

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES
CAMPUS PATOS DE MINAS

PAULO EDUARDO ALVES DA SILVA

**DIMENSIONAMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO
COM ÊNFASE NA ECONOMIA DE ENERGIA GERADA EM UBERLÂNDIA – MG.**

PATOS DE MINAS - MG

2023

PAULO EDUARDO ALVES DA SILVA

**DIMENSIONAMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO
COM ÊNFASE NA ECONOMIA DE ENERGIA GERADA EM UBERLÂNDIA – MG.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para a conclusão do curso de graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações pela Universidade Federal de Uberlândia, *Campus* Patos de Minas.

Linha de pesquisa: Energia fotovoltaica.

Orientadora: Profa. Dra. Elise Saraiva.

PATOS DE MINAS - MG

2023

PAULO EDUARDO ALVES DA SILVA

**DIMENSIONAMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO
COM ÊNFASE NA ECONOMIA DE ENERGIA GERADA EM UBERLÂNDIA – MG.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para a conclusão do curso de graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações pela Universidade Federal de Uberlândia, *Campus* Patos de Minas.

Linha de pesquisa: Energia fotovoltaica

Patos de Minas, 19/06/2023

Banca Examinadora

Prof.^a Dr.^a Elise Saraiva – FEELT/UFU (Orientadora)

Prof. Dr. Julio Cezar Coelho (Membro 1)

Prof. Dr. Gustavo Gonçalves dos Santos (Membro 2)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, pois sem ele nada disso seria possível, e é nele que busco as forças necessárias para ir em busca de cada objetivo de minha vida.

Agradeço a minha família e a minha namorada, por estarem sempre ao meu lado me incentivando e ajudando no que fosse necessário ao longo dessa jornada até aqui.

Agradeço também a todos os professores que contribuíram para a minha formação, me proporcionando o conhecimento indispensável para a conclusão da minha graduação.

Em especial agradeço a minha orientadora Prof.^a Dr.^a Elise Saraiva, que não mediu esforços, me orientando da melhor forma possível para que os objetivos deste trabalho fossem alcançados.

RESUMO

Os sistemas de energia solar fotovoltaicos conectados à rede (*On-Grid*) operam, simultaneamente, com a rede pública de distribuição, conforme o sistema de compensação da normativa Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) resolução nº 687/2015. Esses sistemas são responsáveis por fornecer eletricidade para residências e comércios, principalmente, visando reduzir ou eliminar o consumo por meio da rede pública e gerando uma independência em relação à concessionária. Quando a energia gerada pelos painéis é superior à demanda imposta pelas cargas, o excedente dessa energia é injetado na rede pública e o consumidor adquire créditos com a concessionária. Esses créditos são reservados por 60 meses e, caso o consumidor não os utilize, eles se expiram. Essa troca de energia elétrica entre a distribuidora e as residências ou comércios promove uma redução de custos na conta de energia elétrica. Todavia, quando o sistema gera uma energia inferior à demanda, o déficit é suprido pela rede elétrica. Quando a irradiação solar é baixa, a concessionária também se responsabiliza em alimentar as cargas. Nesse contexto, este trabalho foi realizado um estudo do dimensionamento de um sistema fotovoltaico para implantação de uma microgeração de energia que atenda às necessidades dos consumidores residenciais da cidade de Uberlândia/MG. O principal objetivo desse dimensionamento foi gerar maior economia para os consumidores, bem como uma diminuição da dependência de energia proveniente da rede distribuidora. Para a realização da análise, foram coletados dados da irradiância solar e o consumo de energia de sete moradores da cidade de Uberlândia/MG, para assim, realizar os cálculos necessários para o dimensionamento dos painéis fotovoltaicos e do inversor adequado para o sistema. Logo após a realização desses cálculos, foi realizado um orçamento e o investimento total para a instalação do sistema. Assim, o *payback* (tempo de retorno do investimento) foi calculado e os resultados obtidos foram satisfatórios, o retorno do valor investido seria em 8 anos e 2 meses, ou seja, inferior ao tempo de vida útil dos painéis fotovoltaicos que são de, aproximadamente, 25 anos.

Palavras-chave: Sistemas fotovoltaicos On-Grid. Dimensionamento elétrico. Inversor.

ABSTRACT

Os sistemas de energia solar fotovoltaicos conectados à rede (On-Grid) operam, simultaneamente, com a rede pública de distribuição, conforme o sistema de compensação da resolução normativa da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) nº 687/2015. Esses sistemas são responsáveis por fornecer eletricidade para residências e comércios, principalmente, visando reduzir ou eliminar o consumo pelo meio da rede pública e gerar uma independência em relação à motorista. Quando a energia gerada pelos painéis é superior à demanda definida pelas cargas, o excedente dessa energia é injetado na rede pública e o consumidor adquire créditos com o motorista. Esses créditos são reservados por 60 meses e, caso o consumidor não os utilize, eles expiram. Essa troca de energia elétrica entre a distribuidora e as residências ou comércios promove uma redução de custos na conta de energia elétrica. Todavia, quando o sistema gera uma energia inferior à demanda, o déficit é suprido pela rede elétrica. Quando a irradiação solar é baixa, o responsável também se responsabiliza em alimentar as cargas. Nesse contexto, este trabalho foi realizado um estudo do dimensionamento de um sistema fotovoltaico para implantação de uma microgeração de energia que atenda às necessidades dos consumidores domésticos da cidade de Uberlândia/MG. O principal objetivo desse dimensionamento foi gerar maior economia para os consumidores, bem como uma diminuição da dependência de energia proveniente da rede distribuidora. Para a conclusão da análise, foram coletados dados de irradiação solar e o consumo de energia de sete moradores da cidade de Uberlândia/MG, para assim, realizar os cálculos necessários para o dimensionamento dos painéis fotovoltaicos e do inversor adequados para o sistema. Logo após a realização desses cálculos, foi realizado um orçamento e o investimento total para a instalação do sistema. Assim, o retorno (tempo de retorno do investimento) foi calculado e os resultados obtidos foram sólidos, o retorno do valor investido seria em 8 anos e 2 meses, ou seja, inferior ao tempo de vida útil dos painéis fotovoltaicos que são de, aproximadamente, 25 anos.

Keywords: On-Grid photovoltaic systems. Electrical sizing. Inverter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelos de sistemas de geração distribuída de energia solar.	21
Figura 2 - Funcionamento de um sistema On-grid.....	22
Figura 3 - Elementos que compõem a estrutura de uma célula fotovoltaica.....	23
Figura 4 - Demonstração do que ocorre internamente em uma célula fotovoltaica.....	24
Figura 5 - Efeito causado pela irradiância em um painel fotovoltaico.....	25
Figura 6 - Efeito causado pela temperatura em um painel fotovoltaico.....	26
Figura 7 - Disposição dos componentes básicos de um módulo fotovoltaico.....	26
Figura 8 - Inversores Off Grid.....	27
Figura 9 - Inversores Grid Tie ou On Grid.....	27
Figura 10 - Enquadramentos de definição de acordo com a potência instalada.....	28
Figura 11 - Módulos solares.....	34
Figura 12 - Inversor Solar Grid-Tie B&B Moso SF5000TL.....	40
Figura 13 - Disjuntor Bipolar Siemens 5SL12.....	46
Figura 14 - DPS Clamper Front Monopolar.....	48
Figura 15 - Medidor Bidimensional Vector 4.	50
Figura 16 - Diagrama Unifilar.....	52

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Distribuição do sistema fotovoltaico	15
Gráfico 2 - Previsão de consumo de energia elétrica mundial até 2030.	18
Gráfico 3 - Uso das fontes de energia para geração de eletricidade no mundo.....	19
Gráfico 4 - Irradiação solar média versus mensal em Uberlândia.....	32
Gráfico 5 - Simulação da potência necessária e da perda anual ao passar dos 25 anos, utilizando 9 módulos.....	35
Gráfico 6 - Simulação da potência necessária e da perda anual ao passar dos 25 anos, utilizando 10 módulos.....	36

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Dados técnicos do módulo fotovoltaico.....	34
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo de eficiência de materiais que compõem as células fotovoltaicas.....	24
Tabela 2 - Consumo mensal de energia dos consumidores residentes em Uberlândia/MG.....	31
Tabela 3 - Irradiação solar média.	32
Tabela 4 - Dimensionamento dos painéis fotovoltaicos.....	38
Tabela 5 - Dimensionamento do inversor.	40
Tabela 6 - Dimensionamento dos condutores.	42
Tabela 7 - Valores de disjuntores tipo DIN.....	45
Tabela 8 - Seção mínima do condutor de proteção.	46
Tabela 09 - Códigos e Grandezas do mostrador.....	49
Tabela 10 - Características Técnicas Medidor Vector 4.	51
Tabela 11 - Média dos custos para a execução do projeto.	55
Tabela 12 - Média de valor para a execução do projeto.....	56
Tabela 13 - Projeção do Payback, desconsiderando as perdas.....	58
Tabela 14 - Projeção do Payback, considerando as perdas	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
PWM	Modulação de Largura de Pulso
GND	<i>Ground</i> ou terra
VCC	Tensão de corrente contínua
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Kcal	Quilocaloria
V	Volt
+-	Terminal positivo e negativo
-	Terminal negativo
S	<i>Signal</i> ou Sinal
A	Ampere
mV	miliVolt
TWh	Terrawatt/hora

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 Energias Renováveis	18
2.2 Energia Solar Fotovoltaica	19
2.2.1 Princípios de funcionamento do sistema On-Grid	21
2.2.2 Princípios de funcionamento de um painel fotovoltaico	23
2.3 Inversores	27
2.4 Resolução Normativa N° 687 da ANEEL	28
2.4.1 Definições de micro e minigerações	28
2.4.2 Prazos	28
2.4.3 Novas modalidades	29
3 METODOLOGIA	30
3.1 Projeto de um sistema fotovoltaico <i>On-Grid</i>	30
3.2 Cálculo da irradiação solar	31
3.3 Dimensionamento dos Módulos	33
3.4 Dimensionamento do inversor	38
3.5 Cabeamento	40
3.6 Dispositivos de Proteção	44
3.6.1 Disjuntores	44
3.6.2 DPS - Dispositivos de Proteção contra Surtos	47
3.7 Medidor Bidimensional	48
3.8 Diagrama Unifilar	52
3.9 Rendimento	53
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4.1 Estimativa de custo	55
4.2 Investimento Total	55
5 CONCLUSÃO	59
ANEXO A - TABELA DE LIMITE DE CORRENTE/ABNT NBR 5410, 2004.	63
ANEXO B – TABELA DE DADOS TÉCNICOS DOS DISJUNTORES 5SL1.	64
ANEXO C – TABELA DE SELEÇÃO DOS DISJUNTORES.	65
ANEXO D – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DPS CLAMPER FRONT MONOPOLAR.	66

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é líder mundial no que se refere a fontes de energias renováveis, tais como: a energia hidrelétrica e fotovoltaica. Todavia, ainda é necessário aprimorar nas energias renováveis não convencionais¹, como na regulamentação do quadro legal, no planejamento de energia em longo prazo (considerando questões climáticas e econômicas) e na atualização das instituições que apoiam esse tipo de energia, como as agências energéticas mais específicas (BONDARIK; PILATTI; HORST, 2018).

De acordo com o Governo do brasileiro (2021), quase metade da energia elétrica do Brasil é produzida pelas fontes renováveis. A porcentagem é produzida pelas usinas hidrelétricas, no entanto, a energia eólica e solar estão em constante crescimento (GOV, 2021). A energia eólica representa, aproximadamente, 10,9% da matriz elétrica brasileira e há uma expectativa de que esse número cresça 2,7% até o fim de 2025. A energia solar gerada por grandes usinas cresceu, nos últimos três anos, 200%, representando, em 2020, 2% da matriz elétrica brasileira (GOV, 2021).

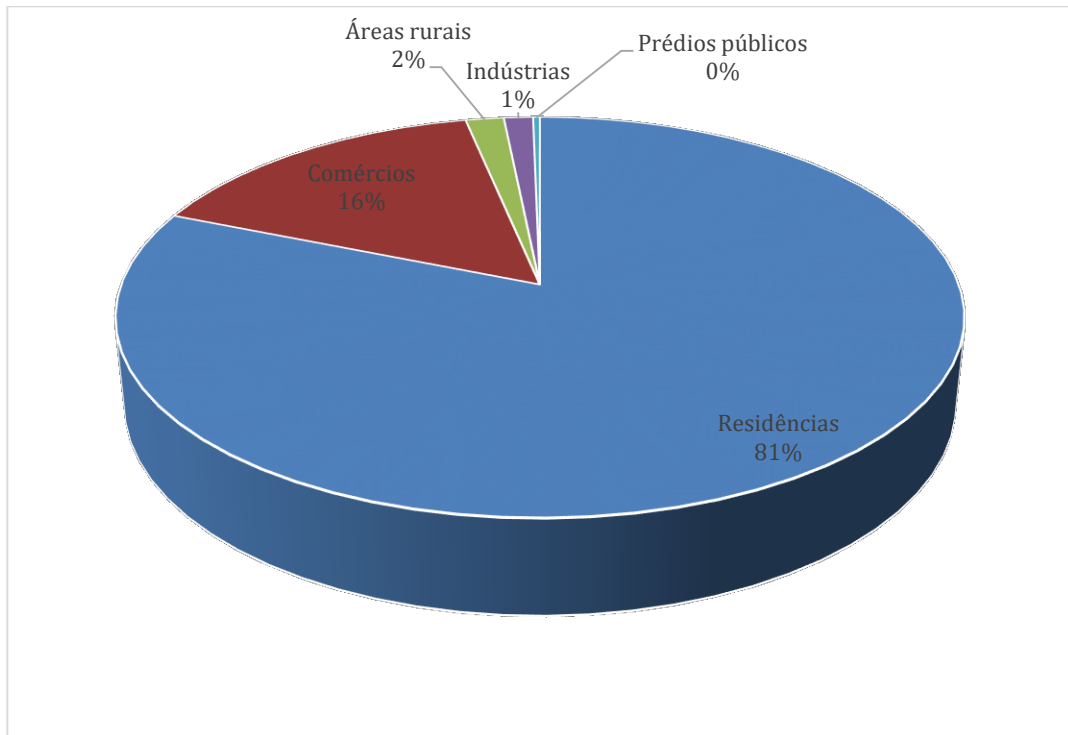
Segundo a CNN Brasil (2022), a energia solar fotovoltaica está com um crescimento exponencial. Afirmção dada pelo fato de que, em 2022, o aumento já foi de 80% durante o mês de fevereiro, comparado ao ano de 2021. Esse crescimento é devido à expansão de usinas solares no Brasil. Há dois fatores que justificam o número maior de usinas brasileiras: os leilões organizados pelo governo e outra pelas próprias empresas (CNN, 2022).

