo, sobrariam ainda 4 kWh de créditos que o consumidor utilizará no mês em que necessitar (no exemplo, em setembro).

Em resumo, nos meses em que o consumo for igual ou inferior à energia injetada na rede (janeiro, fevereiro e julho, no exemplo), ou quando, embora maior o consumo, a diferença for menor ou igual a 100 kWh (abril, junho, agosto, setembro, novembro e dezembro, no exemplo), a UC será faturada apenas pelo custo de disponibilidade.

2.7 CARACTERÍSTICAS DE DESENVOLVIMENTO

Para a etapa de desenvolvimento deste trabalho, que será apresentado na seção 3, serão utilizados alguns conceitos, que são de suma importância para o entendimento e funcionamento dos sistemas fotovoltaicos, dito isto, na sequência são apresentados alguns destes.

2.7.1 IRRADIAÇÃO SOLAR

A radiação solar, nada mais é que a energia liberada pelo sol, sendo predominantemente na forma de ondas eletromagnéticas.

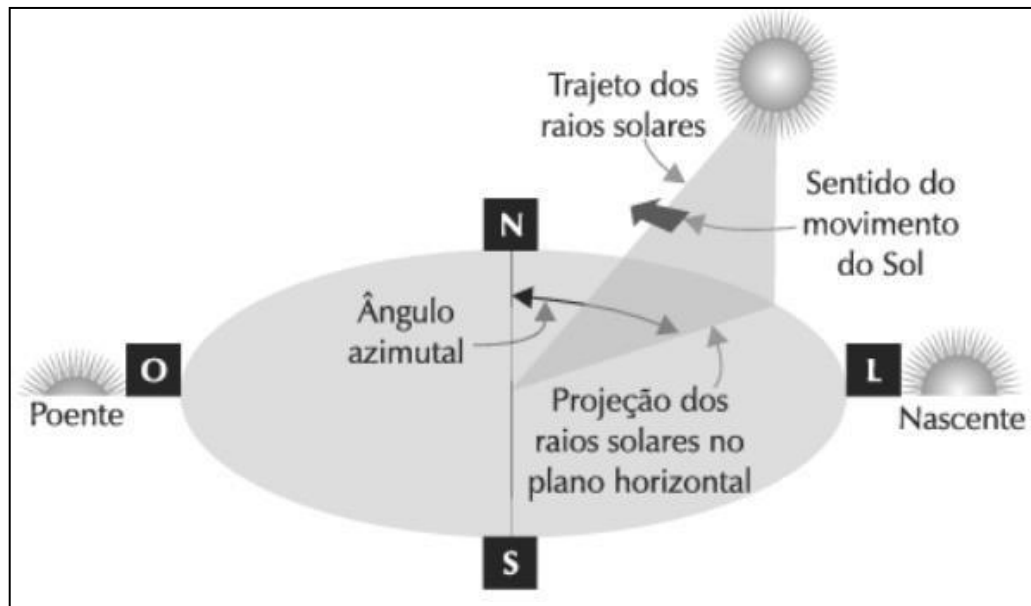
Já a irradiação solar, é a propagação de energia sem a necessidade de meio material. É a quantidade de radiação solar em determinado intervalo de temp. Geralmente, é medida em watt hora por metro quadrado (Wh/m²). É o valor de irradiação solar que será utilizado no dimensionamento do projeto na seção 3.

O Brasil, predominantemente na região Nordeste, possui um dos maiores índices anuais de irradiação solar. A média no país fica entre 4500 Wh/m² e 6300 Wh/m², de acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Solar.

2.7.2 DESVIO AZIMUTAL

Segundo Villalva, o desvio azimutal trata-se do ângulo de orientação dos raios solares com relação ao norte geográfico como mostra a Figura 12.

Figura 12: Desvio Azimutal



Fonte: VILLALVA, 2012

No âmbito dos projetos solares fotovoltaicos, a melhor maneira de aproveitar a maior parte do potencial solar diário, é instalar os módulos fotovoltaicos voltados para o Norte geográfico, considerando uma instalação no hemisfério Sul, neste caso o desvio azimutal é considerado nulo, desta forma haverá incidência de irradiação solar sobre o sistema durante todo o dia. Por exemplo, se um sistema for instalado em um telhado que permita apenas inclinação para o Leste, haverá incidência de irradiação solar apenas no período da manhã (Villalva, 2012).

