



UFOP



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

Universidade Federal de Ouro Preto

Escola de Minas – Departamento de Engenharia Ambiental

Curso de Graduação em Engenharia Ambiental



Lucas Periard do Amaral

SISTEMA FOTOVOLTAICO EM VILA RESIDENCIAL: VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA

Ouro Preto

2023

**SISTEMA FOTOVOLTAICO EM VILA RESIDENCIAL:
VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA**

Lucas Periard do Amaral

Trabalho Final de Curso apresentado
como parte dos requisitos para obtenção
do Grau de Engenheiro Ambiental na
Universidade Federal de Ouro Preto.

Data da aprovação: 09/03/2023

Área de concentração: Energia e sustentabilidade

Orientador: Prof.^a D.Sc. Ana Letícia Pilz de Castro

Ouro Preto

2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

A485s Amaral, Lucas Periard Do.

Sistema fotovoltaico em vila residencial [manuscrito]: viabilidade técnica e econômica. / Lucas Periard Do Amaral. - 2023.
99 f.

Orientadora: Profa. Dra. Ana Letícia Pilz de Castro.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Ambiental .

1. Sistemas de energia fotovoltaica. 2. Geração de energia fotovoltaica. 3. Sistemas de energia fotovoltaica - Análise econômico-financeira. I. Castro, Ana Letícia Pilz de. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 504:502

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Lucas Periard do Amaral

Sistema fotovoltaico em vila residencial: viabilidade técnica e econômica.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de engenheiro ambiental.

Aprovada em 09 de março de 2023.

Membros da banca

D. Sc. - Ana Letícia Pilz de Castro - Orientador(a) Universidade Federal de Ouro Preto
D. Sc. - Lívia Cristina Pinto Dias - Universidade Federal de Ouro Preto
M. Sc. - Diogenes Viegas Mendes Ferreira - Universidade Federal de Ouro Preto

Ana Letícia Pilz de Castro, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 29/03/2023.



Documento assinado eletronicamente por **Ana Letícia Pilz de Castro**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 24/04/2023, às 10:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0513561** e o código CRC **B73147F4**.

“Se eu vi mais longe,
foi por estar de pé sobre
ombro de gigantes”.

(Issac Newton)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, pois sem Ele não poderia ter caminhado até aqui. A vontade e o ânimo para aprender e me tornar uma pessoa melhor a cada dia vem da graça e crença de que poderei deixar algo de bom para o próximo.

Aos meus pais Arlei e Aldair, que me ensinaram valores éticos e morais. Além de todo carinho, torcida e apoio afetivo e econômico.

Agradeço a minha companheira, Mônica, por me incentivar e não deixar desistir.

Agradeço a amizade e confiança dada por minhas irmãs, Michelle e Fernanda.

Aos meus amigos e familiares pelas forças e conselhos.

Aos amigos da Intrometeu e de Ouro Branco que se tornaram família.

Aos amigos da Engenharia Ambiental e da UFOP por todos perrengues e vitórias conquistadas ao longo da vida acadêmica.

A todos os professores do DEAMB e que de alguma forma estiveram presentes em todo período de formação e por contribuírem com seus conhecimentos.

A UFOP que possibilitou a oportunidade de graduar-me.

E a orientadora Prof^a Dr.^a Ana Letícia Castro pela sua disposição e paciência em me orientar nesse trabalho.

RESUMO

O atual ritmo de crescimento está ligado ao aumento da demanda por eletricidade. Atualmente as fontes geradoras de energia elétrica são baseadas em combustíveis fósseis. O Brasil tem um retrato diferente, é firmado em fontes renováveis, porém dependente de energia hídrica. A introdução de novas fontes renováveis na matriz elétrica brasileira gera uma mudança nos padrões de consumo e descentralizando a produção de energia, que são fundamentais para um desenvolvimento sustentável. À vista disso, o presente trabalho buscou analisar se o uso de energia solar fotovoltaica on-grid em uma vila residencial de Brumadinho, no estado de Minas Gerais, seria economicamente e ambientalmente viável para suprir a demanda de eletricidade da vila. A análise utilizou o espaço de convivência para estudo do sistema fotovoltaico. Para o dimensionamento do sistema utilizou-se as metodologias propostas por Pinho e Galdino (2014) e a utilizada por Menezes (2019) Após, foram usadas variáveis financeiras para estudar a viabilidade econômica do sistema e estipular as emissões de dióxido de carbono (CO₂). Os resultados obtidos na instalação uma área de 186 m² e a configuração atenderá a demanda da vila, produzindo mensalmente 5786 kWh, valor que supre o consumo de energia elétrica. A economia que esta trará ao condomínio durante os 25 anos de vida útil do projeto é de R\$ 888.936,22. Em relação à análise ambiental, os resultados apontaram que o sistema deixará de emitir 5,22 t/ano de CO₂ para a atmosfera. O estudo confirmou que existe viabilidade nos três quesitos analisados. Assim sendo, a inserção de fontes renováveis na geração de eletricidade é uma alternativa viável para atendimento de vilas e comunidades residenciais, reduzindo os impactos na emissão de poluentes a atmosfera.

Palavras-chave: Sistema fotovoltaico. Sistema on-grid. Análise técnica e econômica.

ABSTRACT

The current pace of growth is linked to increased demand for electricity. Currently the generating sources of electricity are based on fossil fuels. Brazil has a different picture, it is based on renewable sources, but dependent on hydropower. The introduction of new renewable sources in the Brazilian electrical matrix generates a change in consumption patterns and decentralized energy production, which are fundamental for sustainable development. In view of this, the present work sought to analyze whether the use of on-grid photovoltaic solar energy in a residential village of Brumadinho, in the state of Minas Gerais, would be economically and environmentally viable to supply the village's electricity demand. The analysis used the living space to study the photovoltaic system. For the sizing of the system, the methodologies proposed by Pinho and Galdino (2014) and the one used by Menezes (2019) were used. Afterwards, financial variables were used to study the economic viability of the system and stipulate carbon dioxide (CO₂) emissions. The results obtained in the installation have an area of 186 m² and the configuration will meet the demand of the village, producing 5786 kWh monthly, a value that supplies the consumption of electricity. The savings that this will bring to the condominium during the 25 years of the project's useful life is R\$ 888,936.22. Regarding the environmental analysis, the results indicated that the system will no longer emit 5.22 t/year of CO₂ into the atmosphere. The study confirmed that there is viability in the three aspects analyzed. Therefore, the insertion of renewable sources in the generation of electricity is a viable alternative to serve villages and residential communities, reducing the impacts on the emission of pollutants into the atmosphere.

Keywords: Photovoltaic system. On-grid system. Technical and economic analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Participação global na geração de energia.....	17
Figura 2 – Matriz elétrica mundial.	18
Figura 3 – Matriz elétrica do Brasil.....	19
Figura 4 – Mapa de Radiação Solar Global	22
Figura 5 – Movimentos da Terra e as estações do ano.	24
Figura 6 – Célula fotovoltaica recebendo a radiação solar	26
Figura 7 – Comparação: Policristalina (esquerda) x Monocristalina (direita).	28
Figura 8 – Película fina e flexível.	29
Figura 9 – Materiais utilizados na fabricação de um módulo fotovoltaico.	33
Figura 10 – Curva I x V de um módulo fotovoltaico.	34
Figura 11 – Influências na Curva I x V.	36
Figura 12 – Conexão de módulos fotovoltaicos em série	37
Figura 13 – Conexão paralela entre módulos fotovoltaicos	38
Figura 14 – Conexão mista entre módulos fotovoltaicos	39
Figura 15 – Tipos de inversores.....	40
Figura 16 – Configuração de sistema isolado.....	41
Figura 17 – Sistema fotovoltaico conectado à rede.	42
Figura 18 – Sistema híbrido	42
Figura 19 – Sistema isolado com baterias de armazenamento.	44
Figura 20 – Sistema <i>On-grid</i>	45
Figura 21 – Exemplo de compensação positiva.....	47
Figura 22 – Vila residencial na fazenda Nossa Senhora do Carmo.....	49
Figura 23 – Área de aproveitamento do telhado do centro de convivência.	56
Figura 24 – <i>Oversizing</i> : Sem limitação de potência (laranja) x Clipping (azul). ..	58
Figura 25 – Calculadora de CO ₂ – IDESAM.	63

Figura 26 – Orientação do módulo direcionada ao norte	71
Figura 27 – Simulação do arranjo fotovoltaico	74
Figura 28 – Estádio Kaohsiung	76
Figura 29 – Estádio Mineirão painéis fotovoltaicos.	77
Figura 30 – Ilustração dos sistemas de transporte de energia elétrica.	78
Figura 31 – Composição do valor final da tarifa de energia elétrica.	78
Figura 32 – Simulação de investimentos Projeto Solar x Poupança.....	84
Figura 33 –Projeto Solar x Tesouro Direto Prefixado.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Eficiência das tecnologias de energia fotovoltaica.....	29
Tabela 2 – Demanda mensal de energia – Residências.....	50
Tabela 3 – Demanda mensal de energia – Área de Convivência.....	51
Tabela 4 – Demanda de energia da comunidade.....	51
Tabela 5 – Dados de irradiação.....	52
Tabela 6 – Módulos fotovoltaicos.....	54
Tabela 7 – Análise dos módulos.....	64
Tabela 8 – Cálculo do indicador “i”.....	67
Tabela 9 – Especificações do painel.....	68
Tabela 10 – Inversor Intelbras trifásico On Grid G2 EGT 33000 MAX G2.....	69
Tabela 11 – Configurações do sistema fotovoltaico.....	72
Tabela 12 – Energia gerada diariamente pelo sistema.....	73
Tabela 13 – Orçamento do Sistema Fotovoltaico.....	79
Tabela 14 – Análise econômica.....	80
Tabela 15 – Fluxo mensal nos próximos 25 anos.....	81
Tabela 16 – Viabilidade econômica.....	82
Tabela 17 – Simulação de Investimentos.....	83
Tabela 18 – Emissão de CO ₂	87

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivo Geral.....	16
1.1.1	Objetivos Específicos.....	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	Matriz elétrica: Mundo x Brasil.....	17
2.2	Legislação brasileira sobre Geração Distribuída.	19
2.3	Recurso Solar	21
2.3.1	Radiação Solar.....	23
2.3.2	Irradiância x Irradiação.....	23
2.3.3	Orientação e inclinação dos módulos fotovoltaicos.....	24
2.4	Efeito Fotovoltaico	25
2.5	Células fotovoltaicas.....	26
2.5.1	Silício monocristalino	26
2.5.2	Silício policristalino	27
2.5.3	Filme fino de silício.....	28
2.6	Impactos Ambientais	29
2.7	Viabilidade econômica.....	31
2.7.1	Valor presente líquido	31
2.7.2	Taxa interna de retorno.....	32
2.7.3	<i>Payback</i>	32
2.8	Componentes de um sistema fotovoltaico	32
2.8.1	Módulos fotovoltaicos.....	32
2.8.2	Características elétricas dos módulos fotovoltaicos.....	33

2.8.3	Curva características I x V	34
2.8.4	Fatores que influenciam os módulos fotovoltaicos.....	35
2.9	Associação de módulos.....	36
2.9.1	Associação em Série	36
2.9.2	Associação em Paralelo.....	37
2.9.3	Associação Mista	38
2.10	Inversores.....	39
2.11	Sistemas fotovoltaicos.....	40
2.11.1	Sistemas <i>Off-Grid</i>	43
2.11.2	Sistemas <i>On-Grid</i>	44
2.12	<i>String box</i> (Caixas de junção)	45
2.13	Medidor de Energia Bidirecional.....	46
3	Métodos	48
3.1	Vila residencial.....	48
3.2	Demanda diária de energia da comunidade	49
3.3	Dimensionamento do sistema fotovoltaico	52
3.3.1	Conjunto de dados de radiação solar.....	52
3.3.2	Caracterização do módulo fotovoltaico	54
3.3.3	Dimensionamento do sistema fotovoltaico	54
3.3.4	Número máximo de módulos por inversor	56
3.3.5	Configurações do sistema.....	60
3.4	Viabilidade econômica do sistema.....	61
3.5	Análise de emissão de dióxido de carbono	62
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
4.1	Resultados Preliminares.....	64

4.2	Dimensionamento do sistema fotovoltaico	66
4.2.1	Painel fotovoltaico	66
4.2.2	Inversor	68
4.2.3	Área	70
4.3	Estudos de viabilidade econômica.....	77
4.4	Análise das emissões de CO ₂	86
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA.....	91

1 INTRODUÇÃO

Com o ritmo crescente de desenvolvimento, a demanda energética tornasse cada vez maior em todo mundo. Atualmente as fontes convencionais são baseadas em combustíveis fósseis, sendo os principais contribuintes para geração mundial de energia elétrica, resultando em desigualdades, dívida externa e degradação ambiental. Sendo assim, para a proteção ao meio ambiente, à qualidade de vida, o aumento da eficiência energética, a mudança nos padrões do consumo e a produção de energia descentralizada são fundamentais para um desenvolvimento sustentável (IBGE, 2010).

A base da matriz elétrica brasileira é a renovável, isso porque grande parte vem de usinas hidrelétricas que são transmitidas por uma extensa rede de transmissão que cobre quase todo o país. A solar também vem crescendo bastante, contribuindo para que a nossa matriz seja de 78,1% (BEN, 2022). Existem três fatores que fazem a energia solar, em particular, mais adequada para ser adotada para a geração de energia elétrica no Brasil, tais como: baixa dos preços dos painéis e inversores, alta nos preços das tarifas elétricas e a imensa disponibilidade do recurso solar.

Segundo EPE (2023) parte desse crescimento deve-se à queda do preço das fontes fotovoltaicas nos leilões. Em 2013, o preço médio do equipamento era de R\$ 103,00. Esse valor apresentou significativa queda, alcançando os R\$ 44,31 em 2017, e, finalmente, os R\$ 17,62 em 2019, o ano com o leilão mais competitivo que se tem registrado. Em 2022, o preço teve uma pequena alta, onde foi para 32,34 devido a alta da inflação pela pandemia de Covid-19.

Ao longo de 2021, a energia elétrica acumulou 121,21% de aumento, enquanto o IPCA cresceu 10,06% no mesmo período. Três fatores principais são apontados: o primeiro deles foi a crise hídrica; o segundo, o reajuste na tarifa da bandeira vermelha; e o terceiro, a incidência da bandeira de escassez hídrica. A crise diminuiu os reservatórios das hidrelétricas do Sul e do Centro-Oeste, responsáveis por 70% da geração de energia hidráulica no país. Como resposta ao aumento expressivo do custo da geração, a Aneel reajustou a bandeira vermelha em 52%, que foi praticada de maio a setembro daquele ano, quando a bandeira de escassez hídrica passa a incidir sobre o preço final (ANEEL, 2023).

O Brasil possui uma vantagem por conta do extenso potencial energético devido aos níveis de incidência solar serem superiores aos de países que desenvolvem projetos fotovoltaicos com mais frequência, como Alemanha, França e Espanha. A energia solar no Brasil tem sido utilizada como auxiliar na economia da conta de luz, na redução da sobrecarga de redes distribuidoras e na diminuição de impactos ambientais, seja em residências, estabelecimentos comerciais ou indústrias.

Estima-se que, em 2024, o território brasileiro contará com, aproximadamente, 887 mil sistemas de energia solar conectados à rede, estabelecendo uma maior economia em relação às distribuidoras convencionais, além da manutenção e preservação ambiental do País (BEN, 2022).

Com o intuito de introduzir e estimular o uso de energias renováveis na matriz energética brasileira, a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) estipulou a normativa resolutiva 482, em 2012. Essa normativa regula a micro e minigeração para geração distribuída no sistema brasileiro.

O avanço tecnológico tem permitido cada vez mais o aparecimento de novas tecnologias capazes de explorar de forma mais eficiente os recursos renováveis existentes. A tecnologia solar fotovoltaica tem assumido um grande papel, como fonte geradora de energia elétrica renovável, e simultaneamente, disponibilizando diversas oportunidades de emprego para a população. Ela é dinâmica e de fácil implementação, com ela pode-se fazer instalações residenciais e industriais.

Em 2020, o mercado cresceu 70% mesmo em meio à crise gerada pela pandemia de Covid-19 e a retração da economia. Em meio à crise climática, devido ao consumo exagerado de combustíveis fósseis, a tecnologia fotovoltaica evoluiu como uma alternativa na geração de energia limpa e sustentável.

O Brasil, a cada ano, dá mais passos em direção ao aproveitamento de todo o seu potencial energético. Entre investimentos privados e incentivos governamentais, o significativo crescimento da produção de energia já gerou mais de 783,7 mil empregos, além de proporcionar uma arrecadação aos cofres públicos que supera R\$ 12 bilhões (EPE, 2023).

Apesar disso, a obtenção de um projeto fotovoltaico com um orçamento ainda é um processo burocrático e demorado, que necessita de conhecimento especializado para a realização dos cálculos necessários. O presente trabalho, tem por objetivo analisar de forma técnica e econômica a viabilidade de implementação de um sistema fotovoltaico em uma vila residencial no distrito rural Toca de Cima em Brumadinho, bem como estimar a redução da emissão de CO₂.

1.1 Objetivo Geral

Realizar um estudo de caso da viabilidade técnica e econômica da microgeração de energia elétrica por um sistema fotovoltaico *on-grid* em uma vila residencial localizada em Brumadinho no estado de Minas Gerais.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Entender o consumo da demanda de energia elétrica da vila residencial.
- Analisar a viabilidade técnica e econômica para o uso de sistemas de painéis fotovoltaicos na vila residencial.
- Analisar a eficiência energética em termos de emissão de CO₂.

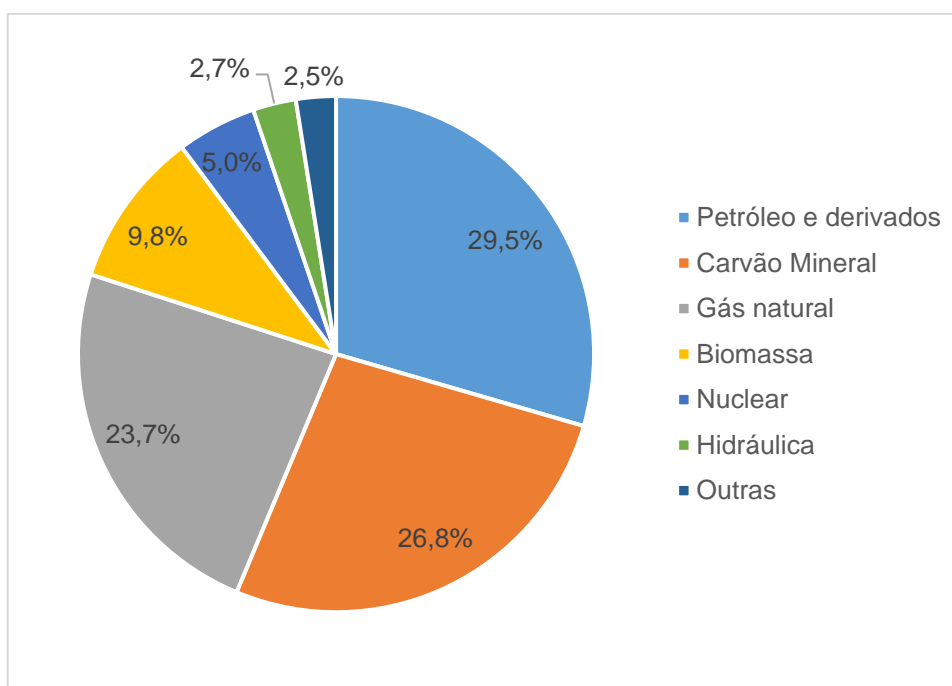
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Matriz elétrica: Mundo x Brasil

A priori vamos diferenciar matriz energética de matriz elétrica. Matriz energética é uma representação quantitativa de todos os recursos e fontes de energia disponíveis para serem utilizados nos diversos processos produtivos. É fundamental para orientar o planejamento do setor energético que reúne às atividades ligadas a produção, transporte, inovação, manejo e venda de produtos energéticos. A matriz elétrica é um conjunto de fontes de energia utilizadas para a produção de energia elétrica (EPE, 2023). Dessa forma, podemos concluir que a matriz elétrica é parte da matriz energética.

O atual ritmo de desenvolvimento impacta na demanda por energia em todo o mundo. Atualmente, os principais contribuintes para a geração de energia global são as fontes convencionais baseadas em combustíveis fósseis (Figura 1). Notasse que a energia de biomassa é a que fornece a maior contribuição entre as várias fontes renováveis. Houve um crescimento das demais fontes alternativas.

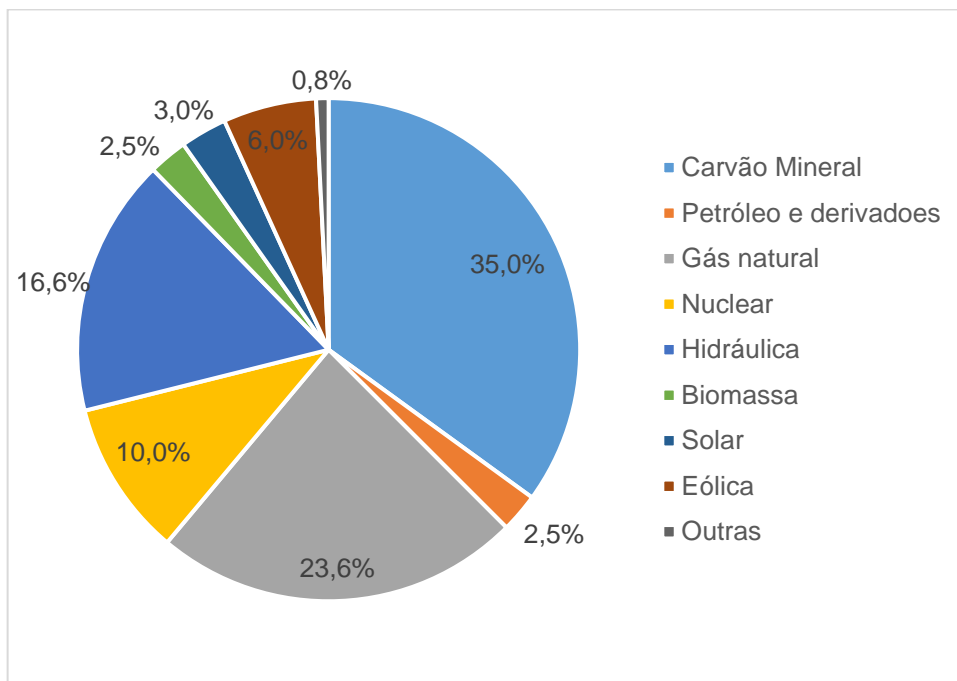
Figura 1 – Participação global na geração de energia.