Com o aumento das contas de luz, a energia solar será certamente a melhor opção para os consumidores brasileiros. Segundo a Insole (2022), a capacidade instalada da energia solar está em grande crescimento e vai aumentar o dobro em 2022, em comparação em 2021. O estudo ainda afirma que o Brasil ultrapassou 1 milhão de unidades consumidoras com geração de energia a partir da fonte solar (INSOLE, 2022).

De acordo com o Portal Solar (2021), o município de Uberlândia/MG ocupa o primeiro lugar no ranking brasileiro com maior potência fotovoltaica, excedendo a marca de 500 MW operacionais em distribuição de energia fotovoltaica. O município abastece 3.968 unidades consumidoras e possui 3.267 sistemas fotovoltaicos. O gráfico 1 ilustra a distribuição dos sistemas fotovoltaicos em Uberlândia/MG.

¹ Derivada se recursos naturais que estão sempre disponíveis ao homem, a exemplo da energia solar e eólica.

Gráfico 1 - Distribuição do sistema fotovoltaico



Fonte: O autor, baseado nos dados de PORTAL SOLAR (2021).

Assim, esta pesquisa tem como objetivo realizar o dimensionamento de um sistema solar fotovoltaico localizado na cidade de Uberlândia/MG para que seja possível reduzir os custos dos 7 consumidores analisados e diminuir a dependência de energia elétrica proveniente da distribuidora.

1.1 Tema do projeto

Este trabalho possui o seguinte tema: Dimensionamento e implementação de um sistema fotovoltaico com ênfase na economia de energia gerada. Assim, o principal objetivo desta pesquisa é realizar uma análise da viabilidade do dimensionamento de um sistema solar de modo que reduza os custos dos consumidores e a dependência da energia elétrica proveniente das concessionárias. Este projeto tem como proposta que o sistema opere, diretamente, conectado à rede elétrica convencional.

1.2 Problematização

Com a atual crise energética brasileira, sugere-se a necessidade de diversificar a matriz elétrica. A ausência da chuva acarreta um colapso das hidrelétricas, enquanto a utilização de termelétricas aumenta, drasticamente, os impactos ambientais e econômicos. Diante desse pressuposto, uma excelente alternativa é a utilização de fontes de energia renováveis, dentre as quais se destaca, a energia proveniente do sol, isto é, a energia fotovoltaica, que é considerada uma fonte de energia abundante, sustentável e não poluente.

De acordo com Macedo (2017), o consumo de energia elétrica do Brasil possui uma estimativa de triplicar de valor até 2050, alcançando 1.624 terawatt/hora (TWh). Assim, torna-se necessário, que haja novos investimentos em fontes renováveis limpas de energia, pois a utilização das fontes tradicionais, como hidrelétrica e termelétrica, pode não atender a demanda.

Todavia, um outro grande problema em relação a geração da energia solar fotovoltaica é o dimensionamento correto, de maneira que supra a necessidade da demanda necessária em uma residência, juntamente com uma boa viabilidade financeira, isto é, que haja um barateamento da conta de energia entregue pela distribuidora.

1.3 Hipóteses

A hipótese norteadora desta pesquisa é dada pela possibilidade de realizar um dimensionamento adequado, de acordo com a necessidade de cada consumidor, e uma implantação de uma microgeração em um local que possui um alto consumo de energia, por meio da utilização de painéis fotovoltaicos conectados à rede elétrica convencional (sistemas *on-grid*) de maneira eficiente e com baixo custo.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

Este projeto tem como objetivo geral realizar uma análise da viabilidade econômica do dimensionamento de um sistema de energia solar, objetivando uma redução de custo dos usuários e uma diminuição da dependência da energia elétrica vinda das concessionárias.

1.4.2 Objetivos Específicos

Para que o objetivo principal seja alcançado, é necessário o estabelecimento dos seguintes objetivos específicos:

- Realizar uma revisão de literatura, de modo que analise as peculiaridades dos sistemas fotovoltaicos: *On-grid* e *Off-grid*;
- Coletar o consumo de energia elétrica dos usuários de Uberlândia/MG;
- Dimensionar os módulos fotovoltaicos de acordo com o consumo dos usuários;
- Estimar o custo de um sistema solar fotovoltaico;
- Dimensionar o inversor adequado para o sistema fotovoltaico;
- Dimensionar o cabeamento específico para o projeto fotovoltaico;
- Dimensionar o tipo de dispositivos de proteção adequados;
- Dimensionar o medidor bidimensional do sistema fotovoltaico;
- Esquematização do diagrama unifilar do sistema fotovoltaico;
- Comparar os *paybacks* da geração fotovoltaica real e ideal, verificando a viabilidade econômica.

1.5 Justificativa

A energia proveniente do sol é indispensável para a vida no planeta Terra, e o seu aproveitamento para geração de energia elétrica, por meio dos painéis fotovoltaicos é uma das alternativas mais promissoras (DE REZENDE; ZILLES, 2018). Esse tipo de geração de energia possui como vantagem a minimização dos impactos ambientais, além de gerar mais economia para os usuários.

Este trabalho apresenta um estudo da viabilidade e dimensionamento de um sistema fotovoltaico para geração de energia elétrica em residências, visando uma segurança maior aos usuários e economia de custos referente a conta de energia elétrica.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

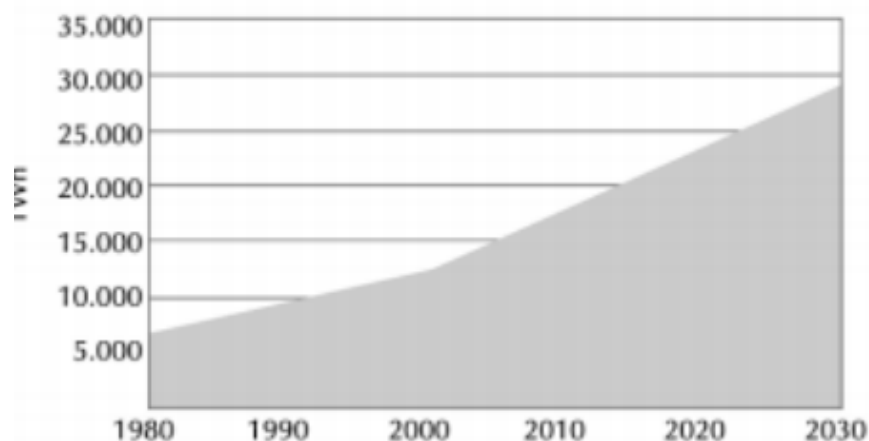
Neste capítulo, serão abordados os principais tópicos sobre o tema, tais como: A energia solar fotovoltaica, sistemas *on-grid* e a Resolução nº 687 da ANEEL.

2.1 Energias Renováveis

Desde as sociedades mais primitivas, a energia é um meio indispensável para manutenção da vida humana, bem como a água e o ar. Nessa época, a energia era obtida de forma bem rudimentar, obtida da lenha proveniente das florestas, e assim era possível realizar atividades básicas, como cozinhar. Com a chegada da Idade Média, esses meios de obtenção de energia foram se diversificando, utilizando cursos d'água e os ventos, mas ainda assim, não eram suficientes para suprir a grande demanda crescente da população por recursos (GOLDEMBERG; LUCON, 2007).

Depois da concepção da Revolução Industrial, essa busca por recursos energéticos ficou ainda mais abrangente, sendo necessário o maior uso, de energia provenientes de fontes como o gás, petróleo e carvão. Mais recentemente, como exemplo, no ano de 2003, o consumo total médio mundial era de 1,69 toneladas de petróleo per capita. Levando em consideração que a população era de 6,27 bilhões de pessoas, conclui-se que em média, o consumo diário por habitante era de 46.300 kcal (GOLDEMBERG; LUCON, 2007). O gráfico 2 ilustra o crescimento do consumo de energia elétrica mundial (eixo y) desde 1980, e faz uma projeção desse consumo até 2030 (eixo x).

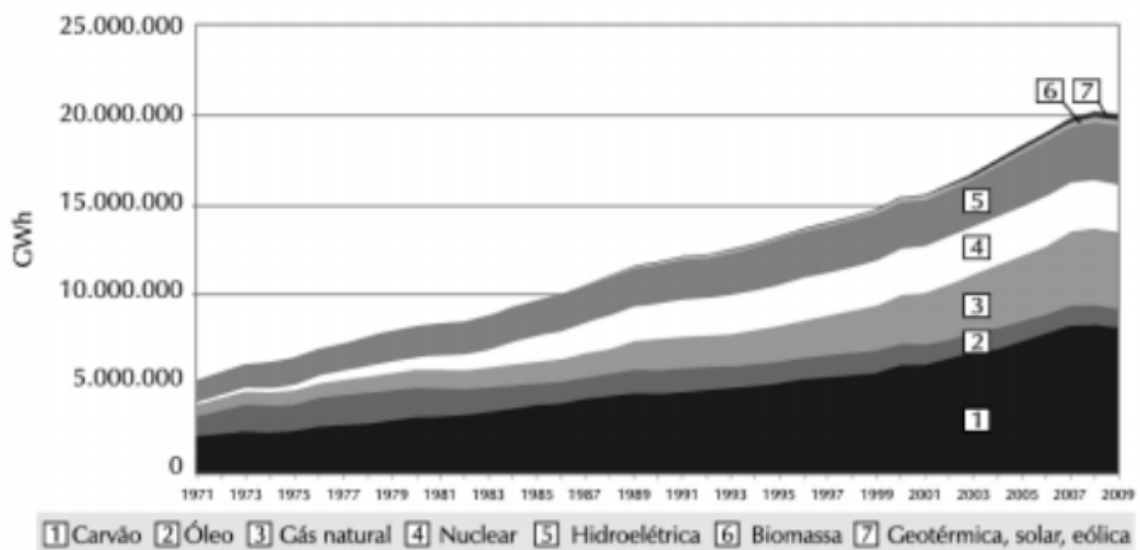
Gráfico 2 - Previsão de consumo de energia elétrica mundial até 2030.



Fonte: ENERGIA E ELETRICIDADE (2012).

Como ilustra o Gráfico 3, é possível observar a utilização das fontes de energia elétrica mundialmente, e concluir que aproximadamente 80% da energia elétrica mundial produzida e consumida, parte da queima de petróleo, gás natural e carvão, e de usinas nucleares (ENERGIA E ELETRICIDADE, 2012).

Gráfico 3 - Uso das fontes de energia para geração de eletricidade no mundo.



Fonte: ENERGIA E ELETRICIDADE (2012).

Diante do uso em massa desses recursos para a produção de energia elétrica, podem ser citados pelo menos dois grandes problemas gerados, um deles é a sua escassez, ou seja, podem se esgotar um dia. Além disso, há um outro grande problema ambiental em relação a queima de combustíveis fósseis, acarretando a poluição do planeta. É necessário que a humanidade tenha uma perspectiva de futuro quanto as energias renováveis, e intensificar seu uso (ENERGIA E ELETRICIDADE, 2012).

2.2 Energia Solar Fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica é a energia elétrica captada por meio da radiação solar através de células fotovoltaicas, que convertem os raios do sol e o transformam em energia elétrica. Essa geração de energia solar ocorre dentro da célula quando ocorre uma reação da luz do sol com o material semicondutor, admitindo a placa solar uma combinação de diversos elementos sobrepostos (DOS SANTOS; MARTINS; DE SOUSA BORGES, 2020).

O módulo solar fotovoltaico é a célula essencial do sistema. A quantidade desses módulos conectados em série determina a tensão de toda a operação do sistema em corrente contínua (CC).

De acordo com Santos et al. (2015), a conversão da radiação solar em energia elétrica ocorre por meio dos módulos fotovoltaicos construídos com materiais semicondutores, como o Silício. Quando a radiação atinge a célula, uma quantidade de fótons que compõem a luz solar é absorvida pelo semicondutor, liberando os elétrons para fluir livremente, que vão em um sentido de acordo com o campo elétrico produzido pela célula fotovoltaica.

De acordo com Pereira (2019), há dois tipos de operações relacionadas à geração distribuída: Os sistemas *off-grid* e *on-grid*. O primeiro refere-se a sistemas isolados e autônomos de geração de energia solar que utilizam baterias como dispositivos armazenadores de energia. Esse sistema é composto por placas fotovoltaicas, cabos e estrutura de suporte, como: inversores (que convertem a corrente contínua CC em corrente alternada AC), controladores de cargas (responsável por evitar o excesso de carga energética nas baterias, armazenando a energia excedente) e baterias. Como, nesse sistema não há ligação direta com a concessionária energética. Ao haver falta de energia, o abastecimento é realizado pela reserva que fica armazenada no banco de baterias.

O sistema *on-grid* é conectado à rede elétrica da concessionária de energia. Nesse sistema, o inversor exerce a função de converter corrente contínua (CC) em corrente alternada (AC) e sincroniza todo sistema com a rede pública. Dessa forma, sempre que houver excesso de carga, ela será enviada a rede convencional de distribuição de energia. Assim, o excedente é convertido em créditos para o consumidor (PEREIRA, 2019).

Diante do pressuposto, é possível notar que o sistema *on-grid* é mais vantajoso para o consumidor que fica próximo da rede de distribuição de energia, pois dispensa a utilização de baterias. Entretanto, o sistema *off-grid* ganha em relação aos consumidores que moram distantes da rede de transmissão de energia, como ilustra a figura 1.

Figura 1 - Modelos de sistemas de geração distribuída de energia solar.



Fonte: PEREIRA (2019).

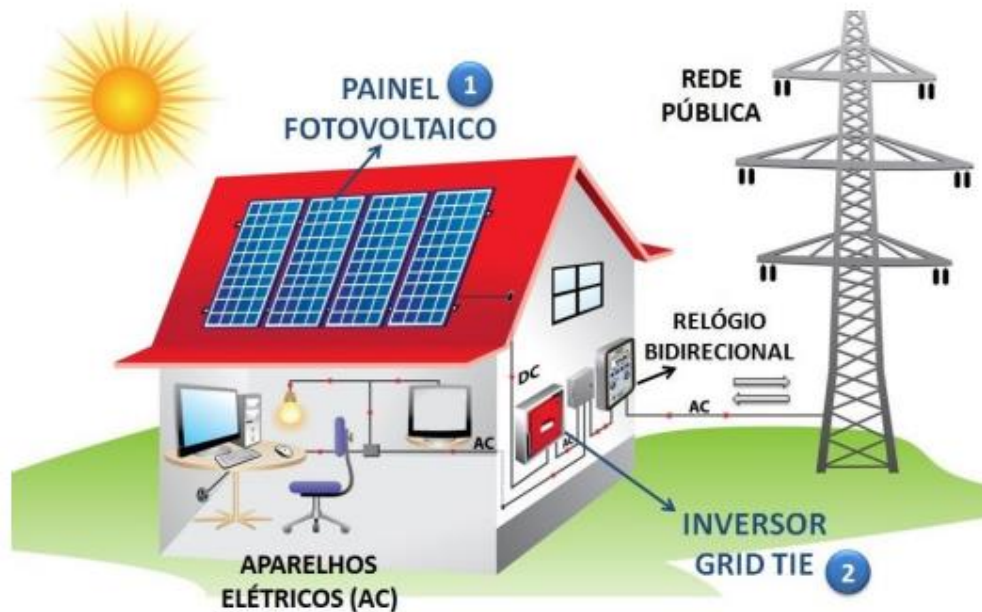
Os maiores desafios para a geração de energia solar são o rendimento energético e todo o custo de operação. O rendimento chega a, aproximadamente, 12% com o silício monocristalino, que é o material mais puro (MACIEL; SOUZA; BOULOMYTIS, 2021).