2.7.3 TEMPERATURA MÁXIMA E MÍNIMA

Segundo Villalva, a temperatura ambiente influencia a tensão dos módulos fotovoltaicos, e conseqüentemente na potência fornecida. Com temperaturas mais baixas as tensões são maiores e em altas temperaturas ocorre a queda de tensão nos módulos fotovoltaicos. Já a corrente fornecida pelo módulo não se altera com a temperatura (Villalva, 2012).

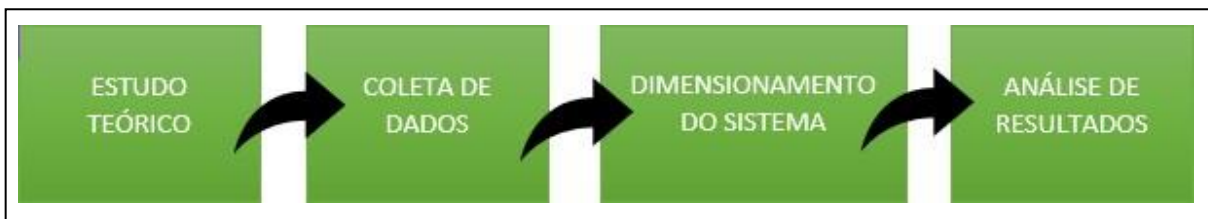
3 DESENVOLVIMENTO

Nesta seção será apresentado o desenvolvimento do estudo teórico para análise da viabilidade técnica de implantação de um sistema de energia solar fotovoltaica no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas – Campus Distrito Industrial (IFAM-CMDI).

Para dimensionamento do sistema proposto foi necessária realizar uma pesquisa quantitativo-qualitativa, onde os dados foram coletados de forma numérica no campus do IFAM-CMDI, a fim de mensurar a área disponível e a energia elétrica consumida pela instituição.

As etapas de desenvolvimento foram realizadas conforme Figura 13, onde é apresentado o fluxograma das etapas deste projeto, onde a parte de estudo teórico já foi realizada no capítulo dois deste trabalho

Figura 13: Fluxograma de desenvolvimento do projeto



Fonte: A autora, 2021

3.1 COLETA DE DADOS

Para o correto desenvolvimento de um projeto de energia solar fotovoltaica, a etapa de coleta de dados é de extrema importância. Nesta etapa do projeto foram coletadas informações acerca da localização geográfica, foram avaliadas as possíveis áreas de instalação do sistema, realizou-se análise da fatura de energia da instituição, neste ponto é importante ressaltar, que a análise foi realizada com base no consumo do ano de 2019, como mostra o a Figura 14.

Figura 14: Dados de Consumo da Instituição

AMAZONAS ENERGIA		AMAZONAS ENERGIA S.A.		AV 7 DE SETEMBRO, 2414 CACHOEIRINHA - MANAUS - AM - CEP: 69.005-141 CNPJ: 02.341.467/0001-20 IE: 42156092		Atendimento: 0800 701 3001 www.amazonasenergia.com Ouvidoria: 0800 095 1247 (08 às 18h/Dias úteis)		Para contato com a empresa, informe este número		Código Único 0087072-2			
Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL - Fone 167 - Ligação Gratuita de telefones fixos e tarifada na origem para telefones celulares													
Emissão	05/03/2020	Data Leitura Anterior	01/02/2020	Data Leitura Atual	01/03/2020	Data Próxima Leitura	01/04/2020	Dias de Consumo	29	Apresentação	10/03/2020	Mês Faturado	02/2020
Cod. Far.	5.3.31.4	Classe/Subclasse	Pod.públ.federal	Ligação	Alta Tensao	Poste	C 14 19 205	Forma Faturamento	Normal	Motivo FD		Número FD	
Consumo	11370789	Medidor	Leit. Atual	Leit. Anterior	211	Constants Fatur	NPL	Cons. Medido	Cons. Faturado			D. Ctda Pta:	400
Demanda					9994		6					D. Ctda F.Pta:	400
							0,42000		6				
Histórico kWh		Composição da Tarifa		Itens Faturados		Tar. sem impostos		Valor					
01/2020	45780	TUSD (*)	7.076,66	Consumo Ponta	5.040 kWh a 1,752492	1,314370	8.832,56						
12/2019	57960	TE (*)	20.237,29	Demanda	252 kW a 23,453327	17,590000	5.910,23						
11/2019	77700	Transmissão	1953,28	Demanda	148 kW a 17,590000	17,590000	2.603,32						
10/2019	68040	Encargos	2.433,59	Consumo F/Ponta	47.040 kWh a 0,520426	0,390320	24.480,83						
09/2019	73500	Tributos	9.805,90	Retenção Imp. Federalia	- Lei 9.430/96 Grupo 1 (-)		-1.948,82						
08/2019	78540	Receita Irrac.	320,21	Retenção Imp. Federalia	- Lei 9.430/96 Grupo 2 (-)		-804,51						
07/2019	64260	*TUSD= Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição; TE= Tarifa de Energia											
06/2019	74340												
05/2019	76860												
04/2019	72240												
03/2019	68880												
01/2019	55020												
Média	6265	Pis/Pasep - 0,00											
12 meses		Cofins - 0,00											
Indicadores de Continuidade: 12/2019				Contas em Débito									
Cj-416 - DISTRITO INDUSTRIAL	uso:	R\$ 18.545,49		Mês/Ano	FD	Vencimento	Valor	Mês/Ano	FD	Vencimento	Valor		
Meta Mensal	Realizado	Trimestral	Anual	01/2020	0	27/02/2020	33.981,30	12/2019	0	24/01/2020	45.324,13		
DIC	6,30	1,39	12,60	03/2018	0	23/04/2018	49.434,85						
FIC	3,63	1,00	7,26										
DMIC	3,31	1,39	0,00										
Total de Conta(s) Pendente(s)												R\$ 128.740,28	

