

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



Lucas da Silva Sousa

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA DA
INSTALAÇÃO DE PLACAS FOTOVOLTAICAS PARA
ABASTECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA NA VILA
RESIDENCIAL DO DCTA**

Trabalho de Graduação
2023

Curso de Engenharia Civil - Aeronáutica

Lucas da Silva Sousa

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA DA
INSTALAÇÃO DE PLACAS FOTOVOLTAICAS PARA
ABASTECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA NA VILA
RESIDENCIAL DO DCTA**

Orientador

Prof. Dr. Wilson Cabral de Sousa Júnior (ITA)

Coorientador

1 Ten. Davi Santana Santos (PASJ)

ENGENHERIA CIVIL - AERONÁUTICA

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

2023

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Divisão de Informação e Documentação

Sousa, Lucas da Silva

Análise da viabilidade técnico-econômica da instalação de placas fotovoltaicas para abastecimento de energia elétrica na Vila Residencial do DCTA / Lucas da Silva Sousa.

São José dos Campos, 2023.

94f.

Trabalho de Graduação – Curso de Engenharia Civil - Aeronáutica– Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2023. Orientador: Prof. Dr. Wilson Cabral de Sousa Júnior. Coorientador: 1 Ten. Davi Santana Santos.

1. Placa. 2. Solar. 3. Análise. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Título.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SOUSA, Lucas da Silva. **Análise da viabilidade técnico-econômica da instalação de placas fotovoltaicas para abastecimento de energia elétrica na Vila Residencial do DCTA.** 2023. 94f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Lucas da Silva Sousa

TÍTULO DO TRABALHO: Análise da viabilidade técnico-econômica da instalação de placas fotovoltaicas para abastecimento de energia elétrica na Vila Residencial do DCTA.

TIPO DO TRABALHO/ANO: Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) / 2023

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.



Lucas da Silva Sousa

Rua H8A, 115

12.228-460 – São José dos Campos–SP

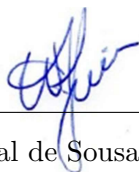
ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA DA INSTALAÇÃO DE PLACAS FOTOVOLTAICAS PARA ABASTECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA NA VILA RESIDENCIAL DO DCTA

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação



Lucas da Silva Sousa

Autor



Wilson Cabral de Sousa Júnior (ITA)

Orientador



Documento assinado digitalmente

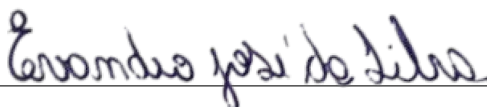
DAVI SANTANA SANTOS

Data: 18/11/2023 08:54:19-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Davi Santana Santos (PASJ)

Coorientador



Prof. Dr. Evandro José da Silva

Coordenador do Curso de Engenharia Civil - Aeronáutica

São José dos Campos, 16 de novembro de 2023.

À minha família, sem a qual eu não estaria aqui hoje, aos meus amigos da Graduação, a quem devo atribuir pelo menos metade do mérito por chegar ao final do curso, aos meus queridos e estimados professores do ITA.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, com quem estabeleci um propósito bastante claro durante minha preparação para ingressar no ITA, propósito este que me trouxe até o momento em que me encontro hoje, e cuja completude continuarei a buscar nos anos vindouros.

Em segundo lugar, preciso agradecer à minha mãe, Maria, que foi a luz que iluminou a minha vida e os meus pensamentos desde cedo, me motivando quando criança a estudar e a sonhar alto. Minha mãe transformou todos os limões que a vida lhe ofereceu em uma incrível limonada que resultou em conquistas espetaculares, como este curso de graduação, bem como o da minha irmã, que está prestes a se formar médica e a quem também preciso agradecer, por todo amor, cuidado e apoio de sempre. Este nível de educação é inédito na minha família, e não teria sido alcançado sem o incentivo da minha mãe. Sem exitar, ela abdicou de muitas coisas e da sua própria carreira para criar a mim e à minha irmã, e sem a sua garra inabalável, que a fez passar por cima de todas as muitas dificuldades da vida para que tivéssemos uma educação de qualidade e para que pudéssemos realizar os nossos sonhos, eu jamais estaria escrevendo este texto de agradecimento. Ela é hoje e sempre será o maior exemplo de superação e de determinação que eu terei em toda a vida, e a ela eu devo uma enorme parte de toda a minha formação e das minhas conquistas.

Gostaria de agradecer aos meus irmãos: primeiramente, à minha irmã biológica, Helen, de quem precisei me distanciar fisicamente para conquistar meu sonho de estudar no ITA, mas que sempre esteve presente à distância e que sempre me apoiou nas minhas escolhas, me lembrando de onde vim e me dando forças para que pudesse atingir os meus sonhos. Em segundo lugar, aos meus irmãos de vida, que conquistei aqui no ITA, em especial aos que viveram comigo na maior parte do tempo: Rubens Ramos, Gustavo Cunha, Fernando Alves, João Vitor, Lucas Barbacovi, Hugo Timóteo, Augusto Zanca e, principalmente, Vitor Halley, com quem moro há vários anos e com quem dividi o alojamento durante toda a graduação. A este último, que me conhece como só um irmão conhece, devo não apenas a amizade que me manteve e me mantém de pé há vários anos, mas também as infinitas lições de vida aprendidas, o exemplo de homem e de ser humano que ele representa e que continuará representando sempre para mim, as incontáveis conversas nos momentos de extrema alegria ou de profunda tristeza, os empurrões e as palavras de sabedoria que foram dadas nos muitos momentos em que eram necessárias. Além disso, agradeço profundamente pela compreensão para lidar com todos os meus defeitos, da forma mais direta possível, me ajudando sempre a superá-los de forma que

eu pudesse crescer como pessoa. O valor dessa amizade e a sorte por tê-la construído jamais poderão ser estimados, restando somente a minha profunda gratidão a Deus por ter colocado alguém tão fundamental em minha vida, no momento perfeito, enquanto dividíamos o sonho de sermos aprovados no ITA enquanto moramos em Fortaleza. Essas pessoas, junto aos meus diversos amigos conquistados no ITA, especialmente na turma 23, foram a fortaleza que precisei para conseguir chegar ao fim do curso, e os laços construídos jamais serão desfeitos.

Sou grato de forma muito especial à minha namorada, Luisa, que tive a sorte de conhecer durante a graduação, que aceitou dividir a vida comigo em meio às dificuldades de um relacionamento à distância e que esteve presente comigo, mesmo que às vezes de longe, nos melhores e nos piores momentos. Sem o seu amor, cuidado, carinho, compreensão e comprometimento com o nosso relacionamento, ter forças para conseguir buscar a concretização deste sonho teria sido uma tarefa extremamente árdua. Sua praticidade e sabedoria me ajudaram imensamente nos momentos em que precisei olhar minhas decisões e desafios sob uma perspectiva mais realista, o que foi fundamental em muitos momentos. Além disso, nosso relacionamento acrescentou à caminhada muitos momentos memoráveis, que lembraremos pro resto da vida com muito amor. Agradeço também à sua família, especialmente ao meu sogro e sogra, Gustavo e Erika, que entre tantas outras coisas me acolheram com todo o coração e que me apoiaram imensamente no caminho até aqui, tornando a minha jornada muito mais leve e fornecendo conselhos fundamentais para que eu pudesse lidar de uma melhor forma com as circunstâncias da vida.

Por fim, quero agradecer a todos os meus amigos, familiares, professores e coordenadores que sonharam comigo o sonho de ser aprovado no ITA, que me ajudaram a conseguir as minhas bolsas de estudo e que viabilizaram a concretização desta jornada, em todas as cidades por onde passei, em especial as pessoas que começaram junto comigo, em Recife. Meus amigos Vinícius Ferreira, Cristiano, João Marcelo, Lucas Dias, Gabriel Belchior, Ricardo Fusano, Luís Remígio e Israel, em especial, começaram essa trajetória comigo muito antes de ser de fato possível concretizá-la. Eles serão sempre considerados verdadeiros irmãos e, junto aos seus familiares, nunca deixaram de me acolher e de me ajudar a percorrer toda a minha jornada até então, com conselhos e com palavras de sabedoria nos muitos momentos em que foram necessários, me ajudando a superar as minhas fraquezas e compreendendo os meus defeitos. Junto com eles, vivi os momentos mais divertidos que eu poderia colecionar, nas vezes em que retornei para casa, mas também aprendi muitas das lições que precisavam ser aprendidas para que eu pudesse crescer como pessoa. Saber que tenho amigos tão espetaculares em Recife sempre foi um conforto para mim nos momentos de dificuldade, e a eles eu devo também as conquistas dos meus sonhos.

"Tomorrow belongs to those who can hear it coming"

— DAVID BOWIE

Resumo

O presente estudo propõe uma análise abrangente da viabilidade técnico-econômica relacionada à instalação de módulos fotovoltaicos na vila residencial do Departamento de Ciência e Tecnologia da Aeronáutica (DCTA). O objetivo principal é alcançar uma produção de energia mais limpa e sustentável, promovendo eficiência financeira no ecossistema energético e ampliando a autonomia do Departamento em relação ao fornecimento interno de energia.

A pesquisa inicia-se com a avaliação dos custos de instalação do sistema em um bloco piloto, expandindo posteriormente a análise para abranger toda a vila militar do DCTA. Nesse contexto, são considerados os custos estimados e orçados em parceria com três empresas distintas, com o intuito de fornecer uma base sólida para as projeções financeiras. Além disso, a pesquisa inclui uma análise detalhada do retorno financeiro derivado da implementação do projeto, destacando os benefícios econômicos tangíveis.

Além dos aspectos econômicos, o estudo incorpora uma análise dos impactos ambientais positivos resultantes da redução na emissão de carbono. A quantificação desses benefícios ambientais proporciona uma visão abrangente do papel do projeto na mitigação das mudanças climáticas e na promoção da responsabilidade ambiental.

Ao abordar tanto os aspectos econômicos quanto os ambientais, este trabalho oferece uma análise holística da implementação de módulos fotovoltaicos na vila residencial do DCTA, destacando não apenas os benefícios financeiros imediatos, mas também a contribuição para um futuro mais sustentável e resiliente em termos energéticos.

Abstract

This study aims to provide a comprehensive analysis of the technical-economic feasibility of installing photovoltaic modules in the residential village of the Department of Science and Aerospace Technology (DCTA). The primary objective is to achieve cleaner and more sustainable energy production, promoting financial efficiency in the energy ecosystem and enhancing the Department's autonomy in internal energy supply.

The research begins by assessing the installation costs of the system in a pilot block, later expanding the analysis to encompass the entire military village of DCTA. In this context, estimated and budgeted costs are considered in collaboration with three different companies, providing a solid foundation for financial projections. Additionally, the research includes a detailed analysis of the financial return derived from project implementation, emphasizing tangible economic benefits.

Beyond economic considerations, the study incorporates an analysis of positive environmental impacts resulting from reduced carbon emissions. Quantifying these environmental benefits provides a comprehensive view of the project's role in mitigating climate change and promoting environmental responsibility.

By addressing both economic and environmental aspects, this work offers a holistic analysis of the implementation of photovoltaic modules in the DCTA residential village, highlighting not only immediate financial benefits but also contributions to a more sustainable and resilient energy future.

Lista de Figuras

FIGURA 1.1 – Produção global de energia a partir de diferentes fontes, segundo a IEA . . .	20
FIGURA 1.2 – Crescimento global em eletricidade renovável em relação ao crescimento total da geração de eletricidade por cenário, 2021-2050	21
FIGURA 1.3 – Oferta e demanda global de energia elétrica, por cenário, em TWh0 . . .	22
FIGURA 1.4 – Vários bairros em São José registram queda de energia, após incêndio em subestação	24
FIGURA 2.1 – Participação da energia renovável na Oferta Interna de Energia do Brasil e do mundo, segundo a Agência Internacional de Energia (AIE)	28
FIGURA 2.2 – Outras categorias de energia renovável que compõem a matriz de produção brasileira	29
FIGURA 2.3 – Variação, em GWh, das outras categorias de energia elétrica renovável . .	30
FIGURA 2.4 – OIE de energia elétrica do Brasil, por fonte	31
FIGURA 2.5 – Participação setorial no consumo de eletricidade	31
FIGURA 2.6 – Esquema de comparação entre a geração de energia convencional e a geração distribuída	32
FIGURA 2.7 – Exemplo de micro-usina fotovoltaica.	33
FIGURA 2.8 – Ilustração do efeito fotovoltaico	34
FIGURA 2.9 – Componentes da irradiância solar.	36
FIGURA 2.10 – Organização e componentes de um sistema fotovoltaico residencial conectado à rede elétrica.	38
FIGURA 2.11 – Ângulo de inclinação dos módulos fotovoltaicos e ângulos de incidência dos raios solares (VILLALVA; GAZOLI, 2012)	39
FIGURA 2.12 – Relações entre as dimensões do módulo fotovoltaico.	40
FIGURA 2.13 – Dimensões para fileiras de módulos fotovoltaicos.	41
FIGURA 3.1 – Total diário da irradiação global horizontal - Média anual.	48

FIGURA 3.2 – Mapa da vila residencial do DCTA	49
FIGURA 3.3 – Esquema representativo da estrutura de suporte metálico para os módulos fotovoltaicos, aplicada a um telhado de fibrocimento.	51
FIGURA 3.4 – Histórico de crescimento da tarifa de energia elétrica no Brasil, desde 2011	53
FIGURA 3.5 – Taxa média de reajuste da tarifa de energia elétrica pela EDP/SP, desde 2011	54
FIGURA 4.1 – Modelo padrão de apartamento térreo no bloco H21A.	63
FIGURA 4.2 – Modelo padrão de apartamento no pavimento superior do bloco H21A. . .	64
FIGURA 4.3 – Fachada frontal de um apartamento no bloco H21A.	65
FIGURA 4.4 – Fachada traseira de um apartamento no bloco H21A.	65
FIGURA 4.5 – Dados de irradiação na região de projeto	66
FIGURA 4.6 – Medição do azimuth do telhado do bloco H21A em relação ao norte. . . .	66
FIGURA 4.7 – Parâmetros utilizados para cálculo da irradiância nas condições de projeto	67
FIGURA 4.8 – Módulo fotovoltaico Canadian CS7N-665MS	68
FIGURA 4.9 – Microinversor utilizado pelas empresas A e B	72
FIGURA 4.10 – Inversor utilizado pela empresa C	73
FIGURA 4.11 – Variação de Caixa e de Fluxo de Caixa, ano após ano, para o investimento no projeto da empresa A	79
FIGURA 4.12 – Variação de Caixa e de Fluxo de Caixa, ano após ano, para o investimento no projeto da empresa B	80
FIGURA 4.13 – Variação de Caixa e de Fluxo de Caixa, ano após ano, para o investimento no projeto da empresa C	82
FIGURA 4.14 – Comparativo entre fluxos de caixa acumulados para os projetos das em- presas analisadas	83
FIGURA 4.15 – Comparativo entre fluxos de caixa acumulados para os projetos das em- presas analisadas - Valores corrigidos pela inflação, a valor presente	84
FIGURA 4.16 – Comparativo entre fluxos de caixa acumulados para o projeto da empresa A, com e sem compensação de carbono	86
FIGURA 4.17 – Comparativo entre fluxos de caixa acumulados, em valor presente, para o projeto da empresa A, com e sem compensação de carbono	87
FIGURA 4.18 – Comparativo entre fluxos de caixa acumulados para o projeto da empresa A, com e sem compensação de carbono	90

FIGURA 4.19 –Comparativo entre fluxos de caixa acumulados para o projeto da empresa A, com e sem compensação de carbono	91
FIGURA 4.20 –Comparativo entre fluxos de caixa acumulados para o projeto da empresa A, com e sem compensação de carbono	91

Lista de Tabelas

TABELA 2.1 – Crescimento das outras categorias de energia elétrica renovável que compõem a matriz de produção de energia brasileira, em GWh	29
TABELA 2.2 – Ângulo de Inclinação Recomendado em Função da Latitude Geográfica . .	39
TABELA 3.1 – Fatores considerados para análise do retorno financeiro sobre o investimento no sistema do projeto.	52
TABELA 3.2 – Estimativa de variação da tarifa de energia (DCTA)	55
TABELA 3.3 – Tabela de Fatores de emissão de CO_2 , ano a ano, desde 2006, obtidos pelo Método Simples Ajustado	57
TABELA 4.1 – Dados de Consumo de Energia mensal dos blocos H9 ao H30	61
TABELA 4.2 – Dados de Consumo de Energia mensal dos blocos da classe de Graduados e Suboficiais.	62
TABELA 4.3 – Especificações elétricas do módulo Canadian CS7N-665MS	69
TABELA 4.4 – Especificações mecânicas do módulo Canadian CS7N-665MS	69
TABELA 4.5 – Especificações de temperatura do módulo Canadian CS7N-665MS	70
TABELA 4.6 – Especificações elétricas do módulo Canadian CS7N-665MS	71
TABELA 4.7 – Especificações mecânicas do módulo Canadian CS7N-665MS	71
TABELA 4.8 – Especificações de temperatura do módulo Canadian CS7N-665MS	72
TABELA 4.9 – Produtividade do sistema para um único apartamento do bloco	74
TABELA 4.10 – Produtividade do sistema para o bloco H21A	74
TABELA 4.11 – Produtividade do sistema da empresa C para o bloco H21A	75
TABELA 4.12 – Peso do Sistema para o Bloco H21A	75
TABELA 4.13 – Peso do Sistema para o Bloco H21A	76
TABELA 4.14 – Estimativas de orçamento apresentadas pelas empresas A, B e C	76
TABELA 4.15 – Parâmetros iniciais	78

TABELA 4.16 –Fatores considerados (a.a)	78
TABELA 4.17 –Análise de viabilidade (Empresa A)	79
TABELA 4.18 –Parâmetros iniciais	80
TABELA 4.19 –Fatores considerados (a.a)	80
TABELA 4.20 –Análise de viabilidade	81
TABELA 4.21 –Parâmetros iniciais	81
TABELA 4.22 –Fatores considerados (a.a)	81
TABELA 4.23 –Análise de viabilidade (Empresa C)	82
TABELA 4.24 –Investimento inicial e Produção média (sistema) por Empresa	84
TABELA 4.25 –TIR e VPL (Projeto) por Empresa	85
TABELA 4.26 –Payback (anos) e Lucratividade por Empresa	85
TABELA 4.27 –Tabela de Compensação de Carbono para o bloco de projeto (H21A) . . .	85
TABELA 4.28 –Análise de Viabilidade com compensação de carbono (Empresa A)	86
TABELA 4.29 –Tabela de Dados dos Blocos da vila residencial - DCTA	88
TABELA 4.30 –Parâmetros de projeto para a usina solar da vila residencial	89
TABELA 4.31 –Fatores Considerados	89
TABELA 4.32 –Parâmetros Iniciais	89
TABELA 4.33 –Análise de Viabilidade (Vila Residencial - DCTA)	90

Lista de Abreviaturas e Siglas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanco Energético Nacional
IEA	International Energy Agency
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
EPE	Empresa de Pesquisa Energética

Lista de Símbolos

G_0	Irradiância extraterrestre
G_n	taxa de energia normal
G	Irradiância global horizontal
G_{dif}	Irradiância difusa horizontal
G_{dir}	Irradiância direta horizontal
G_i	Irradiância no plano inclinado
α	ângulo de inclinação do painel solar
β	Ângulo de incidência do raio solar
γ_s	Ângulo da altura solar k_f

Sumário

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Objetivo	25
1.1.1	Objetivo geral	25
1.1.2	Objetivos específicos	25
1.2	Etapas de projeto	26
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1	Revisão bibliográfica	27
2.1.1	Cenário atual da produção de energia no Brasil	27
2.1.2	Geração distribuída	32
2.1.3	Incidência solar na Terra	33
2.1.4	Sistemas de células e módulos fotovoltaicos	37
2.1.5	Disposição, inclinação dos módulos	38
2.1.6	Regras de instalação	39
2.1.7	Viabilidade técnico-econômica	41
2.1.8	Impacto do projeto na redução da emissão de carbono	45
3	METODOLOGIA	47
3.1	Área de estudo	47
3.1.1	Localização e incidência solar	47
3.2	Caracterização e tipificação das residências da vila militar	49
3.2.1	Perfis de consumo	50
3.2.2	Escolha do bloco padrão para o projeto	50
3.3	Sistemas fotovoltaicos	50
3.3.1	Conexão entre o gerador de energia fotovoltaica e a rede elétrica existente	50

3.3.2	Fixação dos módulos fotovoltaicos no telhado de fibrocimento	51
3.4	Análise técnico-econômica	51
3.4.1	Capacidade de geração de energia do sistema de projeto e viabilidade estrutural	51
3.4.2	Orçamento de projeto e custos de reposição ou manutenção	52
3.4.3	Retorno financeiro esperado	52
3.4.4	Projeções de fluxo de caixa	56
3.4.5	Compensação do projeto em créditos de carbono	56
3.4.6	Expansão do projeto: do H21A para a vila militar	59
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
4.1	Caracterização e tipificação das residências da vila militar	60
4.1.1	Perfis de consumo	60
4.1.2	Escolha do bloco padrão para o projeto	61
4.1.3	Caracterização do bloco de projeto: H21 - A	63
4.1.4	Irradiação incidente no bloco padrão de projeto	65
4.2	Sistemas fotovoltaicos	67
4.2.1	Caracterização dos tipos de placa utilizados em projeto	67
4.2.2	Caracterização dos tipos de inversores utilizados em projeto	72
4.2.3	Caracterização dos demais componentes utilizados em projeto	73
4.3	Análise técnico-econômica	73
4.3.1	Dimensionamento do sistema para o bloco H21A	73
4.3.2	Fixação dos módulos fotovoltaicos no telhado de fibrocimento	75
4.3.3	Orçamentos de projeto	76
4.3.4	Custos envolvidos nas reposições de itens do sistema	76
4.3.5	Retorno financeiro esperado	77
4.3.6	Compensação do projeto em créditos de carbono	85
4.3.7	Rentabilidade do projeto, considerando a compensação de carbono	86
4.3.8	Expansão do projeto: do H21A para a vila militar	87
5	CONCLUSÃO	92
	REFERÊNCIAS	93

1 Introdução

Motivação

Até a Revolução Industrial do século XVIII, os seres humanos exploraram diferentes formas de energia para utilização cotidiana e para promoção da vida e do trabalho. Desde a biomassa, utilizada como lenha para o fogo, à energia mecânica dos animais, ou até mesmo a energia hidráulica dos moinhos de água. Esses métodos atendiam às necessidades mais básicas das pessoas à época, porém eram bastante limitados e restritos, além de gerar diversas formas de poluição para o meio ambiente.

Com o advento da Revolução Industrial, iniciou-se o uso do carvão, posteriormente substituído pelo petróleo e pelo gás natural, que perduraram por muitos anos como a principal fonte de energia utilizada pela humanidade para seus diversos fins. Apesar de ter sido revolucionária, essa forma de geração de energia apresenta diversos problemas, como a intensa poluição ambiental oriunda das liberações de gases nocivos ao planeta Terra (VARUN *et al.*, 2009), e contribuintes para o aquecimento global, entre outros, além de ser uma forma de produção de energia baseada em fontes escassas de recursos naturais (STOCKER *et al.*, 2013). Além disso, a extração desses recursos causa poluição da água e do solo, destruição de habitats e impactos negativos para as cidades e habitações.

Hoje em dia, os seres humanos são completamente dependentes da energia elétrica em suas residências e no seu dia a dia. Dado o contexto de crescimento populacional vivenciado nas últimas décadas e a redução, ano após ano, da disponibilidade de recursos combustíveis e minerais não renováveis, tornou-se urgente o desenvolvimento de métodos alternativos para produção de energia em larga escala (PROENÇA, 2007). Depois do desenvolvimento das fontes de energia hidrelétrica, eólica e nuclear, entre outras, a humanidade tem voltado as atenções para a busca de soluções que sejam, principalmente, eficientes e sustentáveis, além de pouco agressivos ao meio ambiente nas suas diversas fases de implantação.