Atualmente, existem diversas tecnologias para otimização da captação e geração da energia solar, dentre eles destaca-se o sistema de rastreamento solar. Esse sistema visa gerar energia de acordo com o movimento do sol e então, maximizar o aproveitamento da radiação solar, comparado a um sistema estático. Essa tecnologia pode promover um aumento de 30% a 40% na produção de energia (MACIEL; SOUZA; BOULOMYTIS, 2021).

2.2.1 Princípios de funcionamento do sistema *On-Grid*

A figura 2 ilustra um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica. Pode-se observar que o sistema opera, simultaneamente, com a concessionária e são responsáveis por fornecer eletricidade para residências e prédios comerciais, principalmente. Esses sistemas visam reduzir ou eliminar o consumo por meio da rede pública, objetivando uma independência em relação a concessionária (MACEDO, 2017).

Figura 2 - Funcionamento de um sistema On-grid.



Fonte: MACEDO (2017).

Quando a energia gerada pelos painéis é superior a demanda imposta pelas cargas, o excedente dessa energia é injetado na rede pública, e assim, o consumidor adquire créditos de energia. Esses créditos são reservados por 60 meses e, caso o consumidor não os utilize, ficarão para a distribuidora de energia (MACEDO, 2017).

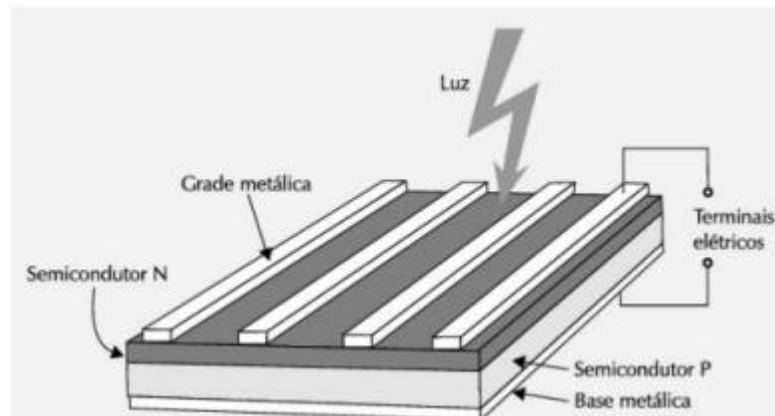
Essa troca de energia elétrica entre a distribuidora e as residências ou comércios, promove uma redução de custos na conta de energia elétrica. Todavia, quando o sistema gera uma energia inferior a demanda, o déficit é suprido pela rede elétrica. Quando há ausência de sol, a rede pública também se responsabiliza em alimentar as cargas (MACEDO, 2017).

A ANEEL classifica os sistemas *On-grid* em três categorias: microgeração, minigeração e usinas de eletricidade, conforme a Resolução nº687/2015. A microgeração possui potência instalada igual ou até 75 kW, enquanto a minigeração possui potência superior à 75 kW menor ou igual a 5 MW e as usinas de eletricidade com capacidade de 25.263 MW, correspondendo a 0,02% da matriz energética nacional. Geralmente, todos esses sistemas são instalados em consumidores comerciais e industriais, visando suprir a demanda do consumo de energia elétrica concessionária (MACEDO, 2017).

2.2.2 Princípios de funcionamento de um painel fotovoltaico

Uma célula fotovoltaica possui a estrutura composta por duas camadas de material semicondutor, P e N. Além disso, possui uma grade metálica superior e uma base metálica inferior, que funcionam como coletores da corrente elétrica, as quais basicamente os terminais elétricos da célula. Com o intuito de evitar a reflexão e aumentar a absorção de fótons de radiação solar, a célula conta ainda com uma camada de nitreto de silício ou dióxido de titânio (ENERGIA E ELETRICIDADE, 2012). A figura 3, demonstra a disposição dos elementos de uma célula fotovoltaica.

Figura 3-Elementos que compõem a estrutura de uma célula fotovoltaica.

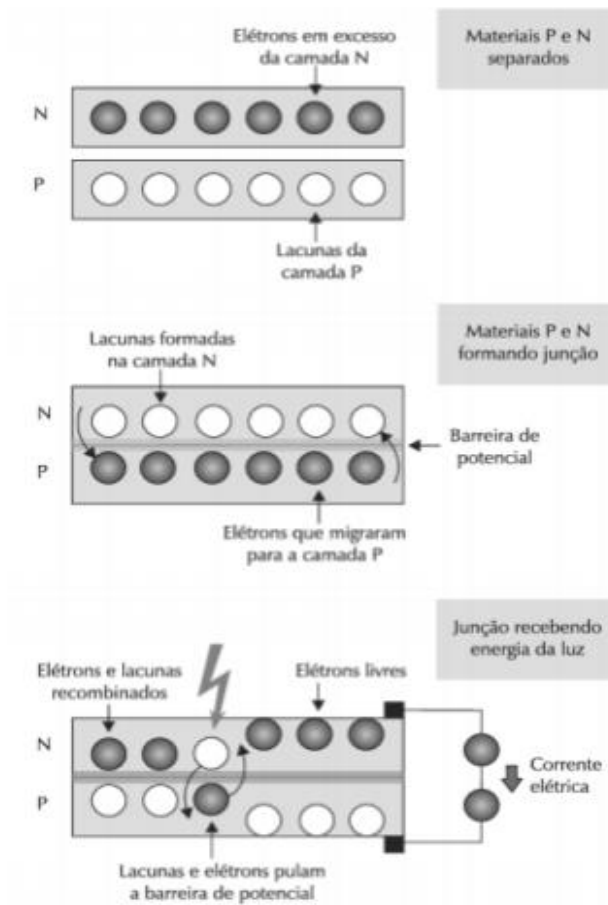


Fonte: ENERGIA E ELETRICIDADE (2012).

A junção semicondutora é formada quando há o contato das camadas de dois materiais P e N, de modo que ocorra a migração de elétrons da camada P para a N, ocupando as lacunas vazias (ENERGIA E ELETRICIDADE, 2012).

A figura 4 demonstra o que acontece quando há o contato das camadas P e N, onde um campo elétrico é criado através da mudança de camadas dos elétrons e lacunas, ocasionando uma barreira de potencial entre elas. Se a célula não estiver iluminada, os elétrons e lacunas ficam aprisionados por essa barreira. Na primeira situação, os materiais semicondutores estão separados, na segunda estão juntos para formar a junção e na terceira a junção está produzindo corrente elétrica através da exposição a luz (ENERGIA E ELETRICIDADE, 2012).

Figura 4 - Demonstração do que ocorre internamente em uma célula fotovoltaica.



Fonte: ENERGIA E ELETRICIDADE (2012).

O semicondutor mais utilizado na produção dos painéis fotovoltaicos é o silício, mas existem também outras tecnologias de materiais utilizados, o que possibilita fazer um comparativo de eficiência entre elas, como ilustra a tabela 1.

Tabela 1- Comparativo de eficiência de materiais que compõem as células fotovoltaicas.

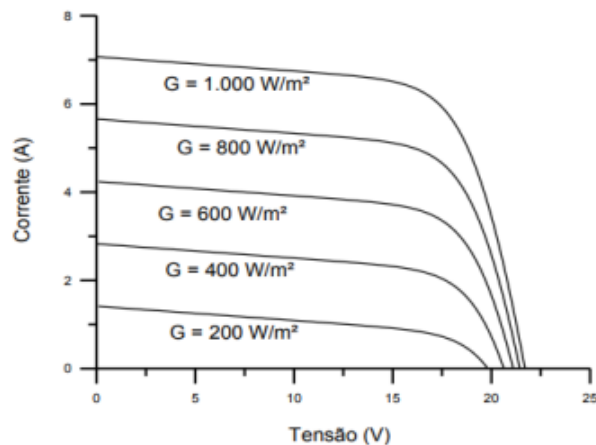
Material da célula fotovoltaica	Eficiência da célula em laboratório	Eficiência da célula comercial	Eficiência dos módulos comerciais
Silício monocristalino	24,7%	18%	14%
Silício policristalino	19,8%	15%	13%
Silício amorfo	13%	10,5%	7,5%
CIS, CIGS	18,8%	14%	10%
Talureto de cádmio	16,4%	10%	9%

Fonte: ENERGIA E ELETRICIDADE (2012).

Ao se deparar com a tabela 1, pode-se concluir que o silício monocristalino, o silício policristalino e o silício amorfo, possuem os valores mais satisfatórios nos quesitos de eficiência, o que justifica seu maior uso na fabricação dos painéis fotovoltaicos. Vale ressaltar também, que a eficiência e bom desempenho dos módulos estão diretamente ligados a irradiância do sol e temperatura das células fotovoltaicas (CEPEL/CRESESB, 2014).

À medida que se aumenta a irradiância do sol, a corrente elétrica proveniente do módulo tende a aumentar também, ou seja, quanto mais irradiância o painel recebe, mais corrente ele tende a gerar. A figura 5 ilustra o efeito causado pela irradiância, ocasionando maior geração de potência através da elevação da corrente.

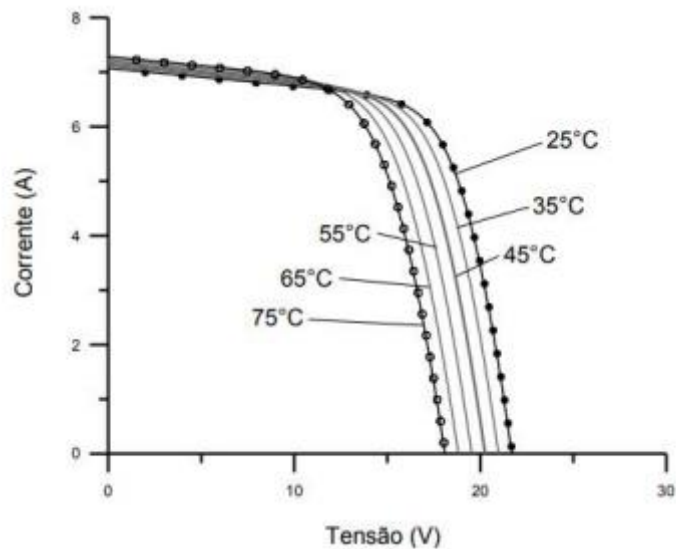
Figura 5 - Efeito causado pela irradiância em um painel fotovoltaico.



Fonte: ENERGIA E ELETRICIDADE (2012).

Os efeitos da irradiância estão relacionados com o aumento da temperatura das células, que por sua vez, está relacionada com uma queda de tensão sofrida. Essa queda de tensão devido a temperatura é mostrada na figura 6, onde é possível notar que quanto maior a temperatura, maior é a queda de tensão (CEPEL/CRESESB, 2014).

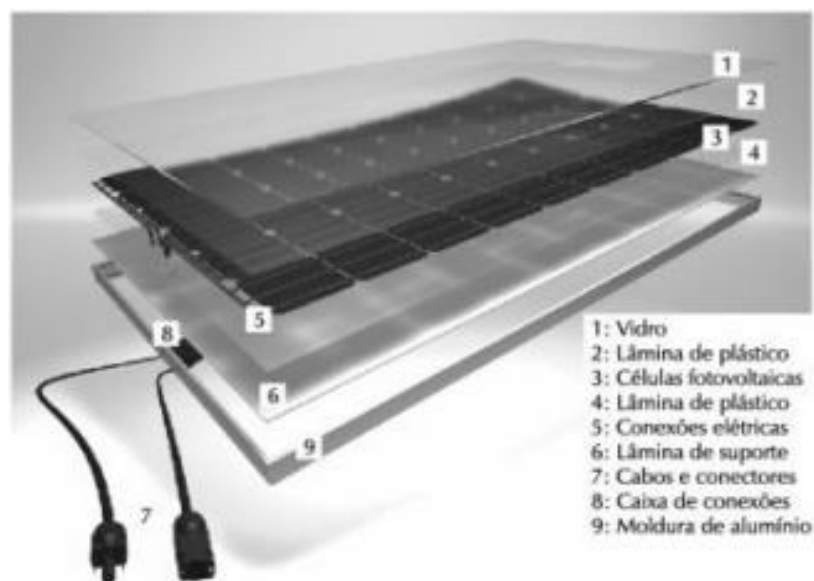
Figura 6 - Efeito causado pela temperatura em um painel fotovoltaico.



Fonte: ENERGIA E ELETRICIDADE (2012).

No processo de produção de um módulo fotovoltaico, as células e conexões são recobertas e encapsuladas dentro de lâminas de plástico. Logo depois, o módulo é envolvido por uma lâmina de vidro. E por fim uma moldura de alumínio é aplicada. Os cabos e conexões elétricos, são dispostos na parte traseira dos módulos, em uma espécie de caixa. A figura 7 mostra o processo de fabricação de um módulo em questão.

Figura 7 - Disposição dos componentes básicos de um módulo fotovoltaico.



Fonte: ENERGIA E ELETRICIDADE (2012).

2.3 Inversores

Os painéis fotovoltaicos geram energia de forma de corrente contínua (CC), entretanto a grande maioria dos aparelhos de uma residência operam com corrente alternada (AC). Assim, tanto os sistemas de geração distribuída conectados à rede da concessionária de energia, quanto sistemas isolados necessitam da presença de um inversor, para que seja possível realizar essa conversão da energia, provenientes dos módulos fotovoltaicos e/ou baterias em energia AC, conforme as especificações definidas pela unidade consumidora (MACEDO, 2017).

Os inversores são divididos em duas categorias: *Off grid* e *On grid* ou *Grid Tie*. O primeiro refere-se ao sistema fotovoltaico que trabalha de forma independente, isto é, não é conectado a nenhuma outra fonte de energia que não seja os módulos fotovoltaicos (NOGUEIRA, 2017). A figura 8 ilustra alguns exemplos dos inversores *Off Grid*.

Figura 8 - Inversores Off Grid.



Fonte: NOGUEIRA (2017).

Os inversores *Grid Tie* ou *On Grid*, além de converter a energia proveniente das placas solares, conecta o sistema de geração solar a rede concessionária de energia (NOGUEIRA, 2017). A figura 9 ilustra alguns modelos de inversores *On Grid*.