Fonte: IFAM, 2021

3.1.1 LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA

Um dos primeiros passos ao projetar um sistema fotovoltaico, é verificar a localização geográfica de sua instalação, para que sejam verificadas as suas coordenadas, sendo assim, é possível determinar a direção e inclinação dos módulos fotovoltaicos, com este dado também é possível realizar a consulta dos níveis de irradiação solar.

Conforme já mencionado, o projeto será projetado considerando instalação no campus do IFAM-CMDI, localizado na cidade de Manaus. Neste ponto utilizando ferramenta do *Google Maps*, foi possível consultar os valores para latitude e longitude, sendo os valores aproximados de -3° e -60° , respectivamente. Na figura 15 observa-se a visão de satélite do campus IFAM-CMDI.

Figura 15: Visão de satélite do campus IFAM-CMDI



Fonte: Google Maps, 2021

3.1.2 IRRADIAÇÃO SOLAR

Para verificar os valores de irradiação solar no Campus do IFAM CMDI, foi utilizada a ferramenta, SunData, nela é possível realizar a pesquisa por localização, por área e por região, para o campus foi utilizada a localização exata, com isso obteve-se os valores da Figura 15. No caso deste projeto, será utilizado o valor de 4,32 kWh/m² por dia. Também é definido neste momento o ângulo de inclinação dos módulos fotovoltaicos, comumente é utilizado um ângulo igual a latitude, porém, na cidade de Manaus o ângulo necessário seria 3°, isso acarretaria uma péssima limpeza do sistema nos períodos de chuva, com isso utiliza-se um mínimo de 8° de inclinação. Os dados apresentados na Tabela 3 são calculados pela ferramenta com base nessa inclinação.

Tabela 3: Irradiação solar diária média mensal

Inclinação	Irradiação solar diária média mensal (kWh/m ² .dia)												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
0° N	3,97	4,06	3,99	3,80	3,77	4,26	4,31	4,96	4,98	4,85	4,65	4,22	4,32
3° N	3,91	4,02	3,98	3,83	3,83	4,35	4,40	5,02	5,00	4,81	4,58	4,14	4,32
4° N	3,89	4,01	3,98	3,83	3,85	4,38	4,43	5,04	5,00	4,80	4,55	4,11	4,32
6° N	3,85	3,98	3,97	3,85	3,88	4,44	4,48	5,08	5,00	4,77	4,50	4,06	4,32

Fonte: Adaptado de SunData, 2021

3.1.3 CÁLCULO DA MÉDIA DE CONSUMO MENSAL

Para se calcular a potência fotovoltaica, é necessário calcular o consumo médio mensal, que também pode ser considerada a energia desejada para o sistema, com isso adotaremos a sigla “E”, para esta variável do sistema. Utilizando os 12 valores, assinalados em vermelho na Figura 14, encontra o seguinte desenvolvimento de cálculo.