Fonte: Adaptado (EPE, 2023).

A geração de eletricidade a partir de fontes não renováveis como o carvão, óleo e gás natural, em termelétricas apresentam 61,1% da produção mundial (Figura 2). Repensar a estratégia do setor de energia é uma grande preocupação, devido ao impacto ter efeitos adversos ao meio ambiente e às condições climáticas.

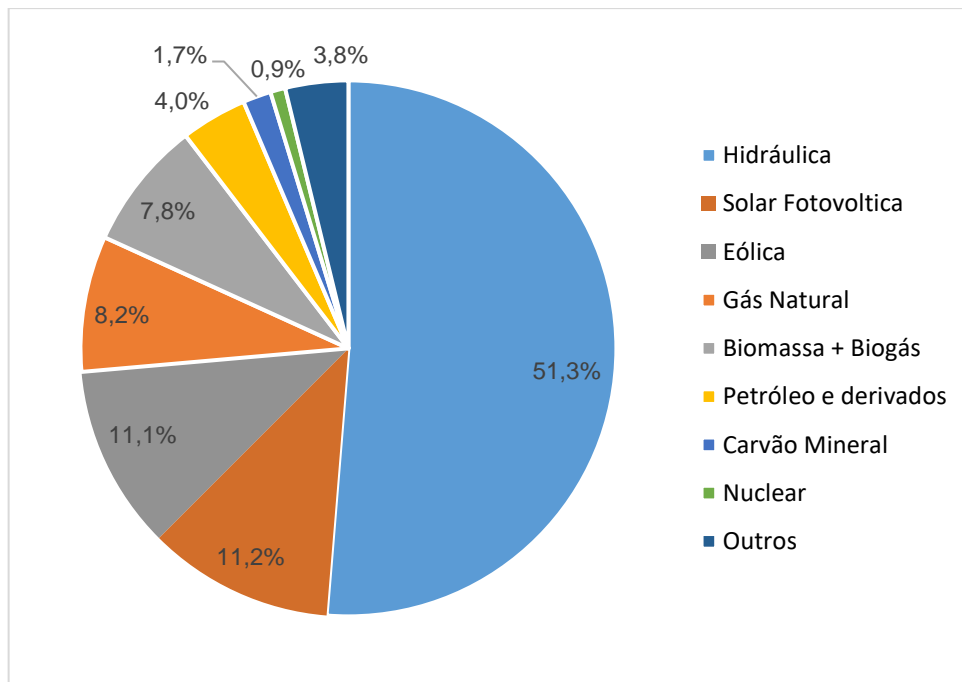
Figura 2 – Matriz elétrica mundial.



Fonte: Adaptado (EPE, 2023).

A matriz elétrica brasileira é predominantemente renovável porque 51,3% são geradas em usinas hidrelétricas e o total equivale a 86,1 % conforme a Figura 3. A energia eólica e a solar também vem crescendo bastante, contribuindo para que a nossa matriz elétrica continue sendo, em sua maior parte, renovável.

Figura 3 – Matriz elétrica do Brasil.



Fonte: Adaptado (EPE, 2023).

Sabe-se da necessidade em desenvolver tecnologias limpas que produzam energia elétrica com eficiência e baixo custo. A solução é baseada em fontes renováveis, sendo um cenário favorável ao Brasil.

2.2 Legislação brasileira sobre Geração Distribuída.

O uso de diversas fontes de energia elétrica passou ser o Norte quando se fala em mudanças climáticas. As fontes alternativas aos combustíveis fósseis passaram a ter mais espaço nas políticas públicas e no planejamento setorial. O desenvolvimento do Planejamento Elétrico em âmbito local, de forma descentralizada é uma ferramenta para o alcance da sustentabilidade de modo a integrar iniciativas de produção de energias renováveis, da busca pela eficiência e conservação de energia de forma limpa (COLLAÇO & BERMANN, 2017).

A resolução normativa ANEEL 482, de 17 de abril de 2012, que trata do micro e da minigeração distribuídas de energia elétrica e inovações que podem aliar economia financeira, consciência socioambiental e autossustentabilidade. Foi um

marco para a geração distribuída no Brasil, pois o consumidor pode gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada e inclusive fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade. Criado em 2012 por meio de uma resolução normativa da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), a REN 482.

A micro e a minigeração distribuída, mais conhecidas como geração distribuída (GD), são modalidades que permitem a geração de energia elétrica no local ou próximo ao ponto de consumo. Permite aos consumidores a produção de sua própria energia usando fontes renováveis, podendo ser solar fotovoltaica, centrais hidrelétricas, eólica e biomassa e outros classificados como microgeradores. A GD permite que consumidores produzam a própria eletricidade e obtenham economia na conta de luz por meio de um sistema de compensação de créditos com a concessionária de distribuição.

A resolução ANEEL 482 estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. O Art. 2º define:

“I - Microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;

II - Minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5MW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras; “

O Marco Legal da Geração Distribuída foi instituído no Brasil por meio da Lei 14.300 de 6 de janeiro de 2022. Essa legislação estabelece o regramento da micro e minigeração distribuída de energia,

O ponto principal da lei 14.300 é a mudança no sistema de compensação de crédito de energia, referente ao excedente injetado na rede da distribuidora e como retornará ao cliente em forma de desconto na conta de luz.

A tarifa divide-se em duas macros componentes:

- TE: congrega todos os custos referentes a energia elétrica;
- TUSD: reúne os custos de transporte da energia, divididos em Fio A (custo do uso de redes de distribuição ou de transmissão de terceiros) e Fio B (custo do serviço prestado pela própria distribuidora). Porcentagem de pagamento da TUSD Fio B.
 - 2023 – 15%;
 - 2024 – 30%;
 - 2025 – 45%;
 - 2026 – 60%;
 - 2027 – 75%;
 - 2028 – 90%;
 - 2029 – Nova regra para quem tiver solicitado conexão após 7 de julho;
 - 2031 - Nova regra para quem tiver solicitado entre 7 de janeiro e 6 de julho.

Há penalidades mais severas na perda de compensação de créditos como projetos de autoconsumo remoto maiores que 500 kW e geração compartilhada quando um consumidor tiver 25% ou mais dos créditos. Nesse caso, serão cobrados 100% da TUSD Fio B + 40% da TUSD Fio A + Tarifa Social de Energia Elétrica (TFSEE) + P&D e Eficiência Energética até o fim do período de transição.

As regras definitivas começarão a ser válidas em janeiro de 2029 para consumidores que protocolarem a solicitação de acesso após julho de 2023. Para aqueles que protocolaram entre janeiro e julho de 2023, o início é em 1º de janeiro de 2031. E para os consumidores com direito adquirido, somente em 1º de janeiro de 2046. Os cálculos serão definidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel).

2.3 Recurso Solar

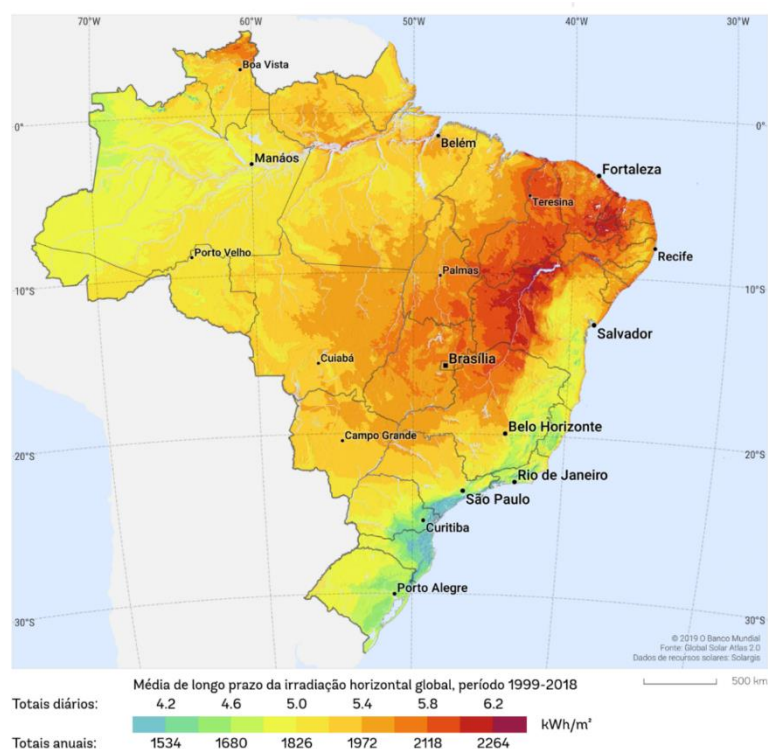
O principal parâmetro técnico é o recurso solar disponível no local de instalação. No mapa (Figura 4) disponível por meio da iniciativa SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*) com base nos dados obtidos pelo INPE

(Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) mostra a média para o GHI (*Global Horizontal Irradiation*) para todo o território brasileiro baseado em dados de satélite medidos no período de 1999 a 2018.

Quando se compara o Brasil com outros países da Europa com relação a incidência de radiação solar, verifica-se que aquele possui um índice mais elevado, facilitando a instalação de estruturas com intuito de captação da energia solar para conversão em energia elétrica.

O mapa mostra que o território brasileiro possui um elevado índice de irradiação, variando 4,4 a 6,4 kWh/m².dia. Os valores representam a média de energia que chega ao plano horizontal por dia, o que não reflete exatamente a energia absorvida pelo sistema fotovoltaico, uma vez que este nunca será instalado na horizontal. Para calcular a energia incidente nos módulos, é necessário um modelo de transposição do plano horizontal para o plano inclinado. Quanto maior a mudança no posicionamento, maior será o desvio com relação ao medido no plano horizontal.

Figura 4 – Mapa de Radiação Solar Global



Fonte: (GLOBAL, 2022).

Outro ponto importante a ser observado é que o recurso solar possui variabilidade mensal. Quanto maior a latitude do sistema menor será a irradiação. Para corrigir este efeito a melhor estratégia é inclinar o arranjo com a mesma angulação da latitude local, o que nem sempre é possível por limitações físicas do local de instalação.

2.3.1 Radiação Solar

O Sol é a estrela mais próxima da Terra, sendo a principal fonte de energia do planeta. Sua fonte energética está relacionada ao processo de fusão termonuclear que envolve átomos de hidrogênio se fundindo em átomos de hélio. Nesse processo são emitidos fótons altamente energéticos de forma que a transferência de energia da parte interna até a superfície é feita a partir de radiação eletromagnética sendo transmitida pelo vácuo (AMASOE & CORRÊA, 2016).

2.3.2 Irradiância x Irradiação

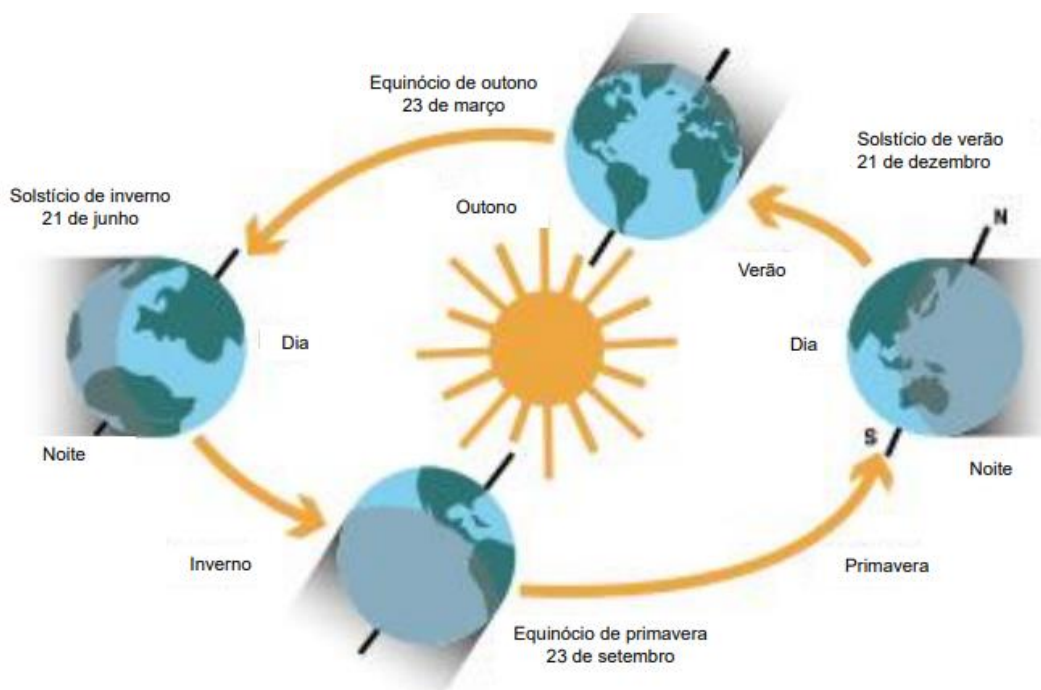
Irradiância se refere a quantidade de energia luminosa emitida de um ponto para outro. Os fótons que carregam essa energia têm comprimentos de onda que podem variar de raios-X e raios gama ao infravermelho. É a relação entre potência e área da região de incidência. Assim, ela é expressa por W/m^2 (watt por metro quadrado). A Irradiância que chega à terra advinda do Sol possui valor médio de aproximadamente $1.367 W/m^2$ e é adotado como padrão na indústria fotovoltaica em torno de $1000W/m^2$. Essa medida é muito útil para mensurar a eficiência de dispositivos e sistemas fotovoltaicos (PINHO & GALDINO, 2014).

A irradiação é a quantidade de energia solar que incide sobre uma determinada superfície durante um certo período. Também conhecida como insolação é expressa por $kWh/(m^2.dia)$ ou $kWh/(m^2.mês)$ ou $kWh/(m^2.ano)$. Como a energia é expressa como potência ao longo do tempo ($P \times t$), a radiação solar é a irradiação ao longo de um determinado tempo. Para instalação solar fotovoltaica a irradiação solar anual em determinada localidade é considerada um parâmetro fundamental.

2.3.3 Orientação e inclinação dos módulos fotovoltaicos

O Sol é considerado uma grande esfera de gás incandescente, onde há geração de energia por reações termonucleares no núcleo. A terra descreve uma trajetória elíptica em seu movimento anual em torno do sol. O Eixo da Terra em relação ao plano normal à elipse apresenta uma inclinação de aproximadamente 23,450. Essa inclinação da Terra em conjunto com o seu movimento de translação resulta nas estações do ano (Figura 5).

Figura 5 – Movimentos da Terra e as estações do ano.



Fonte: (MELO, 2018).

Para que ocorra a máxima captação da energia solar, deve-se observar tanto a orientação como a inclinação dos módulos fotovoltaicos. Com relação a orientação, os módulos devem ser orientados em direção à Linha do Equador. As instalações localizadas no hemisfério Norte a face do módulo deve ser voltada para o sul verdadeiro e as instalações localizadas no hemisfério Sul a face do módulo voltada para o norte verdadeiro.

As direções do Sul verdadeiro ou do Norte Verdadeiro não coincide com a do Sul Magnético ou Norte Magnético. Assim, deve ser realizada a correção do referencial magnético, para tanto utiliza-se a declinação magnética do local de instalação (MELO, 2018).

Com relação a inclinação dos módulos fotovoltaicos observa-se que a mesma deve estar no máximo entre -10° e $+10^{\circ}$ em torno da latitude do local com intuito obtenção do máximo desempenho dos módulos. Para áreas localizadas próximas ao Equador, onde a latitude varia entre -10° e $+10^{\circ}$ é importante que a inclinação mínima do módulo seja de 10° , com intuito de facilitar a limpeza dos módulos em períodos de chuva.

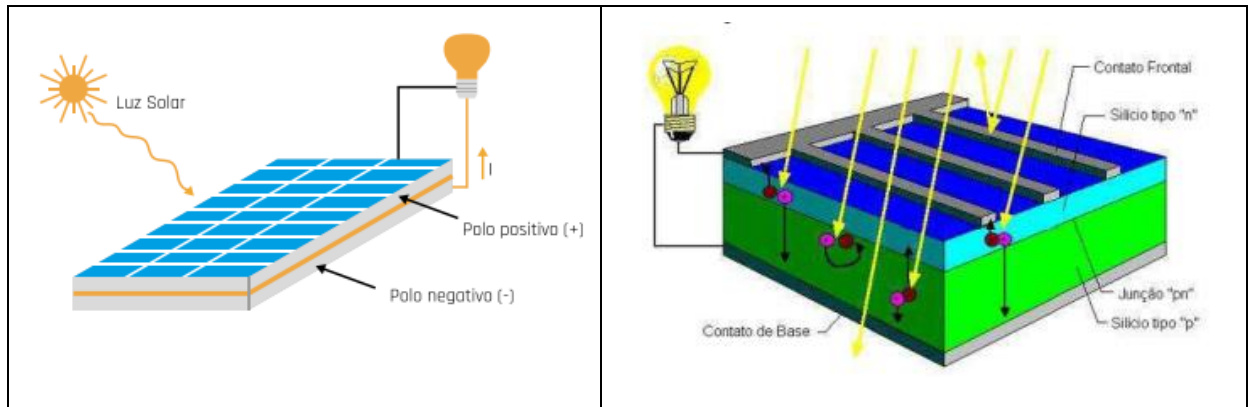
2.4 Efeito Fotovoltaico

A célula fotovoltaica é o elemento principal na geração de eletricidade a partir da energia solar. Quando uma célula fotovoltaica é exposta a luz surge uma tensão em seus terminais e assim a capacidade de gerar corrente elétrica. A palavra fotovoltaica vem de Foto, que tem sua raiz na língua grega que significa 'luz' e Voltaica, da unidade de medida de tensão elétrica volt (PINHO & GALDINO, 2014).

As células fotovoltaicas são feitas de materiais semicondutores onde o material que é mais utilizado para a fabricação delas é o silício. No entanto, o silício por si só não é capaz de gerar muita eletricidade quando exposto à luz. Para conseguir níveis elevados de corrente elétrica o silício é misturado com outros materiais para conseguir gerar eletricidade a níveis satisfatórios (MELO, 2018).

A mistura desses materiais com o silício faz com que a célula fotovoltaica gere corrente elétrica em apenas um sentido, ou seja, geram corrente contínua. A Figura 6 ilustra uma célula fotovoltaica recebendo radiação solar e convertendo em eletricidade para alimentar uma carga. Note que a parte superior é o polo negativo e a parte inferior é o polo positivo da célula.

Figura 6 – Célula fotovoltaica recebendo a radiação solar



Fonte: (PINHO & GALDINO, 2014; MELO, 2018).

2.5 Células fotovoltaicas

A célula fotovoltaica é o elemento básico na composição do módulo fotovoltaico, sendo responsável pela conversão da energia radiante do Sol em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico. As células fotovoltaicas mais comuns encontradas atualmente no mercado são de três tipos, as de silício monocristalino, as de silício policristalino e as de filme fino de silício (MELO, 2018).

Ocorreu um grande avanço na produção de células fotovoltaicas, mesmo com a diminuição de custos a eficiência ainda é considerada baixa. Atualmente existem diversas pesquisas com o objetivo de confeccionar células fotovoltaicas com baixos custos de fabricação, alta durabilidade e maior eficiência na conversão de radiação solar em energia elétrica.

2.5.1 Silício monocristalino

O silício monocristalino é um dos materiais semicondutores mais disponíveis para a fabricação de células fotovoltaicas. As células de silício monocristalino são as mais eficientes devido ao material utilizado apresentar um grau de pureza bastante elevado. Essas células podem apresentar uma eficiência na ordem de 21% comercialmente e chegar aos 25% (MELO, 2018; ENERGIA, 2023).

O método mais comum de fabricação das células monocristalinas é, primeiramente, extrair o cristal do dióxido de silício que depois é derretido em um

caldeirão, onde também é purificado. Para a célula monocristalina ser utilizada para fins de geração de energia é necessário acrescentar às fatias uma dopagem ao material, criando uma junção P-N (PINHO & GALDINO, 2014).

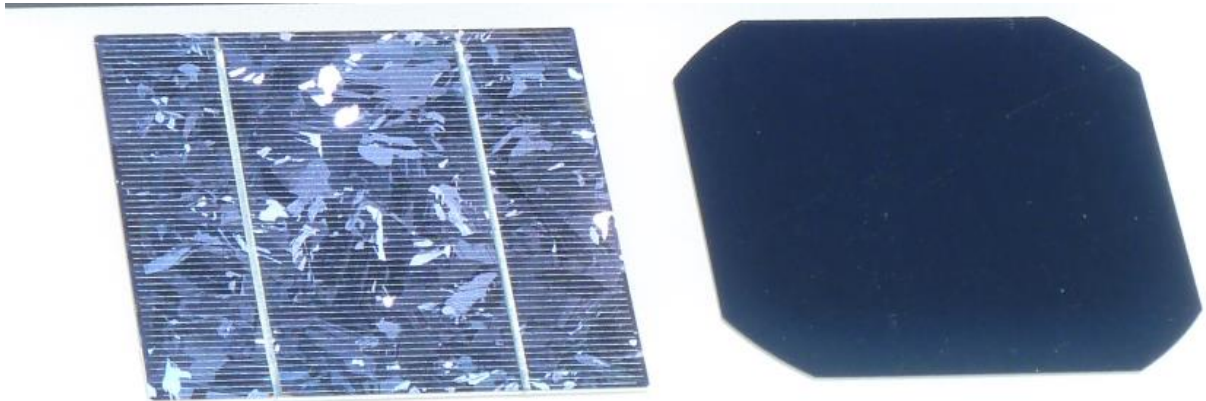
Células monocristalinas são altamente eficientes, mas para que o silício apresente um grau de pureza muito elevado o seu processo de fabricação demanda de muito investimento e energia, o que eleva o preço final desse tipo de célula tornando as policristalinas e de película fina melhores opções para o consumidor (MELO, 2018).

2.5.2 Silício policristalino

A célula de silício policristalino é relativamente mais barata comparada a monocristalina. A eficiência dessas células é menor, porém o baixo custo por watt de energia acaba compensando. Essa produção menos exigente faz com que eficiência desse tipo de célula seja em torno dos 13 e 17% nas células comerciais (MELO, 2018; ENERGIA, 2023).

As células de silício policristalino apresentam uma desuniformidade em sua coloração devido ao processo de purificação do material ser menos exigente e mais barato. Elas são feitas com pequenos grãos de cristais que são moldados em um formato cúbico de lingote de silício fundido. Sendo assim, são fatiadas e montadas com método similar ao das de silício monocristalino, porém com menos rigorosidade no processo. Na Figura 7 percebe-se a diferença a entre dois tipos de materiais (AFEWORK; et al., 2022).