Figura 9 - Inversores Grid Tie ou On Grid.



Fonte: NOGUEIRA (2017).

Os inversores *Grid Tie* apresentam características de funcionamento que vão além da conversão CC para CA, pois apresentam funções de controle de fluxo de potência entre a unidade geradora fotovoltaica e a concessionária, ajustes de parâmetros em saída, como: níveis de corrente harmônica, frequência, tensão e fator de potência, além de realizar o monitoramento da tensão e correntes provenientes dos módulos fotovoltaicos (NOGUEIRA, 2017).

2.4 Resolução Normativa N° 687 da ANEEL

A ANEEL, alterou algumas diretrizes da resolução normativa n° 482/2012, visando tornar mais atrativo o investimento em energias renováveis. Dessa forma, a agência maximizou as regras para o sistema de compensação de energia e incluiu outras modalidades de geração (ALMEIDA, 2016). Essas alterações serão descritas nas subseções a seguir.

2.4.1 Definições de micro e minigerações

Os incisos I e II da nova resolução definiram como mini e microgerações, levando em consideração a potência do sistema instalado. Classificam-se como minigeração, os sistemas que possuem uma potência instalada inferior a 75 kW e que utilizam energias renováveis ou de cogeração qualificada conectados à rede. Por sua vez, como microgeração, classificam-se os sistemas com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5MW, com exceção das fontes hídricas (ALMEIDA, 2016).

A Figura 10 ilustra os novos e antigos limites de enquadramento para sistemas de geração solar, eólica cogeração qualificada ou biomassa.

Figura 10 - Enquadramentos de definição de acordo com a potência instalada

	482/2012	687/2015
Microgeração	75	100
Minigeração	1000	5000

Fonte: ALMEIDA (2016).

2.4.2 Prazos

Segundo Almeida (2016), o prazo da validade dos créditos de energia passou a ser de 60 meses, o qual anteriormente tinha o prazo de 36 meses. Outra alteração válida foi em relação

ao prazo total para a distribuidora conectar usinas de microgeração que, foi reduzido de 82 para 34 dias.

2.4.3 Novas modalidades

Uma inclusão bastante relevante realizada pela ANEEL foi a “geração compartilhada” que possibilita que diversos interessados pelo projeto se unam em um consórcio ou em uma cooperativa, instalem uma micro ou mini geração distribuída e utilizem a energia gerada pelo sistema. Dessa forma, possibilitará uma economia na conta de energia dos consorciados ou cooperados. Nesse viés, essas novas regras facilitaram o acesso à rede, por meio do preenchimento de um formulário padrão a ser disponibilizado pela distribuidora local (ALMEIDA, 2016).

Vale ressaltar que, na forma de geração compartilhada, que a distribuidora deve deferir a solicitação de acesso, onde foram localizados o pagamento de aluguel proporcional a quantidade de energia gerada (R\$/kWh) (ALMEIDA, 2016).

3 METODOLOGIA

Para a realização deste trabalho de conclusão de curso, foi necessário realizar o dimensionamento de um sistema fotovoltaico localizado na cidade de Uberlândia/MG, considerando a média de consumo de energia elétrica. Os dados foram obtidos a partir da análise das contas de energia elétrica de 7 consumidores residenciais, provenientes da CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais).

Dentre os demais tipos dos sistemas fotovoltaicos, foi adotado o sistema *on-grid*, por dispensar o uso de baterias, implicando na redução de custos, bem como o aproveitamento do excedente de energia, gerando créditos com a concessionária.

Assim, foi realizado o dimensionamento dos painéis fotovoltaicos, definindo quantidade necessária, conforme as necessidades energéticas dos usuários da região analisada. Dessa forma, também foi analisado e devidamente calculado o tipo de inversor adequado. Também foram definidos o tipo de cabeamento necessário, os dispositivos de proteção para o sistema, e o medidor bidirecional utilizado. Foi feito um diagrama unifilar esquematizando o sistema fotovoltaico por completo, com todas as especificações necessárias. E por fim foi feito um comparativo dos *paybacks* ideais visando a viabilidade econômica.

3.1 Projeto de um sistema fotovoltaico *On-Grid*

Para estimar a média anual de consumo, foi necessário realizar a coleta de dados de consumo diário e mensal dos sete consumidores residenciais da cidade de Uberlândia/MG atualizados da conta de energia elétrica da CEMIG. A Tabela 2 detalha os dados coletados. Vale ressaltar que, por questões de sigilo, eles não foram identificados.

Tabela 2 - Consumo mensal de energia dos consumidores residentes em Uberlândia/MG.

ANO	CONSUMIDOR	MÉDIA MENSAL (kWh)	MÉDIA ANUAL (kWh)	MÉDIA DIÁRIA (kWh)
2022	J.K.J.S.	128,355	1540,26	4,2785
	A.S.S.	300	3600	10
	K.L.J.S.	200	2400	6,666666667
	M.S.A.	120	1440	4
	J.R.F.	220	2640	7,333333333
	E.S.S.	125,06	1500,72	4,168666667
	R.J.S.	70	840	2,333333333
	TOTAL	1163,41	13960,98	38,78
	MÉDIA PARA ANÁLISE	166,20	1994,42	5,54

Fonte: O Autor.

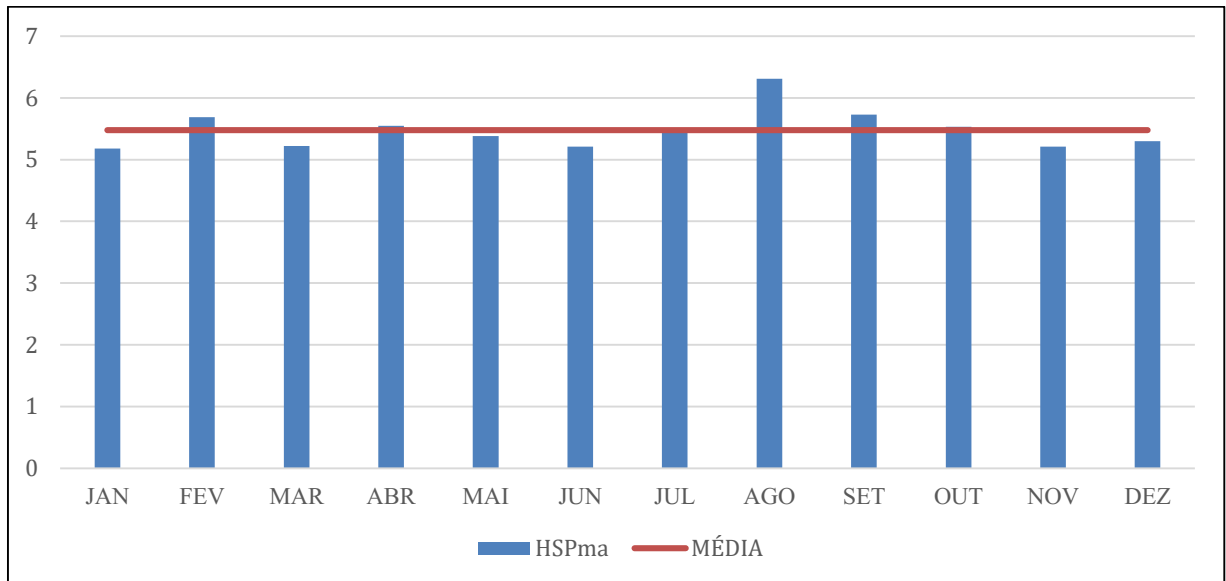
De acordo com Macedo (2017), o consumo mensal mínimo exigido pela CEMIG é de 30 kWh, ou seja, mesmo o consumidor não utilizando a energia elétrica, ele terá que pagar a taxa mínima. Assim, deve-se desconsiderar 1 kWh/dia no projeto do sistema fotovoltaico.

Como pode ser observado na Tabela 2, em 2022, dentre os sete consumidores avaliados, foi constatado a média de consumo diário de 5,54 kWh/dia. Ao subtrair 1 kWh/dia referente a taxa mínima, o valor reduz a 4.54kWh/dia. Todavia, esse número não supre a necessidade de alguns consumidores. Então é necessário utilizar o maior valor de média diária aproximado do consumo diário e anual, equivalente a 10 kWh/dia e 3600 kWh/ano para a realização dos respectivos cálculos.

3.2 Cálculo da irradiação solar

Os valores da irradiação média da cidade de Uberlândia/MG foram coletados por meio do site de (CRESESB, 2023). O Centro de Referência das Energias Solar e Eólica Sérgio Brito (CRESESB) disponibiliza uma página online, onde são inseridos os dados de latitude e longitude do município e ilustra a irradiação solar média [kWh/m².dia]. Para a cidade de Uberlândia/MG utilizou-se 19° 30' de latitude sul e 48° 50' de longitude oeste. O Gráfico 4 ilustra um comparativo entre os valores de irradiação solar mensal, e a média obtida de irradiação solar, da cidade de Uberlândia/MG.

Gráfico 4 - Irradiação solar média versus mensal em Uberlândia



Fonte: O Autor, baseado nos dados CRESESB (2022).

A Tabela 3 ilustra os valores obtidos pelo CRESESB.

Tabela 3 - Irradiação solar média.

MÊS	HSPMA (WH/M²/DIA)
JAN	5,18
FEV	5,69
MAR	5,22
ABR	5,55
MAI	5,38
JUN	5,21
JUL	5,45
AGO	6,31
SET	5,73
OUT	5,53
NOV	5,21
DEZ	5,3
MÉDIA	5,48

Fonte: O Autor.

Para a realização dos cálculos de dimensionamento dos módulos fotovoltaicos a seguir, será utilizado o valor da média 5,48 Wh/m²/dia.

3.3 Dimensionamento dos Módulos

Tendo em vista que, os créditos gerados excedentes possuem uma duração de 60 meses, deve-se planejar uma geração energética inferior ao consumo mensal.

Para a realização do dimensionamento, primeiramente, foi necessário realizar o cálculo da potência de pico do sistema fotovoltaico (Pfv). A equação (1) utilizada consta na monografia de Macedo (2017). Para a realização do cálculo, foi estabelecido o valor de 0,75 para a taxa de desempenho do sistema. Esse valor, considera algumas possíveis perdas do sistema de geração solar, como a eficiência do inversor, sombreamento sobre as placas fotovoltaicas e uma possível redução da eficiência do sistema.

$$p_{fv} = \frac{E/TD}{HSP_{ma}} \quad (1)$$

Onde:

Pfv – Potência de pico do sistema fotovoltaico [W];

E – Consumo diário médio da região analisada [Wh/dia];

TD – Taxa de desempenho do sistema [adimensional];

HSP_{ma} – Horas de sol pleno diário em média [kWh/m²].

A partir dos valores coletados, foi possível determinar a potência gerada pelo sistema, obtendo Pfv.

$$p_{fv} = \frac{E/TD}{HSP_{ma}}$$

$$p_{fv} = \frac{10.000/0,75}{5,48}$$

$$p_{fv} = 2.433,09W$$

A potência obtida foi de 2.433,09 W, dessa forma, foram selecionados alguns painéis solares. Tal seleção foi realizada por meio da análise entre diversas marcas de módulos solares, evidenciando os mais utilizados nas residências e a relação custo versus benefício. Assim, o

Quadro 1 e a Figura 11 ilustram as especificações dos módulos solares escolhidos para o sistema.

Quadro 1 - Dados técnicos do módulo fotovoltaico.

Fabricante	Yingli Solar
Modelo	YL295P-35b
Tecnologia	Silício Policristalino
Potência nominal	295 W
Eficiência	15,2 %
Área do painel	1,94 m ²
Peso	25,5 kg
Tensão de circuito aberto - V_{oc}	45 V
Coefficiente de temperatura da tensão	0,32 %/°C
Tensão de máxima potência	36,9 V
Potência no ponto de máxima potência	295W
Peso vida útil	25 anos

Fonte: O Autor.

Figura 11 - Módulos solares



Fonte: O Autor.

A partir das especificações dos painéis fotovoltaicos, foi possível calcular a quantidade de painéis necessários para a geração de energia suficiente, tirando como base o consumo médio diário. A equação (2), consta na pesquisa de Macedo (2017), no qual N_{PFV} corresponde a quantidade de painéis necessários.

$$N_{PFV} = \frac{P_{fv}}{P_N} \quad (2)$$

$$N_{PFV} = \frac{2.433,09W}{295}$$

$$N_{PFV} = 8,24 \text{ painéis}$$

Onde:

N_{PFV} - Quantidade de painéis necessários;

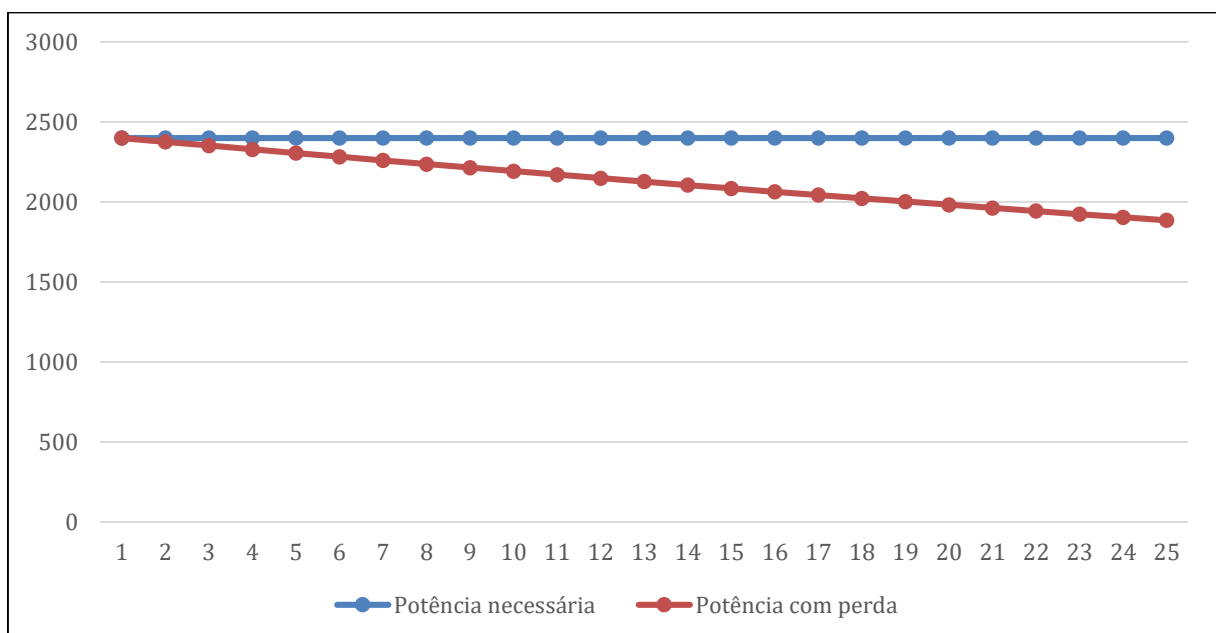
P_{fv} – Potência de pico do sistema fotovoltaico [W];

P_N – Potência nominal [W].