$$E = \frac{\sum_{jan}^{dez} (\text{Consumo em } \frac{kWh}{mês})}{12} \quad (1)$$

$$E = \frac{\sum_{jan}^{dez} (813120 \text{ kWh})}{12} \quad (2)$$

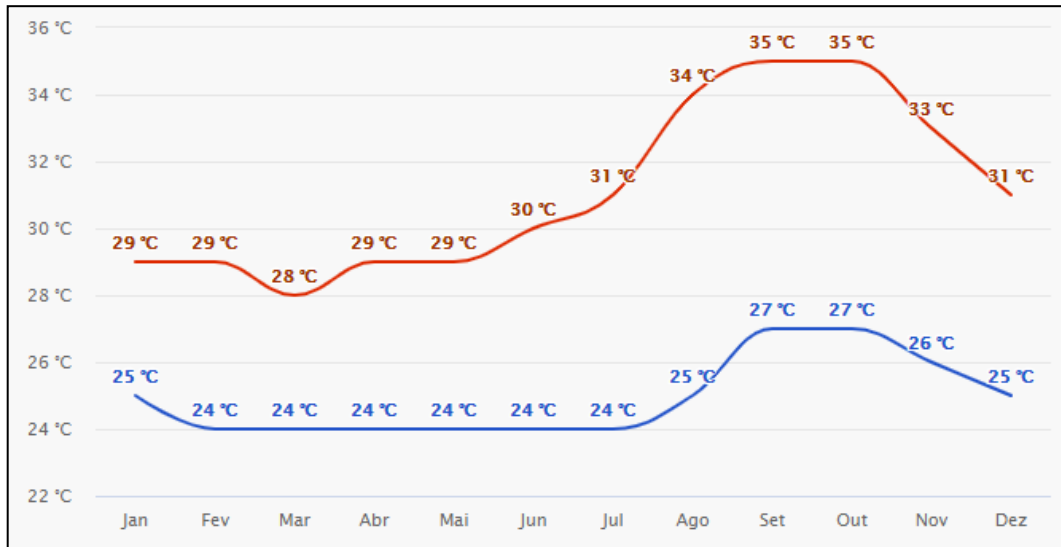
$$E = 67760 \text{ kWh/mês} \quad (3)$$

3.1.4 AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA MÁXIMA E MÍNIMA

Conforme explanado na seção 2, a temperatura pode influenciar o sistema, elevando ou diminuindo a tensão nos módulos. A Figura 15 apresenta um gráfico retirado do site da Meteolue, registrando as mínimas e as máximas para os 12 meses do ano, durante 30 anos. Com isso é possível adotar como temperatura mínima para o sistema o valor de 24°C. Para a temperatura máxima, o gráfico mostra uma máxima histórica de 35°C para Manaus, porém, prevendo uma possível temperatura de operação maior, e adotando uma postura conservadora, serão adicionados 40°C a

temperatura máxima, sendo assim, será adotado o valor de 75°C para temperatura máxima.

Figura 15: Temperaturas Mínimas e Máximas para Manaus



Fonte: Meteoblue, 2021

3.1.5 SÍNTESE DA COLETA DE DADOS

Realizando todas as etapas da coleta de dados chega-se à Tabela 4, onde foram concentradas todas as informações acerca dos dados de entrada deste projeto.

Tabela 4: Síntese dos dados de projeto

Dados de Projeto	
Latitude	-3°
Longitude	-60°
Irradiação	4,32 kWh/m ² .dia
Inclinação	8°
Temperatura Mínima	24°C
Temperatura Máxima	75°C
Consumo Médio Anual	67.760 kWh/mês

Fonte: A autora, 2021

3.2 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA

Com todos os dados iniciais coletados, possibilita-se o início do dimensionamento do sistema. Nesta etapa será calculada a potência fotovoltaica, com isto serão calculadas as quantidades de módulos fotovoltaicos necessários para suprir a demanda média de energia, também será dimensionado o inversor adequado ao sistema, separando as séries de módulos conforme os dados do fabricante selecionado como referência.

3.2.1 POTÊNCIA FOTOVOLTAICA

Para chegar ao valor da potência fotovoltaica, que posteriormente será utilizada para definir quantidade de módulos, será necessário utilizar a equação 4:

$$P_{fv} = \frac{E \times G_{stc}}{H_{tot} \times TD} \quad (4)$$

As variáveis da equação 4 são:

- P_{fv}: Potência Fotovoltaica, dada em kWp;
- E: Energia média desejada, dada em kWh/mês;
- G_{stc}: Constante (1 kW/m²)
- H_{tot}: Irradiação, dada em kWh/m² x 30 dias);
- TD: Taxa de desempenho