Figura 7 – Comparação: Policristalina (esquerda) x Monocristalina (direita).



Fonte: (AFEWORK; et al., 2022)

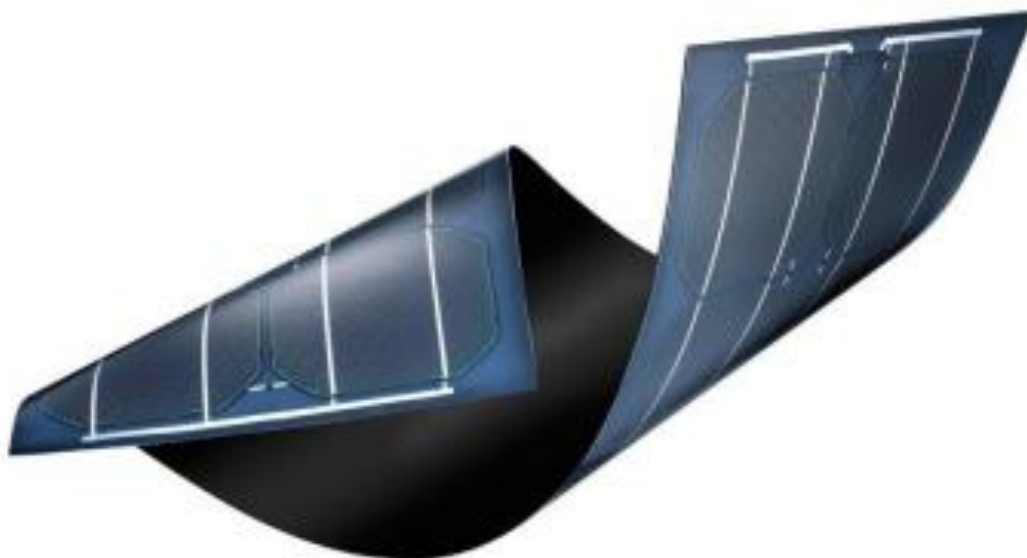
2.5.3 Filme fino de silício

As células de filme fino ou de película fina de silício são mais uma das várias opções no mercado, sendo a mais recente que a tecnologia de mono e policristalina. Alguns exemplos de materiais dessas películas são: o seleneto de cobre e índio-gálio (CuInSe_2), o telureto de cádmio (CdTe) e o arsenieto de gálio (GaAs), com tipicamente alguns micrômetros de espessura que são diretamente depositados em uma placa de vidro, plástico ou aço inoxidável (PATEL, 2006).

Outro tipo de material de película fina para células fotovoltaicas é o silício amorfo (a-Si), que também é produzido depositando pequenas camadas de silício em um substrato de vidro. As células de silício amorfo apresentam uma coloração escura e uniforme como mostrado na Figura 8. O resultado é uma célula bem fina e flexível. Essa tecnologia apresenta um baixo rendimento (entre 8 e 12%) e a desvantagem de diminuir sua eficiência no primeiro ano de uso devido à degradação pela exposição à radiação solar (MELO, 2018; ENERGIA, 2023).

Devido ao seu baixo custo de fabricação esse tipo de célula é muito utilizado em calculadoras, brinquedos e pequenos aparelhos eletrônicos que demandam uma baixa energia em seu funcionamento. Outro fator crucial é que nos primeiros meses de uso deste painel as células sofrem uma queda de 20% em sua eficiência até que sua operação se estabilize (AFEWORK; et al., 2022)

Figura 8 – Película fina e flexível.



Fonte: (SOLAR, 2022).

Na Tabela 1 observa-se as eficiências das 3 tecnologias principais descritas neste trabalho.

Tabela 1 – Eficiência das tecnologias de energia fotovoltaica.

Tipos de células	Eficiência em laboratório	Eficiência comercial
Silício Monocristalina	31%	18 a 25%
Silício Policristalino	20%	13 a 18%
Silício Amorfo	13%	8 a 12%

Fonte: Adaptado (MELO, 2018; ENERGIA, 2023).

2.6 Impactos Ambientais

O sistema fotovoltaico não emite poluentes durante sua operação e é muito promissor como uma alternativa energética sustentável, entretanto gera impactos

ambientais a serem considerados (INATOMI & UDAETA, 2005). Os efeitos mais significativos do sistema fotovoltaico para geração de energia solar são provocados durante a fabricação de seus materiais e construção, e também relacionado às questões de área de implantação (INATOMI & UDAETA, 2005).

Segundo Lagrimante (2018) os impactos ambientais gerados em empreendimentos de aproveitamento solar fotovoltaico estão estreitamente relacionados à sua localização, às características físico-climáticas do local de implantação e às características dos ecossistemas locais.

Segundo Tolmasquim (2004) os impactos relacionados as modificações paisagísticas e a movimentação de recursos, tanto humano quanto maquinário e equipamentos, alteram e degradam a paisagem além da geração de resíduos, como baterias e óleos, a geração de poeiras/gases e alterações na qualidade do ar pela circulação de veículos e o manuseio de máquinas e equipamentos.

A construção de uma usina gera impactos consideráveis nos ecossistemas locais, modificando os ciclos de desenvolvimento da fauna e da flora, tanto durante a fase de construção quanto durante a permanência do empreendimento. Ocasionalmente ocasiona a perda de cobertura vegetal, alteração da dinâmica dos ecossistemas locais, afugentamento e fuga da fauna local (LAGRIMANTE, 2018).

Analisando o ciclo de vida na fabricação dos painéis fotovoltaicos, utiliza-se uma gama de materiais, tais como alumínio, cádmio, cobre, índio, gálio e principalmente o silício. Contudo há também a questão acerca do descarte dos painéis, findada a operação de uma usina. Caso a gestão de resíduos não tenha a devida importância, o descarte inadequado pode gerar impacto ambiental, como contaminação do solo por metais pesados. Estimativas apontam que, até 2050, serão gerados 78 milhões de toneladas de resíduos de painéis (IRENA, 2016).

A importância de considerar o descomissionamento das usinas na avaliação de potenciais impactos socioambientais, atualmente se restringe aos materiais empregados e seus possíveis danos ao meio ambiente. Isso porque ainda não há um histórico de descomissionamento de usinas, visto que o tempo médio de vida útil dos painéis é de 30 anos (IRENA, 2016).

Contudo, não se limita a impactos negativos. Como impactos positivos, a fonte solar se identifica por não ser uma fonte emissora de gases poluentes para a

atmosfera e de ser renovável, os impactos ambientais comparados a outras fontes não renováveis são de baixa escala (TOLMASQUIM, 2004).

Outro impacto relevante é de caráter socioambiental, é a geração de emprego deste setor é alta tanto em caráter micro (construção e operação) quanto macro (rede nacional de energia), geração de renda com o crescimento da economia local e aumento da arrecadação tributária (LAGRIMANTE, 2018).

No aspecto licenciamento ambiental para fontes de geração solar fotovoltaica, não há um regramento específico sobre a mesma. A falta de regulamentação específica sobre o licenciamento ambiental de geração solar fotovoltaica no nível federal pode gerar insegurança quanto aos critérios a serem considerados pelos órgãos ambientais licenciadores, o que se reflete na inibição do interesse do mercado por reatar um processo burocrático como outras atividades de licenciamento (JOTA, 2018).

2.7 Viabilidade econômica

Como todo investimento, os sistemas fotovoltaicos precisam ser rentáveis. Neste sentido, o custo do investimento, tempo de retorno, operação e manutenção devem ser bem equacionados. Para analisar esta viabilidade são escolhidas as variáveis: Taxa Interna de Retorno (TIR), Valor Presente Líquido (VPL) e *Payback*.

2.7.1 Valor presente líquido

O Valor Presente Líquido é um método matemático-financeiro que possui a capacidade de determinar o valor presente de pagamentos futuros com a aplicação de uma taxa de juros adequada, subtraindo o valor do investimento inicial. A análise do VPL segue duas maneiras:

- VPL positivo, o investimento é considerado vantajoso;
- VPL negativo, o investimento não deverá ser considerado.

Este indicador possui vantagens quanto a avaliação de investimentos, é confiável e flexível, entretanto as empresas o consideram com um indicador de difícil

interpretação. Isso faz com que, preferencialmente, estas prefiram o TIR como método para se estudar a viabilidade do sistema (NAKABAYASHI, 2014).

2.7.2 Taxa interna de retorno

A Taxa Interna de Retorno (TIR) mostra o retorno sobre o investimento. Em outras palavras indica a taxa intrínseca do rendimento de um determinado investimento onde o VPL seja igual a zero, quando a TIR for maior que o custo de capital o investimento é considerado viável. Esse indicador igualará fluxos de entrada e saída de um determinado investimento, assim é possível determinar a taxa de retorno dos fluxos de caixa do investimento (ROSS, 2015).

Segundo Ross (2015) é uma taxa de desconto hipotética, calculada a partir de uma projeção de fluxo de caixa (previsão de receitas geradas por um investimento ao longo de determinado período) quando consideramos que seu Valor Presente Líquido (VPL) é igual a zero. Na prática, ela é usada para indicar se um projeto é viável ou não.

2.7.3 Payback

O *payback* é uma técnica de análise de investimento utilizada para calcular o tempo no qual o investimento inicial e o lucro acumulado oriundo desse investimento se igualam. Extremamente limitado, pois não se leva em consideração o risco, correção monetária ou financiamento. A análise deste indicador quando utilizada com outros métodos de análise de viabilidade demonstra com precisão a associação entre valor e tempo de retorno dos investimentos (MIRANDA, 2014).

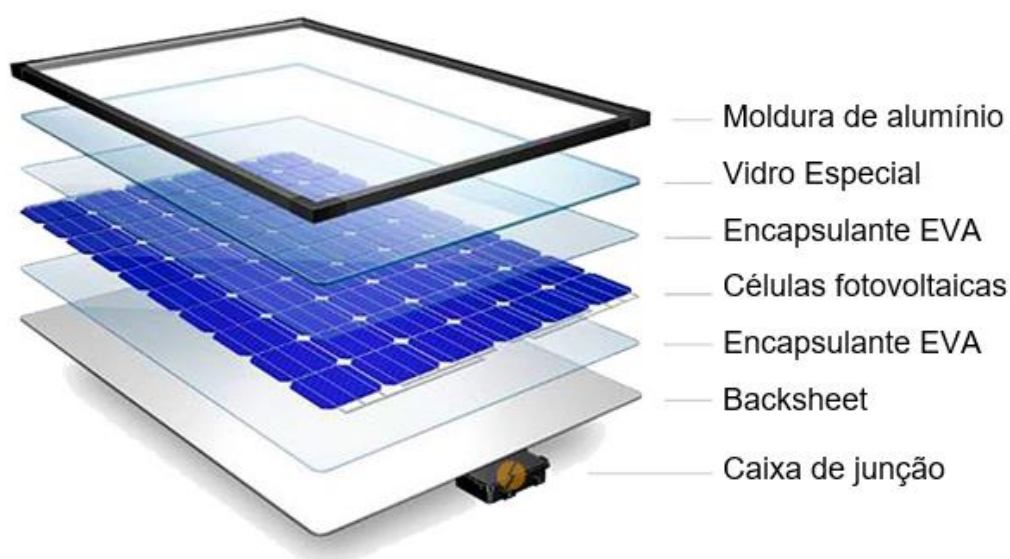
2.8 Componentes de um sistema fotovoltaico

2.8.1 Módulos fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos (também chamados de painéis fotovoltaicos ou placas fotovoltaicas) são estruturas rígidas que comportam várias células interligadas em série para se obter uma tensão maior em seus terminais. Os painéis transformam energia emitida pelo Sol em energia elétrica de corrente contínua.

Os módulos fotovoltaicos apresentam conexões em série entre suas células, onde a parte superior de uma célula (polo negativo) é conectada ao polo inferior (polo positivo) da próxima célula. O número de células conectadas em um módulo e seu arranjo, que pode ser em paralelo ou em série, depende da tensão da utilização e da corrente elétrica desejada (PINHO & GALDINO, 2014). Na Figura 9 é possível observar os materiais que compõe um modulo fotovoltaico.

Figura 9 – Materiais utilizados na fabricação de um módulo fotovoltaico.



Fonte: (SOLAR, 2022).

2.8.2 Características elétricas dos módulos fotovoltaicos

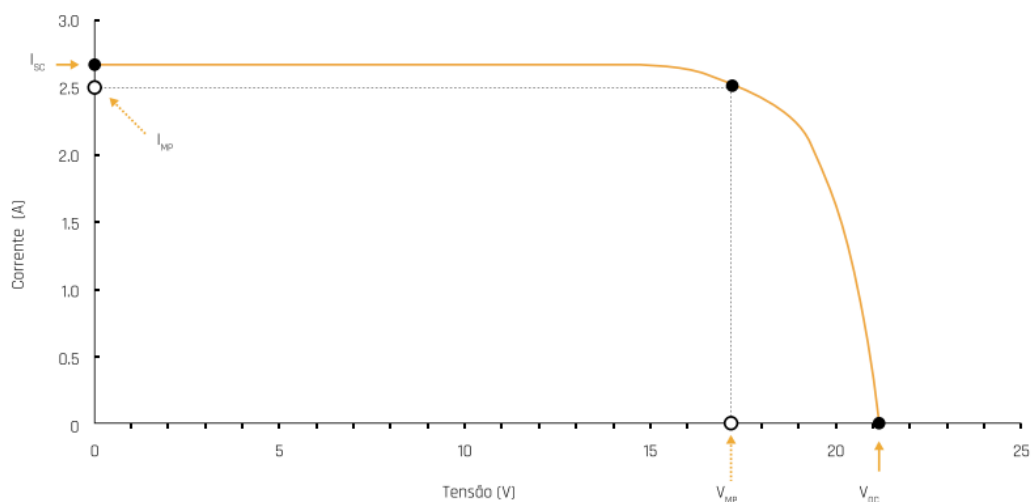
Um módulo fotovoltaico pode ser identificado por sua potência elétrica de pico nominal (Wp), no entanto, as características de tensão e corrente para módulos de mesma potência e de fabricantes diferentes podem variar um pouco. A potência nominal ou potência de pico que é informada pelo fabricante é a potência que o módulo pode fornecer levando em consideração as condições de teste padrão realizadas em laboratório (*STC – do inglês Standard Test Conditions*) (PINHO & GALDINO, 2014).

Após a fabricação de um módulo, o fabricante realiza testes de desempenho elétrico para traçar a curva característica do módulo e extrair alguns parâmetros importantes. Nesse teste, o módulo é colocado em uma câmara que simula níveis de radiação solar, temperatura e massa de ar fixa. A irradiância na qual o módulo é submetido é de 1000W/m^2 , a temperatura das células fotovoltaicas controlada em 25°C e a massa de ar (AM) de 1,5 (MELO, 2018).

2.8.3 Curva características I x V

O comportamento elétrico dos módulos fotovoltaicos é geralmente representado pela curva de corrente (I) e pela tensão (V). Mantendo um nível de irradiância fixa sobre o plano frontal do módulo fotovoltaico, a tensão e a corrente dele dependem da carga que está conectada em seus terminais. A relação entre a tensão e a corrente de um módulo fotovoltaico é mostrada na Figura 10. O ponto de operação do módulo pode excursionar por toda a curva traçada dependendo da carga conectada.

Figura 10 – Curva I x V de um módulo fotovoltaico.



Fonte: (MELO, 2018).

Na Figura 10 tem-se alguns pontos singulares, tais como:

- I_{SC} – Corrente de curto-circuito: é a corrente máxima que um módulo fotovoltaico pode fornecer e é obtida a partir de um curto-circuito em seus terminais.
- V_{OC} – Tensão de circuito aberto: é a máxima tensão entre os terminais de um módulo. É quando o mesmo não está fornecendo corrente elétrica.
- I_{MP} – Corrente de máxima potência: é o valor de corrente que corresponde à situação na qual o módulo fornece máxima potência.
- V_{MP} – Tensão de máxima potência: é o valor de tensão que corresponde à situação na qual o módulo fornece máxima potência.
- P_{MP} – Ponto de máxima potência: é a máxima potência que o módulo fotovoltaico pode entregar para um determinado nível de irradiância solar. É calculado como sendo o produto $V_{MP} \times I_{MP}$.

O produto da corrente e tensão representa a potência gerada para aquela condição de operação. A área do gráfico, denominada fator forma (FF) do módulo representa o produto $V_{MP} \times I_{MP}$, ou seja, P_{MP} , a potência máxima. Os valores de I_{SC} , V_{OC} , I_{MP} , V_{MP} e P_{MP} são cinco parâmetros que especificam o módulo sob dadas condições de radiação, temperatura de operação de célula e massa de ar (PINHO & GALDINO, 2014).

2.8.4 Fatores que influenciam os módulos fotovoltaicos

Os principais fatores que influenciam a geração fotovoltaica são o nível de irradiância solar e a temperaturas nos módulos (Figura 11). A corrente elétrica que o módulo fotovoltaico pode fornecer depende diretamente da intensidade da radiação solar que incide sobre as células, sendo que ela aumenta de acordo com o aumento da irradiância. A $1000W/m^2$ o módulo é capaz de fornecer a corrente máxima especificada em sua etiqueta (sob temperatura de $25^{\circ}C$).

Já a temperatura tem influência sobre a tensão que o módulo apresenta em seus terminais e, conseqüentemente, na potência fornecida por ele. Em temperaturas mais baixas é evidente que há um ganho de tensão. Com o aumento de em temperaturas a tensão diminui.

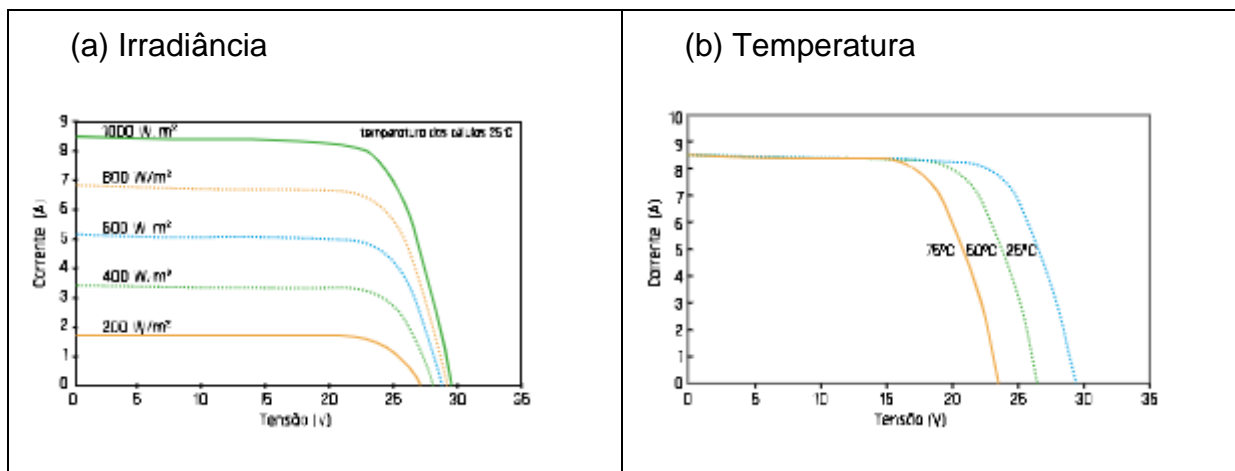
2.9 Associação de módulos

No dimensionamento de um sistema fotovoltaico deve-se identificar as características elétricas do projeto. Costuma-se associar módulos para atingir uma faixa de tensão, corrente ou potência no qual um único módulo não seria capaz de produzir. Esses módulos podem ser conectados em ligações em série e/ou paralelo (PINHO E GALDINO, 2014).

Ao definir como serão associados os módulos, é necessário ter informações de como deverá ser a instalação e quais componentes serão utilizados, pois as tensões e correntes resultantes devem ter plena compatibilidade com esses componentes.

Na Figura 11 (a e b) observa-se as curvas de correntes (i) e tensão (v) para diferentes níveis de irradiância e temperaturas nas células fotovoltaicas.

Figura 11 – Influências na Curva I x V.



Fonte: (MELO, 2018).

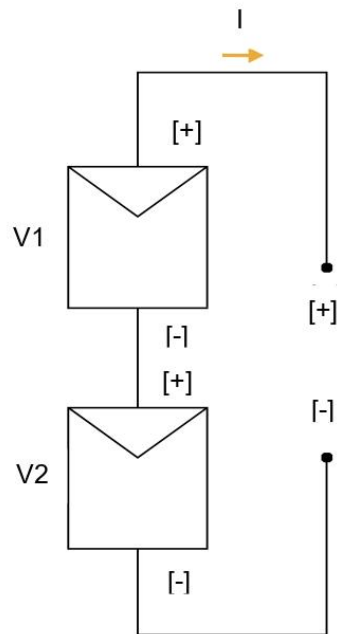
2.9.1 Associação em Série

Associa-se módulos fotovoltaicos em série quando o projeto necessita gerar valores altos de tensão. A conexão em série é feita de um terminal positivo ao terminal negativo de um outro módulo, e assim por diante. As tensões são somadas e a corrente permanece constante.

Os módulos fotovoltaicos na ligação em série devem apresentar o mesmo tipo e modelo de módulo, mantendo as características elétricas iguais, evitando que

módulos de menor capacidade de geração limite a capacidade de geração dos módulos de maior capacidade. Na Figura 12 demonstra uma conexão em série de módulos. Um conjunto de módulos conectados em série é chamada de *string*.

Figura 12 – Conexão de módulos fotovoltaicos em série



Fonte: (MELO, 2018).

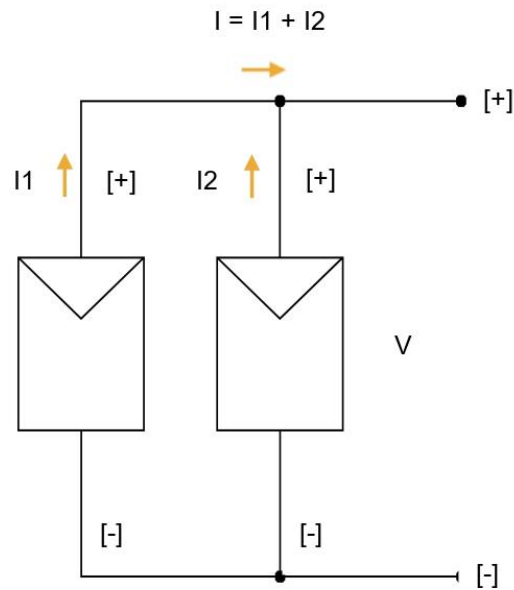
2.9.2 Associação em Paralelo

A conexão em paralelo é feita unindo-se terminais positivos dos módulos entre si e procedendo de forma igual com os terminais negativos. A associação de módulos paralelos as correntes geradas por cada módulo se somam e a tensão entre eles permanece a mesma (Figura 13).

