

CENTRO MULTIDISCIPLINAR UFRJ – MACAÉ
INSTITUTO POLITÉCNICO
ENGENHARIA CIVIL

MATHEUS LIMA BARRETO DE SOUZA BARCELLOS

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DE INSTALAÇÃO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO
DE ENERGIA POR PAINÉIS SOLARES EM UMA RESIDÊNCIA FAMILIAR**

MACAÉ

2023

MATHEUS LIMA BARRETO DE SOUZA BARCELLOS

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DE INSTALAÇÃO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO
DE ENERGIA POR PAINÉIS SOLARES EM UMA RESIDÊNCIA FAMILIAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal do Rio de Janeiro, Campus Macaé, como parte dos requisitos necessários à obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. D. Sc. Thiago Gomes de Lima

MACAÉ

2023

CIP - Catalogação na Publicação

B242

Barcellos, Matheus Lima Barreto de Souza

Análise da viabilidade de instalação de um sistema de geração de energia por painéis solares em uma residência familiar / Matheus Lima Barreto de Souza Barcellos - Macaé, 2023.

120 f.

Orientador(a): Thiago Gomes de Lima.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico, Bacharel em Engenharia Civil, 2023.

1. Sistema fotovoltaico. 2. Viabilidade. 3. Energia renovável. 4. Conforto térmico.
I. Lima, Thiago Gomes de, orient. II. Título.

CDD 624



**ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA
UFRJ – MACAÉ**

Aluno: MATHEUS LIMA BARRETO DE SOUZA BARCELLOS DRE: 116020988

**Título: ANÁLISE DA VIABILIDADE DE INSTALAÇÃO DE UM SISTEMA DE
GERAÇÃO DE ENERGIA POR PAINÉIS SOLARES EM UMA RESIDÊNCIA
FAMILIAR**

Orientador: Prof. Dr. Thiago Gomes de Lima

Pareceres: Os membros da Banca Avaliadora, atribui os seguintes resultados ao aluno em questão:

(códigos das opções de resultados: ASR – Aprovado Sem Restrição; ACR – Aprovado Com Restrição; RP – Reprovado)

Nome	Parecer	Assinaturas
Orientador:		
Prof. Dr. Thiago Gomes de Lima	ASR	
Demais membros:		
Profa. Ms. Beatriz Rohden Becker	ASR	
Prof. Dr. Leandro Tomaz Knopp	ASR	
Prof. Ms. Rômulo Bernardo dos Santos	ASR	Rômulo Bernardo dos Santos

Parecer final: Aprovado (por extenso)

Macaé, 17 de Julho de 2023

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DE INSTALAÇÃO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO
DE ENERGIA POR PAINÉIS SOLARES EM UMA RESIDÊNCIA FAMILIAR**

MATHEUS LIMA BARRETO DE SOUZA BARCELLOS

Orientador: D. Sc. Thiago Gomes de Lima,

Aprovada em / /

Orientador: Prof. Thiago Gomes de Lima, D. Sc.

Membro interno – UFRJ Macaé

Membro Interno: Profa. Msc. Beatriz R. Becker

Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) – Campus Macaé

Membro Interno: Prof. Msc. Leandro Tomaz Knopp

Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) – Campus Macaé

Membro Interno: Prof. Msc. Rômulo Bernardo dos Santos

Universidade Federal do Rio de Janeiro (Campus Macaé)

AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar, que nunca deixou faltar nada para mim e minha família.

Aos meus pais, Marcelo de Souza Barcellos e Rossana Lima Barreto de Souza Barcellos, que me criaram com amor e sempre me mostraram o caminho certo. Por todo o esforço financeiro, físico e mental que sempre dedicaram a mim, para que eu pudesse chegar até aqui.

Aos meus irmãos mais presentes, Isadora, Maurício e Ymara, que em diversos momentos durante o curso demonstraram apoio.

A minha namorada Tainá Rebelo e Ribeiro, que ressignificou o amor, tornando-o imprevisível. Pela compreensão e parceria nos últimos meses de formação, trazendo leveza e ânimo a minha vida.

Aos amigos que trilharam esse caminho comigo, dentro e fora do ambiente acadêmico.

Aos professores do Curso de Engenharia Civil da UFRJ Macaé, que trouxeram a mim o conhecimento para que eu pudesse aplicar na vida profissional.

Ao professor e orientador Thiago Gomes, pela paciência, parceria e confiança para que esse trabalho pudesse ser concluído.

Por fim, agradeço a Universidade Federal do Rio de Janeiro, pela estrutura, organização, e a oportunidade de me tornar Engenheiro Civil.

RESUMO

A energia solar fotovoltaica se mostra como uma das grandes alternativas para a substituição das energias não renováveis nos setores industrial e residencial. Sendo assim, no Brasil e no mundo, pesquisadores estudam a otimização da obtenção de energia elétrica pelos módulos solares, em busca da alta eficiência. Este trabalho tem como objetivo analisar a aplicação da energia fotovoltaica em edificações residenciais, através de um estudo de viabilidade técnica, econômica e ambiental. Neste sentido, foi possível dimensionar um sistema para geração necessária integral do caso em questão, obtendo-se os valores de *Payback*, Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), unidos a estimativa de geração de energia pelos modelos matemáticos de cálculo para Potência (V) e Corrente (A) de um sistema ideal, e toda a composição por um processo sustentável, sem que haja a emissão de resíduos e gases poluentes à natureza e a atmosfera. Os resultados encontrados foram em sua totalidade satisfatórios nos âmbitos técnico e econômico e ambiental, pois a implementação do sistema e o seu funcionamento não são danosos ao meio ambiente.

Palavras-chave: Energia renovável; Energia solar; Fotovoltaico; Análise de viabilidade; Geração; Residências.

ABSTRACT

Photovoltaic solar energy is proving to be one of the great alternatives for replacing non-renewable energies in the industrial and residential sectors. Therefore, in Brazil and worldwide, researchers are studying the optimization of obtaining electrical energy through solar modules, in pursuit of high efficiency. This work aims to analyze the physical and financial characteristics of a single-family residence in order to identify the technical, economic, and environmental viability of installing a photovoltaic system for electricity generation. In this context, emphasizing the concepts of Civil, Economic, and Environmental Engineering, it was possible to dimension the system for the integral necessary generation in the case at hand, obtaining values such as Payback, Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), along with energy generation estimates using mathematical calculation models for Voltage (V) and Current (A) of an ideal system, all composed through a sustainable process without emitting waste or polluting gases into nature and the atmosphere. The results obtained were mostly satisfactory in the technical, economic and environmental aspects, as the implementation and operation of the system are not harmful to the environment.

Key-words: Renewable energy; Solar energy; Photovoltaic; Feasibility analysis; Generation; Residences.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estimativa populacional até 2050	13
Figura 2 - Matriz energética mundial em 2020	21
Figura 3 - Matriz elétrica mundial em 2020	22
Figura 4 - Matriz energética nacional em 2021	23
Figura 5 - Matriz elétrica nacional em 2021	24
Figura 6 - Percentual de utilização de fontes renováveis e não renováveis para geração de energia no Brasil e no mundo em 2020	24
Figura 7 - Consumo de energia elétrica por classes	25
Figura 8 - Detalhe do Sistema de uma Turbina Eólica	28
Figura 9 - Sistema de Usina Hidrelétrica	30
Figura 10 - Sistema de barragens	31
Figura 11 - Central Geotérmica	33
Figura 12 - Ciclo Energético da Biomassa	34
Figura 13 - Sistema de painéis solares	35
Figura 14 – Órbita da Terra em torno do Sol, om o seu eixo N-S inclinado a 23, 5°	37
Figura 15 - Ilustração dos ângulos α e as	38
Figura 16 - Coordenadas de orientação da superfície, aw , β e γ	39
Figura 17 – Trajetória dos raios de sol na atmosfera.....	40
Figura 18 – Mapa dos níveis de irradiação solar por região.....	41
Figura 19 - Dados de Espectro Magnético e Energia do Fóton Associado	42
Figura 20 - Efeito fotovoltaico na junção pn.....	43
Figura 21 - Tipos de materiais utilizados na confecção de células FV e suas respectivas Eficiências	44
Figura 22 - Sistema <i>on grid</i>	45
Figura 23 - Sistema <i>off grid</i>	45
Figura 24 - Estrutura de uma célula fotovoltaica e visão frontal de uma célula cristalina de silício.....	46
Figura 25 - Curvas IxV pra a conexão em série de dois dispositivos FV	47
Figura 26 - Curvas IxV pra a conexão em paralelo de dois dispositivos FV	48
Figura 27 - Efeito causado pela variação da intensidade da luz na curva característica IxV para um módulo FV	49
Figura 28 - Efeito causado pela temperatura da célula na curva IxV para 1.000 W/m ² em um módulo FV de silício cristalino	49

Figura 29 - Camadas de uma célula fotovoltaica	51
Figura 30 - Constituição do sistema fotovoltaico <i>off grid</i> conectado à rede elétrica	53
Figura 31 - Constituição do sistema fotovoltaico <i>on grid</i> conectado à rede elétrica	54
Figura 32 - Solução aditiva para instalação de módulos FV	55
Figura 33 - Solução Integrativa para instalação de módulos FV	56
Figura 34 - Consumo médio mensal de energia elétrica do domicílio, em kWh	58
Figura 35 - Consumo por equipamento	59
Figura 36 - Demanda diária média nacional.....	59
Figura 37 - Ângulo azimutal e de inclinação do painel fotovoltaico	60
Figura 38 - Exemplo de estudo de sombreamento	61
Figura 39 - Exemplo de estudo de sombreamento	61
Figura 40 - Ficha técnica módulo RS6E-150P	63
Figura 41 - Ficha técnica do módulo RS6E-155M.....	63
Figura 42 - Ficha técnica do módulo RS6C-280P	64
Figura 43 - Ficha técnica do inversor SUN1600G3	68
Figura 44 - Ficha técnica do inversor ELITE5000	69
Figura 45 - SUN2000G3	70
Figura 46 - Diagrama esquemático do sistema fotovoltaico de 2,8 kWp de Porto União/SC com os módulos conectados em série	71
Figura 47 - Comparação entre geração do sistema e consumo da edificação em colunas	73
Figura 48 - Comparação entre geração do sistema e consumo da edificação em curvas	73
Figura 49 – Dados de valores dos impactos gerados pela produção de um painel Fotovoltaico	75
Figura 50 - Gases emitidos pela geração de energia em termelétrica	76
Figura 51 - Fluxograma das Atividades Desenvolvidas	82
Figura 52 - Vista superior por satélite do objeto em estudo	83
Figura 53 - Fachada principal do objeto de estudo.....	84
Figura 54 - Planta de cobertura	86
Figura 55 - Situação da parte posterior da residência.....	87
Figura 56 - Área útil para instalação dos painéis	87
Figura 57 - Esboço da residência após a instalação dos módulos FV	88
Figura 58 - Estudo do ângulo azimutal.....	89
Figura 59 - Comparativo dos níveis de irradiação média na região	90
Figura 60 - Temperaturas médias, máximas e mínimas no decorrer do ano	90

Figura 61 - Ficha técnica módulo DHM-72X10-550W	92
Figura 62 - Ficha técnica do inversor	94
Figura 63 - Diagrama esquemático do sistema fotovoltaico proposto	96
Figura 64 - Modelagem 3D da residência após a instalação dos painéis FV	97
Figura 65 - Comparação entre a geração mensal de energia elétrica do sistema e o consumo mensal de energia elétrica da residência	99
Figura 66 - Tarifas da concessionária.....	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados dos modelos fotovoltaicos	64
Tabela 2 - Vantagens e desvantagens da geração de energia solar.....	80
Tabela 3 - Consumo médio de energia elétrica mensal	88
Tabela 4 - Irradiação solar diária média	89
Tabela 5 - Dados do modelo DHM-72X10-550W	92
Tabela 6 - Custo final dos módulos	93
Tabela 7 - Resumo das informações	96
Tabela 8 - Energia produzida pelo sistema.....	98
Tabela 9 - Tarifa de energia e custos	100
Tabela 10 - Custos do sistema fotovoltaico.....	101
Tabela 11 - <i>Payback</i> descontado	103
Tabela 12 - Análise do VPL	104
Tabela 13 - TIR do sistema proposto.....	105

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	13
1.2 OBJETIVOS	17
1.2.1 Objetivo geral	17
1.2.2 Objetivo específico	17
1.3 JUSTIFICATIVA	18
1.4 MOTIVAÇÃO PESSOAL	19
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2 REFERENCIAL TEORICO	21
2.1 O CENÁRIO ENERGÉTICO	21
2.2 ENERGIAS RENOVÁVEIS	25
2.2.1 Tipos de Energias Renováveis	27
2.2.1.1 Energia Eólica	27
2.2.1.2 Energia Hidrelétrica	29
2.2.1.3 Energia das Marés	30
2.2.1.4 Energia Geotérmica	32
2.2.1.5 Energia da Biomassa	34
2.2.1.6 Energia Solar	35
2.3 CONCEITOS BÁSICOS DE ENERGIA FOTOVOLTAICA	36
2.3.1 Princípios de Funcionamento de Sistemas Fotovoltaicos	36
2.3.2 Componentes de um Sistema fotovoltaico	44
2.3.2.1 Células Fotovoltaicas	46
2.3.2.2 Outros componentes do painel solar	50
2.3.2.3 Outros componentes do sistema fotovoltaico	51
2.4 APLICAÇÕES DA ENERGIA FOTOVOLTAICA EM RESIDÊNCIAS	54
2.4.1 Indicadores de análise de viabilidade em sistemas fotovoltaicos	56
2.4.1.1 Divisão Técnica	57
2.4.1.2 Divisão Ambiental	74
2.4.1.3 Divisão Econômica	76
2.4.2 Vantagens e desvantagens do sistema fotovoltaico	80
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	82
3.1 CARACTERÍSTICAS DA EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL	83

4 RESULTADOS	85
4.1 ETAPA 1. CARACTERISTICAS DA EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL.....	85
4.1.1 Determinação da área da área disponível para instalação dos Painéis	
Fotovoltaicos.....	85
4.1.2 Determinação da Demanda de Energia Elétrica da Edificação Proposta	88
4.1.3 Estudo Geográfico e Solar da Região de Aplicação.....	89
4.2 ETAPA 2. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO	
ESCOLHIDO.....	90
4.2.1 Determinação do Modelo dos Painéis	90
4.2.2 Dimensionamento do Inversor	94
4.3 ETAPA 3. ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA, ECONÔMICA E AMBIENTAL.	97
4.3.1 Estimativa da Geração de Energia do Sistema Dimensionado.....	97
4.3.2 Análise Técnica Comparativa entre Geração e Consumo	98
4.3.3 Análise Econômica e Retorno do Investimento	99
4.3.4 Análise dos Impactos Ambientais	105
5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	107
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS ENGENHEIROS, PROJETISTAS E	
GESTORES	108
6 CONCLUSÃO.....	110
6.1 GESTORES	110
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	111
REFERENCIASBIBLIOGRAFICAS	112

1 INTRODUÇÃO

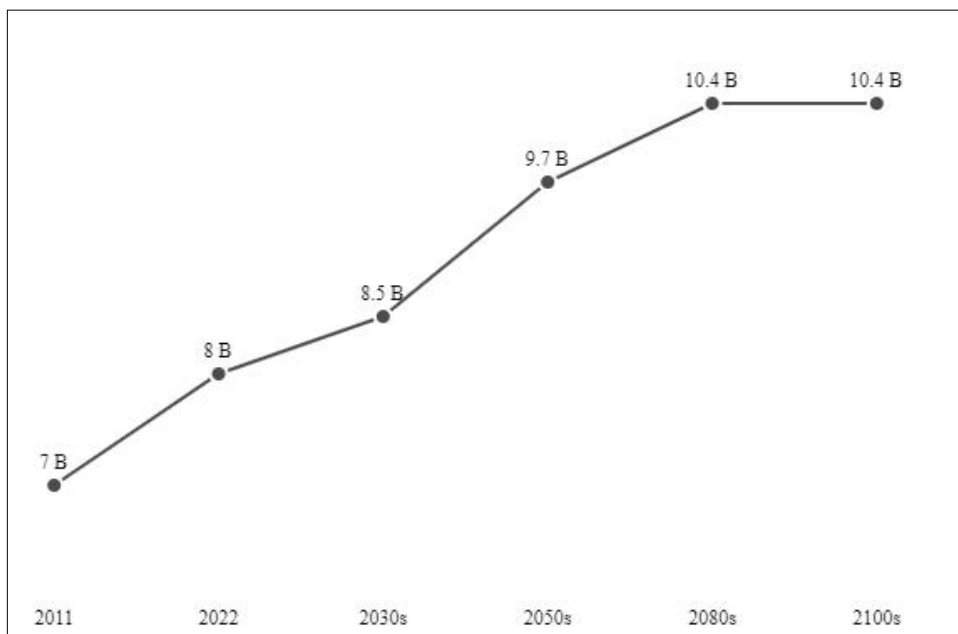
Nesta seção será apresentada a contextualização do tema e sua relevância, os objetivos gerais e específicos, a justificativa, a motivação pessoal e, por fim, a estrutura do presente trabalho.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A matriz energética do mundo é composta por várias fontes primárias, destacando-se o petróleo, gás natural, carvão mineral, urânio e as energias renováveis e/ou sustentáveis, como a energia hidráulica, energia solar, energia eólica, energia geotérmica e muitas outras, como a energia da biomassa. Apesar das opções menos danosas ao meio ambiente, o consumo dos combustíveis fósseis, esgotáveis e poluentes, prevalece sobre os demais (TORRES, 2012).

De acordo com a *United Nations Population Fund* (UNFPA) (2023), a população mundial em bilhões, no ano de 2023, é de 8,045. Destaca-se que nos últimos 70 anos, o número de habitantes do mundo mais que duplicou, visto que em 1950 o número de pessoas chegava a 2 bilhões e 500 mil. A estimativa é que em 2050 a população mundial já atinja a marca dos quase 10 bilhões de pessoas, figura 1.

Figura 1 – Estimativa populacional até 2050



Fonte: UNFPA, 2023.

Devido ao crescimento exponencial da população, os gastos energéticos também aumentam. Assim, para mitigar o problema relacionado a finitude das fontes de origem fósseis, somado a constante preocupação ambiental com a poluição proveniente dos gases de efeito estufa (GEE), como o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O), que causam danos à qualidade de vida da sociedade atual e das futuras gerações, a necessidade das pesquisas na área de fontes de energia renováveis tem crescido (TORRES, 2012).

A energia renovável é cada vez mais importante no mundo, devido à sua capacidade de fornecer energia limpa e sustentável, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e as emissões de gases de efeito estufa. De acordo com a Agência Internacional de Energia (AIE), a energia renovável pode reduzir as emissões globais de CO₂ em 70% até 2050. Segundo o relatório *Renewables 2021* da AIE, a energia renovável agora representa cerca de 90% da capacidade de geração de energia adicionada globalmente em 2020, com custos em declínio e sendo a fonte de energia mais barata em muitas regiões. Assim, a adoção das energias renováveis pode contribuir para geração de empregos, impulsionar o crescimento econômico, fornecer energia para áreas rurais e remotas e mitigar os efeitos das mudanças climáticas (IRENA, 2021).

Em relação ao Brasil, conforme o Ministério de Minas e Energia (MME) (2021), é um dos países mais ricos em recursos naturais do mundo, onde a energia renovável tem uma importância crescente. O país tem grande potencial para o uso de fontes renováveis, como hidrelétrica, eólica, solar e biomassa. De fato, em 2020, a geração de energia renovável representou cerca de 83,5% da capacidade total de geração de energia elétrica no país, Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (2021). A energia eólica e solar fotovoltaica foram responsáveis por quase 10% da capacidade total de geração de energia elétrica no Brasil em 2020, com custos competitivos em relação às fontes de energia convencionais, Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica) (2021). Além disso, o Brasil tem se esforçado para aumentar o uso de biocombustíveis, como o etanol produzido a partir de cana-de-açúcar, que representou 47% do combustível usado em veículos leves no Brasil em 2020 (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS (ANP), 2021).

O estado do Rio de Janeiro reflete a capacidade nacional, tendo grande potencial para a geração de energia renovável, principalmente por meio da energia solar e eólica, Governo do Estado do Rio de Janeiro (2021). Em 2020, a geração de energia renovável no estado representou cerca de 17,5% da capacidade total de geração de energia elétrica, sendo a energia eólica responsável por 10% dessa capacidade, ANEEL (2021). O estado tem um alto custo de energia elétrica e a geração de energia renovável pode ajudar a reduzir esses custos para

empresas e consumidores (FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO (FIRJAN), 2021).

Existem várias fontes de energia renovável, sendo as principais a energia solar, eólica, hidráulica, biomassa e geotérmica, Portal Solar (2023). Cada uma dessas fontes é caracterizada por uma forma específica de obtenção e conversão da energia, podendo ser utilizada em diferentes aplicações. Tratando-se da energia fotovoltaica, no qual o presente trabalho pretende dar ênfase, vale sinalizar que se trata de uma forma de geração de energia elétrica a partir da radiação solar, que é convertida em eletricidade. É uma fonte de energia limpa, renovável e com grande potencial de geração, especialmente em países com alto índice de irradiação solar (PORTAL SOLAR, 2023).

Na energia fotovoltaica adota-se constantemente as placas solares, também conhecidas como painéis solares fotovoltaicos, que são dispositivos que convertem a energia da luz solar em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico. Elas são constituídas por células fotovoltaicas que contêm materiais semicondutores, como o silício, que absorvem os fótons da luz solar e liberam elétrons, gerando uma corrente elétrica contínua. As células fotovoltaicas são geralmente organizadas em módulos e, em seguida, conectadas em série ou em paralelo para gerar a tensão e a corrente elétrica necessárias para alimentar um dispositivo elétrico ou para serem injetadas na rede elétrica (PORTAL SOLAR, 2023).

Sabe-se que a geração de energia fotovoltaica é influenciada por vários fatores, como a intensidade e a direção da luz solar, a temperatura, a umidade e a qualidade dos componentes da célula fotovoltaica. Para maximizar a eficiência do sistema, é necessário instalar as placas solares em locais com boa exposição solar e com um ângulo adequado em relação ao sol. Além disso, é importante utilizar materiais de alta qualidade na fabricação das células fotovoltaicas e dos componentes do sistema, além de adotar práticas de manutenção preventiva e corretiva (HCC ENERGIA SOLAR, 2022).

No Brasil, a energia fotovoltaica tem se mostrado uma opção viável para a geração de energia elétrica. Segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a capacidade instalada de energia solar fotovoltaica no país cresceu mais de dez vezes entre 2016 e 2021, atingindo uma capacidade de 14,5 GW em agosto de 2021. A geração distribuída de energia fotovoltaica tem se popularizado em todo o país, com um crescimento médio anual de 130% nos últimos cinco anos, Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (2021). Além disso, o governo brasileiro tem adotado políticas e incentivos para o desenvolvimento da geração de energia fotovoltaica, como o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD), que tem como objetivo as ações de estímulo a geração distribuída,

e o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), com o objetivo de aumentar a participação de fontes renováveis (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2021).

Dada a importância dessa temática, muitos pesquisadores estão direcionando as suas publicações para projetos que adotaram a energia fotovoltaica.

Salamoni, Ruther e Zilles (2009), em seu trabalho intitulado “Uma Oportunidade para o Desenvolvimento da Indústria Fotovoltaica no Brasil: Eletricidade Solar para os Telhados”, que teve como objetivo analisar o potencial da energia solar fotovoltaica para geração de eletricidade em telhados no Brasil, através da análise de estudos de caso. Os pesquisadores consideraram as variáveis clima, o potencial solar e a tarifa de energia elétrica em diferentes regiões brasileiras. Os resultados obtidos indicaram que a geração de eletricidade por meio de sistemas fotovoltaicos em telhados é uma opção viável e atrativa no país, entretanto, destacam a necessidade de políticas públicas que incentivem a adoção da energia solar fotovoltaica no Brasil, bem como o desenvolvimento da indústria fotovoltaica nacional.

Silva, *et al.* (2016) realizou uma análise comparativa entre a energia solar fotovoltaica e a produção de energia convencional em Fortaleza, CE. A metodologia utilizada envolveu o levantamento de dados sobre as condições climáticas, o consumo médio de energia elétrica e o custo da energia em Fortaleza, bem como a simulação de um sistema de energia solar fotovoltaica conectado à rede elétrica. Os resultados indicaram os valores de geração mensal de energia e o tempo de retorno do investimento que a energia solar fotovoltaica apresenta, de acordo com o consumo médio mensal calculado. Como conclusão, os autores destacam que o uso de painéis fotovoltaicos pode ser uma alternativa viável para complementar a matriz energética brasileira e reduzir impactos ambientais. Vale ressaltar que o estudo de caso mostrou que o tempo de retorno do investimento é menor que a durabilidade dos painéis, o que facilita a implantação do sistema.

Nayak *et al.* (2019) abordou em seu trabalho *Photovoltaic solar cell technologies: analysing the state of the art* os avanços tecnológicos na área de células fotovoltaicas (PV) nos últimos 5 anos, com destaque para o progresso em células monocristalinas e multicristalinas, bem como filmes finos policristalinos. Além disso, são analisados os desenvolvimentos recentes em perovskitas de halogeneto de chumbo, calcogenetos sustentáveis, PVs orgânicos e tecnologias de pontos quânticos. O texto também enfatiza a importância do controle da qualidade optoeletrônica dos materiais relevantes para PV e a descoberta de novas propriedades dos materiais. Por fim, os autores compararam os parâmetros das células PV entre tecnologias, avaliando até onde cada tecnologia pode progredir no futuro próximo. A publicação mostrou

em suas conclusões que a transferência de conhecimento entre tecnologias é essencial para o avanço da área de PV, especialmente com o desenvolvimento das perovskitas de halogeneto de metal.

Parida, Iniyam e Goic (2011) em seu artigo *A review of solar photovoltaic Technologies* abordaram a crescente demanda por energia e as preocupações ambientais globais, que estão abrindo oportunidades para o uso de recursos de energia renovável. A tecnologia fotovoltaica é apresentada como uma das melhores maneiras de aproveitar a energia solar, e o artigo revisa essa tecnologia, sua capacidade de geração de energia, os diferentes materiais utilizados para absorver a luz solar e suas aplicações. O artigo também destacou a importância da avaliação de desempenho e confiabilidade, dimensionamento e controle, conexão e distribuição da rede para a tecnologia fotovoltaica. Em resumo, a publicação enfatiza a importância da energia solar como uma fonte de energia renovável e apresenta a tecnologia fotovoltaica como uma solução para aproveitar essa fonte de energia.

Frente a isso, o presente trabalho pretende contribuir para ampliar a base de conhecimentos acerca dos projetos que foram viabilizados adotando a energia fotovoltaica, com ênfase em edificações residenciais.

1.2 OBJETIVOS

Nesta seção serão descritos o objetivo geral, que apresenta a ideia central do trabalho, e os objetivos específicos, que foram detalhados para alcançar o propósito do trabalho.

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho pretende analisar a aplicação da energia fotovoltaica em edificações residenciais, através de um estudo de viabilidade técnica, econômica e ambiental. Para atingir esse objetivo, será adotado um estudo de caso em residências familiares.

1.2.2 Objetivos Específico

- Contextualizar as energias renováveis com ênfase na energia fotovoltaica, com seus respectivos princípios, componentes e aplicações.

- Descrever os indicadores adotados em estudos para análise de viabilidade de sistemas fotovoltaicos, bem como os benefícios e desafios da implementação de sistemas fotovoltaicos em edifícios residenciais.
- Finalmente pretende-se realizar análises técnicas, econômicas e ambientais, com base em um projeto de sistema fotovoltaico para um edifício residencial

1.3 JUSTIFICATIVA

A utilização da energia fotovoltaica em edificações residenciais tem se destacado como uma alternativa promissora para a geração de energia limpa e sustentável. A crescente demanda por energia elétrica, juntamente com a necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa, torna a implantação de sistemas fotovoltaicos em residências uma opção atraente. Segundo dados do Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2023, o setor residencial representa aproximadamente 30% do consumo total de energia elétrica do país, ficando atrás apenas do setor industrial. Portanto, é fundamental explorar e analisar a aplicação da energia fotovoltaica nesse contexto, visando maximizar os benefícios ambientais e econômicos.

Além disso, um estudo específico direcionado a residências é importante devido às particularidades desse tipo de edificação. As residências apresentam características próprias, como padrões de consumo variados ao longo do dia, sazonalidade de demanda e a possibilidade de adaptação das instalações fotovoltaicas aos diferentes tamanhos e perfis de consumo, assim como o ambiente de instalação. Ao investigar a aplicação da energia fotovoltaica em residências, poderemos compreender melhor essas nuances e identificar soluções personalizadas que otimizem o aproveitamento da energia solar ou, até mesmo, verificar a impossibilidade de instalação, explicando o seu motivo.

Destaca-se também a importância econômica desse estudo. A análise da viabilidade financeira da implementação de sistemas fotovoltaicos em residências permitirá avaliar o retorno sobre o investimento em termos de tempo (*payback*) e o impacto nos custos de energia a longo prazo. Com a evolução tecnológica e a redução dos custos dos equipamentos fotovoltaicos, torna-se crucial examinar a atratividade econômica dessa solução para os proprietários de residências, levando em consideração fatores como incentivos fiscais, como por exemplo a isenção de impostos sobre a produção de chips e semicondutores, somando um montante de 600 milhões de reais em 2023; tarifas de energia e potenciais economias proporcionadas pela autogeração de eletricidade.

Salienta-se a relevância ambiental desse estudo. A energia fotovoltaica é uma fonte renovável e não emite gases poluentes durante sua operação, contribuindo para a redução das

emissões de gases de efeito estufa e para a mitigação dos impactos das mudanças climáticas. Ao analisar a aplicação da energia fotovoltaica em residências, poderemos estimar os benefícios ambientais resultantes da substituição de fontes de energia convencionais que, de acordo com a *Climate Watch Data* (2019), desenvolvida pela *World Resources Institute*, representa cerca de 10,9% das emissões de gases de efeito estufa no mundo, e identificar seu potencial para a construção de uma matriz energética mais sustentável.

Em suma, a realização deste trabalho permitirá uma análise aprofundada da aplicação da energia fotovoltaica em residências, por um estudo de caso, considerando suas particularidades, viabilidade econômica e impactos ambientais. Os resultados obtidos poderão embasar a tomada de decisão de proprietários, governos e demais interessados na adoção dessa tecnologia, impulsionando o desenvolvimento sustentável e a transição para um modelo energético mais limpo e eficiente.

1.4 MOTIVAÇÃO PESSOAL

Sou de uma família que respira construção civil, composta por diversos arquitetos, design de interiores, construtores, pedreiros e afins, mas nenhum engenheiro. Na infância, meu pai me levava às obras que era responsável e, a partir dali, tirando fotos com capacete e ferramentas, comecei a lapidar meu gosto pela engenharia civil. Ao ingressar na universidade, participando de palestras e realizando as disciplinas propostas, senti afeição às temáticas de sustentabilidade, economia circular e energias renováveis, todas com foco principal no maior bem da humanidade que hoje, após anos sendo relativamente ignorado, pede socorro: o meio ambiente.

Assim, ao estar próximo de finalizar o meu curso, tive contato com profissionais que trabalham com o estudo e implantação de painéis solares em edifícios comerciais e empresas *Off-Shore*, nas cidades de Macaé e região. Ao mesmo tempo, comecei a me questionar quanto seria vantajoso implementar essa energia renovável na minha própria casa, que hoje demanda muita energia elétrica, principalmente pelos mais de 11 (onze) cachorros que vivem nela.

Por fim, aliado ao meu interesse pela proteção dos ecossistemas naturais, a possibilidade de atuar a favor da mitigação dos danos ao meio ambiente enquanto Engenheiro Civil, e o interesse no ramo de energias renováveis, procurei desenvolver um estudo de viabilidade da implantação de um sistema de geração de energia elétrica por painéis fotovoltaicos na minha própria residência.

1.5 A ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em seis partes. Na primeira parte deste trabalho foi apresentada a Introdução, contemplando a contextualização ao tema, os objetivos, a justificativa e motivação pessoal para o presente estudo. Na segunda parte será apresentado o referencial teórico, envolvendo o cenário energético atual nacional e mundial, as energias renováveis, o funcionamento dos sistemas fotovoltaicos e indicadores para análise de viabilidade. Na terceira parte serão descritos os procedimentos metodológicos. Na quarta parte serão apresentados os resultados das análises técnica, econômica e ambiental com base num estudo de caso. Na quinta parte será apresentada a discussão dos resultados e finalmente o trabalho é concluído.

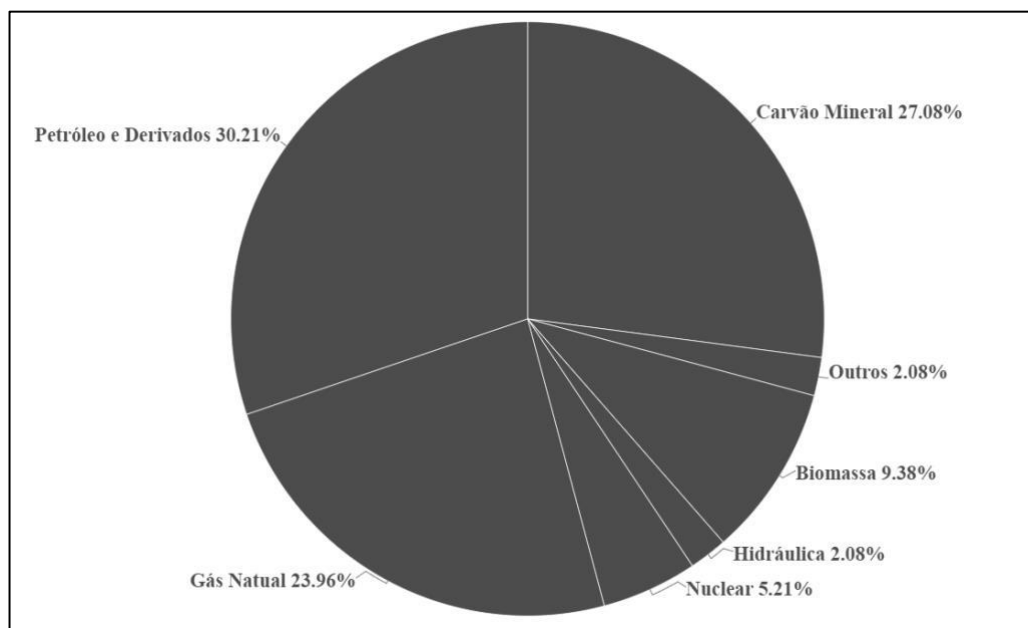
2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção, serão contextualizadas as energias renováveis, o cenário energético atual mundial e nacional, os conceitos básicos da energia fotovoltaica, os indicadores de análise de viabilidade em sistemas fotovoltaicos e, por fim, as vantagens, os benefícios, as desvantagens e os desafios da implementação dos sistemas fotovoltaicos em edifícios residenciais.