Tendo conhecimento das variáveis, e com os dados da Tabela 4, obtêm-se a equação 5, e sua solução. É necessário observar que para a Taxa de desempenho foi utilizado uma taxa de 80%, sendo considerada uma taxa para boas instalações de sistema fotovoltaicos, com correta inclinação, sem a presença de sombras e outros fatores que podem prejudicar o sistema.

$$P_{fv} = \frac{67.760 \frac{kWh}{mês} \times 1 \frac{kW}{m^2}}{4,32 \frac{kWh}{m^2 \cdot dia} \times 30 \frac{dias}{mês} \times 0,80} \quad (5)$$

Resolvendo a Equação 5, obtêm-se a P_{fv} , na Equação 6

$$P_{fv} \cong 655,0 \text{ kWp} \quad (6)$$

3.2.2 NÚMERO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Após o cálculo da potência fotovoltaica, o próximo passo é determinar o número de módulos fotovoltaicos, para isto será utilizado como referência para o projeto, o módulo fotovoltaico da empresa CanadianSolar, o modelo selecionado é o “Canadian CS3W-390PB-AG”, com potência de aproximadamente 390 W. Com essa informação podemos calcular a partir da Equação 6.

$$N_{mod} = \frac{P_{fv}}{P_{mod}} \quad (7)$$

Substituindo os valores,

$$N_{mod} = \frac{655000}{390} \quad (8)$$

Obtêm-se então o resultado na Equação 8

$$N_{mod} \cong 1680 \text{ módulos} \quad (9)$$

3.2.3 ESCOLHA DO MODELO DE INVERSOR

Nesta etapa do projeto, será selecionado o modelo do inversor, bem como serão definidas as configurações do sistema fotovoltaico, dividindo o circuito em strings, que são as fileiras de módulos, projetadas para que o sistema atenda os valores de tensão máxima e mínima e corrente máxima de entrada do inversor.

Atualmente no Brasil existem diversos fabricantes de inversores para aplicação em sistemas fotovoltaicos. Destaca-se neste trabalho a utilização do inversor da marca Solis, modelo Solis-125K-EHV-5G. Este inversor possui potência nominal de

saída de 125 kW, sendo que o sistema possui uma potência fotovoltaica de 655 kWp, serão utilizados 4 inversores, onde serão distribuídos os módulos igualmente.

Na Figura 16, extraída da folha de dados do inversor, é possível obter algumas informações de extrema importância para o projeto. A primeira delas são as tensões máximas e mínimas da entrada do inversor, com essa informação é definido, com base nas temperaturas históricas, as quantidades de módulos que cada string deverá ter. Também se obtêm a máxima corrente de entrada, e o número de MPPT's e o número de entradas que o inversor possui.

Figura 16: Características inversor Solis-125k-EHV-5G

Entrada CC		
Potência máxima de entrada recomendada		187.5 kW
Tensão máx de entrada		1500 V
Tensão nominal		950 V
Tensão de partida		900 V
Intervalo de tensão MPPT		860-1450 V
Corrente máx de entrada		150 A
Corrente máx. do conector de entrada		13 A
Corrente máx de curto-circuito		300 A
MPPTs / Número de Entradas		1/20
Saída CA		
Potência nominal de saída		125 kW
Potência máx de saída aparente		125 kVA
Potência máx de saída		125 kW
Tensão nominal da rede		3/PE, 600 V
Frequência nominal da rede		50 Hz / 60 Hz
Corrente nominal de saída da rede		120.3 A
Corrente máx de saída		120.3 A
Fator de potência		> 0,99 (0,8 inicial - 0,8 atrasado)
Harmônicas (THDi)		<3%

Fonte: Solis, 2021

3.2.4 CÁLCULO DA TENSÃO MÍNIMA DOS MÓDULOS

Conforme mencionado anteriormente, conforme a temperatura dos módulos variam, a tensão de operação também varia, para mais ou para menos. No caso, do cálculo da tensão mínima, será utilizada a temperatura máxima informada na Tabela 2, sendo 75°C. A Equação 10, é o ponto de partida para este cálculo.

$$V_{mp_min} = N \times V_{mp} \times (1 - (\beta_{vmp} \times (25 - T_{m\acute{a}x}))) \quad (10)$$

As variáveis da Equação 10 são:

- V_{mp_min} : Tensão Mínima de Máxima Potência da série (V);
- N: Número de módulos na série;
- V_{mp} : Tensão de máxima potência (V);
- β_{vmp} : Coeficiente de temperatura da tensão de máxima potência (%/°C);
- $T_{m\acute{a}x}$: Temperatura extrema máxima estimada (°C)

Na Figura 17, é possível observar as características de temperatura do módulo fotovoltaico em questão, outro dado importante para o cálculo é a tensão de máxima potência (V_{mp}), que neste caso é 38,3 V (Dado encontrado na folha de dados do módulo fotovoltaico).