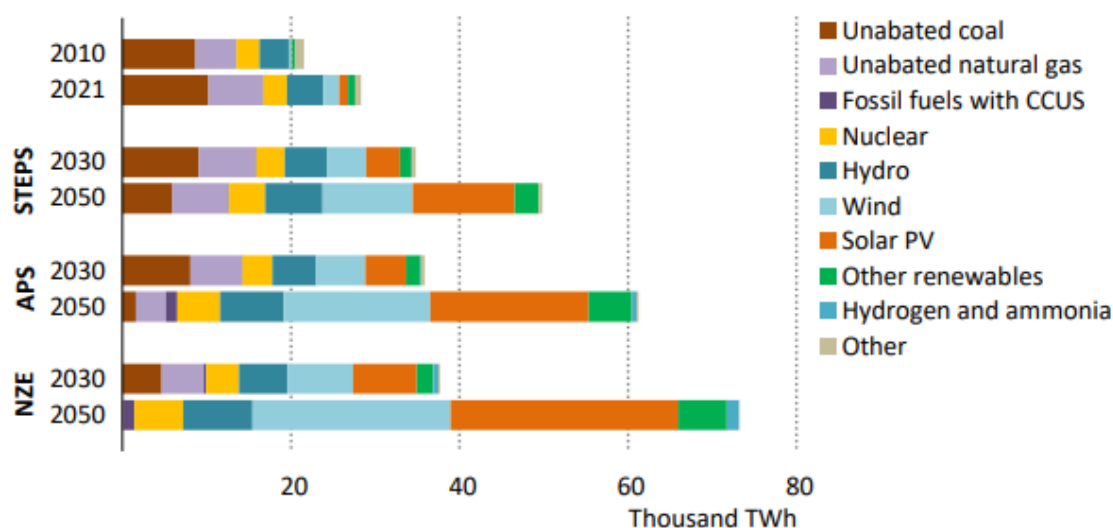
Nesse contexto, a energia solar se encaixa como uma excelente alternativa de produção de energia, uma vez que tem baixo custo de instalação, comparado às demais formas de produção, e produz energia a partir da radiação que vem diretamente do Sol: uma fonte inesgotável, gratuita e limpa.

A tecnologia fotovoltaica surgiu no século XX, depois dos trabalhos pioneiros de Chapin,

Fuller e Pearson na Bell Labs em 1954 (Chapin, Fuller, & Pearson, 1954), que resultaram no primeiro protótipo de painel solar. Desde então, esse método de produção de energia tem sido cada vez mais explorado, na tentativa de melhorar a eficiência das placas e de conseguir reduções nos custos de produção e de implantação dessa tecnologia (Dincer, 2011).

Os sistemas fotovoltaicos podem ser implementados de forma descentralizada, de modo que se elimina a necessidade de construção de grandes sistemas de geração e de transmissão de energia, além de facilitar a produção de energia mesmo nas áreas mais remotas. Por este e por outros motivos, a geração de energia por meio de painéis fotovoltaicos tem crescido muito nos últimos anos, conforme apresentado no relatório geral da (International Energy Agency, 2022), com dados sobre o cenário global de energia referentes ao ano de 2022, e estimativas para um crescimento acentuado dessa forma de produção de energia nos próximos anos, conforme evidenciado pela Fig. 1.1.

FIGURA 1.1 – Produção global de energia a partir de diferentes fontes, segundo a IEA



Fonte: IEA, 2022

O gráfico apresenta dados sobre a produção de energia, em milhares de Terawhatt-hora, por diferentes fontes desde 2010, incluindo as estimativas para essa produção até os anos 2030 e 2050, considerando 3 diferentes cenários definidos pela associação:

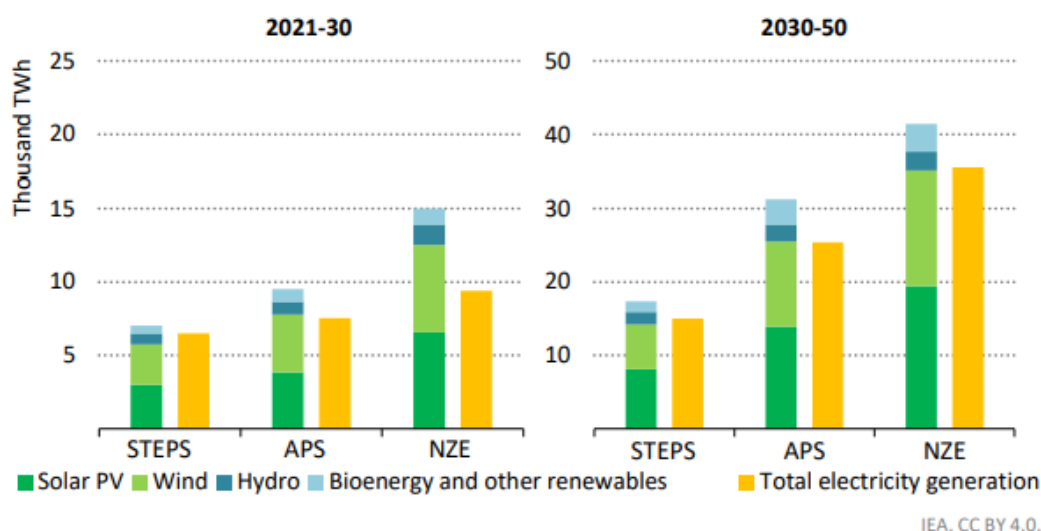
- STEPS (Stated Policies Scenario): Cenário que reflete as configurações de políticas atuais com base em uma avaliação setor por setor e país por país das políticas específicas que estão em vigor, bem como aquelas que foram anunciadas pelos governos ao redor do mundo.
- APS (Announced Pledges Scenario): cenário que presume que todos os compromissos climáticos feitos pelos governos ao redor do mundo, incluindo Contribuições Determinadas Nacionalmente (NDCs) e metas de longo prazo para emissões líquidas zero, bem como

metas para acesso à eletricidade e ao cozimento limpo, serão cumpridos integralmente e dentro do prazo.

- NZE (Net Zero Emissions by 2050 Scenario): Cenário que traça um caminho para que o setor de energia global atinja emissões líquidas zero de CO₂ até 2050. Ele não depende de reduções de emissões fora do setor de energia para atingir seus objetivos. O acesso universal à eletricidade e ao cozimento limpo é alcançado até 2030.

Em relação à produção de energia renovável, as estimativas da IEA são também muito promissoras para a energia solar. Vide Fig. 1.2, abaixo:

FIGURA 1.2 – Crescimento global em eletricidade renovável em relação ao crescimento total da geração de eletricidade por cenário, 2021-2050



Fonte: IEA, 2022

Hoje em dia, as fontes de energia renovável fornecem cerca de 30% da geração de eletricidade, mas têm boas perspectivas em todos os cenários de desenvolvimento, especialmente quando se fala em energia solar fotovoltaica e energia eólica (International Energy Agency, 2022)

No cenário STEPS, o crescimento na geração de energia por fontes renováveis já supera o crescimento na geração total até 2030 e 2050, de modo que reduz a necessidade de combustíveis fósseis e não renováveis.

No cenário APS, a energia solar fotovoltaica e eólica juntas já superam até mesmo o maior crescimento da demanda até 2030 e 2050, desbloqueando reduções mais profundas nas emissões. Já no cenário NZE, o crescimento das renováveis é 40% mais rápido até 2030 e 20% mais rápido até 2050 do que no APS, e isso leva à rápida descarbonização da eletricidade (International Energy Agency, 2022).

Diante do crescimento da demanda global por energia, é extremamente necessário que se invista nessas formas renováveis de geração, o que depende bastante da redução ou da apo-

sentadoria das atuais fontes de energia e do aumento do interesse político global em relação à causa (Vide 1.3).

FIGURA 1.3 – Oferta e demanda global de energia elétrica, por cenário, em TWh0

	2010	2021	STEPS		APS		NZE	
			2030	2050	2030	2050	2030	2050
Buildings	9 637	12 594	15 383	21 940	14 889	19 623	13 293	15 850
Industry	7 450	10 166	12 036	15 073	12 471	18 332	13 776	21 697
Transport	295	441	1 169	3 607	1 570	7 845	2 236	10 243
Hydrogen production	-	2	159	663	879	5 714	2 464	11 433
Global electricity demand	18 548	24 700	30 621	43 672	31 752	53 810	33 733	62 159
Unabated coal	8 670	10 201	9 044	5 892	8 076	1 580	4 666	0
Unabated natural gas	4 855	6 552	6 848	6 658	6 100	3 577	4 977	82
Unabated oil	969	682	432	312	363	175	180	3
Fossil fuels with CCUS	-	1	5	133	75	1 338	282	1 317
Nuclear	2 756	2 776	3 351	4 260	3 547	5 103	3 896	5 810
Hydropower	3 449	4 327	5 078	6 809	5 213	7 543	5 725	8 251
Wind	342	1 870	4 604	10 691	5 816	17 416	7 840	23 486
Solar PV	32	1 003	4 011	12 118	4 838	18 761	7 551	27 006
Other renewables	411	859	1 380	2 833	1 707	5 153	1 948	5 762
Hydrogen and ammonia	-	-	9	44	79	567	603	1 467
Global electricity supply	21 539	28 334	34 834	49 845	35 878	61 268	37 723	73 232
Renewables share	20%	28%	43%	65%	49%	80%	61%	88%

Fonte: IEA, 2022

Percebe-se pela Fig. 1.3 que a demanda global por eletricidade aumenta significativamente em todos os três cenários até 2050, subindo de 24.700 TWh em 2021 cerca de 80% no cenário STEPS, 120% no cenário APS e 150% no Cenário NZE.

O setor de edificações é o maior consumidor de eletricidade hoje e continua sendo no STEPS e APS até 2050, com a indústria sendo a segunda maior. Outros usos de eletricidade aumentam rapidamente, especialmente no APS e no Cenário NZE, à medida que mais veículos elétricos (VE) entram em circulação e o uso de hidrogênio limpo aumenta.

Prevê-se que o fornecimento global de eletricidade se afaste dos combustíveis fósseis não mitigados após a recuperação das atuais perturbações no mercado, que envolvem o aumento da energia a carvão em 2022 devido à alta demanda de energia decorrente da recuperação econômica da Covid-19, além das preocupações sobre os preços do gás natural, devido aos recentes acontecimentos e crises no cenário global.

Dito isto, tudo indica que nos próximos anos a energia solar deve corresponder a uma grande parte da produção de energia mundial, o que é extremamente relevante no cenário de demanda crescente de energia e da necessidade de redução dos impactos da intervenção humana no meio

ambiente. Dentre as energias renováveis, a energia solar consiste na captação da radiação emitida pelo Sol, podendo resultar em aquecimento de água, energia térmica ou energia elétrica (Guo, 2012, Proença, 2007).

Portanto, faz-se extremamente importante a incorporação das tendências atuais de geração de energia por parte do maior número de instituições e de empresas nacionais, de modo a incentivarem o uso de energia limpa por todo o país. De modo geral, isso constitui uma excelente oportunidade para as Forças Armadas e para as suas vilas de habitação militar, no sentido de assumirem a vanguarda neste movimento.

A importância estratégica do projeto no DCTA: Independência na produção de energia elétrica

Em um cenário de crescente complexidade e dinamismo, a segurança energética emerge como uma prioridade estratégica para as instituições militares, e o Departamento de Ciência e Tecnologia da Aeronáutica (DCTA) não é exceção. Por diversas vezes, a vila militar do Departamento foi vítima de quedas de energia ou interrupções no seu fornecimento, devido a problemas externos ou a falhas na subestação que a abastece (Vide Fig. 1.4). Sendo assim, o projeto de instalação de módulos fotovoltaicos na vila surge como uma iniciativa crucial para contribuir para a independência energética da vila militar do DCTA, conferindo benefícios substanciais a um Departamento que produz tecnologia para a defesa nacional.

FIGURA 1.4 – Vários bairros em São José registram queda de energia, após incêndio em subestação



Fonte: G1, 2020

A autossuficiência no fornecimento de energia é essencial para garantir operações contínuas e ininterruptas, especialmente em instalações estratégicas como o DCTA. Ao adotar fontes renováveis, como a energia solar, o departamento não apenas reduz sua dependência de recursos externos, mas também fortalece sua resiliência operacional em face de potenciais interrupções no fornecimento convencional de energia.

A instalação de placas fotovoltaicas não só representa uma medida de eficiência e responsabilidade ambiental, mas também alinha-se com a visão de segurança nacional ao garantir um fornecimento estável de energia em situações adversas. Em casos de eventos climáticos extremos, falhas na infraestrutura convencional ou mesmo em cenários de contingência, a capacidade de produzir energia localmente confere ao DCTA uma vantagem estratégica significativa.

Além disso, a redução da pegada de carbono associada à transição para fontes renováveis não apenas contribui para práticas sustentáveis, mas também reflete positivamente na imagem e na responsabilidade social das instituições militares. Isso demonstra um comprometimento inequívoco com a eficiência operacional e a proteção do meio ambiente, valores fundamentais para a adaptação da infraestrutura dos departamentos e institutos militares às tendências modernas do mercado e do país.

Sendo assim, entende-se que o projeto de instalação de módulos fotovoltaicos na vila residencial do DCTA transcende a busca por eficiência energética, representando um marco estratégico na promoção da segurança energética e na garantia da autonomia operacional. Ao investir em fontes renováveis, o DCTA não apenas responde às demandas contemporâneas de sustentabilidade, mas também reforça sua capacidade de enfrentar desafios futuros, consolidando-se como uma instituição militar moderna, adaptável e comprometida com a defesa nacional.

1.1 Objetivo

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho de graduação é analisar a viabilidade técnico-econômica da implantação de placas solares na vila residencial do DCTA. Para isso, pretende-se realizar um estudo sobre o funcionamento dos tipos de placas solares existentes, do sistema de absorção e distribuição de energia para cada uma delas, da incidência solar no local de estudo do projeto, dos custos de implantação dessas placas e da economia financeira que essa implantação traria para a prefeitura do DCTA, de forma a entender como funciona a demanda e a oferta de energia na configuração atual e quais seriam os benefícios oriundos da implantação pretendida, em termos de custos.

Os dados sobre o consumo atual nas residências do DCTA foram obtidos pela prefeitura do departamento, os métodos e os processos de instalação dos sistemas foram escolhidos a partir de visitas técnicas no local, enquanto os dados sobre a incidência solar foram obtidos conforme descrito na seção 3.1 deste trabalho.

A análise da viabilidade econômica-financeira foi feita a partir de uma análise de custos de implantação dos sistemas e do cálculo de alguns parâmetros de retorno financeiro, descritos na seção 3.4 deste trabalho.

1.1.2 Objetivos específicos

- Explorar a fundamentação teórica sobre sistemas fotovoltaicos, contextualizando a região do DCTA, em São José dos Campos, abordando tópicos essenciais ao planejamento da geração de energia elétrica em ambiente urbano, assim como conceitos referentes à redução do impacto ambiental;
- Entender e definir a melhor forma de aproveitamento da energia solar na região de estudo, bem como a finalidade do sistema de captação de energia: aquecimento de água ou geração de energia elétrica;
- Estudar os impactos econômicos e técnicos da instalação e manutenção das placas solares nos ambientes de estudo propostos;

- Quantificar e analisar a quantidade equivalente de CO₂ evitado a partir da geração fotovoltaica estimada dentro dos cenários do projeto;

1.2 Etapas de projeto

- Realizar uma investigação aprofundada na literatura a respeito da geração fotovoltaica distribuída, focando em elementos cruciais, tais como o princípio operacional, componentes dos sistemas fotovoltaicos e as variáveis e parâmetros necessários para dimensionar e otimizar tais sistemas.
- Construir um catálogo de dados, através da análise de informações fornecidas pela prefeitura do DCTA, sobre o perfil de consumo de energia na vila militar e fatores relacionados, como o custo do aluguel pago pelos militares da vila, as fontes de energia empregadas, os tipos de residências onde as placas solares serão instaladas, o consumo médio de energia por tipo de residência e a incidência solar na região de São José dos Campos.
- Procurar estudos sobre as emissões de CO₂ ligadas à implantação e operação de projetos para a geração de energia.
- Selecionar artigos, textos e livros com relevância acadêmica para embasar a pesquisa. Identificar os materiais mais relevantes para a leitura, realizar o fichamento e organizar esses recursos de acordo com a fase do trabalho que irão enriquecer.
- Registrar os dados de geração fotovoltaica para sistemas em operação em São José dos Campos, a fim de criar um registro histórico de desempenho.
- Recolher informações relacionadas ao consumo de energia elétrica na região estudada, para uma análise de inserção de geração fotovoltaica, bem como dados sobre a irradiação diária na região.
- Desenvolver cenários estratégicos de implantação de geração fotovoltaica distribuída para atender parte do consumo energético da região em estudo. Para a criação desses cenários, serão utilizados como referência sistemas reais em funcionamento.
- Avaliar as consequências da implantação dos cenários sugeridos, levando em consideração os impactos diretos de cada um, assim como quantificar a quantidade total de emissões equivalentes de CO₂ que são evitadas, através de estimativas de geração anual dos cenários propostos e do fator de emissões de CO₂ equivalente para gerar 1 MWh na matriz elétrica brasileira.

2 Revisão bibliográfica

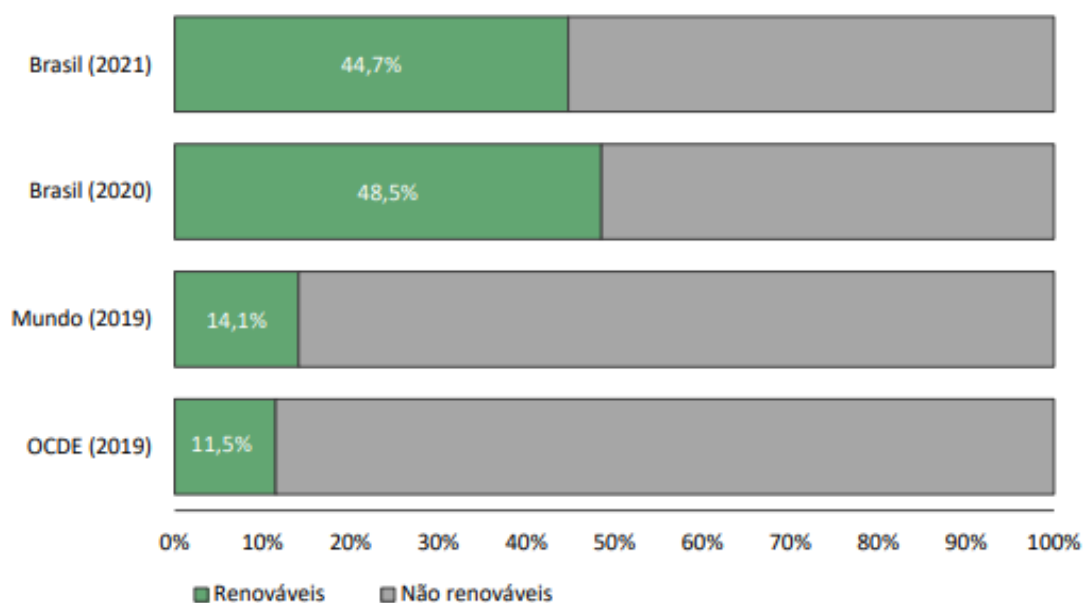
2.1 Revisão bibliográfica

2.1.1 Cenário atual da produção de energia no Brasil

Segundo o Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional (BNE) de 2022, referente ao ano de 2021 e elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), em 2021 o total de energia disponibilizada no Brasil atingiu 301,5 Mtp, ou 10^6 toneladas equivalentes de petróleo. Uma unidade de tep equivale ao calor liberado pela combustão de uma tonelada de petróleo cru, o que corresponde a aproximadamente 42 gigajoules.

Essa valor de energia total interna disponibilizada representa um aumento de 4,5% em relação ao ano de 2020. Em relação à energia elétrica, esse crescimento foi marcado pela queda na oferta de energia hidráulica (redução de 8,5%) e pelo incremento nas fontes de energia eólica (incremento de 26,7%) e solar (incremento de 55,9%) na matriz energética, o que manteve a produção de energia renovável correspondente a 44,7% da produção interna no país, um padrão muito superior ao restante do mundo (Balanço Energético Nacional, 2022), conforme apresentado na Fig. 2.1.

FIGURA 2.1 – Participação da energia renovável na Oferta Interna de Energia do Brasil e do mundo, segundo a Agência Internacional de Energia (AIE)



Fonte: EPE, 2022

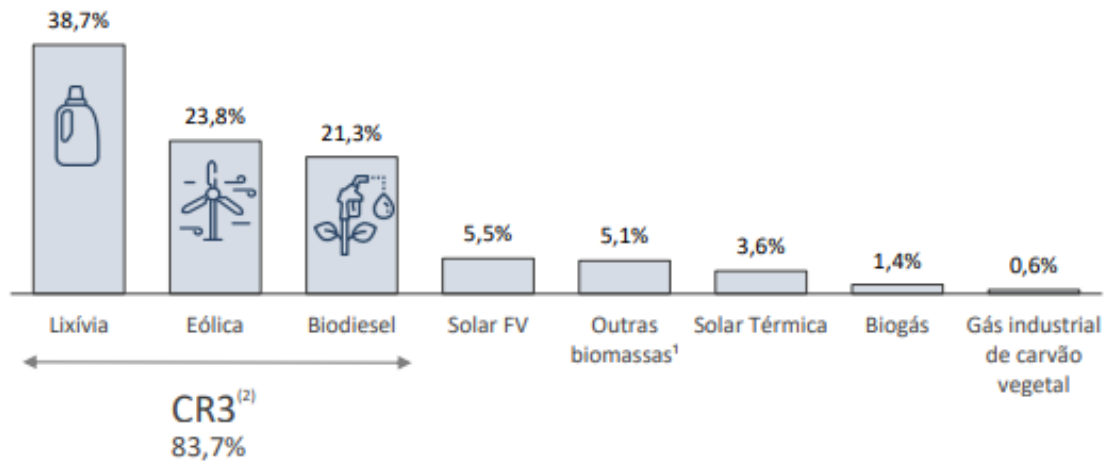
Desses 44,7% (Vide Fig. 2.1) de energia renovável produzida no Brasil, tem-se a seguinte distribuição (Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2022):

- Biomassa da cana: 16,4%
- Energia hidráulica: 11,0%
- Lenha e carvão vegetal: 8,7%
- Outras fontes: 8,7 %

2.1.1.1 Energia elétrica solar fotovoltaica no Brasil

Dos 8,7% correspondente a “Outras fontes” na distribuição de energia renovável no Brasil, tem-se a distribuição em 8 categorias de fontes de energia apresentada na Fig. 2.2:

FIGURA 2.2 – Outras categorias de energia renovável que compõem a matriz de produção brasileira



Fonte: EPE, 2022

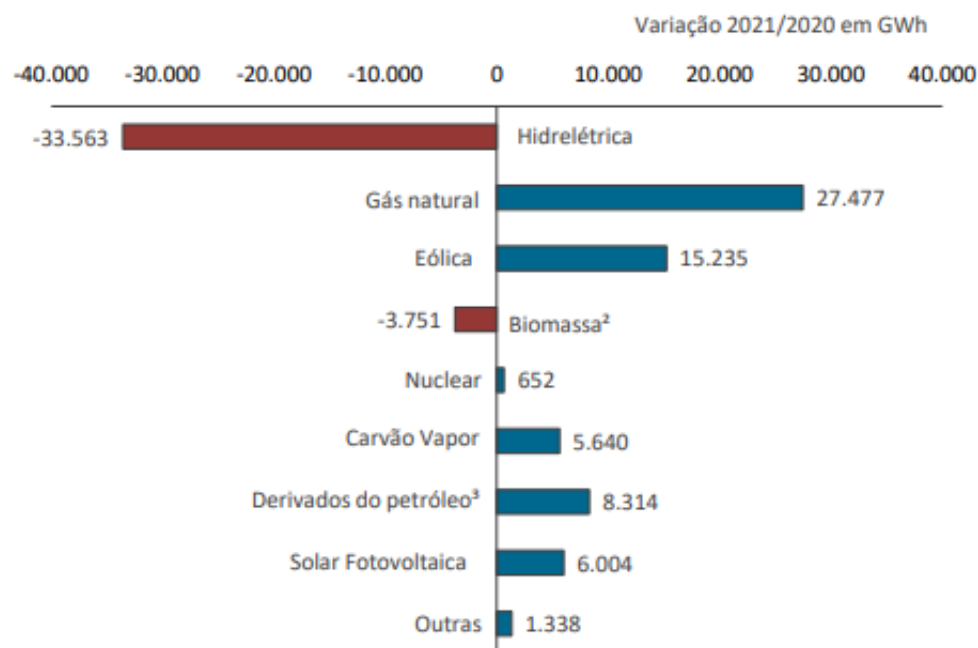
Entre essas categorias, a energia solar fotovoltaica é a segunda maior em termos de crescimento no país, entre 2020 e 2021 (Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2022), conforme explicitado na tabela 2.1.