2.1 O CENÁRIO ENERGÉTICO

No mundo, os combustíveis fósseis como petróleo, carvão mineral e o gás natural ainda representam a maioria da oferta de energia primária. Em 2020, de acordo com a *International Energy Agency* (IEA), indicado na figura 2, a oferta mundial de petróleo aproxima-se dos 30%, enquanto as energias renováveis biomassa, hidráulica e, assinaladas como “outros” a eólica, solar, entre outras, representam apenas 15%.

Figura 2 – Matriz energética mundial em 2020

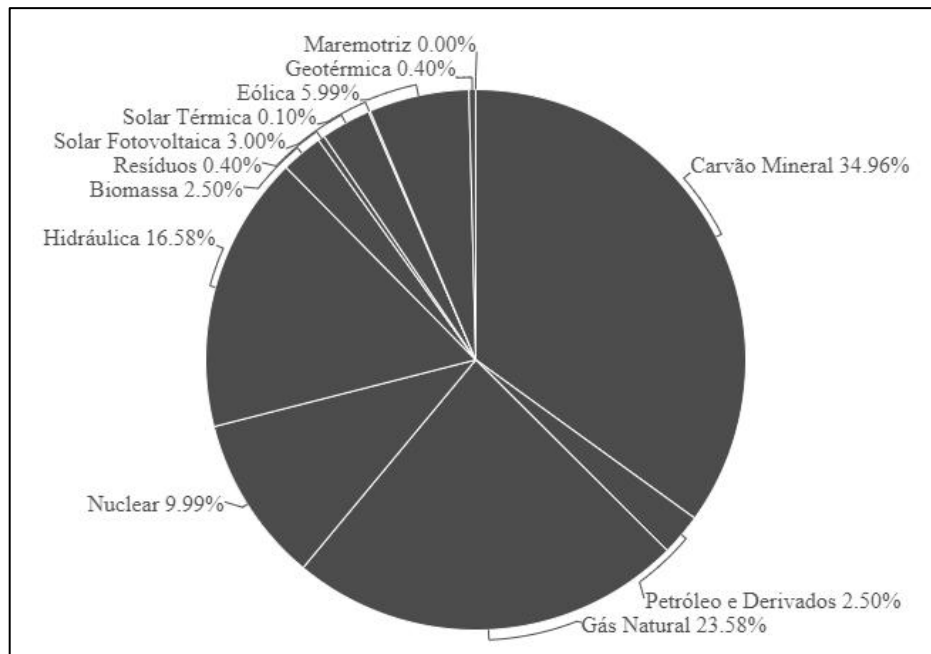


Fonte: IEA, 2022.

A geração total de energia no mundo, em 2020, foi de 585 milhões de TJ, isso equivale a 162.500 TWh. Dessa forma, as fontes não renováveis, que são responsáveis por 85% da matriz energética mundial, representam 138.125 TWh, enquanto as fontes renováveis, que são responsáveis por apenas 15%, representam 24.375 TWh.

A geração de energia elétrica no mundo, em 2020, foi de 27.000 de TWh, sendo o carvão mineral responsável por 35% do total, seguido do gás natural com 23,6%, energia hidráulica com 16,6%, nuclear com 10%, eólica com 6% e solar fotovoltaica com 3%. O petróleo e derivados representam 2,5%, a biomassa, também, enquanto as outras fontes são responsáveis por 0,9%, conforme representado na figura 3 (IEA, 2022).

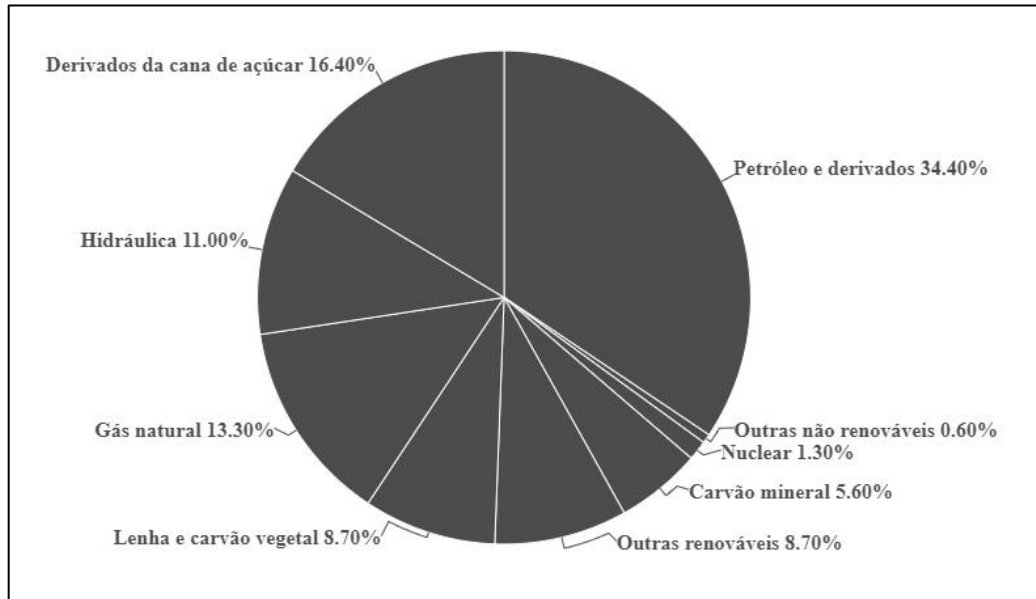
Figura 3 – Matriz elétrica mundial em 2020



Fonte: IEA, 2022.

Segundo a IEA, em um estudo realizado em 2011, a eletricidade representará 23% da demanda total de energia mundial em 2050.

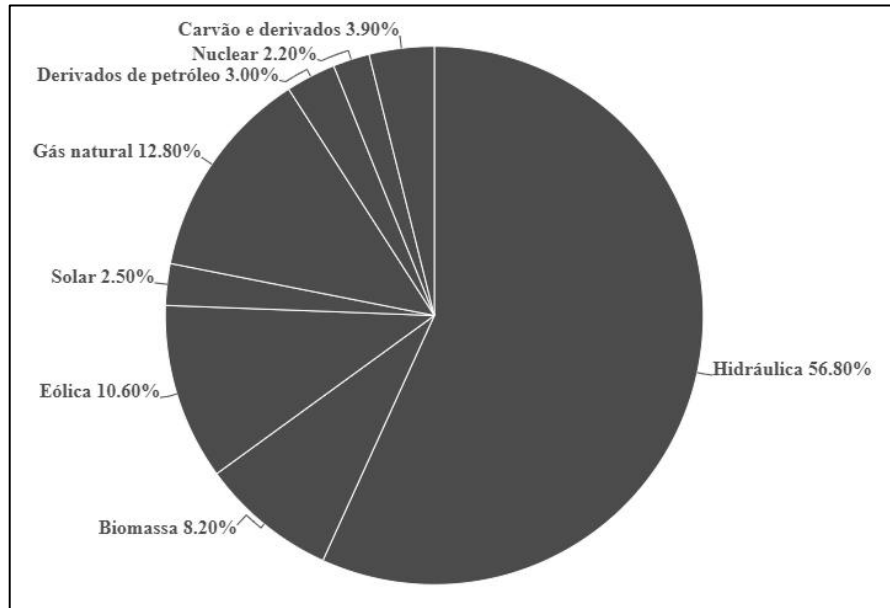
No Brasil, os combustíveis fósseis como petróleo, carvão mineral e o gás natural e outras energias não renováveis ainda representam a maioria da oferta de energia primária. Em 2021, de acordo com a IEA, indicado na figura 4, a oferta nacional de petróleo e derivados é de 34,4%, seguido dos derivados de cana-de-açúcar, renovável, com 16,4% e o gás natural com 13,3%, enquanto as demais energias renováveis hidráulica e assinaladas como “outras renováveis” a eólica, solar, entre outras, representam 19,7%.

Figura 4 – Matriz energética nacional em 2021

Fonte: Balanço Energético Nacional (BEN), 2022.

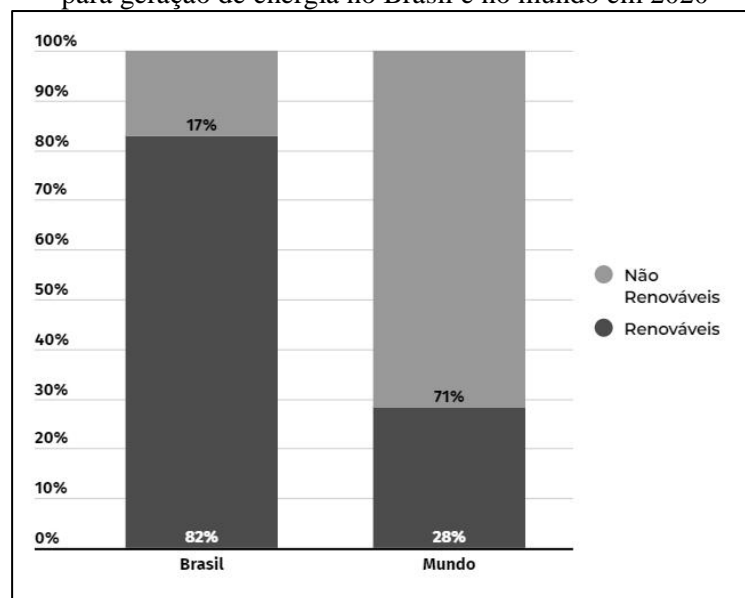
A geração total de energia no Brasil, em 2021, foi de 302 milhões de tep (tonelada-equivalente de petróleo), que é uma unidade de medida utilizada para contabilizar energia de diferentes fontes, isso equivale a 3.512,26 TWh. Dessa forma, as fontes não renováveis, que são responsáveis por 63,9% da matriz energética nacional, representam 2.244,33 TWh, enquanto as fontes renováveis, que são responsáveis por apenas 36,1%, representam 1.267,93 TWh.

A geração de energia elétrica nacional em 2021 foi de 656 de TWh, sendo a energia hidráulica responsável por 56,8% do total, seguido do gás natural com 12,8%, energia eólica com 10,6%, biomassa com 8,2%, carvão e derivados com 3,9%, derivados do petróleo com 3%, solar com 2,5% e por fim, a nuclear com 2,5%, conforme representado na figura 5 (BEN, 2022).

Figura 5 – Matriz elétrica nacional em 2021

Fonte: BEN, 2022.

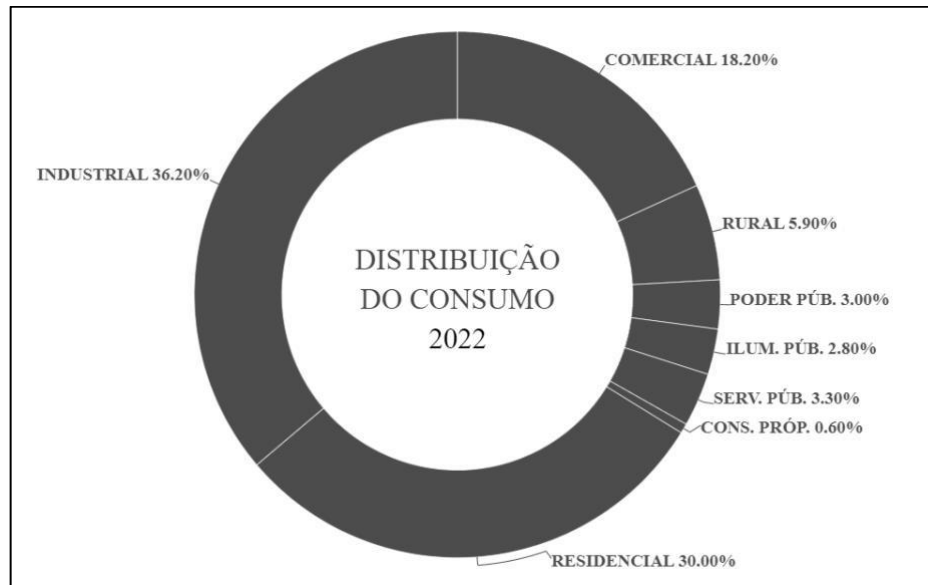
Ao mesmo tempo que o Brasil apresenta grande potencial na produção de combustíveis fósseis, também possui a maior bacia hidrográfica do mundo, o que reflete na produção de energia elétrica proveniente da matriz hidráulica, Torres (2012). A figura 6 compara a utilização de fontes de energia renováveis e não renováveis, para a geração de energia elétrica no Brasil e no mundo em 2020.

Figura 6 – Percentual de utilização de fontes renováveis e não renováveis para geração de energia no Brasil e no mundo em 2020

Fonte: BEN (2022), IEA (2022).

O consumo de energia elétrica pode ser dividido por classes. De acordo com dados do anuário estatístico de energia elétrica de 2023, produzido pela EPE, destacam-se 8 setores, sendo eles, em sequência decrescente: industrial (36,2%), residencial (30%), comercial (18,2%), rural (5,9%), serviço público (3,3%), poder público (3%), iluminação pública (2,8%) e, por fim, consumo próprio (0,6%), figura 7.

Figura 7 – Consumo de energia elétrica por classes



Fonte: EPE, 2023.

O consumo industrial representa mais do que um terço do consumo total dos setores, seguido do setor residencial. As fontes de energia não renováveis são esgotáveis e, por isso, ano após ano, se tornam mais caras e mais escassas. Tendo vista essa perspectiva, a necessidade do uso de energias renováveis é cada ano mais eminente. É de extrema importância a inserção dessas energias dentro desses setores. Para isso, existe uma gama de fontes de energias renováveis que são possíveis para o uso e estão em constante desenvolvimento.

2.2 ENERGIAS RENOVÁVEIS

A sustentabilidade está relacionada com a expressão “desenvolvimento sustentável”, tido como o desenvolvimento que atende às necessidades das gerações atuais e garante condições para que as gerações futuras possam suprimir as próprias necessidades. O conceito em questão começou a ser discutido na década de 70, quando houve a primeira conferência da

ONU em Estocolmo, Suécia. Essa conferência teve como tema o meio ambiente e o desenvolvimento (FLORIANI, 2018 apud SESC, n.d.).

O relatório escrito por Brundtland, em 1987, chamado “Nosso Futuro Comum”, apresentou a definição de desenvolvimento sustentável, na qual ele define como um processo de mudança onde a exploração dos recursos, o direcionamento dos investimentos, a orientação do desenvolvimento tecnológico e a mudança institucional estão em harmonia e devem reforçar o atual e o futuro potencial para satisfazer as aspirações e necessidades humanas (FLORIANI, 2018 apud SENADO, n.d.).

Na década de 90, iniciou-se à discussão quanto a sustentabilidade na construção civil, pois após a Segunda Guerra Mundial, tecnologias que fizessem com que os edifícios começassem a controlar as condições ambientais no seu interior surgiram, como uso de condicionamento ambiental e iluminação artificial. Dessa forma, os edifícios passaram a consumir muito mais energia (GOLÇALVES E DUARTE, 2006).

O conceito de energia remonta aos primórdios da humanidade, quando nossos ancestrais começaram a explorar as fontes disponíveis em seu ambiente para realizar tarefas essenciais, Smil (2017). A descoberta e a utilização do fogo como fonte de calor e luz representaram uma das primeiras manifestações de utilização de energia pelos seres humanos. Ao longo dos séculos, diferentes formas de energia foram identificadas e aproveitadas para impulsionar o desenvolvimento humano.

No entanto, foi a partir do século XIX que a demanda crescente por energia, impulsionada pela Revolução Industrial, trouxe à tona a necessidade de explorar novas fontes para suprir as necessidades da sociedade, Fouquet (2016). O uso intensivo de combustíveis fósseis, como o carvão e o petróleo, tornou-se a principal fonte de energia, impulsionando o progresso industrial, mas também gerando problemas ambientais e de escassez.

Com o reconhecimento dos impactos negativos causados pelas fontes de energia não renováveis, no século XX começaram a surgir discussões e iniciativas em prol do desenvolvimento e da utilização de energias limpas e renováveis, Sovacool (2017). Nesse contexto, a energia renovável emergiu como uma alternativa promissora, capaz de atender às demandas energéticas sem comprometer as futuras gerações.

A energia renovável é uma forma de obtenção de energia proveniente de recursos naturais que são virtualmente inesgotáveis e que se regeneram de forma contínua. Ao contrário das fontes de energia não renováveis, como o petróleo e o carvão, que têm um suprimento finito e contribuem para a emissão de gases de efeito estufa, a energia renovável é considerada

ambientalmente sustentável, IEA (2020). Dessa forma, a energia renovável desempenha um papel crucial na mitigação dos impactos das mudanças climáticas (IPCC, 2018).

A energia renovável não se restringe apenas à geração centralizada em grandes usinas, mas também abrange sistemas de geração distribuída, como painéis solares instalados em residências e edifícios comerciais. A expansão da energia solar fotovoltaica, por exemplo, tem possibilitado que indivíduos e comunidades se tornem produtores de energia, aumentando a autonomia e reduzindo os custos associados ao consumo energético, Jäger-Waldau (2019). Essa descentralização da geração de energia contribui para a democratização do acesso à energia limpa e para a promoção da sustentabilidade em nível local.

A busca por uma matriz energética mais sustentável e a crescente conscientização sobre a importância da energia renovável têm impulsionado investimentos e políticas públicas voltadas para o aumento da participação dessas fontes no mix energético global, IRENA (2020). Governos de diversos países têm estabelecido metas ambiciosas de aumento da participação de energias renováveis em suas matrizes energéticas, buscando alcançar um futuro mais sustentável e resiliente. No entanto, desafios técnicos, econômicos e políticos ainda precisam ser superados para garantir uma transição eficiente e efetiva para uma economia de baixo carbono baseada em energias renováveis, Sovacool (2017). Neste sentido, a evolução tecnológica e os esforços de pesquisa têm permitido o desenvolvimento e a implementação de diversas formas de energia renovável.

2.2.1 Tipos de Energias Renováveis

A energia renovável engloba uma variedade de fontes que oferecem uma alternativa sustentável e ambientalmente amigável às formas tradicionais de geração de energia. Neste tópico, serão apresentadas algumas formas de energias renováveis que são ambientalmente amigáveis às formas tradicionais de geração de energia, entre elas: Energia Eólica, Hidrelétrica, Energia das Marés, Energia Geotérmica e Energia da Biomassa.

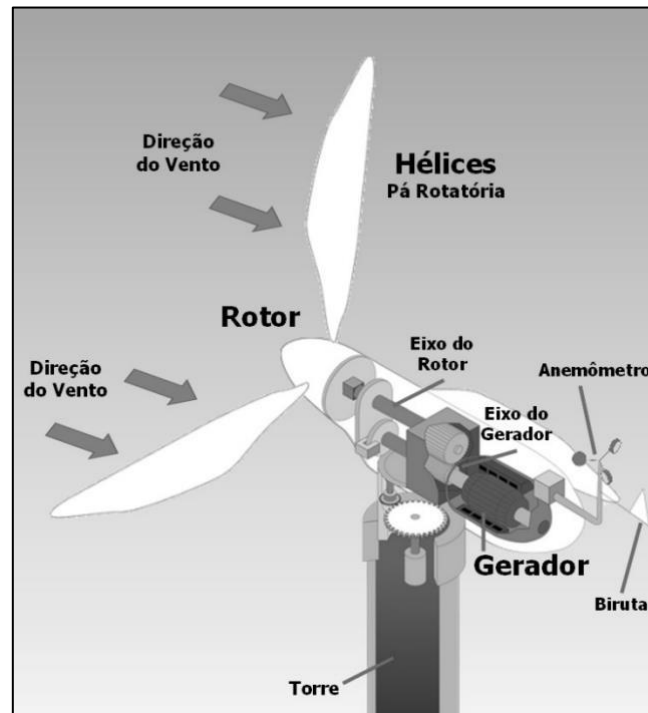
2.2.1.1 Energia Eólica

É a energia produzida a partir da energia cinética do vento, ou seja, das massas de ar em movimento. De acordo com o Ranking do *Wind Energy Council*, o Brasil está em 6º lugar entre os maiores produtores de energia eólica do mundo. De acordo com a Agência Nacional de

Energia Elétrica (ANEEL), o Brasil possui 248 megawatts (MW) de capacidade instalada de energia eólica.

A energia cinética do vento é convertida em energia mecânica por moinhos e cataventos, ou em energia elétrica por turbinas eólicas conforme a figura 8.

Figura 8 – Detalhe do Sistema de uma Turbina Eólica



Fonte: CBIE, 2020.

Além de ser uma energia considerada limpa, uma das principais vantagens da energia eólica é a geração de energia elétrica sem a produção de resíduos. Trata-se de uma fonte de energia considerada inesgotável e sem custos associados a obtenção de matéria prima. Seu custo de implantação é relativamente baixo e a necessidade de manutenção é pequena (DE PAULA, 2019).

Para a energia eólica ser considerada aproveitável sob o ponto de vista técnico, a usina deve ser implantada em um local em que a densidade de massa de ar seja maior ou igual a 500 *watts* por metro quadrado (W/m^2) a uma altura de 50 metros. Além disso, a velocidade do vento precisa atingir de 7 a 8 metros por segundo (m/s) (GRUBB; MEYER, 1993). Assim, uma das críticas a geração por energia eólica se faz a sua intermitência, visto que a força e ocorrência dos ventos em determinado local são parâmetros anuais e sazonais. Segundo a Organização Mundial de Meteorologia (OMM), o vento apresenta velocidade média igual ou superior a 7 m/s, a uma altura de 50 metros, em apenas 13% da superfície terrestre.

No entanto, embora seja benéfica ao meio ambiente, há alguns impactos negativos a serem considerados, como por exemplo na fauna local. Pássaros e morcegos sofrem ferimentos após serem atingidos pelas pás. Causando a mudança nas rotas de fluxos migratórios (VILLEY MIGRANE, 2004).

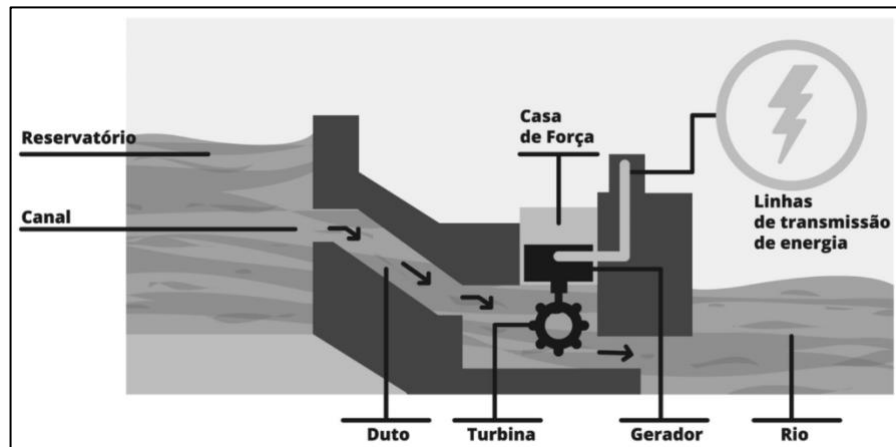
No Brasil, para a instalação da energia eólica, é necessária a realização de Estudos de Impacto Ambiental (IEA) e do Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), para garantir que não haverá danos aos animais, ao meio ambiente e aos moradores do entorno, de acordo com o Código Florestal (Lei nº 4.771/1965), a Lei de Proteção à Fauna (Lei nº 5.197/1967), a Política Nacional de Meio Ambiente (Lei nº 6.938/1981) e a Constituição Federal de 1988.

2.2.1.2 Energia Hidrelétrica

É uma forma de energia renovável que utiliza a força da água em movimento, como rios e quedas d'água, para gerar eletricidade. É uma das principais fontes de energia elétrica no mundo, sendo valorizada por sua capacidade de fornecer energia limpa e sustentável (EKKO GREEN, 2023).

O conceito de energia hidrelétrica baseia-se na conversão da energia cinética da água em energia elétrica. O processo de geração de energia hidrelétrica envolve a construção de barragens, que represam a água formando um reservatório. Quando a água é liberada da barragem, ela flui através de turbinas que acionam geradores elétricos. A força da água em movimento faz com que as pás das turbinas girem, convertendo a energia cinética em energia mecânica. Conforme a representação da figura 9, essa energia mecânica é então transformada em energia elétrica pelos geradores (CAUS E MICHELS, 2014).

Figura 9 – Sistema de Usina Hidrelétrica



Fonte: Wikimedia Commons, 2021.

A energia hidrelétrica é amplamente aplicada em diferentes setores. Ela é utilizada para fornecer eletricidade a residências, comércios, indústrias e instituições públicas. Além disso, a energia hidrelétrica também é empregada para fins de irrigação, controle de enchentes, navegação e recreação em torno dos reservatórios criados pelas barragens. Sua versatilidade e confiabilidade fazem da energia hidrelétrica uma importante fonte de energia em todo o mundo (LIMA *et al.*, 1999).

No que diz respeito aos custos, os investimentos iniciais para a construção de usinas hidrelétricas podem ser significativos. No entanto, uma vez construídas, as usinas hidrelétricas têm baixos custos operacionais e de manutenção, o que as torna economicamente viáveis a longo prazo. Além disso, os custos de geração de energia hidrelétrica são relativamente estáveis, uma vez que não dependem de flutuações nos preços de combustíveis fósseis (IEA, 2020).

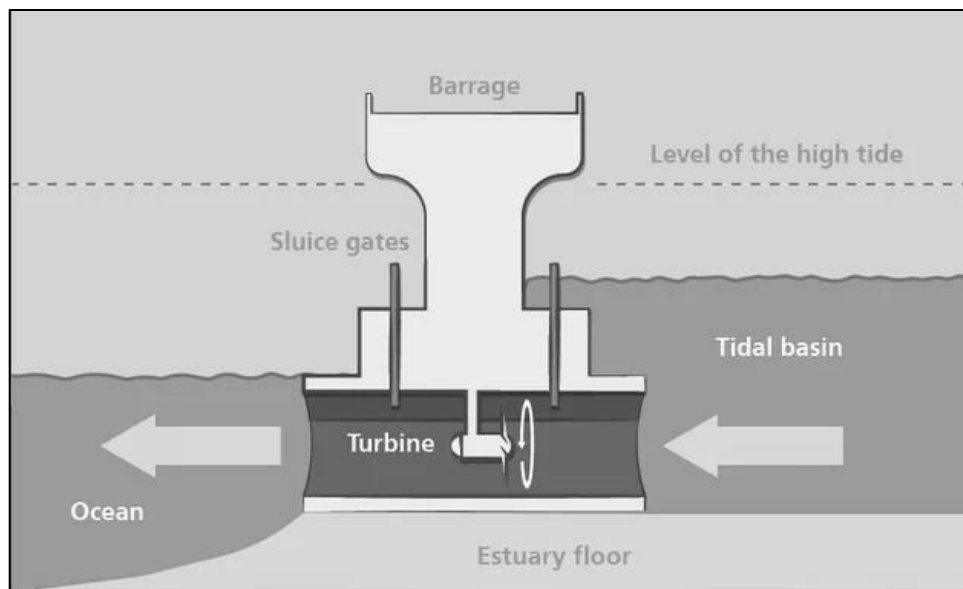
É importante ressaltar que a implementação de projetos de energia hidrelétrica pode ter impactos ambientais significativos, incluindo a alteração do ecossistema dos rios, a realocação de comunidades locais e a perda de habitat para espécies aquáticas. Portanto, é essencial que esses projetos sejam planejados e executados com cuidado, levando em consideração aspectos ambientais, sociais e culturais.

2.2.1.3 Energia das Marés

É uma forma de energia renovável que aproveita o movimento das marés para gerar eletricidade de forma sustentável e limpa, Silva *et al.* (2018). Ela tem sido explorada há séculos, mas somente recentemente tecnologias avançadas permitiram sua aplicação em larga escala.

O conceito fundamental por trás da energia das marés é a conversão da energia cinética da água em energia elétrica. Quando a maré sobe, a água é armazenada em uma área delimitada por uma barragem ou dique. À medida que a maré baixa, a água é liberada através de turbinas instaladas na barragem. A força da água em movimento faz com que as turbinas girem, acionando geradores que produzem eletricidade. Esse processo pode ser repetido a cada ciclo de maré, garantindo um suprimento constante de energia renovável, conforme a figura 10 (THRESHER, 2017).

Figura 10 – Sistema de barragem



Fonte: Renewable energy: Hydroelectricity, 2020.

A energia das marés é aplicada principalmente em regiões costeiras com grandes amplitudes de maré, como baías, estuários e canais estreitos. Alguns dos principais projetos de energia das marés no mundo estão localizados em lugares como a Baía de *Fundy*, no Canadá, a Baía de *Sevillianas*, na França, e o Estreito de *Uldolmok*, na Coreia do Sul. Segundo Da Rocha (2020) e Pratolongo *et al.* (2016), essas áreas oferecem condições geográficas favoráveis, com correntes de maré intensas e infraestrutura adequada para a instalação de usinas de energia das marés.

Em relação aos custos, os projetos de energia das marés geralmente envolvem investimentos iniciais significativos. Os custos estão relacionados à construção de barragens, turbinas e sistemas de transmissão de energia. No entanto, os custos operacionais e de manutenção são relativamente baixos, uma vez que a fonte de energia primária, a maré, é gratuita e previsível (DÁRIO *et al.*, 2013).

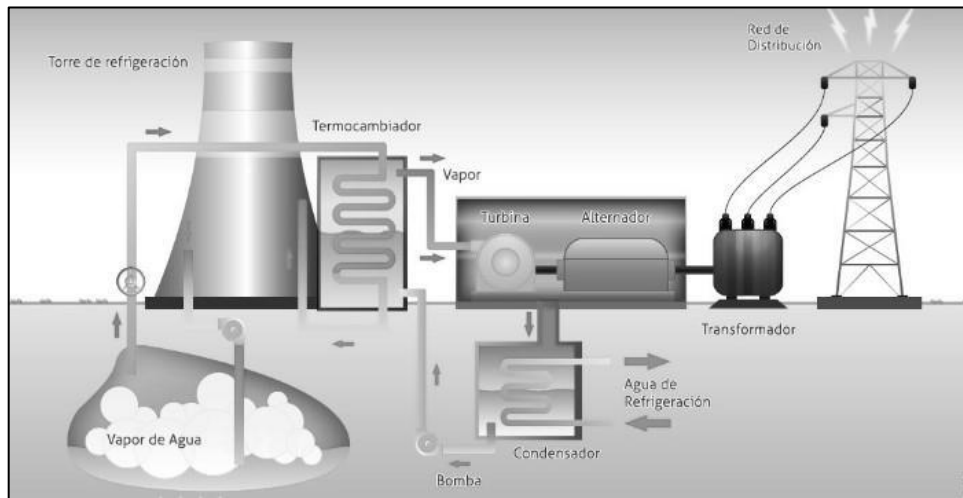
Embora a energia das marés seja uma fonte promissora de energia renovável, existem desafios a serem superados. Um dos principais desafios é a disponibilidade limitada de locais adequados para a instalação de usinas de energia das marés. Além disso, a construção de barragens e turbinas pode ter impactos ambientais, como alterações no ecossistema marinho e interferência nas rotas migratórias de peixes e outras espécies marinhas. Portanto, é fundamental realizar estudos de impacto ambiental abrangentes e adotar medidas de mitigação para garantir a sustentabilidade desses projetos (PEREIRA, 2020).

2.2.1.4 Energia Geotérmica

DiPippo (2012) explica que é uma forma de energia renovável que aproveita o calor proveniente do interior da Terra para gerar eletricidade e fornecer aquecimento, essa fonte de energia baseia-se na utilização do calor naturalmente presente nas camadas mais profundas da crosta terrestre, sendo uma alternativa limpa e sustentável para suprir as demandas energéticas.

O conceito por trás da energia geotérmica está relacionado à diferença de temperatura entre a superfície terrestre e o interior da Terra. A uma certa profundidade, conhecida como zona de temperatura geotérmica, o calor proveniente do núcleo terrestre e das atividades vulcânicas aquece as rochas circundantes. Essas altas temperaturas são aproveitadas por meio de poços geotérmicos para produzir energia elétrica (OMIDO *et al.*, 2017).

A forma de funcionamento da energia geotérmica envolve a perfuração de poços geotérmicos para acessar as camadas mais quentes da Terra. A água, ou um fluido termal, é bombeada para esses poços, onde é aquecida pelas rochas quentes. O vapor ou o fluido aquecido é então conduzido a uma central geotérmica, onde é utilizado para movimentar turbinas e acionar geradores elétricos, produzindo assim eletricidade limpa e renovável, Bicudo (2010), conforme a figura 11.

Figura 11 – Central Geotérmica

Fonte: Portal Energia, 2019.

A energia geotérmica pode ser aplicada em diversas regiões do mundo, especialmente onde existem áreas com atividade geotérmica significativa, como falhas tectônicas ou vulcões. Países como Islândia, Filipinas, Estados Unidos, México e Indonésia têm um grande potencial para a produção de energia geotérmica, aproveitando seus recursos naturais únicos (TESTER *et al.*, 2006).