O valor obtido foi de $8,24 \cong 9$ painéis, todavia essa quantidade não é, diretamente, utilizada, pois é necessário considerar o desgaste natural do módulo fotovoltaico ao longo da sua vida útil. Assim, a Yinglii Solar considera uma vida útil de 25 anos, com uma perda máxima de 25% na eficiência. Neste estudo, pretende-se projetar um sistema que, mesmo ao chegar no fim da sua vida útil, ainda permaneça fornecendo a energia necessária para atender o consumidor, entregando a mesma potência calculada na equação (1).

Assim, foi estabelecido, graficamente, uma média das possíveis perdas. O Gráfico 5 ilustra a potência necessária constante e a curva de perda ao longo dos 25 anos.

Gráfico 5 - Simulação da potência necessária e da perda anual ao passar dos 25 anos, utilizando 9 módulos



Fonte: O autor.

O Gráfico 6 foi realizado por meio do *software* Excel. Percebe-se que a energia de 2400W diminui constantemente durante os 25 anos. Dessa forma, fica inviável do sistema cumprir as necessidades dos usuários. Uma estratégia viável, seria aumentar a quantidade dos módulos fotovoltaicos, pois com 9 painéis fotovoltaicos, a potência gerada é de 2433,09 W. Logo, ao acrescentar-se mais um painel fotovoltaico, resultaria em mais potência gerada para abastecer o cliente por mais tempo. Utilizando a equação 3, é possível obter a potência gerada com 10 painéis.

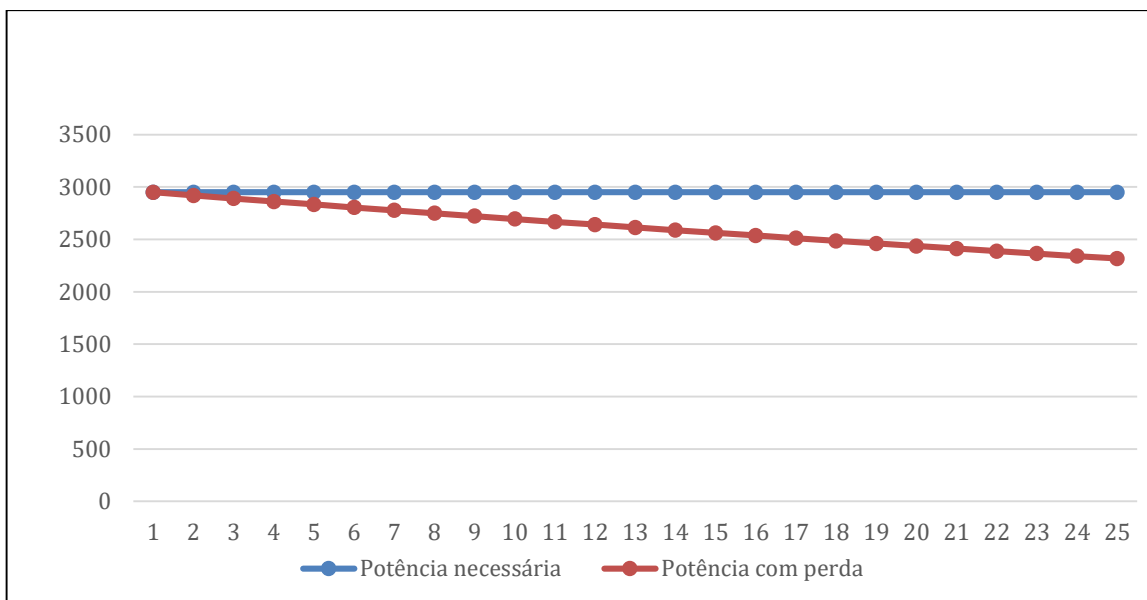
$$N_{PFV} = \frac{P_{fv}}{P_N} \quad (3)$$

$$10 = \frac{P_{fv}}{295}$$

$$P_{fv} = 2950W$$

O valor da potência calculado foi de 2950W. O Gráfico 6 ilustra a perda de potência ao passar dos anos.

Gráfico 6 - Simulação da potência necessária e da perda anual ao passar dos 25 anos, utilizando 10 módulos.



Fonte: O autor.

Ao comparar o Gráfico 5 e o Gráfico 6, pode-se observar que no final dos 25 anos, a diferença da potência gerada mensalmente, é de, aproximadamente, 500 W. Outro fato

relevante, é que durante os 18 anos, a potência gerada é excedente². Esse excesso de energia é injetado na rede elétrica da concessionária e o consumidor recebe o ressarcimento na forma de créditos acumulados. Após isso, é necessário realizar os cálculos da estimativa de energia gerada pelo arranjo fotovoltaico, conforme a equação (4) (FIGUEIRA, 2014).

$$\begin{aligned} E_{SP} &= HSP_{MAX} \times P_{módulo} \times N_{PFV} \\ E_{SP} &= 5,48 \times 295 \times 10 \\ E_{SP} &= 16,16 \text{ kWh/dia} \end{aligned} \quad (4)$$

Onde:

E_{SP} – Energia diária gerada sem perdas [kWh/dia];

HSP_{max} – Horas de sol pleno diário em média [kWh/m²];

$P_{módulo}$ – Potência nominal do módulo solar [W];

N_{PFV} – Número de painéis fotovoltaicos.

No entanto, essa energia gerada de 16,16 kWh/dia não leva em consideração as perdas do sistema. Nesse caso, ainda é necessário realizar o cálculo considerando a geração de energia esperada e a real, conforme a equação (5) (MACEDO, 2017).

$$\begin{aligned} E_{GP} &= HSP_{MAX} \times A_{inst} \times E_f \times (1 - \rho) \\ E_{GP} &= 5,48 \times 19,4 \times 0,152 \times (1 - 0,2) \\ E_{GP} &= 5,48 \times 19,4 \times 0,152 \times 0,8 \\ E_{GP} &= 12,92 \text{ kWh/dia} \end{aligned} \quad (5)$$

Onde:

E_{GP} – Energia diária gerada com perdas [kWh/dia];

HSP_{MAX} – Horas de sol pleno diário em média [kWh/m²];

A_{inst} – Área total a ser instalada [m²];

E_f – Eficiência do módulo solar [%];

ρ – perda percentual do sistema [%].

² Potência que excede o consumo dos moradores.

Em um projeto fotovoltaico, o projetista deve levar em consideração as perdas do sistema, visto que elas interferem, negativamente, na análise da viabilidade do sistema. A Tabela 4 ilustra os dados obtidos do dimensionamento realizado neste trabalho.

Tabela 4 - Dimensionamento dos painéis fotovoltaicos.

Energia diária gerada sem perdas	16,16 kWh/dia
Energia diária gerada com perdas	12,92 kWh/dia
Número de painéis adequado para o sistema	10 painéis
Área ocupada	19,4m ²
Peso total	255 kg

Fonte: O Autor.

Por meio dos cálculos realizados nesta seção, é possível realizar o dimensionamento do inversor adequado para o sistema solar.

3.4 Dimensionamento do inversor

Para a realização do dimensionamento do inversor fotovoltaico, primeiramente, é necessário calcular a tensão total série do sistema, conforme equação 6 (COELHO; DE OLIVEIRA, 2016).

$$V_{ts} = V_{oc} \times N_{ps} \quad (6)$$

$$V_{ts} = 45 \times 10$$

$$V_{ts} = 450 \text{ V}$$

Onde:

V_{ts} – Tensão total série dos painéis [V];

V_{oc} – Tensão de circuito aberto do painel [V];

N_{ps} – Número de módulos fotovoltaicos.

Vale ressaltar que a temperatura interfere no sistema. Dessa forma, é necessário considerar os valores referentes ao coeficiente de temperatura de operação, como $\beta = \frac{2,3mV}{cél\ ul\ ^{\circ}C}$

e 47°C para temperatura máxima estimada, respectivamente. A equação 7 ilustra o cálculo da Tensão Corrigida por meio da Temperatura (MACEDO, 2017).

$$\begin{aligned}
 V_{\Delta T} &= V_{ts} \times (1 - \beta \Delta t) & (7) \\
 V_{\Delta T} &= 450 \times (1 - 0,0023 \times [47 - 25]) \\
 V_{\Delta T} &= 450 \times (1 - 0,0023 \times 22) \\
 V_{\Delta T} &= 450 \times (1 - 0,0506) \\
 V_{\Delta T} &= 450 \times 0,9494 \\
 V_{\Delta T} &= 427,23 \text{ V}
 \end{aligned}$$

Onde:

$V_{\Delta t}$ – Tensão corrigida pelo efeito da temperatura [V];

V_{ts} – Tensão total série dos painéis [V];

β – Coeficiente de temperatura da tensão [mV/célula.°C];

Δt – Variação de temperatura possível [°C].

O passo seguinte é calcular a corrente máxima que o sistema pode suportar, por meio da equação 8 (MACEDO, 2017).

$$\begin{aligned}
 I_{FVM\acute{a}x} &= \frac{Pt_{gerada}}{V_{\Delta T}} & (8) \\
 I_{FVM\acute{a}x} &= \frac{2950}{427,23} \\
 I_{FVM\acute{a}x} &= 6,90A
 \end{aligned}$$

Onde:

$I_{FVM\acute{a}x}$ – Corrente máxima de entrada [A];

PT_{Gerada} – Máxima potência gerada pelo sistema [W];

$V_{\Delta t}$ – Tensão corrigida pelo efeito da temperatura [V].

Por meio dos cálculos realizados, é possível escolher o inversor adequado para o sistema. A tabela 5 ilustra o resultado do dimensionamento do inversor fotovoltaico.

Tabela 5 - Dimensionamento do inversor.

Tensão total série dos painéis	450 V
Tensão corrigida	427,23V
Potência total do sistema	2950W
Corrente máxima	6,90 A

Fonte: O Autor.

Com esses resultados, o inversor escolhido foi o **Inversor Solar Grid-Tie B&B Moso SF5000TL**, que é capaz de suportar uma potência máxima de 5000W, uma tensão CC de 500V e uma corrente máxima de 15A. A imagem do inversor utilizado é mostrada na Figura 12 abaixo:

Figura 12 - Inversor Solar Grid-Tie B&B Moso SF5000TL.



Fonte: FLYTEC (2022).

3.5 Cabeamento

Primeiramente, é importante mencionar que este trabalho abordará superficialmente o dimensionamento de cabos elétricos para sistemas fotovoltaicos. Essa escolha se deve ao fato de que o objetivo principal deste estudo é o dimensionamento do sistema gerador e a estimativa

da energia produzida pelo sistema fotovoltaico em relação à intensidade de radiação solar no local da instalação.

Ao instalar um sistema fotovoltaico, é crucial se utilizar de cabos que atendam aos requisitos para esta aplicação, pois, em corrente contínua, os cabos estão sujeitos ao aquecimento devido ao efeito Joule. É fundamental distinguir cabos de fileira, cabo principal CC e cabo de ramal CA. Os cabos de fileira se referem aos condutores que estabelecem a conexão elétrica entre os módulos individuais do gerador fotovoltaico e a caixa de junção do gerador. Esses cabos geralmente são aplicados no exterior e devem ser independentes para os condutores de polaridade positiva e negativa, garantindo proteção contra falhas de aterramento e curtos-circuitos.

O cabo principal CC conecta a caixa de junção do gerador ao inversor. Quando a caixa de junção do gerador está localizada no exterior, os cabos devem ser tubulares porque não são resistentes aos raios ultravioletas. Também é recomendado separar os condutores de polaridade positiva e negativa para proteção contra falhas de terra e curtos-circuitos. Para isolar o inversor do gerador fotovoltaico e permitir trabalhos de manutenção e reparo, um interruptor principal CC é utilizado, seguindo a norma (IEC 60364-7-712, 2017). Essa norma estipula a necessidade de instalar um dispositivo de corte da conexão acessível entre o gerador fotovoltaico e o inversor. Por fim, o cabo de ramal CA é o cabo de conexão de corrente alternada que liga o inversor à rede da concessionária de energia por meio de um equipamento de proteção.

Para proteger os módulos e cabos de sobrecargas, será necessário intercalar fusíveis de fileira em todos os condutores ativos, positivos e negativos. Isso requer o dimensionamento dos cabos de fileira para suportar a corrente nominal corrigida de cada fileira. Caso contrário, sem o uso de fusíveis de fileira, os condutores devem ser dimensionados para a máxima corrente de curto-circuito do arranjo fotovoltaico, subtraído da corrente da fileira. Para garantir a proteção contra curto-circuito e sobrecarga, o cabo principal CC será equipado com um disjuntor CC. Ele também fornecerá seccionamento do arranjo fotovoltaico para futuras manutenções, inspeções ou troca em outros equipamentos do sistema. O cabo que liga o banco de baterias ao controlador de carga também deve ser equipado com um disjuntor CC para garantir a proteção e o seccionamento dos acumuladores de sobrecarga e curto-circuito. Esses cabos serão dimensionados a partir da máxima corrente de carga corrigida durante o uso total das baterias. O método da queda de tensão será usado para dimensionar os condutores adequadamente. Através do método da queda de tensão, os condutores deverão ser dimensionados da seguinte forma (equação 9):

$$S = \frac{P.l}{\Delta V (\%).V^2.\sigma} \quad (9)$$

Onde:

S - Seção transversal do cabo em mm²;

P - Potência transmitida no condutor;

l - Comprimento do condutor (positivo + negativo);

$\Delta V(\%)$ - Queda de tensão percentual no condutor;

V - Tensão nominal do sistema;

σ - Condutividade elétrica do material condutor.

A tabela 6 apresenta o dimensionamento dos condutores em corrente contínua do sistema fotovoltaico em estudo.

Tabela 6 - Dimensionamento dos condutores.

Fio	Corrente nominal	Tensão nominal	Capacidade de condução	Potência transmitida	Comprimento do trecho	Queda de tensão (%)	Bitola (mm ²)
CABO DE FILEIRA	8,22	16,59	30,5	272,73 Wp	4	1	4
CABO PRINCIPAL (CC)	38,85	16,59	30,5	1289,04 Wp	2	1	6
CABOS DO ACUMULADOR	23,43	24	26,93	562,32 Wp	3	1	10

Fonte: O Autor.