TABELA 2.1 – Crescimento das outras categorias de energia elétrica renovável que compõem a matriz de produção de energia brasileira, em GWh

Fonte	2020	2021	$\Delta 20/21$
Hidrelétrica	396.381	362.818	-8,50%
Gás Natural	59.480	86.957	46,20%
Eólica	57.051	72.286	26,70%
Biomassa	56.168	52.416	-6,70%
Nuclear	14.053	14.705	4,60%
Carvão Vapor	11.946	17.585	47,20%
Derivados do Petróleo	9.013	17.327	92,30%
Solar Fotovoltaica	10.748	16.752	55,90%
Outras	13.925	15.263	9,60%
Geração Total	628.764	656.109	4,30%

Fonte: EPE, 2022

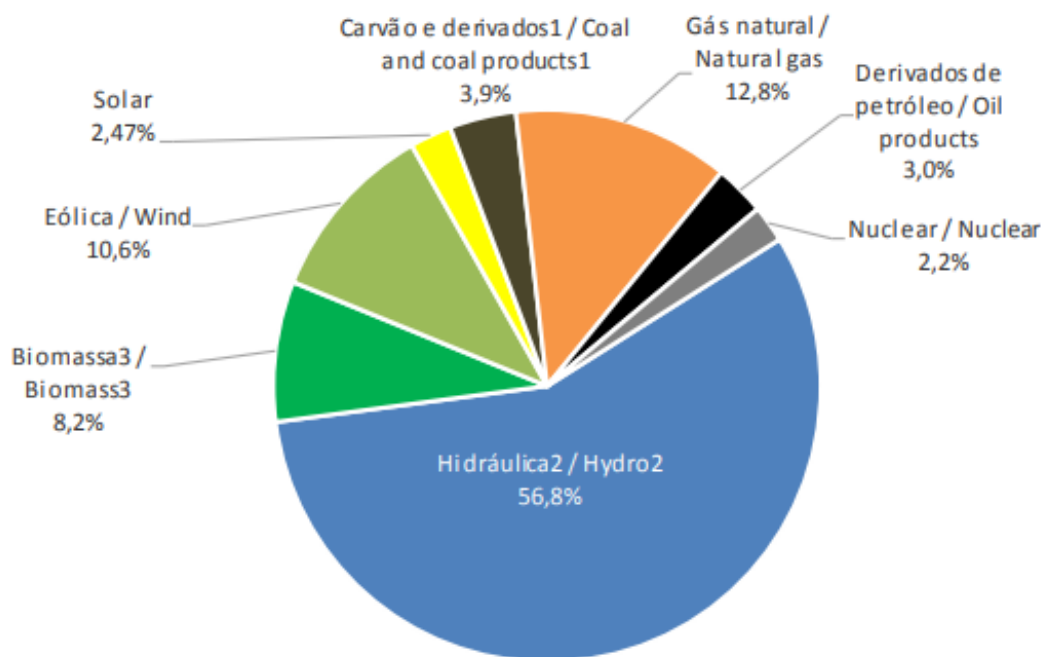
FIGURA 2.3 – Variação, em GWh, das outras categorias de energia elétrica renovável



Fonte: EPE, 2022

Com um crescimento de 55,9% entre os anos de 2020 e 2021 (Vide tabela 2.1), essa categoria de produção de energia tem-se consolidado no país como uma alternativa promissora para os anos vindouros, seguindo a tendência do cenário global de produção de energia. Aliado ao grande potencial de crescimento dessa fonte de energia, há também um grande espaço a ser conquistado na matriz energética. Numa visão global, a Oferta Interna de Energia elétrica no país segue a distribuição apresentada na Fig. 2.4 (Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2022):

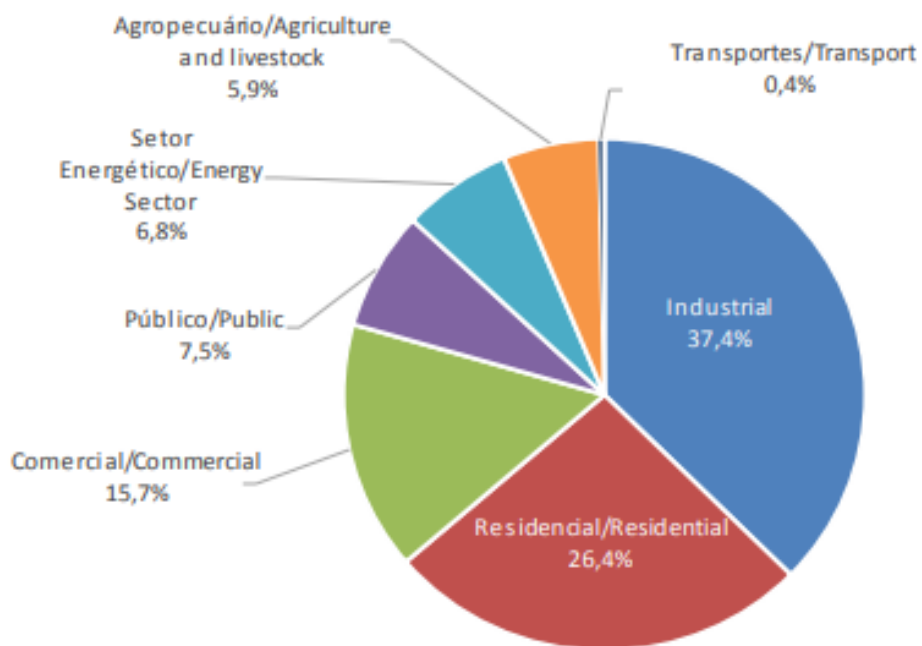
FIGURA 2.4 – OIE de energia elétrica do Brasil, por fonte



Fonte: EPE, 2022

Essa oportunidade de crescimento é especialmente verdadeira nos setores Industrial e Residencial, que têm as maiores participações no consumo de energia no país, conforme a Fig. 2.5.

FIGURA 2.5 – Participação setorial no consumo de eletricidade



Fonte: EPE, 2022

2.1.2 Geração distribuída

Diferentemente do modelo convencional de geração de energia elétrica, que conta com grandes estruturas de usina em regiões afastadas dos centros urbanos e com grandes infraestruturas de distribuição elétrica, o modelo de Geração distribuída consiste na utilização de geradores descentralizados e próximos aos consumidores (Vide Fig. 2.6).

Esse modelo engloba grandes parques geradores de energia ou pequenos produtores em residências e em áreas comerciais (mini-usinas conectadas ao sistema elétrico já existente).

FIGURA 2.6 – Esquema de comparação entre a geração de energia convencional e a geração distribuída



Fonte: INEE

No Brasil, esse modelo tem crescido bastante e permite aos detentores desse tipo de sistema a produção de energia para consumo próprio (vide Fig. 2.7) e para fornecimento, quando necessário, nas regiões mais distantes das redes convencionais de alimentação de energia (como nas cidades muito afastadas dos centros urbanos).

Os sistemas de geração distribuída permitem economia em relação ao consumo de energia elétrica, maior independência e autonomia para os seus usuários, redução nos investimentos em linhas de transmissão e em usinas convencionais para o governo, além de contribuírem para o equilíbrio ambiental (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

FIGURA 2.7 – Exemplo de micro-usina fotovoltaica.



Fonte: Google imagens

Em particular, os sistemas fotovoltaicos são mais baratos que os sistemas dos métodos convencionais, são adequáveis à infraestrutura já existente na maioria dos lugares e contribuem para a produção de uma energia limpa, com menores taxas de emissão de gases poluentes ou resíduos durante o seu funcionamento.

2.1.3 Incidência solar na Terra

A energia que vem do Sol é transmitida ao planeta Terra na forma de radiação eletromagnética, e a energia que efetivamente chega à Terra corresponde a aproximadamente 10.000 vezes o consumo mundial no planeta, o que torna o Sol numa excelente fonte de energia, desde que bem aproveitada (CRESESB, 2008).

Os corpos que recebem essa energia eletromagnética proveniente do sol, absorvem-na na forma de energia térmica, ao que se dá o nome de captação solar: a energia eletromagnética é convertida em energia cinética e transferida às moléculas e átomos dos corpos (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Em alguns materiais, essa absorção pode produzir tensões ou correntes elétricas, alterando as propriedades elétricas desses materiais, através dos efeitos fotoelétrico ou fotovoltaico. Para o presente trabalho, é interessante a análise do efeito fotovoltaico, que serve de base para os sistemas de geração de energia que serão abordados.

2.1.3.1 Efeito fotovoltaico

Esse efeito consiste na conversão da energia eletromagnética em energia elétrica, particularmente realizada por materiais semicondutores através da criação de uma diferença de potencial ou de tensão elétrica. Quando conectados a eletrodos e caminhos elétricos, esses materiais excitados são capazes de produzir correntes elétricas.

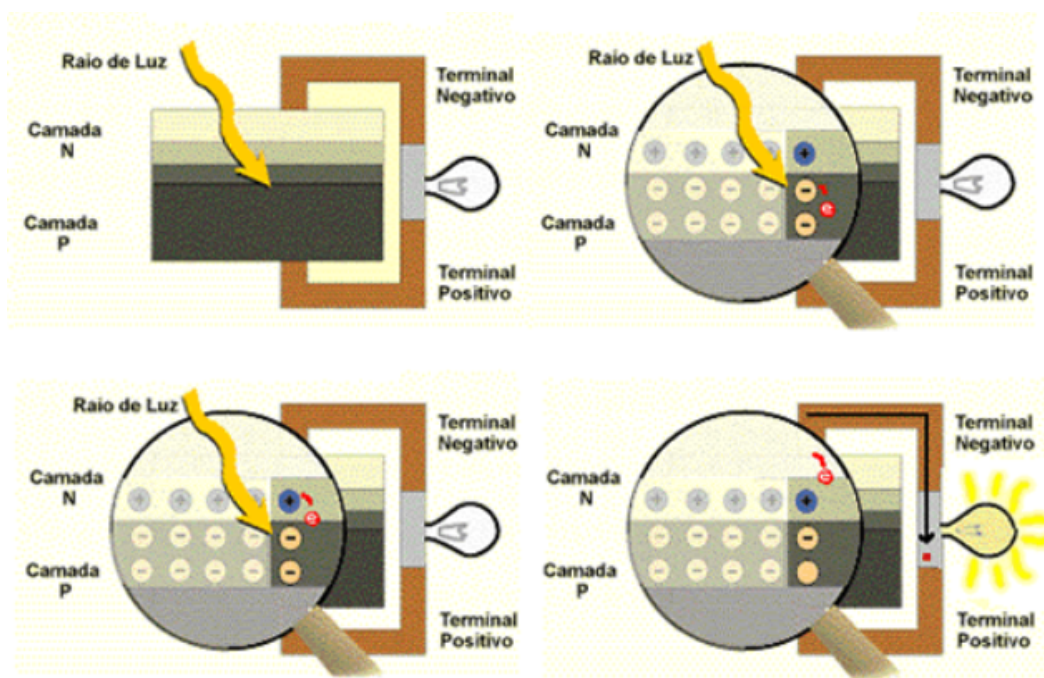
- **Funcionamento das placas solares:**

De forma simplificada, semicondutores como o Silício, que é o mais utilizado nas placas solares, formam redes cristalinas com elétrons em excesso, de modo que são bons fornecedores de elétrons quando excitados, e são conhecidos como *dopante n* ou *impureza n*.

Por outro lado, átomos como o Boro possuem carência de elétrons quando conectados à rede com o Silício, de modo que apresentam vacâncias eletrônicas. Esses átomos são conhecidos como aceitadores de elétrons, ou *dopantes p*.

Quando ao silício puro são adicionados átomos de boro e de fósforo em metades opostas, forma-se uma "junção pn". Nessa situação, os elétrons da parte n passam para a parte p, mantendo o lado n eletricamente positivo, e formando entre as placas um campo elétrico que dificulta a passagem de mais elétrons do lado n para o p (CRESESB, 2008), conforme ilustrado pela Fig. 2.8.

FIGURA 2.8 – Ilustração do efeito fotovoltaico



Fonte: CERESB, 2008

Quando essa junção é excitada por fótons da radiação eletromagnética, ocorre a geração de pares elétron-lacuna, e nas regiões em que o campo elétrico não é nulo, as cargas se deslocam

formando uma diferença de potencial. Se as extremidades opostas do silício forem então conectadas por um condutor, haverá a condução de corrente, e essa é a base do funcionamento das placas solares.

2.1.3.2 Medições da energia solar que incide na Terra

A obtenção dos dados de incidência solar são de extrema importância para o dimensionamento dos sistemas de placas solares. Existem algumas formas de se quantificar a energia solar que incide nas diferentes regiões do planeta Terra, o que requer a utilização e o conhecimento de alguns conceitos.

2.1.3.3 Irradiância

Também chamada de irradiação, trata-se de uma medida de potência por área, expressa em W/m^2 . Na superfície terrestre, a irradiância solar apresenta um valor médio de $1000 W/m^2$, valor bastante adotado pela indústria e utilizado como referência para comparações de eficiência entre diferentes placas.

Sensores e medidores de radiação solar podem ser utilizados para determinar a quantidade de energia incidente por metro quadrado ao longo de dias, meses ou anos, de modo que é possível obter gráficos de irradiância solar em uma dada região ao longo de um período de tempo específico (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

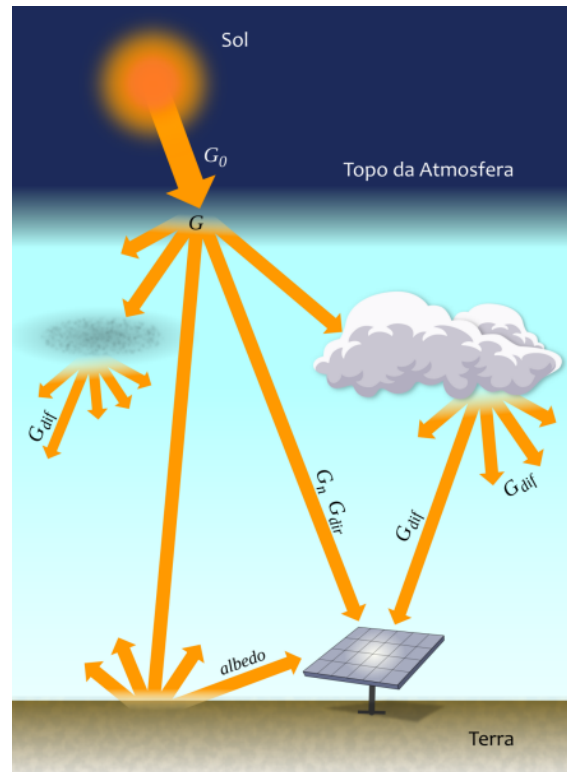
A irradiância incidente em uma superfície é composta por duas principais componentes: direta e difusa. A radiação solar direta incide alinhada com a linha imaginária entre o Sol e a superfície de incidência. Já a radiação difusa é composta por todas as outras radiações espalhadas pelos gases presentes na atmosfera. De acordo com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2022), o Atlas Brasileiro de Energia Solar destaca os seguintes tipos de irradiância, apresentados na Fig. 2.9:

- **Irradiância extraterrestre (G_0):** Irradiância que atinge o topo da atmosfera;
- **Irradiância direta normal (G_n):** Também chamada DNI, é a taxa de energia que vem diretamente do Sol e incide perpendicular à superfície;
- **Irradiância global horizontal (G):** taxa de energia total por unidade de área que incide em uma superfície horizontal, dada por $G = G_{dif} + G_{dir}$, em que G_{dif} é a energia oriunda do espalhamento do feixe solar direto pela atmosfera (nuvens, etc) e G_{dir} corresponde à energia solar direta por unidade de área numa superfície horizontal;

O Atlas define ainda um outro tipo de irradiância:

- **Irradiância no plano inclinado (G_i):** Taxa de energia por unidade de área incidente num plano inclinado na latitude de um determinado local;

FIGURA 2.9 – Componentes da irradiância solar.



Fonte: INPE, 2017

2.1.3.4 Insolação ou Irradiação solar

A insolação é parecida com a irradiância, mas expressa a energia solar (não a potência) incidente sobre uma determinada área ao longo de um intervalo de tempo. É uma unidade medida em watt-hora por metro quadrado, Wh/m^2

É possível obter mapas de insolação que fornecem valores diários desse parâmetro numa determinada região, em $Wh/m^2/dia$, por exemplo. Esses mapas são muito úteis para dimensionamentos (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

No Atlas Brasileiro de Energia Solar, define-se a insolação como a integral da irradiância no tempo, e adota-se uma terminologia parecida com a explicada na seção anterior: H_0 , H_n , H_{dif} , H_{dir} , H e H_i .

2.1.3.5 Fontes de consulta

Os mapas e dados mencionados nesta seção podem ser obtidos através de várias fontes de dados, entre as quais pode-se citar:

- INPE - Atlas Brasileiro de Energia Solar: Documento que apresenta dados sobre incidência solar no Brasil desde 1999 até 2015 (PEREIRA et al., 2017)

- NASA - Projeto Surface meteorology and Solar Energy (SSE): dados meteorológicos desde 1983 a 2005 (SILVA, 2019).
- SOLARGIS - Fonte de dados com resolução espacial de aproximadamente 3 km (SILVA, 2019).
- Projeto SWERA (Solar and Wind Energy Resource Assessment): Conjunto de dados do Núcleo de Programas Ambientais das Nações Unidas, disponíveis no website swera.unep.net (VILLALVA; GAZOLI, 2012).
- Atlas de Energia Elétrica do Brasil, ANEEL: Fonte de Mapas de insolação no território brasileiro (VILLALVA; GAZOLI, 2012).
- Calculadora solar: ferramenta útil para a obtenção de informações sobre insolação num determinado local, disponível em www.calculadorasolar.com.br VILLALVA; GAZOLI, 2012).
- Global Solar Atlas: Calculadora de insolação em uma determinada área, disponível em <https://globalsolaratlas.info/map>.

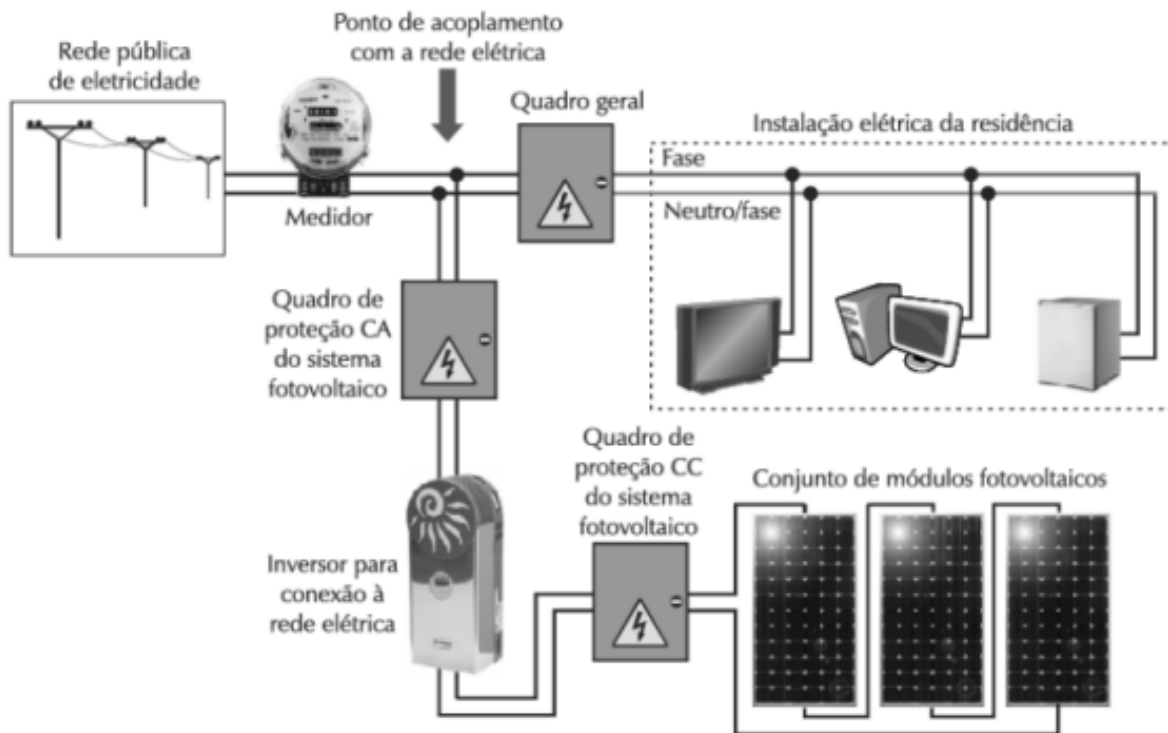
2.1.4 Sistemas de células e módulos fotovoltaicos

Para o cumprimento dos objetivos deste trabalho, serão projetados sistemas fotovoltaicos que se conectem à rede elétrica já existente na região do projeto, reduzindo o consumo da rede e possivelmente gerando excedente de energia. Trata-se de microgeradores de energia fotovoltaica, que apresentam potência de até 100 kW e que não necessitam de transformadores ou de linhas de transmissão (Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), 2023).

Esses sistemas de microgeração fotovoltaica residenciais (Vide Fig. 2.10) são geralmente compostos por:

- **Módulos fotovoltaicos:** são fáceis de instalar, em série ou paralelo, e ficam instalados nos telhados das residências;
- **inversores:** responsáveis pela transformação da corrente contínua (CC) gerada pelos módulos em corrente alternada (CA), que alimenta a residência;
- **Quadros de segurança:** realizam a proteção dos módulos fotovoltaicos, com dispositivos de proteção para eventuais falhas na rede, tanto de corrente alternada quanto de corrente contínua;
- **Infraestrutura de instalação:** Bases metálicas para fixação dos módulos, cabeamentos, entre outros que variam conforme o tipo de residência e telhado;

FIGURA 2.10 – Organização e componentes de um sistema fotovoltaico residencial conectado à rede elétrica.



Fonte: VILLALVA; GAZOLI, 2012

2.1.5 Disposição, inclinação dos módulos

A forma com que os raios solares incidem no planeta Terra variam conforme a posição do Sol, que varia diariamente e anualmente. Existem diversas formas de se dispor as placas fotovoltaicas, sendo a mais recomendada delas a disposição em direção ao norte geográfico, com pequenos ajustes a depender da latitude do local.

Em relação à inclinação das placas, é necessário entender que o ângulo de inclinação das placas influencia na sua captação de energia solar, que pode ser maior ou menor. Existem ângulos que possibilitam a captação máxima de energia para diferentes regiões do Brasil, com base na latitude do local de projeto (Vide Fig. 2.11).

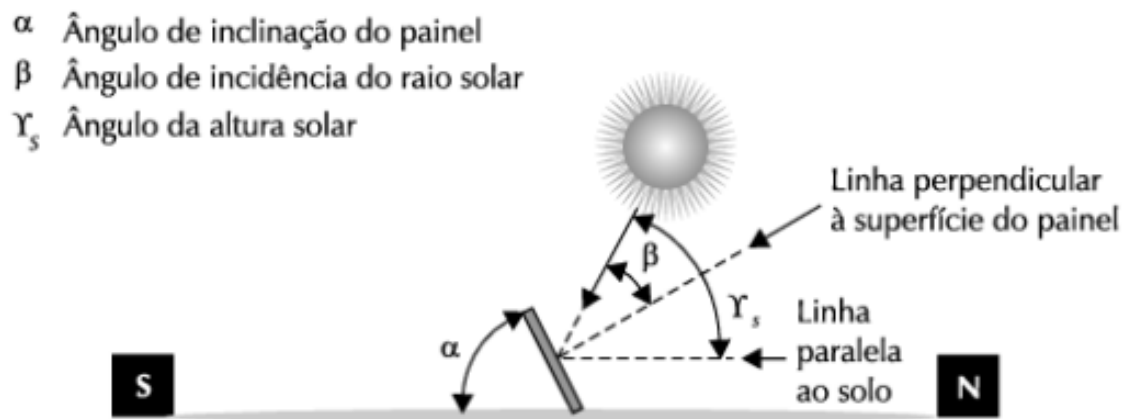


FIGURA 2.11 – Ângulo de inclinação dos módulos fotovoltaicos e ângulos de incidência dos raios solares (VILLALVA; GAZOLI, 2012)

A tabela 2.2 apresenta os ângulos recomendados para as placas com base no *"Installation and Safety Manual of the Bosch Solar Modules"* (Bosch Group, 2011):

TABELA 2.2 – Ângulo de Inclinação Recomendado em Função da Latitude Geográfica

Latitude Geográfica do Local	Ângulo de Inclinação Recomendado
0° a 10°	$\alpha = 10^\circ$
11° a 20°	$\alpha = \text{latitude}$
21° a 30°	$\alpha = \text{latitude} + 5^\circ$
31° a 40°	$\alpha = \text{latitude} + 10^\circ$
41° ou mais	$\alpha = \text{latitude} + 15^\circ$

Fonte: BOSCH, 2011

Com base na tabela 2.2 e na latitude do local de projeto, é possível definir a angulação recomendada para os módulos fotovoltaicos de projeto.