Quanto aos custos, a energia geotérmica tem a vantagem de ter baixos custos operacionais uma vez que o calor da Terra é uma fonte constante e gratuita. No entanto, os custos iniciais de construção de uma usina geotérmica podem ser relativamente altos devido à necessidade de perfuração de poços geotérmicos profundos e infraestrutura associada. Os custos também podem variar de acordo com a profundidade e a temperatura da fonte geotérmica (CAMPOS *et al.*, 2016).

Além da produção de eletricidade, a energia geotérmica também pode ser utilizada para aquecimento direto em sistemas de calefação residencial, comercial e industrial. Essa aplicação é especialmente vantajosa em regiões com uma alta demanda de aquecimento, como países frios ou com necessidades industriais específicas (DIPIPO, 2012).

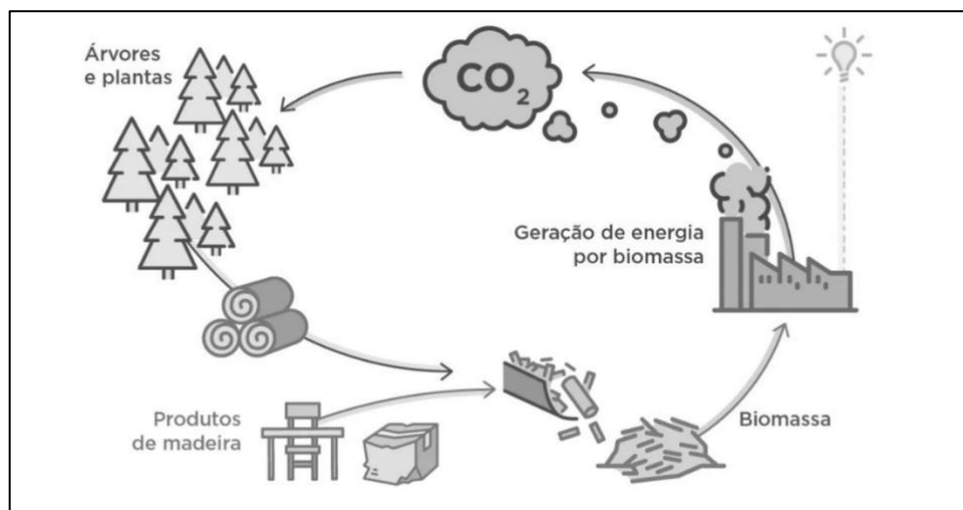
Apesar das suas vantagens, a energia geotérmica apresenta desafios, como a limitação de locais adequados para a sua exploração e o risco potencial de ocorrência de gases e substâncias tóxicas na área dos poços geotérmicos, Campos *et al.*, (2016). É essencial conduzir estudos geológicos e ambientais detalhados para avaliar.

2.2.1.5 Energia da Biomassa

É uma forma de energia renovável que utiliza materiais orgânicos, como resíduos vegetais, animais e industriais, para gerar calor, eletricidade ou combustíveis, Demirbas (2010). Essa fonte de energia baseia-se na conversão da energia contida na matéria orgânica por meio de processos de combustão, fermentação ou decomposição.

O conceito por trás da energia de biomassa está relacionado ao ciclo natural do carbono. As plantas absorvem dióxido de carbono (CO_2) da atmosfera durante o processo de fotossíntese, armazenando energia solar em forma de biomassa. Quando essa biomassa é utilizada como combustível, o CO_2 liberado na queima é reabsorvido pelas plantas, mantendo o ciclo equilibrado e reduzindo as emissões de gases de efeito estufa, conforme a figura 12 (GOLDEMBERG, 2009).

Figura 12 – Ciclo Energético da Biomassa



Fonte: CropLife Brasil, 2020.

A forma de funcionamento da energia de biomassa varia de acordo com a tecnologia utilizada. Na combustão direta, a biomassa é queimada em caldeiras ou fornos para produzir calor, que pode ser utilizado para aquecimento de ambientes, geração de vapor ou produção de eletricidade por meio de turbinas a vapor. Na fermentação, a biomassa é decomposta por microrganismos para produzir biogás, que pode ser utilizado como combustível em motores ou para geração de eletricidade em usinas de biogás (SILVA *et al.*, 2005).

A energia de biomassa, de acordo com Goldemberg (2009), pode ser aplicada em diferentes setores, como residencial, comercial, industrial e agrícola. Ela é amplamente

utilizada para aquecimento de ambientes, principalmente em regiões rurais, onde a disponibilidade de biomassa é maior. Além disso, pode ser utilizada na cogeração, onde a energia térmica gerada na queima da biomassa é aproveitada para a produção simultânea de eletricidade e calor, aumentando a eficiência do processo.

Os custos da energia de biomassa dependem de vários fatores, como a disponibilidade e o custo da biomassa, os investimentos em infraestrutura e tecnologia, e as políticas de incentivo governamentais. Em geral, os custos são influenciados pelo tipo de biomassa utilizada, a eficiência do processo de conversão e a escala da instalação. No entanto, a energia de biomassa pode apresentar custos competitivos em comparação com outras fontes de energia, especialmente em áreas com abundância de biomassa disponível (GOLDEMBERG, 2009).

É importante ressaltar que a utilização da energia de biomassa deve ser realizada de forma sustentável, levando em consideração questões ambientais, sociais e econômicas. A seleção adequada da biomassa, a implementação de tecnologias de baixa emissão e o manejo sustentável das fontes de biomassa são essenciais para minimizar impactos negativos e garantir a viabilidade a longo prazo dessa fonte de energia (BRIDGWATER *et al.*, 2002).

2.2.1.6 Energia Solar

É uma forma de energia renovável que utiliza a luz solar para gerar eletricidade ou calor de forma direta. Esse tipo de energia se baseia no efeito fotovoltaico, que é a capacidade dos materiais semicondutores, como o silício, instalados em forma de painéis, de converter a luz solar em eletricidade, CRESESB (2004), conforme a figura 13.

Figura 13 – Sistema de painéis solares



Fonte: ENVO, 2019.

A energia fotovoltaica pode ser aplicada em diversas áreas, tanto em pequena escala, como em residências e edifícios comerciais, quanto em grandes usinas solares conectadas à rede elétrica. Nos sistemas residenciais, os painéis solares são instalados no telhado ou em áreas externas, capturando a luz solar para suprir as necessidades elétricas da casa. Já as usinas solares são compostas por milhares de painéis solares e geralmente estão localizadas em áreas extensas de terra (IRENA, 2021).

Quanto aos custos, ainda de acordo com a Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA) (2021), a energia fotovoltaica tem apresentado uma redução significativa nos últimos anos, tornando-se cada vez mais competitiva em relação às fontes de energia convencionais. O preço dos painéis solares diminuiu consideravelmente devido ao avanço tecnológico e ao aumento da escala de produção. Além disso, políticas de incentivo governamentais, como o Programa de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico da Indústria e Semicondutores (PADIS), e programas de *net metering*, têm contribuído para a popularização da energia fotovoltaica.

A energia fotovoltaica oferece diversas vantagens, como a redução das emissões de gases de efeito estufa, a geração descentralizada de eletricidade, a baixa manutenção dos sistemas e a disponibilidade abundante da fonte solar. No entanto, desafios ainda precisam ser superados, como o armazenamento eficiente da energia, a integração na rede elétrica e a conscientização sobre os benefícios ambientais (RELLA, 2017).

No capítulo 2.3 será abordada a energia fotovoltaica, bem como seus conceitos, componentes e aplicações, serão detalhadamente trabalhados.

2.3 CONCEITOS BÁSICOS DE ENERGIA FOTOVOLTAICA

Nesta sessão serão apresentados os princípios de funcionamento dos sistemas fotovoltaicos e os componentes que o compõem.

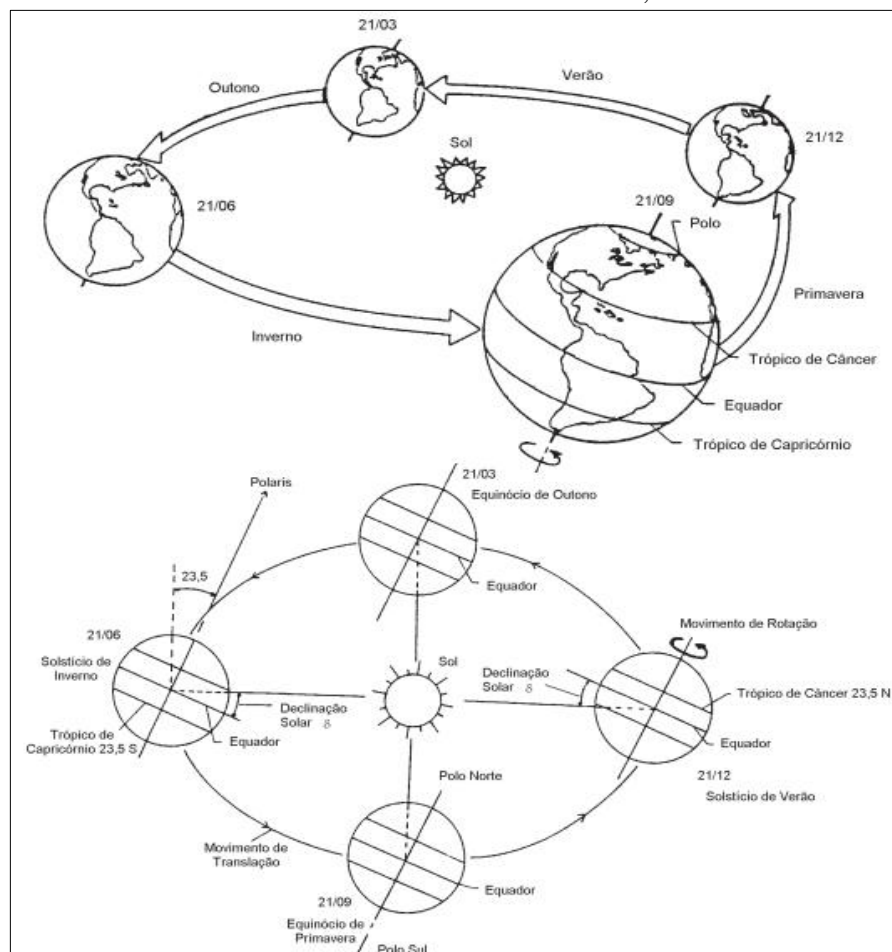
2.3.1 Princípios de Funcionamento de Sistemas Fotovoltaicos

O sol é a principal estrela do sistema solar, com uma abundante fonte de energia renovável, de forma que, um dia de energia solar incidente sobre a superfície terrestre, é superior à demanda mundial de energia de um ano inteiro, Labeee (2010). Além de poder fornecer energia térmica, gerando calor, o sol pode ser fonte de energia elétrica, por meio dos materiais fotovoltaicos (FLORIANI, 2018).

A energia solar fotovoltaica é obtida através da conversão direta da luz em eletricidade, isso se denomina como “efeito fotovoltaico” ou “efeito fotoelétrico”, Do Nascimento (2004). Esse fenômeno foi relatado em 1839 por Edmond Becquerel, que descobriu que certos materiais produzem pequenas quantidades de energia elétrica quando são expostos à luz. Ou seja, no momento da interação da radiação solar como o material semiconductor, ocorre a liberação e a movimentação de elétrons por esse material, gerando, assim, uma diferença de potencial, Torres (2012). Posteriormente, outros físicos como Charles Fritts, Lange, Grondahl e Schottky contribuíram para o desenvolvimento desta tecnologia.

O planeta terra, em seu movimento anual em torno do sol, descreve em trajetória elíptica um plano que é inclinado de aproximadamente $23,5^\circ$ em relação ao plano equatorial. Esta inclinação é responsável pela variação da elevação do Sol no horizonte em relação à mesma hora, ao longo dos dias do ano, dando origem às estações, conforme figura 14.

Figura 14 – Órbita da Terra em torno do Sol, com o seu eixo N-S inclinado a $23,5^\circ$



Fonte: CRESESB, 2004.

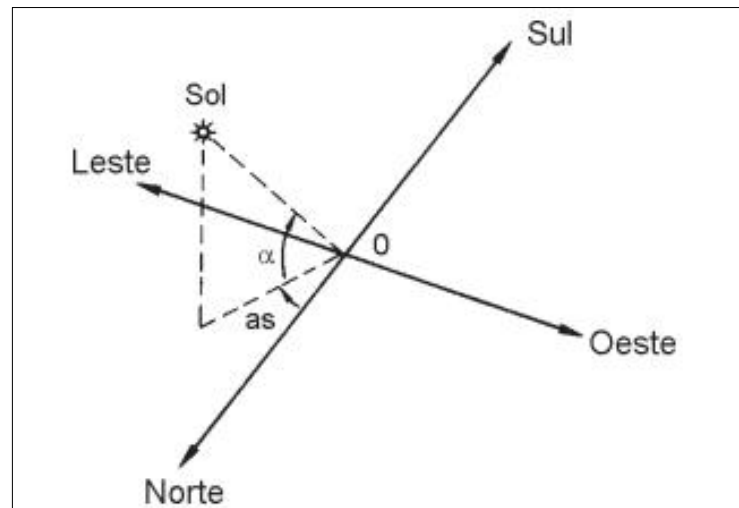
A posição angular do Sol, ao meio-dia, em relação ao plano do Equador, é chamada de Declinação Solar (δ), visualizado na figura 14. Esse ângulo varia de acordo com o dia do ano, dentro dos seguintes limites:

$$-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ \quad (1)$$

A soma da declinação com a latitude local determina a trajetória do movimento aparente realizado pelo Sol para um determinado dia em uma determinada dada localidade na Terra.

As relações geométricas entre os raios solares, que variam de acordo com o movimento aparente do sol e a superfície terrestre, são descritas através de vários ângulos, conforme as figuras 15 e 16.

Figura 15 – Ilustração dos ângulos α e a_s



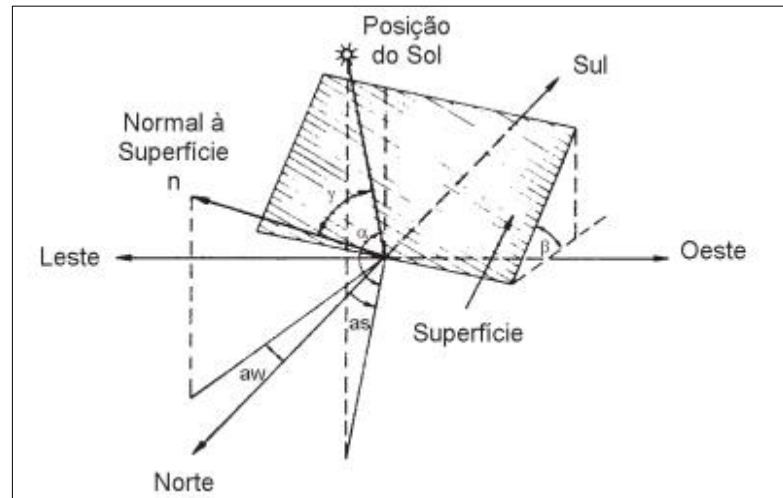
Fonte: CRESESB, 2004.

Onde:

Altura Solar (α): é o ângulo compreendido entre o raio solar e a projeção do mesmo sobre um plano horizontal;

Ângulo Azimutal do Sol (a_s): é o ângulo entre a projeção do raio solar no plano horizontal e a direção N-S.

Figura 16 – Coordenadas de orientação da superfície, a_w , β e γ



Fonte: CRESESB, 2004.

Onde:

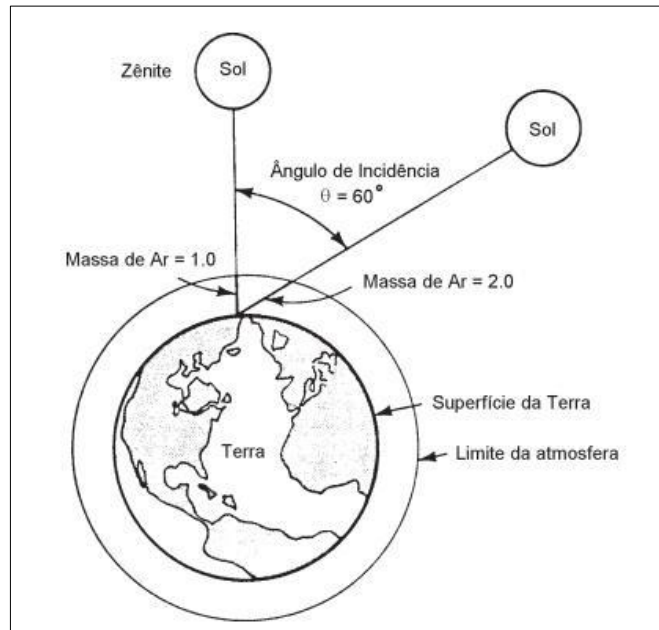
Ângulo Azimutal da Superfície (a_w) = é o ângulo entre projeção da normal à superfície no plano horizontal e a direção N-S. O deslocamento angular é tomado a partir do Norte ($-180^\circ \leq a_w \leq 180^\circ$);

Inclinação (β) = é o ângulo entre o plano da superfície em questão e a horizontal;

Ângulo de incidência (γ) = é o ângulo formado entre os raios do Sol e a normal à superfície de captação.

A potência aproximada que a superfície do nosso planeta recebe do Sol é de aproximadamente 1.400 W/m^2 , no pico de iluminação diária. Quando multiplicamos essa potência pela área de uma esfera de 150 milhões de quilômetros, que é a distância da Terra ao Sol, temos que a potência luminosa emitida é de 4.10^{23} W . Essa quantidade varia de acordo com a estação do ano, horário do dia e a localização geográfica (LIMA *et al.*, 2020).

Antes de atingir o solo, as características descritas da radiação solar são afetadas por interações com a atmosfera devido aos efeitos de absorção e espalhamento. As modificações são dependentes da espessura da camada atmosférica, identificada por um coeficiente denominado Massa de Ar (AM), e, portanto, do ângulo Zenital do Sol, da distância entre a Terra e o Sol e das condições atmosféricas e meteorológicas, conforme a figura 17.

Figura 17 – Trajetória dos raios de sol na atmosfera

Fonte: CRESESB, 2004.

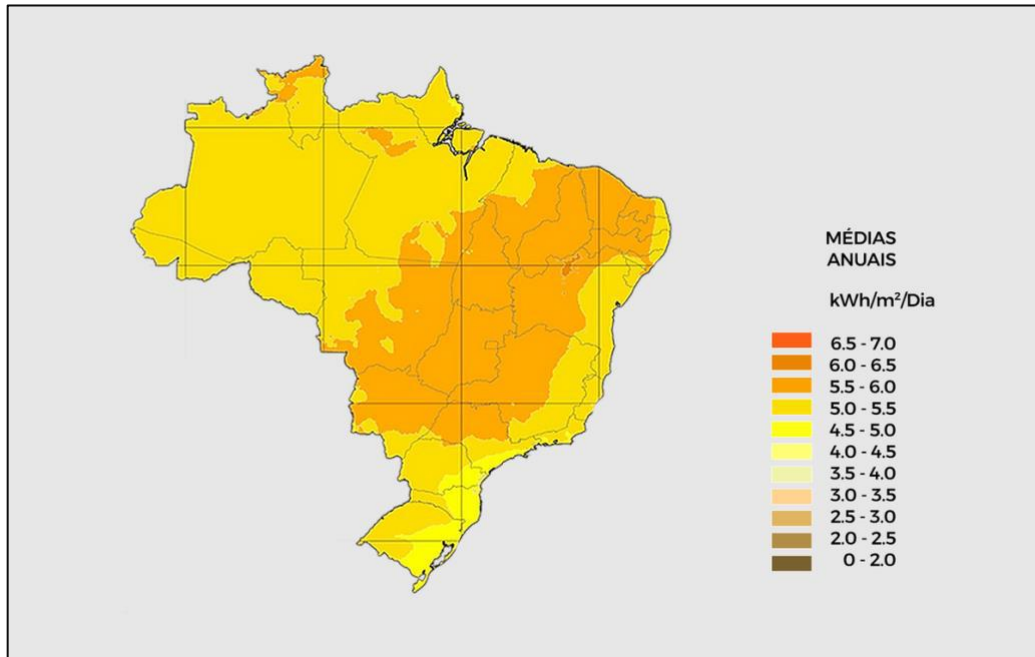
A Massa de Ar (AM) pode ser definida como:

$$AM = \frac{1}{\cos\theta} \quad (2)$$

Sendo assim, após considerar a reflexão, absorção dos gases da atmosfera e a dispersão por conta das partículas do pó e poluição, apenas uma parte da quantidade total da radiação solar atinge a superfície terrestre. Atinge, então, um valor de 1.000 W/m² ao meio-dia, em boas condições climáticas, independentemente da localização estudada (TORRES, 2012).

O Brasil, por sua vez, apresenta uma radiação solar média acima de 2500 horas/ano, visto seu clima tropical, Do Nascimento (2004). A figura 18 demonstra o valor médio anual do total diário de irradiação solar para as cinco regiões do país. A região Nordeste apresenta o maior potencial solar, com valor médio do total diário de irradiação global horizontal de 5,49 kWh/m², seguida das regiões Sudeste e Centro-Oeste que apresentam um potencial solar global horizontal de 5,07 kWh/m².

Figura 18 – Mapa dos níveis de irradiação solar por região



Fonte: Alba Energia Solar, 2022.

A luz é um fenômeno eletromagnético ondulatório descrito pelas equações de Maxwell. Porém, para melhor compreensão da interação da luz com a matéria, através dessa descrição, é necessário a introdução do conceito de fóton. O fóton é a partícula elementar mediadora da força eletromagnética, um objeto quântico com características próprias, Lima *et al.* (2017). A energia de um único fóton é associada diretamente à frequência de radiação eletromagnética pela relação de Planck:

$$E_f = h \times \nu \quad (3)$$

Onde:

$h = 1,054 \times 10^{-34}$ J.s é a constante de Planck

ν = é a frequência angular ad luz, medida em rad/s.

Alternativamente, pode-se representar a expressão anterior em função do comprimento de onda:

$$E_f = \frac{h \times c}{\lambda} \quad (4)$$

Onde:

λ = é o comprimento de onda

c = a velocidade da luz

Dessa forma, como a energia é inversamente proporcional ao comprimento de onda, quanto menor o comprimento, maior a energia. Para fins de comparação, a Figura 19 apresenta dados das energias típicas dos fótons em cada faixa do espectro eletromagnético.

Figura 19 – Dados de Espectro Magnético e Energia do Fóton Associado

Região Espectral	λ	E_f
Radiofrequência (RF)	$\lambda < 1\text{mm}$	$E_f < 1\text{meV}$
Infravermelho (IR)	$1\text{mm} > \lambda > 700\text{nm}$	$1\text{meV} < E_f < 1,78\text{eV}$
Visível	$700\text{nm} > \lambda > 400\text{nm}$	$1,78\text{eV} < E_f < 3,1\text{eV}$
Ultravioleta (UV)	$400\text{nm} > \lambda > 1\text{nm}$	$3,1\text{eV} < E_f < 1,25\text{keV}$
Raios X	$1\text{nm} > \lambda > 5\text{pm}$	$1,25\text{keV} < E_f < 250\text{keV}$
Raios γ	$\lambda < 5\text{pm}$	$E_f > 250\text{keV}$

Fonte: Lima *et al.*, 2020.

Segundo Junior e Souza (2021), os fótons levam cerca de 8 minutos e 20 segundos para percorrer a trajetória do Sol até a Terra. Ao chegar na superfície terrestre, os fótons atingem as células fotovoltaicas, componentes fabricados com material semicondutor responsáveis pela captação e geração de energia. As células solares são as responsáveis pelo funcionamento de um efeito fotovoltaico. Nelas, há a conversão da radiação solar diretamente em energia elétrica. Nesse processo, esses componentes feitos de materiais semicondutores como o silício, arsenieto de gálio, telureto de cádmio ou disseleneto de cobre e índio, são adicionados dopantes com o objetivo de criar um meio adequado para o estabelecimento do efeito fotovoltaico (TORRES, 2012).

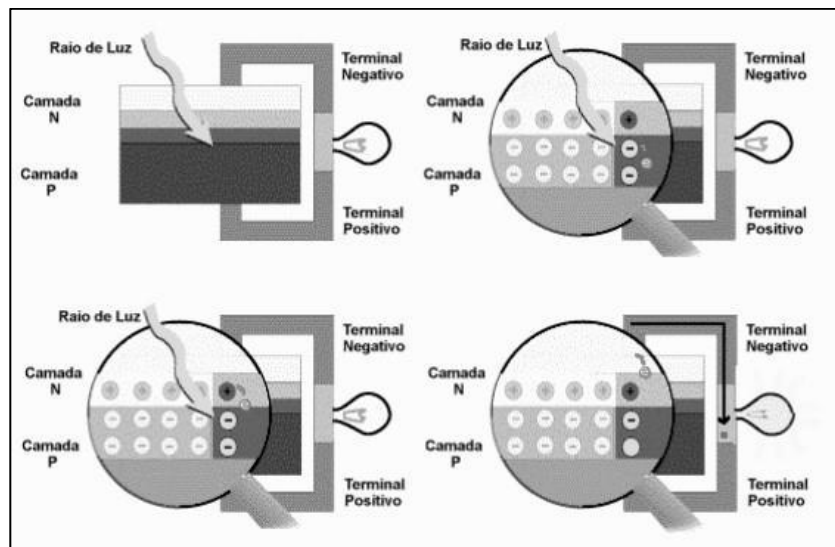
A primeira célula fotovoltaica considerada prática foi criada em 1954, por Daryl Chapin, Calvin Souther Fuller e Gerald Pearson. Os pesquisadores utilizaram uma junção p-n de silício que conseguia atingir aproximadamente 6% de rendimento, superando as primeiras células de estudo, feitas de selênio e com rendimento de apenas 0,5%. (SILVA, 2014).

O silício puro, por não possuir elétrons livres, é um mal condutor elétrico. Por isso, para se obter o silício do tipo n, faz-se o processo denominado dopagem, onde acrescentam-se porcentagens de fósforo para obtenção de um material com elétrons livres ou portadores de cargas negativas. O mesmo se faz para se obter o silício do tipo p, onde é realizada a dopagem

com Boro, obtendo-se um material com falta de elétrons ou portador de carga positiva livre (NASCIMENTO, 2004).

Ambos os materiais obtidos são utilizados na montagem de uma célula fotovoltaica, que será abordada mais profundamente no capítulo 2.3.2.1. A partir disso, tem-se a junção pn , componente onde os elétrons livres do lado n passam ao lado p , e isto faz com que haja um acúmulo de elétrons do lado p , tornando-o mais negativamente carregado e uma redução de elétrons do lado n , tornando-o eletricamente positivo. O campo elétrico que é formado dificulta a passagem de mais elétrons do lado n para o lado p . Esse processo alcança um equilíbrio quando o campo elétrico forma uma barreira capaz de barrar os elétrons livres remanescentes no lado n , criando uma diferença de potencial, conforme a figura 20.

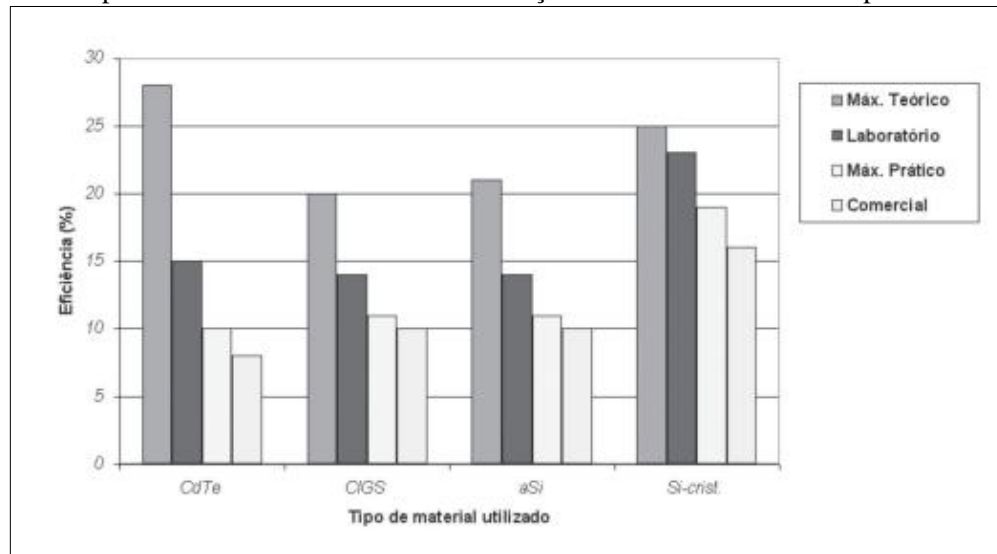
Figura 20 – Efeito fotovoltaico na junção pn



Fonte: CRESESB, 2004.

Com o passar do tempo, vários estudos e pesquisas foram desenvolvidas com a finalidade de aprimorar a composição material da célula fotovoltaica, diminuindo os requisitos necessários para a sua manufatura, da Silva (2014). Porém, o melhor resultado é da tecnologia baseada no Silício (Si) Cristalino, segundo material mais abundante na terra e inserido em 90% do mercado existente, CEMIG (2012). Os resultados dos estudos estão representados graficamente na figura 21.

Figura 21 – Tipos de materiais utilizados na confecção de células FV e suas respectivas eficiências



Fonte: CRESESB, 2004.

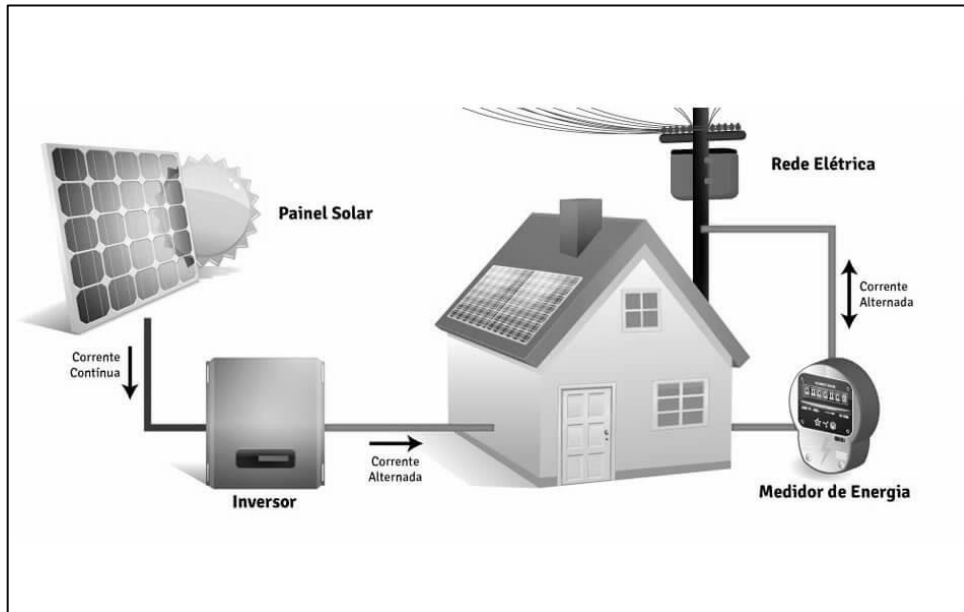
O silício cristalino (Si-crist.) embora não apresente a máxima eficiência teórica, que é pertencente ao telureto de cádmio (CdTe), apresenta a maior eficiência em laboratório e prática, por isso sua apresentação majoritária no mercado. A partir da definição do material semiconductor utilizado, pode-se buscar os componentes que constituirão o sistema fotovoltaico e definir seu método de montagem.

2.3.2 Componentes de um Sistema fotovoltaico

Conforme o CRESESB (2004), um sistema fotovoltaico é dividido em dois meios de geração e consumo: *on grid* e *off grid*.

No modo *on grid*, figura 22, a energia gerada que não é consumida, passa por um wattímetro (instrumento para medir a potência elétrica fornecida ou dissipada) bidirecional e que lança todo o excedente nas linhas elétricas, reduzindo a conta de energia. Instalações deste tipo vêm se tornando cada vez mais populares no Brasil, as potências instaladas variam de poucos quilowatts de potência de pico (kWp) em instalações residenciais, até alguns megawatts-pico (MWp), em grandes sistemas operados em empresas.

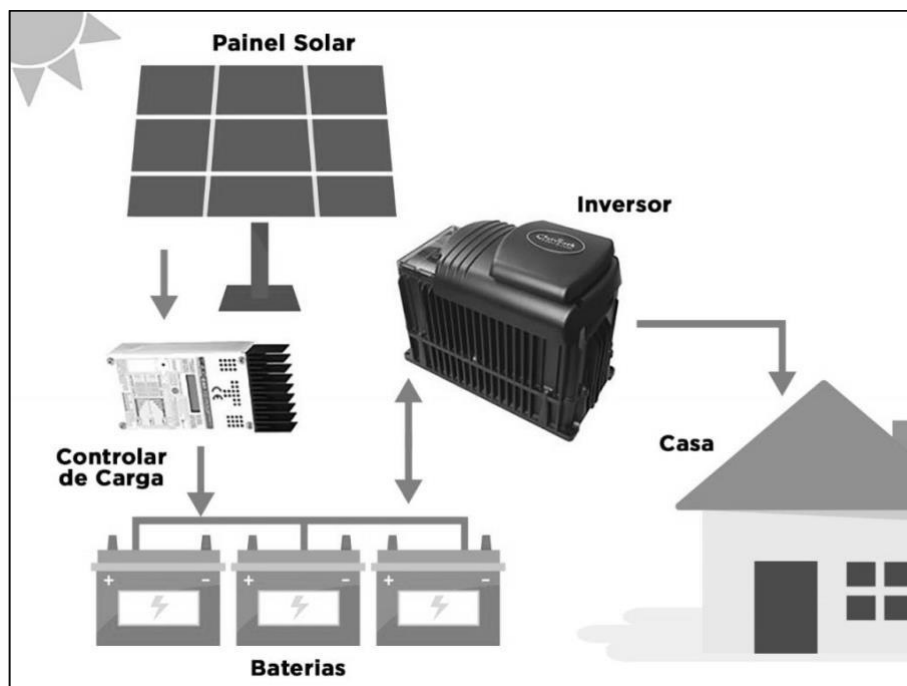
Figura 22 – Sistema *on grid*



Fonte: Ribeiro, 2022.