Este tipo de conexão entre módulos fotovoltaicos é geralmente utilizado em sistemas autônomos, onde não há conexão com a rede elétrica. Ocorre, também, a soma das potências de cada módulo resultando em uma potência final maior. É importante que os módulos associados em paralelo apresentem mesma tensão, pois

um módulo de tensão menor pode passar a receber energia de outro módulo de tensão maior, funcionando como consumidor ao invés de gerador.

Figura 13 – Conexão paralela entre módulos fotovoltaicos



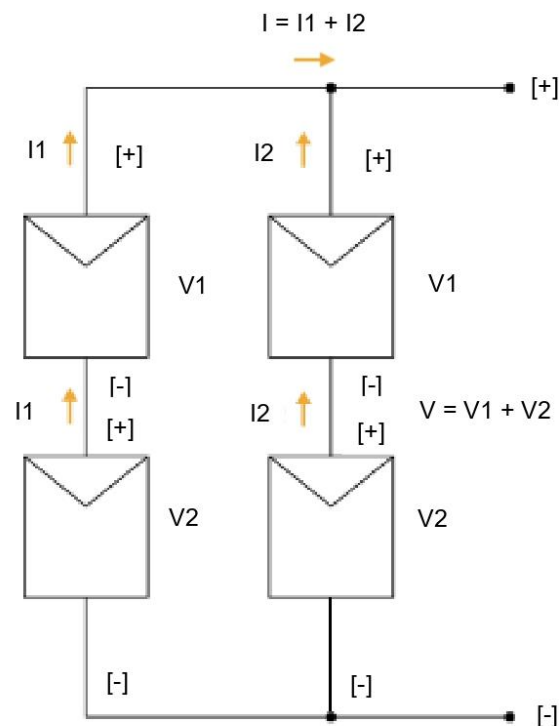
Fonte: (MELO, 2018).

2.9.3 Associação Mista

Este tipo de conexão é utilizado em sistemas conectados à rede quando se deseja alcançar maiores níveis de potência, sendo muito comum em projetos de médio/grande porte para atingir níveis de tensões e potências mais altas do que uma simples *string* pode chegar.

Ao conectar-se *strings* em paralelo soma-se as correntes de cada *string* e no final de tudo soma-se as potências de todos os módulos fotovoltaicos. Na Figura 14 observa-se um esquema de conexão série-paralelo.

Figura 14 – Conexão mista entre módulos fotovoltaicos



Fonte: (MELO, 2018).

2.10 Inversores

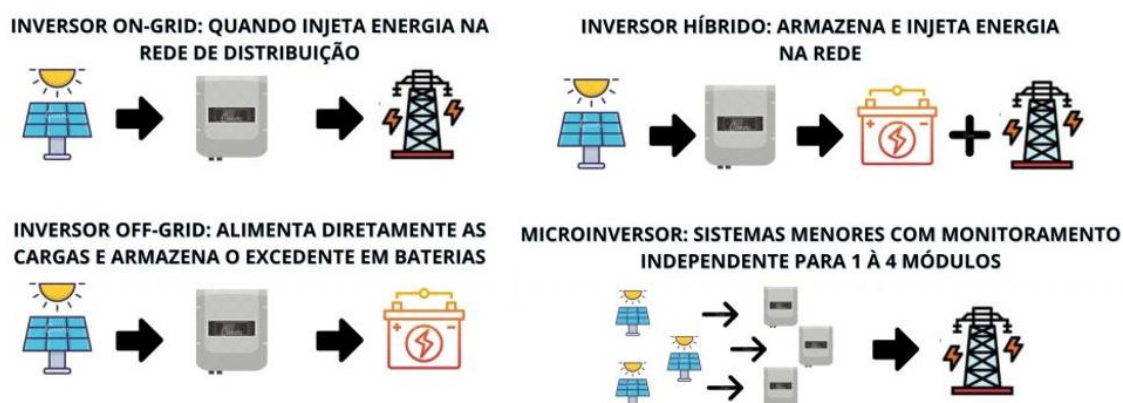
A maioria dos equipamentos eletrônicos funcionam com tensão de 127V ou 220V e de corrente alternada, que são características da rede elétrica local. Os módulos fotovoltaicos geram uma energia de baixa tensão e em corrente contínua, sendo assim, para que o sistema seja conectado à rede de distribuição é necessário o uso de conversor de corrente-contínua em corrente-alternada (CC-CA), conectado diretamente à *String Box* que se conecta ao quadro de distribuição de cargas.

Os inversores têm uma função fundamental no funcionamento dos sistemas fotovoltaicos sendo sua principal função a conversão de energia. É um dispositivo eletrônico que fornece energia elétrica em corrente alternada a partir de uma fonte em corrente contínua. Inversores podem ser divididos em dois tipos (Figura 15), aqueles para sistemas *on-grid*, que são chamados de comutados pela rede ou *grid-*

tie (comutação natural) e os sistemas *off-grid*, ou autocomutados (comutação forçada).

A tensão CA de saída deve ter amplitude, frequência e conteúdo harmônico adequados às cargas a serem alimentadas. No caso de sistemas conectados à rede elétrica a tensão de saída do inversor deve ser sincronizada com a tensão de rede (PINHO & GALDINO, 2014; MELO, 2018). Os inversores supervisionam a tensão e a frequência da rede, entrando em operação a partir do momento em que os valores estão dentro da faixa de regime normal de operação. O conjunto de proteção de conexão dos inversores não permite que o equipamento funcione de forma ilhada, ou seja, em caso de queda da rede elétrica, o sistema para de funcionar.

Figura 15 – Tipos de inversores.



Fonte: ENERGES, 2020.

Houve um crescimento nos investimentos em inversores pelo mercado de energia fotovoltaica, transformando-o em um dos principais componentes, oferecendo funções de gerenciamento e armazenamento de energia, além de segurança de sistemas (RODRIGUES, 2017).

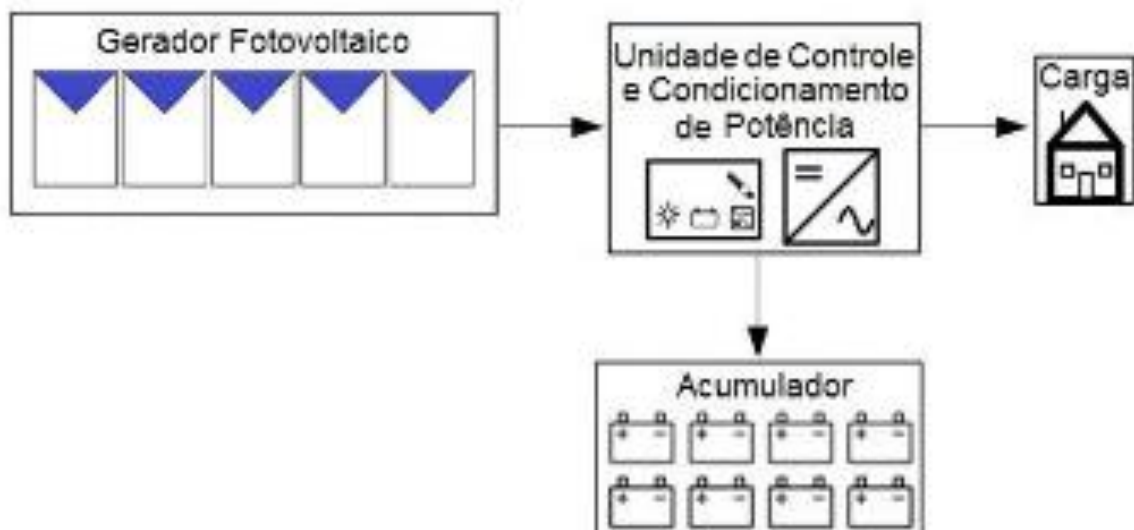
2.11 Sistemas fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos (SFV) podem ser classificados em categorias: isolados (sistemas off-grid), conectados à rede (sistemas on-grid) e sistema híbridos. Esses

sistemas só podem operar por meio de fonte fotovoltaica, separada ou de forma híbrida. A escolha de cada sistema depende da aplicação e da disponibilidade de recursos energéticos.

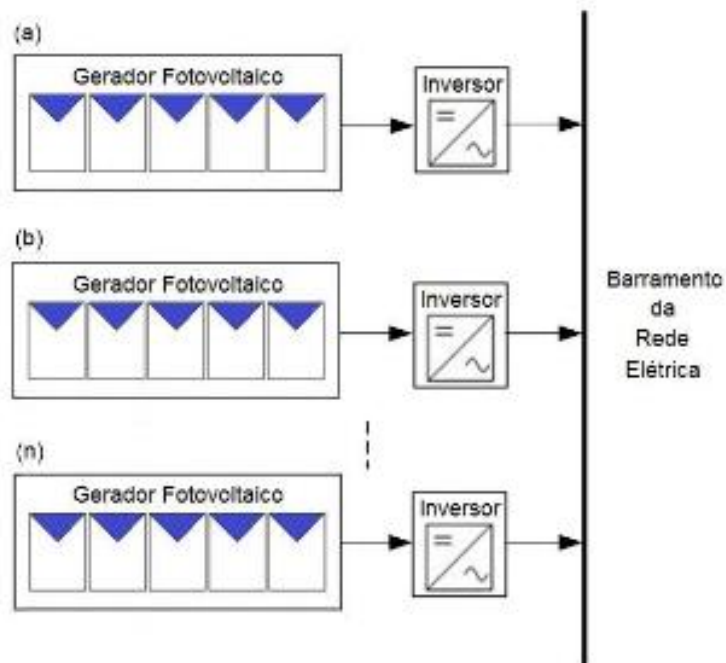
Os sistemas isolados (SFI) (Figura 16), puramente fotovoltaico (SFV) (Figura 17) ou híbridos (SFH) (Figura 18), geralmente necessitam de algum tipo de armazenamento. As baterias são as mais empregadas como um sistema de armazenamento quando deseja utilizar aparelhos elétricos em períodos em que não há geração fotovoltaica.

Figura 16 – Configuração de sistema isolado



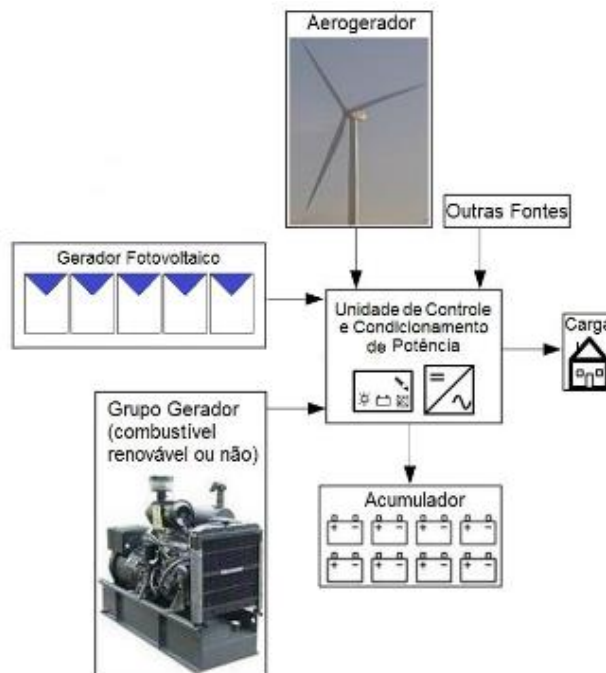
Fonte: (PINHO E GALDINO, 2014).

Figura 17 – Sistema fotovoltaico conectado à rede.



Fonte: (PINHO E GALDINO, 2014).

Figura 18 – Sistema híbrido



Fonte: (PINHO E GALDINO, 2014).

2.11.1 Sistemas *Off-Grid*

O sistema de energia solar *off-grid* (sistema isolado ou sistema autônomo) tem como principal característica o “autossustento”. É um sistema que não é conectado à rede de distribuição. Na Figura 19, o sistema *off-grid* é autônomo que necessita de armazenamento de energia elétrica, que pode ser feito de diversas formas como: mecânica, energia potencial, química ou térmica para armazenar a energia produzidas pelas placas fotovoltaicas. Devido à necessidade de manter o equilíbrio entre a produção e o consumo, cada vez mais os sistemas de armazenamento se tornam importantes, sendo esse sistema permite atenuar a intermitência ou imprevisibilidade de produção de uma fonte renovável.

Como é difícil ajustar o valor da carga à produção este sistema isolado precisa sempre de lhe ter associado um sistema de armazenamento, que normalmente é composto por baterias, garantindo que o excedente de produção é armazenado para poder ser utilizado posteriormente. Pode-se usar em horários em que não existe radiação solar ou para salvaguardar os dias chuvosos e/ou nublados

Esse sistema autônomo funciona independente da rede elétrica, motivo pelo qual é utilizado em locais remotos. Devido a tal circunstância, esse sistema necessita de mais investimentos para produzir a mesma quantidade de kWh consumida por uma residência tal qual se esta fosse produzida pelas concessionárias de energia.

Figura 19 – Sistema isolado com baterias de armazenamento.



Fonte: (BORTOLOTO, 2017).

2.11.2 Sistemas *On-Grid*

O sistema de energia solar *on-grid* (*grid-tie*) ou sistema fotovoltaico conectado à rede, é o sistema que funciona em função de sua conexão à rede de transmissão. Permite que a energia produzida em excesso e que não for consumida pela residência seja repassada para a rede de transmissão e sendo nesta convertida em créditos de energia para a mesma residência.

O sistema conectado à rede funciona por intermédio de captação da luz solar por meio dos painéis solares gerando eletricidade. É composto de um painel com módulos fotovoltaicos que possuem a função de converter a energia solar em energia elétrica em corrente contínua e possui os inversores, que convertem essa corrente contínua em corrente alternada, com frequência e tensão compatível com os valores da rede elétrica (BORTOLOTO, 2017).

Observa-se na Figura 20 que o conjunto envia energia para a rede quando a geração é maior que o consumo, e retira dela quando o consumo é maior que a geração. O usuário paga só para a concessionária quando consome mais que gera, e caso produza mais do que consome, ele recebe créditos de acordo com a resolução normativa da ANEEL (482/2012).

Figura 20 – Sistema *On-grid*.



Fonte: (BORTOLOTO, 2017).

Os componentes que fazem parte de um sistema fotovoltaico *on-grid* para que o sistema opere de maneira satisfatória são os módulos, inversor, *string box*, quadro elétrico, medidor bidirecional e cabeamentos.

2.12 *String box* (Caixas de junção)

As caixas de junção são equipamentos que possuem a finalidade de agrupar as *strings* (séries) em paralelo para que sejam encaminhadas às entradas do inversor. Adicionalmente contém dispositivos de proteção, formados por chaves seccionadoras, fusíveis, disjuntores e dispositivos de proteção contra surtos (DPSs), produzindo uma saída CC devidamente protegida que se conecta à entrada CC do inversor.

A *string box* possui fusíveis de proteção e é responsável por unir os cabos elétricos em dois barramentos, um positivo e outro negativo, também pode possuir diodos de bloqueio que impedem que a corrente elétrica circule em sentido contrário, o que danificaria todo o sistema (PINHO E GALDINO, 2014).

Estes equipamentos são praticamente obrigatórios em sistemas que utilizam grandes inversores centrais com potência superior a 50 kW. Porém no Brasil apesar de opcional, está sendo comum à sua utilização em sistemas de pequeno porte. A justificativa na maioria dos casos é devida principalmente à proteção de surto (MELO, 2018).

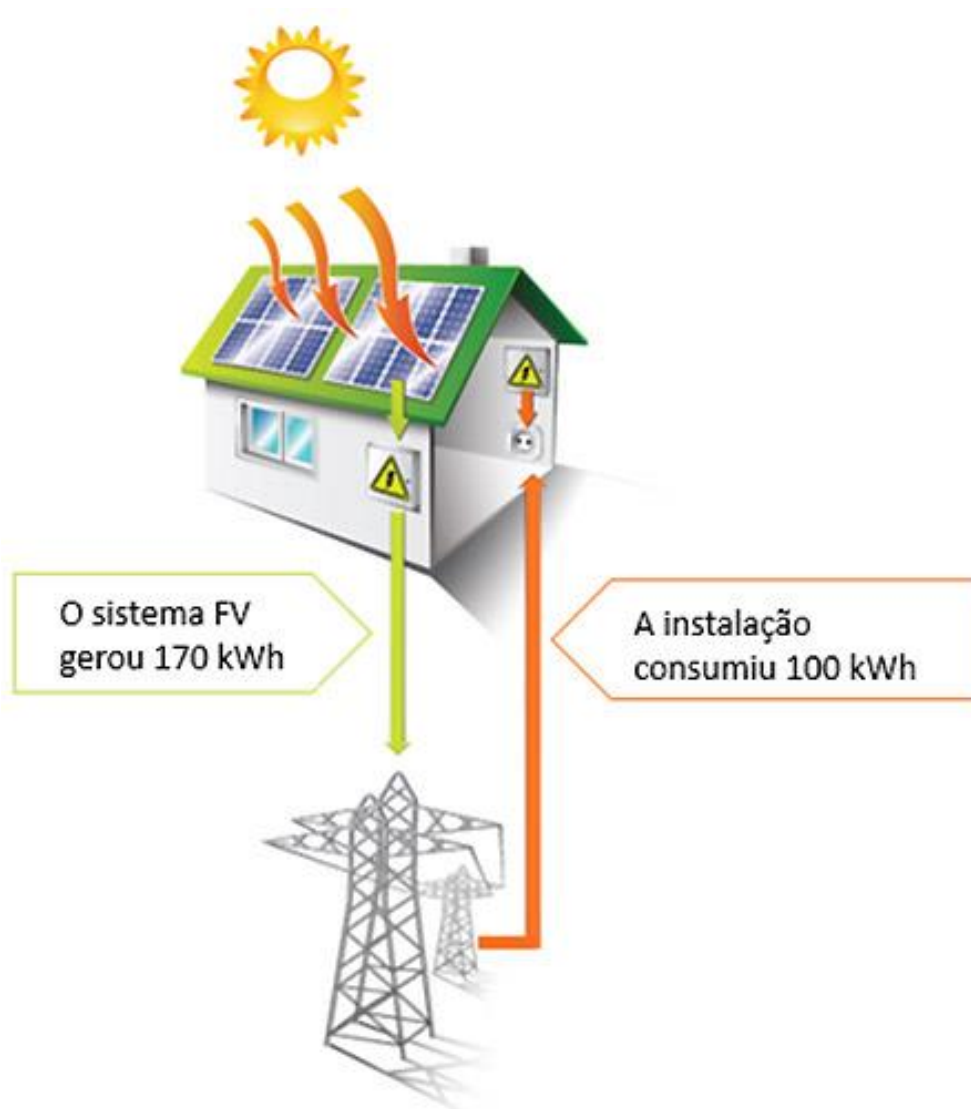
2.13 Medidor de Energia Bidirecional

Os medidores do tipo bidirecional são utilizados nas instalações solares on-grid, sistemas de microgeração conectados à rede pública. A interface com a companhia de energia deve ser feita por meio de um medidor bidirecional.

O método mais utilizado para negociar a eletricidade de fontes renováveis é o Virtual Net Metering ou Sistema de Compensação de Energia. Funciona como um incentivo de créditos ao proprietário da instalação. Quando o sistema fotovoltaico gera mais energia que a instalação esse excedente é injetado na rede e o medidor contabiliza esse valor e beneficia o consumidor. Quando o contrário acontece e a instalação consome mais energia do que é gerada, o medidor funciona contabilizando de modo a cobrar o proprietário pelo uso da eletricidade da companhia (RÜTHER, 2004).

Na Figura 21 é exemplificado uma instalação residencial em que o sistema fotovoltaico montado no telhado gerou uma energia de 170 kWh e a residência consumiu 100 kWh. Dessa forma, suprimindo a geração pelo consumo percebe-se que há um crédito de 70 kWh que pode ser compensado nos meses seguintes caso o consumo seja maior que a geração.

Figura 21 – Exemplo de compensação positiva.



Fonte: (SOLAR, 2022)

3 MÉTODOS

Para o dimensionamento do sistema fotovoltaico utilizou-se as metodologias proposta por Pinho e Galdino (2014) e a utilizada por Menezes (2019).

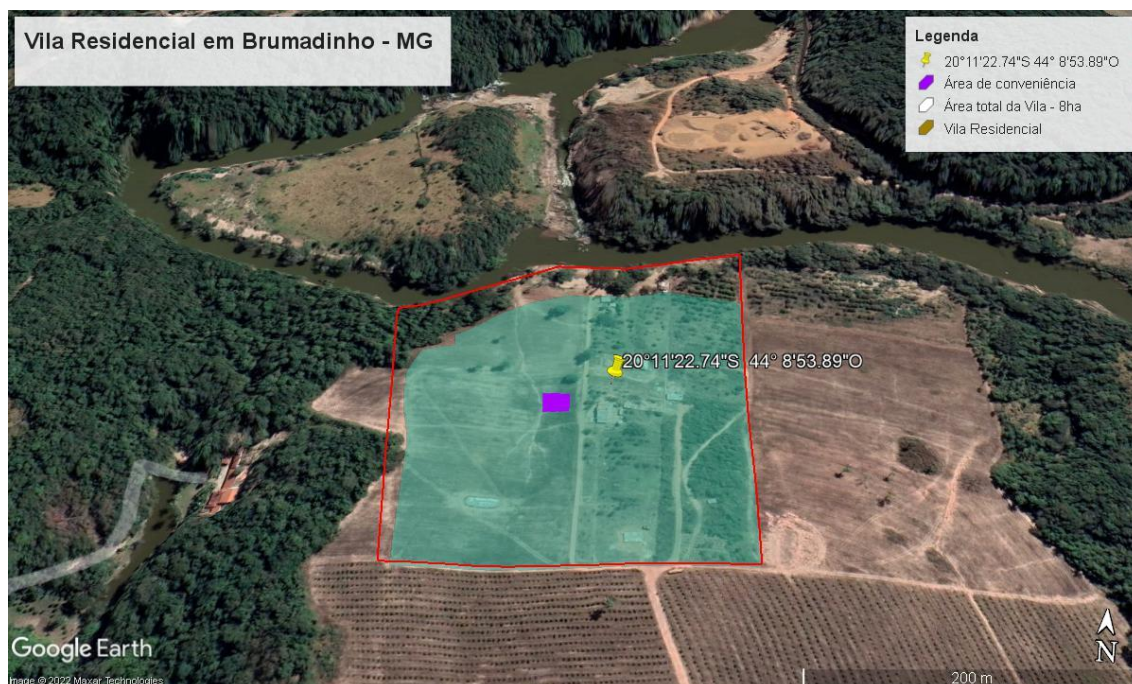
3.1 Vila residencial

Brumadinho é um município brasileiro no estado de Minas Gerais, região Sudeste do país. Está localizado na Região Metropolitana de Belo Horizonte e sua população estimada em 2021 era de 41.208 habitantes. Possui uma área de territorial de 693,434 km² (IBGE, 2022). Conforme o *Climate-data* o município de Brumadinho está em 762 m acima do nível do mar. O clima é quente e temperado. Há muito menos pluviosidade no inverno que no verão. De acordo com a *Köppen e Geiger* o clima é classificado como Cwa. A temperatura média é 20.8 °C e a pluviosidade média anual é de 1267 mm.