2.1.6 Regras de instalação

2.1.6.1 Dimensões dos módulos e da estrutura de suporte

Tendo definido o ângulo de inclinação dos módulos solares com base no método descrito na seção anterior e tendo posicionado os módulos na direção do norte geográfico, deve-se agora determinar as dimensões da altura de haste de fixação dos módulos (z) e a distância entre a borda do módulo em solo e a haste de fixação (x), com base no comprimento do módulo (L) e do ângulo (α) determinado (VILLALVA; GAZOLI, 2012), conforme explicitado na Fig. 2.12:

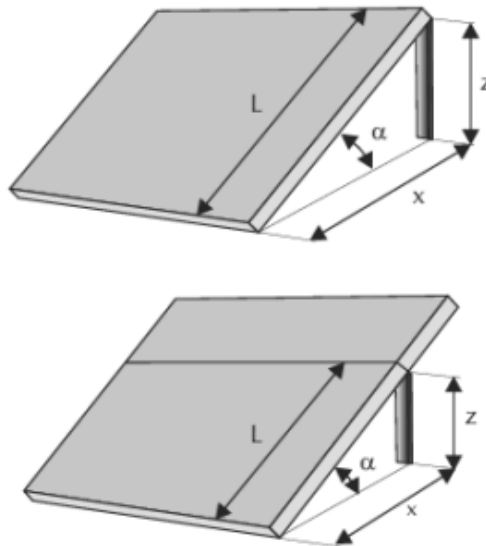


FIGURA 2.12 – Relações entre as dimensões do módulo fotovoltaico.

A partir dessas relações, tem-se as relações 2.1 e 2.2:

$$z = L \cdot \text{sen} \alpha \quad (2.1)$$

$$x = L \cdot \text{cos} \alpha \quad (2.2)$$

Baseado nessas relações, podem ser determinadas quaisquer dimensões necessárias em função das especificidades do local de instalação.

2.1.6.2 Espaçamento entre as placas

O propósito de espaçar corretamente os módulos do sistema de captação fotovoltaica é estabelecer um balanço adequado entre o melhor aproveitamento do espaço disponível para disposição das placas e a menor perda de eficiência possível, devido ao efeito de sombreamento que uma placa causa sobre a outra, reduzindo a capacidade de absorção desta última (Vide Fig. 2.13).

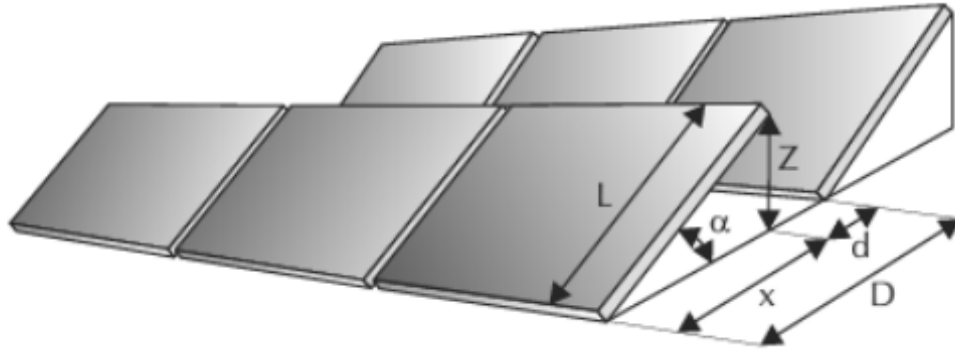


FIGURA 2.13 – Dimensões para fileiras de módulos fotovoltaicos.

Existem duas estratégias preponderantes de espaçamento, a primeira delas prioriza o aproveitamento de espaço, enquanto a segunda prioriza a menor perda de eficiência por sombreamento. A escolha entre as estratégias fica a critério do projetista (VILLALVA; GAZOLI, 2012):

- **Aproveitamento da área disponível:** Adotando-se essa estratégia, que prioriza a melhor utilização do espaço em detrimento da eficiência de captação da energia solar, é recomendado o seguinte espaçamento entre as placas de projeto: $d = 3,5 \cdot z$
- **Maximização da eficiência de absorção:** Neste segundo cenário, prioriza-se a eficiência de absorção solar, utilizando-se o seguinte espaçamento recomendado: $d = 2,25 \cdot L$

Uma vez que as placas dos módulos solares para este projeto devem ser instaladas sobre os telhados das residências escolhidas, deve-se levar em conta também a angulação já existente dos telhados e dos locais de instalação. Esses ajustes serão feitos posteriormente na seção 3 deste trabalho.

2.1.7 Viabilidade técnico-econômica

2.1.7.1 Payback

O *payback* é definido como o período de retorno de um investimento. Basicamente, trata-se de uma métrica financeira para cálculo do tempo necessário para que um investimento inicial seja recuperado (MAGALHÃES, 2017).

Para o projeto de instalação de placas solares na vila militar, o *payback* se calcula a partir do custo total de instalação dos módulos e a partir da expectativa de fluxo de caixa que será obtido pela geração própria de energia elétrica, através do reaproveitamento da energia solar (Rosa e Lopes, 2018). Assim, calcula-se o payback conforme equação 2.3:

$$Payback = \frac{Investimento\ inicial}{Fluxo\ de\ caixa_t} \quad (2.3)$$

- Fluxo de caixa: Obtido a partir da instalação de placas solares

No contexto do projeto, define-se fluxo de caixa da aplicação, $Fluxo\ de\ caixa_t$, como o dinheiro que está sendo economizado a partir da instalação do sistema de placas. Esse dinheiro seria destinado ao pagamento de energia elétrica fornecido por uma concessionária. No presente trabalho, será considerado um período de projeto de trinta anos para análise do fluxo de caixa ($t = 30$ anos).

2.1.7.2 Retorno em 30 anos - Fluxo de caixa acumulado

A partir da estimativa de produção de energia dos sistemas de geração fotovoltaica, é possível estimar os valores de fluxo de caixa que serão gerados a partir do projeto, considerando-se as taxas de degradação da produtividade do sistema, a taxa de aumento da tarifa cobrada sobre o valor do kWh e os valores de manutenção ou reposição de componentes do sistema instalado.

O fluxo de caixa inicial, no ano zero, corresponde ao valor do investimento no projeto. Os próximos fluxos de caixa, ano após ano, podem ser estimados a partir da equação 2.4, considerando-se as variáveis de projeto descritas anteriormente:

$$F.C_i = P_{sis} \cdot \frac{(1 + C)^i}{(1 + D)^i} \quad (2.4)$$

Sendo $F.C_i$ o fluxo de caixa no ano i , P_{sis} a produtividade do sistema, em reais, C a taxa de crescimento da tarifa cobrada sobre o kWh consumido e D a taxa de degradação do sistema de geração de energia solar.

Nos anos em que for necessário troca de equipamentos, obtém-se o fluxo de caixa a partir da inclusão de um fator que corresponde ao custo de troca (C_{troca}), conforme a equação 2.5:

$$F.C_i = P_{sis} \cdot \frac{(1 + C)^i}{(1 + D)^i} - C_{troca} \quad (2.5)$$

2.1.7.3 VPL - Valor presente líquido

O Valor Presente Líquido (VPL) é uma métrica financeira que avalia a atratividade de um investimento ou projeto, calculando o valor presente de todos os fluxos de caixa futuros associados a esse projeto, descontados a uma taxa apropriada (a taxa de desconto). O VPL é usado para determinar se um investimento é viável financeiramente (GITMAN, 2010), e pode ser determinado pela expressão 2.6:

$$VPL = \sum_{i=0}^n \frac{FC_i}{(1 + r)^i} \quad (2.6)$$

Sendo

- VPL o Valor Presente Líquido do projeto;
- n o número de períodos ao longo do tempo no projeto, neste caso $n = 30$ anos;
- FC_i representa o fluxo de caixa no ano i ;
- r é a taxa de desconto utilizada para trazer todos os fluxos de caixa para o seu valor presente;

O VPL é uma métrica poderosa para avaliar investimentos, pois considera o valor temporal do dinheiro. Ele assume que o dinheiro no futuro vale menos do que o dinheiro no presente, devido a oportunidades de investimento alternativas e ao risco associado aos fluxos de caixa futuros.

Para o projeto de instalação dos sistemas de módulos fotovoltaicos, o cálculo do VPL envolve somar os fluxos de caixa futuros (entradas e saídas) descontados de volta ao presente, usando a taxa de desconto apropriada. Se o VPL for positivo, o projeto é considerado viável, pois ele está gerando um retorno maior do que o custo de oportunidade do dinheiro (a taxa de desconto). Se o VPL for negativo, o projeto pode não ser econômico.

Geralmente, os investidores e tomadores de decisão comparam o VPL de diferentes projetos e escolhem aquele com o VPL mais alto, desde que seja positivo, pois isso indica a maior oportunidade de retorno financeiro.

2.1.7.4 TIR - Taxa interna de retorno

A Taxa Interna de Retorno (TIR) é uma métrica financeira que determina a taxa de desconto à qual o Valor Presente Líquido (VPL) de um projeto se torna igual a zero (ROSS *et al.*, 2013).

Em outras palavras, a TIR é a taxa de retorno que faz com que o investimento seja neutro do ponto de vista financeiro, ou seja, o valor dos fluxos de caixa futuros do projeto é igual ao valor investido inicialmente. Quando a TIR é positiva, o projeto é considerado economicamente viável, pois proporcionará um retorno superior à taxa de desconto usada (Vide Eq. 2.7):

$$0 = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1 + TIR)^t} \quad (2.7)$$

Sendo:

- 0 é o valor presente líquido (VPL) do projeto, que é igual a zero quando estamos resolvendo para a TIR;
- n é o número de períodos no projeto;
- CF_t representa o fluxo de caixa no ano t ;

- TIR é a Taxa Interna de Retorno a ser calculada;

Procura-se determinar o valor de TIR que torna a soma dos fluxos de caixa futuros igual a zero. Para fazer isso, pode-se usar métodos numéricos, como o método da bisseção, o método de *Newton-Raphson* ou funções de *software* financeiro (como o *Microsoft Excel*), que será utilizado neste projeto.

No caso do projeto de sistema de geração fotovoltaica, calcula-se a TIR do projeto e, em seguida, compara-se essa taxa com sua taxa de custo de capital ou taxa de retorno requerida. Se a TIR for maior que a taxa de custo de capital, o projeto é considerado atrativo, pois está gerando um retorno superior ao custo do financiamento. Se for menor, o projeto pode não ser econômico.

A TIR deve ser considerada em conjunto com outras métricas financeiras para determinação da viabilidade de um projeto.

2.1.7.5 Taxa de lucratividade

A taxa de lucratividade é uma métrica financeira que avalia a eficiência de um investimento ou projeto, comparando os lucros gerados em relação ao capital investido (GITMAN, 2010). Ela é expressa como uma porcentagem e fornece uma medida de quão bem um investimento está gerando retornos em relação ao investimento inicial. Pode-se calcular a taxa de lucratividade através da expressão 2.8:

$$Taxa\ de\ Lucratividade\ (\%) = \left(\frac{Lucro\ Líquido}{Investimento\ Inicial} \right) \cdot 100 \quad (2.8)$$

O Lucro Líquido é referente ao lucro total gerado pelo projeto ou investimento, considerando todas as receitas e despesas ao longo do período de análise, enquanto o Investimento Inicial representa o capital inicial investido no projeto.

A taxa de lucratividade é uma métrica importante para avaliar o potencial de retorno de um investimento. Quanto maior a taxa de lucratividade, mais eficiente e lucrativo é o projeto. Por outro lado, se a taxa de lucratividade for baixa ou negativa, isso indica que o projeto pode não ser eficiente ou não gerar lucros significativos em relação ao investimento.

A taxa de lucratividade exclusivamente não considera o valor temporal do dinheiro e não leva em conta o momento em que os lucros são obtidos ao longo do tempo. Portanto, para a análise neste projeto serão usadas métricas como o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR) em conjunto com a taxa de lucratividade para avaliar o projeto de forma mais completa.

2.1.8 Impacto do projeto na redução da emissão de carbono

2.1.8.1 Créditos de carbono

O conceito de créditos de carbono surgiu como resposta às crescentes emissões de carbono provocadas, em grande parte, pela indústria. Durante a produção industrial, a queima de combustíveis fósseis libera gases na atmosfera, e práticas como a pecuária, queimadas, cultivo de commodities e desmatamento, atribuídas ao comportamento de diversas empresas, exacerbam significativamente a emissão de carbono.

Durante a pandemia da COVID-19, houve um resultado de redução de 7% nas emissões gasosas, em comparação aos anos anteriores. Entretanto, essa diminuição não foi suficiente para reverter a tendência alarmante de emissões que existe atualmente (Cordeiro Energia, 2023).

Os créditos de carbono, instituídos pela Convenção do Clima da ONU em 2005, foram concebidos como uma resposta proativa a esse panorama. Comumente referidos como Reduções Certificadas de Emissões (CERs - *Certified Emission Reductions*), esses créditos visam conter as emissões de gases de efeito estufa (United Nations, 2005). As empresas são desafiadas a reduzir suas emissões em uma determinada porcentagem e, caso não alcancem essa meta, têm a opção de adquirir créditos de carbono para compensar a produção de dióxido de carbono.

Esses créditos são adquiridos de projetos comprometidos com a mitigação de emissões, promovendo iniciativas sustentáveis e reduzindo seu impacto no aquecimento global. Cada crédito comprado representa uma tonelada de CO_2 que deixou de ser emitida.

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), estabelecido pela ONU no Protocolo de Kyoto, abriga 22 projetos, sendo 12 deles localizados no Brasil. Esses projetos constituem esforços conjuntos para enfrentar o desafio global das mudanças climáticas, exemplificando a busca por soluções inovadoras e sustentáveis (Governo Brasileiro, 2023a).

2.1.8.2 Rentabilização do projeto por compensação de carbono

- **Venda de créditos de carbono - CERs**

No presente projeto, cujo objetivo envolve a adoção de fontes renováveis de energia, será utilizada a luz do sol como fonte de energia, sem produção adicional de gases poluentes no seu processo de geração. Com isso, o projeto reduz o impacto ambiental no planeta e, além de ser possível obter benefícios fiscais e recompensas por parte do governo, é possível ainda vender créditos de carbono para as empresas que realizam compensação, conforme explicado na seção 2.1.11.1.

Portanto, será realizada uma estimativa da rentabilidade da venda desses créditos de carbono, com posterior inclusão deste resultado nas análises financeiras já explicitadas anteriormente.

- **Benefícios fiscais**

Por ser um projeto de interesse nacional em termos de redução de impactos ao meio ambiente, é possível negociar taxas de desconto mais atraentes em termos de rentabilidade com o Governo Federal: a taxa r , explicitada na seção 2.1.10.4. Quanto menor essa taxa, que pode ser considerada como uma métrica de atratividade do investimento do orçamento de projeto em títulos públicos, ajustados conforme a inflação, maior a rentabilidade financeira do projeto. Portanto, a obtenção de taxas mais atrativas de desconto pode ser uma alternativa negociável com o Banco Central, de modo a aumentar ainda mais a atratividade do projeto.

3 Metodologia

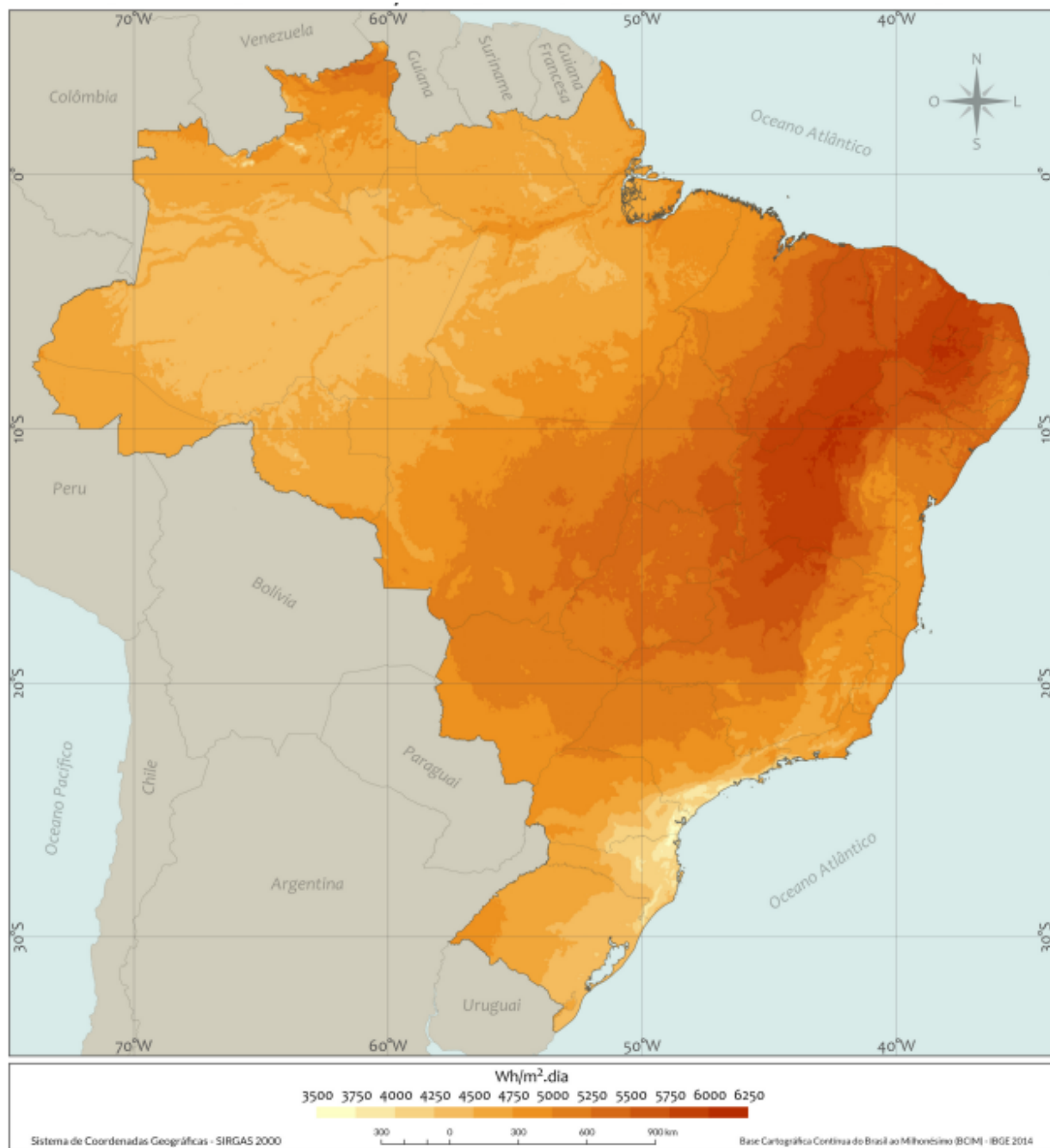
3.1 Área de estudo

3.1.1 Localização e incidência solar

O DCTA, complexo militar e área de estudo deste projeto, está localizado em São José dos Campos - SP, com as seguintes coordenadas de latitude e longitude, segundo o *Google Maps*: (-23.20568, -45.88181).

A partir do Atlas Brasileiro de Energia Solar (ANEEL, 2017), referenciado na seção 2.1.3.2 deste trabalho, é possível obter a irradiação total nas diversas regiões do Brasil (Vide Fig. 3.1, através dos Mapas de irradiação, que fornecem no Atlas as médias anuais e também mensais.

FIGURA 3.1 – Total diário da irradiação global horizontal - Média anual.



Fonte: INPE, 2017

A partir do mapa e das coordenadas do DCTA, é possível estimar uma irradiação de $4750 Wh/m^2.dia$ para a região de projeto. Esse valor serve como estimativa inicial, e será complementado por outros métodos de estimativa, descritos na seção 2.1.3.5 deste projeto e que serão abordados em mais detalhes nas seções posteriores.

Para o presente trabalho, buscou-se estabelecer um desses blocos como parâmetro inicial de planejamento de projeto. A partir dos resultados obtidos para esse bloco específico, expandiu-se a análise para os demais blocos do DCTA, sendo feitas as adaptações necessárias para tal.

O bloco padrão foi escolhido com base em dois critérios: Arquitetura e Perfil de consumo dos habitantes do bloco.

3.2.1 Perfis de consumo

Na seção de manutenção elétrica (SME) do DCTA, que conta com as medições de consumo de energia desde 1998, foram obtidos os valores de consumo médio mensal para os blocos da vila militar, com dados correspondentes aos últimos 12 meses (1 ano) de registro, com a última média mensal registrada para o mês de maio de 2023.

Esses dados, contendo medições individuais das residências, leituras dos equipamentos, comparações entre meses e médias anuais, foram filtrados e tratados, com eliminação dos valores zerados e dos *outliers*, registrados erroneamente devido a eventuais substituições de medidores ou a medições em períodos de desocupação das residências.

3.2.2 Escolha do bloco padrão para o projeto

Para escolha do bloco padrão, foi considerado o bloco mais representativo e cuja arquitetura e padrão de consumo é a mais replicável possível entre os blocos da vila militar do DCTA.

3.3 Sistemas fotovoltaicos

Os equipamentos e materiais escolhidos para composição do sistema fotovoltaico do projeto foram escolhidos e orçados a partir do contato com 3 empresas diferentes, que possuem atuação na cidade de São José dos Campos.

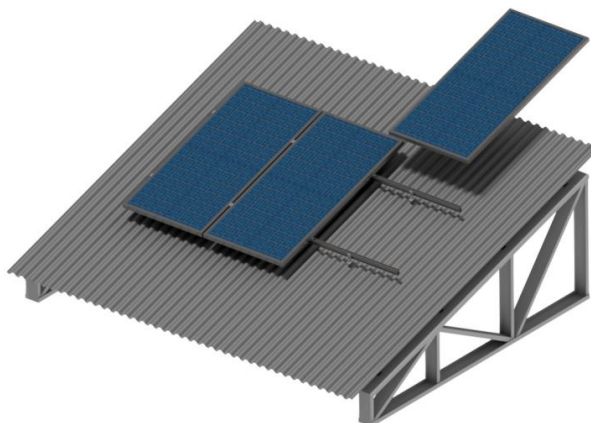
3.3.1 Conexão entre o gerador de energia fotovoltaica e a rede elétrica existente

No DCTA, a medição de energia consumida é feita por relógios próprios, mas a energia chega ao Departamento de forma integrada, com a distribuição dos valores a serem pagos por cada morador da vila sendo efetuada pelo pessoal da Seção de Manutenção Elétrica. Sendo assim, toda a energia produzida pelo sistema de placas será adicionada à rede já existente, de modo que será necessário substituir os medidores de consumo convencionais por medidores bidirecionais, que fazem a medição do consumo de energia da rede elétrica e a medição do excedente de energia gerado pelo sistema de módulos fotovoltaicos que será implementado.

3.3.2 Fixação dos módulos fotovoltaicos no telhado de fibrocimento

No projeto de instalação do sistema de módulos fotovoltaicos, foi utilizado para estimativas de custo e peso uma estrutura de suporte com *hooks* e com perfis de aço, constituindo um sistema de um trilho para suporte dos módulos, semelhante ao esquema representativo da Fig. 3.3:

FIGURA 3.3 – Esquema representativo da estrutura de suporte metálico para os módulos fotovoltaicos, aplicada a um telhado de fibrocimento.



Fonte: (PHB Solar, 2023)

Segundo as empresas consultadas durante a pesquisa, é conveniente estimar um peso de 3,6 kg para as estruturas de suporte para cada módulo fotovoltaico instalado.

Portanto, para instalação do sistema proposto em projeto, requiere-se a produção de um laudo técnico favorável ao acréscimo de cargas à estrutura dos telhados dos blocos da vila residencial.

3.4 Análise técnico-econômica

3.4.1 Capacidade de geração de energia do sistema de projeto e viabilidade estrutural

- Capacidade e Potência gerada pelos sistemas implementados

Para estimar a capacidade e a potência de geração de energia elétrica por parte dos módulos utilizados no sistema, serão consultadas empresas do ramo que atuam na cidade de São José dos Campos, região de projeto.

Além disso, serão considerados os valores de irradiância da região e as estimativas desse parâmetros fornecidas por softwares, nas seções posteriores, além da análise do Atlas Brasileiro de Energia Solar (Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), 2023).

- **Acréscimo de peso à estrutura de telhado da residência do bloco padrão**

A estimativa do acréscimo de peso à estrutura (caibros) dos telhados residenciais dos blocos da vila considerados em projeto será feita a partir da consulta às referências técnicas dos equipamentos utilizados em projeto. A partir das fichas técnicas dos componentes do sistema, estima-se o peso total que será adicionado sobre os telhados. É possível também estimar o acréscimo de peso linear ao longo dos caibros, dividindo-se o peso total sobre cada estrutura de suporte pelo comprimento da estrutura.