No método *off grid*, figura 23, a energia fica armazenada em baterias, convertidas por um inversor e, então, posteriormente consumidas, Bortoloto, *et al.* (2017). É o caso em que se deseja usar equipamentos elétricos independentemente de haver ou não geração fotovoltaica simultânea (CRESESB, 2004).

Figura 23 – Sistema *off grid*



Fonte: ShareEnergy, 2020.

Os painéis solares são estruturados das mais diversas estruturas, visto a gama de possibilidades de ambientes diferentes, Valle (2019). Ao formar um conjunto de células fotovoltaicas associadas eletricamente, em série e/ou em paralelo, obtemos a primeira parte de um painel solar (ALMEIDA *et al.*, 2016).

Diversos componentes são importantes para o pleno funcionamento do sistema fotovoltaico. O módulo fotovoltaico é o componente responsável pela absorção e transformação dos fótons em energia elétrica, ele é constituído pelas células fotovoltaicas, vidro fotovoltaico, filme encapsulante, *backsheet*, caixa de junção e moldura.

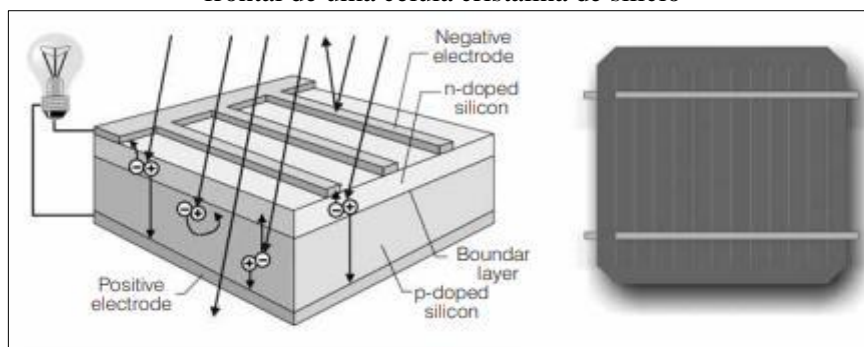
2.3.2.1 Células Fotovoltaicas

A célula fotovoltaica é um componente capaz de converter a luz do sol diretamente em energia elétrica, através da produção de tensão e corrente elétrica sob iluminação, denomina-se célula fotovoltaica (LIMA *et al.*, 2020).

Como o material utilizado nas células solares deve ser da maior pureza possível, é necessária a separação do oxigênio não desejado do dióxido de silício, material de interesse. Dessa forma, funde-se a areia de sílica aquecida com o pó de carvão, criando-se assim o silício metalúrgico, com uma pureza de 98%. Os 2% restantes de impurezas em aplicações eletrônicas ainda são muito expressivos, havendo a necessidade de purificar o silício em estado bruto através de vários processos químicos, obtendo-se por fim, o silício de alta qualidade para produção das células (TORRES, 2012).

Uma célula fotovoltaica é estruturada em vários estratos. Comumente, há duas camadas de material semicondutor, um tipo *p* e outro tipo *n*, geralmente feita de silício cristalino, conforme mostrado na figura 24

Figura 24 – Estrutura de uma célula fotovoltaica e visão frontal de uma célula cristalina de silício



Fonte: Quaschnig, 2005.

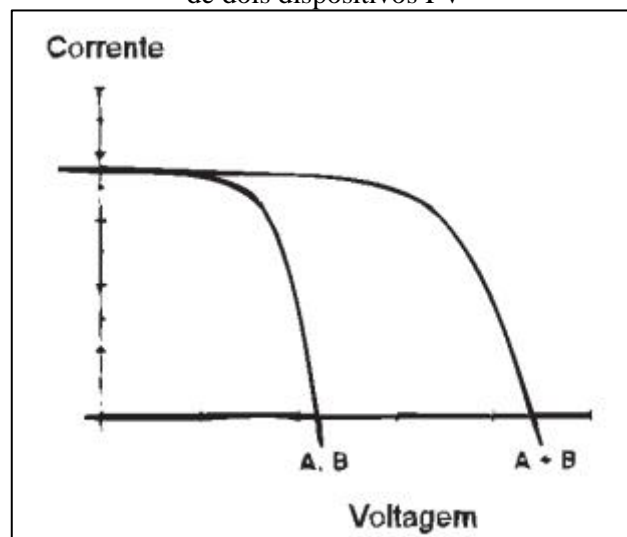
Os módulos, assim como as células em um módulo, podem ser conectados em série e/ou em paralelo. Quando conectados em série, a conexão é feita de um terminal positivo de um módulo a um terminal negativo de outro, e assim por diante, CRESESB (2004). Se houver ligação em série nas células, módulos e painéis, as tensões são adicionadas e a corrente não é afetada, de forma que:

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n \quad (5)$$

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad (6)$$

A figura 25 demonstra as curvas de corrente e tensão para a conexão em série de dois dispositivos fotovoltaicos (FV).

Figura 25 – Curvas IxV pra a conexão em série de dois dispositivos FV



Fonte: CRESESB, 2004.

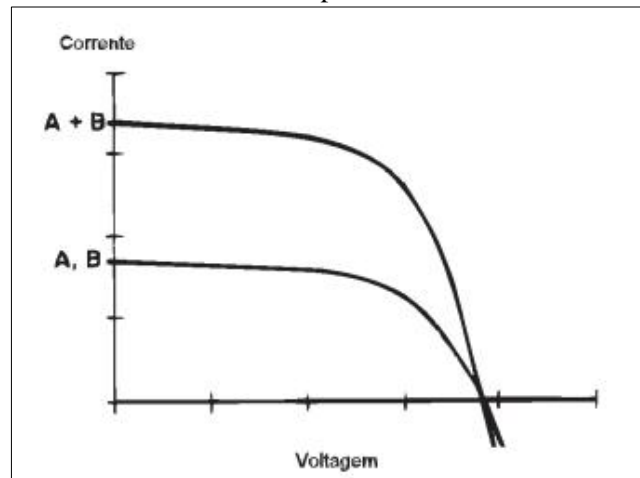
Dispositivos conectados em paralelo compreendem ligações de terminais positivos juntos e terminais negativos juntos. As correntes são somadas e as tensões continuam as mesmas, ou seja:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (7)$$

$$V = V_1 = V_2 = \dots = V_n \quad (8)$$

A figura 26 demonstra as curvas de corrente e tensão para a conexão em paralelo de dois dispositivos fotovoltaicos (FV).

Figura 26 – Curvas IxV pra a conexão em paralelo de dois dispositivos FV



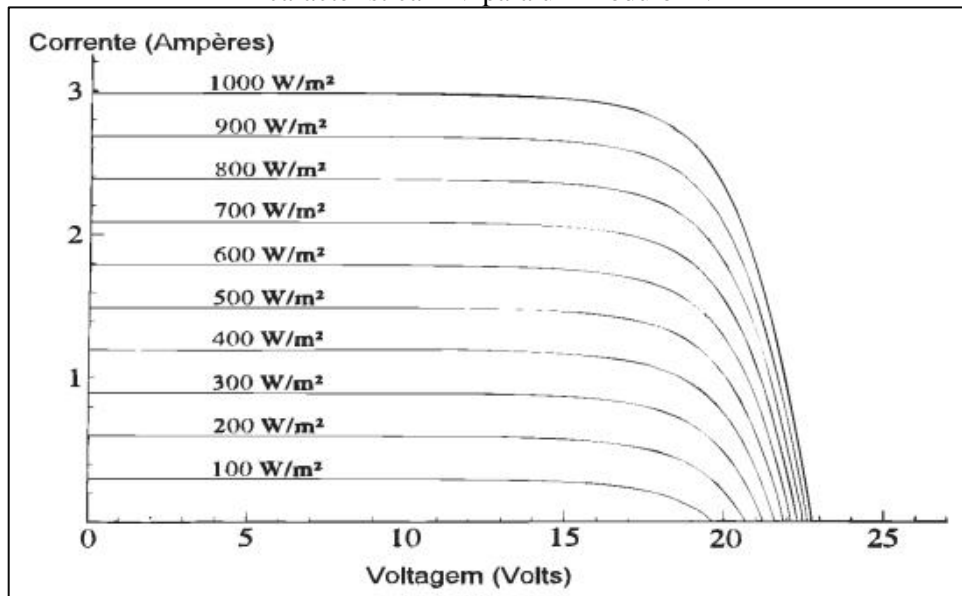
Fonte: CRESESB, 2004.

A eficiência das células fotovoltaicas é variada, dependendo da tecnologia utilizada na confecção de cada uma. Segundo o Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, desenvolvido pela CRESESB (2004), a condição padrão para plotagem das curvas características e testes dos módulos é definida para a radiação de 1.000 W/m^2 e temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ na célula, visto que a eficiência da célula é reduzida com o aumento da temperatura.

Atualmente, a eficiência média dos painéis solares fica em torno de 15 a 18%, com alguns painéis de alta eficiência podendo chegar a 23% (VALLE, 2019).

O primeiro fator que afeta as características elétricas dos módulos é a intensidade luminosa. Sabe-se que, conforme o capítulo 2.1.1 demonstrou, o sol está em constante movimento, e conseqüentemente seu ângulo de irradiação também, afetando sua intensidade em um determinado ponto. A figura 27 demonstra o efeito causado pela variação de intensidade da luz na curva característica IxV para um módulo.

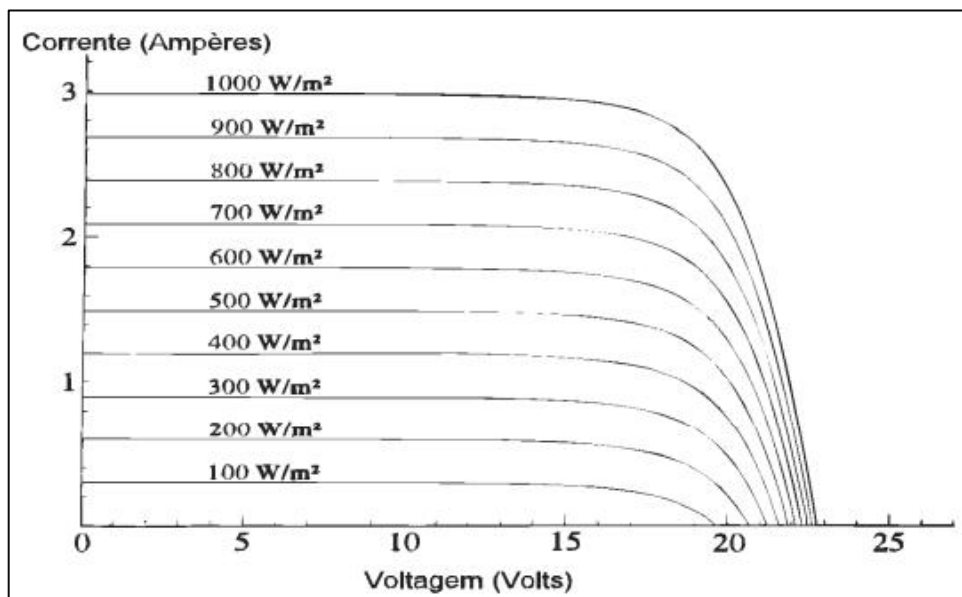
Figura 27 – Efeito causado pela variação da intensidade da luz na curva característica IxV para um módulo FV



Fonte: CRESESB, 2004.

O segundo fator que afeta as características elétricas dos módulos é a temperatura das células. A figura 28 demonstra que o aumento do nível de insolação aumenta a temperatura da célula e conseqüentemente tende a reduzir a eficiência do módulo.

Figura 28 – Efeito causado pela temperatura da célula na curva IxV para 1.000 W/m² em um módulo FV de silício cristalino



Fonte: CRESB, 2004.

2.3.2.2 Outros componentes do painel solar

Além das células fotovoltaicas, outros componentes são necessários para o pleno funcionamento do módulo FV. Sendo eles: vidro fotovoltaico, filme encapsulante, *backsheet*, caixa de junção e moldura.

Vidro Fotovoltaico: É um vidro temperado transparente que tem a função de proteger as células fotovoltaicas contra chuva, sujeiras e eventuais impactos, Junior (2018).

Filme Encapsulante: É um produto de cura rápida, feito de EVA (acetato-vinilo de etileno) desenvolvido para garantir maior durabilidade das células. Está presente tanto por cima quanto por baixo dos condutores (SILVA, 2014).

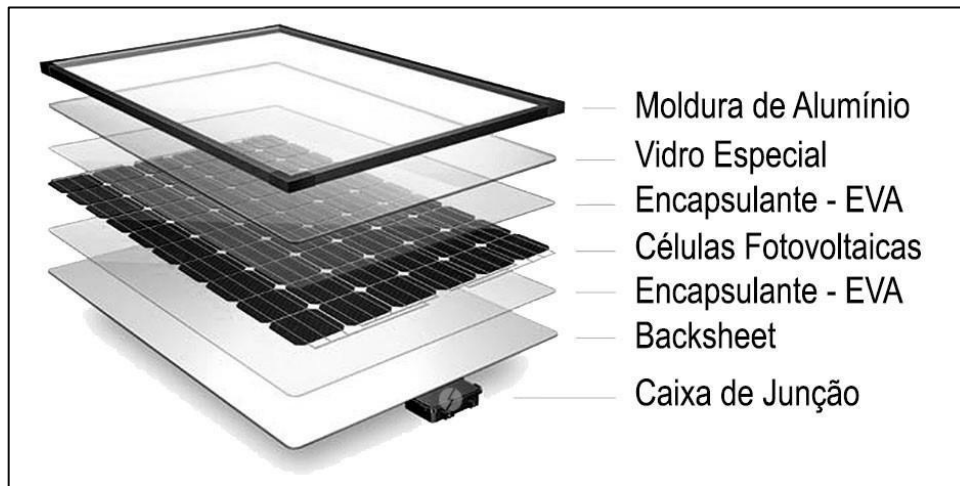
BackSheet: Também serve como encapsulamento, feito com um material chamado Tedlar (fluoreto de polivinila), garantindo proteção permanente das células (CRESESB, 2004).

Caixa de Junção: Componente onde se encontra o diodo de by-pass (ou diodo de passagem) que tem como objetivo evitar a formação de pontos quentes no módulo fotovoltaico. A caixa de junção também contém a conexão dos terminais positivos e negativos das células (LORENZO, 2006; PINHO E GALDINO, 2014).

Moldura: A última camada do painel solar. Após a instalação da caixa de junção, usa-se uma prensa semiautomática ou automática para colocar a moldura de alumínio no painel fotovoltaico. Esse componente é responsável por proteger e dar rigidez ao vidro e acabamento para o módulo fotovoltaico (ROSSO *et al.*, 2020).

Após a montagem do painel solar, composto pelas células fotovoltaicas e os componentes de encapsulamento, sendo o vidro fotovoltaico, filme encapsulante, *backsheet* e a caixa de junção, o módulo fotovoltaico, em detalhe, é distribuído conforme a figura 29.

Figura 29 – Camadas de uma célula fotovoltaica



Fonte: Portal Solar, entre 2014 e 2023.

2.3.2.3 Outros componentes do sistema fotovoltaico

Além dos componentes que constituem o módulo fotovoltaico, outros componentes para o pleno funcionamento do sistema escolhido são necessários, sendo *on grid* ou *off grid*, entre eles o controlador de carga, as baterias e o inversor.

Controlador de Carga: É responsável regular a tensão e alimenta o banco de dados de baterias, por isso, é um componente geralmente utilizado na montagem de sistemas *off grid*, ALMEIDA *et al.* (2016). Segundo Pereira & Oliveira (2011), os controladores têm a função principal de proteger os acumuladores, ou seja, as baterias de sobrecarga do sistema. Além disso, asseguram que o sistema opere com máxima eficiência.

No momento de se especificar um controlador de carga, primeiro é importante saber o tipo de bateria que será utilizada e o regime de operação do sistema. Assim, após determinar a tensão e a corrente de operação, consegue-se definir o controlador com as mínimas características necessárias, evitando custo excessivo e concedendo confiabilidade na escolha. A maioria dos controladores de carga disponíveis no mercado atualmente, são dispositivos analógicos convencionais que, por vários motivos, não atendem às necessidades dos sistemas (CRESESB, 2004).

Bateria: Presente nos sistemas *off grid*, uma ou mais baterias são utilizadas para armazenar a eletricidade em excesso gerada pelo sistema, Newkirk (2014). São peças fundamentais nos sistemas instalados principalmente em áreas rurais, onde a eletricidade gerada durante o dia seja utilizada no período da noite, porém, sua inserção no sistema torna o custo mais elevado (VILLALVA & GAZOLI, 2012).

A mais simples unidade de operação de uma bateria é chamada de célula eletroquímica, além disso, uma bateria pode ser composta de apenas uma célula ou do arranjo de diversas. De acordo com o Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos (2004), existem vários tipos de baterias, que se diferem pelas células empregadas, as quais influenciam na eficiência do armazenamento. As células primárias compõem baterias que podem ser utilizadas apenas uma vez, as quais chamamos de baterias não carregáveis. Dessa forma, quando as células se descarregam completamente, sua vida útil termina e elas são inutilizadas. Por outro lado, as células secundárias compõem baterias recarregáveis, podendo ser utilizadas mais de uma vez, são chamadas de baterias de armazenamento. Atualmente, para o caso de sistemas fotovoltaicos, as baterias de chumbo-ácido são as mais empregadas (CRESESB, 2004).

Inversor: O segundo componente, além do painel solar, que está presente em todos os tipos de sistema. É o responsável pela conversão da corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA), para que haja a conexão com a rede elétrica. Esse componente deve dissipar o mínimo de potência, evitando perdas e produzindo uma tensão com baixo teor de harmônicos e em sincronismo com a rede elétrica, caso o sistema esteja interligado à rede (CRESESB, 2004).

Existem dois tipos de inversores, os comutados pela rede e os autos comutados. No primeiro, o processo de inversão é controlado pela tensão da rede elétrica. No segundo, o controle é realizado pelo próprio inversor. Com os avanços tecnológicos, inversores mais recentes conseguem operar nos dois sentidos. Segundo Torres (2012), a eficiência de um inversor é afetada por vários fatores, como as condições ambientais e a presença de sujeira nos módulos. Nas condições padrões de teste, isto é, irradiância de 1.000 W/m², temperatura de junção de 25 °C e massa de ar AM = 1,5, é possível calcular a potência em corrente alternada obtida na saída do inversor, através da equação 9.

$$P_{CA} = P_{CC} \times EC \quad (9)$$

Onde:

P_{CA} = potência em corrente alternada na saída do inversor

P_{CC} = potência em corrente contínua obtida nos módulos

EC = eficiência de conversão

Com a potência de saída CA, podemos calcular o rendimento do inversor pela equação 10.

$$\eta_{inv} = \frac{P_{CA}}{(V_{max} \times I_{max})_{CC}} \quad (10)$$

Onde:

η_{inv} = rendimento do inversor

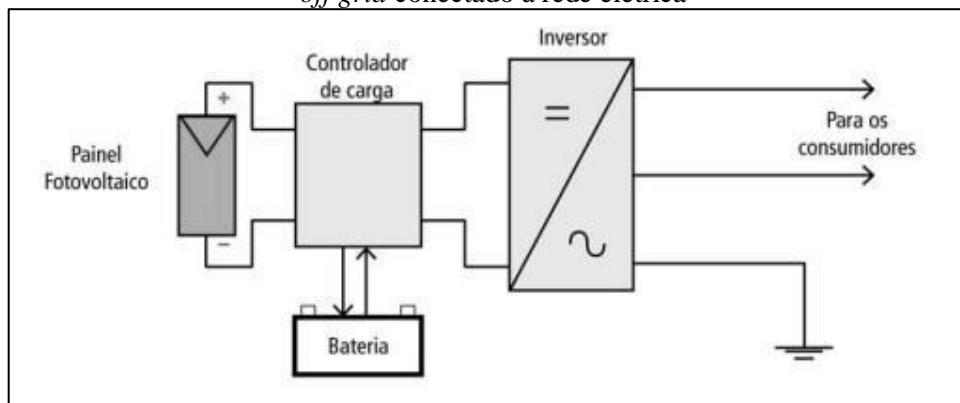
P_{CA} = potência em corrente alternada na saída do inversor

V_{max} = tensão máxima em CC

I_{max} = corrente máxima em CC

A figura 30 demonstra a conexão realizada entre o painel, o controlador de carga, as baterias e o inversor de um sistema *off grid*, que ao detectar a presença da rede, converte a corrente contínua em corrente alternada, com o mesmo padrão de tensão, frequência e fase da rede elétrica a qual está conectado.

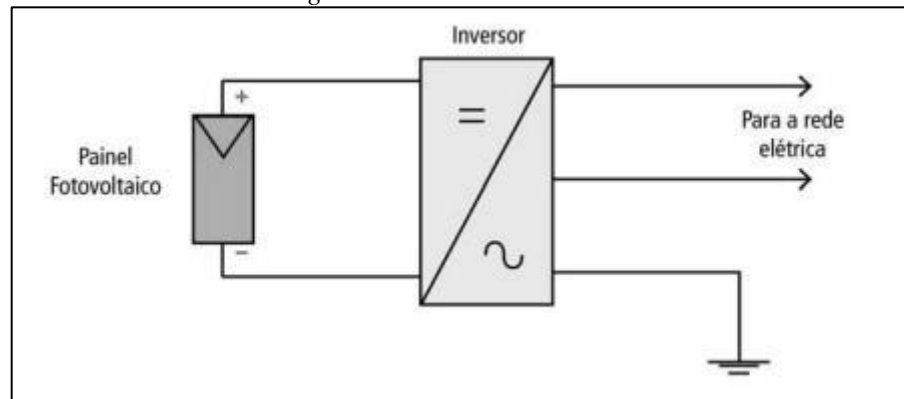
Figura 30 – Constituição do sistema fotovoltaico *off grid* conectado à rede elétrica



Fonte: LAMBERTS *et al.*, 2010.

No caso de sistemas *on grid*, pela falta de necessidade de baterias, a conexão se resume ao painel fotovoltaico e o inversor, além de contar com componentes de comando e proteção, como chaves, fusíveis e disjuntores. A figura 31 demonstra a conexão realizada entre o painel e o inversor, que ao detectar a presença da rede, converte a corrente contínua em corrente alternada, com o mesmo padrão de tensão, frequência e fase da rede elétrica a qual está conectado.

Figura 31 – Constituição do sistema fotovoltaico *on grid* conectado à rede elétrica



Fonte: LAMBERTS *et al.*, 2010.

Portanto, após o conhecimento dos itens que compõem um sistema fotovoltaico, seja ele *on grid* ou *off grid*, pode-se realizar a aplicação nos mais diferentes imóveis, como as residências que ganharam evidência nas políticas sustentáveis dos últimos anos.

2.4 APLICAÇÕES DA ENERGIA FOTOVOLTAICA EM RESIDÊNCIAS

A geração de energia fotovoltaica em edifícios residenciais, como fonte renovável, tem se mostrado um dos pilares principais para o desenvolvimento de um ambiente sustentável. De acordo com o Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2023, desenvolvido pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o consumo de energia em residências no Brasil, no ano de 2022, chegou ao valor de 152.771 GWh. No mesmo ano, houve um aumento na potência instalada de 59,5% em relação ao ano anterior, correspondente a uma expansão de 2,8 GW. Quanto a geração, houve um aumento de 79,8% referente a geração solar.

A escolha de residências como locais de integração dos painéis fotovoltaicos é justificada pela grande área de cobertura disponível, além de pertencerem a um único proprietário. De acordo com a Política Nacional de Energia Solar Fotovoltaica (PRONASOLAR) (2018), o potencial técnico da geração distribuída equivale a mais de 164 GW apenas em telhados residenciais, o que é suficiente para abastecer mais de duas vezes toda a demanda de energia elétrica residencial do país.

A opção mais adequada da instalação de energia fotovoltaica em edifícios residenciais é o sistema *on grid*, onde não necessita de componentes acumuladores de energia, visto que a rede elétrica está conectada ao sistema, recebendo toda a energia produzida durante o dia e fornecendo energia à residência no período noturno, tornando o sistema mais economicamente

viável, Costa (2012). Geralmente, a instalação dos painéis é realizada no telhado da residência, por ser o local mais alto, evitando o sombreamento das construções ou objetos vizinhos (SANTOS, 2009).

A aplicação da energia fotovoltaica em residências pode ser utilizada para iluminação, uso de eletrodomésticos, bombeamento de água, cercas eletrificadas, entre outras aplicações (IZIDORO *et al.*, 2010).

Segundo Lorenzo e Zilles, (1994), a estrutura do suporte dos módulos FV precisa suportar ventos de até 150 Km/h, também deve ser projetada com materiais resistentes a corrosão e estar aterrada eletricamente, seguindo as normas vigentes. Os módulos fotovoltaicos devem estar posicionados pelo menos 1 metro do solo.

Existem duas formas de se instalar o sistema nos telhados, sendo elas soluções aditivas ou soluções integrativas. Na solução aditiva, figura 32, os módulos são fixados no telhado, através de uma estrutura metálica. Enquanto na solução integrativa, figura 33, os componentes do telhado são substituídos por elementos fotovoltaicos (TORRES, 2012).

Figura 32 – Solução aditiva para instalação de módulos FV



Fonte: Fotovoltec, 2016.

Figura 33 – Solução Integrativa para instalação de módulos FV



Fonte: HCC Energia Solar, 2022.

Para estruturas já construídas, como residências antigas, a solução aditiva é mais atraente, pois não exigirá muitas intervenções na cobertura da construção, caso a instalação seja definida no telhado. As soluções integrativas são mais utilizadas em situações que o peso dos módulos fotovoltaicos é significativo, podendo comprometer a estrutura. Além da solução definida, faz-se necessário o dimensionamento dos módulos em decorrência da situação encontrada. Para isso, existem indicadores de análise de viabilidade técnica, econômica e ambiental, que auxiliam nos cálculos para o dimensionamento do sistema fotovoltaico ideal em cada projeto.

2.4.1 Indicadores de análise de viabilidade em sistemas fotovoltaicos

Antes da etapa de planejamento e dimensionamento do sistema fotovoltaico, de acordo com Torres (2012), deve-se conhecer o local da instalação, para uma pré-avaliação das condições básicas. Na análise de viabilidade dos sistemas fotovoltaicos, existem três divisões a serem consideradas: técnicas, econômicas e ambientais. O presente trabalho se baseou no dimensionamento de um sistema fotovoltaico no Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, desenvolvido pelo Centro de Referência para Energia Solar e Eólica (CRESESB) (2004) e na dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica de Torres (2012).

2.4.1.1 Divisão Técnica

A geração de energia elétrica em um sistema de placas solares depende das características da edificação estudada. Sendo assim, deve-se determinar a área disponível para a instalação dos painéis fotovoltaicos, a demanda de energia elétrica da edificação proposta e o estudo geográfico e solar da região de aplicação. Após o cumprimento dessas etapas, pode-se dimensionar o sistema fotovoltaico escolhido, determinando o modelo dos painéis que serão utilizados e o dimensionamento do inversor necessário. Por fim, realiza-se a estimativa da geração de energia do sistema fotovoltaico dimensionado e a análise comparativa entre a geração do sistema e o consumo da edificação estudada (TORRES, 2012).

- Etapa 1. Área disponível para a instalação dos painéis fotovoltaicos

Nessa etapa, deve-se determinar as possíveis áreas disponíveis para a instalação dos painéis fotovoltaicos, seja em uma laje, telhado, cobertura ou solo, escolhendo o local com menos sombreamento, para que não comprometa o desempenho do sistema. Além disso, deve-se definir a solução adotada para o sistema, seja ela aditiva, onde os módulos FV são fixados através do uso de uma estrutura metálica, ou integrativa, onde os componentes do local são substituídos por elementos fotovoltaicos.

- Etapa 2. Demanda de energia elétrica da edificação proposta

Após a determinação da área de instalação dos painéis e a intervenção realizada, deve-se realizar o dimensionamento do sistema de geração fotovoltaico a partir da demanda de energia elétrica pela carga. Quando não se conhece o consumo médio mensal, deve-se especificar a carga para um projeto de sistema fotovoltaico a partir do consumo médio diário de energia. Para calcular o consumo de um equipamento em um dia, deve-se multiplicar a sua potência pelo tempo de funcionamento, em horas. O resultado será dado em *Watts-hora/dia* (Wh/dia), e representado em kWh/dia, conforme a equação 11.

$$C = \frac{P_{\text{aparelho}} \times h}{1000} \quad (11)$$

Onde:

C = consumo

P = potência do aparelho em Watts (W)

h = horas de funcionamento por dia

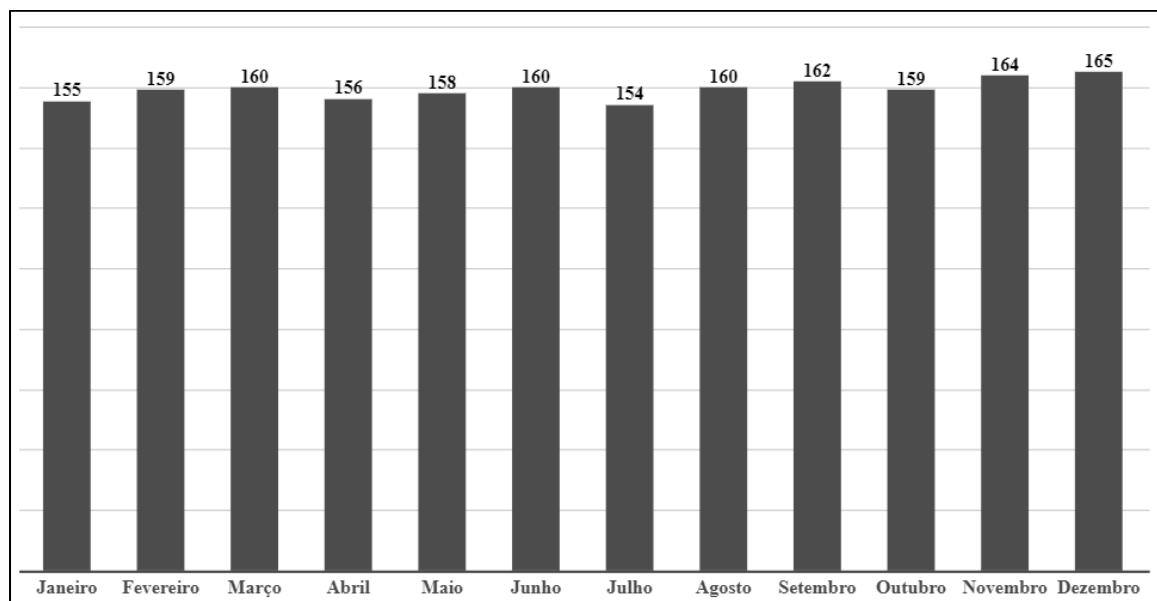
Algumas mudanças significativas na redução do consumo de energia podem ser comprovadas com a aplicação da fórmula. Uma lâmpada incandescente com potência de 100 W tem um fluxo luminoso, em lúmens (lm) de 1.500, e equivale a uma lâmpada de LED com potência de 15 W. Aplicando a fórmula de consumo, podemos comparar ambas as lâmpadas. Supondo-se um funcionamento de 8 horas por dia em um mês de 30 dias, temos que:

$$C_{\text{incandescente}} = \frac{P_{\text{aparelho}} \times h}{100} = \frac{100 \times 8 \frac{\text{horas}}{\text{dia}} \times 30 \text{ dias}}{1000} = 24 \frac{\text{kWh}}{\text{mês}} \quad (12)$$

$$C_{\text{LED}} = \frac{P_{\text{aparelho}} \times h}{100} = \frac{15 \times 8 \frac{\text{horas}}{\text{dia}} \times 30 \text{ dias}}{1000} = 3.6 \frac{\text{kWh}}{\text{mês}} \quad (13)$$

Assim, o consumo de uma lâmpada incandescente é quase 7 vezes maior que o consumo de uma lâmpada de LED. O consumo médio mensal de energia elétrica do domicílio no Brasil, figura 34, foi calculado pela Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Equipamentos Elétricos na Classe Residencial, desenvolvida pelo Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), a Eletrobrás, e o Ministério de Minas e Energia (MME), em 2019.

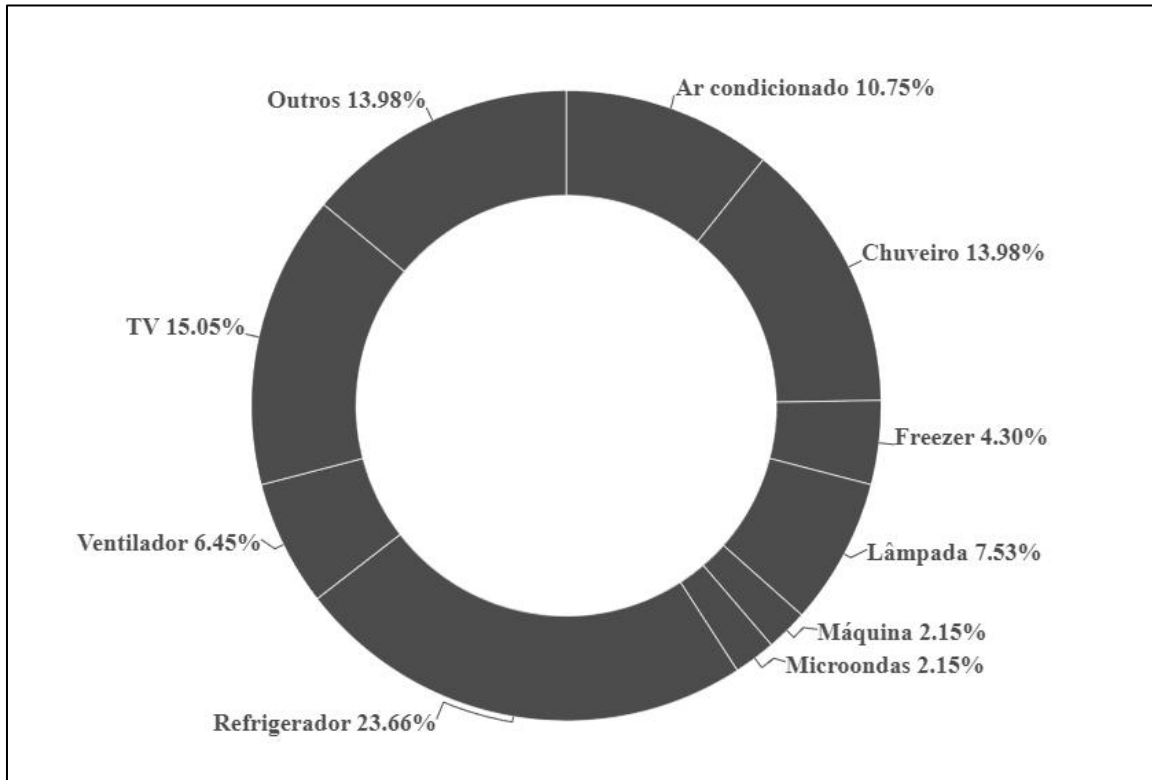
Figura 34 – Consumo médio mensal de energia elétrica do domicílio, em kWh



Fonte: PROCEL; ELETROBRÁS; MME, 2019.