Para obter a corrente nominal do arranjo, multiplica-se a corrente de máxima potência de cada módulo pelo número total de módulos em paralelo, o que resulta em 30,5 Amperes. Já para a corrente de curto-circuito do arranjo, multiplica-se a corrente de curto-circuito de cada módulo pelo número total de módulos em paralelo, chegando a um valor de 41,5 A. De acordo com a norma europeia (IEC 60364-7-712, 2017) o cabo que liga os módulos deve ser capaz de transportar 1,25 vezes a corrente de curto-circuito do arranjo fotovoltaico e estar protegido contra falhas de aterramento e curtos-circuitos. Considerando uma corrente de curto-circuito de 8,3 A, calcula-se que a bitola do cabo deve ser de 11 A.

A potência transmitida pode ser encontrada multiplicando-se a tensão e a corrente da fileira no ponto de máxima potência, totalizando 272,73 Wp. Para uma queda de tensão de 1%

e com condutividade do cobre igual a 56 S/m, a bitola do cabo da fileira deve ser de 4 mm². Assim como os cabos de fileira, o cabo principal que liga o arranjo deve ser dimensionado para suportar 1,25 vezes a corrente de curto-circuito do arranjo fotovoltaico. Além disso, a potência transmitida pelo cabo principal pode ser calculada pela multiplicação da tensão e a corrente no ponto de máxima potência, totalizando 1289,04 Wp.

A corrente nominal do banco de baterias foi determinada calculando-se a máxima corrente de carga na ausência de energia da fonte primária da seguinte maneira:

$$I_n = \frac{P_c}{V \cdot fp} \quad (10)$$

Em que P_c é a potência total da carga determinada na seção 3.4, V é a tensão nominal do banco de baterias e fp é o fator de potência da carga.

Adotando-se um fator de potência da carga igual a 0,8 indutivo, determina-se a corrente nominal do banco de baterias de:

$$I_n = \frac{450}{24 * 0,8}$$

$$I_n = 23,43 \text{ A}$$

A capacidade de condução é determinada aplicando o fator de correção para temperatura ambiente diferente de 30°C, consultada na tabela 40 da (ABNT NBR 5410, 2004). Para uma temperatura ambiente de 40°C aplica-se um fator de correção de $k = 0,87$. Portanto, a capacidade de condução dos cabos do banco de baterias deverá suportar uma corrente corrigida de:

$$I_n' = \frac{23,43}{0,87} = 26,93$$

Como nos cabos anteriores, a potência transmitida nos cabos dos acumuladores é igual ao produto tensão e corrente: (24 V x 23,43 A = 562,32 W). Novamente substituindo os valores na equação (10), obtém-se uma bitola de 10 mm², verificando a conformidade com a capacidade de condução de corrente e com a máxima queda de tensão permitida.

3.6 Dispositivos de Proteção

3.6.1 Disjuntores

Após o dimensionamento do cabeamento, os disjuntores devem ser dimensionados seguindo o diagrama abaixo (ABNT NBR 5410, 2004):

$$I_{circuito} \leq I_{disjuntor} \leq I_{limite\text{cabo}}$$

Onde:

$I_{circuito}$ – Corrente do circuito

$I_{disjuntor}$ – Corrente de disparo do disjuntor

Conforme observado no diagrama, são especificadas as seguintes bitolas de cabos:

- Cabos de alimentação dos painéis fotovoltaicos (tensão DC) – 4 mm²;
- Cabos de força para ligação do inversor ao painel de proteção AC – 6 mm².

Conforme a tabela provida pela ABNT NBR 5410 (2004), exposta no anexo A, de limite de corrente, e considerando-se o método de instalação em eletroduto aparente (método B1), e da tabela 7, de corrente nominal de disjuntores termomagnéticos padrão europeu (DIN), teremos os seguintes disjuntores para os circuitos:

- Circuitos de alimentação dos painéis fotovoltaicos (tensão DC) – 16 A, bipolar;
- Circuitos de força para ligação do Inversor ao painel de proteção AC – 32 A, bipolar.

Tabela 7 - Valores de disjuntores tipo DIN.

CÓDIGO	PÓLOS	UN. DE VENDA	CORRENTE	MÍNIMO DE VENDA	CAIXA PEQUENA (UN)	CAIXA GRANDE (UN)
Dj 1063	MONO	UM	6	12	12	120
Dj 1103	MONO	UM	10	12	12	120
Dj 1163	MONO	UN	16	12	12	120
Dj 1203	MONO	UN	20	12	12	120
Dj 1253	MONO	UN	25	12	12	120
Dj 13 23	MONO	UN	32	12	12	120
Dj 1403	MONO	UN	40	12	12	120
Dj 1503	MONO	UN	50	12	12	120
Dj 1633	MONO	UN	63	12	12	120
Dj 1803	MONO	UN	80	12	12	120
Dj 1100	MONO	UN	100	12	12	120
Dj 2063	BI	UN	6	6	6	60
Dj 2103	BI	UN	10	6	6	60
Dj 2163	BI	UN	16	6	6	60
Dj 2203	BI	UN	20	6	6	60
Dj 2253	BI	UN	25	6	6	60
Dj 23P3	BI	UN	32	6	6	60
Dj 2803	BI	UN	40	6	6	60
Dj 2503	BI	UN	50	6	6	60
Dj 2633	BI	UN	63	6	6	60
Dj 2803	BI	UN	80	6	6	60
Dj 2100	BI	UN	100	6	6	60
Dj 3063	TRI	UN	6	4	4	40
Dj 3103	TRI	UN	10	6	4	40
Dj3163	TRI	UN	16	6	4	40
Dj 3203	TRI	UN	20	6	4	40
Dj 3253	TRI	UN	25	6	4	40
Dj 3323	TRI	UN	32	6	4	40
Dj 3403	TRI	UN	40	6	4	40
Dj 3503	TRI	UN	50	4	4	40
Dj 3633	TRI	UN	63	6	4	40
Dj 3803	TRI	UN	80	6	4	40
Dj 3100	TRI	UN	100	4	4	40

Fonte: ELETRICA UFPR (2020).

Sobre as curvas de disparo, sabe-se que:

- Curva B (3 a 5 x I_n) – Indicados para cargas resistivas com pequena corrente de partida ou grandes distâncias de cabo envolvidas, como é o caso de aquecedores e chuveiros elétricos e lâmpadas incandescentes;
- Curva C (5 a 10 x I_n) – Indicado para cargas indutivas, como motores elétricos, lâmpadas fluorescentes, geladeiras e máquinas de lavar roupas;
- Curva D (10 a 20 x I_n) - Cargas de grande corrente de partida, como transformadores BT/BT.

Dessa forma, como os sistemas fotovoltaicos não possuem correntes transitórias superiores a nominal, à Curva B é a indicada para todos os disjuntores a serem utilizados.

3.6.1.1 Condutores de Proteção

A respeito dos condutores e proteção PE, estes devem ser da cor verde, ou verde-amarelo, e com bitola superior a metade do valor da fase, conforme a tabela 8 (ABNT NBR 5410, 2004):

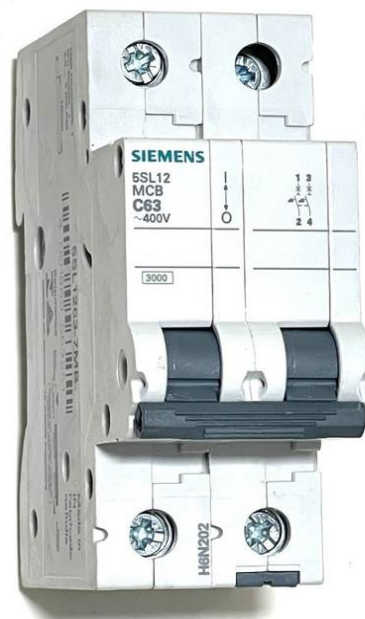
Tabela 8 - Seção mínima do condutor de proteção.

Seção dos condutores de fase $S \text{ mm}^2$	Seção mínima do condutor de proteção correspondente
$S \leq 16$	S
$16 < S \leq 35$	16
$S > 35$	S/2

Fonte: ABNT NBR 5410 (2004).

Após realizar todas as análises acima, foi selecionado o disjuntor que irá compor o sistema fotovoltaico, e a Figura 13 demonstra as suas características:

Figura 13 - Disjuntor Bipolar Siemens 5SL12



Fonte: SIEMENS (2018).

As tabelas com dados técnicos e seleção dos disjuntores estão nos anexos B e C, respectivamente.

3.6.2 DPS - Dispositivos de Proteção contra Surtos

Os DPS, são equipamentos que conseguem detectar sobretensões transitórias na rede elétrica. Ou seja, o aparelho desvia as correntes de surto que, infelizmente, são mais comuns do que muitas pessoas imaginam que podem danificar eletrônicos e eletrodomésticos, principalmente. Existem três classes de DPS, voltadas para sobretensões em lugares específicos (GUIMARÃES, 2020):

- Classe I: dispositivos com capacidade para drenagem de correntes parciais de um raio, para áreas urbanas periféricas e rurais, que ficam expostas a descargas atmosféricas diretas;
- Classe II: dispositivos que drenam correntes induzidas, em edificações, com efeitos indiretos de descarga atmosférica;
- Classe III: dispositivos instalados próximos a equipamentos ligados à rede elétrica, de dados ou telefônica, para proteção fina.

A norma ABNT NBR 5410 (2004), em seu item 5.4.2.1 estabelece que todas as edificações dentro do território brasileiro, que forem alimentadas total ou parcialmente por linha aérea, e se situarem onde há a ocorrência de trovoadas em mais de 25 dias por ano, devem ser providas de DPS;(Zona de influências externas AQ2).

Quando partes da instalação estão situadas no exterior das edificações, expostas a descargas diretas, (Zona de influências externas AQ3) o DPS também é obrigatório. Dessa forma, torna-se obrigatório o uso do DPS tanto na parte de geração dos painéis solares, quanto na saída AC do inversor.

No projeto foram utilizados DPS classe I, tendo em vista o nível de exposição. O nível de tensão utilizado foi de 220 V. Sendo assim, depois de realizadas as análises acima, foram selecionados os dispositivos de proteção contra surto para o projeto, que são demonstrados na Figura 14.

Figura 14 - DPS Clamper Front Monopolar.



Fonte: CLAMPER (2022).

As características técnicas do DPS Clamper Front Monopolar estão especificadas no anexo D.

3.7 Medidor Bidirecional

Conforme a RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL N° 1.059 (2023), “ O sistema de medição bidirecional deve, no mínimo, diferenciar a energia elétrica ativa consumida da energia elétrica ativa injetada na rede, atendendo às especificações estabelecidas no Módulo 5 do PRODIST”.

Dessa forma, para um sistema fotovoltaico, ou de qualquer outra fonte de energia, que funcione como *on-grid*, é necessário que a concessionária de energia instale um medidor, geralmente eletrônico, capaz de apurar a geração injetada na rede. É preciso destacar apenas o excedente de geração é contabilizado, e não é contabilizada a parcela de consumo interno de uma determinada unidade consumidora (ANEXO V DA RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL N° 956, 2021).

Portanto, nos projetos de mini e microgeração em baixa tensão, os medidores apenas registram a energia ativa, em kWh, consumida e injetada. Ao final de um período de medição, de geralmente um mês, a fatura é gerada, informando o consumo e a geração. A partir destas informações, são realizados descontos e compartilhamento conforme legislação vigente (RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL N° 1.059, DE 7 DE FEVEREIRO DE 2023).

As especificações de um medidor são dadas por (CELESC, 2020):

- Frequência da tensão;
- Número de fios (fases);
- O medidor deve funcionar quando conectado a qualquer fase e neutro, bem como conectado entre duas fases (sem a presença do neutro);
- Os registradores não devem perder as suas informações em caso de falta de energia, devendo possuir memória não volátil;
- O fechamento da tampa principal do medidor deve ser trancado à base;
- O número de série do medidor fornecido deve estar gravado pelo menos em uma de suas laterais, sendo que essa gravação deve contemplar a base e a tampa. Não sendo possível, o número de série deve estar gravado nas duas partes;
- O bloco de terminais deve ser construído com material isolante não higroscópico, capaz de suportar temperatura permanente de 110°C sem apresentar deformações ao longo da vida útil do medidor;
- A tampa do bloco de terminais deve ser de policarbonato transparente. Deve conter a inscrição “LINHA-CARGA”, gravada de forma indelével;
- O terminal de neutro deve ser do mesmo material e ter a mesma condutibilidade dos terminais de fase;
- O bloco de terminais deve ser construído de forma a não permitir o acesso às partes internas do medidor;
- Os terminais não devem ser passíveis de deslocamento para o interior do medidor, independentes dos parafusos de fixação dos cabos de ligação;
- Devem ser protegidos contra a penetração de poeira e água segundo a classificação IP52, conforme NBR IEC 60529;
- O medidor deve medir e registrar a energia ativa em ambos os sentidos de fluxo, totalizando-as em diferentes registradores, que devem estar disponíveis na saída serial unidirecional, conforme Especificação E-321.0017;
- O mostrador deve apresentar, de forma cíclica, o registro das seguintes grandezas:

Tabela 09 - Códigos e Grandezas do mostrador.

Código	Grandeza
03	Totalizador de Energia Ativa Total
103	Totalizador de Energia Ativa Reversa
88	Teste do mostrador

Fonte: CELESC (2020).

Após todas as análises anteriores, foi possível definir qual o Medidor Bidirecional a ser utilizado, indicando fabricante, modelo e especificações técnicas. Assim sendo, é listado na Figura 15 e Tabela 10, respectivamente:

Figura 15 - Medidor Bidirecional Vector 4.



Fonte: NANSEN (2023).

Tabela 10 - Características Técnicas Medidor Vector 4.