Dessa forma, é imprescindível que se avalie, após aceitação do projeto por parte da prefeitura e dos órgãos envolvidos, se o acréscimo de peso gerado pela implantação do sistema pode ser suportado pela estrutura já existente nos blocos da vila ou se será necessária a construção de uma estrutura de suporte adicional.

3.4.2 Orçamento de projeto e custos de reposição ou manutenção

O projeto idealizado para o conjunto habitacional da vila será orçado para um bloco piloto com três diferentes empresas, afim de se produzir uma estimativa de custos confiável e em acordo com os valores praticados em mercado. Os custos envolvidos com manutenção ou reposição de componentes do sistema também serão avaliados junto às empresas responsáveis pelo orçamento, utilizando paralelamente métricas de desempenho e de durabilidade disponíveis na literatura.

3.4.3 Retorno financeiro esperado

Para a análise financeira do investimento estimado para o projeto, foram utilizadas as métricas de análise explicitadas na seção 2.1.11: Análise de fluxo de caixa, VPL, TIR, *Payback* e taxa de lucratividade. Para isso, utilizou-se os dados de performance exibidos na tabela 3.1:

TABELA 3.1 – Fatores considerados para análise do retorno financeiro sobre o investimento no sistema do projeto.

Fatores considerados	
Taxa de crescimento (a.a) - Tarifa/kWh	6,00%
Reposição dos inversores (15 anos)	Valor em R\$
Degradação do sistema (a.a)	1,00%
Taxa de desconto (Selic desde 2000)	13,15%

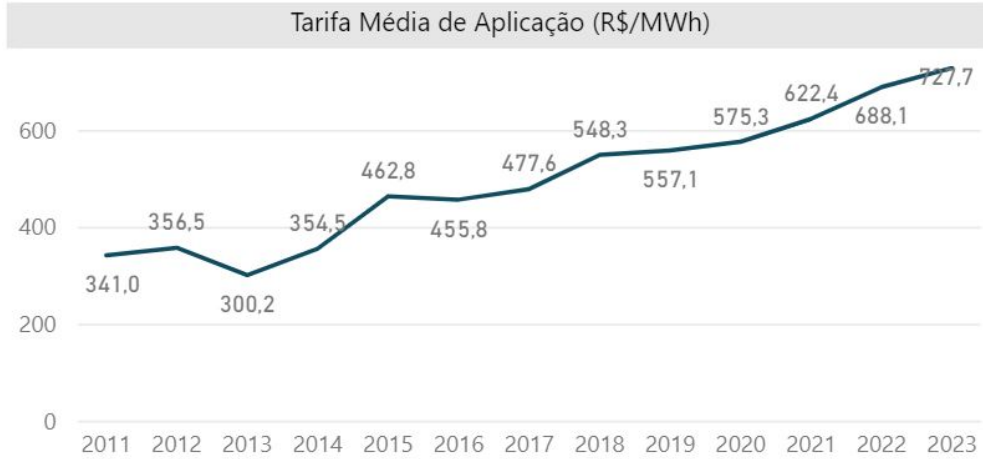
Fonte: O autor

- **Taxa de crescimento da tarifa: 6,0% ao ano**

Consultando as empresas envolvidas no projeto, o valor de 6,0% de crescimento ao ano da tarifa de energia cobrada pelo DCTA para os moradores da vila residencial foi considerada uma

taxa compatível com o objetivo de estimar custos para o projeto. O valor reflete a variação tarifária por kWh que já ocorre no fornecimento de energia padrão pelas companhias brasileiras, que corrigem anualmente a taxa cobrada por kWh de acordo com a região e com a empresa atuante, sob regulamentação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), vide Fig. 3.4:

FIGURA 3.4 – Histórico de crescimento da tarifa de energia elétrica no Brasil, desde 2011



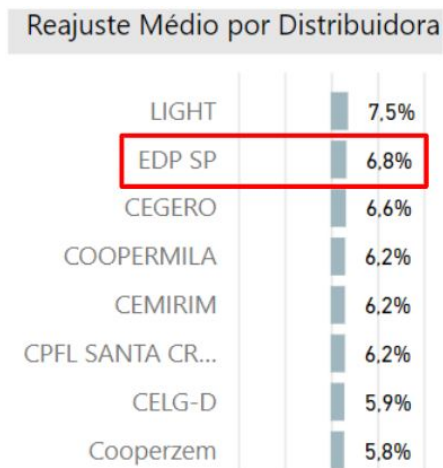
Fonte: ANEEL, 2023

Tomando-se a média histórica da tarifa de energia elétrica praticada em território nacional desde 2011, tem-se a taxa de crescimento anual apresentada na expressão 3.1 (Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), 2023):

$$E_{tarifa} = \left(\frac{T_{23}}{T_{11}} \right)^{\left(\frac{1}{13} \right)} - 1 = \left(\frac{727,66}{340,96} \right)^{\left(\frac{1}{13} \right)} - 1 \approx 6\% \quad (3.1)$$

O relatório da ANEEL apresenta ainda a taxa média de reajuste por Distribuidora. No caso de São José dos Campos, para a EDP (Energias de Portugal), tem-se a média apresentada na Fig. 3.5:

FIGURA 3.5 – Taxa média de reajuste da tarifa de energia elétrica pela EDP/SP, desde 2011



Fonte: ANEEL, 2023 (Adaptado pelo autor)

Considerando-se essas médias, com o objetivo de manter uma análise conservadora, será adotada para o estudo uma taxa de crescimento de tarifa de 6,0% para o DCTA, condizente com a média histórica nacional. Em caso de uma taxa de reajuste superior, o retorno financeiro será maior. Dessa forma, chega-se à seguinte projeção tarifária para a cobrança de energia na vila residencial do DCTA, apresentada na tabela 3.2:

TABELA 3.2 – Estimativa de variação da tarifa de energia (DCTA)

Ano	Ano de Projeto	Tarifa (R\$/kWh)
2023	0	R\$ 0,78
2024	1	R\$ 0,83
2025	2	R\$ 0,88
2026	3	R\$ 0,93
2027	4	R\$ 0,98
2028	5	R\$ 1,04
2029	6	R\$ 1,11
2030	7	R\$ 1,17
2031	8	R\$ 1,24
2032	9	R\$ 1,32
2033	10	R\$ 1,40
2034	11	R\$ 1,48
2035	12	R\$ 1,57
2036	13	R\$ 1,66
2037	14	R\$ 1,76
2038	15	R\$ 1,87
2039	16	R\$ 1,98
2040	17	R\$ 2,10
2041	18	R\$ 2,23
2042	19	R\$ 2,36
2043	20	R\$ 2,50
2044	21	R\$ 2,65
2045	22	R\$ 2,81
2046	23	R\$ 2,98
2047	24	R\$ 3,16
2048	25	R\$ 3,35
2049	26	R\$ 3,55
2050	27	R\$ 3,76
2051	28	R\$ 3,99
2052	29	R\$ 4,23
2053	30	R\$ 4,48

Fonte: O autor

- **Taxa de degradação do sistema**

Novamente a favor de uma estimativa conservadora, foi considerada uma taxa de degradação do sistema de 1,00 % ao ano, condizente com a perda de eficiência dos módulos dentro da média

de garantia das empresas consultadas, que asseguram 80% de eficiência do sistema até o 25º ano de funcionamento.

- **Custos de manutenção e troca de equipamentos**

Considerou-se que a cada certo período de anos será feita a troca dos microinversores ou inversores do sistema, conforme indicação de projeto. Como nem todos os inversores serão substituídos no tempo indicado, considera-se que essa estimativa abrange eventuais despesas de manutenção do sistema e de substituição de componentes mais baratos, como estrutura de suporte dos módulos ou cabeamento.

3.4.4 Projeções de fluxo de caixa

Utilizando os parâmetros de viabilidade descritos na seção 2.1.11, é possível obter as estimativas de *Payback*, Retorno do investimento, VPL, TIR e Taxa de lucratividade, que podem e serão utilizados para análise da qualidade do investimento proposto para o projeto.

3.4.5 Compensação do projeto em créditos de carbono

Para estimar o quanto o projeto proposto para o bloco H21A poupa em termos de emissões de carbono, é necessário obter o valor de toneladas de carbono emitidas por quantidade de energia elétrica produzida. Para isso, serão utilizados dois parâmetros de cálculo:

3.4.5.1 Média nacional de emissão de carbono

Utilizando dados do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, é possível obter uma média de fatores de emissão de CO_2 por MWh de energia elétrica produzida, utilizando o fator de emissão de energia na margem de operação.

O Sistema de Registro Nacional de Emissões (Governo Brasileiro, 2023b) calcula a média das emissões de geração de energia, considerando todas as usinas que geram energia no país.

- **Fator de emissão da margem de operação:**

Esse fator é calculado através de uma ferramenta metodológica aprovada pelo Conselho Executivo do MDL, e combina o fator de emissão da margem de operação, que reflete a intensidade das emissões de CO_2 da energia despachada na margem, com o fator de emissão da margem de construção, que reflete a intensidade das emissões de CO_2 das últimas usinas construídas (Governo Brasileiro, 2023b), conforme apresentado na tabela 3.3:

TABELA 3.3 – Tabela de Fatores de emissão de CO_2 , ano a ano, desde 2006, obtidos pelo Método Simples Ajustado

Ano	Valor
2006	0,3355
2007	0,3227
2008	0,3531
2009	0,2997
2010	0,3823
2011	0,3073
2012	0,4185
2013	0,4653
2014	0,5224
2015	0,5317
2016*	0,4360
2017	0,4287
2018	0,3932
2019**	0,3860
2020	0,3490
2021	0,3680
2022	0,3406
Média	0,3877

Fonte: O autor.

Com isso, utiliza-se o valor da expressão 3.2 para estimativa de compensação de carbono:

$$E_{base} = 0,3877 \frac{tCO_2}{MWh} \quad (3.2)$$

3.4.5.2 Metodologia internacional para o cálculo da pegada de carbono

Segundo a literatura científica sobre mapeamento da pegada de carbono, é possível estimar a compensação total de emissão de carbono promovido por um sistema de produção de energia renovável a partir da expressão 3.3, para uma potência de produção anual E_{FG} :

$$E_{emissao_{total}} = E_{emissao_{linha\ de\ base}} - E_{emissao_{projeto}} - E_{emissao_{vazamentos}} \quad (3.3)$$

Sendo $E_{emissao_{linha\ de\ base}}$ a emissão de carbono de uma usina elétrica que produz o mesmo equivalente em energia ao sistema de energia renovável, $E_{emissao_{projeto}}$ a emissão de carbono do sistema renovável referente à implementação do projeto e $E_{emissao_{vazamentos}}$ a emissão de carbono referente a possíveis vazamentos de carbono durante o funcionamento do sistema. Para

o projeto de módulos fotovoltaicos, estes últimos dois parâmetros podem ser considerados nulos (EIB..., 2023).

Logo, a compensação de carbono nesses projetos corresponde à emissão de linha de base, que pode ser calculada pela expressão 3.4:

$$E_{base} = (F_{mc} \cdot W_{mc} + F_{mo} \cdot W_{mo}) \cdot E_{FG} \quad (3.4)$$

Sendo F_{mc} o fator de emissão de construção da usina, $0,0979 \text{ ton}/Mwh$ e W_{mc} o fator de ponderação deste fator de construção, considerado 0,25.

Já F_{mo} é o fator de emissão de carbono com margem na operação da usina, dado por $0,4539 \text{ ton}/Mwh$, cujo fato de ponderação é 0,75.

Todos esses valores foram extraídos com base na média histórica dos últimos dez anos, considerando o último mês de janeiro de 2023 (EIB..., 2023). Logo, tem-se a expressão 3.5:

$$E_{base} = 0,0979 \cdot 0,25 + 0,4539 \cdot 0,75 = 0,3649 \frac{tCO_2}{MWh} \quad (3.5)$$

3.4.5.3 Fator de cálculo para estimativa de compensação de carbono:

Com o objetivo de realizar uma análise conservadora, será considerada a média entre os fatores de conversão considerados nas seções 3.4.5.1 e 3.4.5.2, de modo que tem-se o valor apresentado na expressão 3.6:

$$E_{base} = 0,3763 \frac{tCO_2}{MWh} \quad (3.6)$$

3.4.5.4 Valor do crédito de carbono:

Segundo o Observatório de Bioeconomia da Fundação Getúlio Vargas (FGV), o preço médio do crédito de carbono no Brasil varia entre US\$ 5, ou R\$ 24,31, e US\$ 40, ou R\$ 194,50 (FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS (FGV),), com estimativas de valor que ultrapassam €80 para o Mercado futuro.

A partir desses valores e da quantidade de toneladas compensadas pelo sistema fotovoltaico, é possível estimar o retorno financeiro que pode ser obtido pela venda de créditos de carbono pelo DCTA, uma vez implantado o projeto de produção de energia solar fotovoltaica (EMBER CLIMATE,).

3.4.6 Expansão do projeto: do H21A para a vila militar

Após a análise técnico-econômica para o bloco H21A, será realizada uma análise para a vila militar, afim de se obter uma estimativa mais ampla de projeto, considerando-se apenas os blocos com arquitetura e condições técnicas semelhantes ao bloco piloto de projeto.

Os critérios de adaptabilidade do projeto do H21A para a vila militar serão os seguintes:

- **Quantidade de módulos fotovoltaicos**

Os parâmetros de projeto serão ajustados do H21A para a vila com base em um fator de correção, C_1 definido pela proporção entre a quantidade de módulos necessários para o bloco e a quantidade de módulos previstos para o H21A (equação 3.7):

$$C_1 = \frac{N_{vila}}{N_{H21A}} \quad (3.7)$$

- **Potência do sistema**

Para esse critério, será considera a potência de geração do sistema da vila, em relação à potência do H21A (equação 3.8):

$$C_2 = \frac{Pot_{vila}}{Pot_{H21A}} \quad (3.8)$$

- **Capacidade de geração de energia**

Por fim, será considera a relação entre a demanda energética da vila, em kWh, em relação à demanda do H21A (equação 3.9):

$$C_3 = \frac{E_{vila}}{E_{H21A}} \quad (3.9)$$

Para fins de estimativa de projeto, os parâmetros serão multiplicados pelos fatores C_1 , C_2 e C_3 , considerados de forma independente para cada bloco diferente do H21A.

4 Resultados e discussões

4.1 Caracterização e tipificação das residências da vila militar

4.1.1 Perfis de consumo

Após a filtragem e o tratamento mencionados na seção 3.2.1, foram extraídas as medições de consumo para cada residência dos blocos, e a partir desses valores foram obtidas as médias de consumo mensal para cada bloco da vila (Vide tabela 4.1).

4.1.1.1 Blocos da vila: do H9 ao H30:

TABELA 4.1 – Dados de Consumo de Energia mensal dos blocos H9 ao H30

Bloco	Mediana (kWh)	Média (kWh)	3° quartil (kWh)	Média - Bloco (kWh)	Perfil de moradia	Telhado
H-09-A	276,5	291,18	350,5	260,94	Oficiais subalternos e superiores	Fibrocimento
H-09-B	186,63	246,68	267,63			
H-09-C	220,13	244,97	339,38			
H-10-A	107,5	132,45	231,88	160,8	Graduados e suboficiais	Fibrocimento
H-10-B	196,25	189,16	242,5			
H-11-A	205	243,82	311,25	243,82	Graduados e suboficiais	Fibrocimento
H-12-A	238,63	243,11	297,81	253,51	Graduados e suboficiais	Cerâmico
H-12-B	247,13	244,02	327,75			
H-12-C	245,38	264,03	284,94			
H-12-D	275,5	262,88	336,81			
H-17-B	417,5	436,18	579,25	445,11	Oficiais gerais	Fibrocimento
H-17-C	384,63	454,04	660,81			
H-18-A	197,5	214,79	269,94	220,8	Graduados e suboficiais	Fibrocimento
H-18-B	192,5	192,83	223,75			
H-18-C	240,75	254,76	328,06			
H-19-A	488,75	449	523,69	354,63	Oficiais subalternos e superiores	Fibrocimento
H-19-B	241,5	260,25	358,06			
H-19-C	488,75	449	523,69			
H-19-D	241,5	260,25	358,06			
H-20-A	340	343,03	405	366,1	Oficiais subalternos e superiores	Fibrocimento
H-20-B	350,5	389,17	561			
H-21-A	285	292,17	353,75	292,17	Graduados e suboficiais	Fibrocimento
H-23-A	359,75	378,41	457,63	378,41	Oficiais subalternos e superiores	Fibrocimento
H-25-A	228,75	272,92	301,25	299,18		
H-25-B	248,75	286,46	411,88		Oficiais superiores	Cerâmico
H-25-C	290	318,67	431,25			
H-25-D	290	318,67	431,25			
H-26-A	249	280,59	366,94	280,59	Graduados e suboficiais	Fibrocimento
H-27-A	280	318,06	342,56	303,44	Oficiais subalternos e superiores	Fibrocimento
H-27-B	245,25	279,55	348,44			
H-27-C	356,25	343,28	445,81			
H-27-D	307,63	315,79	445,44			
H-27-E	253,75	260,51	343,75			
H-30-A	305	288,66	380	312,98	Graduados e suboficiais	Fibrocimento
H-30-B	286,38	326,44	418,13			
H-30-C	281,25	307,57	402,94			
H-30-D	328,75	329,26	421,56			

Fonte: Seção de Manutenção elétrica do DCTA, 2023

Considerando-se a média para todos os blocos da vila, tem-se o valor apresentado na expressão 4.1:

$$Media_{DCTA} = 296,83 \text{ kWh} \quad (4.1)$$

4.1.2 Escolha do bloco padrão para o projeto

Para escolha do bloco padrão de projeto, foram considerados os seguintes itens de avaliação:

- **Tipo de telhado:** A grande maioria das casas da vila apresenta telhado de fibrocimento. Portanto, o bloco padrão deve possuir este tipo de telhado.
- **Quantidade de blocos semelhantes:** Os blocos de moradia dos Graduados e Suboficiais são os mais semelhantes entre si, além de estarem presentes em maior quantidade. Portanto, o bloco padrão escolhido para o projeto será um dos blocos pertencentes a essa classe de moradia.
- **Perfil de consumo:** Considera-se para o consumo mensal um valor entre a média geral do DCTA, calculada na seção anterior, e a média da consumo exclusiva dos blocos dos Graduados e Suboficiais (Vide tabela 4.2).

TABELA 4.2 – Dados de Consumo de Energia mensal dos blocos da classe de Graduados e Suboficiais.

Bloco	Média (kWh)	Média - Bloco (kWh)	Perfil de moradia	Telhado
H-10-A	132,45	160,8	Graduados e suboficiais	Fibrocimento
H-10-B	189,16			
H-11-A	243,82	243,82	Graduados e suboficiais	Fibrocimento
H-12-A	243,11	253,51	Graduados e suboficiais	Cerâmico
H-12-B	244,02			
H-12-C	264,03			
H-12-D	262,88	220,8	Graduados e suboficiais	Fibrocimento
H-18-A	214,79			
H-18-B	192,83			
H-18-C	254,76	292,17	Graduados e suboficiais	Fibrocimento
H-21-A	292,17			
H-26-A	280,59	280,59	Graduados e suboficiais	Fibrocimento
H-30-A	288,66	312,98	Graduados e suboficiais	Fibrocimento
H-30-B	326,44			
H-30-C	307,57			
H-30-D	329,26			

Fonte: Seção de Manutenção elétrica do DCTA, 2023

Para este perfil de bloco (tabela 4.2), tem-se a média de consumo obtida na expressão 4.2:

$$Media_{Graduados, Suboficiais} = 254,38 \text{ kWh} \quad (4.2)$$

Portanto, os blocos que atendem a esses requisitos, apresentando valores de consumo mensal médio dentro dos limites estabelecidos e possuindo um maior padrão de replicabilidade na vila militar, são os blocos H21-A e H26-A. Uma vez que os blocos são bem semelhantes, por apresentar maior média de consumo, foi escolhido o bloco H21-A como bloco padrão.

4.1.3 Caracterização do bloco de projeto: H21 - A

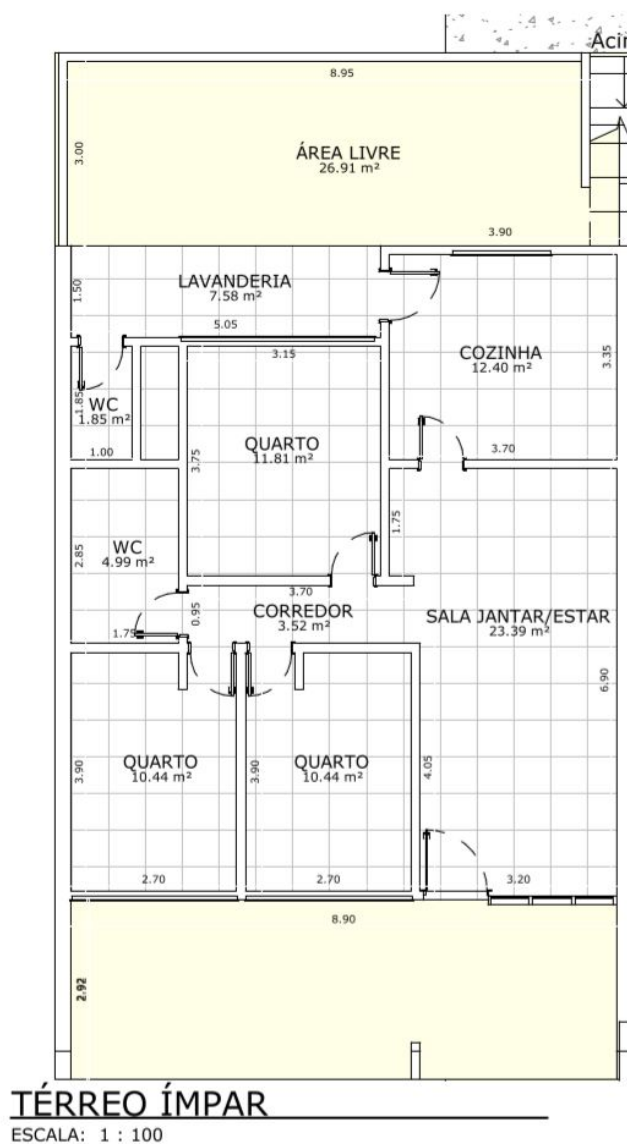
O bloco escolhido como piloto para o projeto, H21-A, é um bloco residencial com 33 apartamentos, sendo 14 deles no pavimento térreo (Fig. 4.1) e os demais no pavimento superior (Fig. 4.2).

4.1.3.1 Arquitetura do H21A

O bloco é composto por apartamentos residenciais, contendo sala, cozinha, WC social, 3 quartos, área de serviço, WC empregada, 1 garagem para carro e uma varanda, em uma configuração semelhante às apresentadas nas plantas a seguir:

- Pavimento térreo:

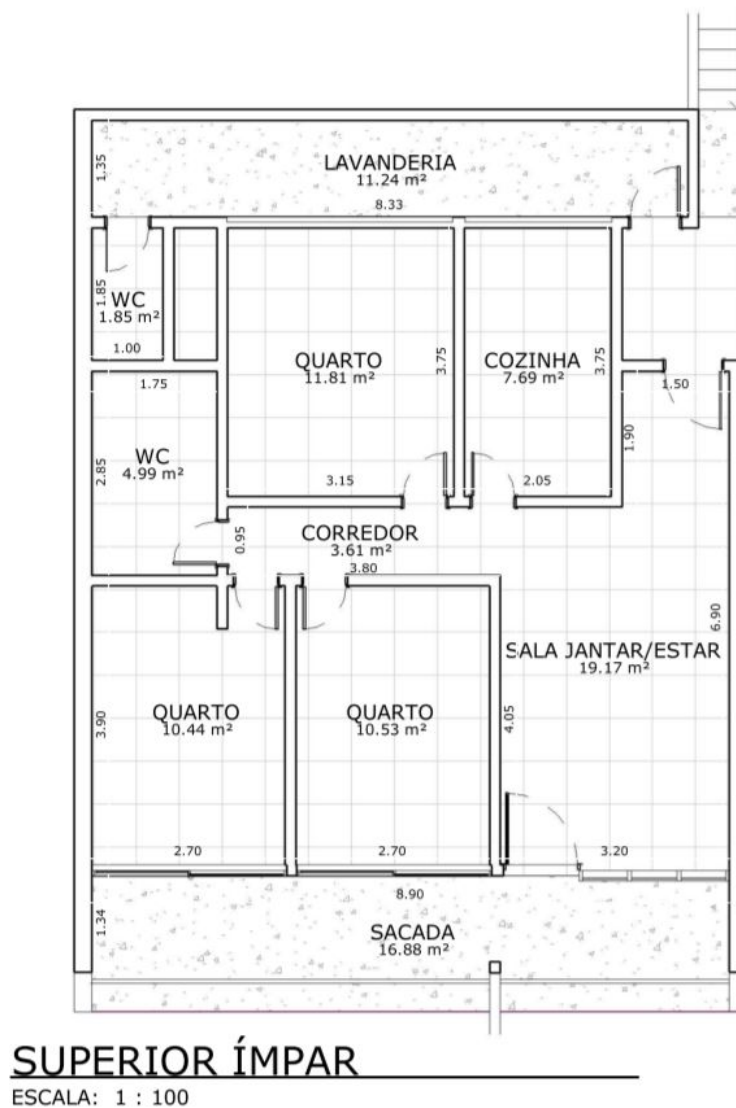
FIGURA 4.1 – Modelo padrão de apartamento térreo no bloco H21A.