Também é possível verificar o consumo por equipamento, figura 35.

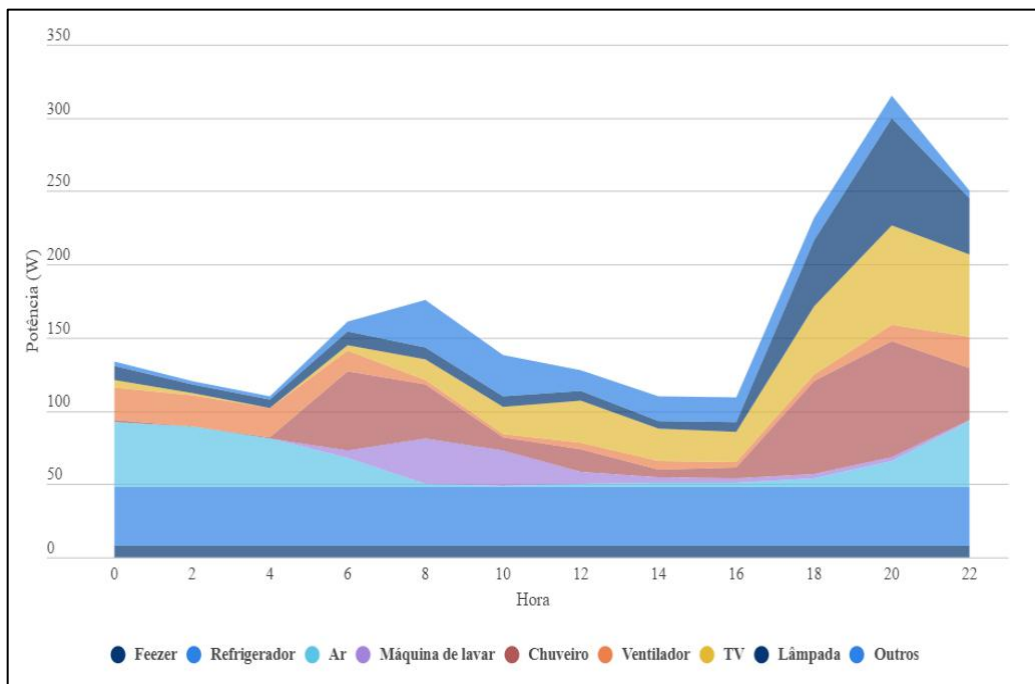
Figura 35 – Consumo por equipamento



Fonte: PROCEL; ELETROBRÁS; MME, 2019.

O formato da curva de demanda diária média nacional está representado na figura 36.

Figura 36 – Demanda diária média nacional



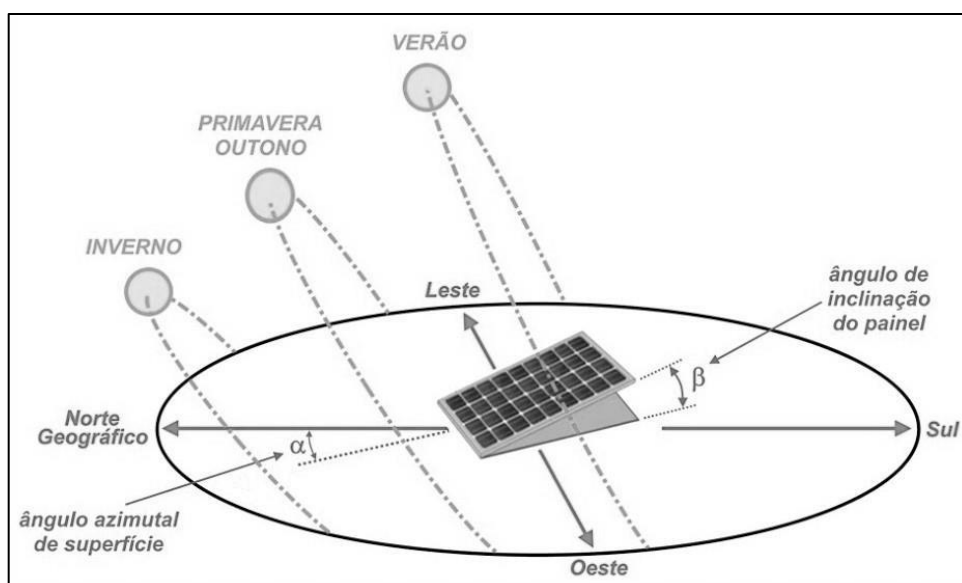
Fonte: PROCEL; ELETROBRÁS; MME, 2019.

Percebe-se o pico de uso dos eletrodomésticos no horário noturno, entre as 18h e 22h pois geralmente as pessoas voltam às suas casas e o consumo aumenta principalmente pelo uso do chuveiro elétrico e dos condicionamentos ambientais (ar-condicionado e ventilador). A partir da definição da demanda de energia elétrica, que será a média de consumo em um período de 12 meses, faz-se a avaliação do recurso solar da região, para definir a irradiação solar diária média em termos de potência.

- Etapa 3. Estudo geográfico e solar da região de aplicação

O Brasil é caracterizado majoritariamente por um clima tropical, de médias de irradiação solar relativamente altas. Conforme visto no capítulo 2.3.1, as regiões Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste apresentam as maiores médias anuais. Nessa etapa, diversos *softwares* podem ser utilizados para o auxílio do cálculo da irradiação solar incidente no plano, como o Radiasol 2, desenvolvido pela UFSC e o SunData 3.0, desenvolvido pela CRESESB. A partir das coordenadas geográficas do objeto de estudo, pode-se definir o melhor aproveitamento da radiação do sol ao longo do ano. Essa orientação é vista quando os painéis são apontados ao Norte geográfico, ou seja, quando o ângulo azimutal de superfície é igual a zero, e possuem uma inclinação igual à latitude do local, figura 37.

Figura 37 – Ângulo azimutal e de inclinação do painel fotovoltaico



Fonte: CARI, 2021.

Após inserir os valores de latitude e altitude no *software*, é possível se obter os valores médios mensais registrados. A figura 38 demonstra o resultado no modelo tabela gerado.

Figura 38 – Apresentação dos dados no software SunData 3.0

		Irradiação diária média [kwh/m2.dia]													
Ângulo	Inclinação [°]	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta
Ângulo igual a latitude	XX	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx
Maior média anual	XX	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx
Maior mínimo mensal	XX	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx

Fonte: CRESESB, 2018.

Os dados da tabela mostram a irradiação solar diária mensal em kWh/m². dia, para todos os meses do ano. Os valores em vermelho indicam a menor irradiação diária mensal, enquanto os valores em azul indicam a maior. Outro fator importante de se analisar é o sombreamento presente no local. Com o auxílio do software *GoogleEarth* ou *Sketchup*, é possível analisar a posição da sombra dos objetos em qualquer período do ano. A figura 39 contém um exemplo de estudo de sombreamento genérico realizado no *Sketchup*.

Figura 39 – Exemplo de estudo de sombreamento



Fonte: Elaboração própria.

Para o exemplo proposto, a partir do estudo de sombreamento, ao definir a data de 15/06/2023, às 16h, pode-se observar a sombra projetada do edifício de 15 metros. Na cidade em questão, o código de urbanismo do município previne altura máxima nas edificações dessa área, para que não haja o sombreamento da faixa de areia no período da tarde, onde há maior incidência solar e a maior frequência de pessoas. O mesmo pode ocorrer ao se definir a área de aplicação do sistema fotovoltaico, caso haja algum edifício ou objeto mais alto ao redor.

- Etapa 4. Determinação do modelo dos painéis que serão utilizados

Os painéis fotovoltaicos devem ser definidos de modo a obter o maior aproveitamento da energia solar, ou seja, utiliza-se somente a área ensolarada disponível, considerando as características regionais do local em estudo.

Após a coleta dos dados sobre a região de estudo, faz-se necessário estimar a potência nominal necessária para suprir a demanda energética, que pode ser determinada através da equação 14.

$$P_{CC} = \frac{E}{G \times R} \quad (14)$$

Onde:

PCC = potência média em corrente contínua necessária (kWp)

E = consumo médio diário durante o ano (kWh/dia)

G = irradiação diária recebida no plano do painel fotovoltaico, dada em kWh/m², dividida pela irradiância de referência de 1.000 W/m², expressa em horas

R = rendimento do sistema, inversor e conexões (%)

De acordo com Torres (2012) apud Marinowski; Salamoni; Rüther (2004); Lisita (2005), não há um consenso sobre o rendimento do sistema, que comumente varia de 70% a 90%, tanto para o setor residencial, quanto para o setor industrial.

Conhecendo a potência nominal necessária, realiza-se uma pesquisa de mercado para comparar as características de diversos modelos de módulos fotovoltaicos. Como dito no referencial teórico, a grande maioria dos módulos existentes são feitos de silício policristalino, mas também podem ser estudados os feitos de silício monocristalino. A figura 40, 41 e 42, respectivamente, apresentam modelos de fichas técnicas dos módulos fotovoltaicos RS6E-150P, RS6E-155M e RS6C-280P, para condições de 1.000 W/m², AM 1,5 e 25° C.

Figura 40 – Ficha técnica módulo RS6E-150P

- Potência Nominal: 150W
- Tensão de Operação (Vmp): 17,91V
- Corrente de Operação (Imp): 8,38A
- Tensão de circuito aberto (Voc): 22,3V
- Corrente de curto circuito (Voc): 8,82A
- Eficiência: 15,15%
- Número de Células: 36
- Tipo de célula: Silício policristalino
- Vidro, espessura e tipo: Vidro de alta transmitância de 3.2mm;
- Estrutura: Liga de alumínio anodizado;
- Caixa de junção: IP65 ou IP67, 6 Diodos;
- Cabo: 4mm² cabo 900mm (com conector acoplado);
- Conector: MC4 ou compatível com MC4;
- Dimensões painel: 1487 x 666 x 35mm;
- Peso: 11,5kg;
- Inmetro: 004913/2020.

Fonte: Minha Casa Solar, 2023.

Figura 41 – Ficha técnica do módulo RS6E-155M

Condições padrões de teste (STC)

- Potência Nominal: 155W
- Tensão de Operação (Vmp): 20,64V
- Corrente de Operação (Imp): 7,51A
- Tensão de circuito aberto (Voc): 24.46V
- Corrente de curto circuito (Voc): 8.31A
- Tensão máxima do sistema: 1000V
- Eficiência: 18,05%
- Número de Células: 36
- Tipo de célula: Silício Monocristalino
- Dimensões painel: 1270 x 676 x 30 mm
- Peso: 11Kg
- Registro INMETRO: **004913/2020**

Fonte: Minha Casa Solar, 2023.

Figura 42 – Ficha técnica do módulo RS6C-280P

- Potência máxima (Pmax): 280Wp
- Número de células: 60
- Tensão de máxima potência (Vmp): 31,70V
- Corrente da máxima potência (Imp): 8,85A
- Tensão de circuito aberto (Voc): 39,03V
- Corrente do curto-circuito (Isc): 9,24A
- Tipo de células: Silício Policristalino
- Eficiência do módulo: 17,21%
- Dimensões: 1640 x 992 x35 mm
- Peso: 19Kg
- Registro Inmetro - 006114/2020

Fonte: Minha Casa Solar, 2023.

A partir da eficiência, dimensões e custo de cada modelo no mercado, que pode ser consultado na internet, é possível elaborar a tabela 1 que determina o custo por metro quadrado.

Tabela 1 – Dados dos modelos fotovoltaicos

Modelo	Eficiência (%)	Potência (Wp)	Área (m ²)	Custo unitário (R\$)	Custo/m ² (R\$/m ²)
RS6E-150P	15,15	150	0,99	333,87	337,13
RS6E-155M	18,05	155	0,86	324,57	378,06
RS6C-280P	17,21	280	1,63	482,67	296,68

Fonte: Elaboração própria

Após se obter a potência nominal necessária (equação 14), a potência nominal do módulo e área de cada módulo (tabela 1), pode-se encontrar o valor da área requerida de instalação dos painéis de acordo com a equação 15.

$$A = \frac{P_{cc}}{P_{módulo}} \times A_{módulo} \quad (15)$$

Onde:

A = área requerida, em m²

P_{CC} = potência média em corrente contínua necessária, em Wp

$P_{\text{módulo}}$ = potência do módulo, em Wp

$A_{\text{módulo}}$ = Área de cada módulo, em m²

Obtendo-se a área requerida, pode-se calcular a quantidade inteira (Q) de módulos que é necessária para atingir a potência nominal calculada, através da equação 16.

$$Q = \frac{P_{CC}}{P_{\text{módulo}}} \quad (16)$$

Onde:

Q = quantidade de módulos necessários

P_{CC} = potência média em corrente contínua necessária, em Wp

$P_{\text{módulo}}$ = potência do módulo, em Wp

Após o dimensionamento da quantidade de módulos necessários, é importante recalcular a potência efetiva do sistema, visto que se utiliza números inteiros e em alguns casos se acrescenta módulos excedentes para chegar a um número par. Além disso, com a quantidade de módulos definida, tem-se o custo final dos módulos, que é o custo unitário do modelo de módulo multiplicado pela quantidade de módulos, equação 17.

$$C_{\text{final}} = C_{\text{unitário}} \times Q \quad (17)$$

Onde:

C_{final} = custo final dos módulos, em reais

$C_{\text{unitário}}$ = custo unitário dos módulos, em reais

Q = quantidade de módulos necessários

Tendo os custos finais de cada modelo de módulo, é possível definir qual é mais economicamente viável. Por fim, a eficiência do módulo, caso não esteja especificada na ficha técnica do modelo, é definida pela relação entre a potência gerada pelo módulo e a radiação incidente sobre o módulo, obtida através da equação 18.

$$\eta = \frac{I_{mpp} \times V_{mpp}}{I_c \times A} \times 100 \quad (18)$$

Onde:

η = eficiência do módulo fotovoltaico

I_{mpp} = corrente máxima de pico, em amperes (A)

V_{mpp} = corrente máxima de potência, em volt (V)

I_c = irradiância solar, em W/m²

A = área útil do módulo, em m²

- Etapa 5. Dimensionamento do inversor

A partir das características do módulo fotovoltaico definido, analisam-se os modelos de inversores com o objetivo de definir uma escolha mais otimizada e compatível com o componente proposto. A escolha do inversor com uma potência pouco menor que a potência do arranjo fotovoltaico é favorável, pois a eficiência do inversor é relativamente baixa para as gamas de potência operacionais inferiores a 10% da potência nominal.

O número de inversores é derivado da potência estimada para o sistema fotovoltaico e do tipo de sistema escolhido. A relação das potências do módulo fotovoltaico e do inversor respeitam o seguinte intervalo:

$$0,7 \times P_{FV} < P_{INVmax} < 1,2 \times P_{FV} \quad (19)$$

Onde:

P_{FV} = potência máxima nominal do gerador fotovoltaico

P_{INVmax} = potência CC máxima nominal do inversor

Após a escolha do inversor, é importante verificar se a corrente máxima de potência do módulo é menor que a corrente máxima de MPPT do inversor, para que não haja perda de potência. Da mesma forma, deve-se verificar se a corrente de curto-circuito do módulo é menor que a máxima corrente de curto do inversor, pois caso ultrapasse, existe um alto risco de dano ao inversor.

$$I_{mpmódulo} < Máx. corrente de MPPT_{inversor} \quad (20)$$

$$I_{scmódulo} < Máx. corrente de curto_{inversor} \quad (21)$$

Para o dimensionamento do inversor, é importante analisar as situações operacionais extremas de inverno e verão, pois a temperatura influencia na tensão do sistema. No entanto, como o Brasil não apresenta amplitudes significativas de variações de temperatura, o cálculo pode ser realizado sem considerar um decréscimo na eficiência das células por esse motivo. Nesse caso, considera-se a temperatura das células no padrão a 25 °C.

A partir da máxima tensão de entrada do inversor e da tensão em circuito aberto dos módulos, é possível calcular o número máximo de módulos conectados em série por fileira, conforme a equação 22.

$$N_{m\acute{a}x} \leq \frac{V_{m\acute{a}x, inversor}}{V_{OC, m\acute{o}dulo}} \quad (22)$$

Onde:

$N_{m\acute{a}x}$ = número máximo de módulos conectados em série por fileira

$V_{m\acute{a}x, inversor}$ = máxima tensão de entrada do inversor, em volts (V)

$V_{OC, m\acute{o}dulo}$ = tensão em circuito aberto do módulo, em volts (V)

O número mínimo de módulos por fileira também deve ser calculado, ele é o quociente entre a tensão mínima MPP de entrada do inversor e a tensão MPP do módulo, de acordo com a equação 23.

$$N_{m\acute{i}n} \geq \frac{V_{MPPmin, inversor}}{V_{MPP, m\acute{o}dulo}} \quad (23)$$

Onde:

$N_{m\acute{i}n}$ = número mínimo de módulos conectados em série por fileira

$V_{MPPmin, inversor}$ = tensão mínima MPP de entrada no versor, em volts (V)

$V_{MPP, m\acute{o}dulo}$ = tensão MPP do módulo, em volts

Por fim, deve-se verificar se a corrente do arranjo FV não ultrapassa a corrente limite de entrada do inversor. O número máximo de fileiras em paralelo deve ser menor ou igual ao quociente entre a corrente máxima de entrada do inversor e a corrente máxima na fileira de módulos conectados em série, conforme a equação 24.

$$N_{fileira} \leq \frac{I_{m\acute{a}x, inversor}}{I_{n, fileira}} \quad (24)$$

Onde:

N_{fileira} = número máximo de fileiras em paralelo

$I_{\text{máx, inversor}}$ = corrente máxima de entrada do inversor

$I_{\text{n, fileira}}$ = corrente máxima na fileira de módulos conectados em série

Realizando uma pesquisa de mercado, pode-se obter modelos de fichas técnicas de diferentes inversores. A figura 43, 44 e 45, respectivamente, apresentam as fichas técnicas dos inversores SUN1600G3, ELITE5000 e SUN2000G3.

Figura 43 – Ficha técnica do inversor SUN1600G3

<p>Parâmetros de entrada:</p> <ul style="list-style-type: none"> • MPPT Faixa de Tensão: 25V - 55V • Faixa de Tensão de Operação: 20V - 60V • Tensão máx. de entrada: 60V • Corrente DC por MPPT: 13A • Corrente de Curto por MPPT: 16A • Rastreadores MPPT 4 <p>Parâmetros de saída:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Potência nominal de saída CA: 1600W • Tensão nominal de saída: 220v / 176~242Vca e 230v / 185~265Vca • Frequência nominal: 50, 60Hz • Faixa de frequência: 45~55Hz / 55~65Hz • Corrente máx. de saída: 7.3A • Unidades por cabo tronco 4 <p>Eficiência</p> <ul style="list-style-type: none"> • Eficiência Máxima 96,5% <p>Dados Gerais</p> <ul style="list-style-type: none"> • Peso bruto: 5,2Kg • Dimensão: 42,5mm x 267mm x 300mm • Quatro Mppts independentes • Monitoramento Wifi integrado a nível de módulo • Ampla faixa de tensão suportando redes rurais • Capacidade para módulos de 210~600W • Grau de proteção IP67
--

Fonte: Minha Casa Solar, 2023.

Figura 44 – Ficha técnica do inversor ELITE5000

<p>Parâmetros da Entrada</p> <ul style="list-style-type: none"> • Potência fotovoltaica nominal: 5000W • Oversizing¹ máximo: 30% • Potência fotovoltaica máxima recomendada (kWp): 6,5 • Tensão mínima de entrada CC (partida): 90/70V • Tensão máxima de entrada CC (limite): 600V • Entrada MPPT: 2 (Faixa de operação 70V~580V) • Corrente CC máxima para cada MPPT: 11A • Número de MPPTs independentes: 02 • Conector de entrada fotovoltaica CC: MC4 • É recomendado o uso de Painéis Fotovoltaicos de 60 e 72 Células <p>¹ oversizing é o superdimensionamento que o inversor suporta em relação a sua capacidade nominal</p> <p>Parâmetros da Saída:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Potência fotovoltaica nominal: 5,0kW • Potência Máxima em CA: 5,5kVA • Tensão mínima de entrada CC (partida): 90/70V • Tensão máxima de entrada CC (limite): 600V • Conexão CA: Monofásica ou Bifásica • Tensão nominal de saída CA: 220V (Fase+Fase ou Fase+Neutro - Faixa de operação: 176V~242V) • Corrente nominal de saída: 23,8 A • Frequência nominal de saída: 60Hz (Faixa de operação: 57,5Hz~62Hz) • Fator de Potência > 0,99 <p>Eficiência:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Eficiência máxima: 98% • THD: <3,00% <p>Dados Gerais:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dimensões: 285mm x 336mm x 125mm • Peso líquido: 12,8Kg • Ambiente de operação: Interno ou externo • Montagem: Fixação na parede -Acompanha Suporte • Temperatura de operação: -25°C a +60°C • Grau de proteção: IP65 (protege totalmente contra poeira e jatos de água) • Refrigeração: Natural • Garantia: 4 anos e 9 meses contra defeitos de fabricação - Mediante Cadastro <p>Proteções internas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Anti-ilhamento; • Protetor de Surto CA Tipo III • Sobre/sub tensão; • Sobre/subcorrente; • Sobre/sub frequência; • Proteção contra sobrecarga; • Inicialização automática fora de fase; • Proteção de temperatura; • Proteção contra injeção de componente CC; • Proteção contra inversão de polaridade. • Religamento automático fora de fase
--

Fonte: Minha Casa Solar, 2023.

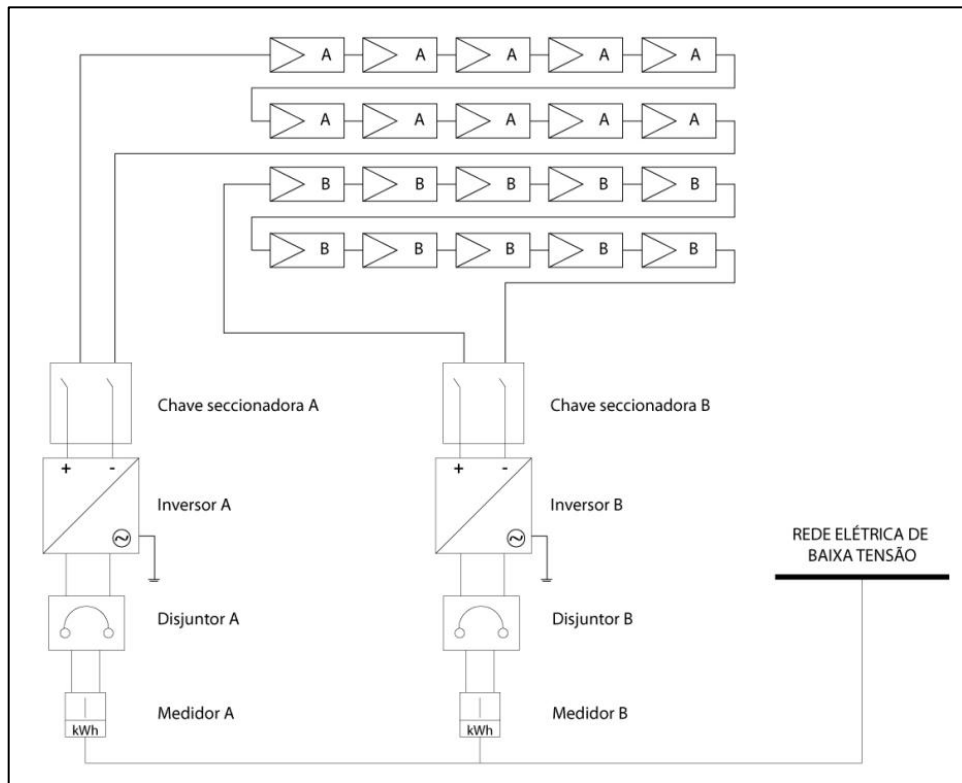
Figura 45 – SUN2000G3

<p>Parâmetros de entrada:</p> <ul style="list-style-type: none"> • MPPT Faixa de Tensão: 25V - 55V • Faixa de Tensão de Operação: 20V - 60V • Tensão máx. de entrada: 60V • Corrente DC por MPPT: 13A • Corrente de Curto por MPPT: 16A • Rastreadores MPPT 4 <p>Parâmetros de saída:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Potência nominal de saída CA: 2000W • Tensão nominal de saída: 220v / 176~242Vca e 230v / 185~265Vca • Frequência nominal 50, 60Hz • Faixa de frequência 45~55Hz /55~65 • Corrente máx. de saída 9.1A • Unidades por cabo tronco 3 <p>Eficiência</p> <ul style="list-style-type: none"> • Eficiência Máxima 96,5% <p>Dados Gerais</p> <ul style="list-style-type: none"> • Peso bruto: 5,2 Kg • Dimensão: 42,5mm x 267mm x 300mm (Altura x Largura x Comprimento) • Quatro Mppts independentes • Monitoramento Wifi integrado a nível de módulo • Ampla faixa de tensão suportando redes rurais • Capacidade para módulos de 210~600W • Grau de proteção IP67
--

Fonte: Minha Casa Solar, 2023.

Após o cálculo de dimensionamento dos inversores, é possível construir um diagrama esquemático do sistema fotovoltaico proposto. A figura 46 é uma exemplificação retirada do diagrama referente ao dimensionamento realizado por Torres (2012) de um sistema de 2,8 kWp em Porto União/SC.

Figura 46 – Diagrama esquemático do sistema fotovoltaico de 2,8 kWp de PortoUnião/SC com os módulos conectados em série



Fonte: Torres, 2012.

A partir do dimensionamento dos inversores, pode-se estimar a geração de energia do sistema.

- Etapa 6. Estimativa da geração de energia do sistema fotovoltaico dimensionado

Após se obter a potência nominal do módulo fotovoltaico, o valor de irradiação solar média mensal, e um rendimento médio, que comumente varia de 70% a 90%, tanto para o setor residencial, quanto para o setor industrial, pode-se calcular a produção de energia elétrica anual. Através da equação 25, obtém-se a energia mensal produzida em quilowatt-hora (kWh).

$$E_{\text{mensal}} = D \times P_{CC} \times G \times R \quad (25)$$

Onde:

E_{mensal} = energia mensal produzida, em kWh

D = número de dias no mês

P_{CC} = potência nominal em corrente contínua, em kW

G = irradiação solar média diária, em kWh/m².dia

R = rendimento do sistema, inversores e conexões

Caso não haja a irradiação solar média mensal, pode-se calcular, pela equação 26, a energia em função da irradiação diária recebida no plano do painel, dividida pela irradiância de 1.000 W/m² e expressa em número de horas.

$$E_{anual} = P_{CC} \times R \times G \times 365 \quad (26)$$

Onde:

E_{anual} = energia anual produzida, em kWh/ano

P_{CC} = potência em corrente contínua, em kW

R = rendimento do sistema, inversores e conexões

G = irradiação solar diária recebida pelo plano dividida por 1.000 W/m², em horas

A partir da energia anual produzida, calcula-se a produtividade anual do sistema dimensionado, conforme a equação 27.

$$P_{anual} = \frac{\sum E_{mensal}}{P_{CC}} \quad (27)$$

Onde:

P_{anual} = produtividade anual do sistema

E_{mensal} = energia mensal produzida, em kWh

P_{CC} = potência nominal em corrente contínua, em kW

Porém, a energia entregue pelo sistema não é equivalente a calculada, pois o sistema não opera em tempo integral na sua potência nominal. O fator de capacidade é o índice que mensura essa razão, representado em porcentagem e calculado de acordo com a equação 28.

$$FC = \frac{E_g}{P_{nom} \times \Delta t} \times 100 \quad (28)$$

Onde:

FC = fator de capacidade do sistema

E_g = energia gerada pelo sistema em instante t , em kWh

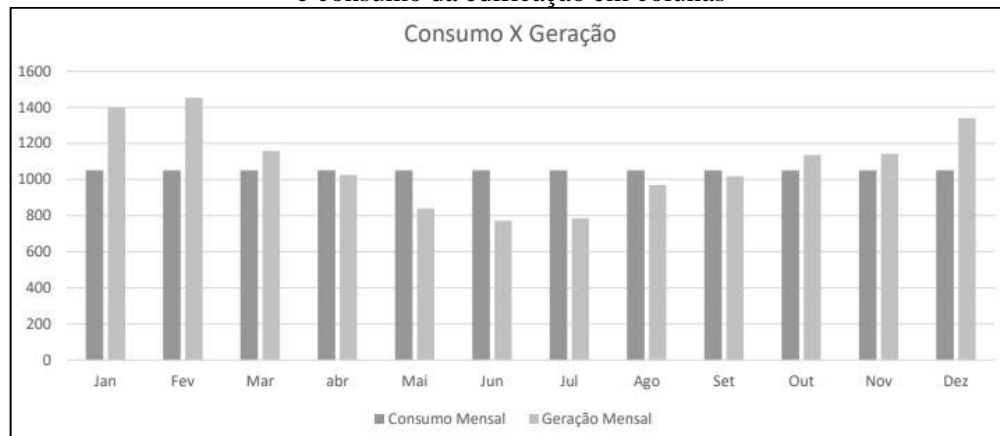
P_{nom} = potência de pico do sistema, em kWp

Δt = período de integração de um ano, equivalente a 8.760 horas (365 dias multiplicado por 24 horas)

- Etapa 7. Análise comparativa entre a geração do sistema e o consumo da edificação estudada

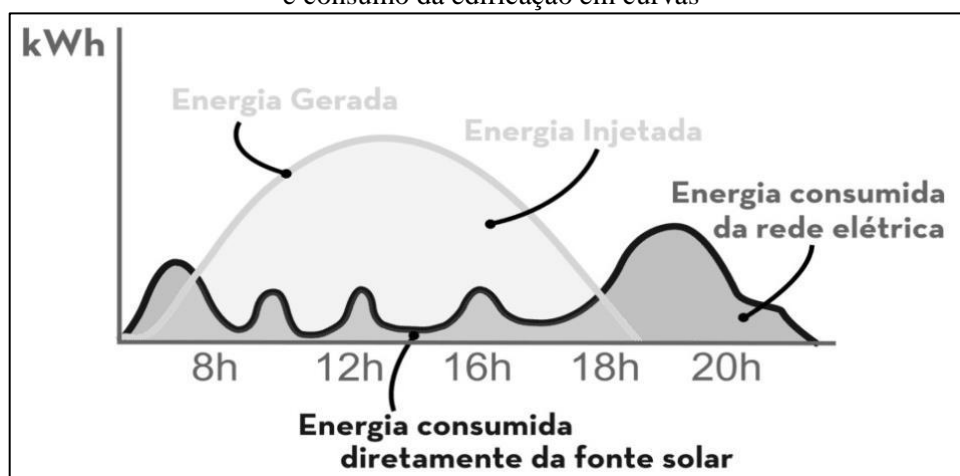
Conhecendo a demanda do objeto de estudo e comparando com o dimensionamento realizado, é possível comparar a geração e o consumo da relação sistema-local existente. Essa comparação pode ser graficamente vista de diferentes formas, as mais utilizadas são o gráfico de colunas, figura 47, e o gráfico de curva, figura 48.

Figura 47 – Comparação entre geração do sistema e consumo da edificação em colunas



Fonte: MACSOL, 2022

Figura 48 – Comparação entre geração do sistema e consumo da edificação em curvas



Fonte: Solstício Energia, 2023.

Como visto no referencial teórico, os picos de demanda de energia em uma residência são na parte da manhã e noite, onde a insolação é baixa ou nula, enquanto na parte da tarde, quando a geração de energia alcança o seu pico, as demandas de energia das residências são próximas a mínima. Para contornar esse problema, a Resolução nº 1.059, de 7 de fevereiro de 2023 da ANEEL possibilita a conversão da energia excedente injetada na rede em crédito.

Além de benéfico para o proprietário do sistema fotovoltaico, a implantação do sistema traz impactos ambientais e econômicos ao entorno. Uma das consequências é a energia excedente que é concedida para as concessionárias, que contribui para a redução da carga, diminuindo os riscos de *blackout*, fenômeno que ocorre quando a demanda excede a capacidade geradora e os limites operativos do sistema de transmissão.

2.4.1.2 Divisão Ambiental

Ambientais: é de extrema importância a avaliação dos impactos ambientais dos painéis solares, analisando a geração e economia da emissão de gases poluentes na atmosfera (VALLE, 2019).

- Etapa 1. Impactos ambientais

Impacto ambiental é o resultado de qualquer atividade humana que altere as condições naturais da saúde, bem-estar da população, das atividades sociais e econômicas, da biota e das condições estéticas e sanitárias ambientais e da qualidade dos recursos ambientais, sendo positiva ou negativa (PUPIN, 2019 apud CONAMA, 1986).

Os processos de extração da matéria prima e confecção dos painéis fotovoltaicos, bem como o seu transporte, de acordo com Pupin (2019), gera impactos ambientais negativos significativos. A Figura 49 demonstra os valores dos impactos ambientais gerados pela produção de 1 m² de painel fotovoltaico.