Segundo o *Koppen climate classification*, o tipo C é considerado clima temperado. Cwa é definido como: clima subtropical úmido. É influenciado pelas monções, a média do mês mais frio está acima de 0 °C ou -3 °C, pelo menos um mês tem temperatura média acima de 22 °C e ao menos quatro meses apresentam média acima de 10 °C. No verão é pelo menos dez vezes mais chuvoso do que o inverno, que é seco e irradiação solar de 1677,9 kWh/m² (GLOBAL, 2022).

A vila residencial localiza-se nas coordenadas latitude sul 20°11'22,74" e oeste 44°08'53,59", no povoado da Toca, na Fazenda Nossa Senhora do Carmo, em Brumadinho, Minas Gerais (Figura 22). A unidade de geração de energia elétrica vai ser dimensionada para atender uma comunidade idealizada com 8 residências comuns. A comunidade tem uma área de 8 hectares (ha), divididos em 8 sítios de 1 ha (10.000 m²). A área de convivência terá uma estrutura de 20 m x 20 m, totalizando 400 m², localizada ao centro da vila residencial. O telhado será de duas caídas com inclinação de 20%, ou seja, a cada 100 cm na horizontal, o telhado sobe 20 cm na vertical.

Figura 22 – Vila residencial na fazenda Nossa Senhora do Carmo



Fonte: GOOGLE EARTH, 2022.

3.2 Demanda diária de energia da comunidade

A unidade deve atender uma comunidade idealizada com 8 residências comuns, cada uma com 4 habitantes, totalizando 32 pessoas. Além das residências e espaços comuns, é necessário o fornecimento de iluminação para as áreas em torno das residências e entrada da comunidade.

Para o projeto da unidade é necessário mensurar a quantidade de energia para suprir as demandas da vila. Assim, considera-se o uso diário de eletrodomésticos básicos para a integração e bem-estar da comunidade, bem como uma parcela de aparelhos de uso facultativo, como carregadores de celulares, liquidificador ou outros maquinários utilizados conforme necessidade (Tabela 2). Na Tabela 3 observa-se a quantidade de energia consumida na área de convivência.

A quantidade de energia transformada, conforme uma unidade de tempo é denominada potência, cujo valor é levantado como fonte de dado para determinar o consumo de energia que será necessária para executar a ação do determinado

eletrodoméstico, sendo gerado assim o valor do consumo de energia, que pode ser calculado conforme a equação 1:

$$C (kWh) = \frac{P}{1000} * t \quad (1)$$

Onde: C é o consumo (KWh), P é a potência (W), t o tempo (h).

Assim, usando as tabelas (Tabela 2; Tabela 3) que consideram o consumo diário de energia necessário para atendimento à comunidade, conforme necessidade e disponibilização dos eletrodomésticos nas residências, calcula-se a demanda de eletricidade.

Tabela 2 – Demanda mensal de energia – Residências

Eletrodomésticos	Potência (W)	Quant	Potência total (W)	Tempo de uso (h)	Demanda (kWh)
Chuveiro 127V	4400	2	8800	0,5	4,4
Computador	250	1	250	2	0,5
Geladeira Duplex	300	1	300	24	7,2
Lâmpadas Fluorescente	40	10	400	6	2,4
Máquina de lavar roupas	1500	1	1500	0,5	0,75
Micro-ondas	900	1	900	0,5	0,45
Televisores	200	2	400	1	0,4
Outros	500	1	500	2	1
Total (kWh)					17,1

Fonte: Adaptado (CEMIG, 2012).

Tabela 3 – Demanda mensal de energia – Área de Convivência

Eletrodomésticos	Potência (W)	Quantidade	Potência total (W)	Tempo de uso (h)	Demanda (kWh)
Freezer horizontal	500	1	500	6	3
Conjunto de som	100	1	100	1	0,1
Projeto	215	1	215	1	0,215
Ventilador	100	6	600	1	0,6
Lâmpadas Fluorescente	40	20	800	4	3,2
Outros	500	1	500	1	0,5
Total (kWh)					7,6

Fonte: Adaptado (CEMIG, 2012).

Sabendo-se que a comunidade possui 8 residências com a mesma distribuição de equipamentos, multiplica-se o valor de consumo mensal de residências pela quantidade delas e soma-se a demanda mensal de energia da área de convivência.

Conforme o manual do CRESESB (2014), o dimensionamento de um sistema fotovoltaico é norteado pelo consumo registrado ou calculado da residência e pela energia recebida do Sol. Dessa forma, a base de cálculo de consumo diário irá considerar um mês composto de 30 dias. Com o total mensal consumido, divide-se pelos dias considerados no mês (30 dias) e encontra-se a demanda diária total de energia. De posse do valor, serão acrescidos 25% por motivos de segurança (Tabela 4).

Tabela 4 – Demanda de energia da comunidade

Número de residências	8	Demanda diária somado (kWh)	144,4
Demanda diária residências (kWh)	136,8	Demanda mensal (kWh)	4.104
Demanda anual (kWh)	49.248	Demanda total diária (kWh)	171
Demanda total mensal (kWh)	5.130	Demanda total anual (kWh)	61.560

Fonte: Adaptado (CEMIG, 2012).

3.3 Dimensionamento do sistema fotovoltaico

3.3.1 Conjunto de dados de radiação solar

O programa SunData foi utilizado para mensurar a irradiação solar diária média anual a fim de fundamentar os dados para dimensionamento do sistema fotovoltaico, uma ferramenta da CRESESB para apoio nos cálculos. A irradiação solar diária permite determinar a melhor posição e inclinação para instalação dos módulos. As informações sobre a irradiação solar diária média anual estão na Tabela 5.

Tabela 5 – Dados de irradiação

		Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² . dia]													
Ângulo	Inclinação	Jan	Fev.	Mar	Abr.	Mai	Jun.	Jul	Ago.	Set	Out	Nov.	Dez	Média	Delta
Plano Horizontal	0° N	5,86	5,92	5,13	4,78	4,2	4,04	4,27	5,18	5,49	5,59	5,28	5,68	5,12	1,88
Ângulo igual a latitude	20° N	5,34	5,66	5,24	5,31	5,05	5,09	5,29	6,03	5,81	5,45	4,89	5,12	5,36	1,15
Maior média anual	20° N	5,34	5,66	5,24	5,31	5,05	5,09	5,29	6,03	5,81	5,45	4,89	5,12	5,36	1,15
Maior mínimo mensal	17° N	5,44	5,73	5,25	5,26	4,95	4,96	5,17	5,94	5,8	5,5	4,97	5,23	5,35	0,9

Fonte: Adaptado (CRESESB, 2022).

O ângulo de inclinação dos módulos é de 17° (maior mínimo mensal) uma vez que delta representa a menor variação da irradiação solar. O valor utilizado para a irradiação será de 4,95 kWh/m².dia, referente ao mês de maio, mesmo tendo baixa irradiação atenderá a demanda (Tabela 5).

Para calcular as estimativas de produção de energia fotovoltaica, é usual ignorar alguns efeitos da irradiância instantânea e trabalhar com as totalidades convertidas em intervalos de horário. A radiação solar varia durante o dia e tem sua maior intensidade ao meio-dia-solar, que é quando o sol está se projetando na direção Norte-Sul, no meridiano local. É nessa hora que o painel gerará o máximo durante o dia.

O número de Horas de Sol Pico ou Horas de Sol Pleno (HSP) é uma grandeza que reflete o número de horas em que a irradiância solar deve permanecer igual a 1

kW/m², de modo que a energia acumulada ao longo do dia seja equivalente à disponibilizada pelo Sol naquele determinado local. O HSP estão compreendidas entre duas e três horas antes e depois do meio-dia-solar (PINHO & GALDINO, 2014). A partir da equação (2) é possível encontrar o valor de HSP.

$$HSP = \frac{\text{irradiância do local (kWh/m}^2\text{)}}{1 \text{ (kW/m}^2\text{)}} \quad (2)$$

O consumo médio diário de energia é de 171 kWh/dia (Tabela 4). A partir da equação (3) é possível calcular a potência de pico dos painéis fotovoltaicos (P_{FV}), em kWp (quilo Watt-pico).

$$P_{FV} = \frac{\frac{E}{Td}}{HPS} \quad (3)$$

Conforme a equação tem-se que E (kWh/dia) como sendo o consumo diário médio anual da vila, TD (adimensional) a taxa de desempenho e HPS (h) a média diária anual das horas de sol pico incidentes no painel fotovoltaico. A taxa de desempenho merece destaque pois essa variável interfere diretamente no desempenho do sistema fotovoltaico, sendo definida pela relação entre o desempenho real do sistema sobre o desempenho máximo teórico. Além disso, esta taxa leva em consideração a potência real do sistema sob as mais diversas condições de operação e perdas energéticas. Um estudo de 527 sistemas fotovoltaicos conectados à rede, maioria instalados na Alemanha, apresentou um TD médio entre 70 e 80% nos anos entre 2001 e 2005 (PINHO & GALDINO, 2014).

Com base no conceito teórico apresentado e calculado 4,95 horas de sol pleno e a taxa de desempenho será uma estimativa de 80%, pois de acordo com Pinho e Galdino (2014) para sistemas fotovoltaicos residenciais conectados à rede instalados no Brasil, quando bem ventilados e não sombreados, possuem uma TD entre 70 e 80%.

3.3.2 Caracterização do módulo fotovoltaico

Foi realizado uma seleção de 3 módulos fotovoltaicos distintos com intuito de escolher o que melhor atenderá a necessidade local. As marcas escolhidas são comercializadas no mercado nacional. Na Tabela 6 são descreve-se os módulos e suas características.

Tabela 6 – Módulos fotovoltaicos

Especificações	Painel Solar Fotovoltaico 335PHK-36	Painel Solar Fotovoltaico ODA465-36V-MH	Painel Solar Fotovoltaico ODA550-36V-MH
Marca	BYD	OSDA	OSDA
Potência (Wp)	335	465	550
Eficiência (%)	16,95	21,30	21,30
Tecnologia	Silício Policristalino	Silício Monocristalino	Silício Monocristalino
Preço (R\$)	799,00	1049,00	1389,00
Área (m ²)	1,98	2,19	2,58

Fonte: Adaptado (NEOSOLAR, 2022)

Para a escolha do melhor painel foi usado um indicador denominado “i”, calculado a partir da Equação 4. Quanto menor este indicador for, mais viável será a escolha ao determinado painel.

$$i = \frac{\text{Preço}}{(\text{Potência} * \text{Eficiência})}$$

(4)

3.3.3 Dimensionamento do sistema fotovoltaico

Alguns parâmetros são levados em considerações no dimensionamento do sistema fotovoltaico. Tais parâmetros são: consumo médio mensal, irradiação solar média mensal, especificação dos módulos fotovoltaicos e inversores, disposição do arranjo do sistema e possíveis perdas.

Após a escolha do módulo fotovoltaico, baseado no indicador “i” e na potência fotovoltaica de pico (43,2 kWp), determinou-se a potência necessária e a quantidade de painéis. Para se conhecer o número de módulos, é necessário, primeiramente, determinar o modelo que será usado, pois cada um pode variar sua potência. A equação 5 determina a quantidade de painéis.

$$n_{mód} = \frac{P_{fv}}{P_{Nfv}} \quad (5)$$

No qual $n_{mód}$ é a quantidade de módulos, P_{fv} é a potência fotovoltaica de pico (kWp) e P_{Nfv} é a potência nominal do painel a STC (Wp).

De posse do total de módulos, atualiza a potência fotovoltaica de pico do sistema (Equação 5).

$$P_{fv} = n_{mód} * P_{Nfv}$$

A Equação 6 mostra o cálculo da área necessária para o dimensionamento.

$$A_t = n_{mód} * A_{mód} \quad (6)$$

Onde A_t (m²) é a área total necessária para instalação do projeto; $n_{mód}$ é a quantidade de módulos e $A_{mód}$ (m²) é a área do módulo.

Pelo teorema de Pitágoras (Equação 7) calcula-se a área total disponível para instalação do sistema fotovoltaico e a inclinação do telhado (Equação 8) (Figura 23).

$$h^2 = ca^2 + co^2 \quad (7)$$

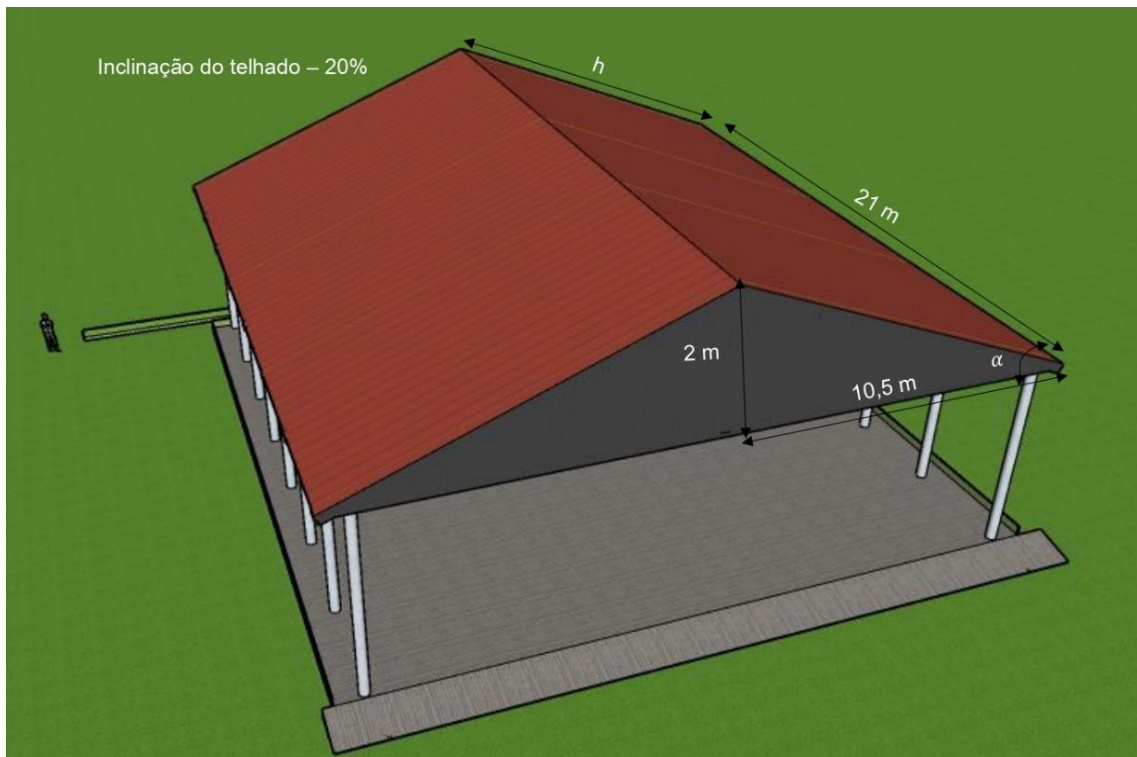
Onde h é a hipotenusa (m), ca é o cateto adjacente (comprimento em m) e co o cateto oposto (altura em m).

$$\alpha = \arctg \frac{co}{ca} \quad (8)$$

No qual α é o ângulo de inclinação do telhado, ca é o cateto adjacente (comprimento em m) e co o cateto oposto (altura em m).

Considerou-se um beiral de 50 cm (ENGENHARIA, 2022).

Figura 23 – Área de aproveitamento do telhado do centro de convivência.



Fonte: Próprio autor.

3.3.4 Número máximo de módulos por inversor

Para escolha do inversor, calcula-se a potência mínima utilizando a equação 9.

$$P_{inv} = P_{mód} * n_{mód} \quad (9)$$

Onde P_{inv} (W) é a potência do inverso; $P_{mód}$ (W) é a potência da placa e $n_{mód}$ é a quantidade de placas.

Foram escolhidos os inversores solares da Intelbras: trifásico On Grid EGT 33000 MAX e inversor solar trifásico On Grid G2 EGT 40000 MAX G2. Para análise do inversor, inicialmente é calculado o fator de dimensionamento do inversor (FDI), que é a relação da potência do gerador fotovoltaico e a potência do inversor.

O FDI indica qual capacidade o inversor opera sobre a potência fotovoltaica. A faixa de potência ideal é entre 75% e 120% da potência nominal do gerador solar, logo, o FDI deve ser entre 0,75 e 1,2 para que não leve o sistema a perder potência, seja por subdimensionamento ou por sobredimensionamento do inversor. A equação 10 é utilizada para escolha do inversor.

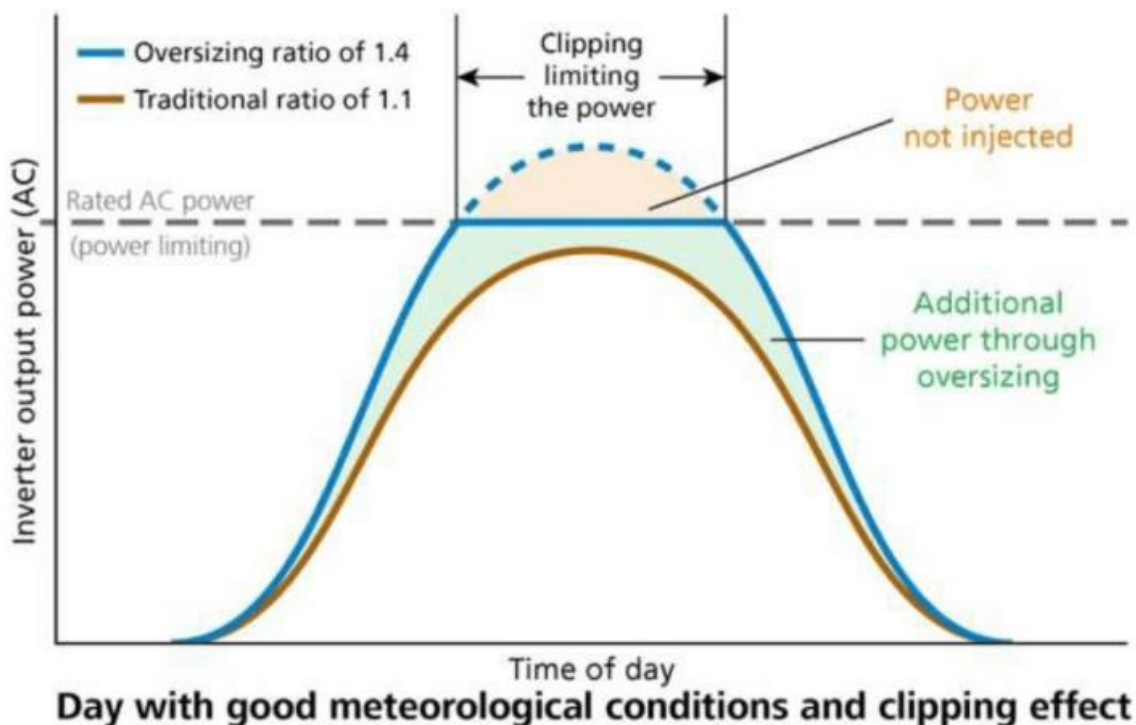
$$FDI = \frac{P_{inv}}{P_{sis}} \quad (10)$$

Para calcular o número máximo de módulos por inversor alguns fatores devem ser considerados, e esses fatores são encontrados na ficha de dados de ambos.

O FDI representa a relação da potência máxima de saída do inversor em relação à potência das placas fotovoltaicas. Uma instalação com uma potência de módulos fotovoltaicos (W_p) maior do que a potência nominal do inversor é denominada *oversizing*, sobrecarregamento, ou até sobrecarga são algumas das nomenclaturas utilizadas. O aumento da relação entre potência de módulos e a potência do inversor (ou a consequente redução do FDI) expõe os inversores solares a um conjunto de módulos fotovoltaicos cuja potência e cuja corrente de curto-circuito são maiores do que aquelas que o inversor teoricamente suportaria. Dependendo da intensidade do *oversizing* ocorrerá o *clipping*, que nada mais é do que a limitação de potência imposta pelo inversor aos módulos fotovoltaicos (PINHO E GALDINO, 2014).

A potência de geração fica limitada à potência máxima do inversor e a curva de potência x tempo (na saída do inversor) fica grampeada ou achatada. Esse efeito limitador de potência (*clipping*) nos inversores ocorre com maior probabilidade e durante períodos mais longos quanto maior o *oversizing*, conforme Figura 24.

Figura 24 – *Oversizing*: Sem limitação de potência (laranja) x Clipping (azul).



Fonte: (SOLAR, 2022)

Como podemos perceber, a curva de potência de um sistema fotovoltaico apresenta no eixo X o tempo (horas) enquanto no eixo Y temos a potência do sistema. No caso sem *oversizing* (curva em laranja), nos horários com maior irradiância solar o inversor entrega a potência máxima dos módulos fotovoltaicos.

A situação com *oversizing* (curva azul), quando a potência de pico dos módulos fotovoltaicos é superior à potência de entrada do inversor. Observa-se que na maior parte do tempo o sistema com *oversizing* entrega mais potência em comparação com o primeiro caso. Isso representa uma maior geração de energia ao longo do dia, incluindo manhãs e finais de tarde.

Os módulos fotovoltaicos podem ser ligados em série e paralelo para formar um arranjo ou estrutura fotovoltaica. Quando os painéis estão ligados em série (*string*, do inglês fila ou linha), as tensões são somadas e a corrente que circula na *string* é a mesma.

Os painéis solares funcionam melhor em temperaturas mais frias do que em temperaturas quentes. Isso porque, na sua maioria, são feitos de silício e este

material é um semicondutor, e todo semicondutor perde eficiência com o calor. Assim, o módulo aumenta sua tensão de circuito aberto quando está sob temperaturas abaixo da *Standard Test Conditions* (STC). Utilizou-se as tabelas (Tabela 9; Tabela 10) para realizar os cálculos abaixo.