Figura 17: Características inversor Solis-125k-EHV-5G

Especificação	Dados
Coeficiente de Temperatura (Pmax)	-0.36 % / °C
Coeficiente de Temperatura (Voc)	-0.28 % / °C
Coeficiente de Temperatura (Isc)	0.05 % / °C
Temperatura Nominal de Operação do Módulo	41 ± 3°C

Fonte: Solis, 2021

Então, com os dados obtidos é possível dar continuidade aos cálculos a partir da Equação 11:

$$V_{mp_min} = 1 \times 38,3 \times (1 - ((\frac{-0,36}{100}) \times (25 - (75)))) \quad (11)$$

$$V_{mp_min} = 38,3 \times (0,82) \quad (12)$$

$$V_{mp_min} = 31,40 \text{ V} \quad (13)$$

Com isso define-se a tensão mínima nos módulos fotovoltaicos em 31,40 V, considerando a máxima temperatura estimada.

3.2.5 CÁLCULO DA TENSÃO MÁXIMA DOS MÓDULOS

O próximo passo do desenvolvimento, é obter o valor de tensão máxima nos módulos fotovoltaicos, desta forma será possível determinar o número máximo de módulos no sistema, evitando a ocorrência de problemas na entrada do inversor, por exceder os níveis máximos de tensão. Para obter esta variável do sistema o ponto de partida é a Equação 14.

$$V_{oc_máx} = N \times V_{oc} \times (1 - (\beta_{voc} \times (25 - T_{min}))) \quad (14)$$

Algumas variáveis já foram descritas na Equação 10, as que serão introduzidas neste trabalho estão descritas abaixo:

- Voc_máx: Tensão mínima de circuito aberto (V);
- Voc: Tensão de circuito aberto (V);
- β_{voc} : Coeficiente de temperatura da tensão de circuito aberto (%/°C);
- Tmín: Temperatura extrema mínima estimada (°C)

Para a resolução desta equação, será utilizado o valor mínimo de temperatura de 24°C, encontrado na Tabela 2. E para tensão de Voc, o valor de 46,8 V, encontrado na folha de dados do módulo. Então:

$$V_{oc_m\acute{a}x} = 1 \times 46,8 \times \left(1 - \left(\left(\frac{-0,28}{100}\right) \times (25 - (24))\right)\right) \quad (15)$$

$$V_{oc_m\acute{a}x} = 46,8 \times (1,0028) \quad (16)$$

$$V_{oc_m\acute{a}x} = 46,93 \text{ V} \quad (17)$$

Com isso define-se a tensão máxima de cada módulo fotovoltaico em 46,93V.

3.2.6 DEFINIÇAO DE NÚMERO DE MÓDULOS MÍNIMO E MÁXIMO

Para definir a quantidade mínima e quantidade máxima de módulos uma determinada série de módulos poderá ter, será utilizado a informação contida na Figura 17, Intervalo de tensão MPPT, que varia de 860 V, tensão mínima e 1450V, tensão máxima. A quantidade mínima e máxima de módulos é calculada nas Equações 18 e 19, respectivamente:

$$N_{mod_min} = \frac{860}{31,40} \cong 28 \text{ módulos} \quad (18)$$

$$N_{mod_max} = \frac{1450}{46,93} \cong 30 \text{ módulos} \quad (19)$$

3.2.7 SIMULAAO DO SISTEMA UTILIZANDO O SOFTWARE “SAM”

Para avaliar a veracidade dos cálculos, e ter uma segunda validação para o dimensionamento do projeto, foi realizada a simulação no software SAM (System Advisor Model).

O SAM é software gratuito, desenvolvido para auxiliar na análise técnica e economica, de sistemas solares, incluindo sistemas fotovoltaicos. Ele conta com um grande acervo, de módulos e inversores solares, das mais diversas marcas

mundiais, desta forma há uma facilidade na análise e desenvolvimento por meio do software, pois obtêm-se informações precisas e de qualidade.

No banco de dados do software foram encontrados os módulos e os inversores utilizados neste trabalho, sendo o módulo da Canadian Solar, CS3W-390PG-AG, e o inversor da marca Solis, 125K-EHV-5G.