Figura 49 – Dados de valores dos impactos ambientais gerados pela produção de um m² de painel fotovoltaico

CATEGORIA DE IMPACTO	VALOR	UNIDADE
Depleção abiótica	8,97E-02	kg Sb eq
Depleção abiótica de combustíveis fósseis	4,26E+04	MJ
Aquecimento global	3,18E+03	kg CO ₂ eq
Depleção da camada de ozônio estratosférico	5,32E-04	kg CFC-11 eq
Toxicidade humana	1,39E+03	kg 1,4-DB eq
Ecotoxicidade aquática (água doce)	1,06E+03	kg 1,4-DB eq
Ecotoxicidade aquática (marinha)	5,39E+06	kg 1,4-DB eq
Ecotoxicidade terrestre	3,04E+00	kg 1,4-DB eq
Formação de compostos foto-oxidantes	8,98E-01	kg C ₂ H ₄ eq
Acidificação	2,10E+01	kg SO ₂ eq
Eutrofização	5,85E+00	kg PO ₄ ⁻³ eq

Fonte: PUPIN, 2019.

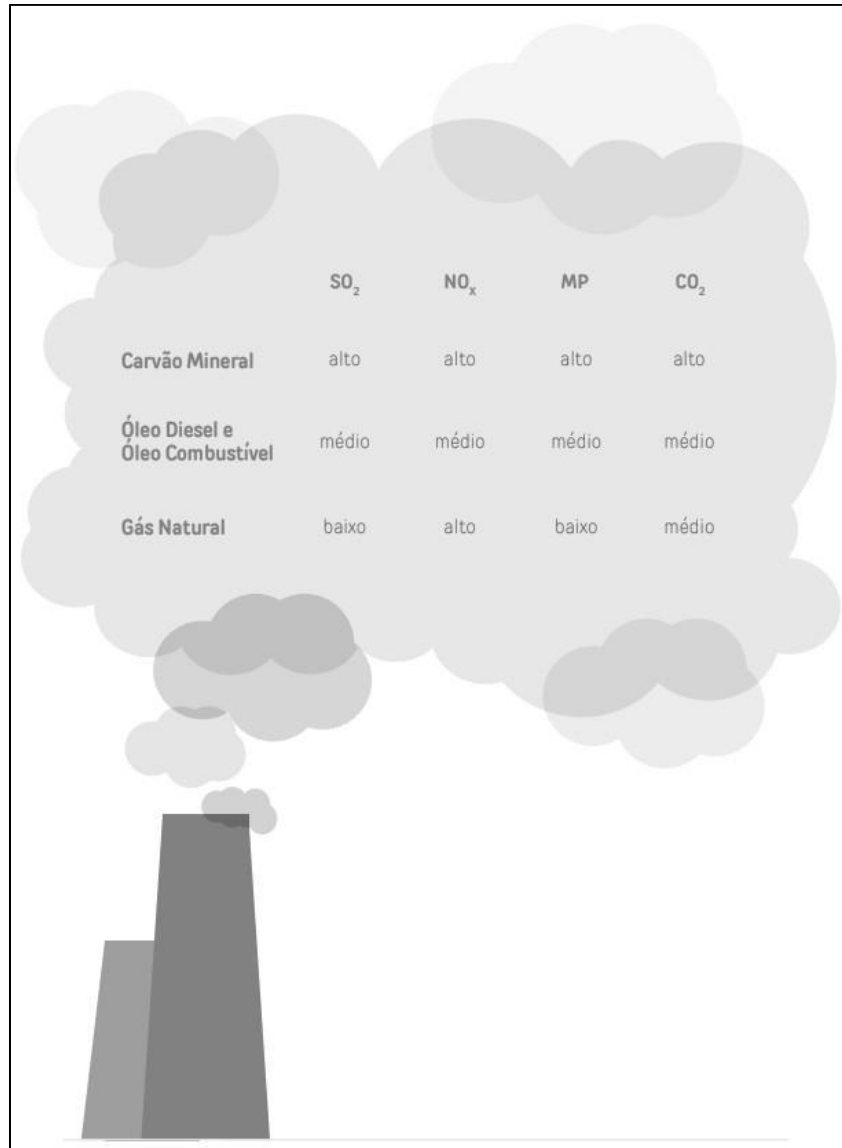
Além dos impactos da produção do painel fotovoltaico, os impactos das produções dos outros componentes, como o inversor e, além disso, os impactos ambientais do transporte marítimo e rodoviário de todos os componentes também deve ser calculado. Em decorrência da utilização dos painéis fotovoltaicos ter começado há cerca de 25 a 30 anos, os primeiros painéis fotovoltaicos ainda estão em utilização, visto sua vida útil média de 20 a 25 anos. Por isso, não existem registros dos métodos de descarte dos painéis, embora estudos iniciais tenham despertado o interesse de diversos pesquisadores como Radziemska (2010), Zeng (2004) e Brower (2011), Pupin (2019). Para o presente trabalho, como um estudo de viabilidade da instalação dos painéis fotovoltaicos em uma residência, não se dimensionará os valores dos impactos ambientais gerados por essas etapas.

A implantação da geração fotovoltaica em residências diminui a necessidade de novas usinas hidrelétricas, construções que causam um impacto ambiental negativo, visto que o excedente gerado pelo sistema é enviado para o uso da concessionária, funcionando como um reservatório de energia.

De acordo com Inatomi e Udaeta (2005), quanto a quantificação dos impactos ambientais em um sistema de energia solar, pode-se ter: a comparação da emissão dos poluentes por energia gerada com o recurso solar e a gerada pelas fontes de energia não renováveis; os riscos de acidentes em manutenções; os riscos de incêndio, entre outros. Como a energia fotovoltaica não gera resíduos e nem gases poluentes durante sua vida útil, para fins

comparativos, a figura 50 demonstra os gases poluentes emitidos pela geração de energia em termelétricas.

Figura 50 – Gases emitidos pela geração de energia em termelétrica



Fonte: Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA), 2016.

Após analisar os impactos ambientais da instalação de painéis fotovoltaicos, pode-se realizar a análise econômica do resultado das decisões tomadas no dimensionamento.

2.4.1.3 Divisão Econômica

Para a análise econômica do sistema, são considerados os gastos com os componentes utilizados, ou seja, os painéis fotovoltaicos, inversores, estruturas de montagem e equipamentos auxiliares, se necessário, a energia economizada e os custos com as instalações dos mesmos,

Junior *et al.* (2018). Também é realizado o estudo do período de retorno (*payback*) simples e descontado, do Valor Presente Líquido (VPL) e da Taxa Interna de Retorno (TIR). Por fim, é realizada uma comparação entre o custo do sistema e a taxa Selic, afim de verificar a viabilidade econômica do sistema.

- Etapa 1. Análise econômica e retorno do investimento

As tarifas de energia variam de acordo com a concessionária, o grupo de consumidor e o local de aplicação. Geralmente, nas contas de energia, são considerados os impostos que incidem sobre as tarifas, como o imposto sobre circulação de mercadorias (ICMS), programa de integração social (PIS/PASEP) e a contribuição para o financiamento da seguridade social (COFINS), entre outros itens presentes na fatura. Com o consumo médio mensal, pode-se calcular o custo total com energia elétrica para o período de um ano.

Tendo como base a estimativa da geração de energia elétrica a partir dos painéis fotovoltaicos, a economia durante um ano pode ser calculada através da equação 29.

$$Economia = E_g \times T \quad (29)$$

Onde:

Economia = valor economizado durante o ano, em reais

E_g = energia produzida em um ano pelo sistema fotovoltaico, em kWh

T = tarifa cobrada pela concessionária, em R\$/kWh

O próximo passo é calcular o custo do sistema. O preço dos módulos pode ser encontrado no mercado. Para os painéis SUN1600G3, ELITE5000 e SUN2000G3, utilizados como exemplo, encontram-se os valores de mercado de R\$ 333,87, R\$ 324,57 e R\$ 482,67. Os preços dos inversores, da estrutura metálica e dos materiais elétricos também pode ser encontrada no mercado.

De acordo com Torres (2012), os custos estimados para a instalação dos sistemas fotovoltaicos ainda são altos na realidade brasileira, devido à falta de um mercado expressivo nacional. Após o levantamento dos custos de aquisição do sistema, pode-se calcular o período de retorno do investimento.

O período de retorno simples (PRS) ou *payback* simples é a relação entre o investimento feito inicialmente com a economia média obtida na fatura de energia elétrica. O cálculo do PRS é realizado através da equação 30.

$$PRS = \frac{C_{inicial}}{Eco_{mês}} \quad (30)$$

Onde:

PRS = período de retorno simples, em meses

$C_{inicial}$ = investimento inicial, em reais

Eco_{ano} = economia média por mês, em reais

Um dos problemas do *payback* simples é não considerar o valor do dinheiro no tempo. Para isso, utiliza-se o *payback* descontado, que é calculado através da equação 31.

$$Payback_{descontado} = i - \frac{S_i}{FC_{(i+1)}} \quad (31)$$

Onde:

i = mês de retorno

S_i = saldo no mês i , em reais

$FC_{(i+1)}$ = fluxo no mês posterior a i , em reais

Deve-se analisar o período de retorno do sistema com a sua vida útil. Após a análise, pode-se calcular o rendimento proveniente da energia excedente que é injetada na rede elétrica, ao final da vida útil do sistema. Para entender o próximo passo, é necessária a definição de alguns conceitos de matemática financeira, que foram baseados nos livros “Matemática Financeira” escrito por Vianna (2018), e “Finanças Corporativas e Valor” por Neto (2014), sendo eles: valor futuro, valor presente líquido, juros, taxa de juros, inflação e taxa interna de retorno.

Valor futuro (VF): é a quantia em dinheiro no fim da aplicação, sendo a soma do capital aplicado e os juros produzidos em um período de tempo. Também pode ser chamado de valor final, saldo, montante, entre outros.

Juros (J): é a remuneração obtida pelo uso do capital por um intervalo de tempo.

Taxa de juros (i): é o coeficiente resultante da razão entre juros e capital. Pode ser representada em valor unitário ou percentual.

Inflação: é o valor percentual da desvalorização da moeda em um intervalo de tempo.

Valor presente líquido (VPL): é obtida pela diferença entre o valor presente dos benefícios líquidos de caixa, previstos para cada período do horizonte de duração do projeto em estudo, e o valor presente do investimento realizado. Quando o VPL for maior ou igual a zero, o investimento será considerado atraente. É expresso pela equação 32.

$$VPL = \left[\sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} \right] - \left[I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{I_t}{(1+i)^t} \right] \quad (32)$$

Onde:

VPL = valor presente líquido, em reais

FC = fluxo de caixa líquido de cada período, expresso em reais

i = taxa de desconto do projeto, representado pela rentabilidade mínima requerida

I_0 = investimento processado no momento zero, em reais

I_t = investimento previsto em cada período subsequente, em reais

Taxa interna de retorno (TIR): é definida como a taxa de juros para a qual o valor presente dos recebimentos é exatamente igual ao valor presente dos desembolsos, ou seja, o momento em que o fluxo de caixa do projeto atinge o equilíbrio. A TIR mede a rentabilidade de um investimento expressa em termos de juros composta equivalente periódica, através da equação 33.

$$I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{I_t}{(1+i)^t} = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} \quad (33)$$

Onde:

I_0 = investimento processado no momento zero, em reais

I_t = investimento previsto em cada período subsequente, em reais

i = taxa interna de retorno

FC = fluxos previstos de entradas de caixa em cada período da vida útil do projeto

Taxa mínima de atratividade (TMA): representa o mínimo que o investidor se propõe a ganhar quando aplica os seus recursos. Quando a TMA é maior do que a TIR, significa que o sistema não é viável economicamente. Entretanto, quando a TMA é menor do que a TIR, significa que o sistema é viável economicamente.

A partir dos conceitos apresentados, utiliza-se a equação 34 para encontrar o valor futuro ao final da vida útil do sistema, que relaciona o valor do dinheiro no tempo.

$$VF = VP \times (1 + i)^n \quad (34)$$

Onde:

VF = valor futuro ao final da vida útil

VP = valor presente

i = taxa de juros (TIR e Inflação)

n = número de anos da vida útil do sistema

Utilizando as equações apresentadas, é possível tabular a análise financeira do objeto de estudo. Ao final do estudo econômico, consegue-se definir se o sistema fotovoltaico dimensionado é viável ou não. Por fim, sabe-se que a energia fotovoltaica é uma energia renovável livre de gases poluentes na sua operação. Apesar da sua alta gama de vantagens, a sua baixa popularidade é consequência de uma série de desvantagens que o modelo de geração de energia ainda apresenta.

2.4.2 Vantagens e desvantagens do sistema fotovoltaico

Algumas considerações são importantes destacar para implementação de sistemas fotovoltaicos em residências, como as suas vantagens e desvantagens. Diferentes pesquisadores como a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2023); DA COSTA (2012); VALLE (2019); IZIDORO *et al.* (2010) têm colaborado com estudos que comprovam os benefícios da geração de energia solar como energia renovável. Ao mesmo tempo, consideram as desvantagens que o sistema apresenta. A tabela 3 é uma síntese dos tópicos abordados nas pesquisas realizadas.

Tabela 2 – Vantagens e desvantagens da geração de energia solar

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> – A fonte de energia é infinita – Por ser proveniente da energia solar; – Sua geração de energia não contribui para a poluição durante a vida útil – Sem emissões, combustões ou desperdícios radioativos; 	<ul style="list-style-type: none"> – É uma energia de baixa densidade – O rendimento de conversão do módulo em energia ainda é baixo, as células de alto rendimento de silício cristalino têm um limite teórico de aproximadamente 25%;

-
- **Baixo custo de funcionamento – Não necessita de combustíveis para seu funcionamento e a manutenção é quase inexistente;**
 - **Elevado tempo de vida útil – Tempo de vida útil > 20 anos;**
 - **Rápida Instalação;**
 - **Pode ser instalada em edifícios novos ou existentes – Não necessita de estar presente no projeto inicial da construção, podendo ser instalada a qualquer momento;**
 - **Pode ser instalada em qualquer tipo de edifício (casa, prédio, galpão, etc.);**
 - **Sustentável – É a energia renovável mais utilizada no Mundo, além de não ser poluente, é silenciosa e não perturba o ambiente;**
 - **Incentivo fiscal – Como o Programa de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico da Indústria de Semicondutores (PADIS), que teve incluído o segmento de fotovoltaicos em 2023, reduzindo a 0% alíquotas de Imposto de Importação, IPI e PIS-COFINS, entre outros benefícios, para a produção de componentes que compõem o sistema fotovoltaico. Também há o Leilão de Energia Reserva (LER), a PRONASOLAR e o Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (IFAE);**
- Custo elevado de instalação e aquisição de componentes – A tecnologia da fabricação dos módulos é muito sofisticada, elevando o custo dos materiais;
 - Baixa eficiência no armazenamento de energia produzida – Em locais isolados ou com grande preocupação ambiental, se tratando de um sistema *off grid*, o investimento do sistema fotovoltaico se torna ainda mais elevado para o funcionamento noturno;
 - Transformação estética na construção.
-

Fonte: Elaboração própria

Após a apresentação dos princípios de funcionamento dos sistemas fotovoltaicos, os componentes que o compõem, as aplicações da energia fotovoltaica em residências e os indicadores de análise de viabilidade técnica, econômica e ambiental que auxiliam nos cálculos para o dimensionamento do sistema fotovoltaico ideal para cada projeto, é possível realizar o dimensionamento para qualquer estudo de caso e, por fim, analisar as vantagens e desvantagens trazidas pela implementação dos módulos. Podendo-se concluir se, para o determinado caso, é viável ou não.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

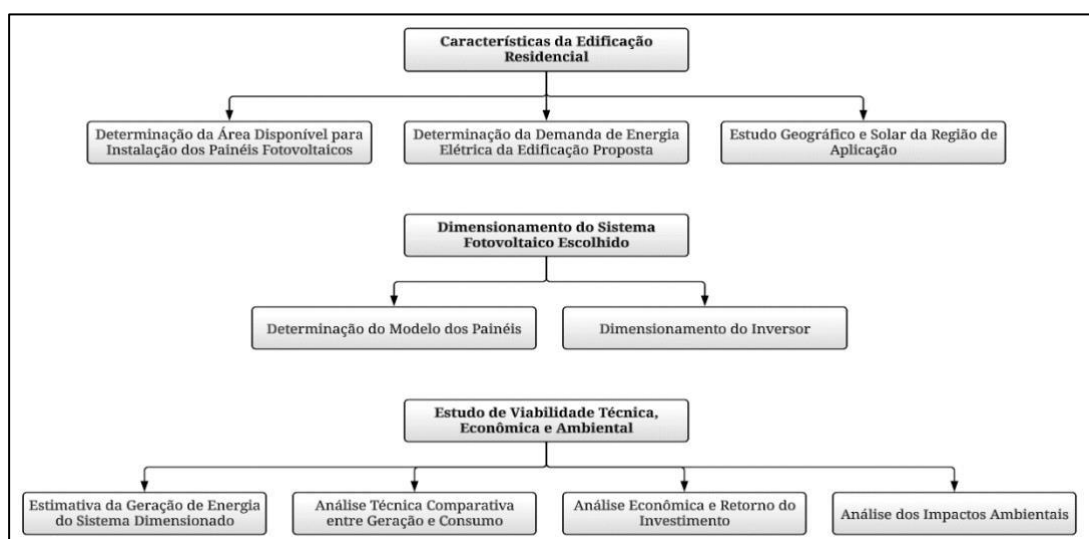
Uma pesquisa científica necessita definir o objeto de estudo e, a partir dele, construir um processo de investigação, delimitando o que será estudado, Ventura (2007). Esse processo conta com diferentes métodos práticos e teóricos. Para o presente trabalho, será realizado o estudo de caso a partir de revisões bibliográficas.

O estudo de caso foi usado primeiramente na área médica e psicológica, com o intuito de compreender as causas e os funcionamentos de uma patologia específica, CEBRAP (2016). O método é uma investigação com a finalidade de descrever e analisar acontecimentos, agentes e situações complexas, havendo o dimensionamento das variáveis em interconexão. Para isso, utilizam-se técnicas variadas em escalas empíricas distintas e, juntamente, a integração dos dados por pesquisadores de diferentes áreas técnicas e do conhecimento (CEBRAP, 2016).

De acordo com Yin (2005), sobre a quantidade de casos, não há uma preocupação na quantidade proposta, embora seja uma condição de relevância para o próprio pesquisador. Segundo ele, o que se estima é a quantidade de certezas e incertezas que o pesquisador tem sobre os padrões de comportamento do objeto de estudo. Sendo assim, um único caso mais vulnerável ao erro. Porém, como evidenciam Meffezzolli e Boehs (2008), um estudo de caso único pode contribuir conceitualmente e metodologicamente para uma área de estudo, se bem conduzido.

Para o presente trabalho, após o estudo dos temas relevantes para sua elaboração, expostos no Capítulo 2, serão cumpridas as etapas conforme o fluxograma apresentado na figura 51

Figura 51 – Fluxograma das Atividades Desenvolvidas

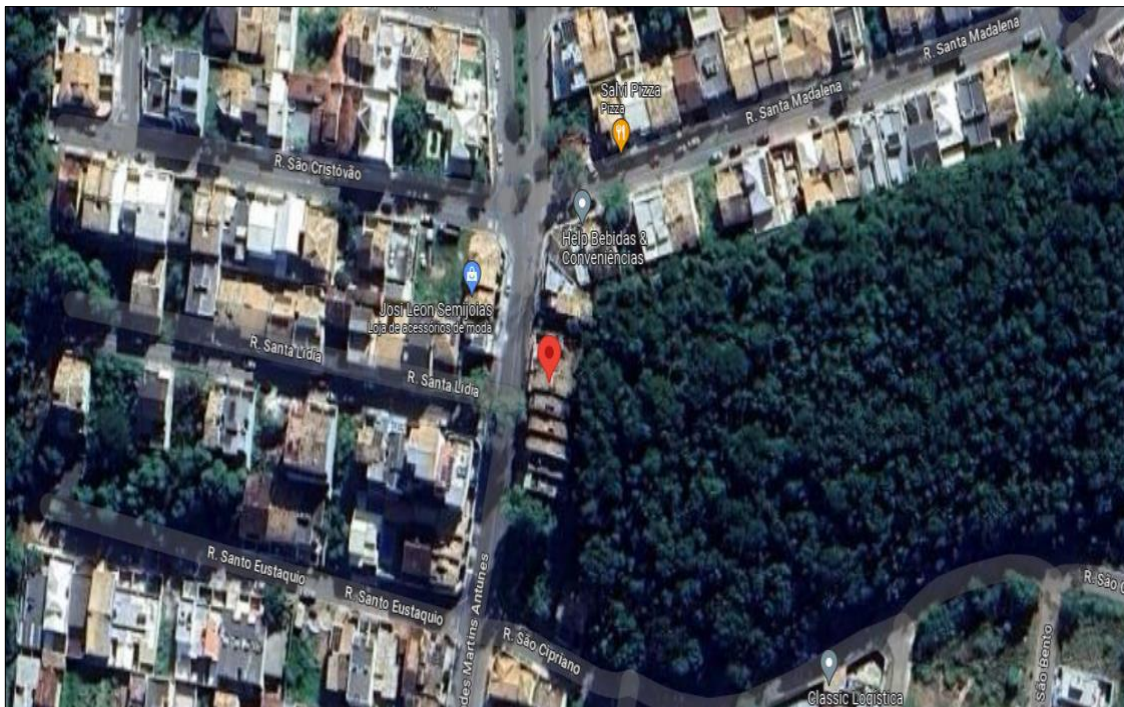


Fonte: Elaboração Própria

3.1 CARACTERÍSTICAS DA EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL

O edifício residencial unifamiliar em estudo é uma construção já existente. Projeto de 2013 e construção em 2014, localizado no bairro Jardim Vitória, Macaé, Rio de Janeiro, no endereço Av. Berta Fernandes Martins Antunes, número 261. A figura 52 representa a vista por satélite da região estudada, referente às coordenadas -22.381030, -41.796768.

Figura 52– Vista superior por satélite do objeto em estudo



Fonte: Google Maps (2023).

O edifício residencial de 3 pavimentos, onde residem 4 pessoas adultas e 12 cachorros, foi construído em um terreno de 100 m² e tem área construída total de 137,67 m². A figura 53 representa a fachada principal da residência.

Figura 53 – Fachada principal do objeto de estudo



Fonte: Elaboração própria, 2023.

Após a contextualização da residência proposta, podem-se iniciar os cálculos de dimensionamento.

4 RESULTADOS

Esta sessão está organizada em 3 etapas. Na etapa 1 serão definidas as características da edificação residencial, determinando-se a área disponível para a instalação dos painéis fotovoltaicos, a demanda de energia elétrica na edificação proposta e o estudo geográfico e solar da região de aplicação. Na etapa 2 será dimensionado o sistema fotovoltaico escolhido, com a determinação do modelo dos painéis e o dimensionamento do inversor. Na etapa 3 serão realizados os estudos de viabilidade técnica, que consiste na estimativa da geração de energia do sistema dimensionado e na análise técnica comparativa entre geração e consumo; viabilidade econômica, que consiste no retorno do investimento necessário para implementação do sistema e viabilidade ambiental, que consiste na análise dos impactos ambientais.

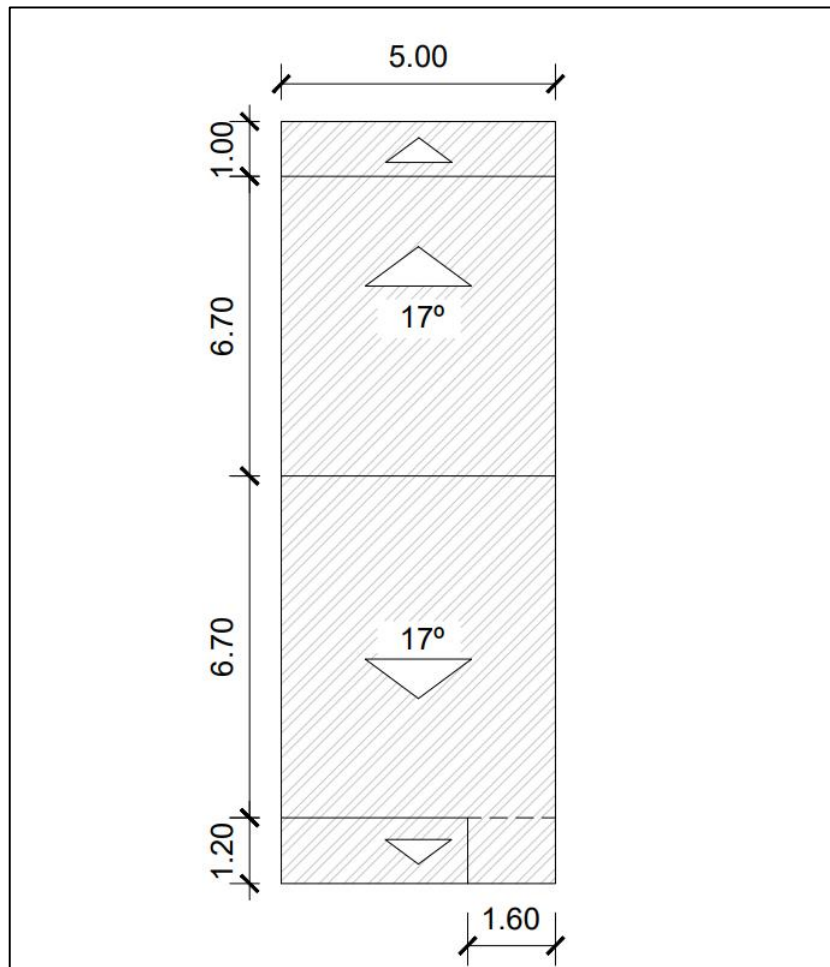
4.1 ETAPA 1. CARACTERÍSTICAS DA EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL

As características da edificação residencial consistem na determinação da área disponível para a instalação dos painéis fotovoltaicos, na demanda de energia elétrica na edificação proposta e no estudo geográfico e solar da região de aplicação.

4.1.1 Determinação da área disponível para instalação dos Painéis Fotovoltaicos

Com o auxílio do *software* AutoCAD, elaborou-se o projeto do telhado colonial da edificação, figura 54, e é possível verificar as possíveis áreas de cobertura para a instalação dos painéis fotovoltaicos.

Figura 54 – Planta de cobertura



Fonte: Elaboração própria.

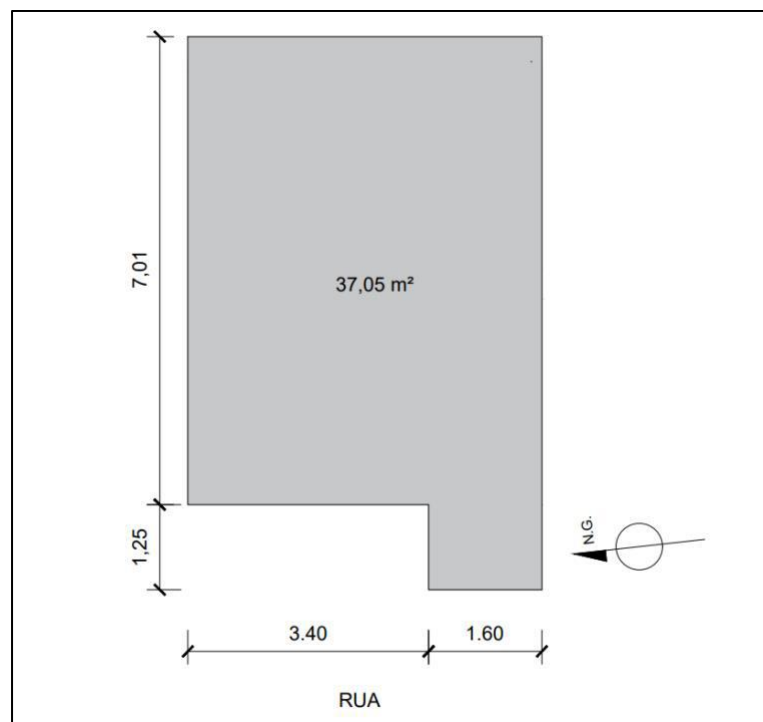
Como nenhuma face do telhado está apontado para o Norte geográfico, situação ideal de aplicação, precisa-se escolher em qual banda será instalado o sistema fotovoltaico. A parte posterior, além de possuir uma menor área útil, conta com o sombreamento gerado pela vegetação presente, figura 55, o que dificultaria a irradiação solar pela manhã. Escolheu-se a instalação dos painéis na parte frontal, com inclinação de 17° , por apresentar maior área útil, indicada na figura 56, bem como sua respectiva área.

Figura 55 – Situação da parte posterior da residência



Fonte: Elaboração própria.

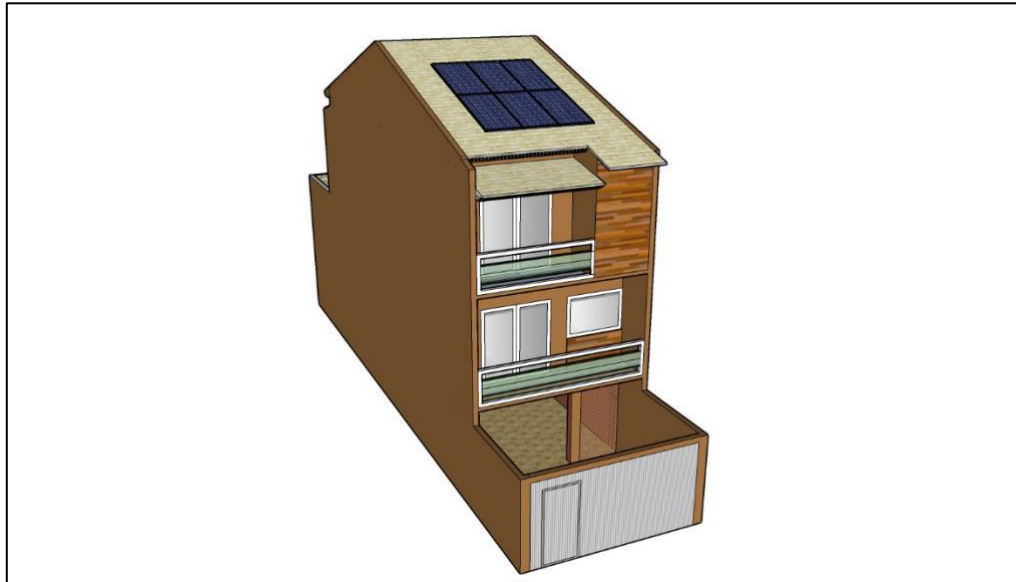
Figura 56 – Área útil para instalação dos painéis.



Fonte: Elaboração própria.

Foi escolhida a solução aditiva, onde os módulos são fixados no telhado, através de uma estrutura metálica. Com o auxílio do software *Sketchup*, foi possível simular a aparência da residência após a instalação dos módulos, figura 57.

Figura 57 – Esboço da residência após a instalação dos módulos FV



Fonte: Elaboração própria.

4.1.2 Determinação da Demanda de Energia Elétrica da Edificação Proposta

Para o presente trabalho, serão realizados os cálculos com o consumo de energia elétrica nos 12 meses do ano de 2022. Por se tratar de uma residência habitada, foi possível constatar, conforme apresenta a tabela 3, o consumo médio mensal, que equivale a 659,3 kWh/mês e 21,98 kWh/dia.

Tabela 3 – Consumo médio de energia elétrica mensal

Consumo médio de energia elétrica mensal													
Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
Consumo (kWh)	678	724	774	754	758	540	500	544	615	569	802	654	659,3

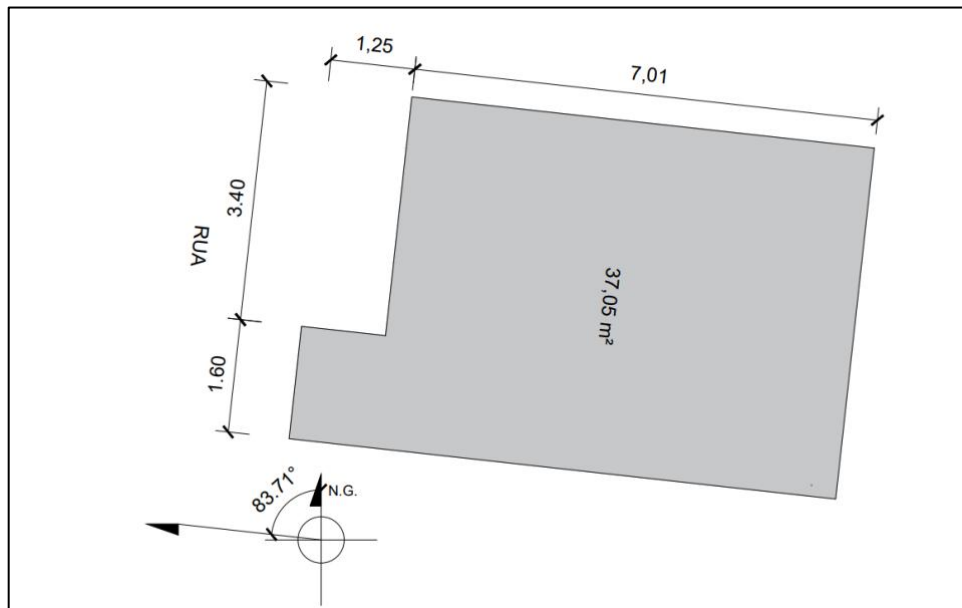
Fonte: Elaboração própria.

Comparando com os dados da figura 33, a média do consumo de energia da residência é aproximadamente 4 (quatro) vezes maior que a média nacional.

4.1.3 Estudo Geográfico e Solar da Região de Aplicação

A residência em questão tem um telhado com inclinação de 17° e ângulo azimutal, que é o ângulo formado pelo eixo Leste-Oeste com o Norte geográfico, representado na figura 58, equivalente a $-83,71^\circ$.

Figura 58 – Estudo do ângulo azimutal



Fonte: Elaboração própria.