Para se calcular o valor correto, devemos considerar o menor valor de temperatura do ano naquela determinada região, considera-se 10 °C. Deve se calcular a nova tensão de circuito aberto de acordo com a equação 11.

$$V_{ocm\acute{a}x} = V_{oc} + V_{oc} \left[(T - STC) * \frac{T_c V_{oc}}{100} \right] \quad (11)$$

No qual $V_{ocm\acute{a}x}$ (V) é a tensão de circuito aberto corrigida, V_{oc} (V) é a tensão em aberto do módulo, T (°C) é a menor temperatura da região, STC (°C) é a temperatura das condições de teste padrão e $T_c V_{oc}$ (%/°C) é o coeficiente de temperatura de tensão.

Divide-se a tensão máxima de entrada do inversor por $V_{ocm\acute{a}x}$ e o resultado arredondando será o número máximo de módulos suportados por *string* (Equação 12).

$$MódString = \frac{V_{inm\acute{a}x}}{V_{ocm\acute{a}x}} \quad (12)$$

Com o total de módulos por *string*, calcula-se (Equação 13) o valor máximo de painéis do inversor. É necessário considerar nas fórmulas as potências máximas do inversor e do módulo.

$$Mód_{total} = \frac{P_{invm\acute{a}x}}{P_{m\acute{a}x}} \quad (13)$$

No qual $Mód_{total}$ é a quantidade máxima de módulos do inversor, $P_{invm\acute{a}x}$ (V_{oc}) e a potência máxima de entrada do inversor e $P_{m\acute{a}x}$ (V_{oc}) é a potência máxima do módulo fotovoltaico.

3.3.5 Configurações do sistema

A partir da escolha do módulo fotovoltaico e do inversor foi possível traçar a melhor configuração do projeto a ser instalado. O número de painéis que terão de estar em série, foi calculado pela Equação 14. O inversor trabalha em uma faixa de tensão de corrente contínua de 180V a 1000V.

$$n_{série} = \frac{V_{ramos}}{V_{oc}} \quad (14)$$

No qual $n_{série}$ é o número necessários de módulos em série; V_{ramos} é a faixa de tensão de máxima eficiência do inversor e V_{oc} é a tensão em aberto dos módulos fotovoltaicos (V).

Por meio das equações 15 e 16 estima-se a potência do inversor para determinar a quantidade de arranjo em paralelo e daí determinar as possíveis estruturas do projeto.

$$P_{inv} = n_{série} * P_{módulo} \quad (15)$$

Onde P_{inv} é a potência máxima do inversor (Wp), $n_{série}$ é o número necessário de módulos em série e $P_{módulo}$ é a potência máxima dos módulos (W).

$$n_{ramos \ em \ paralelo} = \frac{n_{tmódulos}}{n_{série}} \quad (16)$$

Em que, $n_{ramos \ em \ paralelo}$ é quantidade de módulos e paralelo, $N_{tmódulos}$ é o número total de módulos e $n_{série}$ é o número de módulos em série.

Após as configurações propostas é necessário determinar a quantidade de energia fornecida pelo sistema e sua eficiência. A equação 17 ilustra a energia gerada pelo sistema diariamente e a equação 18 a energia com perdas de eficiência.

$$Ed_{sistema} = A_m * n_m * Id * Ef \quad (17)$$

No qual $E_{d\text{sistema}}$ (kWh) é a energia gerada diariamente, A_m (m²) é a área do módulo, n_m é o número de módulos, I_d (kWh/m².dia) é o índice de radiação e E_f (%) é a eficiência máxima dos módulos.

$$E_{dp} = E_{ds} * E_{f_{inv}} * E_{F_{cj}} * E_{f_{fios}} \quad (18)$$

Em que E_{dp} (kWh) é a perdas de energia diária, E_{ds} (kWh) é a energia total diária, $E_{f_{inv}}$ (%) é a eficiência do inversor, $E_{f_{cj}}$ (%) é a eficiência da caixa de junção, adotando-se 99%, e $E_{f_{fios}}$ é a eficiência dos fios, adota-se 99%.

Os resultados da quantidade de geração com e sem percas, foram tabelados e pode-se escolher o melhor arranjo do sistema.

3.4 Viabilidade econômica do sistema

O custo para aquisição de um sistema fotovoltaico, além do investimento inicial, também inclui custos operacionais e de manutenção e reposição. A análise econômica consiste em avaliar o tempo de retorno do capital investido na construção do sistema fotovoltaico.

Para a análise da viabilidade foi considerado o valor inicial do projeto realizado por um orçamento dos componentes do sistema. De posse dos orçamentos, foram considerados três indicadores financeiros para determinar se o projeto é economicamente viável ou não. Os indicadores calculados foram o VPL, TIR e o *Payback*.

A equação (19) indicado o cálculo do VPL. Com a equação (20) calcula-se o TIR e por fim o indicador *Payback* foi calculado pela equação (21).

$$VPL = -FC_o + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+k)^n} \quad (19)$$

No qual FC_o é o investimento inicial, FC_t o fluxo de caixa do ano n , n o número de anos e k o custo de capital.

$$VPL = -FC_o + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + TIR)^n}$$

(20)

Onde FC_o é o investimento inicial, FC_t o fluxo de caixa do ano n , n o número de anos e TIR a taxa interna de retorno.

$$FC_o = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + k)^n}$$

(21)

Em que FC_o é o investimento inicial, FC_t o fluxo de caixa do ano n , n o número de anos e k o custo de capital.

A tarifa média de energia elétrica no estado de Minas Gerais é de R\$ 0,6653 kWh para B3, que se encaixa em demais classes. Conforme a CEMIG, concessionária responsável pela distribuição no estado, suas taxas aumentam em média 1,28% em relação ao ano anterior (CEMIG, 2022). Devido a pandemia de Covid 19 a taxa Selic está 13,75%. De posse desses valores, calcula-se as variáveis de análise econômica.

As regras para taxação da GD foram desconsideradas nos cálculos devido o dimensionamento do sistema estar no grupo de consumidores com direito adquirido, na qual a cobrança iniciará somente em 1º de janeiro de 2046.

3.5 Análise de emissão de dióxido de carbono

Para o cálculo de estimativa de gás carbônico (CO_2) utilizou-se a ferramenta Idesam. É uma ferramenta que calcula a emissão de CO_2 geradas a partir das principais atividades cotidianas. A calculadora de emissões do Programa Carbono Neutro Idesam (PCN) (Figura 25) foi desenvolvida com base nas guias do GHG Protocol e utilizando fontes de dados e fatores de emissão disponibilizados pelo Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT), CETESB, Eletrobrás e IPCC (IDESAM, 2022).

Figura 25 – Calculadora de CO₂ – IDESAM.

The image shows the IDESAM website's CO2 calculator interface. At the top, there is a navigation bar with the IDESAM logo and links for HOME, O IDESAM, NOTÍCIAS, CONTEÚDO, CARBONO NEUTRO, and CONTATO. Below this is a green banner with the title "Calculadora de CO₂" and a subtitle: "A calculadora disponível no site é somente direcionada para compensação de emissões de períodos fixos." The main content area is divided into four sections for calculating emissions from different activities: 1. "Emissão de CO₂ por consumo de combustível" (highlighted with a red box), which includes a dropdown for "Escolha um veículo", a "Km/Mês" input field, and a "Rotas:" section. 2. "Emissão de CO₂ por viagens aéreas", which includes a "Busca por cidade" section with "Origem" and "Destino" fields, a checked "Ida e volta" option, and a "Quantidade" input field. 3. "Emissão de CO₂ por consumo de energia elétrica" (highlighted with a red box), which includes a dropdown for "Escolha a região", radio buttons for "Km/Mês" and "Valor da conta R\$", and a "Valor da conta R\$" input field. 4. "Emissão de CO₂ por consumo de gás de cozinha", which includes radio buttons for "Botão/Mês" and "Gás encanado m³/Mês", and a "Valor da conta R\$" input field. Each section has a "Adicionar ao cálculo" button. At the bottom, there are four summary cards: "Emissão de CO₂" (with a globe icon), "Compensação (Ano)" (with a tree icon), "Toneladas de Carbono (Ano)" (with a CO₂ icon), and "Quantidade 0 árvores" / "Valor (R\$) 0,00" / "Plantar" (with a tree icon). The "Plantar" button has a subtext: "Você será direcionado ao ProRegisto."

Fonte: (IDESAM, 2022).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados Preliminares

De posse dos dados mensurados no programa SunData para calcular o sistema, utilizou-se a irradiação solar diária para encontrar o número de Horas de Sol Pico ou Horas de Sol Pleno (HSP). O HSP estão compreendidas entre duas e três horas antes e depois do meio-dia-solar.

$$HSP = 4,95 h$$

O consumo médio diário de energia é de 171 kWh/dia e a HSP, além da taxa de desempenho de 80%, calculou-se a potência de pico dos painéis fotovoltaicos (P_{FV}), em kWp (quilo Watt-pico).

$$P_{FV} = 43,2 kWp$$

Após a escolha do módulo fotovoltaico, baseado no indicador “i” e na potência fotovoltaica de pico (43,2 kWp), determinou-se a potência necessária e a quantidade de painéis. Na tabela 7 observa-se a quantidade de módulos e a área necessária para instalação do sistema.

Tabela 7 – Análise dos módulos

$P_{mód}$ (Wp)	$N_{mód}$	$N_{mód}$ corrigido	P_{fv} corrigida (kWp)	Área total
335	129,0	130	43,6	256,9
465	92,9	94	43,7	205,5
550	78,5	80	44,0	206,8

Fonte: Próprio autor.

Na escolha do inversor, calculou-se a potência mínima a fim de conferir se atende a demanda energética.

$$P_{inv} = 43710 W = 43,7 kW$$

Após, calculou-se o FDI, a relação da potência do gerador fotovoltaico e a potência do inversor, na qual encontrou-se os seguintes resultados:

- Inversor solar trifásico On Grid G2 EGT 33000 MAX G2.

$$FDI = \frac{33}{43,7} = 0,88$$

- Inversor solar trifásico On Grid G2 EGT 40000 MAX G2.

$$FDI = \frac{40}{43,7} = 0,73$$

Calculou-se o número máximo de módulos por inversor e os possíveis arranjos e combinações que ambos suportam. Os módulos fotovoltaicos podem ser ligados em série (string) e paralelo para formar um arranjo ou estrutura fotovoltaica. Utilizou-se as Tabelas 9 e 10 para realizar os cálculos de tensão de circuito aberto corrigido máxima ($V_{ocm\acute{a}x}$) e posteriormente o máximo de painéis suportados por strings.

$$V_{ocm\acute{a}x} = 49,90 + 49,90 \left[(10^\circ - 25) * \frac{-0,27}{100} \right]$$

$$V_{ocm\acute{a}x} = 51,92 \text{ V}$$

$$MódString = \frac{1000}{51,92} = 19,3$$

$$MódString = 19$$

Com o total de módulos por *string*, calculou o valor máximo de painéis do inversor.

$$Mód_{total} = \frac{49500}{465} = 106,5$$

$$Mód_{total} = 106$$

A análise dos cálculos é verificada nos dados do inversor. O inversor possui 3 MPPT's com 2 *strings* por MPPT. Como cada *string* suporta 19 módulos, logo a quantidade de painéis no inversor é de 114.

O MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) é um sistema eletrônico lógico, cuja função é rastrear o ponto de maior potência do arranjo fotovoltaico no qual está ligado e de forma constante. Com isso, o equipamento pode obter um aproveitamento melhor da geração solar que incide nas placas fotovoltaicas.

Sempre analisar se a corrente de curto-circuito do módulo é compatível com o inversor.

A partir da escolha do módulo fotovoltaico e do inversor foi possível traçar a melhor configuração do projeto a ser instalado.

- Para inversores de 500V

$$n_{série} = \frac{500}{49,90} = 10$$

- Para inversores de 850V

$$n_{série} = \frac{850}{49,90} = 17$$

Por meio das equações 15 e 16 estimou-se a potência do inversor para determinar a quantidade de arranjo em paralelo e daí determinar as possíveis estruturas do projeto.

4.2 Dimensionamento do sistema fotovoltaico

4.2.1 Painel fotovoltaico

A vila residencial possui uma média mensal de consumo de energia elétrica de 5.631 kWh, conforme Tabela 4. O dimensionamento do projeto deu início com a busca da melhor escolha dos componentes do SFV. A seleção dos painéis fotovoltaicos resultou em painéis comercializados e de fácil acesso em território nacional.

Na Tabela 8, observa-se os resultados do indicador “i” e apresenta o melhor custo-benefício. O resultado desta ferramenta permitiu que houvesse a melhor escolha do módulo fotovoltaico.

Tabela 8 – Cálculo do indicador “i”

Modelo do painel	i
Painel Solar Fotovoltaico 335PHK-36	0,141
Painel Solar Fotovoltaico ODA465-36V-MH	0,106
Painel Solar Fotovoltaico ODA550-36V-MH	0,119

Fonte: Próprio autor.

O painel solar fotovoltaico 335PHK-36 da marca BYD resultou num maior indicador “i”. Apesar de possuir um preço acessível, a potência é baixa o que aumenta o valor do indicador. O painel solar fotovoltaico ODA550-36V-MH apresenta um valor de “i” baixo, mas devido ao alto custo das placas, não torna interessante a escolha desse painel. O modelo que apresentou o menor resultado no indicador “i” foi o painel solar fotovoltaico ODA465-36V-MH, o que foi fundamental na escolha para compor o projeto.

O modelo escolhido Painel Solar Fotovoltaico ODA465-36V-MH possui avaliação do INMETRO e atende todos os quesitos para a comercialização. Suas características técnicas estão descritas na Tabela 9. Conforme Neosolar (2022) o painel é composto por 144 células monocristalinas protegidas por vidro temperado e uma estrutura de alumínio anodizado que já vem com furos para fixação do cabo conector MC4. A placa solar possui 2102 x 1040 x 35 mm de dimensão, pesa 23,50 kg e vem com certificação do INMETRO assegurando alta eficiência, confiabilidade e segurança para instalação.

Tabela 9 – Especificações do painel

Especificações	Valores
Potência do painel	465 Wp
Tolerância	± 3 W
Tensão de Máxima Potência (V_{mp})	42,10 V
Corrente de Máxima Potência (I_{mp})	11,06 A
Tensão em Aberto (V_{oc})	49,90 V
Corrente de Curto-Circuito (I_{sc})	11,78 A
Tensão Máxima do Sistema	1500 V
Eficiência do Módulo	21,30%
Coeficiente de Temperatura da Potência	-0,35 %/°C
Temperatura Nominal da Célula (TNOC/NOCT)	45 ± 2 °C
Coeficiente de Temperatura da Corrente	0,045 %/°C
Coeficiente de Tensão	-0,27%/°C
Dimensões do Painel	2102 x 1040 x 35 mm
Corrente Máxima de Fusível	20 A
Código IP da caixa de proteção	IP 68, 3 diodos
Peso do Módulo	23,50 kg
Número de Células e Tipo	144 Monocristalino

Fonte: Adaptado (NEOSOLAR, 2022).

4.2.2 Inversor

A escolha do inversor para o sistema deve operar com FDI entre 0,75 e 1,2 (PINHO E GALDINO, 2014). No trabalho de Freitas (2021) o inversor escolhido apresenta uma eficiência máxima de 97,9% e FDI de 0,88. Nos estudos de Menezes (2019) os geradores fotovoltaicos apresentaram um resultado no FDI de 1,04. Para Pereira e Gonçalves (2008) os dois inversores estudados na Usina de Tubarão apresentam um FDI de 1,02 e o outro de 0,85.

Com base nas comparações anteriores e nas recomendações de Pinho e Galdino (2014) a escolha do inversor baseou-se no FDI. Os dados calculados indicam que inversor solar trifásico On Grid EGT 33000 MAX teve FDI de 0,88 e o

inversor solar trifásico On Grid G2 EGT 40000 MAX G2 de 0,73. Somente um inversor está dentro do parâmetro. Logo, o escolhido para o projeto é o solar trifásico On Grid G2 EGT 33000 MAX G2. Na tabela 10 encontra-se as especificações do Inversor.

Tabela 10 – Inversor Intelbras trifásico On Grid G2 EGT 33000 MAX G2.

Especificações	Valores
Entrada (CC)	Entrada (CC)
Potência máxima de entrada (P_{max})	49.500 W
Faixa de tensão de entrada (V_{cc})	180 – 1000 V
Tensão máxima de entrada (V_{cc})	1100 V
Tensão de inicialização (V_{cc})	250 V
Tensão nominal de entrada (V_{cc})	600 V
Faixa de tensão MPPT (V_{cc})	180 – 1000 V
Faixa de tensão de máxima eficiência (V_{cc})	500 – 850
Corrente máxima de entrada (CC) por MPPT	26 A
Corrente máxima por <i>string</i> (CC)	A: 13 / 13 A B: 13 /13 A C: 13 / 13 A
Número de rastreadores MPPT	3
Quantidade de Springs por rastreador MPPT	A: 2/ B:2/ C:2
Corrente de curto-circuito máxima por rastreador MPPT	A:32/ B:32/ C:32 A
Saída (CA)	Saída (CA)
Potência máxima de saída	33.000 W
Potência máxima aparente de saída	36.600 W
Tensão nominal de saída	220/380 V_{ca}
Frequência de saída	50/60 Hz
Corrente máxima de saída	55,5 A
Fator de potência	1

continua

Especificações	Valores
Gerais	Gerais
Eficiência MPPT	99,9%
Máxima eficiência	99,8%
Dimensão (L x A x P)	580 x 345 x 230 mm
Peso	31 kg
Conexão	Trifásico

Fonte: Adaptado (INTELBRAS, 2022).

Portanto, o inversor escolhido corresponde a 88% da potência dos painéis fotovoltaicos, ou seja, este inversor estará em *oversizing* ou em sobrecarregamento. Conclui-se que durante a instalação do projeto a potência nominal dos painéis fotovoltaicos será maior que a potência nominal do inversor.

4.2.3 Área

A área total para instalação do sistema fotovoltaico no telhado (Figura 23) é de 225 m².

$$h = \sqrt{2^2 + 10,5^2} = 10,7 \text{ m}$$

$$A_{\text{telhado}} = 10,7 \text{ m} * 21 \text{ m} = 224,7 \text{ m}^2$$

A inclinação do telhado é de 11,3°.

$$\alpha = \arctan \frac{co}{ca} = \arctan \frac{2}{10} = 11,3^\circ$$

$$\alpha = 11,3^\circ$$

Conforme Pinho e Galdino (2014), para máxima geração de energia ao longo do ano, o sistema deve ser instalado igual a latitude do local. Entretanto, pequenas variações na inclinação não resultam em grandes mudanças na energia gerada anualmente e a inclinação do painel fotovoltaico pode estar dentro de 10° em torno da latitude local.

Com base no consumo médio mensal de energia elétrica da vila residencial de 5.130 kWh e um consumo diário calculado (acrescido de 25%) de 171 kWh, dados coletados de irradiação média solar e o fator de eficiência do painel ODA465-36V-MH a área necessária para a instalação da central micro geradora é de 206 m². A área disponível para construção da unidade é de 225 m² e a inclinação de 11°. A fim de gerar economia na estrutura do projeto, a inclinação dos painéis será igual a inclinação do telhado.

Logo, é possível instalar o projeto fotovoltaico sobre o telhado com a face voltado ao norte e Azimute 0°, conforme Figura 26.

Figura 26 – Orientação do módulo direcionada ao norte



Fonte: (SOLMETRIC, 2022)

No sistema fotovoltaico o número de células conectadas em um módulo e seu arranjo, que pode ser série e/ou paralelo, depende da tensão de utilização e da corrente elétrica desejada. Os arranjos dependem das características técnicas do inversor e dos módulos fotovoltaicos utilizados. Considerando duas faixas de tensão

para o inversor trabalhar, uma de 500V e a outra de 850V, que é a faixa de tensão de máxima eficiência para o inversor, o resultado encontrado foi que o sistema fotovoltaico suportará entre 10 e 17 painéis em série. Para determinar o arranjo do sistema é também necessário conhecer quantos painéis estarão em paralelo. Na Tabela 11 estima a potência do inversor para assim, determinar a quantidade de arranjos em paralelo.

Tabela 11 – Configurações do sistema fotovoltaico

Configurações do sistema	Módulos em série	Potência do Inversor (Wp)	Ramos em paralelo		Quantidade de módulos
I	10	4650,0	9,4	9	90
II	11	5115,0	8,5	9	99
III	12	5580,0	7,8	8	96
IV	13	6045,0	7,2	7	91
V	14	6510,0	6,7	7	98
VI	15	6975,0	6,3	6	90
VII	16	7440,0	5,9	6	96
VIII	17	7905,0	5,5	5	85

Fonte: Próprio autor.

Quanto maior o número de módulos em série, maior será a potência do inversor, ou seja, são grandezas proporcionais. O cálculo do número de módulos em série deve respeitar a relação entre os valores de máxima tensão aberta do painel em circuito aberto e a tensão de entrada máxima do inversor (PINHO & GALDINO, 2014). Tanto V_{oc} quando a $V_{i_{máx}}$ é disponibilizada pelos fabricantes dos módulos e inversores.

A relação é dada pela Equação (17) abaixo.

$$n^{\circ} \text{ de módulos} * V_{oc} < V_{i_{máx}}$$

(17)

Onde $n^{\circ} V_{oc}$ é a máxima tensão aberta do painel em circuito aberto e $V_{imáx}$ é a tensão de entrada máxima do inversor.

As Tabelas 8 e 9 indicam V_{oc} é de 49,90V e a $V_{imáx}$ é de 1100V. A relação é de:

$$21 * 49,90 < 1100$$

$$1048 < 1100$$

Utilizando o maior número possível de módulos em série, nota-se que a relação foi respeitada.

Determinado o arranjo e a quantidade de painéis em série, calcula-se a quantidade de energia fornecida pelo sistema sem e com perda (Tabela 12).

Tabela 12 – Energia gerada diariamente pelo sistema.

Configurações do sistema	Quantidade de módulos	Energia gerada pelo sistema (kWh)	Energia com perdas (kWh)
I	90	208,8	204,2
II	99	229,6	224,6
III	96	222,7	217,8
IV	91	211,1	206,5
V	98	227,3	222,3
VI	90	208,8	204,2
VII	96	222,7	217,8
VIII	85	197,2	192,9

Fonte: Próprio autor.