Conforme calculado, foi distribuído o sistema em 56 strings, com 30 módulos em série, respeitando o cálculo de tensão máxima e mínima. Na Figura 18, é possível observar a configuração do número de strings e número de módulos, que totalizam 1680 módulos, conforme o calculado, também é visto a tensão mínima e máxima.

Figura 18: Configuração do número de módulos no SAM

Modules per string in subarray	30
Strings in parallel in subarray	56
Number of modules in subarray	1,680
String Voc at reference conditions (V)	1,404.0
String Vmp at reference conditions (V)	1,149.0

Fonte: SAM, 2021

Para validar o cálculo da potência fotovoltaica, pode-se observar a Figura 19, onde o software, com base no número de módulos, calcula a potência total do sistema, na mesma figura é possível verificar a área total necessária para a instalação do sistema.

Figura 19: Potência fotovoltaica e área total no SAM

Nameplate DC capacity	655.665 kWdc	Number of modules	1,680
Total AC capacity	500.000 kWac	Number of strings	56
Total inverter DC capacity	506.935 kWdc	Total module area	3,645.6 m ²

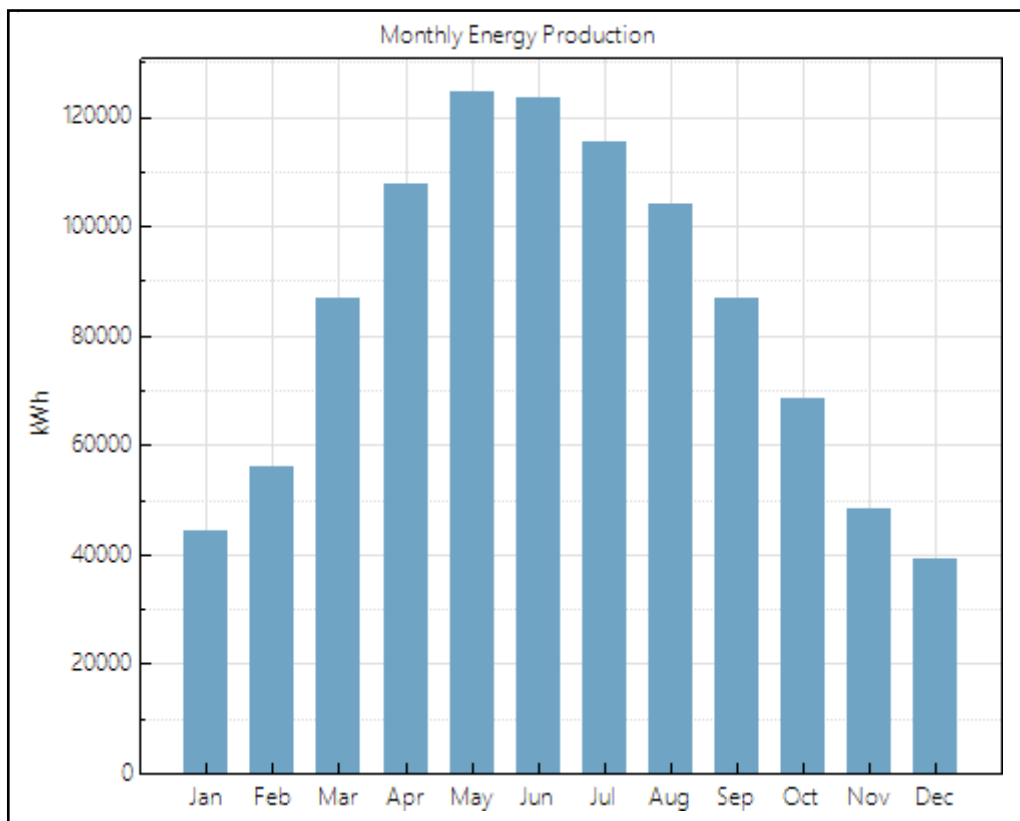
Fonte: SAM, 2021

Dentro do software SAM, também foi definido o número de inversores utilizados para este trabalho, no caso, 4 unidades, onde o software retorna uma taxa de carregamento de 130%, ou seja, os 4 inversores somados, possuem uma potência total de 500 kW, separando as 56 strings, igualmente entre os inversores, chega-se

a uma carga de aproximadamente, 164 kW em um único inversor de 125 kW. Devido a condição da irradiação solar não proporcionar potência máxima ao sistema durante todo o dia, é possível realizar o sobredimensionamento, e ainda obter vantagem, pois nos poucos momentos em que o inversor trabalhar acima da capacidade máxima de saída, haverá a o corte na geração automaticamente, dessa forma é possível reduzir o número de inversores no sistema, reduzindo o custo.