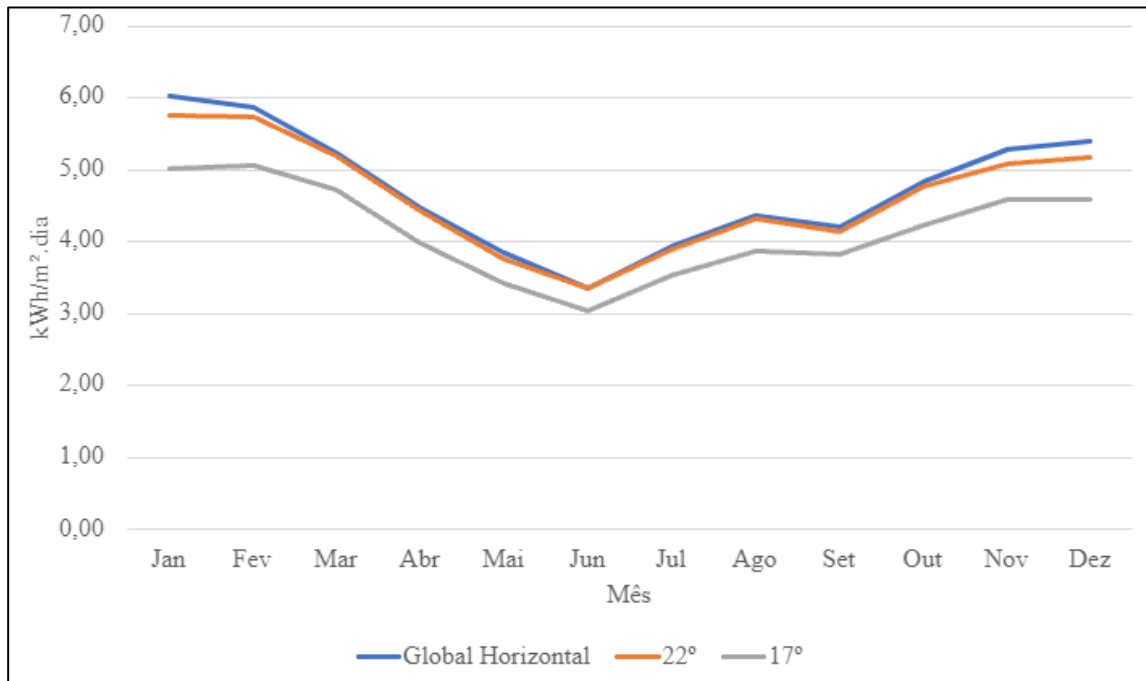
Com o auxílio do *software* Radiasol, inserindo as coordenadas geográficas de -22.381030 , -41.796768 , inclinação de 17° e 22° (latitude local) e ângulo azimutal arredondado de -84° , pois o *software* aceita apenas valores inteiros, obteve-se a irradiação solar diária média da região, tabela 4.

Tabela 4 – Irradiação solar diária média

Irradiação média (kWh/m ² /dia)													
Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
Global	6,02	5,87	5,24	4,48	3,84	3,36	3,93	4,36	4,20	4,83	5,29	5,40	4,74
Horizontal													
22°	5,76	5,74	5,19	4,43	3,76	3,35	3,90	4,31	4,14	4,76	5,09	5,17	4,63
17°	5,01	5,06	4,71	3,98	3,42	3,04	3,54	3,86	3,82	4,23	4,59	4,58	4,15

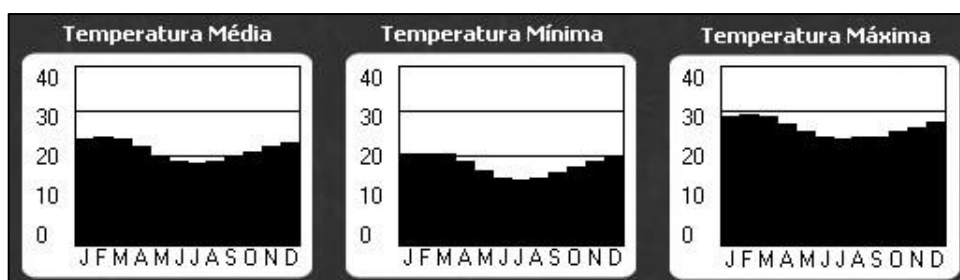
Fonte: Elaboração própria.

Com os dados obtidos, é possível representar graficamente na figura 59 o comparativo dos níveis de irradiação média na região no plano horizontal, 22° e 17° .

Figura 59 – Comparativo dos níveis de irradiação média na região

Fonte: Elaboração própria

Percebe-se que a irradiação média cai de forma significativa nos meses de junho, julho, agosto e setembro. Isso ocorre, pois, a temperatura média da região decai durante os meses citados, período correspondente ao inverno (21 de junho a 23 de setembro). A figura 60 é o balanço das temperaturas retirado do RadiaSol 2 no decorrer do ano.

Figura 60 – Temperaturas médias, máximas e mínimas no decorrer do ano

Fonte: Elaboração própria

4.2 ETAPA 2. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO ESCOLHIDO

O dimensionado do sistema fotovoltaico escolhido consiste na determinação do modelo dos painéis e no dimensionamento do inversor.

4.2.1 Determinação do Modelo dos Painéis

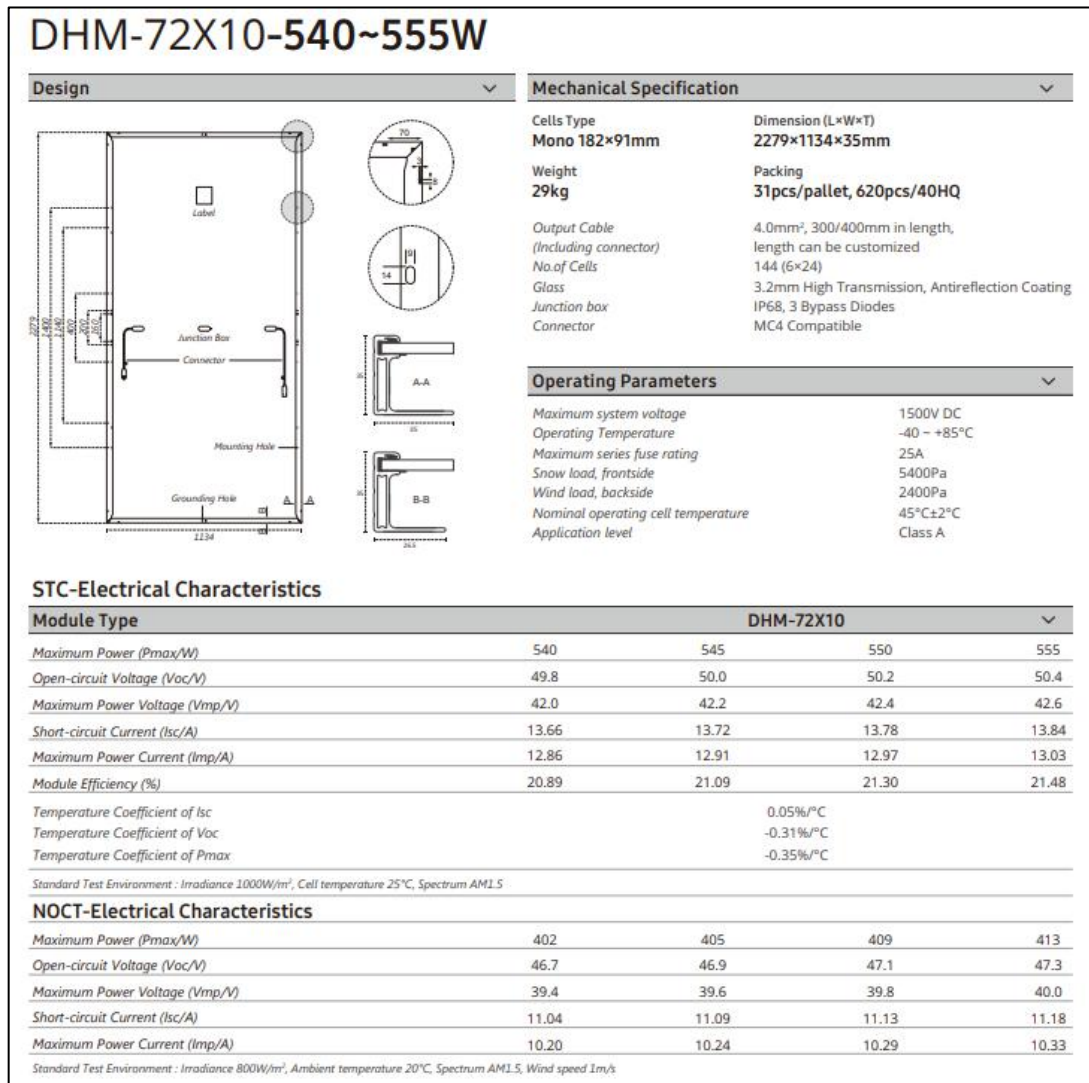
Para a determinação do modelo dos painéis, primeiro é necessário calcular a potência nominal necessária em corrente contínua. Como não há um consenso sobre o rendimento do sistema, será utilizado o valor de rendimento de 80%. Aplicando, na equação 35, os valores encontrados do consumo médio diário, da irradiação diária e do rendimento do sistema, temos que:

$$P_{cc} = \frac{21,98}{4,15 \times 0,8} \quad (35)$$

$$P_{cc} = 6,62 \text{ kWp}$$

A partir dos valores da potência nominal necessária, define-se o modelo dos painéis fotovoltaicos. Para o estudo em questão, escolheu-se o modelo DHM-72X10-550W, com dimensões de 2279 x 1134 mm, monocristalino e eficiência de 21,3%. A figura 56 apresenta a ficha técnica completa do módulo fotovoltaico, obtida no catálogo do fabricante.

Figura 61 – Ficha técnica módulo DHM-72X10-550W



Fonte: DAH Solar, 2023.

Elaborou-se a tabela 5 com os dados retirados da ficha técnica do módulo FV, contendo a eficiência, potência, área, custo unitário e custo por metro quadrado. Para se obter o custo unitário, realizou-se uma pesquisa de mercado.

Tabela 5 – Dados do modelo DHM-72X10-550W

Modelo	Eficiência (%)	Potência (Wp)	Área (m ²)	Custo Unitário (R\$)	Custo/m ² (R\$/m ²)
DHM-72X10-550W	21,30	550	2,58	998,00	386,17

Fonte: Elaboração própria.

Com potência nominal necessária, a potência do módulo e a área de cada módulo, pode-se encontrar o valor da área requerida de instalação dos painéis de acordo com a equação 36.

$$A = \frac{6620}{550} \times 2,58 \quad (36)$$

$$A = 31,05 \text{ m}^2$$

Verifica-se que são necessários 31,05 m² para o maior requisito de potência da residência (6.620 Wp). A partir desse valor, utilizando a equação 37, pode-se calcular a quantidade inteira (Q) de módulos que é necessária para atingir a potência nominal calculada.

$$Q = \frac{6620}{550} \quad (37)$$

$$Q = 12$$

Portanto, são necessários 12 módulos do modelo DHM-72X10-550W para atender a potência de 6.620 Wp. Como o número de módulos já é um valor par e inteiro, não foi preciso acrescentar nenhum módulo. Nesse caso, para 12 módulos de 550W, a potência final é de 6,6 kWp. A partir disso, com a quantidade de módulos definida, aplicou-se a equação 14 e elaborou-se a tabela 8, referente ao custo final dos módulos.

Tabela 6 – Custo final dos módulos

Modelo	Quantidade	Custo total (R\$)
DHM-72X10-550W	12	11.976,00

Fonte: Elaboração própria

Por fim, os módulos fotovoltaicos do sistema proposto resultaram em uma quantidade de 12 módulos de 550W do modelo DHM-72X10-550W, com potência nominal total de 6,60 kWp e custo total de R\$ 11.976,00. A partir desses valores, pode-se realizar o dimensionamento do inversor.

4.2.2 Dimensionamento do Inversor

Após a avaliação das características elétricas do módulo fotovoltaico selecionado, modelo DHM-72X10-550W, realizou-se uma pesquisa de mercado em busca das opções de inversores que atendessem às características técnicas de compatibilidade do módulo e pudessem ser instalados em um sistema *on-grid* bifásico. A relação das potências do módulo fotovoltaico e do inversor foi descrita anteriormente e deve respeitar o seguinte intervalo:

$$0,7 \times P_{FV} < P_{INVmax} < 1,2 \times P_{FV} \quad (38)$$

$$0,7 \times 6,6 \text{ kWp} < P_{INVmax} < 1,2 \times 6,6 \text{ kWp}$$

$$4.62 \text{ kWp} < P_{INVmax} < 7.92 \text{ kWp}$$

Sendo assim, o inversor escolhido deve atender à faixa de no mínimo 4.62 kWp e no máximo 7.92 kWp. Para o presente trabalho, escolheu-se o inversor do modelo R5-5K-S2 da marca SAJ. A ficha técnica do inversor está representada na figura 57.

Figura 62 – Ficha técnica do inversor

Dados Técnicos								
Modelo	R5-3K-S2-15	R5-3.6K-S2-15	R5-4K-S2-15	R5-5K-S2-15	R5-6K-S2-15	R5-7K-S2-15	R5-8K-S2-15	
Entrada (CC)								
Máx. Potência CC [Wp]@STC	4500	5400	6000	7500	9000	10500	12000	
Máx. Tensão CC [V]				600				
Faixa de Tensão MPPT [V]				90-550				
Tensão Nominal CC [V]				360				
Tensão de Partida [V]				100				
Min. Tensão CC [V]				80				
Máx. Corrente CC PV1/PV2 [A]			15/15				30/15	
Máx. Corrente em Curto			15/15				30/30	
Número de Strings por MPPT			1/1				2/1	
Número de MPPT				2				
Interruptor CC				Integrado				
Saída (CA)								
Potência Nominal CA [W]	3000	3680	4000	5000 ¹⁾	6000	7000	8000	
Máx. Potência CA ²⁾ [VA]	3300	3680	4400	5500	6000	7700	8000	
Corrente Nominal CA [A] @230Vac	13,1	16,0	17,4	21,8 ³⁾	26,1	30,5	34,8	
Máx. Corrente CA [A]	14,4	16,0	19,2	24,0	26,1	33,5	34,8	
Tensão Nominal CA/ Faixa de Tensão [V]				220,230,240/180-280				
Frequência da Rede/ Faixa [Hz]				50,60/45-55,55-65				
Fator de Potência [cos φ]				0,8 à frente -0,8 à retaguarda				
Distorção Harmônica Total [THDi]				< 2%(a potência nominal)				
Cabos CA				L+N+PE				
Eficiência								
Máx. Eficiência	97,8%	98,0%	98,0%	98,1%	98,2%	98,2%	98,3%	
Eficiência Européia	97,2%	97,5%	97,5%	97,6%	97,6%	97,7%	97,8%	
Precisão do MPPT				>99,9%				

Fonte: SAJ, 2023.

Após se obter as características técnicas do inversor, é possível verificar se haverá perdas de potência do sistema ou riscos de danificação do inversor, respeitando as relações:

$$Imp_{\text{módulo}} < \text{Máx. corrente de MPPT}_{\text{inversor}} \quad (39)$$

$$12,97 \text{ A} < 15 \text{ A}$$

$$Isc_{\text{módulo}} < \text{Máx. corrente de curto}_{\text{inversor}}$$

$$13,78 \text{ A} < 15 \text{ A}$$

Dessa forma, verifica-se a compatibilidade do inversor definido com o sistema dimensionado. A partir desse ponto, é possível calcular o número máximo e mínimo de módulos conectados em série por fileira, conforme as equações 40 e 41.

$$N_{\text{máx}} \leq \frac{600}{50,2} \quad (40)$$

$$N_{\text{máx}} \leq 12$$

$$N_{\text{mín}} \geq \frac{90}{42,4} \quad (41)$$

$$N_{\text{mín}} \geq 3$$

Isso significa que, para o sistema proposto, deve haver no mínimo 3 e no máximo 12 módulos conectados em série por fileira. Por fim, deve-se calcular o número máximo de fileiras conectadas em paralelo, aplicando a equação 24.

$$N_{\text{fileira}} \leq \frac{15}{12,97} \quad (42)$$

$$N_{\text{fileira}} \leq 1,16$$

Isso significa que o número máximo de fileiras ligadas em paralelo não poderá ultrapassar o valor de 1.

A partir dos cálculos realizados, é possível determinar a melhor configuração do sistema. A tabela 7 é um resumo das informações obtidas do dimensionamento para o sistema proposto.

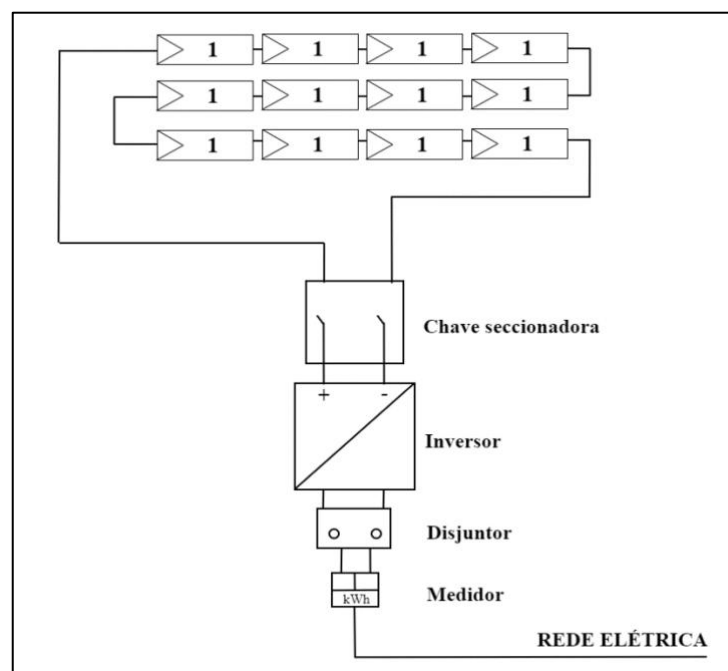
Tabela 7 – Resumo das informações

Descrição	Valor
Potência nominal do sistema (kWp)	6,6
Quantidade de subsistemas	1
Quantidade de módulo em cada subsistema	12
Potência do módulo (Wp)	550
Potência total do subsistema (kWp)	6,6
Tensão de máxima potência de um módulo (V)	42,4
Potência (V)	508,8
Corrente contínua (A)	12,97

Fonte: Elaboração própria.

A partir da tabela de resumo, é possível montar um diagrama esquemática do sistema. A figura 63 é a representação da montagem do sistema, mostrando a configuração até aqui calculada dos componentes que o compõem.

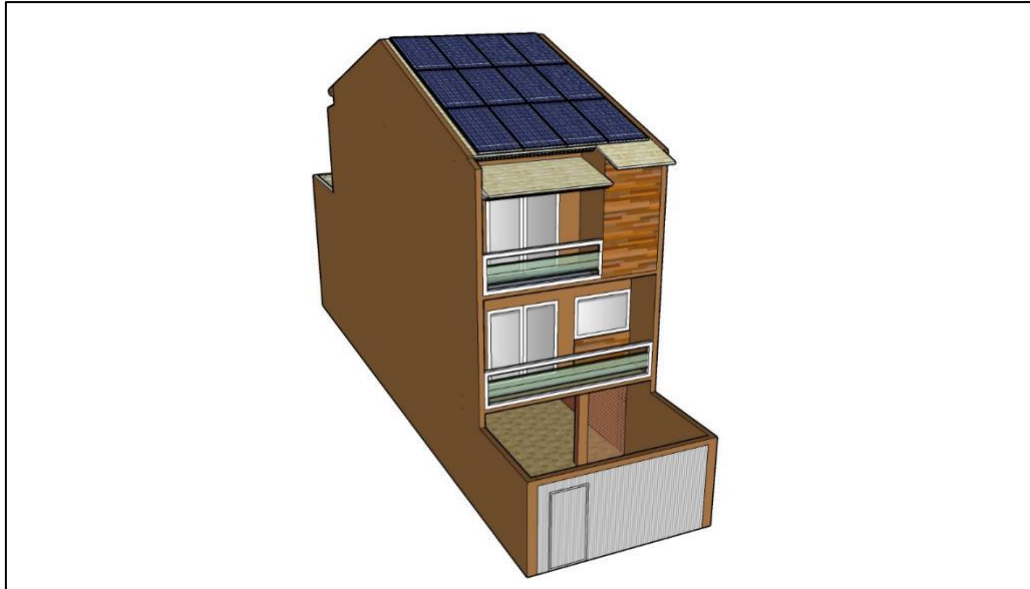
Figura 63 – Diagrama esquemático do sistema fotovoltaico proposto



Fonte: Elaboração própria

A figura 64 representa a modelagem 3D dos painéis dimensionados na residência de estudo.

Figura 64 – Modelagem 3D da residência após a instalação dos painéis FV



Fonte: Elaboração própria.

A partir do dimensionamento completo do sistema fotovoltaico, avaliando sua viabilidade técnica, pode-se analisar o viés econômico e ambiental.

4.3 ETAPA 3. ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA, ECONÔMICA E AMBIENTAL

Nessa sessão será apresentado o estudo de viabilidade técnica, que consiste na estimativa da geração de energia do sistema dimensionado e na análise técnica comparativa entre geração e consumo; o estudo de viabilidade econômica, que consiste no retorno do investimento necessário para implementação do sistema e o estudo de viabilidade ambiental, que consiste na análise dos impactos ambientais causados pelo sistema proposto.

4.3.1 Estimativa da Geração de Energia do Sistema Dimensionado

A partir dos dados obtidos de potência nominal do sistema fotovoltaico, os valores de irradiação solar para o plano inclinado de 17° e com um rendimento médio definido 80%, é possível calcular a energia mensal produzida pelo sistema fotovoltaico e a produtividade anual

do sistema, de acordo com as equações 26 e 27, respectivamente. A tabela 8 resume os valores de energia mensal produzida e a energia anual produzida pelo sistema proposto de 6,6 kWp.

Tabela 8 – Energia produzida pelo sistema

Mês	Dias	Potência instalada (kWp)	Irradiação solar diária média (kWh/m ² .dia)
Jan	31	6,60	5,01
Fev	31	6,60	5,06
Mar	30	6,60	4,71
Abr	31	6,60	3,98
Mai	30	6,60	3,42
Jun	30	6,60	3,04
Jul	30	6,60	3,54
Ago	29	6,60	3,86
Set	33	6,60	3,82
Out	29	6,60	4,23
Nov	30	6,60	4,59
Dez	29	6,60	4,58

Fonte: Elaboração própria

Aplicando a equação 43 para encontrar o fator de capacidade do sistema, tem-se:

$$FC = \frac{7962,45}{6,6 \times 8760} \times 100 \quad (43)$$

$$FC = 13,77 \%$$

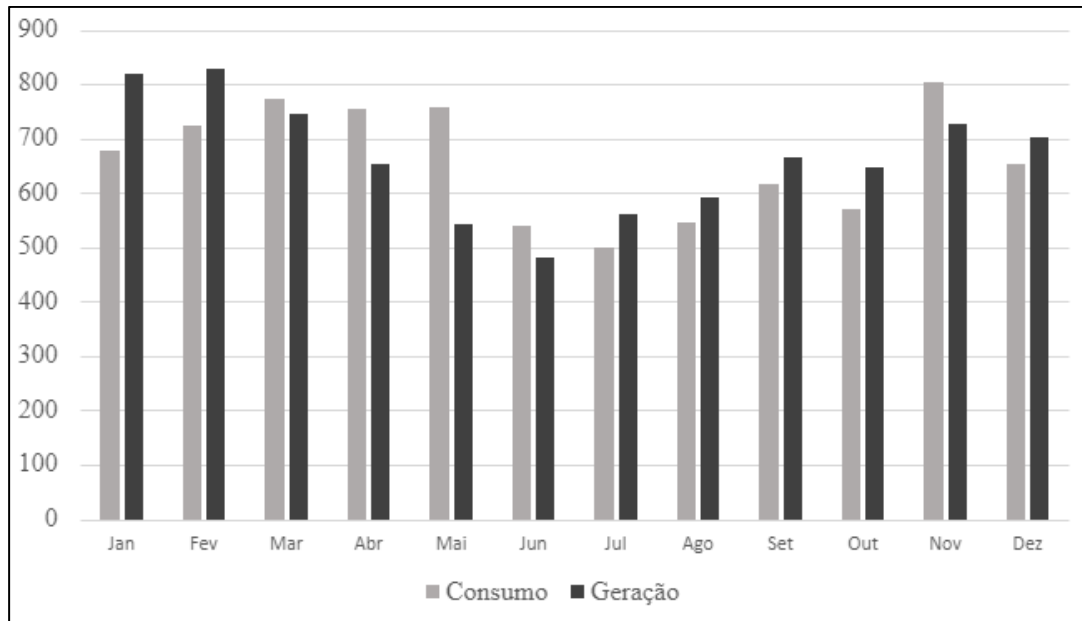
Por fim, conclui-se que o sistema proposto consegue gerar apenas 13,77% de energia em relação ao seu máximo possível.

4.3.2 Análise Técnica Comparativa entre Geração e Consumo

Após realizar o dimensionamento do sistema fotovoltaico para a residência de estudo, é possível comparar a geração de energia elétrica prevista e o consumo de energia elétrica mensal da residência. Como o sistema está conectado à rede, o excedente de energia produzido será convertido em crédito, abatendo também o valor do consumo de energia nos horários sem

irradiação solar. A figura 65 compara os valores de consumo e geração mensal para a residência de estudo.

Figura 65 – Comparação entre a geração mensal de energia elétrica do sistema e o consumo mensal de energia elétrica da residência




Fonte: Elaboração própria.

Percebe-se que em alguns meses como março, abril e maio, o consumo é maior que a geração de energia elétrica. Isso pode ser explicado pelo fato de os painéis solares não estarem direcionados ao Norte geográfico, havendo menos irradiação solar incidindo no painel, fazendo com que ele não opere na situação ideal do local. Além disso, os meses indicados compreendem as estações de verão e inverno, onde a temperatura média local está mais alta e, conseqüentemente, aumenta o uso de aparelhos de condicionamento de ambiente e dos chuveiros elétricos. Em todo o ano, calculou-se um valor de 50 kWp de geração a mais do que consumo.

4.3.3 Análise Econômica e Retorno do Investimento

As tarifas de energia variam de acordo com a concessionária, o grupo consumidor e o local de aplicação. Para o presente trabalho e elaboração da tabela 9, tem-se uma residência localizada na cidade de Macaé/RJ, caracterizada como B1 Residencial e bandeira verde. A consulta das tarifas e impostos pode ser realizada no *site* da concessionária Enel e está representada na figura 66.

Figura 66 – Tarifas da concessionária

Tarifas Enel RIO		Decisão Liminar - Retorno Reh.3177/2023			
FORNECIMENTO EM BAIXA TENSÃO		VIGÊNCIA		15/03/2023	
Bandeira Ativa VERDE					
		R\$/kWh			
		VERDE	AMARELA	VERMELHA P2	
RESIDENCIAL BAIXA RENDA - B1					
0 A 30 kWh		0,24891	0,25545	0,28213	
31 a 100 kWh		0,42672	0,43794	0,48367	
101 a 220 kWh		0,64008	0,65691	0,72551	
ACIMA 220 kWh		0,71121	0,72991	0,80613	
BANDEIRA VIGENTE: VERDE					
B1 - RESIDENCIAL NORMAL		0,88834	0,90177	1,03034	
SUB-GRUPO - OUTROS					
R\$/kWh					
B2 - R U R A L		0,88834	0,90177	1,03034	
B2 - RURAL IRRIGANTE - 60% desc.		0,35534	0,36071	0,41214	
B2 - RURAL COOP. ELETRIF. RURAL		0,88834	0,90177	1,03034	
B3 - DEMAIS CLASSES (Com, Ind e Poder Público)		0,88834	0,90177	1,03034	
B4a - ILUMINACAO PUBLICA		0,48858	0,50201	0,63058	
B4b - ILUMINACAO PUBLICA		0,53301	0,54644	0,67501	
Res. Homol. ANEEL 3.177, de 14/03/2023 - vigência 15/03/2023					
Res. Homol. ANEEL 3.015, de 15/03/2022 - vigência 15/03/2022					
Res. Homol. ANEEL 2.836, de 09/03/2021 - vigência 15/03/2021					
Res. Homol. ANEEL 2.666, de 10/03/2020 - vigência 15/03/2020					
Res. Homol. ANEEL 2.523, de 26/03/2019 - vigência 01/04/2019					
Res. Homol. ANEEL 2.519, de 14/03/2019 - vigência 15/03/2019					
Res. Homol. ANEEL 2.377, de 14/03/2018 - vigência 15/03/2018					
Res. Homol. ANEEL 2207, de 14/03/2017 - vigência 15/03/2017					
Res. Homol. ANEEL 2214, de 28/03/2017 - vigência 01/05/2017					

Fonte: Enel, 2023.

Tabela 9 – Tarifa de energia e custos

Cidade	Concessionária	Tarifa única (R\$)	Consumo médio mensal (kWh)	Custo total mensal (R\$)	Custo total anual (R\$)
Macaé	Enel	0,88834	659,33	585,71	7028,55

Fonte: Enel, 2023.

A partir da estimativa da geração de energia elétrica pelos painéis fotovoltaicos, a economia durante um ano pode ser calculada através da equação 44.

$$Economia = 7962,45 \times 0,88834 \quad (44)$$

$$Economia = 7073,36$$

Dessa forma, a residência deixaria de pagar anualmente R\$ 44,81 de tarifa de energia elétrica após a implantação do sistema fotovoltaico. Além da economia das tarifas do sistema, a legislação municipal, em incentivo, prevê a redução de 50% do valor do Imposto sobre a Propriedade Predial e Territorial Urbana (IPTU), se comprovar a produção de energia solar em

no mínimo de 50% do consumo médio mensal do imóvel, com o respectivo indicador de produção de energia e mediante projeto devidamente homologado.

Para se calcular o custo do sistema, é necessário elaborar uma tabela de custos juntamente às pesquisas de mercado. Entre os custos do sistema proposto, tem-se: custo dos painéis, do inversor, da estrutura metálica e os materiais elétricos necessários para montagem do sistema. A tabela 10 contém os detalhes e preços individuais e somados dos componentes necessários para a instalação do sistema.

Tabela 10 – Custos do sistema fotovoltaico

Produto	Valor unitário (R\$)	Quantidade	Valor total (R\$)
Módulo DAH DHM72X10-550W	998,00	12	11976,00
SAJ R5-5K-S2	4593,77	1	4593,77
Caixa de acessórios para fixação de 04 painéis em telhado colonial	315,27	3	945,81
Materiais elétricos e instalação	5000,00	1	5000,00
		TOTAL	22.515,58

Fonte: Elaboração própria

Estipulou-se um valor de R\$ 5.000,00 para a aquisição de materiais elétricos como cabeamento, *strings*, disjuntor, entre outros, além da instalação dos painéis. Por fim, ao somar todos os valores totais, obteve-se o valor total de aquisição e instalação do sistema fotovoltaico de R\$ 22.515,58.

A partir desse valor, utilizando a equação 30, é possível calcular o período de retorno simples do investimento. Como a economia anual é de R\$ 7.073,36, podemos obter e utilizar a média mensal da economia, sendo equivalente a R\$ 589,45.

$$PRS = \frac{22.515,58}{589,45} \quad (45)$$

$$PRS = 38,20$$

Ou seja, o *payback* simples sistema é de 38,20 meses, equivalente a 3 anos, 2 meses e 6 dias, tempo muito menor do que a vida útil do equipamento, de 25 anos.

Para o *payback* descontado, utiliza-se o Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) que, para os últimos 12 meses, apresentou uma taxa acumulada de 6,85% ao ano no setor de energia elétrica, de acordo com o IBGE (2023). Como o fluxo de caixa é analisado a cada mês, o valor do IPCA utilizado será mensal, calculado pela conversão das taxas equivalentes, representada na equação 46.

$$i_{mensal} = \sqrt[q]{(1 + i_{anual})} - 1 \quad (46)$$

$$i_{mensal} = \sqrt[12]{(1 + 0,0685)} - 1$$

$$i_{mensal} = 0,55\%$$

Onde:

i_{mensal} = taxa de juros mensal equivalente

q = número de partes do intervalo de tempo considerado

i_{anual} = taxa de juros anual

Após se obter o IPCA mensal, pode-se calcular o *payback* descontado reconhecendo o momento em que o saldo torna positivo. A tabela 11 demonstra os valores do saldo obtidos a cada mês.

Tabela 11 – *Payback* descontado

Mês	IPCA	0,55%	Saldo (R\$)
	FC (R\$)	FC descontado (R\$)	
0	- 22.515,58	-22.515,58	-22.515,58
1	589,45	586,20	-21.929,38
2	589,45	582,98	-21.346,40
3	589,45	579,77	-20.766,63
4	589,45	576,57	-20.190,06
5	589,45	573,40	-19.616,66
-	589,45	-	-
41	589,45	470,04	-947,98
42	589,45	467,45	-480,53
43	589,45	464,88	-15,65
44	589,45	462,32	446,66
45	589,45	459,77	906,44
46	589,45	457,24	1.363,68
47	589,45	454,72	1.818,40

Fonte: Elaboração própria.

Dessa forma, analisou-se que o *payback* descontado do sistema proposto equivale a 44 meses, ou seja, 3 anos e 8 meses, tempo em que o saldo passa a ser positivo.

Para a análise do VPL, utiliza-se a equação 32, com o momento zero considerado no mês de investimento (mês zero) e os descontos mensais equivalentes a economia mensal gerada pelo sistema. Além disso, na tabela 12, considera-se a taxa de juros de 0,55% ao mês e se estipula um prazo máximo de 10 anos (120 meses) para análise da viabilidade do investimento.

Tabela 12 – Análise do VPL

	IPCA	0,55%		
Mês	FC (R\$)	FC descontado (R\$)	VPL	Saldo (R\$)
0	-22.515,58	-22.515,58	-22.515,58	-22.515,58
1	589,45	586,20	586,20	-21.929,38
2	589,45	582,98	582,98	-21.346,40
3	589,45	579,77	579,77	-20.766,63
4	589,45	576,57	576,57	-20.190,06
5	589,45	573,40	573,40	-19.616,66
-	589,45	-	-	-
117	589,45	308,96	308,96	28.146,48
118	589,45	307,25	307,25	28.453,74
119	589,45	305,56	305,56	28.759,30
120	589,45	303,88	303,88	29.063,18

Fonte: Elaboração própria.