Fonte: Prefeitura de Aeronáutica de São José dos Campos, 2023.

- Pavimento superior:

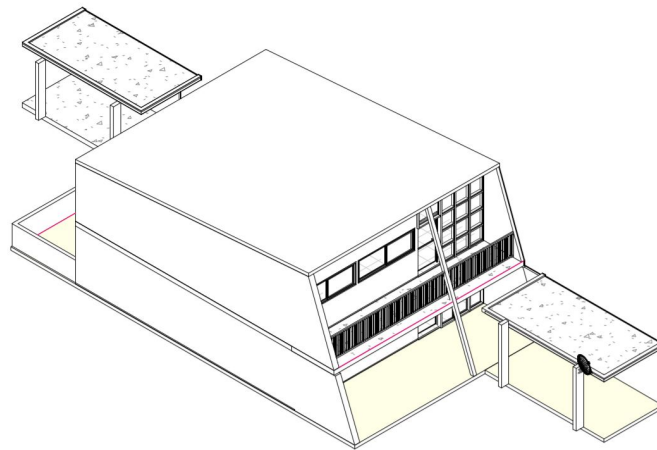
FIGURA 4.2 – Modelo padrão de apartamento no pavimento superior do bloco H21A.



Fonte: Prefeitura de Aeronáutica de São José dos Campos, 2023.

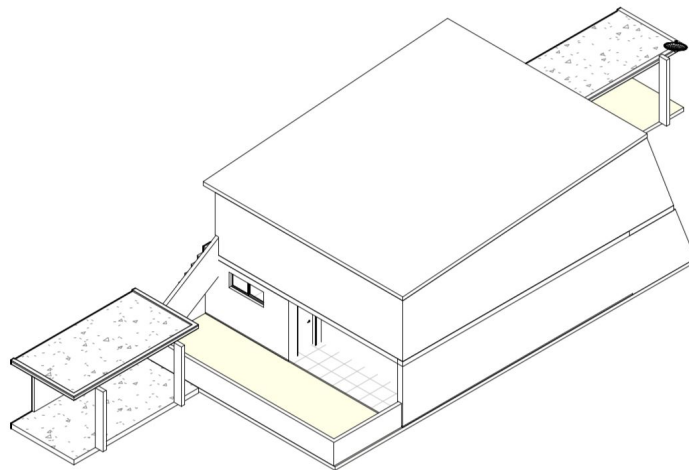
As fachadas dos apartamentos do bloco possuem arquitetura semelhante às representações das Fig. 4.3 e Fig. 4.4:

FIGURA 4.3 – Fachada frontal de um apartamento no bloco H21A.



Fonte: Prefeitura de Aeronáutica de São José dos Campos, 2023.

FIGURA 4.4 – Fachada traseira de um apartamento no bloco H21A.



Fonte: Prefeitura de Aeronáutica de São José dos Campos, 2023.

O bloco possui um telhado uma área disponível de aproximadamente 2027 m^2 , com inclinação aproximada de 9,6%, ou $5,5^\circ$.

4.1.4 Irradiação incidente no bloco padrão de projeto

O bloco padrão está localizado numa região com coordenadas (-23.201812° , -045.870587°). Utilizando-se o *Global Solar Atlas*, chega-se aos valores de irradiação explicitados na Fig. 4.5:

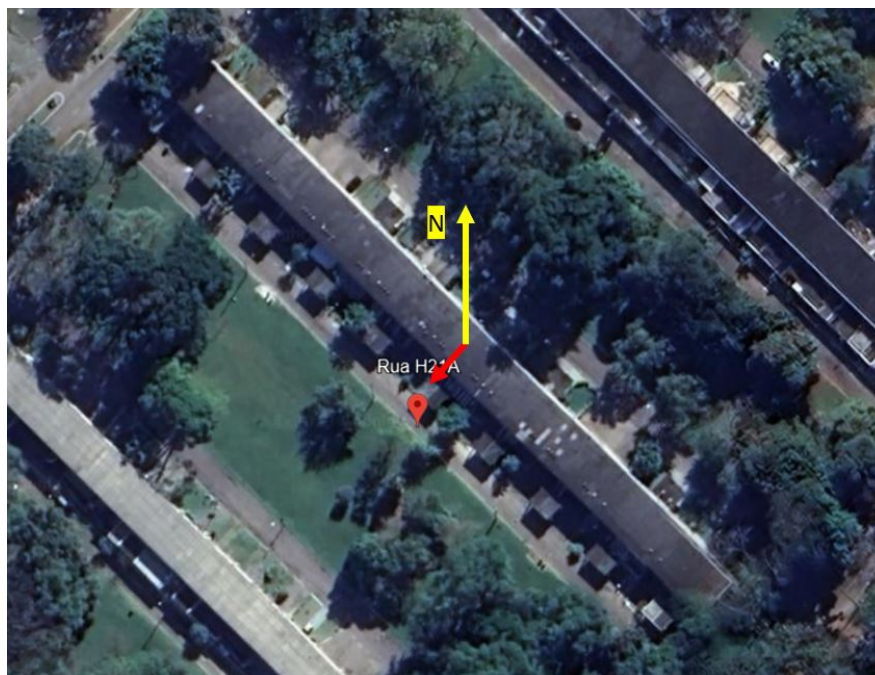
FIGURA 4.5 – Dados de irradiação na região de projeto

Direct normal irradiation	DNI	4.055	kWh/m ² per day ▼
Global horizontal irradiation	GHI	4.779	kWh/m ² per day ▼
Diffuse horizontal irradiation	DIF	2.032	kWh/m ² per day ▼
Global tilted irradiation at optimum angle	GTI opta	5.127	kWh/m ² per day ▼
Optimum tilt of PV modules	OPTA	24 / 0	°
Air temperature	TEMP	21.0	°C ▼
Terrain elevation	ELE	609	m ▼

Fonte: *Global Solar Atlas*, 2023

Esses valores foram obtidos no aplicativo a partir da definição de um sistema para pequenas residências, com azimuth de 138° em relação ao norte (Vide Fig. 4.6):

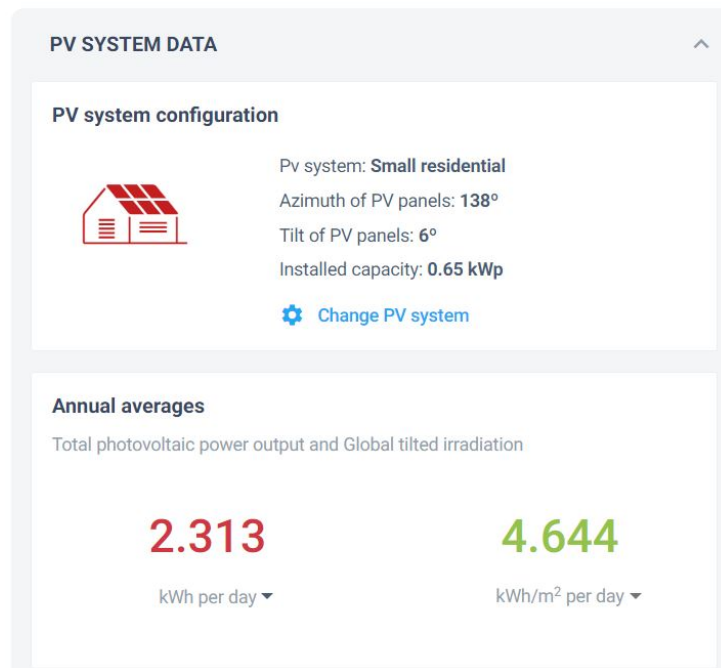
FIGURA 4.6 – Medição do azimuth do telhado do bloco H21A em relação ao norte.



Fonte: *Google Earth* - Adaptado, 2023

Além disso, foi utilizada a inclinação de telhado do bloco arredondada: 6%. Para os painéis fotovoltaicos, considerou-se potência padrão das placas, de 0,655 kWp (Vide Fig. 4.7):

FIGURA 4.7 – Parâmetros utilizados para cálculo da irradiância nas condições de projeto



Fonte: *Global Solar Atlas*, 2023

Esses valores encontram-se coerentes com o valor discutido e apresentado na seção 3.1.1.

4.2 Sistemas fotovoltaicos

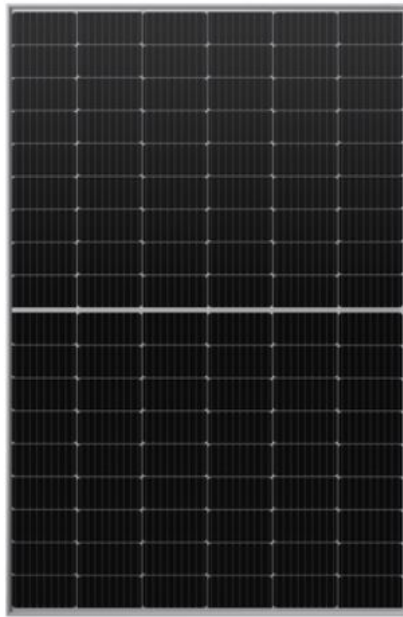
Para definição dos itens componentes do projeto de sistema de captação de energia solar fotovoltaica, foram consultadas três empresas diferentes, duas das quais realizaram visitas técnicas para elaboração da proposta comercial e para orçamento do sistema.

4.2.1 Caracterização dos tipos de placa utilizados em projeto

4.2.1.1 Empresas A e B

Para o sistema de abastecimento por energia elétrica do bloco residencial H21A, as empresas A e B optaram por módulos fotovoltaicos do modelo Canadian CS7N-665MS, com 132 células, monocristalino (Vide Fig. 4.8). Os módulos desse modelo já têm sido utilizados por essas empresas em São José dos Campos.

FIGURA 4.8 – Módulo fotovoltaico Canadian CS7N-665MS



Fonte: (Canadian Solar, 2023)

Esses módulos contam com as especificações exibidas nas tabelas 4.3, 4.4 e 4.4:

- **Especificações elétricas**

TABELA 4.3 – Especificações elétricas do módulo Canadian CS7N-665MS

Dados Elétricos (STC)	
Máx. Potência nominal (Pmax)	665 W
Tensão operacional ideal (Vmp)	38.5 V
Corrente de operação ideal (Imp)	17.28 A
Tensão de circuito aberto (Voc)	45.6 V
Corrente de curto circuito (Isc)	18.51 A
Eficiência do painel	21.4%
Temperatura de Operação	-40 ° C ± 85 ° C
Tensão máxima do sistema (IEC)	1500V
Tensão máxima do sistema (IEC)	1000V
Desempenho antichamas do módulo (IEC 61730)	CLASS C
Classificação máxima do fusível em série	30 A
Classe da aplicação	A
Tolerância de potência	0 ± 10 W
Dados Elétricos no NOCT	
Potência máxima (Pmax)	497 W
Tensão na potência máxima (Vmpp)	36.0 V
Corrente na potência máxima (Imp)	13.81 A
Tensão de circuito aberto (Voc)	43.0 V
Corrente de curto-circuito (Isc)	14.93 A

Fonte: (Canadian Solar, 2023)

- **Especificações mecânicas**

TABELA 4.4 – Especificações mecânicas do módulo Canadian CS7N-665MS

Dados Mecânicos	
Tipo de Célula	Monocristalino
Número de células	132 [2x (11 x6)]
Dimensão do Painel	2.384 x 1.303 x 35 mm
Peso	34.4 kg (75.8 lbs)
Vidro frontal	Vidro temperado de 3,2 mm
Tipo de moldura	Quadro em liga de alumínio anodizado, barra transversal aprimorada
Caixa de junção	IP68, 3 diodos de bypass
Cruzamento de cabo	4 mm ² (IEC)
Comprimento do cabo (incluindo conector)	410 mm (+) / 290 mm (-)
Conector	T4 Séries ou H4 UTX ou MC4-EVO2
Peças por palete	31 Peças
Peças por container (40' HQ)	527 peças

Fonte: (Canadian Solar, 2023)

- **Especificações de temperatura**

TABELA 4.5 – Especificações de temperatura do módulo Canadian CS7N-665MS

Características de Temperatura	
Coeficiente de temperatura de Pmax	-0,34% / ° C
Coeficiente de temperatura de Voc	-0,26% / ° C
Coeficiente de temperatura de Isc	0,05% / ° C
Temperatura nominal de operação do módulo	41 ± 3 ° C
Medida aproximada do palete com 31 peças	1.340 x 1.135 x 2.500 mm
Peso aproximado com palete com 31 peças	1.114 kg

Fonte: (Canadian Solar, 2023)

4.2.1.2 Empresa C

A empresa C optou por módulos fotovoltaicos no modelo Canadian Solar HIKU6 CS6W-550MS - 550 Wp. As especificações desse produto são as apresentadas nas tabelas 4.6, 4.7 e 4.8:

- **Especificações elétricas**

TABELA 4.6 – Especificações elétricas do módulo Canadian CS7N-665MS

Dados Elétricos (STC)	
Máx. Potência nominal (P _{max})	550 W
Tensão operacional ideal (V _{mp})	41.7 V
Corrente de operação ideal (I _{mp})	13.20 A
Tensão de circuito aberto (V _{oc})	49.6 V
Corrente de curto circuito (I _{sc})	14.00 A
Eficiência do painel	21.5%
Temperatura de Operação	-40 ° C ± 85 ° C
Tensão máxima do sistema (IEC)	1500V
Tensão máxima do sistema (IEC)	1000V
Desempenho antichamas do módulo (IEC 61730)	CLASS C (IEC 61730)
Classificação máxima do fusível em série	25 A
Classe da aplicação	A
Tolerância de potência	0 ± 10 W
Dados Elétricos no NOCT	
Potência máxima (P _{max})	411 W
Tensão na potência máxima (V _{mpp})	39.0 V
Corrente na potência máxima (I _{mpp})	10.54 A
Tensão de circuito aberto (V _{oc})	46.8 V
Corrente de curto-circuito (I _{sc})	11.30 A

Fonte: (Canadian Solar, 2023)

- **Especificações mecânicas**

TABELA 4.7 – Especificações mecânicas do módulo Canadian CS7N-665MS

Tipo de Célula	Monocristalino
Número de células	144 [2x (12 x6)]
Dimensão do Painel	2.261 x 1.134 x 35 mm
Peso	27.8 kg
Vidro frontal	Vidro temperado de 3,2 mm
Tipo de moldura	Quadro em liga de alumínio anodizado
Caixa de junção	IP68, 3 diodos de bypass
Cruzamento de cabo	4 mm ² (IEC)
Comprimento do cabo (incluindo conector)	410 mm (+) / 290 mm (-)
Conector	T4 Séries ou H4 UTX ou MC4-EVO2

Fonte: (Canadian Solar, 2023)

- **Especificações de temperatura**

TABELA 4.8 – Especificações de temperatura do módulo Canadian CS7N-665MS

Coeficiente de temperatura de Pmax	-0.34% / ° C
Coeficiente de temperatura de Voc	-0.26% / ° C
Coeficiente de temperatura de Isc	0.05% / ° C
Temperatura nominal de operação do módulo	43 ± 3 ° C
Medida aproximada do palete com 31 peças	1.340 x 1.135 x 2.500 mm
Peso aproximado com palete com 31 peças	1.114 kg

Fonte: (Canadian Solar, 2023)

4.2.2 Caracterização dos tipos de inversores utilizados em projeto

4.2.2.1 Empresas A e B

As empresas A e B, em suas propostas comerciais, utilizaram micro inversores muito semelhantes, de modo que será considerado apenas um deles para este projeto, o modelo Apsystems DS3D - 2000W, apresentado na Fig. 4.9:

FIGURA 4.9 – Microinversor utilizado pelas empresas A e B

Fonte: SolLares - Energia Solar¹

Este micro inversor pode ser utilizado para conexão com, no máximo, quatro módulos fotovoltaicos.

4.2.2.2 Empresa C

A empresa C optou pela utilização de um inversor Solis 1P9K-4G para cada conjunto de 21 módulos fotovoltaicos (Vide Fig. 4.10).

FIGURA 4.10 – Inversor utilizado pela empresa C



Fonte: Energia Total - Energia Solar²

4.2.3 Caracterização dos demais componentes utilizados em projeto

Os demais componentes, como cabeamento, estrutura de sustentação dos módulos e valores de instalação, por exemplo, serão tratados de forma conjunta como "Outros valores" nas descrições realizadas nas próximas seções.

4.3 Análise técnico-econômica

4.3.1 Dimensionamento do sistema para o bloco H21A

Considerando-se a média de consumo dos apartamentos do bloco H21A, o sistema de módulos fotovoltaicos será superdimensionado para um consumo médio mensal de 300 kWh por apartamento.

4.3.1.1 Empresas A e B

Por residência, serão utilizados 4 módulos de 665 W, de modo que tem-se ao todo uma potência de sistema de 2,66 kWp. Com isso, a produtividade do sistema corresponde à apresentada na tabela 4.9:

TABELA 4.9 – Produtividade do sistema para um único apartamento do bloco

Valor do kWh (R\$)	0,78
Dados por Apartamento	
Tipo de Ligação	Bifásico
Consumo Médio Mensal (kWh)	300
Produção Média Mensal (kWh)	330
Produção Média Mensal (R\$)	257,4
Produção Média Anual (R\$)	3088,8
Qtd de Módulos	4
Área Total Instalada (m ²)	12,8
Potência do Sistema (kWp)	2,66

Fonte: O autor

Tratando o bloco H21 completo, tem-se a seguinte produtividade, apresentada na tabela 4.10:

TABELA 4.10 – Produtividade do sistema para o bloco H21A

Qtd. Apartamentos	33
Consumo Médio Mensal por Apartamento (kWh)	300
Consumo Total Mensal do Bloco (kWh)	9900
Produção Média Mensal por Apartamento (kWh)	330
Produção Total Mensal do Bloco (kWh)	10890
Produção Média Mensal por Apartamento (R\$)	257,4
Produção Total Mensal do Bloco (R\$)	8494,2
Produção Média Anual por Apartamento (R\$)	3088,8
Produção Total Anual do Bloco (R\$)	101930,4
Qtd de Módulos	132
Área Total Instalada (m²)	422,4
Potência do Sistema (kWp)	87,78
Qtd de Inversores	33

Fonte: O autor

4.3.1.2 Empresa C

A solução técnica da empresa C, para o bloco H21 completo, pode ser representada pelos parâmetros de projeto apresentados na tabela 4.11:

TABELA 4.11 – Produtividade do sistema da empresa C para o bloco H21A

Qtd. Apartamentos	33
Consumo Médio Mensal por Apartamento (kWh)	300
Consumo Total Mensal do Bloco (kWh)	9900
Produção Média Mensal por Apartamento (kWh)	318
Produção Total Mensal do Bloco (kWh)	10476
Produção Média Mensal por Apartamento (R\$)	247,28
Produção Total Mensal do Bloco (R\$)	8171,28
Produção Média Anual por Apartamento (R\$)	2971,36
Produção Total Anual do Bloco (R\$)	98055,36
Qtd de Módulos	189
Área Total Instalada (m²)	585
Potência do Sistema (kWp)	103,95
Qtd de Inversores	9

Fonte: O autor

4.3.2 Fixação dos módulos fotovoltaicos no telhado de fibrocimento

Considerando-se a estimativa de peso de 3,6 kg para estrutura de suporte por módulo fotovoltaico, estima-se o seguinte acréscimo de peso à estrutura do telhado de fibrocimento, apresentado na tabela 4.12:

4.3.2.1 Empresas A e B

TABELA 4.12 – Peso do Sistema para o Bloco H21A

Peso do Sistema (H21A)	
Item	Peso (kg)
Peso por Placa	34,4
Estrutura de Fixação	3,6
Peso Médio (por m ²)	11,875
Peso total	5016

Fonte: O autor

4.3.2.2 Empresa C

Para o sistema apresentado pela empresa C, estima-se o acréscimo de peso à estrutura do bloco apresentado na tabela 4.13:

TABELA 4.13 – Peso do Sistema para o Bloco H21A

Peso do Sistema (H21A)	
Item	Peso (kg)
Peso por Placa	27,8
Estrutura de Fixação	3,6
Peso Médio (por m ²)	9,27
Peso Total	5424,3

Fonte: O autor

4.3.2.3 Angulação dos módulos

A inclinação dos módulos fotovoltaicos segue a inclinação do telhado sobre o qual são instalados, não sendo necessário nenhum ajuste de angulação.

4.3.3 Orçamentos de projeto

Com as especificações de projeto determinadas, as empresas apresentaram os seguintes valores de orçamento, apresentados na tabela 4.14:

TABELA 4.14 – Estimativas de orçamento apresentadas pelas empresas A, B e C

Empresa	Valor
A	R\$ 339.570,00
B	R\$ 355.824,09
C	R\$ 353.557,62
Média	R\$ 353.557,62

Fonte: O autor

4.3.4 Custos envolvidos nas reposições de itens do sistema

Com base nas garantias apresentadas pelas empresas envolvidas e com base na média de performance do mercado, foram estabelecidos alguns custos de manutenção e reposição de itens do sistema:

4.3.4.1 Empresas A e B

As empresas A e B apresentaram solução técnica que exige 132 módulos e 33 microinversores. No estudo de viabilidade, considera-se que os módulos fotovoltaicos não precisarão ser

substituídos, uma vez que as empresas fornecem garantia estrutural de 10 anos para esses itens, e 25 anos de garantia de eficiência (até 80% de desempenho).

Já os microinversores possuem garantia de 15 ou 25 anos (garantia estendida, que aumenta o valor de projeto). Para contemplar um cenário pessimista, serão consideradas trocas dos microinversores a cada 15 anos. A suposição faz sentido, uma vez que mesmo que não haja troca de todos os equipamentos, haverá custos envolvidos em eventuais ações de manutenção do sistema (troca de cabeamento, remoção de folhas de árvore, limpeza, reposição de peças e materiais da estrutura de suporte, entre outros). Ademais, as empresas apresentaram garantia de instalação de 3 e 1 anos, respectivamente.

A estimativa de valor para troca dos inversores a cada 10 anos corresponde à apresentada na equação 4.3:

$$Custo_{Inversores} = R\$ 82.500,00 \quad (4.3)$$

4.3.4.2 Empresa C

A empresa C apresenta garantia estrutural dos módulos fotovoltaicos de 12 anos, e garantia de performance para 25 anos. A garantia dos inversores, por sua vez, é de 5 anos. Portanto, num cenário pessimista será considerado que os inversores devem ser repostos a cada 10 anos.

Na solução apresentada pela empresa, são contemplados 189 módulos e 9 inversores.

A estimativa de valor para troca dos inversores a cada 10 anos é apresentada na equação 4.4:

$$Custo_{Inversores} = R\$ 93.452,67 \quad (4.4)$$

4.3.5 Retorno financeiro esperado

Todas as propostas comerciais das empresas foram analisadas para um prazo de 30 anos a partir do investimento inicial.