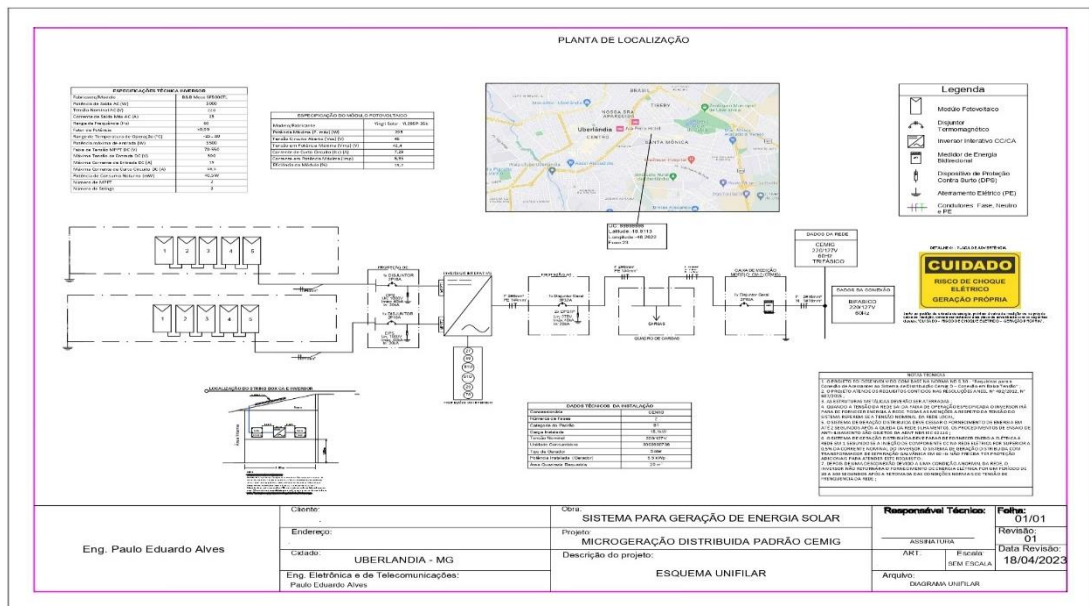
Tensão	Tensão nominal (VN): multi-tensão 120/240V ou 120V ou 240V Faixa de operação: 96V a 276V (tensão fase-neutro) - Fonte linear trifásica
Corrente - Conexão Direta	Corrente nominal (IN): 15A Corrente máxima (Imax): 120A
Frequência	50 ou 60 Hz
Precisão	Classe B (1%) - Energia reativa Classe B (2%)
Constantes	Ativo: 1,25 Wh/pulso - Reativo: 1,25 varh/pulso
Mostrador LCD	3 dígitos para código 8 dígitos numéricos para valor da grandeza 9mm de altura e 5mm de largura Opções 6 inteiros ou 5 inteiros com 1 decimal ou 2 decimais
Sequência de Fase	ABC ou CBA (ACB)
Tipo de Conexão	2 elementos
Faixa de temperatura	-10°C a 70°C (temperatura de operação) -40°C a 85°C (temperatura de armazenamento)
Consumo Circuito de Potencial	120/240V < 2W e < 15VA 120V ou 240V < 2W e < 10VA
Consumo Circuito de Corrente	<0,15 VA
Tipo de Registro	Unidirecional ou Bidirecional (Microgeração/Minigeração Res. 482 ANEEL)
Grau de Proteção	IP52
Peso	377g
Dimensões	A 138mm x L 128,7mm x P 53,3mm
Material	Tampa principal: Policarbonato + 10% de fibra de vidro Tampa do bloco: Policarbonato transparente (curta) Visor: Policarbonato transparente Base + bloco: Policarbonato preto + 20% de fibra de vidro
Terminais de tensão e corrente	Conector de latão ou alumínio com os opcionais de tratamento abaixo: - Sem tratamento - Estanhado - Cromado - Niquelado - Zincado
Mostrador	A 9mm x L 5mm

Fonte: NANSEN (2023).

3.8 Diagrama Unifilar

O sistema de geração fotovoltaica pode ser entendido como o a interligação de pequenos subsistemas, sendo o primeiro deles, os painéis fotovoltaicos, o segundo o inversor de frequência e o terceiro os dispositivos de proteção, como pode ser observado na Figura 16.

Figura 16 - Diagrama Unifilar.



Fonte: O Autor.

Painéis fotovoltaicos: São painéis compostos por células de semicondutores ligados em série. Essas células são capazes de converter a energia de radiação solar em energia elétrica com tensão e corrente CC. Esta produção é proporcional ao nível de irradiação, medido em W/m^2 . Os painéis podem ser associados em ligações em série e em paralelo. A ligação em série é chamada de *string*, de forma a se obter determinado nível de tensão, somando-se a tensão das placas. Strings podem ser ligadas em paralelo, de forma a aumentar capacidade de fornecimento de corrente. As strings são formadas de acordo com a especificação do inversor de frequência. No projeto foram utilizadas duas strings, ligadas em entradas independentes do inversor, chamadas MPTT. Foram associadas 5 placas de forma a se ter a tensão equivalente de cerca de 200 V e corrente de cerca de 7 A.

Inversor de frequência: São dispositivos que recebem a tensão e corrente contínua dos painéis fotovoltaicos e convertem essa energia em tensão e corrente alternada, compatíveis com as da rede elétrica. No projeto, a tensão nominal é de 220 V, com corrente máxima de 25 A. O inversor trabalha continuamente monitorando a rede, alterando o ângulo entre tensão e corrente, de forma a se ter a injeção de potência ativa, além de monitorar parâmetros de

proteção, como o esquema anti-ilhamento, para que não se tenha injeção de potência na ausência da rede, bem como a sobretensão e subtensão e sobrecorrente.

Dispositivos de proteção: Formados por condutores de aterramento, disjuntores e DPS, são instalados em uma caixa de montagem chamada de *string box*. Normalmente são instaladas tanto no lado AC (*string box AC*) quanto no lado CC (*string box DC*). Sua função é proteger o sistema e pessoas quanto a oscilações de qualidade de energia, assim como surtos causados por descargas atmosféricas.

Por fim, demais itens do diagrama são orientativos e servem para indicar as boas práticas de engenharia, bem como atender as exigências normativas das concessionárias de energia e da ABNT. Delas podemos destacar:

- Uso de placa de identificação de geração própria;
- Distâncias mínimas dos dispositivos em sua instalação;
- Especificação das funções dos relés de proteção dos inversores que devem ser utilizadas;
- Dados técnicos da instalação, dos painéis e inversores;
- Indicações de aterramento;
- Especificação de parâmetros de funcionamento;
- Plantas de localização e legenda;
- Resumo do diagrama unifilar da instalação elétrica e a localização do sistema de geração.

3.9 Rendimento

A performance de rendimento relaciona a produção efetiva de energia gerada pelo sistema fotovoltaico e o seu valor calculado, teoricamente. Essa relação resulta em uma porcentagem. Dessa forma, é possível obter o valor da energia gasta, juntamente com suas perdas para gerar eletricidade e o valor nominal real entregue ao sistema. Para alguns fabricantes, sistemas eficientes atingem uma média de 80%. Por meio da equação (11), é possível analisar o desempenho de um sistema de geração solar anualmente.

$$PR = \frac{\text{Rendimento real do sistema} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{ano}} \right)}{\text{Rendimento nominal do sistema} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{ano}} \right)} \% \quad (11)$$

Como esta pesquisa aborda somente um referencial teórico do dimensionamento para instalação de módulos fotovoltaicos em unidades residenciais e comerciais, não será possível realizar as medições periódicas para calcular a PR (Performance de Rendimento).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, serão apresentados os pontos importantes para serem analisados e discutidos para a proposta da aplicação dos sistemas fotovoltaicos, tais como: o investimento e orçamento total do sistema e a análise da viabilidade do projeto, considerando as perdas e a energia gerada pelo sistema.

4.1 Estimativa de custo

Para ser possível a realização do orçamento e estimativa de custo da aplicação de um sistema fotovoltaico na cidade de Uberlândia-MG, foi realizada uma pesquisa do valor comercial dos painéis fotovoltaicos e dos inversores, bem como os custos para instalação e manutenção dos painéis.

Além desses custos, deve ser considerado o valor do projeto elétrico, da interligação com a rede elétrica, painel de proteção, custo de instalação e o custo da Anotação de Responsabilidade Técnica (ART) do CREA. A tabela 11 ilustra as taxas cobradas por esses serviços.

Tabela 11 - Média dos custos para a execução do projeto.

Suporte para fixação dos painéis	R\$100
Projeto elétrico e encargos	20% do valor (painéis + inversor)
Interligação com a rede	2% do valor (painéis + inversor)
Painel de proteção	2,5% do valor (painéis + inversor)
Instalação elétrica dos painéis	16,4% do valor (painéis + inversor)
ART	40% do valor (painéis + inversor)

Fonte: O Autor.

Os valores acima foram obtidos por meio da consulta com engenheiros eletricitistas que trabalham com sistemas de energia solar.

4.2 Investimento Total

Baseado no Quadro 5, foi possível determinar o valor do investimento do projeto proposto, considerando o valor unitário do módulo FV Yingli Solar YL295P-35b R\$1.249,75,

totalizando R\$12.497,50 (YINGLI SOLAR, 2017). A tabela 12 ilustra os equipamentos e serviços necessários para a instalação dos painéis com seus respectivos custos.

Tabela 12 - Média de valor para a execução do projeto.

EQUIPAMENTOS E SERVIÇOS	CUSTO	Fonte
Módulo FV Yingli Solar YL295P-35b	R\$12.497,5	Yingli Solar (2017)
Inversor Solar Grid-Tie B&B Moso SF5000TL	R\$8.776,69	ShopTime (2022)
Suporte para fixação dos painéis	R\$1.000	Americanas (2022)
Projeto elétrico, encargos da empresa e ART	R\$12.764,51	O autor (2022)
Interligação com a rede existente (Medidor bidirecional)	R\$425,48	O autor (2022)
Painel de proteção	R\$531,85	O autor (2022)
Instalação elétrica dos painéis	R\$3.488,96	O autor (2022)
TOTAL	R\$39.484,99	

Fonte: O Autor.

De uma forma geral, para mostrar uma maior viabilidade em projetos que visam maior economia, utiliza-se um cálculo do tempo de retorno da capital, denominado *payback*. O cálculo de *payback* é apresentado na equação (12).

$$Payback \text{ si mples} = \frac{I}{C_{economizando}} \quad (12)$$

Onde:

payback si mples– Tempo de retorno [anos];

I – Custo total do investimento do projeto [R\$];

Ceconomizado– Valor da energia gerada durante o ano [R\$/ano].

Para calcular o *Payback*, primeiramente é necessário obter o $C_{economizado}$ como ilustra a equação (13).

$$C_{economizado} = Tarifa \times E \times 365 \quad (13)$$

Onde:

$C_{economizado}$ – Valor da energia gerada durante o ano [R\$/ano].

$tarifa$ – Valor correspondente ao kWh;

E – Energia gerada estimada [kWh].

Após analisar as faturas de energia elétrica da CEMIG, foi possível estabelecer uma média correspondente ao kWh pago, sendo R\$1,01 o resultado obtido por kWh. Assim, por meio da Equação (10), é possível calcular o valor da energia gerada com e sem perdas durante o período de 365 dias.

$$C_{economizado\ sem\ perdas} = Tarifa \times E \times 365$$

$$C_{economizado\ sem\ perdas} = 1,01 \times 16,16 \times 365$$

$$C_{economizado\ sem\ perdas} = R\$5957,38/ano$$

$$C_{economizado\ com\ perdas} = Tarifa \times E \times 365$$

$$C_{economizado\ com\ perdas} = 1,01 \times 12,92 \times 365$$

$$C_{economizado\ com\ perdas} = R\$4762,95/ano$$

Dessa forma, é possível calcular o *Payback* com e sem perdas.

$$Payback_{sem\ perdas} = \frac{39484,99}{5957,38}$$

$$Payback_{sem\ perdas} = 6\ anos\ e\ 6\ meses$$

$$Payback_{com\ perdas} = \frac{39484,99}{4762,95}$$

$$Payback_{com\ perdas} = 8\ anos\ e\ 2\ meses$$

Para comprovar os valores do *payback* encontrados, foi realizada uma projeção desse tempo de retorno, considerando o valor economizado anualmente, equivalente a R\$5957,38 e

4762,95 para energia gerada, sem perdas e com perdas, respectivamente. O procedimento pode ser analisado por meio das Tabelas 13 e 14.

Tabela 13 - Projeção do Payback, desconsiderando as perdas.

ANOS	INVESTIMENTO	ECONOMIA DE ENERGIA	SALDO
0	R\$ 39.484,99		-39484,99
1		5957,38	-33.527,61
2		5957,38	-27.570,23
3		5957,38	-21.612,85
4		5957,38	-15.655,47
5		5957,38	-9.698,09
6		5957,38	-3.740,71
7		5957,38	2.216,67
8		5957,38	8.174,05
9		5957,38	14.131,43
10		5957,38	20.088,81
11		5957,38	26.046,19

Fonte: O Autor.

Tabela 14 - Projeção do Payback, considerando as perdas

ANOS	INVESTIMENTO	ECONOMIA DE ENERGIA	SALDO
0	R\$ 39.484,99		-39484,99
1		4762,95	-34.722,04
2		4762,95	-29.959,09
3		4762,95	-25.196,14
4		4762,95	-20.433,19
5		4762,95	-15.670,24
6		4762,95	-10.907,29
7		4762,95	-6.144,34
8		4762,95	-1.381,39
9		4762,95	3.381,56
10		4762,95	8.144,51
11		4762,95	12.907,46

Fonte: O Autor.

Como pode-se observar por meio das tabelas 13 e 14, o sistema proposto realmente reduz os custos de energia, promovendo uma diversificação energética, sendo viável para a área em estudo e o período analisado. Com base nesses resultados, são apresentados na próxima seção, as conclusões dessa monografia.

5 CONCLUSÃO

Para a realização desta pesquisa, primeiramente, foi necessário realizar uma revisão de literatura de modo que analisasse e decidisse qual sistema seria proposto neste projeto. Dessa forma, foi escolhido o sistema fotovoltaicos *on-grid*, pelo fato de promover uma redução de custos, significativa, na conta de energia elétrica e por existir a possibilidade de quando a produção de energia exceder o consumo do usuário, ela se transformar em créditos de energia.

Posteriormente, foi realizada a coleta do consumo de energia elétrica de 7 moradores da cidade de Uberlândia/MG. Dessa forma, foi possível tirar uma média de consumo para a realização do dimensionamento, que foi realizado considerando as perdas do sistema. Após a realização desses cálculos, também foi escolhido o inversor adequado, considerando as necessidades dos consumidores. E então, foi estabelecido um orçamento, contendo todos os custos para a execução do projeto.

Assim, foram realizados os cálculos da viabilidade e do *payback* que, considerando as perdas, mostrou um retorno estimado de 8 anos e 2 meses, ou seja, esse resultado foi inferior ao tempo de vida útil dos painéis fotovoltaicos que são de 25 anos. Vale ressaltar, que caso a energia gerada seja comercializada pela concessionária, o *payback* diminui ainda mais. Dessa forma, pode ser comprovado que o sistema proposto é bastante viável para a cidade de Uberlândia/MG.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 5410. **Norma Brasileira.** 2004. Disponível em: <https://docente.ifrn.edu.br/jeangaldino/disciplinas/2015.1/instalacoes-eletricas/nbr-5410>. Acesso em: 12 jan 2023.

ALMEIDA, Augusto Nichele Ottoni de et al. Projeto e análise de viabilidade econômica de um sistema de geração compartilhada nos padrões da Resolução Normativa Aneel nº 687/2015. Monografia (Engenharia de energia). Universidade Federal de Santa Catarina. Araranguá, 2016.

AMERICANAS. Estrutura Suporte Fixador Placa Pannel Solar Alumínio e Inox Para Telha Cerâmica e Cimento Perfil Master. 2022. Disponível em: https://www.americanas.com.br/produto/4881866760?epar=bp_pl_00_go_cc_d_9100_n_com_p_tk2&opn=YSMESP&WT.srch=1&offerId=624c76c187c00289c2d77d96&gclid=Cj0KCQjw852XBhC6ARIsAJsFPN2isuzdxQ7Z9rDz-e-mqSH0VJKoKTKa_Bk1UjtUDDVzuxPYK8HqTSkaAgPyEALw_wcB. Acesso em: 1 ago. 2022.