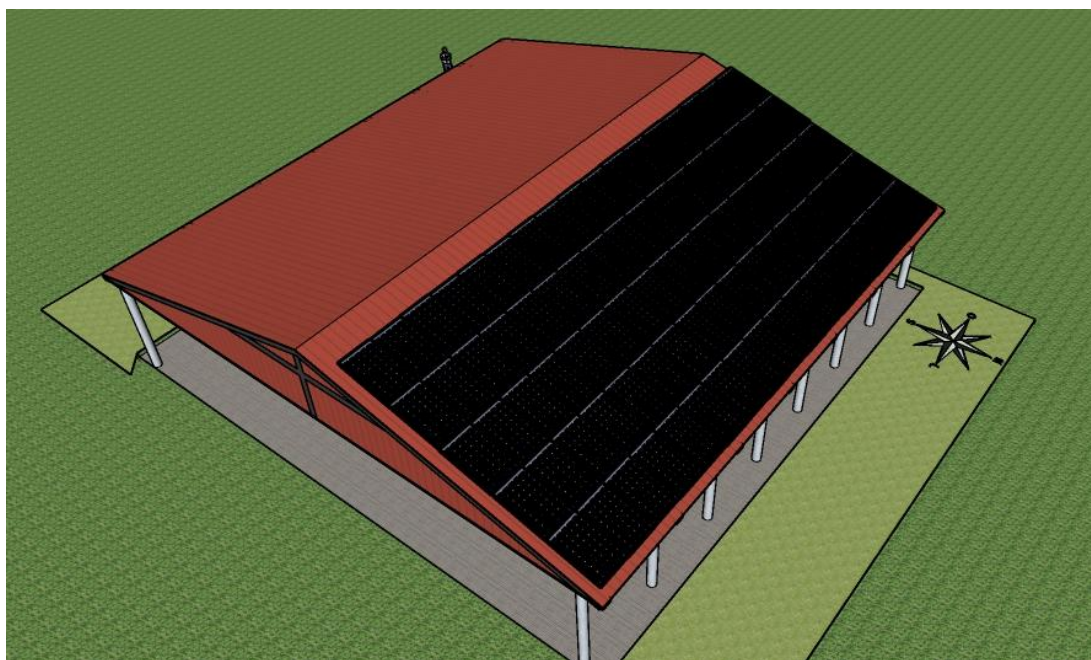
Considerando o valor de consumo diário de 171 kWh pela Vila residencial, todas as configurações produzem energia suficiente para atendimento do projeto. Conforme estabelecido, a área do telhado é de 225 m², com as dimensões de 21 m de comprimento e 10,7 m de largura, a escolha da configuração VIII torna-se ideal, devido a uma configuração com uma quantidade menor de módulos, considerando as 3 entradas MPPT. Logo, a produção de energia diária é de 192,9 kWh.

A inclinação adotada para o sistema é de 11° . As características físicas do local como sombreamento podem ser extremamente prejudiciais à produção energética. Não se considerou sombras devido a localidade e a influência das construções residenciais.

O projeto contém os módulos fotovoltaicos, inversor, *string box* e cabeamentos. A configuração que atende a instalação do sistema fotovoltaico aproveitando a área disponível e economizando com gastos em estruturas é a VIII, onde têm-se 17 módulos série e 5 *strings* em paralelo, gerando com as perdas 192,9 kWh de energia elétrica diariamente, 5.786 kWh mensal e 69.427 kWh anual. A energia excedente poderá ficar armazenada na rede ou ser convertidas em créditos. Por meio da equação 5, calcula-se a nova área necessária para instalação do painel. Logo, a nova área será de 186 m^2 .

Os módulos serão ligados nas entradas no inversor. Outros componentes como um *String Box*, fios e estrutura metálica também irão compor o projeto fotovoltaico. Simula-se o arranjo do sistema fotovoltaico (Figura 27).

Figura 27 – Simulação do arranjo fotovoltaico



Fonte: Próprio autor – Imagem meramente ilustrativa.

O modelo de *string box* escolhido foi da Intelbras ESB 1106 e é composta por dispositivo que atua contra surtos, como descargas atmosféricas e chave de manobra para isolamento do circuito CC (corrente contínua), de modo a permitir a manutenção no sistema. Possui um gabinete plástico com proteção UV, que pode ser embutido ou sobreposto à parede de alvenaria ou madeira, onde será instalado na área de convivência. Possui um Dispositivo de Proteção contra Surtos (DPS), que protege os equipamentos contra descargas atmosféricas. Outro componente do SFV utilizados foram os cabos de fiação que ligam as placas fotovoltaicas ao inversor e a *string box*.

Segundo dados do Balanço Energético Nacional (BEN, 2023) verificou-se um crescimento na oferta interna na geração de energia elétrica de 25,7 TWh (Terawatt-hora) (+3,9%) em relação a 2020. Já a geração solar atingiu 16,8 TWh, o que representou um avanço de 55,9% em relação ao ano anterior. O Ministério de Minas e Energia estima que, no ano de 2050, 18% das residências contarão com o sistema de microgeração de energia solar fotovoltaica.

Melo (2020) estuda a viabilidade da implantação de um sistema gerador fotovoltaico na cobertura das arquibancadas no estádio Aderbal Ramos da Silva, conhecido como estádio da Ressacada, do Avaí Futebol Clube, de Florianópolis (SC). O trabalho indica uma potência necessária de 72 kWp de potência instalada para o sistema gerador, sendo enquadrado como um sistema de microgeração e capaz de produzir 96,1 MWh anualmente e 180 módulos fotovoltaicos de 400 Wp.

É comum a instalação de sistema fotovoltaicos em estádios, como o Stade de Suisse Wankdorf, em Berna, capital da Suíça, que gera 1,13 GWh anualmente. O estádio Kaohsiung (Figura 28), em Taiwan, carrega o título de primeiro do mundo 100% movido a energia solar. O teto é recoberto por 8.844 placas solares.

Figura 28 – Estádio Kaohsiung.

Fonte: (I3E, 2023).

No Brasil, atualmente seis estádios contam com energia solar fotovoltaica para o fornecimento de boa parte da eletricidade consumida ao longo do ano pelos complexos esportivos. Destacam-se o Maracanã e o Mineirão.

O Maracanã, no Rio de Janeiro, a instalação conta com 2.380 m² de painéis fotovoltaicos, num total de 1.552 módulos instalados na borda do anel da cobertura do estádio. O sistema, de cerca de 400 kWp, permite a geração de 500 MWh de energia por ano (MELO, 2020).

Em Minas Gerais, o Estádio Governador Magalhães Pinto, o Mineirão (Figura 29), foi um dos pioneiros na instalação de uma usina solar com potência de 1,42 MWp. São cerca de 6.000 painéis fotovoltaicos e toda a energia gerada é injetada na rede de distribuição da Centrais Elétricas de Minas Gerais (Cemig). A geração de energia elétrica no Mineirão é capaz de suprir cerca de 900 residências anualmente (I3E, 2023).

Figura 29 – Estádio Mineirão painéis fotovoltaicos.



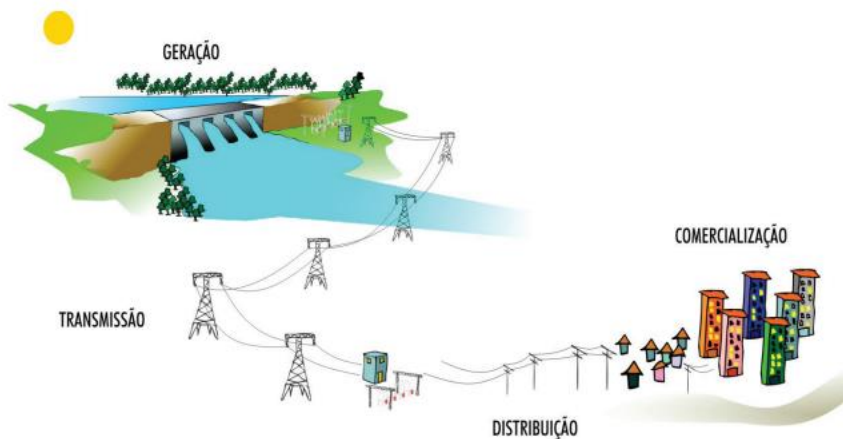
Fonte: (I3E, 2023).

4.3 Estudos de viabilidade econômica

Quanto ao estudo de viabilidade econômica de um projeto de energia solar fotovoltaica pode-se discutir com base em resultados, dados e estudos uma série de fatores, como a economia quanto ao não uso do Sistema Interligado Nacional (SIN) e comparações com opções reais de investimentos utilizando a variável TIR como base.

O transporte da energia desde a usina até a unidade consumidora realiza-se em duas etapas. Primeiramente, a energia vai da geradora até a área da distribuidora pelas linhas de transmissão (Figura 30). Esse custo incide sobre a tarifa da energia elétrica. Depois, a energia vai até as unidades consumidoras mediante o sistema de distribuição.

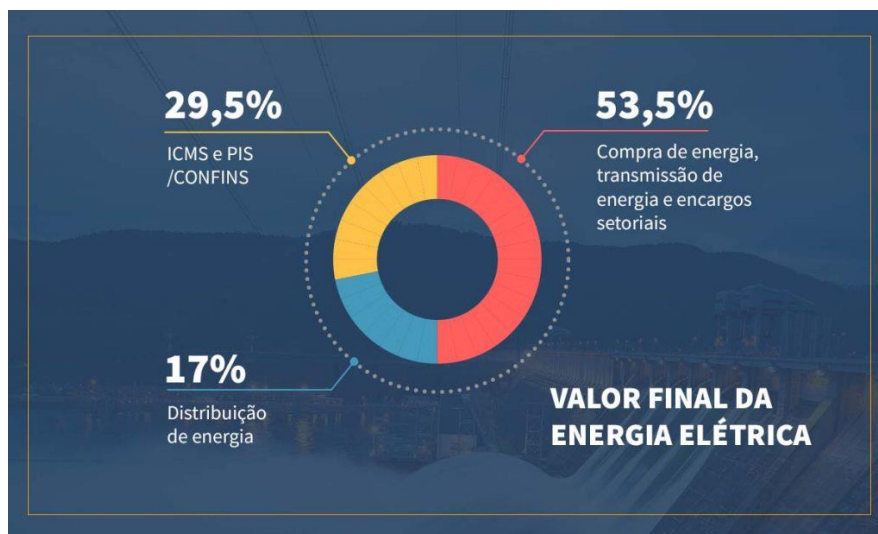
Figura 30 – Ilustração dos sistemas de transporte de energia elétrica.



Fonte: (ECOMENERGIA 2023).

Analisando a Figura 30, percebe-se que a transmissão de eletricidade até a chegada a unidade de consumo, percorre extensos quilômetros de linhas, o que acarreta em perdas elétricas e aumento dos custos para a concessionária. Os custos das linhas de transmissão são todos passados para o consumidor final, custos esses inexistentes quando a opção é o uso de SFV (Figura 31).

Figura 31 – Composição do valor final da tarifa de energia elétrica.



Fonte: (ECOMENERGIA 2023).

Análise realizada pelo EPE (2023), afirma que o SIN investirá cerca de R\$ 119 bilhões, sendo R\$ 78 bilhões em linhas de transmissão e R\$ 41 bilhões em subestações, incluindo as instalações de fronteira, isso equivale a 456.013 km extensão.

Diferentemente de outros métodos de geração de energia elétrica, a energia solar fotovoltaica possui custos de manutenção praticamente nulos sob o aspecto mecânico. Neste estudo, considera-se que os painéis fotovoltaicos terão vida útil de 25 anos. As manutenções à curto prazo se restringe a limpeza dos painéis fotovoltaicos, no orçamento, este custo está descrito como manutenção (Tabela 13). Conforme a inclinação do telhado da área de convivência, a própria chuva fará limpeza do módulo, sendo assim considera-se uma manutenção uma vez ao ano.

Para o estudo de viabilidade técnica do projeto levantou-se o custo total do sistema fotovoltaico. Orçamento está descrito na Tabela 13 com os respectivos valores de mercado. A instalação do SFV precisa ser feita por profissionais qualificados, sendo necessário contratar uma empresa de engenharia de confiança e capacitada neste ramo. A parte de projeto e documentação foram obtidos com uma empresa da região.

Tabela 13 – Orçamento do Sistema Fotovoltaico

Equipamento	Quantidade	Preço	
		Preço	Total
Projeto e documentação	1	R\$ 2.000,00	R\$ 2.000,00
Módulo fotovoltaico	85	R\$ 1.049,00	R\$ 89.165,00
Inversor	1	R\$ 16.889,67	R\$ 16.889,67
<i>String Box</i>	1	R\$ 999,90	R\$ 999,90
Estrutura metálica	85	R\$ 200,00	R\$ 17.000,00
Cabos e conexões	1	R\$ 1.000,00	R\$ 1.000,00
Manutenção	25	R\$ 500,00	R\$ 12.500,00
Total R\$			R\$ 139.554,57

Fonte: Próprio autor.

O dimensionamento fotovoltaico de sistemas ligado à rede (on-grid ou grid-tie) para consumidores do grupo B cujas fornecimento de tensão é inferior a 2,3kV que inclui residências, comércio, pequenas indústrias dentre outros. A vila residencial pertence ao grupo B, grupamento composto de unidades consumidoras com conexão em tensão menor que 2,3 kV no subgrupo B3: demais classes. O sistema possui uma geração trifásica e a cobrança tarifária mínima de consumo é 100 kWh.

Considerando uma vida útil de 25 anos para as placas (SOLAR, 2022), o aumento anual da tarifa de energia elétrica (1,28%) e a taxa Selic de 13,75%, os resultados da análise econômica e o cálculo do primeiro ano, considerando o início em janeiro e o consumo sem o acréscimo de 25% (Tabela 14).

Tabela 14 – Análise econômica.

Consumo Mensal (KW/h)	Tarifa (R\$)	Valor Consumo (R\$)	Bandeira (R\$)	Adicional Bandeira (R\$)	Tarifa Mensal (R\$)	Conta sem energia fotovoltaica (R\$)	Conta com energia fotovoltaica (R\$)	Economia mensal (R\$)
4104,00	0,79	3221,64	14,20	582,77	268,04	4072,79	380,04	3692,75
4104,00	0,79	3242,16	14,20	582,77	269,75	4095,02	381,75	3713,27
4104,00	0,79	3242,16	14,20	582,77	269,75	4095,02	381,75	3713,27
4104,00	0,68	2803,85	1,87	76,91	233,28	3114,39	345,28	2769,11
4104,00	0,65	2680,32	0,00	0,00	223,00	2903,67	335,00	2568,67
4104,00	0,65	2680,32	0,00	0,00	223,00	2903,67	335,00	2568,67
4104,00	0,65	2680,32	0,00	0,00	223,00	2903,67	335,00	2568,67
4104,00	0,65	2680,32	0,00	0,00	223,00	2903,55	335,00	2568,55
4104,00	0,65	2680,32	0,00	0,00	223,00	2903,55	335,00	2568,55
4104,00	0,79	3242,16	14,20	582,77	269,75	4094,90	381,75	3713,15
4104,00	0,79	3242,16	14,20	582,77	269,75	4094,90	381,75	3713,15
4104,00	0,79	3242,16	14,20	582,77	269,75	4094,90	381,75	3713,15
Total						42.180,03	4.309,07	37.870,95

Fonte: Próprio autor.

Os valores de rendimento anual e acumulado durante 25 anos após a instalação do SFV (Tabela 15).

Tabela 15 – Fluxo mensal nos próximos 25 anos.

Fluxo - Considerando economia mensal		
Ano	Total	
		-R\$ 139.554,57
1	R\$ 37.870,95	-R\$ 101.683,62
2	R\$ 38.898,91	-R\$ 62.784,71
3	R\$ 39.944,35	-R\$ 22.840,35
4	R\$ 38.898,91	R\$ 16.058,55
5	R\$ 41.230,44	R\$ 57.289,00
6	R\$ 41.873,49	R\$ 99.162,48
7	R\$ 41.428,80	R\$ 140.591,28
8	R\$ 41.444,16	R\$ 182.035,44
9	R\$ 41.459,52	R\$ 223.494,96
10	R\$ 41.474,88	R\$ 264.969,84
11	R\$ 41.490,24	R\$ 306.460,08
12	R\$ 41.505,60	R\$ 347.965,68
13	R\$ 41.520,96	R\$ 389.486,64
14	R\$ 41.536,32	R\$ 431.022,96
15	R\$ 41.551,68	R\$ 472.574,63
16	R\$ 41.567,04	R\$ 514.141,67
17	R\$ 41.582,40	R\$ 555.724,07
18	R\$ 41.597,76	R\$ 597.321,83
19	R\$ 41.613,12	R\$ 638.934,95
20	R\$ 41.628,48	R\$ 680.563,43
21	R\$ 41.643,84	R\$ 722.207,27
22	R\$ 41.659,20	R\$ 763.866,47
23	R\$ 41.674,56	R\$ 805.541,02
24	R\$ 41.689,92	R\$ 847.230,94
25	R\$ 41.705,28	R\$ 888.936,22

Fonte: Próprio autor.

Os resultados das variáveis econômicas determinam quanto a rentabilidade financeira do projeto. Na Tabela 16 os valores encontrados para o VPL, TIR e o Payback conclui que o SFV é viável.

Tabela 16 – Viabilidade econômica

Viabilidade econômica	
VPL do Projeto	R\$ 282.028,07
Taxa interna de retorno (TIR)	28%
Tempo de Payback	3,59

Fonte: Próprio autor.

O valor do fluxo de caixa foi calculado pelo valor total gerado pelas placas descontado o valor de repasse a Cemig referente a conta da Vila. Mediante a multiplicação entre o valor da tarifa do kWh e a produção de energia no sistema fotovoltaico, já o valor presente descontado foi calculado por meio da subtração entre o valor de geração e o valor da geração com depreciação. Sendo esses valores obtidos, utilizados para calcular o VPL e a TIR do projeto.

Para a VPL ser viável, deve-se atender dois parâmetros. O primeiro é ser positivo e maior que 0. Seguindo este primeiro preceito o VPL calculado, de R\$ 282.028,07, atende ao projeto. O segundo parâmetro é ser um valor relativo ao projeto. O VPL foi cerca de 2 vezes maior que a aplicação inicial. O projeto agrega valor ao consumidor final, pois obedece às duas condições de existência para o VPL.

A aceitação de um projeto por meio da TIR é feita também pela TMA (Taxa Mínima de Atratividade), considerando uma taxa de juros atrativa adicionada ao risco de cada investimento.

A TMA utilizada como base para os cálculos do projeto foi de 13,75%, valor este que representa a média da SELIC do ano de 2022, sendo aplicada no cálculo do valor presente descontado. Dessa forma, o retorno obtido com a geração de energia elétrica pelo sistema fotovoltaico levou à uma TIR de 28%, valor superior a TMA.

O VPL para ser analisado passa por 3 tipos de cenário para ser viável:

1. $TIR > TMA$, O retorno interno é superior à taxa mínima de atratividade, logo o fluxo de caixa é positivo e o VPL é maior que zero, portanto, o investimento é rentável sendo passível de aprovação;
2. $TIR = TMA$, o investimento não é lucrativo, entretanto também não indica prejuízo, já que contempla a TMA, logo, para que haja aprovação do projeto é necessário a análise de outros índices;
3. $TIR < TMA$, a taxa mínima de atratividade é superior que a taxa interna de retorno, logo o investimento terá faturamento negativo, assim o projeto dificilmente será aprovado.

Dessa maneira, o valor calculado da TIR se encaixa no cenário correspondente a $TIR > TMA$ referindo-se à um projeto viável. A taxa de retorno deste investimento o torna viável.

Usualmente utiliza-se a TIR para comprar com outros investimentos como a poupança, CDB, LCI/LCA e títulos do Tesouro Direto. Mediante o resultado do investimento inicial e da rentabilidade gerada ao longo de 25 anos do Projeto Solar Fotovoltaico, comparou-se o resultado a alguns investimentos citados anteriormente (Tabela 17).

Tabela 17 – Simulação de Investimentos.

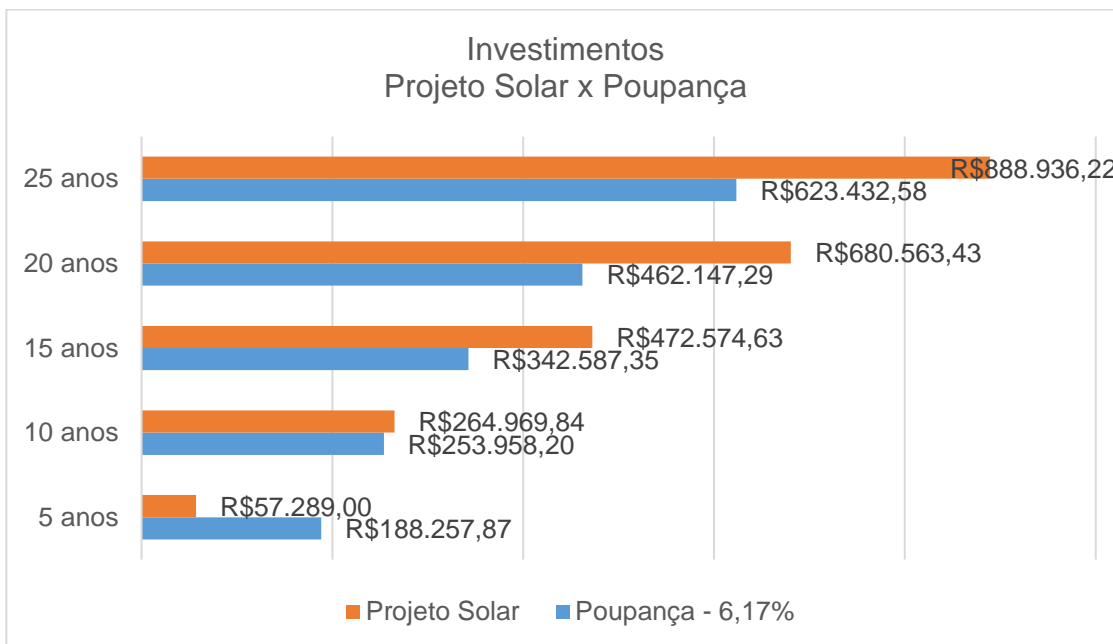
Investimentos	5 anos	10 anos	15 anos	20 anos	25 anos
Tesouro Prefixado - 13,18%	R\$ 220.298,45	R\$ 409.128,64	R\$ 759.815,82	R\$ 1.411.096,71	R\$ 2.620.627,11
Tesouro Prefixado - 10,09%	R\$ 191.823,74	R\$ 310.199,94	R\$ 501.627,19	R\$ 811.185,96	R\$ 1.311.776,30
CDB - 6,65%	R\$ 163.669,32	R\$ 225.824,78	R\$ 311.584,53	R\$ 429.912,61	R\$ 593.177,25
Poupança - 6,17%	R\$ 188.257,87	R\$ 253.958,20	R\$ 342.587,35	R\$ 462.147,29	R\$ 623.432,58
Projeto Solar	R\$ 57.289,00	R\$ 264.969,84	R\$ 472.574,63	R\$ 680.563,43	R\$ 888.936,22

Fonte: Adaptado do (TESOURO, 2023).