4.3.5.1 Empresa A

Para a análise do retorno financeiro gerado a partir da proposta de projeto da empresa A, partiu-se dos parâmetros iniciais apresentados na tabela 4.15:

TABELA 4.15 – Parâmetros iniciais

Parâmetro	Valor
Investimento inicial	R\$ 339.570,00
Produção média do sistema	R\$ 101.930,40

Fonte: O autor

Além disso, foram levados em consideração os fatores apresentados na tabela 4.16, já descritos na seção 3.4.3:

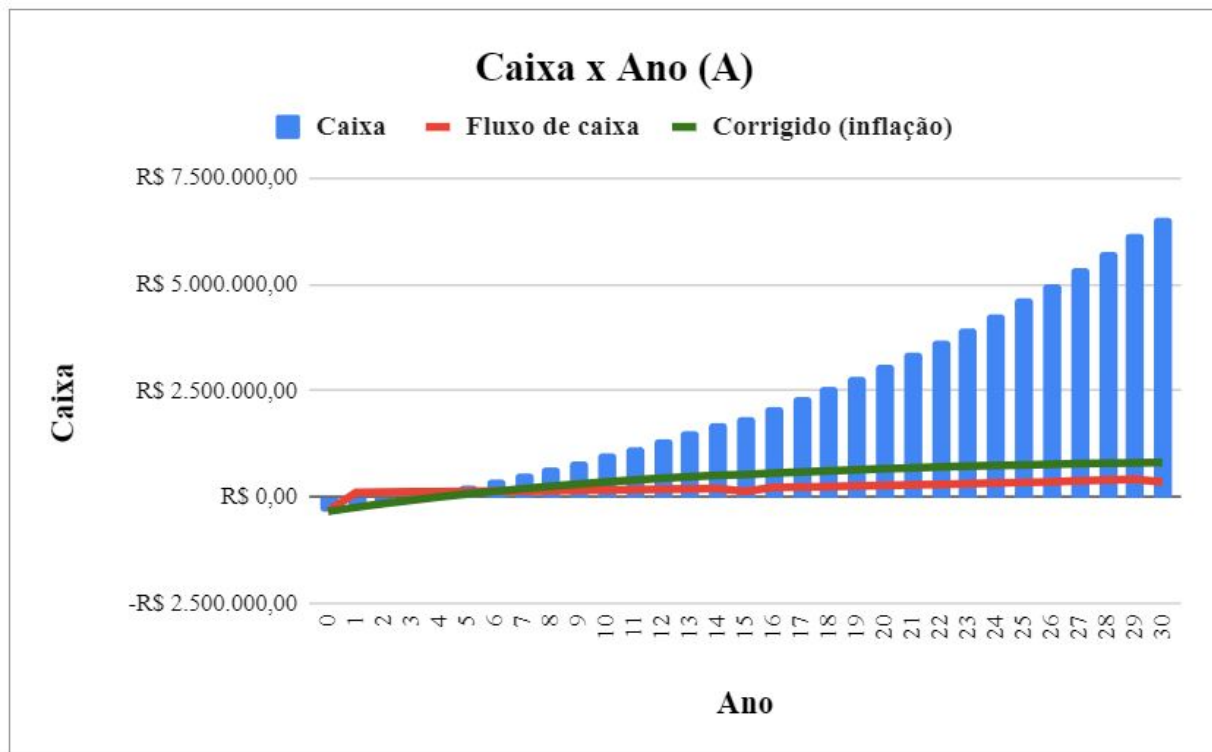
TABELA 4.16 – Fatores considerados (a.a)

Fator	Valor
Taxa de crescimento - Tarifa/kWh	6,00%
Reposição dos inversores (15 anos)	R\$ 82.500,00
Degradação do sistema	1,00%
Taxa de desconto (Selic desde 2000)	13,15%

Fonte: O autor

A partir desses valores e da metodologia da seção 3.4.3, chega-se à projeção de caixa e de variação de fluxo de caixa apresentada na Fig. 4.11:

FIGURA 4.11 – Variação de Caixa e de Fluxo de Caixa, ano após ano, para o investimento no projeto da empresa A



Fonte: O autor

Com isso, o projeto da empresa A apresenta os seguintes parâmetros de viabilidade financeira, exibidos na tabela 4.17:

TABELA 4.17 – Análise de viabilidade (Empresa A)

Indicador	Valor
Soma VPs (Ano 1 a 30)	R\$ 1.153.128,19
VPL do Projeto	R\$ 813.558,19
Taxa Interna de Retorno (TIR)	36%
Taxa de Lucratividade	3,40
Tempo de Payback (anos)	4,01

Fonte: O autor

4.3.5.2 Empresa B

Para a empresa B, a partir dos fatores considerados exibidos nas tabelas 4.18 e 4.19:

TABELA 4.18 – Parâmetros iniciais

Parâmetro	Valor
Investimento inicial	R\$ 355.824,09
Produção média do sistema	R\$ 101.930,40

Fonte: O autor

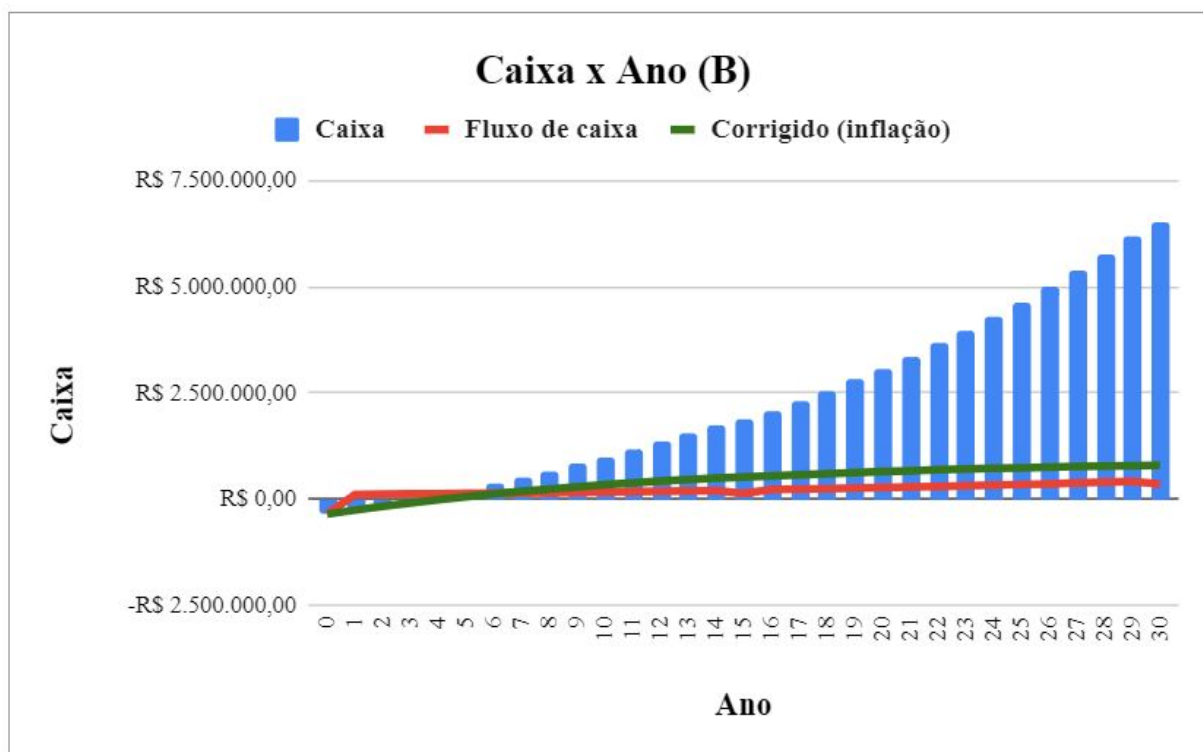
TABELA 4.19 – Fatores considerados (a.a)

Fator	Valor
Taxa de crescimento - Tarifa/kWh	6,00%
Reposição dos inversores (15 anos)	R\$ 82.500,00
Degradação do sistema	1,00%
Taxa de desconto (Selic desde 2000)	13,15%

Fonte: O autor

Chega-se à seguinte projeção de caixa e de variação de fluxo de caixa, apresentada na Fig. 4.12:

FIGURA 4.12 – Variação de Caixa e de Fluxo de Caixa, ano após ano, para o investimento no projeto da empresa B



Fonte: O autor

Com isso, o projeto da empresa B apresenta os parâmetros de viabilidade apresentados na tabela 4.20:

TABELA 4.20 – Análise de viabilidade

Indicador	Valor
Soma VPs (Ano 1 a 30)	R\$ 1.153.128,19
VPL do Projeto	R\$ 797.304,10
Taxa Interna de Retorno (TIR)	35%
Taxa de Lucratividade	3,24
Tempo de Payback (anos)	4,24

Fonte: O autor

4.3.5.3 Empresa C

Para a empresa C, a partir dos fatores considerados nas tabelas 4.21 e 4.22:

TABELA 4.21 – Parâmetros iniciais

Parâmetro	Valor
Investimento inicial	R\$ 353.557,62
Produção média do sistema	R\$ 98.055,36

Fonte: O autor

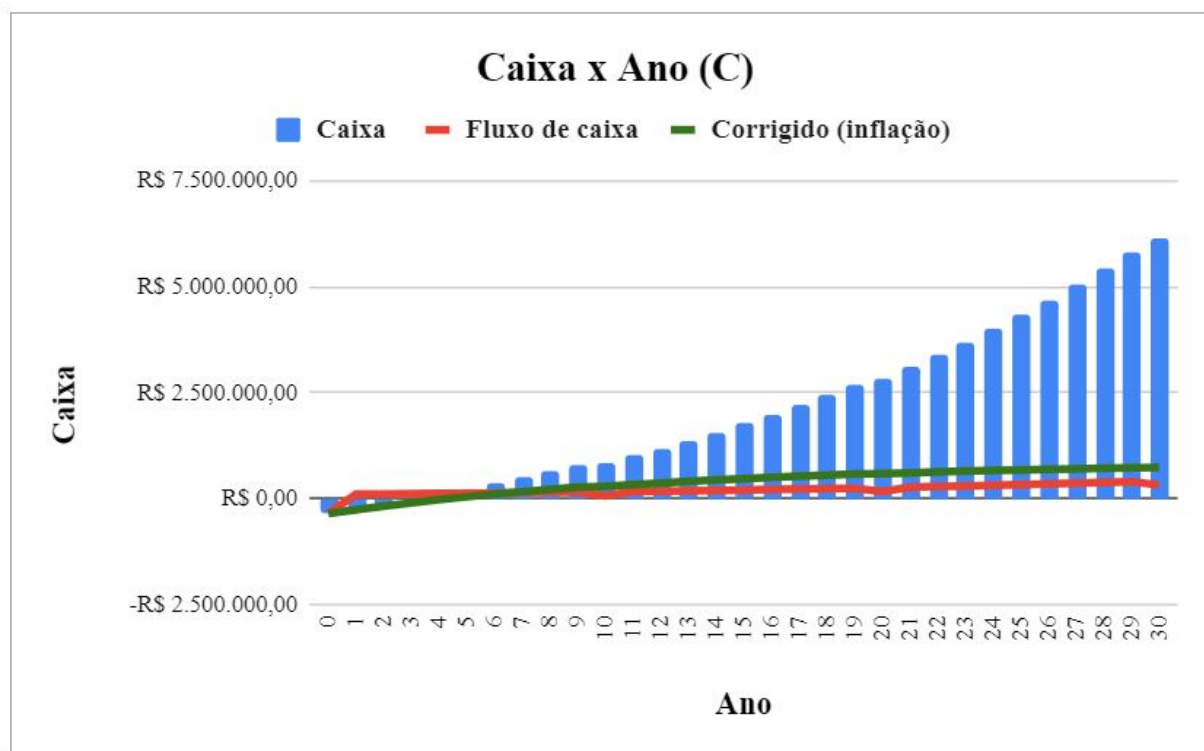
TABELA 4.22 – Fatores considerados (a.a)

Fator	Valor
Taxa de crescimento - Tarifa/kWh	6,00%
Reposição do inversor (10 anos)	R\$ 93.452,67
Degradação do sistema	1,00%
Taxa de desconto (Selic desde 2000)	13,15%

Fonte: O autor

Chega-se à projeção de caixa e de variação de fluxo de caixa apresentadas na Fig. 4.13:

FIGURA 4.13 – Variação de Caixa e de Fluxo de Caixa, ano após ano, para o investimento no projeto da empresa C



Fonte: O autor

Com isso, o projeto da empresa C apresenta os parâmetros de viabilidade explicitados na tabela 4.23:

TABELA 4.23 – Análise de viabilidade (Empresa C)

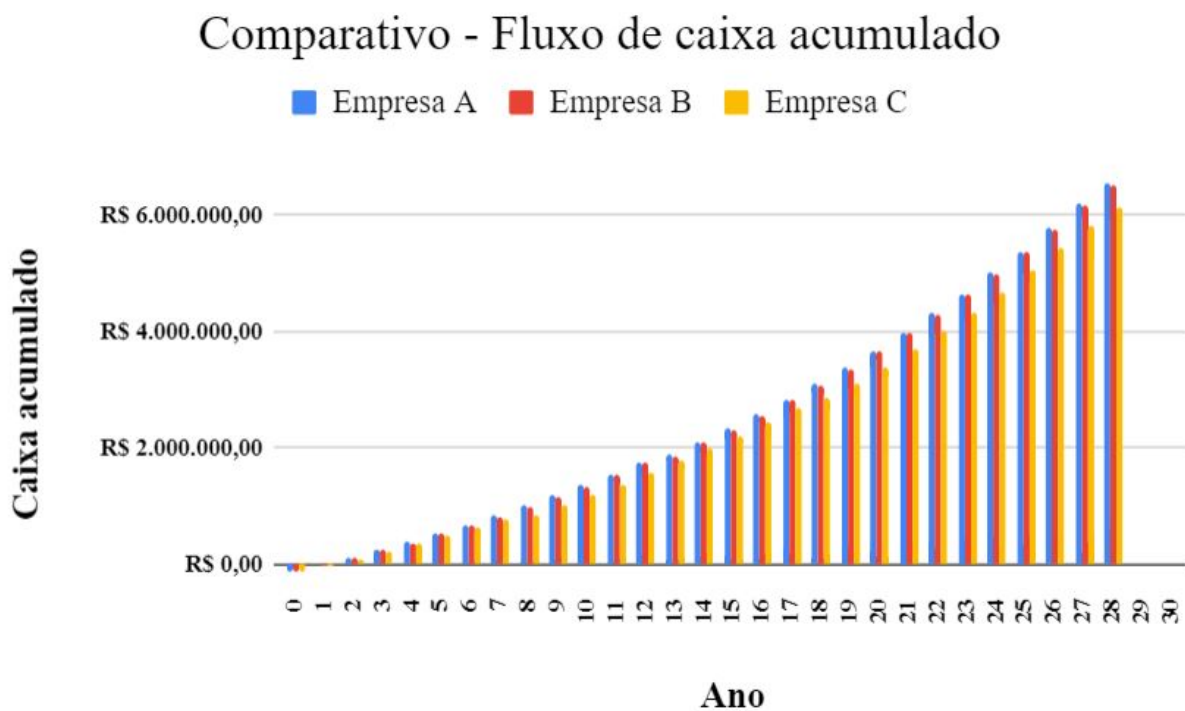
Indicador	Valor
Soma VPs (Ano 1 a 30)	R\$ 1.086.318,66
VPL do Projeto	R\$ 732.761,04
Taxa Interna de Retorno (TIR)	34%
Taxa de Lucratividade	3,072536402
Tempo de Payback (anos)	4,407

Fonte: O autor

4.3.5.4 Comparativo entre empresas

Em resumo, as propostas comerciais apresentadas pelas empresas e as suas viabilidades técnico-econômicas podem ser resumidas na Fig. 4.14 :

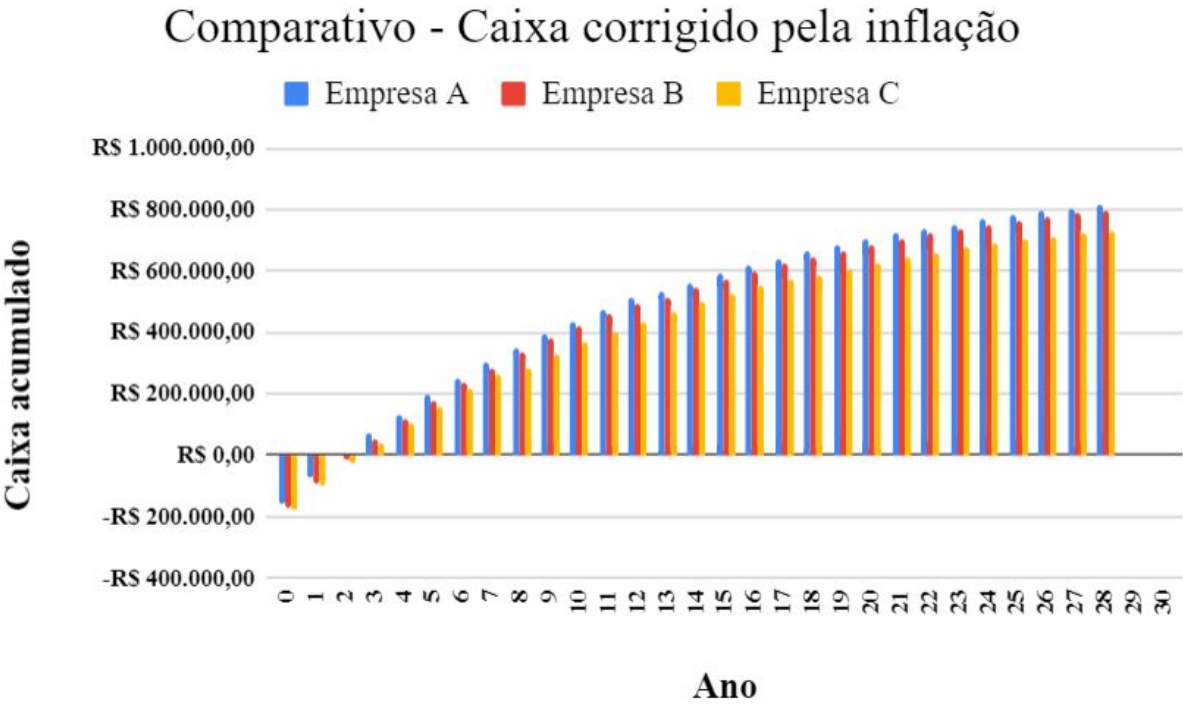
FIGURA 4.14 – Comparativo entre fluxos de caixa acumulados para os projetos das empresas analisadas



Fonte: O autor

Para os fluxos de caixa acumulados corrigidos pelo valor médio de inflação considerado, tem-se o comparativo apresentado na Fig. 4.15:

FIGURA 4.15 – Comparativo entre fluxos de caixa acumulados para os projetos das empresas analisadas - Valores corrigidos pela inflação, a valor presente



• **Comparativo entre métricas de desempenho dos investimentos**

A comparação entre as propostas e o desempenho dos três projetos propostos pelas empresas pode ser resumida através das tabelas 4.24, 4.25 e 4.26:

TABELA 4.24 – Investimento inicial e Produção média (sistema) por Empresa

Empresa	Investimento inicial	Produção média (sistema)
A	R\$ 339.570,00	R\$ 101.930,40
B	R\$ 355.824,09	R\$ 101.930,40
C	R\$ 353.557,62	R\$ 98.055,36
Média	R\$ 353.557,62	R\$ 101.930,40

Fonte: O autor

TABELA 4.25 – TIR e VPL (Projeto) por Empresa

Empresa	TIR	VPL (Projeto)
A	36,37%	R\$ 813.558,19
B	34,92%	R\$ 797.304,10
C	33,59%	R\$ 732.761,04
Média	34,92%	R\$ 781.207,78

Fonte: O autor

TABELA 4.26 – Payback (anos) e Lucratividade por Empresa

Empresa	Payback (anos)	Lucratividade
A	4,01	3,40
B	4,24	3,24
C	4,41	3,07
Média	4,24	3,24

Fonte: O autor

4.3.6 Compensação do projeto em créditos de carbono

Utilizando-se o valor de produção de energia previsto para o bloco H21A, bem como as expressões descritas na seção 3.4.5, chega-se à seguinte estimativa de renda por compensação de créditos de carbono para o sistema solar fotovoltaico previsto para o bloco de projeto, descrita a partir da tabela 4.27:

TABELA 4.27 – Tabela de Compensação de Carbono para o bloco de projeto (H21A)

Indicador	Valor
Produção média anual	130,68 MWh
CO ₂ equivalente	49,17 ton
Crédito de carbono	109,40 R\$
Rentabilidade média	5379,98 R\$/ano

Fonte: O autor

Considerou-se o valor médio do crédito de carbono, dentro do intervalo apresentado na equação 4.5:

$$R\$ 24,31 \leq V_{carbono} \leq R\$ 194,5 \quad (4.5)$$

4.3.7 Rentabilidade do projeto, considerando a compensação de carbono

Considerando-se a rentabilidade decorrente da compensação de carbono, apresentada na seção 4.3.6, pode-se estimar a comparação entre os retornos financeiros para o projeto, considerando-se o melhor cenário, apresentado pela empresa A, com e sem compensação de carbono incluído nos fluxos de caixa (Vide tabela 4.33):

TABELA 4.28 – Análise de Viabilidade com compensação de carbono (Empresa A)

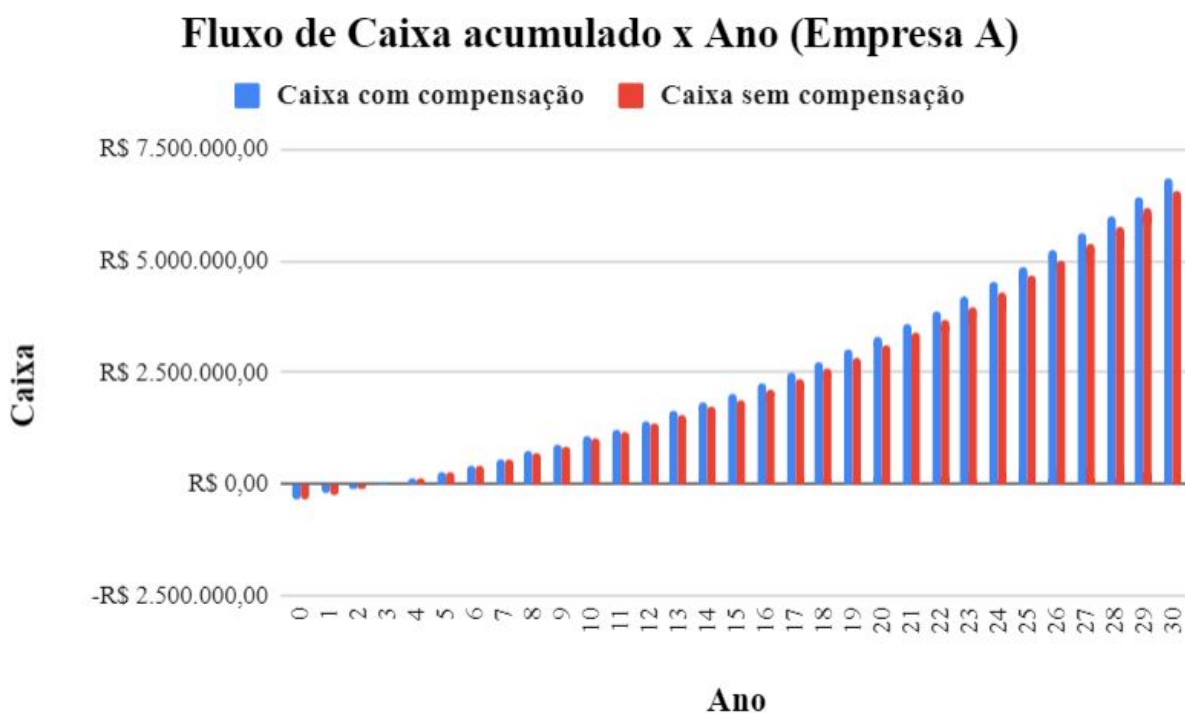
	Sem Compensação	Com Compensação	Variação (%)
Soma VPs (Ano 1 a 30)	R\$ 1.153.128,19	R\$ 1.207.993,39	4,76%
VPL do Projeto	R\$ 813.558,19	R\$ 868.423,39	6,74%
Taxa Interna de Retorno (TIR)	36%	38%	4,00%
Taxa de Lucratividade	3,40	3,56	4,76%
Tempo de Payback (anos)	4,01	3,80	-5,08%

Fonte: o autor

- **Comparativo entre fluxos de caixa acumulados para o projeto, considerando a compensação de carbono:**

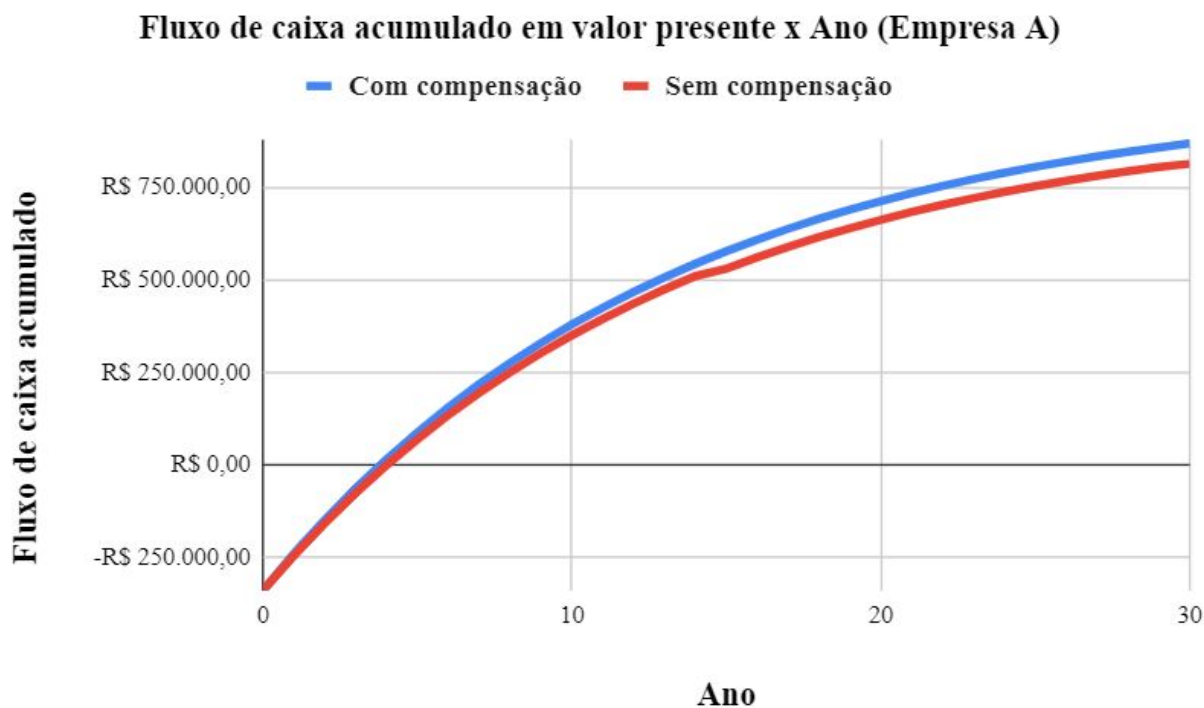
Considerando-se a compensação de emissões de carbono, é possível comparar os fluxos de caixa acumulados com e sem a medida, conforme explicitado nas Fig. 4.16 e Fig. 4.17:

FIGURA 4.16 – Comparativo entre fluxos de caixa acumulados para o projeto da empresa A, com e sem compensação de carbono



Fonte: O autor

FIGURA 4.17 – Comparativo entre fluxos de caixa acumulados, em valor presente, para o projeto da empresa A, com e sem compensação de carbono



Fonte: O autor

4.3.8 Expansão do projeto: do H21A para a vila militar

Para realizar uma estimativa do retorno financeiro do investimento na instalação de módulos fotovoltaicos na vila residencial, serão utilizados os valores orçados anteriormente, extrapolando-os para a totalidade de blocos da vila residencial do DCTA.