Por fim na Figura 20, é possível verificar o gráfico de geração simulada de janeiro a dezembro. Para as condições de entrada do sistema, o software retornou um valor de cerca de 1 GWh em um ano de geração.

Figura 20: Energia mensal produzida calculada pelo SAM



Fonte: SAM, 2021

4 CONCLUSÃO

No presente trabalho, foi desenvolvido um sistema fotovoltaico conectado a rede, com o objetivo de dimensionar e comprovar via software, a quantidade de módulos e inversores necessário para suprir a demanda de energia do Instituto Federal do Amazonas.

Para chegar ao resultado, foi necessário realizar ampla pesquisa bibliográfica, comparando diferentes tipos de bibliografias e artigos técnicos, acerca dos diferentes tipos de sistemas fotovoltaicos e seus componentes, bem como as suas diversas aplicações.

Os objetivos específicos deste trabalho eram apresentar o histórico e os tipos de sistemas fotovoltaico existentes. Realizar um descritivo dos componentes e apresentar as normas vigentes no Brasil para a energia solar fotovoltaica. Por último, um dos maiores objetivos foi realizar o dimensionamento do sistema, realizando coleta de dados adequada e aplicando estes dados para encontrar as variáveis do sistema. Por fim, pode-se dizer que o resultado dos cálculos foi satisfatório, sendo comprovados pela simulação no software SAM.

Para trabalhos futuros, pode-se complementar a proposta de trabalho realizando todo o dimensionamento de instalação do sistema, adequando toda a parte física e também dos padrões de entrada de energia.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa 482. Brasília: 2012. Disponível em: www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2012482.pdf. Acesso em: 04 jun.2021.
- BERTICELLI, Ritelli et al. Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações. I Seminário de Pesquisa Científica e Tecnológica, v. 11, n. 1, 2017.
- BRITO, Miguel Centeno. Meio Século de História Fotovoltaica. 2006. Disponível em: <http://solar.fc.ul.pt/gazeta2006.pdf>. Acesso em: 22 set. 2018.
- CAMARGO, Lucas Tamanini. Projeto de Sistemas Fotovoltaicos conectados à Rede Elétrica: Projeto de Sistemas Fotovoltaicos conectados à Rede Elétrica. 2017. 103 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2017.
- CRESESB/CEPEL. Grupo de Trabalho de Energia Solar. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, 2004. Rio de Janeiro.
- FREITAS, Susana Sofia Alves. Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos. 2008. Tese de Doutorado. Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior de Tecnologia e de Gestão.
- LANA, Luana Teixeira Costa et al. Energia solar fotovoltaica: revisão bibliográfica. Engenharias On-line, v. 1, n. 2, p. 21-33, 2015.
- PINHO, J. T. (Org.); GALDINO, M. A. (Org.). Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos. CEPEL-CRESESB. Rio de Janeiro, 2014.
- PEREIRA, Enio Bueno et al. Atlas Brasileiro de Energia Solar. 2. ed. São José dos Campos: Inpe, 2017. 80 p.
- VILLALVA, M.; GAZOLI, J. Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações. São Paulo: Érica, 2012.
- PAIM, M.V. A Energia Solar: Alternativas. São Paulo: Scipione, 1994.
- RURALS, Ambientes. Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Coleção Tópicos de Atualização em. ANÁLISE DE DIMENSIONAMENTO ESTOCÁSTICO E DETERMINÍSTICO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ISOLADOS, p. 11, 2006.
- RÜTHER, R. Edifícios Solares Fotovoltaicos: O potencial de geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil. LABSOLAR. Florianópolis, 2004.
- SANTOS JÚNIOR, S. L. R. Análise de materiais e técnicas de encapsulamento de módulos fotovoltaicos. Porto Alegre, 2008.

SILVA, M. E. Curso de automação industrial. Apostila. Escola de Engenharia de Piracicaba. Piracicaba, 2007.

SOLAR, Brasil (Org.). O que são os Sistemas Conectados à rede On-Grid 2019. Disponível em: <http://www.solarbrasil.com.br/blog-da-energia-solar/73-o-que-sao-os-sistemas-conectados-a-rede-on-grid>. Acesso em: 10 jul. 2021.