Analisando os investimentos, percebe-se que em relação ao tesouro prefixado a rentabilidade é menor, entretanto comparado ao CDB e a Poupança o projeto é viável.

Um dos investimentos mais populares é a poupança devido ao baixo risco de perdas. Conforme busca no site do Tesouro Direto (2023), atualmente a poupança tem rentabilidade bruta de 6,17% ao ano. Comparando os resultados obtidos, compreende-se que investir em energia solar, neste caso é mais viável do que o investimento em poupança fixa (Figura 32). Uma vez que, o total acumulado na poupança durante os 25 anos é inferior que se o SFV fosse instalado na Vila residencial.

Figura 32 – Simulação de investimentos Projeto Solar x Poupança.



Fonte: Adaptado do (TESOURO, 2023).

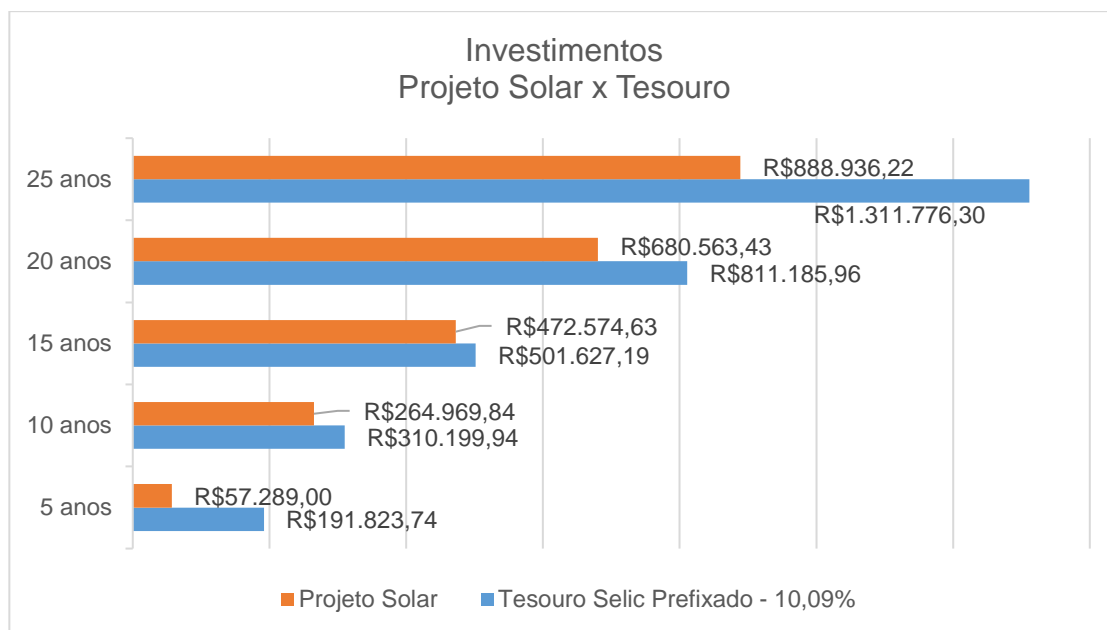
A poupança apresentou um rendimento baixo visto ao capital investido e ao tempo de permanência. Apesar de ser mais atrativo que o CDB (Tabela 17), a rentabilidade da caderneta de poupança é ainda menos vantajosa uma vez que o uso da energia solar apresenta um retorno maior.

O tesouro é um título de dívida emitido pelo governo, seu investimento será feito a partir do empréstimo de seu dinheiro ao poder público. Dessa forma, ele funciona basicamente como um título emitido pelo Tesouro Nacional atrelado à Taxa Selic, que é uma taxa básica de juros, valendo 5,79% ao ano (IBGE, 2023).

O Tesouro Selic, portanto, opera de forma semelhante ao CDB (Certificado de Depósito Bancário), visto que você empresta dinheiro ao governo e recebe juros por essa atividade.

Comparando-se ao Tesouro Direto Prefixado que é considerado um investimento de alta segurança, o projeto não apresenta viabilidade. Na Figura 33, os resultados do título escolhido, o tesouro direto pré-fixado em 10,09% ao ano, apresenta uma rentabilidade líquida de 9,14%. O resultado para esta aplicação, considerando o valor investido no SFV para os 25 anos é de um valor líquido total de R\$ 1.311.776,30.

Figura 33 –Projeto Solar x Tesouro Direto Prefixado.



Fonte: Adaptado do (TESOURO, 2023).

Quando comparado com a poupança e o projeto o tesouro direto é mais vantajoso para este valor de investimento e tempo de retorno. Contudo, como as

rentabilidades estão diretamente ligadas a taxas como Selic e o IPCA e em tempos de crises econômicas a rentabilidade pode ser reduzida.

Apesar do retorno do tesouro ser maior, os motivos para se investir em energia solar são atraentes: grande economia na conta de luz, proteção contra os aumentos de luz, valorização do imóvel, sustentabilidade e o retorno rápido do investimento.

Os sistemas solares agregam valor ao empreendimento e são de caráter sustentáveis. O Sol é uma fonte de energia renovável a possibilidade da transformação da luz do solar em energia, que acontece no interior das células fotovoltaicas de uma placa fotovoltaica, é feita de forma 100% limpa, sem emissão de qualquer poluente. Além disso, na análise da viabilidade financeira do projeto não foram considerados os créditos vendidos da energia excedente a concessionária e possíveis ganhos com a reciclagem dos painéis ao final do tempo de vida útil, isso implicaria em um ganho a mais ao sistema e uma maior lucratividade a Vila.

O tempo de *payback* é de 3 anos e 8 meses. Os outros 21 anos e 4 meses são de lucro para O SFV. Geralmente o tempo de retorno sobre investir em energia solar é em média de 4 a 6 anos. Ou seja, em poucos anos é possível recuperar o valor investido e continuar usufruindo da geração de energia solar.

4.4 Análise das emissões de CO₂

As energias renováveis, também chamadas de energias limpas ou alternativas, são aquelas provenientes da natureza e que se renovam naturalmente em uma escala de tempo humana, além de causarem baixo impacto ambiental. A crescente da energia FV contribui significativamente para a redução de emissões de CO₂. Segundo IRENA (2017), estima-se que a geração de energia FV já reduz globalmente na faixa de 200 a 300 milhões de toneladas anuais de CO₂.

Para o cálculo da estimativa há duas opções de dados de entrada, o consumo de energia elétrica em kWh/mês ou o valor da conta de luz em real brasileiro. Para obter a estimativa da emissão de CO₂ foram utilizados valores médios da conta de luz em uma projeção de 25 anos (Tabela 18).

Tabela 18 – Emissão de CO₂.

Característica	Emissão de CO₂ (t/ano)	Compensação de árvores (ano)
Sem painéis fotovoltaicos	5,814	16
Com painéis fotovoltaicos	0,594	2

Fonte: Adaptado (IDESAM, 2022).

Os valores encontrados referente ao estudo quanto a emissão de CO₂ e a compensação em árvores por ano, foram encontrados a partir de estimativas realizados pelo software usado. Pelos resultados apresentados na tabela 18 percebe-se que a instalação do SFV evitaria a emissão de 5,22 t/ano de CO₂ e o desmatamento de 14 árvores ao ano.

O setor elétrico brasileiro emitiu, em média, apenas 118,5 kg CO₂ para produzir 1 MWh, um índice muito baixo quando se estabelece comparações com países da União Europeia, EUA e China.

Em 2021, o total de emissões antrópicas associadas à matriz energética brasileira atingiu 445,4 milhões de toneladas de dióxido de carbono (Mt CO₂). Em termos de emissões por habitante, cada brasileiro, produzindo e consumindo energia em 2021, emitiu em média 1,9 t CO₂, ou seja, o equivalente a 13% de um americano, 32% de um cidadão da União Europeia e 27% chinês, de acordo com os últimos dados divulgados pela Agência Internacional de Energia (IEA em inglês) para o ano de 2019 (BEN, 2023).

O resultado encontrado indica que o projeto atende a viabilidade ambiental, uma vez que a redução na emissão é cerca de 89,9%. A produção de 1kWh de energia elétrica por meios convencionais consegue emitir cerca de 0,53 kg de CO₂, o uso de energia solar evita que essa quantidade seja emitida para a atmosfera (CUCCHIELLA & D'ADAMO, 2012).

Nos estudos de Freitas (2019) a instalação do sistema produzirá 1,42 kWp o que evita a emissão de 1.331 t de CO₂ e desmatamento de 3 árvores ao ano, resultado satisfatório quanto ao cenário ambiental.

Os resultados encontrados por Araújo (2021) no campus Maracanaú, no Instituto Federal do Ceará, com potência instalada total de 13 kWp e 52 placas fotovoltaicas o total de CO₂ evitado para o meio ambiente foi de 20,07 toneladas em seis anos de funcionamento.

Os resultados encontrados por Queiroz *et. al* (2019) em uma usina fotovoltaica situada na Universidade Federal Rural do Semiárido no estado do Rio Grande do Norte tem uma potência total de 150,8 kWp e foi estimado por evitar um total de 44,19 toneladas de CO₂ para a atmosfera em um período de 3 anos.

Os sistemas solares fotovoltaicos integrados e interligados a rede de distribuição oferecem uma série de vantagens para o sistema elétrico, muitas das quais estão relacionadas a custos evitados e não vêm sendo atualmente consideradas ou quantificadas.

Destacam-se as minimizações nas perdas de energia por transmissão e distribuição, reduz investimentos e perdas em linhas de transmissão e distribuição, a utilização de estruturas como edificações, telhados e estruturas reduzem o impacto na ocupação na necessidade de área física.

Segundo Melo (2020) o estádio de Kaohsiung evita a emissão de 660 toneladas de CO₂ na atmosfera, anualmente. Já o estádio do Maracanã, no Rio de Janeiro evita o despejo de 2.560 toneladas de CO₂ na atmosfera por ano, se comparado com uma usina termoelétrica.

Conforme Dantas *et.al* (2019) em um estudo de caso de uma unidade consumidora com usina fotovoltaica conectada à rede de energia elétrica, localizada no município de Cuiabá-MT, Brasil, inferiu que o nível de emissão da usina operando combinado com o consumo de energia elétrica da concessionária foi de 183,38 kgCO₂ e se a unidade consumidora consumisse apenas energia elétrica da concessionária o nível de emissão seria de 269,89 kgCO₂.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o constante aumento no custo de energia elétrica e a crescente preocupação com os aspectos e impactos ambientais, os sistemas solares fotovoltaicos estão sendo uma alternativa promissora na geração de energia elétrica. O setor residencial é um grande consumidor de energia elétrica e na maior parte dos casos depende do abastecimento de concessionárias.

O estudo de caso deste trabalho, propôs um projeto fotovoltaico conectado à rede para uma vila residencial em uma área rural em Brumadinho. Fundamentado no dimensionamento do SFV, na análise econômica e na projeção de emissão de CO₂ deste projeto, conclui-se que é viável elaboração desta proposta.

O SFV produziria 5.786 kWh mensal e o consumo considerando a expansão é de 5.130 kWh. Como a proposta é para um sistema *on-grid*, a energia não consumida poderia ser transformada em créditos para a vila residencial.

As análises sobre a viabilidade financeira do sistema apontaram que este é um bom investimento. A variável VPL foi aceitável, pois foi diferente de zero e ser em torno de duas vezes maior que o investimento inicial, tornando o projeto atrativo. Importante ressaltar que a VPL é uma variável econômica de grande credibilidade. A Taxa Interna de Retorno foi de 28%, um valor elevado que significa o quão rápido será o retorno do investimento. Por último, o *payback* estimulado foi de 3 anos e 8 meses, tempo parcialmente para curto para a recuperação do valor investido.

Por fim, a média de emissões de CO₂, de 5,22 t/ano é algo significativo que o projeto evitaria em emitir. Em cenários de grandes preocupações, medidas que possuem a capacidade de mitigar impactos ambientais, são de grande valia e precisam de ser incentivadas e implantadas na sociedade.

O tema energia solar é muito amplo e interessante para ser estudado. Atualmente o Brasil vem crescendo no mercado da energia fotovoltaica, com investimentos em pesquisas e redução no valor dos equipamentos. Como sugestão para trabalhos futuros que agregará valor ao tema de geração fotovoltaica e a questão social, listou-se em tópicos:

- explorar os possíveis aspectos e impactos ambientais e a possibilidade de licenciamento ambiental para micro e minigeração;

- análise do ciclo de vida de painéis e propostas de destinação final para módulos fotovoltaicos;
- estudar e buscar caminhos para cidades sustentáveis por meio do uso de energias renováveis;
- estudar a possibilidade de sistemas híbridos de energias renováveis no atendimento de comunidades isoladas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

ANEEL. **Luz na tarifa**. 2023. Disponível: <<https://antigo.aneel.gov.br/luz-na-tarifa>>. Acesso em 03 de abr. 2023.

BORTOLOTO, Valter A. et al. Geração de energia solar on grid e off grid. In: **VI JORNACITEC- Jornada Científica e Tecnológica**. 2017.

BRITO, Sérgio de Salvo. Centro de referência para energia solar e eólica. **CRESESB Informe- Rio de Janeiro**, v. 12, n. 13, p. 3, 2008.

CCEE. **Balanço**. 2022. Disponível: <https://www.ccee.org.br/o/cee/documentos/CCEE_1068101>. Acesso em 03 de abr. de 2023.

CEMIG. (2012). Potência média de aparelhos residenciais e comerciais. Cemig Distribuição S.A.

COLLAÇO, Flávia Mendes de Almeida; BERMANN, Célio. Perspectivas da Gestão de Energia em âmbito municipal no Brasil. *Estudos Avançados*, v. 31, p. 213-235, 2017. <https://www.cemig.com.br/atendimento/valores-de-tarifas-e-servicos/>

CRESESB. 2022. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>>. Acesso em: 25 de maio de 2022.

CUCCHIELLA, Federica; D'ADAMO, Idiano. Estimation of the energetic and environmental impacts of a roof-mounted building-integrated photovoltaic systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 7, p. 5245-5259, 2012.

DE ARAÚJO, Jéssica Santos. ANÁLISE DO SISTEMA DE ENERGIA FOTOVOLTAICA DO INSTITUTO FEDERAL DO CEARÁ–CAMPUS MARACANAÚ E SUA COLABORAÇÃO NA REDUÇÃO DA EMISSÃO DE CO₂. **Conexões-Ciência e Tecnologia**, v. 16, p. 022006, 2022.

DE LIMA DANTAS, Ozlean; APOLONIO, Roberto; JUNIOR, Alcides Arruda. Potencial da geração distribuída e seu impacto na redução de emissões de CO₂: estudo de uma micro usina fotovoltaica conectada à rede de energia elétrica. **Engevista**, v. 21, n. 2, p. 329-340, 2019.

DE OLIVEIRA, Adriano Santhiago. **Alternativas energéticas sustentáveis no Brasil**. Relume Dumará, 2004.

ECOMENERGIA. **Tarifas de energia elétrica**. 2023. Disponível em: <<https://www.ecomenergia.com.br/blog/tarifas-de-energia-eletrica/>>. Acesso em: 30 de jan de 2023.

EDUCATION, Energy. **Types of photovoltaic cells**. Disponível em: <https://energyeducation.ca/encyclopedia/Types_of_photovoltaic_cells>. Acesso em: 05 de abr. de

2023.

ENERGES. **Guia do inversor solar**. 13 de jul. de 2020. Disponível: <<https://energes.com.br/inversor-solar/>> Acesso em: 06 de abr. de 2023.

ENERGIA, Portal. **Vantagens e desvantagens dos painéis solares fotovoltaicos**. 16 de jan. de 2023. <<https://www.portal-energia.com/vantagens-desvantagens-paineis-solares-fotovoltaicos/>>. Acesso em: 04 de abr. de 2023.

ENERGYEDUCATION. **Types of photovoltaic cells. 2022. Disponível em:** <https://energyeducation.ca/encyclopedia/Types_of_photovoltaic_cells>. Acesso em: 17 de jun. de 2022.

ENGENHARIA. **Beiral**. 2022. Disponível em: <<https://www.escolaengenharia.com.br/beiral/>>. Acesso em: 11 de out. de 2022.

EPE. 2023. Disponível em: <[/www.epe.gov.br](https://www.epe.gov.br). Fonte: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-40/PDE2026.pdf>> Acesso em: 30 de jan. de 2023.

EPE. **Matriz energética e elétrica**. 2023. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica#:~:text=Enquanto%20a%20matriz%20energ%C3%A9tica%20representa,a%20gera%C3%A7%C3%A3o%20de%20energia%20el%C3%A9trica.>> Acesso em: 03 de abr. de 2023.

EPE. **Relatório final**. 2023. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-47/topico-85/Relat%C3%B3rio%20Final%20do%20PDE%202023.pdf>> Acesso em: 04 de abr. de 2023.

FREITAS, T. S. (2021). Análise da Geração de Energia Fotovoltaica On-Grid para um Prédio Residencial em um Centro Urbano no estado de Minas Gerais. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto.

GLOBAL. 2022. Disponível em: <<https://globalsolaratlas.info/map?c=-19.923004,-43.945313,11&s=-20.143611,-44.2&m=site>>. Acesso em: 16 de maio de 2022.

I3E. **Energia solar no mundo do futebol**. 2023. Disponível em: <<http://i3e.com.br/energia-solar-no-mundo-do-futebol/>>. Acesso em: 29 de jan. de 2023.

IBGE. **Brumadinho. Panorama**. 2022. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/brumadinho/panorama>>. Acesso em: 11 de out. de 2022.

IDESAM. **Calculadora de Co2**. 2022. Disponível em: <https://idesam.org/calculadora_co2/>

Acesso em: 05 de out. de 2022.

IEA. **Data and statistics**. 2022. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics>>. Acesso em: 01 de ago. de 2022

IEA-PVPS (2016). End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels. International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems, 2016.

INATOMI, Thais Aya Hassan; UDAETA, Miguel Edgar Morales. Análise dos impactos ambientais na produção de energia dentro do planejamento integrado de recursos. **Brasil Japão. Trabalhos**, p. 189-205, 2005.

INTELBRAS. **Inversor solar on-grid trifásico**. 2022. Disponível em: <<https://www.intelbras.com/pt-br/inversor-solar-on-grid-trifasico-40-kw-egt-40000-max-g2>> . Acesso em: 07 de out de 2022.

IRENA. (2017). INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Accelerating the global energy transformation. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

JOTA. (2018). Licenciamento ambiental de projetos de energia solar – Regulamentação e criação de um ambiente favorável. Fonte: JOTA. Licenciamento ambiental de projetos de energia solar – Regulamentação e criação de um ambiente favorável. Disponível em: Licenciamento ambiental de projetos de energia solar - JOTA. Acesso em: 13 dez. 2018

LAGRIMANTE, Danilo Miranda et al. Estudo da aplicação de energia fotovoltaica. **Revista Pesquisa e Ação**, v. 4, n. 1, p. 162-170, 2018.

MELO (2018). Especialista técnico em energia solar fotovoltaica. Brasília: Estúdio Marujo.

MELO (2018). Instalador de sistema fotovoltaicos. Brasília: Estúdio Marujo.

MELO, Felipe Cesar et al. Análise de viabilidade técnica e econômica de um projeto fotovoltaico: Estudo de caso: Estádio Aderbal Ramos da Silva. 2020.

MENEZES, M. D. (2019). Dimensionamento e análise econômica de um sistema fotovoltaico residencial. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande.

MIRANDA, A. B. (2014). Análise de viabilidade econômica de um sistema fotovoltaico conectado à rede. Rio de Janeiro: Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

MME, Ministério de Minas e Energia; EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Plano decenal de expansão de energia**. Brasília. 2014.

NAKABAYASHI, Renny Kunizo. **Microgeração fotovoltaica no Brasil: condições atuais e perspectivas futuras**. 2014. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

NEOSOLAR. 2022. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/loja/>>. Acesso em: 16 de jun. 2022

PATEL, Mukund R.; BEIK, Omid. **Wind and solar power systems: design, analysis, and operation**. CRC press, 2021.

PEREIRA, Osvaldo LS; GONÇALVES, Felipe F. Dimensionamento de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica: estudo de caso do sistema de Tubarão-SC. **Revista Brasileira de Energia**, v. 14, n. 1, p. 25-45, 2008.

PINHO, João Tavares et al. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. **Rio de Janeiro**, v. 1, p. 47-499, 2014.

PORTALSOLAR. **Passo a passo da fabricação do painel solar**. 2022. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/passa-a-passo-da-fabricacao-do-painel-solar.html>>. Acesso em: 20 de jun de 2022.

RIBEIRO, Flávia. **Estudo de caso: implantação de sistema fotovoltaico on-grid em Piquirivaí-Paraná**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

RODRIGUES, Luiz Teixeira. Estudo comparativo de novas tecnologias de geração fotovoltaica. 2017.

ROSS, Stephen A. et al. **Administração financeira**. AMGH Editora, 2015.

RÜTHER, Ricardo. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**. Editora UFSC, 2004.

SOLAR. **Conceito de net metering geração própria de energia e banco de crédito**. 2022. Disponível em: <www.portalsolar.com.br: https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/incentivos-a-energia-solar/conceito-de-net-metering-geracao-propria-de-energia-e-banco-de-creditos.html>. Acesso em: 01 de ago. de 2022.

SOLAR. **Oversizing e clipping nos sistemas fotovoltaicos**. 2022. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/oversizing-e-clipping-nos-sistemas-fotovoltaicos/>>. Acesso em: 10 de jul. de 2022.

SOLAR. **Película ultra fina que capta energia solar**. 2022. Disponível em:

<<https://atacadosolar.com.br/artigo/sun2-pelicula-ultra-fina-que-capta-energia-solar.html>>. Acesso em: 20 de ago. de 2022.

SOLMETRIC. 2022. Disponível em: <<http://tools.solmetric.com/Tools/roofazimuthtool>>. Acesso em: 11 de out. de 2022.

TESOURO. **Simulador**. 2023. Disponível em: <<https://www.tesourodireto.com.br/simulador/>>. Acesso em 31 de jan. de 2023.

YAMASOE, Marcia Akemi; DE PAULA CORRÊA, Marcelo. **Processos radiativos na atmosfera**. Oficina de Textos, 2016