Portanto, ao final dos 120 meses de vida útil, considerando as taxas de juros presentes, haverá um saldo de R\$ 29.063,18, a uma taxa de 0,55% ao mês, evidenciando também a viabilidade econômica do sistema.

Por fim, faz-se uma terceira análise financeira na tabela 13, referente a TIR, onde se descobre a taxa praticada para levar o VPL a zero, no período estimado de retorno de 120 meses. Para o presente trabalho, a TMA comparada será a Selic, a uma taxa anual de 13,75%. Quando calculada pela equação 48, a taxa equivalente mensal da Selic é de 1,08%.

Tabela 13 – TIR do sistema proposto

	IPCA		0,55%	
Mês	FC (R\$)	FC descontado (R\$)	VPL	Saldo (R\$)
0	-22.515,58	-22.515,58	-22.515,58	-22.515,58
1	589,45	586,20	586,20	-21.929,38
2	589,45	582,98	582,98	-21.346,40
3	589,45	579,77	579,77	-20.766,63
4	589,45	576,57	576,57	-20.190,06
5	589,45	573,40	573,40	-19.616,66
-	589,45	-	-	-
117	589,45	308,96	308,96	28.146,48
118	589,45	307,25	307,25	28.453,74
119	589,45	305,56	305,56	28.759,30
120	589,45	303,88	303,88	29.063,18
			TIR	1,92%

Fonte: Elaboração própria.

Assim, ao se comparar a Taxa Interna de Retorno (TIR) encontrada de 1,92% com a Taxa Mínima de Atratividade (TMA), definida pela Selic, de 1,08% verificamos que:

$$TIR > TMA \quad (47)$$

E também se comprova, pela terceira análise, a viabilidade econômica do sistema.

4.3.4 Análise dos Impactos Ambientais

De acordo com a Prefeitura Municipal de Macaé, o município conta com duas usinas termelétricas a gás: a UTE Norte Fluminense e a Mário Lago. A termelétrica UTE Norte Fluminense tem capacidade instalada de 780 mega-watts (MW), equivalente a 780.000 kW, energia suficiente para abastecer uma população superior a dois milhões de pessoas.

O município, de acordo com o IBGE (2022), tem 246.391 habitantes, equivalentes a 12,31% da quantidade de pessoas que a termelétrica consegue abastecer. Já a UTE Mário Lago, iniciou a geração comercial em dezembro de 2001, atingindo sua plena capacidade de produção de 928.000 kW em agosto de 2002, cerca de 19% a mais que a UTE Norte Fluminense. Em março de 2006, a Petrobras adquiriu a usina, assumindo integralmente a sua gestão.

Estima-se que a geração de 1kWh emite 1,144 kgCO₂ quando produzido em uma termelétrica a partir da queima de carvão mineral. Ao implementar o sistema fotovoltaico dimensionado na residência, 7.962,45 kWh de energia seriam produzidos, diminuindo a necessidade nas termelétricas da cidade. Isso equivale a 9.109,04 kgCO₂.

Apesar de ser uma energia renovável limpa, a produção dos painéis fotovoltaicos e os demais componentes do sistema são, como já mencionados, poluentes ao meio ambiente. Por se apresentar como uma tecnologia nova, quase que a totalidade dos painéis continua em atividade. Por isso, não há muitos estudos sobre o descarte dos painéis fotovoltaicos após a sua vida útil. Porém, Anselmo (2020), afirma que a fonte fotovoltaica pode, no Brasil, gerar cerca de 184.000 toneladas de resíduos para 2050. Além disso, a reciclagem dos painéis pode chegar a R\$ 2.190.868.460,00 até 2030, que é equivalente ao valor atual da matéria-prima necessária para produzir 60 milhões de novos painéis.

Portanto, conclui-se que, para a edificação residencial proposta, o sistema dimensionado de 12 módulos fotovoltaicos do modelo DHM-72X10-520-550W e 1 inversor do modelo SAJ R5-5K-S2 atende às necessidades de geração de energia elétrica, referente a uma potência gerada de 6,60 kWp por mês. Além de não emitir gases poluentes e impactos negativos ao meio ambiente, a instalação do sistema fotovoltaico ajuda a diminuir a demanda de geração de energia da termelétrica municipal, alta produtora de gases poluentes. Por fim, verifica-se a viabilidade econômica do sistema proposto, que demonstrou um superávit anual na relação entre consumo e gestão e uma taxa interna de retorno (TIR) cerca de seis vezes maior do que a taxa mínima de atratividade apontada.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A partir do escopo do trabalho, o estudo de viabilidade da instalação de um sistema fotovoltaico para uma residência familiar, foram verificadas as três propostas de viabilidade definidas: técnica, econômica e ambiental.

Conforme apresentado pela IEA em 2022, mais da metade da matriz energética mundial é representada pela queima dos combustíveis fósseis. Para a cidade de Macaé, local de estudo, não é diferente. A existência de duas grandes termelétricas que abastecem a população traz consigo a geração de gases poluentes na ordem de 1,144 kgCO₂ para cada kWh de geração. Esse valor, quando comparado com a geração de energia fotovoltaica, cai a zero. No caso da residência estudada, foi dimensionado uma geração elétrica mensal de aproximadamente 7.960,00 kWh por mês, o que equivale a 9.106,24 kgCO₂.

A geração de energia elétrica por meio dos painéis fotovoltaicos apresenta diversos impactos ambientais. De acordo com Pupin (2019), o processo de extração da matéria prima e da confecção dos painéis fotovoltaicos, bem como o seu transporte marítimo e rodoviário, são responsáveis pelos impactos negativos causados, como o aquecimento global, a toxicidade humana e a ecotoxicidade terrestre. Para o presente trabalho, o estudo de viabilidade ambiental resultou apenas em impactos ambientais positivos, visto que a instalação e funcionamento dos painéis fotovoltaicos, objetivo de estudo, não gera resíduos sólidos e nem lançam gases poluentes a atmosfera.

Embora a região Sudeste apresente uma das maiores médias anuais de irradiação solar, a configuração do sistema proposto não estava de acordo com as condições ideais, referentes ao Manual da Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos (2004). Isso porque, diferente da inclinação de latitude de 22° Sul, para a cidade de Macaé, o telhado da residência estava a 17° com o plano horizontal e, ainda, não se optou pela orientação dos módulos em direção ao Norte geográfico, visto que a área útil para instalação dos painéis estava orientada a -84°. Sendo assim, justifica-se a irradiação média de 4,74 kWh/m².dia, valor abaixo da média de 5,07 kWh/m².dia, da região Sudeste.

O painel fotovoltaico do modelo DHM-72X10-550W é feito de silício monocristalino, material responsável por fazer parte da composição de 90% das placas do mercado, CEMIG (2012). Como um dos materiais semicondutores de maior eficiência prática, foi apresentado pela CRESEB (2004), em um valor de aproximadamente 18%. Esse valor é verificado quando se comparado a eficiência do módulo, de 21,3%. Isso demonstra que os estudos em busca de painéis mais eficientes estão trazendo resultados positivos ao mercado.

Como indicado pela CRESESB (2004) e Da Costa (2012), o modelo de instalação *on grid*, onde os painéis são ligados a rede elétrica, é o mais recomendado para as residências. Após o dimensionamento do sistema na residência de estudo, foi possível analisar que, em alguns meses como maio, abril e novembro, o consumo de energia foi maior que a geração. Sendo assim, para contornar esse problema, a Resolução nº 1.059 da ANEEL, assegura que a residência possa utilizar da energia elétrica proveniente dos créditos concedidos pela concessionária, referentes aos excedentes produzidos nos outros meses, pois não teria capacidade de atender às necessidades.

Após realizada a análise de viabilidade econômica, pôde-se analisar que o sistema proposto teria um *payback* descontado de aproximadamente 3 anos e 8 meses, sendo que a placa fotovoltaica tem vida útil estimada de 25 anos. Além disso, ao se estipular um prazo de 120 meses para o retorno do investimento, pôde-se encontrar um saldo positivo de R\$ 29.063,18, com uma TIR de 1,92% ao mês, superando a Taxa Mínima de Atratividade definida, Selic, de 1,08%. Os três parâmetros de conferência de viabilidade econômica explicam o porquê de, como apresentado no Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2023, desenvolvido pela EPE, haver um aumento de 79,8% de geração solar em relação ao ano anterior.

Os custos estimados para a instalação dos sistemas fotovoltaicos ainda são muito altos na realidade brasileira, visto a gama de componentes importados e dada a falta de um mercado nacional expressivo, Torres (2012). O sistema proposto, embora seja economicamente viável, apresenta um valor de investimento inicial estimado de R\$ 22.515,58, equivalente a 17 salários-mínimos.

Por fim, a partir da fomentação teórica e das equações apresentadas, foi possível dimensionar um sistema fotovoltaico para a edificação proposta com geração total anual de 7962,45 kWh de energia. Essa energia gerada tornaria possível o abastecimento de quatro casas com consumo médio mensal de energia elétrica de domicílio de 160 kWh, conforme os dados apresentados pela Procel, Eletrobrás e MME (2019).

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS ENGENHEIROS, PROJETISTAS E GESTORES

Frente ao caso analisado, alguns aprendizados são importantes se destacar e podem ser úteis na produção de projetos de dimensionamento e análise de viabilidade técnica, econômica e ambiental da energia fotovoltaica em residências. Sendo assim, recomenda-se que as orientações dos módulos fotovoltaicos sejam direcionadas ao Norte geográfico, evitando-se o

Sul, embora também seja possível dimensionar. Pesquisar e simular o dimensionamento com vários modelos de painéis fotovoltaicos para haver mais assertividade na escolha ideal, bem como os demais componentes que compõem o sistema. Realizar o estudo aprofundado de impacto ambiental referente aos processos de confecção e transporte dos painéis fotovoltaico.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho de conclusão de curso teve como analisar a aplicação da energia fotovoltaica em edificações residenciais, através de um estudo de viabilidade técnica, econômica e ambiental. Portanto, foi adotado o método do estudo de caso, contendo uma aplicação prática dos conceitos em uma residência familiar existente. Para isso, foi necessário a realização de pesquisas bibliográficas que fomentassem o entendimento referente ao cenário das energias renováveis e não renováveis, dando ênfase a energia fotovoltaica, bem como a descrição dos indicadores adotados para um estudo de análise de viabilidade da implementação do sistema, seus benefícios e desafios.

Ao unir as informações necessárias referentes a geração de energia elétrica pelo efeito fotovoltaico, as condições ideais que o sistema necessita, os impactos ambientais causados e a análise econômica de viabilidade, pôde-se dimensionar o sistema fotovoltaico para a residência de estudo. A instalação das 12 placas solares, juntamente ao inversor e os demais componentes, na área útil do telhado da residência, é capaz de gerar o valor equivalente ao consumo médio mensal da residência no período de um ano com excedentes, tornando o projeto tecnicamente viável.

Ao analisar o investimento necessário para instalação do sistema fotovoltaico, viu-se que, para os modelos de painéis escolhidos, com vida útil de 25 anos, a taxa de retorno de investimento é maior que a taxa mínima atrativa, o que torna o sistema economicamente viável. Além disso, o excedente gerado pelas placas poderá ser convertido em crédito na concessionária, visto a ligação do sistema com a rede elétrica. Ambientalmente, embora a produção e o transporte dos painéis fotovoltaicos causem impactos negativos ao meio ambiente, a instalação e operação dos módulos não gera resíduos e nem gases poluentes na atmosfera.

Sendo assim, a autonomia de geração de energia da residência causa a diminuição indireta dos gases poluentes, tornando o projeto ambientalmente viável. Por fim, a aplicação da energia fotovoltaica em edifícios residenciais, com base no estudo de caso realizado, se mostrou viável, embora os custos iniciais no Brasil ainda sejam elevados.

6.1 GESTORES

O escopo deste trabalho tinha como objetivo analisar a aplicação da energia renovável em residências, e contemplava os âmbitos de viabilidade técnica, econômica e ambiental. Embora se trate de uma energia renovável, as placas solares, que tem de 25 a 30 anos de vida

útil, ainda estão, desde o início, quase que sua totalidade em funcionamento. A falta de estudos experimentais quanto ao descarte e futuro dos painéis fotovoltaicos dificultou a plena análise de viabilidade ambiental da situação proposta.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros são indicados os estudos dos painéis fotovoltaicos bifaciais nas residências, considerando os parâmetros de eficiência, incidência solar, área útil de instalação e viabilidade econômica. Ademais, o início aprofundado das pesquisas quanto aos impactos ambientais em decorrência ao descarte e reciclagem dos módulos fotovoltaicos se faz necessário, visto que, ainda nessa década, toneladas de painéis terminarão sua vida útil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (AIE). Renewables 2021. Analysis and forecast to 2026 Disponível em: <https://www.iea.org/reports/renewables-2021>. Acesso em: 10 maio 2023.

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (AIE). Global EV Outlook 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>. Acesso em: 10 maio 2023.

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA RENOVÁVEL (IRENA). Renewable Energy and Jobs - Annual Review 2021. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2021/May/Renewable-Energy-and-Jobs-Annual-Review-2021>. Acesso em: 10 maio 2023.

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (AIE). Net Zero by 2050. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>. Acesso em: 10 maio 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. (ANEEL) (2021). Geração Distribuída. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida> Acesso em 04 de maio de 2023,

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Informe anual da fiscalização da geração – 2020. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/documents/656877/11605396/Fiscaliza%C3%A7%C3%A3o+da+Gera%C3%A7%C3%A3o++2020/faf0d27a-5a52-4019-a299-9c9d6b57a69c>. Acesso em: 10 maio 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa ANEEL N° 1.059, de 7 de Fevereiro de 2023. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-normativa-aneel-n-1.059-de-7-de-fevereiro-de-2023-463828999>. Acesso em: 8 maio de 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). Boletim mensal do etanol - abril de 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-refino-de-petroleo-e-gas/boletim-mensal-do-etanol>. Acesso em: 10 maio 2023.

ALMEIDA, Eliane; ROSA, Anna Clara; DIAS, Fernanda Cristina Lima Sales; BRAZ, Kathlen Thais Mariotto; LANA, Luana Teixeira Costa; SANTOS, Olívia Castro do Espírito ; Thays SACRAMENTO, Cristina Bajur **Energia solar fotovoltaica: revisão bibliográfica**. 2016.

ANSELMO, Antonio Harley **Reciclagem ou destinação final dos painéis fotovoltaicos aplicados em geração de energia ao final do ciclo de vida**. Monografia (Especialização em Fontes renováveis: geração, operação e integração) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2019

AQUECIMENTO Global de 1,5°C. Painel Intergovernamental Sobre mudanças climáticas. IPCC. 2018. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/07/SPM-Portuguese-version.pdf>. Acesso em: 10 maio 2023

ARYAN, V; FONT-BRUCART, M; MAGA, D. A comparative life cycle assessment of end-of-life treatment pathways for photovoltaic backsheets. **Progress in Photovoltaics**, v. 26, pp. 443-459, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. Panorama da Energia Eólica no Brasil - Edição 2021. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/panorama-da-energia-eolica-no-brasil-edicao-2021/>. Acesso em: 10 maio 2023

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. Dados do Setor. (2021). Disponível em: <https://www.absolar.org.br/dados-do-setor/> Acesso em: em 04 de maio de 2023

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Plano Nacional de Energia 2050. Disponível em: <https://www.mme.gov.br/documents/36206/0/PNE+2050.pdf/1e7f580f-052d-4c4b-a10f-341cc476d29d>. Acesso em: 10 maio 2023.

BORTOLOTO, Valter A.; SOUZA, André; GOIS, Guilherme; Martins, Marcio A.; BERGHE, Murilo J.; MONTANHA, Gustavo Kimura. Geração de energia solar on grid e off grid. JIX JORNACITEC - Jornada Científica e Tecnológica, 2017.

BRIDGWATER, A. V., *et al.* **Biomass CHP**: The potential for simultaneous production of bioenergy and biofuels. *Applied Thermal Engineering*, 2002. 22(9), 1053-1071. doi: 10.1016/S1359-4311(02)00039-7.

CAMPOS *et al.* Um panorama sobre a energia geotérmica no Brasil e no Mundo. Aspectos ambientais e econômicos. **Revista Espacios** v.38 n.01 Año 2017. Disponível em: <https://www.revistaespacios.com/a17v38n01/a17v38n01p08.pdf>. Acesso em: 12 maio 2023.

CARI, Elmer Pablo Tito. **Introdução à sistemas fotovoltaicos, dimensionamento e instalações**. São Carlos: USP 2021.

CAUS, Tuane Regina. Energia hidrelétrica: eficiência na geração. 2014. Monografia (especialização) - Universidade Federal de Santa Maria. 2014.

CEMIG - COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. Alternativas Energéticas: uma visão Cemig. Belo Horizonte: CEMIG, 2012.

CEPEL – CRESESB. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. 2014. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf Acesso em: 23 mar. 2023

COMO funciona a Geração Eólica? [artigo online]. CBIE. Disponível em: <https://cbie.com.br/como-funciona-a-geracao-eolica/>. Acesso em: 10 maio 2023.

DÁRIO, Gabriel V. B.; SOUZA, Diego H. de; SAITU, Mariana de O. Energia Maremotriz: um estudo das energias de origem marítima. [artigo online]. **Bolsista de Valor**, V. 3 2013. Disponível em: <https://editoraessentia.iff.edu.br/index.php/BolsistaDeValor/article/view/6717> acesso em: 25 abr. 2023.

DEMIRBAS, A. **Biofuels**: Securing the planet's future energy needs. London, UK: Springer, 2010.

DIPIPO, R. **Geothermal power plants**: Principles, applications, case studies, and environmental impact. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2012

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. (2021). Boletim mensal de monitoramento do sistema elétrico brasileiro. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/boletins-mensais-de-monitoramento-do-sistema-eletrico-brasileiro/bmmonitoramento-agosto> Acesso em: 04 de maio de 2023. 2021

EPE EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS. Anuário estatístico de energia elétrica 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Fact%20Sheet%20-%20Anu%20Estat%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202022.pdf>. Acesso em: 20 maio 2023

EPE EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS. Anuário estatístico de energia elétrica. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/a-epe-divulga-mais-uma-edicao-do-anuario-estatistico-de-energia-eletrica-2023>. Acesso em 15 maio. 2023

EPE EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS Balanço Energético Nacional 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022> Acesso em 15 jan. 2023

ENERGIA solar fotovoltaica: entenda como funciona e quais são as vantagens. **Jornal da USP**. (2021). Disponível <https://jornal.usp.br/atualidades/energia-solar-fotovoltaica>. em: Acesso em: 04 de maio de 2023.

ESTADO DO RIO DE JANEIRO. PREFEITURA MUNICIPAL DE MACAÉ. GABINETE DO PREFEITO. 1. LEI COMPLEMENTAR N.º 282/2018

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO (FIRJAN). Estudo de Competitividade dos Estados - Energia. Disponível em: <https://www.firjan.com.br/estudos-economicos/publicacoes/competitividade-estados/2020/energia/estudo-de-competitividade-dos-estados-2020-energia.pdf>. Acesso em: 10 maio 2023.

FLORIANI, Fernanda Dombeck Estudo de caso de aplicação de sistemas fotovoltaicos em um edifício residencial em Curitiba. Monografia (Especialista em Construções Sustentáveis) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, CURITIBA 2018.

FOUQUET, R. The history of energy. Oxford University Press.2016.

GLOBAL HISTORICAL EMISSIONS. Climate Watch Historical GHG Emissions. 2019. Disponível em: https://www.climatewatchdata.org/ghgemissions?end_year=2019&start_year=1990. Acesso em: 10 maio 2023

GRUBB, M.J.; MEYER, N.I. (1993) Wind Energy: Resources, Systems and Regional Strategies. In: JOHANSSON, T.B., KELLY, H., REDDY, A.K.N. and WILLIAMS, R.H., Eds., **Renewable Energy: Sources for Fuels and Electricity**, Island Press, Washington DC, 157-212.

GONÇALO, Carlos Rosário da Costa. **A contribuição dos sistemas solares térmicos e fotovoltaicos para o balanço energético dos edifícios residenciais unifamiliares**. 2012. Dissertação – (Engenharia Civil) - A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa, 2012.

GONÇALVES, J. H. N.; AMARANTE, M. dos S.; BARRETO, G. B., Silva, A. E. da, & JÚNIOR, H. dos S. (2018). Energia Maremotriz. **Revista Pesquisa E Ação**, 4(1), 120-128. Disponível em: <https://revistas.brazcubas.br/index.php/pesquisa/article/view/391> acesso em: 12 maio 2023

GONÇALVES, J. C. S.; DUARTE, D. H. S. **Arquitetura sustentável: uma integração entre ambiente, projeto e tecnologia em experiências de pesquisa, prática e ensino**. Porto Alegre, 2006.

GOVERNO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. Planejamento Energético do Estado do Rio de Janeiro 2020-2035. Disponível em: <http://www.energiario.org.br/wp-content/uploads/2021/08/Planejamento-Energetico-do-Estado-do-Rio-de-Janeiro-2020-2035.pdf>. Acesso em: 10 maio 2023.

GREEN, M. A., EMERY, K., HISHIKAWA, Y., WARTA, W., & DUNLOP, E. D. **Solar cell efficiency tables (version 55)**. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 27(1), 3-12. (2019).

GOLDEMBERG J. Biomassa e energia. Quím Nova [Internet]. 2009;32(3):582–7. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000300004>. Acesso em: 13 maio 2023

HCC ENERGIA SOLAR. Veja os fatores que influenciam na eficiência do sistema fotovoltaico. 2022. Disponível em: <https://hccenergiasolar.com.br/veja-os-fatores-que-influenciam-na-eficiencia-do-sistema-fotovoltaico/>. Acesso em: 15 fev. 2023.

IEA INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Renewables 2020. Paris, France: IEA. (2020)

INATOMI, Thais Aya Hassan; MORALES UDAETA, Miguel Edgar. **Análise dos impactos ambientais na produção de energia dentro do planejamento integrado de recursos**. 2005.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. (2021). Global solar PV market set for dramatic growth over next 5 years., Disponível em: <https://www.iea.org/news/global-solar-pv-market-set-for-dramatic-growth-over-next-5-years> Acesso em 04 de maio de 2023

IRENA INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Renewable Power Generation Costs in 2019.

IZIDORO, Erick Santos; SODRÉ, Henrique Nunes da Silva; SOARES, Ricardo. Painel Solar: uma alternativa para a geração de energia, Bolsista de Valor, 2010.

JÄGER-WALDAU, A. PV Status Report. JRC SCIENCE FOR POLICY REPORT. 2019. Disponível em: <file:///C:/Users/Silva/Downloads/pv%20status%20report%202019-KJNA29938ENN.pdf> acesso em: 23 maio 2023.

JUNIOR, Ivan Mendes de Oliveira e SOUZA. Princípio do funcionamento de uma célula fotovoltaica.. 5º SIMPÓSIO NACIONAL DE CIÊNCIAS E ENGENHARIAS, 2021. Disponível em: <http://anais.unievangelica.edu.br/index.php/SINACEN/article/view/6738/3714>. Acesso em: 23 maio 2023

KULKARNI, Sanjeev, T R, Anil. Rural Electrification through Renewable Energy Sources-An Overview of Challenges and Prospects. **International Journal of Engineering Research**.. Volume No.3, Issue No.6, pp : 384-389 (2014) Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/262729584_Rural_Electrification_through_Renewable_Energy_Sources-An_Overview_of_Challenges_and_Prospects. Acesso em: 23 mar. 2023.

LABEEE. Casa Eficiente: Consumo e Geração de Energia. 2 ed. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. Florianópolis, 2010

LA VALLE bruno. **Análise de ciclo de vida de painéis solares em silício monocristalino**.. 2019. Monografia (Engenharia de Materiais) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Engenheiro de Materiais, 2019

LAMBERTS. R. *et al.* **Casa eficiente**: consumo e geração de energia. v. 2. Florianópolis: UFSC, LABEEE. Florianópolis, 2010. 76 p

LIMA; Jorge Enoch Furquim Werneck; FERREIRA, Raquel Scalia Alves; CHRISTOFIDIS, Demetrios. **O uso da irrigação no brasil**. 1999. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Jorge-Enoch-Lima/publication/228716436_O_uso_da_Irrigacao_no_Brasil/links/00463539b762c64d040000/O-uso-da-Irrigacao-no-Brasil.pdf. acesso em: 20 maio 2023

LIMA, Nathan Willig, ANTUNES JUNIOR Estevão, Ostermann, Fernanda, Cavalcanti, Claudio. A história do fóton em livros de física Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 5-8 de septiembre de 2017. X CONGRESO INTERNACIONAL SOBRE INVESTIGACIÓN EN DIDÁCTICA DE LAS CIENCIAS.

LIMA, A. A., MENEZES, N. P., SANTOS, S., AMORIM, B., THOMAZI, F., ZANELLA, F., HEILMANN, A., BURKARTER, E., & DARTORA, C. A. (2020). Uma revisão dos princípios da conversão fotovoltaica de energia. **Revista Brasileira De Ensino De Física**, 42, e20190191. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2019-0191>

LORENZO, E.; ZILLES, R. El generador fotovoltaico. In: LORENZO, Eduardo Org. Electricidad solar: ingenieria de los sistemas fotovoltaicos. Sevilla: Progensa, 1994.

LORENZO, E. **Radiación Solar y Dispositivos Fotovoltaicos, Electricidad Solar Fotovoltaic**, V. II, Espanã, 2006.

MACÊDO JUNIOR, Natanael Fernandes; et. al. Dimensionamento de um sistema fotovoltaico e análise de investimento para o instituto centro de ensino tecnológico. XXXVIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUCAO, Maceió, 2018.

MÉTODOS de pesquisa em Ciências Sociais: Bloco Qualitativo. Sesc São Paulo/CEBRAP São Paulo, 2016. Disponível em: https://bibliotecavirtual.cebrap.org.br/arquivos/2016_E-BOOK%20Sesc-Cebrap_%20Metodos%20e%20tecnicas%20em%20CS%20-%20Bloco%20Qualitativo.pdf acesso em 11 abr. 2023.

NAYAK, Pabitra; MAHESH, Suhas, SNAITH, Henry; CAHEN, David. (2019). Photovoltaic solar cell technologies: analysing the state of the art. **Nature Reviews Materials**. 4. 1. 10.1038/s41578-019-0097-0.

NASCIMENTO, Cássio Araújo do **Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica** 2004 Monografia, (Engenharia) – Universidade Federal de Lavras. Minas Gerais, 2004.

NEWKIRK, Martin. **How Solar Power Works: On-Grid, Off-Grid And Hybrid Systems**. clean energy reviews. 2014. Disponível em: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/2014/5/4/how-solar-works>. Acesso em: 08 maio 2023

OMIDO Agleison Ramo, BARBOZA, Christian Souza, MOREIRA JÚNIOR, Orlando. Energia geotérmica: uma aliada na busca da eficiência energética VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 2017.

PARIDA, Bhubaneswari; INIYAN, S., GOIC, Ranko. **A review of solar photovoltaic technologies**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2011 15. 1625-1636. 10.1016/j.rser.2010.11.032.

PAULA, Fabrício Fagner de **GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL**. Fabrício Fagner de. Monografia (Engenharia Ambiental e Sanitária) - Faculdade Doctum de Juiz de Fora Juiz de Fora 2019.

PEREIRA, Mariana Graciosa. Economia Azul: o caminho para eficiência econômica, social e ambiental das atividades produtivas baseadas nos oceanos. 2020. 149 f., il. Dissertação (Mestrado em Economia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

PEREIRA, Osvaldo Soliano; RUTHER, Ricardo. Energia solar fotovoltaica. **Revista Brasileira de Energia**, v. 27 n. 3 (2021): Edição Especial I.

PINHO, J. T., GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, 2014

PONTE, Carlos Bicudo da. Aproveitamentos Geotérmicos nos Açores. EDA RENOVÁVEIS, S. A, 2019. Disponível em: http://siaram.azores.gov.pt/energia/geotermia/Geotermia_SRAM_2019.pdf. Acesso em: 20 abr. 2023.

PORTAL EKKO GREEN. Energia Hidrelétrica: O Que É e Como Funciona (+5 Exemplos). Disponível em: <https://ekkogreen.com.br/energia-hidreletrica/>. Acesso em: 20 abr. 2023.

PORTAL ENERGIA. Energia Geotérmica e o calor da terra. 2019. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/energia-geotermica-calor-da-terra/> Acesso em: 20 maio 2023

PORTAL SOLAR. Energia renovável: o que é, quais os tipos e vantagens. Entre 2014 e 2023. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/energia-renovavel>. Acesso em: 23 maio 2023

PRATOLONGO, Paula PIOVAN, María Julia, ZAPPERI, Georgina; NEGRÍN, Vanesa, GONZÁLEZ TRILLA, Gabriela; BOTTE, Sandra. Humedales en estuarios. 2013

PUPIN, Priscila Carvalho **Avaliação dos impactos ambientais da produção de painéis fotovoltaicos através de análise de ciclo de vida**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2019 ITAJUBÁ 2019.

RELLA, Ricardo. Energia Fotovoltaica no Brasil. **Revista de Iniciação Científica**, Criciúma, v. 15, n. 1, 2017. Disponível em: <https://www.periodicos.unesc.net/ojs/index.php/iniciacaocientifica/article/view/2937/3523> Acesso em 20 maio 2023

RENEWABLES GLOBAL STATUS REPORT - REN21. 2021. Disponível em: https://www.google.com/search?q=REN21.+Renewables.+Global+Status+Report%2C+2021&oq=REN21.+Renewables.+Global+Status+Report%2C+2021&gs_lcrp=EgZjaHJvbWUyBgAEEUYOTIICAEQABgWGB7SAQ4zMzU0MTY3MjlkMGoxNagCALACAA&sourceid=cchrome&ie=UTF-8. Acesso em: 23 maio 2023.

ROCHA, João Pedro Pereira da. **Potencial Energético das Marés na Ria de Aveiro**. Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2020.

ROSSO, André Possamai; SCHAEFFER, Lirio; RAMPINELLI, Giuliano Arns. Desenvolvimento de módulos fotovoltaicos a partir de um processo de laminação de baixo custo. XII CBPE – CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO. 2020.

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

SALAMONI, Isabel Tourinho; RUTHER, Ricardo. Uma oportunidade para o desenvolvimento da indústria fotovoltaica no Brasil: eletricidade solar para os telhados. **Parc. Estrat.** Brasília, DF. v.14, jan-jun 2009

SECRETARIA DE ESTADO DO AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE. Relatório de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Estado do Rio de Janeiro 2021. Disponível em: <https://climatepolicyinitiative.org/wp-content/uploads/2021/11/Relato%CC%81rio-de-Emiss%C3%B5es-de-Gases-de-Efeito-Estufa-do-Estado-do-Rio-de-Janeiro-2021.pdf>. Acesso em: 10 maio 2023.

SILVA, Anderson Estevam da; BARRETO; Guilherme Barbosa; SANTOSJUNIOR, Hernandes Rodrigo dos; GONÇALVES João Henrique Nascimento; Mayara dos Santos Amarante. **Pesquisa e Ação** v.4 n.1: maio de 2018.

SILVA, Celso Roberto Alves da *et al.* A biomassa como alternativa energética para o Brasil... **Rev. Brasileira de Ciências Ambientais** – n. 2. Dezembro 2005

SILVA, João Eduardo Santos Ruivo da. **Células Fotovoltaicas Estado da Arte e Perspectivas Futuras**, 2014. Dissertação (Engenharia Eletromecânica) - Universidade DA Beira Interior. Covilhã, junho de 2014.

SILVA, Luana Bomfim; JOÃO NETO, Antônio; LEANDRO FILHO, Francisco De Assis & Araújo, Bruno & Alves Patricio, Rodrigo & Junior, Francisco. (2015). Estudo Comparativo Entre a Energia Solar Fotovoltaica e a Produção de Energia Convencional: Um Estudo de Caso em Fortaleza-CE. CONEM – CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Joao-Bomfim-2/publication/316733125_Estudo_Comparativo_Entre_a_Energia_Solar_Fotovoltaica_e_a_Producao_de_Energia_Convencional_Um_Estudo_de_Caso_em_Fortaleza-CE/links/5ccc5d19a6fdccc9dd8b2c05/Estudo-Comparativo-Entre-a-Energia-Solar-Fotovoltaica-e-a-Producao-de-Energia-Convencional-Um-Estudo-de-Caso-em-Fortaleza-CE.pdf. Acesso em: 10 maio 2023

SOVACOOOL, B. K. **The Routledge Handbook of Energy for Sustainable Development**. Routledge. 2017

SMIL, V. **Energy and civilization: A history**. MIT Press, 2017.

TESTER, J. W., *et al.* **The future of geothermal energy: Impact of enhanced geothermal systems (EGS) on the United States in the 21st century**. Massachusetts Institute of Technology, 2006.

THRESHER, R. **Tidal energy**. In **Encyclopedia of Sustainability Science and Technology** Springer, 2017

TORRES, Celia Regina. **Energia solar fotovoltaica como fonte alternativa de geração de energia elétrica em edificações residenciais**. 2012. Dissertação (Escola de Engenharia) – Universidade de São Paulo, 2012.

UNITED NATIONS POPULATION FUND (UNFPA). World Population Dashboard. Disponível em: <https://www.unfpa.org/data/world-population-dashboard>. Acesso em: 10 maio 2023

VIANNA, Renata de Moura Issa. **Matemática financeira**. Salvador: UFBA, Faculdade de Ciências Contábeis; Superintendência de Educação a Distância, 2018

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

VILLEY-MIGRANE, Marjolaine. **Eoliennes, sons et infrasons: effets de l'eolien industriel sur la sante des hommes**, 2004

ASSAF NETO, Alexandre. **Finanças Corporativas e Valor**. 7^a ed. São Paulo: Atlas, 2014.