ANEXO V DA RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 956. **Módulo 5 – sistemas de medição e procedimentos de leitura.** 2021. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_4. Acesso em: 10 jan 2023.

BONDARIK, Roberto; PILATTI, Luiz Alberto; HORST, Diogo José. **Uma visão geral sobre o potencial de geração de energias renováveis no Brasil.** *Interciencia*, v. 43, n. 10, p. 680-688, 2018.

CELESC. **Medidor eletrônico de energia elétrica com saída RS485.** 2020. Disponível em: <https://www.celesc.com.br/arquivos/normas-tecnicas/equipamentos-medicao/E-321.0015-MEDIDOR-ELETRONICO-DE-ENERGIA-ELETRICA-COM-SAIDA-RS485>. Acesso em: 16 jan 2023.

CEPEL/CRESESB. Manual de Engenharia de Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf. Acesso em: 25 set. 2019.

CLAMPER. **Clamper Front Monopolar.** 2022. Disponível em: https://s3.amazonaws.com/nerit-cms/clamper/file/fil_0086-FT-CLAMPER%20Front%20Monopolar_01_trilingue. Acesso em: 10 fev. 2023.

CNN BRASIL. **Alta geração solar em 2022 é explicada por aumento de usinas, diz especialista.** 2022. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/business/alta-da-geracao-solar-em-2022-e-explicada-por-aumento-de-usinas-diz-especialista/>. Acesso em: 28 abr 2022.

COELHO, GUILHERME AGUIAR; DE OLIVEIRA, RICARDO CARDOSO. Viabilidade econômica do uso de painéis solares no condomínio horizontal Bela Vista: estudo de caso. *Uningá Review*, v. 28, n. 3, 2016.

DE REZENDE, Vinicius Gouveia Scartezini; ZILLES, Roberto. Análise das perdas de produtividade em geradores fotovoltaicos por efeito de sujidade. In: **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS 2018**. 2018.

ELETRICA UFPR. **Instalações Elétricas Industriais Elementos do Projeto**. 2020. Disponível em: http://www.eletrica.ufpr.br/sebastiao/wa_files/te039%20aula%2015%20-%20divisao%20da%20instalacao%20proeca. Acesso em: 15 jan. 2023.

ENERGIA e Eletricidade: Fontes renováveis. In: ENERGIA Solar Fotovoltaica: Conceitos e aplicações. 2. ed.v. 1, cap. 1, 2, 3, p. 15-16, 26-27, 46, 58, 65-69, 74- 76. ISBN 9788536509785. São Paulo: Érica, 2012.

FIGUEIRA, Fabio Fernandes. Dimensionamento de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede para Alimentar a Sala de Computação da Escola Municipal Tenente Antônio João. 2014. 52 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

FLYTEC. **Inversor Solar Grid-Tie B&B Moso SF5000TL**. 2022. Disponível em: <http://www.flytec.com.py/produto/5505/SOLAR%20INVERSOR%20GRID%203500W%20SF3000TL%20550V%20POE%20MOSO%20HOMOLOGADO>. Acesso em: 12 fev. 2023.

GOV. **Energia renovável chega a quase 50% da matriz energética brasileira**. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2021/08/energia-renovavel-chega-a-quase-50-da-matriz-eletrica-brasileira-1#:~:text=Quase%20metade%20da%20energia%20energ%C3%A9tica,a%20solar%20vem%20ganhando%20destaques>. Acesso em: 28 abr 2022.

GUIMARÃES. **O que é um DPS?** 2020. Disponível em: <https://www.pabloguimaraes-professor.com.br/post/o-que-%C3%A9-um-dps>. Acesso em 16 jan 2023.

IEC 60364-7-712. **International Standard**. 2017. Disponível em: <https://solargostaran.com/files/standards/IEC/IEC%2060364-7-712-2017>. Acesso em: 10 jan 2023.

INSOLE. **O que esperar do mercado de energia solar em 2022?** 2022. Disponível em: <https://insole.com.br/tendencias-mercado-energia-solar/#:~:text=A%20Associa%C3%A7%C3%A3o%20Brasileira%20de%20Energia,2022%20C%20em%20compara%C3%A7%C3%A3o%20com%202021>. Acesso em: 28 abr 2022.

MACEDO, Corina Fonseca de Carvalho. Dimensionamento e Análise de viabilidade econômica de um sistema solar fotovoltaico residencial conectado à rede elétrica em Arcos – MG. Monografia. Instituto Federal de Minas Gerais. Formiga, 2017.

MACIEL, Diogo R.; SOUZA, Teófilo M.; BOULOMYTIS, Vassiliki Terezinha Galvão. Ensaios laboratoriais para a comparação entre a irradiação solar captada por painéis fotovoltaicos fixos e móveis. **Latin-American Journal of Physics Education**, v. 15, n. 4, p. 9, 2021.

NANSEN. **Vector 4**. 2023. Disponível em: <http://nansen.com.br/medidores/vector-4/#ficha-tecnica>. Acesso em: 10 fev. 2023.

NEOSOLAR. Sistemas de energia solar fotovoltaica e seus componentes. 2019. Disponível em: [Sistemas de energia solar fotovoltaica e seus componentes | Neosolar](#) . Acesso em: 28 set. 2019.

NOGUEIRA, Jaderson Henrique. ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE ENGENHARIA ASSOCIADOS AOS INVERSORES GRID TIE. Monografia (Engenharia elétrica). Centro Universitário do Sul de Minas. Varginha, 2017.

PEREIRA, Narlton Xavier. Desafios e perspectivas da energia solar fotovoltaica no Brasil: geração distribuída vs geração centralizada. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho. Dissertação (mestrado). Sorocaba, 2019.

PORTAL SOLAR. Energia solar: Uberlândia ocupa 1º lugar em ranking brasileiro – Portal Solar. 2021. Disponível em: [https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar-nas-cidades/ultrapassando-a-marca-de-50-mw-em-geracao-solar-distribuida-uberlandia-ocupa-primeiro-lugar-em-ranking-brasileiro.html#:~:text=Abastecendo%203.968%20unidades%20consumidoras%2C%20Uberl%C3%A2ndia,%2C3%25%20em%20pr%C3%A9dios%20p%C3%BAblicos](https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar-nas-cidades/ultrapassando-a-marca-de-50-mw-em-geracao-solar-distribuida-uberlandia-ocupa-primeiro-lugar-em-ranking-brasileiro.html#:~:text=Abastecendo%203.968%20unidades%20consumidoras%2C%20Uberl%C3%A2ndia,%2C3%25%20em%20pr%C3%A9dios%20p%C3%BAblicos.). Acesso em: 1 ago. 2022.

RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL N° 1.059. **Agência nacional de energia elétrica**. 2023. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231059.html>. Acesso em: 13 fev 2023.

SANTOS, Renata Cristina Oliveira et al. AUTOMATIZAÇÃO RESIDENCIAL E UTILIZAÇÃO DE FONTES DE ENERGIA LIMPA PARA DIMINUIÇÃO DO CONSUMO NAS REDES ELÉTRICAS. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 11, n. 3, 2015.

SHOPTIME. **Inversor On Grid Tie 5000w 60 Hz Inmetro B&B SF5000TL. 2022. Disponível em:** https://www.shoptime.com.br/produto/4296127165?epar=bp_pl_px_go_pmax_casaconstruc_ao&opn=GOOGLEXML&WT.srch=1&offerId=618a91d2062ff5a574458560&gclid=Cj0KCQjw852XBhC6ARIsAJsFPN0LfzJ3rekAin1OX-6VyrEyC4LHSa-E0TG8u7LmzgLBZDDeP8s447UaAhkWEALw_wcB. Acesso em: 1 ago. 2022.

SIEMENS. **Catálogo Minidisjuntores**. 2018. Disponível em: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:fcde51c5-5a34-4778-a2e4-346e85b9450a/catalogo-minidisjuntores-set18-alta>. Acesso em: 10 fev. 2023.

SUNERGIA. Quais os componentes de um sistema solar fotovoltaico? 2017. Disponível em: [Quais os componentes de um sistema solar fotovoltaico? - www.sunergia.com.br](#). Acesso em: 25 set. 2019.

ANEXO A - TABELA DE LIMITE DE CORRENTE/ABNT NBR 5410, 2004.

Seções Nominiais mm ²		Métodos de Referência Indicados na Tabela 16.3											
		A1		A2		B1		B2		C		D	
		Número de Condutores Carregados											
		2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3
Cobre													
0,5	7	7	7	7	9	8	9	8	10	9	12	10	
0,75	9	9	9	9	11	10	11	10	13	11	15	12	
1	11	10	11	10	14	12	13	12	15	14	18	15	
1,5	14,5	13,5	14	13	17,5	15,5	16,5	15	19,5	17,5	22	18	
2,5	19,5	18	18,5	17,5	24	21	23	20	27	24	29	24	
4	26	24	25	23	32	28	30	27	36	32	38	31	
6	34	31	32	29	41	36	38	34	46	41	47	39	
10	46	42	43	39	57	50	52	46	63	57	63	52	
16	61	56	57	52	76	68	69	62	85	76	81	67	
25	80	73	75	68	101	89	90	80	112	96	104	86	
35	99	89	92	83	125	110	111	99	138	119	125	103	
50	119	108	110	99	151	134	133	118	168	144	148	122	
70	151	136	139	125	192	171	168	149	213	184	183	151	
95	182	164	167	150	232	207	201	179	258	223	216	179	
120	210	188	192	172	269	239	232	206	299	259	246	203	
150	240	216	219	196	309	275	265	236	344	299	278	230	

ANEXO B – TABELA DE DADOS TÉCNICOS DOS DISJUNTORES 5SL1.

Dados Técnicos		5SL1	
Norma		NBR NM 60898-1	
Tensão de operação			
• Mín.		VCA/ICC	24
• Máx.		VCA	250/440
• Máx.		VCC	60 (mono) / 125 (bi)
Capacidade de interrupção	NBR NM 60898-1 Icn	127/220 VCA	5,0 kA
		220/380 VCA	3,0 kA
	NBR IEC 60947-2 Icu	127/220 VCA	5,0 kA
		220/380 VCA	4,5 kA
Capacidade de interrupção de curto-circuito em corrente contínua Icu		Relação L / R = 4ms	24 VCC - 20 kA (mono) 60 VCC - 10 kA (mono) 125 VCC - 10 kA (bi)
Seção máxima dos condutores			
Fios e cabos		mm ²	0,75 ... 35
Cabos flexíveis com terminal		mm ²	0,75 ... 25
Terminais			
Torque de aperto		Nm	2,5 ... 3
Vida útil com cargas		20.000 atuações	
Temperatura ambiente		°C	-25 ... +45, ocasionalmente +55, com 95% de umidade. Temperatura de armazenamento: -40 ... +75

ANEXO C – TABELA DE SELEÇÃO DOS DISJUNTORES.

5SL1 - 3kA (NBR NM 60898-1)					
Corrente Nominal	Curva B (disparo em curto-circuito 3 a 5 x In)		Curva C (disparo em curto-circuito 5 a 10 x In)		
	Monopolar (1P)	Bipolar (2P)	Monopolar (1P)	Bipolar (2P)	Tripolar (3P)
2,0 A	-	-	5SL1 102-7MB	5SL1 202-7MB	5SL1 302-7MB
4,0 A	-	-	5SL1 104-7MB	5SL1 204-7MB	5SL1 304-7MB
6,0 A	5SL1 106-6MB	5SL1 206-6MB	5SL1 106-7MB	5SL1 206-7MB	5SL1 306-7MB
10 A	5SL1 110-6MB	5SL1 210-6MB	5SL1 110-7MB	5SL1 210-7MB	5SL1 310-7MB
13 A	5SL1 113-6MB	5SL1 213-6MB	5SL1 113-7MB	5SL1 213-7MB	5SL1 313-7MB
16 A	5SL1 116-6MB	5SL1 216-6MB	5SL1 116-7MB	5SL1 216-7MB	5SL1 316-7MB
20 A	5SL1 120-6MB	5SL1 220-6MB	5SL1 120-7MB	5SL1 220-7MB	5SL1 320-7MB
25 A	5SL1 125-6MB	5SL1 225-6MB	5SL1 125-7MB	5SL1 225-7MB	5SL1 325-7MB
32 A	5SL1 132-6MB	5SL1 232-6MB	5SL1 132-7MB	5SL1 232-7MB	5SL1 332-7MB
40 A	5SL1 140-6MB	5SL1 240-6MB	5SL1 140-7MB	5SL1 240-7MB	5SL1 340-7MB
50 A	-	-	5SL1 150-7MB	5SL1 250-7MB	5SL1 350-7MB
63 A	-	-	5SL1 163-7MB	5SL1 263-7MB	5SL1 363-7MB
70 A	-	-	5SL1 170-7MB	5SL1 270-7MB	5SL1 370-7MB
80 A	-	-	5SL1 180-7MB	5SL1 280-7MB	5SL1 380-7MB

ANEXO D – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DPS CLAMPER FRONT MONOPOLAR.

Características técnicas	Unidade	DPS CLAMPER Front Monopolar	DPS CLAMPER Front Monopolar / SR
Normas aplicáveis	-	ABNT NBR IEC 61643-11 / UL 1449 / ABNT NBR 5410	
Conformidade com	-	ABNT NBR IEC 61643-11 / NMX-J-515 / RETIE Colômbia	
Certificações	-	UL-BR 19.1325 / NOM-ANCE / CIDET	
Modos de proteção	-	L-L, L-N, L-PE e N-PE para sistema TN L-L e L-N para sistema IT e TT	
Tecnologia de proteção	-	Varistor de Óxido Metálico (MOV)	
Tempo de resposta típico	ns	< 25	
Proteção térmica	-	Sim	
Máxima corrente de curto sem fusível de backup	kA	5	
Fusível backup máximo	A	100 gL/gG	
Sinalização do status de operação	-	Verde - SERVIÇO, Vermelho - DEFEITO	
Temperatura de operação	°C	-40 a +70	
Seção dos condutores de conexão elétrica	mm ² (AWG)	4 a 25 (11 a 4)	
Fixação	-	Trilho padrão DIN 35	
Torque máximo dos bornes de conexão elétrica	N.m	3,0	
Acondicionamento	-	Material com características de não propagação e auto extinção de fogo	
Grau de proteção	-	IP20	
Dimensões máximas	mm	94,3 x 74 x 17,5 (C x A x L)	99 x 74 x 17,5 (C x A x L)
Parâmetros elétricos dos contatos de sinalização remota	-	-	120 V _{ca} / 1 A
			24 V _{cc} / 1 A