Para realizar a extrapolação, será considerada a proposta fornecida pela empresa A, cujos desempenhos e métricas de investimento foram consideradas superiores às demais propostas de projeto.

Com isso, tem-se as demandas de projeto apresentadas na tabela 4.29:

TABELA 4.29 – Tabela de Dados dos Blocos da vila residencial - DCTA

Bloco	Consumo mensal (kWh)	Qtd módulos	Inversores	Produção mensal (kWh)	Área total (m2)	Pot. (kWp)
H09-A	6697	92	23	7590	1177,6	61,18
H09-B	5920	72	18	5940	921,6	47,88
H09-C	5879	72	18	5940	921,6	47,88
H10-B	4768	72	18	5940	921,6	47,88
H10-E	6810	72	18	5940	921,6	47,88
H11-A	8778	108	27	8910	1382,4	71,82
H12-A	3890	48	12	3960	614,4	31,92
H12-B	3904	48	12	3960	614,4	31,92
H12-C	4224	48	12	3960	614,4	31,92
H12-C	4206	48	12	3960	614,4	31,92
H17-B	7851	90	23	7425	1152	59,85
H17-C	8173	108	27	8910	1382,4	71,82
H18-A	6658	93	23	7672,5	1190,4	61,845
H18-B	6942	72	18	5940	921,6	47,88
H18-C	9171	108	27	8910	1382,4	71,82
H19-A	6286	70	18	5775	896	46,55
H19-B	3644	42	11	3465	537,6	27,93
H20-A	6518	76	19	6270	972,8	50,54
H20-B	7394	95	24	7837,5	1216	63,175
H21-A	9642	132	33	10890	1689,6	87,78
H23-A	6055	80	20	6600	1024	53,2
H25-A	3275	36	9	2970	460,8	23,94
H25-B	3438	36	9	2970	460,8	23,94
H25-C	4143	52	13	4290	665,6	34,58
H25-D	3505	44	11	3630	563,2	29,26
H26-A	6734	72	18	5940	921,6	47,88
H27-A	7633	96	24	7920	1228,8	63,84
H27-B	6709	72	18	5940	921,6	47,88
H27-C	8239	96	24	7920	1228,8	63,84
H27-D	7579	96	24	7920	1228,8	63,84
H27-E	6252	72	18	5940	921,6	47,88
H30-A	8660	90	23	7425	1152	59,85
H30-B	11099	136	34	11220	1740,8	90,44
H30-C	10457	136	34	11220	1740,8	90,44
H30-D	10866	132	33	10890	1689,6	87,78

Fonte: O autor

4.3.8.1 Especificações do projeto para a vila residencial:

Para esse sistema, são necessários os parâmetros de projeto apresentados na tabela 4.30:

TABELA 4.30 – Parâmetros de projeto para a usina solar da vila residencial

Parâmetro	Valor
Qtd. módulos	2812
Qtd. inversores	705
Produção mensal (kWh)	231990
Produção anual (kWh)	2783880
Produção anual (R\$)	R\$ 2.171.426,40
Área total	35993,6
Pot. sistema (kWp)	1869,98

Fonte: O autor

4.3.8.2 Análise do retorno financeiro para o projeto da vila:

Com os fatores considerados nas tabelas 4.31 e 4.32 para realização do projeto:

TABELA 4.31 – Fatores Considerados

Fator	Valor
Taxa de crescimento - Tarifa/kWh	6,00%
Reposição dos inversores (15 anos)	R\$ 1.762.500,00
Degradação do sistema	1,00%
Taxa de desconto (Selic desde 2000)	13,00%

Fonte: O autor

TABELA 4.32 – Parâmetros Iniciais

Parâmetro	Valor
Investimento inicial	R\$ 8.437.800,00
Produção média do sistema (R\$/ano)	R\$ 2.171.426,40

Fonte: O autor

Chega-se ao resultado de análise de viabilidade para o projeto expandido apresentado na tabela 4.33:

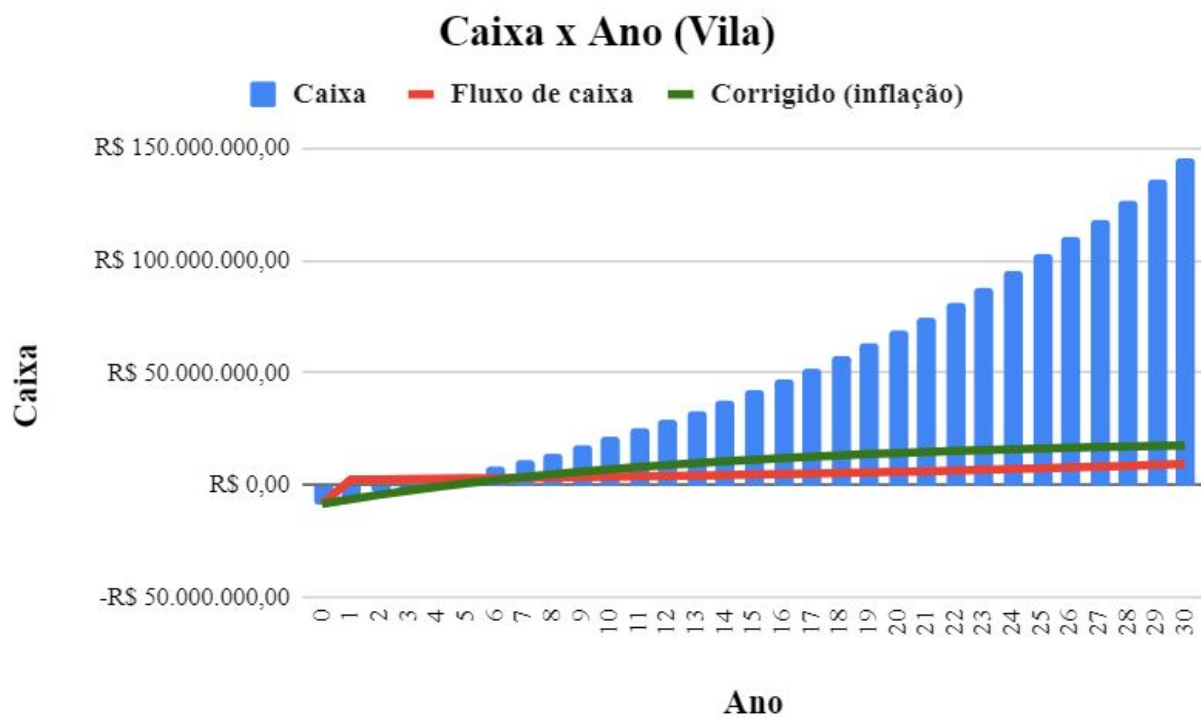
TABELA 4.33 – Análise de Viabilidade (Vila Residencial - DCTA)

	Sem Compensação	Com Compensação	Variação (%)
Soma VPs (Ano 1 a 30)	R\$ 24.883.774,12	R\$ 26.086.220,83	4,83%
VPL do Projeto	R\$ 16.445.974,12	R\$ 17.648.420,83	7,31%
Taxa Interna de Retorno (TIR)	32%	33%	3,64%
Taxa de Lucratividade	2,95	3,09	4,83%
Tempo de Payback (anos)	4,82	4,54	-5,62%

Fonte: O autor

A evolução do fluxo de caixa acumulado e em valor presente pode ser visualizado a partir da Fig. 4.19:

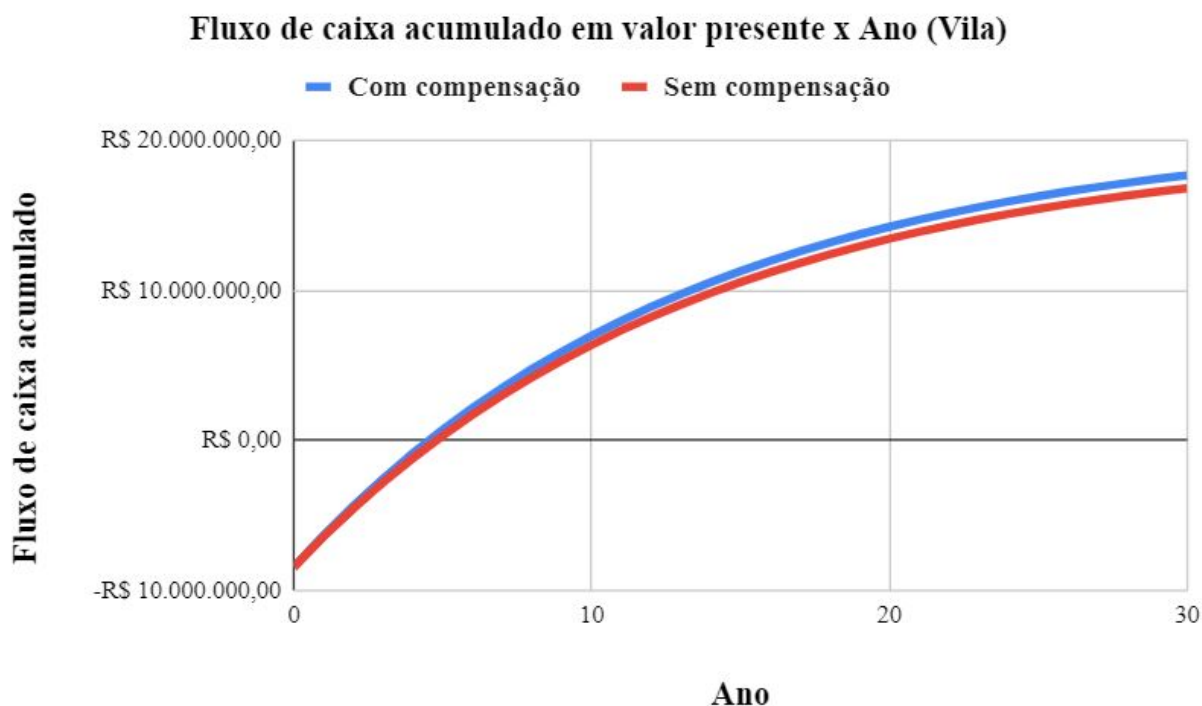
FIGURA 4.18 – Comparativo entre fluxos de caixa acumulados para o projeto da empresa A, com e sem compensação de carbono



Fonte: O autor

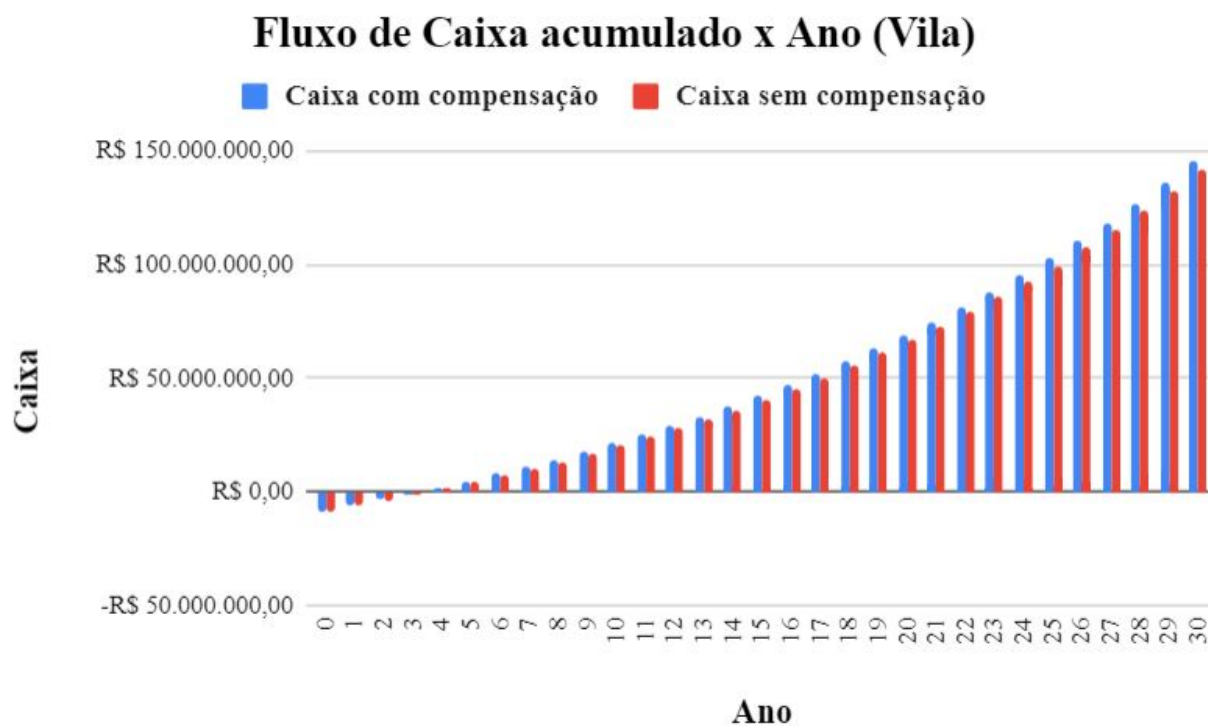
Levando-se em consideração a rentabilidade oriunda da compensação de emissões de carbono, tem-se os resultados apresentados nas figuras 4.19 e 4.20:

FIGURA 4.19 – Comparativo entre fluxos de caixa acumulados para o projeto da empresa A, com e sem compensação de carbono



Fonte: O autor

FIGURA 4.20 – Comparativo entre fluxos de caixa acumulados para o projeto da empresa A, com e sem compensação de carbono



Fonte: O autor

5 Conclusão

A partir do exposto ao longo do corpo deste trabalho, entende-se que o projeto proposto para a instalação de placas fotovoltaicas na vila residencial do DCTA mostrou-se tecnicamente e financeiramente viável, com boas expectativas de retorno a partir da sua implementação.

O projeto mostrou-se particularmente interessante do ponto de vista financeiro, com altos retornos no período de projeto considerado em diferentes cenários, sendo possível obter um rendimento ainda superior, a depender das variáveis econômicas nos anos futuros e da capacidade do DCTA, enquanto órgão público, negociar taxas de atratividade financeira mais interessantes que o valor da Selic.

Além disso, o projeto é muito importante do ponto de vista ambiental, contribuindo para a inclusão das Forças Armadas na vanguarda nacional em busca de implementação de sistemas sustentáveis. Nesse sentido, encontra-se alinhado com as tendências modernas de mercado, dentro da abordagem ESG e, por fim, mostrou-se interessante do ponto de vista estratégico, uma vez que uma maior autonomia em relação ao abastecimento de energia interna é interessante para instituições que desenvolvem pesquisa e que atuam visando a promoção da Defesa Nacional.

Como próximos passos a serem adotados a partir da proposta deste projeto, recomenda-se uma confecção de laudo estrutural dos blocos analisados para o projeto, a fim de entender se as estruturas de telhado são capazes de suportar os módulos fotovoltaicos e os sistemas a eles atrelados, bem como o estudo da possibilidade de distribuir os painéis sobre o solo, compondo uma usina fotovoltaica terrestre, sem a necessidade de instalação dos módulos nos telhados dos blocos residenciais.

Recomenda-se ainda o estudo da regulamentação fiscal e legislativa atrelada à viabilização do projeto, bem como o estudo orientado à entrada do DCTA no Mercado Livre de Energia, medida que tem o potencial de reduzir os valores gastos com o consumo de energia no Departamento, o que pode ser utilizado, inclusive, para financiamento do projeto proposto neste trabalho.

Referências

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Índices de reajuste das tarifas residenciais - Relatório síntese da ANEEL**. 2023. Acessado em: 12 nov. 2023. Available at: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/relatorios-e-indicadores/tarifas-e-informacoes-economico-financeiras>.

Bosch Group. **Installation and Safety Manual for the c-Si M60 NA 30119 Family of Crystalline Photovoltaic Modules**. [S.l.], 2011.

Canadian Solar. **Título da Página**. 2023. Acesso em: 04 nov. 2023. Available at: <https://www.csisolar.com/br/bihiku7/>.

Cordeiro Energia. **Os Créditos de Carbono e a Energia Solar**. 2023. Acessado em: 15 nov. às 12:55. Available at: <https://cordeiroenergia.com.br/os-creditos-de-carbono-e-a-energia-solar/>.

EIB Project Carbon Footprint Methodologies: Methodologies for the assessment of project greenhouse gas emissions and emission variations. [S.l.], Janeiro 2023. Versão 11.3, Janeiro de 2023.

EMBER CLIMATE. **Carbon Price Tracker**. Acessado em 15 de nov. de 2023. Available at: <https://ember-climate.org/data/data-tools/carbon-price-viewer/>.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Balanco Energético Nacional 2022**. Rio de Janeiro, 2022. Acesso em: data do acesso. Available at: <URL de onde o documento foi acessado>.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS (FGV). **Observatório de Bioeconomia da Fundação Getúlio Vargas**. Acessado em 15 de nov. de 2023. Available at: <https://eesp.fgv.br/block-views-publicacoes-bloco-block>.

GITMAN, L. J. **Princípios de Administração Financeira**. 12. ed.. ed. São Paulo: Pearson, 2010. 775 p. ISBN 9788576053323.

Governo Brasileiro. **Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)**. 2023. Acessado em 15 de nov. às 12:58. Available at: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/cgcl/paginas/teste2>.

Governo Brasileiro. **Sistema de Registro Nacional de Emissões (SIRENE)**. 2023. Acessado em 15 de novembro de 2023. Available at: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/cgcl/paginas/sistema-de-registro-nacional-de-emissoes-sirene>.

International Energy Agency. **World Energy Outlook 2022**. Paris, 2022.

MAGALHÃES, J. T. S. **Estudo de Viabilidade Econômica de um Sistema Fotovoltaico Conectado a Rede de Média Tensão para um Consumidor em Fortaleza - CE**. Dissertation (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará - UFC, 2017.

PHB Solar. **Manual de Instalação da Estrutura Metálica da PHB Solar**. 2023. Acessado em: 05 nov. 2023. Available at: <https://www.energiasolarphb.com.br/produto/estrutura-phb-solar-para-telhado-fibrocimento/>.

PROENÇA, E. D. **A Energia Solar Fotovoltaica em Portugal**. Dissertation (Dissertação de Mestrado) — Instituto Superior Técnico, 2007. Available at: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395137487931/Tese - A Energia Solar Fotovoltaica em Portugal.pdf>.

ROSS, S. A.; JAFFE, J. F.; WESTERFIELD, R. W.; LAMB, R. **Fundamentos de Administração Financeira**. 9. ed.. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. 782 p. ISBN 9788580552249.

STOCKER, T.; QIN, D.; PLATTNER, G.-K.; ALEXANDER, L.; ALLEN, S.; BINDOFF, N.; BRÉON, F.-M.; CHURCH, J.; CUBASCH, U.; EMORI, S.; FORSTER, P.; FRIEDLINGSTEIN, P.; GILLET, N.; GREGORY, J.; HARTMANN, D.; JANSEN, E.; KIRTMAN, B.; KNUTTI, R.; KUMAR, K. K.; LEMKE, P.; MAROTZKE, J.; MASSON-DELMOTTE, V.; MEEHL, G.; MOKHOV, I.; PIAO, S.; RAMASWAMY, V.; RANDALL, D.; RHEIN, M.; ROJAS, M.; SABINE, C.; SHINDELL, D.; TALLEY, L.; VAUGHAN, D.; XIE, S.-P. Technical summary. *In*: STOCKER, T.; QIN, D.; PLATTNER, G.-K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S.; DOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V.; MIDGLEY, P. (Ed.). **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2013. p. 33–115. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

United Nations. **United Nations Framework Convention on Climate Change**. 2005. Documento da Convenção. Disponível em: <https://unfccc.int/>.

VARUN; PRAKASH; BHAT. **Energy, Economics and Environmental Impacts of Renewable Energy Systems**. Local de publicação (se disponível): Editora (se disponível), 2009.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2012.

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO TC	2. DATA 16 de novembro de 2023	3. DOCUMENTO Nº DCTA/ITA/TC-100/2023	4. Nº DE PÁGINAS 94
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Análise da viabilidade técnico-econômica da instalação de placas fotovoltaicas para abastecimento de energia elétrica na Vila Residencial do DCTA			
6. AUTOR(ES): Lucas da Silva Sousa			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Energia Solar; Sustentabilidade; Viabilidade Técnico-Econômica; Autonomia Energética; Eficiência Financeira; Vila Residencial Militar; Compensação de Carbono; Redução de Emissões; Projeto Piloto; Análise de Retorno Financeiro; Impacto Ambiental; Independência Energética; Implementação de Tecnologias Verdes; Departamento de Ciência e Tecnologia da Aeronáutica (DCTA); Energia Limpa.			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Energia solar; Energia elétrica; Células fotovoltaicas; Sustentabilidade; CTA(São José dos Campos); Estudos de viabilidades; Eficiência econômica; Fontes alternativas de energia; Engenharia elétrica.			
10. APRESENTAÇÃO: (X) Nacional () Internacional ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica. Orientador: Prof. Dr. Wilson Cabral de Sousa Júnior; coorientador: 1º Ten Davi Santana Santos. Publicada em 2023.			
11. RESUMO: O presente estudo propõe uma análise abrangente da viabilidade técnico-econômica relacionada à instalação de módulos fotovoltaicos na vila residencial do Departamento de Ciência e Tecnologia da Aeronáutica (DCTA). O objetivo principal é alcançar uma produção de energia mais limpa e sustentável, promovendo eficiência financeira no ecossistema energético e ampliando a autonomia do Departamento em relação ao fornecimento interno de energia. A pesquisa inicia-se com a avaliação dos custos de instalação do sistema em um bloco piloto, expandindo posteriormente a análise para abranger toda a vila militar do DCTA. Nesse contexto, são considerados os custos estimados e orçados em parceria com três empresas distintas, com o intuito de fornecer uma base sólida para as projeções financeiras. Além disso, a pesquisa inclui uma análise detalhada do retorno financeiro derivado da implementação do projeto, destacando os benefícios econômicos tangíveis. Além dos aspectos econômicos, o estudo incorpora uma análise dos impactos ambientais positivos resultantes da redução na emissão de carbono. A quantificação desses benefícios ambientais proporciona uma visão abrangente do papel do projeto na mitigação das mudanças climáticas e na promoção da responsabilidade ambiental. Ao abordar tanto os aspectos econômicos quanto os ambientais, este trabalho oferece uma análise holística da implementação de módulos fotovoltaicos na vila residencial do DCTA, destacando não apenas os benefícios financeiros imediatos, mas também a contribuição para um futuro mais sustentável e resiliente em termos energéticos.			
12. GRAU DE SIGILO: (X) OSTENSIVO () RESERVADO () SECRETO			